第一部分 知识要点题型汇总

第一章 运动的描述

第一部分 基础知识点

第 1 节 质点 参考系

1.机械运动

(1)定义：物体的空间位置随时间的变化叫机械运动。简称运动。机械运动是自然界中最简单、最基本的运动形态。

(2)分类：①机械运动按形式分为平动、转动、振动。

②按轨迹分为直线运动和曲线运动。

2.质点

(1)定义：用来代替物体的有质量的点。

(2)条件：物体的大小和形状对研究问题的影响可以忽略不计。

【注意】 **不以大小论质点。**物体能否看成质点不论大小、不看轻重。很小、很轻的物体有时不能看成质点，很大、很重的物体有时能看成质点，主要看对研究问题有无影响。一般而言平动的物体通常可视为质点，有转动的物体，但相对平动而言，如果转动可以忽略时，也可以视为质点。

(3)实质：质点是一种理想化的模型，实际并不存在。

3.参考系

（1）运动的绝对性和相对性

绝对性	运动是绝对的，任何物体都在不停地运动着	
相对性	参考系不同，对同一物体运动的观测结果可能不同	列车中的乘客可以选择车厢或地面为参考系
		同向同速运动的两人，可以选地面为参考系，也可选另一人为参考系

【注意】当两物体角速度相同而线速度不同时（即同轴转动），则两物体保持相对静止。

(2)**参考系**：在描述物体的运动时，用来做参考、假定不动的物体。

(3)参考系的选择原则。

选取原则	内容
任意性原则	参考系的选取是任意的。对于同一物体的运动，选取的参考系不同，对物体运动的描述就可能不同，物体运动情况的描述并不唯一
简单、方便原则	在实际问题中，参考系的选取应以研究问题方便、对运动的描述尽可能简单为基本原则。我们常选取地面或相对于地面静止的物体做参考系
同一性原则	当比较不同物体的运动时，必须选取同一个参考系

【特别提醒】

无论物体原来的运动状态如何，一旦这个物体被选为参考系，就认为它是静止的，不能认为只能选择静止的物体做参考系。且注意不能选择研究对象本身做参考系。

第 2 节 时间 位移

1.时刻和时间间隔

（一）时刻：时刻指的是某一瞬间，在表示时间的数轴上用点表示【时刻是状态量】。

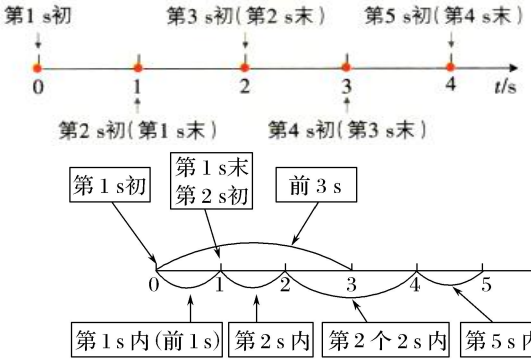
（二）时间间隔：时间间隔是两个时刻之间的间隔，在表示时间的数轴上用线段表示【时间间隔是过程量】。

（三）时刻与时间间隔的关系

(1)用 t_1 和 t_2 分别表示两个时刻，Δt 表示两时刻之间的时间间隔，则 $\Delta t=t_2-t_1$。

(2)时刻与物体在运动过程中的某一位置相对应，反映物体的运动状态；时间间隔与某一段路程（或位移）相对应，描述物体的运动过程。

（四）关系图：



【注意区分】4S 末、4S 内、第 4S、4S 初、前 4S。

【特别提醒】

(1)平时所说的“时间”，有时指的是时刻，有时指的是时间间隔，要根据上下文认清它的含义。

(2)利用时间轴可以明确时刻和时间间隔的区别和联系。当时间轴上的两个点无限靠近时，它们间的时间间隔就会趋于 0，时间间隔就变成时刻。

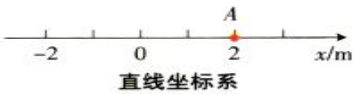
(3)时间间隔展示一个运动过程，好比一段录像；时刻代表运动的一瞬间，好比一张照片。

2.位置和位移

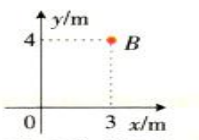
（1）坐标系

①作用：为了定量地描述物体的位置及位置变化，需要在参考系上建立适当的坐标系，这样就可以应用数学工具来研究物体的运动。

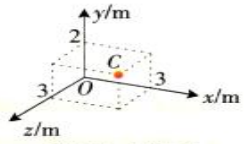
②三种常见的坐标系



直线坐标系



平面直角坐标系



三维直角坐标系

其中 A 的位置 x=2m，B 的位置（3m,4m),C 的位置（3m,2m,3m)

（2）路程：物体运动实际轨迹的长度。

（3）位移：描述物体位置变化的物理量，可用由初位置指向末位置的有向线段表示。

【注意】位移只表示位置的变动，与运动路径无关，而路程与运动路径有关。

（4）位移和路程的区别与联系：

位移	表示质点的位置变动，它是由质点初位置指向质点末位置的有向线段
路程	质点运动轨迹的长度
区别	①位移是矢量，方向由初位置指向末位置 ②路程是标量，没有方向。
联系	①在单向直线运动中，位移的大小等于路程。 ②其他情况下，位移的大小小于路程。

3.矢量和标量

（一）矢量：既有大小又有方向的物理量。如位移、力、速度、加速度、电场强度、磁感应强度等等。运算时遵循平行四边形定则。

（二）标量：只有大小没有方向的物理量。如路程、质量、时间、电流、功、磁通量、电势（能）等等。运算时遵循算术运算法则。

（三）矢量的特点

（1）矢量的表示：用带箭头的线段表示，线段长度表示矢量大小，箭头方向即矢量的方向。

（2）矢量的大小比较：矢量大小只看其绝对值大小，绝对值大则矢量大，其正负只是表示方向。标量大小比较，一般看实际值，但比较功的大小应比较其绝对值。

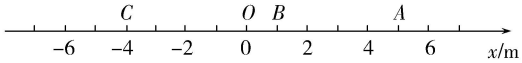
（3）矢量运算法则：平行四边形定则。

【提醒】

矢量的正负表示方向，但有方向或正负的量不一定是矢量，如电流、磁通量、功等为标量。矢量正负与标量正负含义不同。**区别标量和矢量不只看是否有方向或正、负号,关键看运算是否遵循平行四边形定则。**

4.直线运动的位移

(1)用两个坐标的差值即$\Delta x=x_2-x_1$表示位移. Δx 的数值表示位移大小，Δx 为正，表示位移方向与正方向相同；Δx 为负，表示位移方向与正方向相反.



(2)在直线坐标系中，选择不同的坐标原点，各点的位置坐标不同，但两点间位移相同，即位移与坐标原点的选取无关.

5.位移一时间图像（X-t 图像）

(1)定义:在直角坐标系中选时刻 t 为横轴,选位置 x 为纵轴,其上的图线就是位置—时间图像。如果将物体运动的初始位置选作坐标原点 O,则位置与位移大小相等($x=\Delta x$),位置—时间图像就成为位移—时间图像,又称 x-t 图像。

(2)对 x-t 图像的理解　从 x-t 图像可以直观地看出物体在不同时间内的位移。

①x-t 图像不是物体的运动轨迹。

②x-t 图像反映了做直线运动的物体的位移随时间变化的规律。

③x-t 图像只能描述物体做直线运动的情况,这是因为 x-t 图像只能表示位移的两个方向,即 t 轴上方的图线表示位移沿正方向,t 轴下方的图线表示位移沿负方向。

④x-t 图像中的交点表示物体相遇。

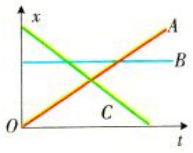
⑤x-t 图像的斜率表示速度,斜率的大小表示速度大小,斜率的正负表示速度方向。

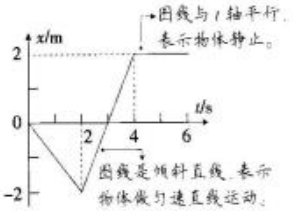
（3）图例分析：

a. A 图线斜率大于 0,表示物体沿正方向运动。

b. B 图线斜率等于 0,表示物体静止。

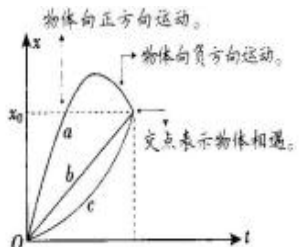
c. C 图线斜率小于 0,表示物体沿负方向运动。





(1)位移:2~4 s 内物体运动的位移是 4 m。

(2)速度:0~2 s 内,$v=\frac{\Delta x}{\Delta t}=-1$ m/s,方向为负;2~4 s 内,$v=\frac{\Delta x}{\Delta t}=2$ m/s,



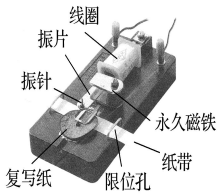
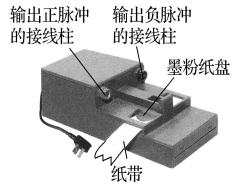
0~t_0 时间内,位移 $x_a=x_b=x_c$,路程 $s_a>s_b=s_c$。

【特别注意】　① $x-t$ 图像只能描述直线运动

② $x-t$ 图像不表示物体运动的轨迹

6.位移和时间的测量

（1）**两种打点计时器**

	电磁打点计时器	电火花计时器
结构图示		
工作电压	4~6 V 的交流电	220 V 交流电
打点周期	0.02 s	0.02 s
实验误差	振针和纸带接触会影响纸带运动，阻力较大，误差较大	火花放电不会影响纸带运动，阻力小，误差较小
记录信息	位置、时刻或位移、时间	

(2)使用打点计时器的注意事项

①实验前,应将打点计时器固定好,以免拉动纸带时晃动。

②使用电磁打点计时器时,应让纸带穿过限位孔,压在复写纸下面;使用电火花打点计时器时,应让纸带从墨粉纸盘下方穿过。

③使用打点计时器时,应先接通电源,待打点计时器打点稳定后,再拉动纸带。

④打点计时器不能连续工作太长时间,打点完毕后应立即关闭电源。

【注意】电磁打点计时器必须配学生电源（变压器）一起使用

(3)电磁打点计时器使用过程中的常见现象和调节方法。

现象	原因	调节方法
打点不清晰	①振针过高 ②所加电压过低,使振幅过小 ③复写纸太旧	①把振针适当调低 ②调高电压 ③换新的复写纸
打的不是点,是短线	①振针过低 ②所加电压太高,使振幅过大	①把振针适当调高 ②适当调低电压
打双点	振针松动	把振针固定

第 3 节　位置变化快慢的描述------速度

一、速度

1.定义：物体的位移与发生这段位移所用时间的比值（比值定义法）。

2.定义式：$v=\frac{\Delta x}{\Delta t}$【V 与ΔX 和Δt 无关】

3.物理意义：速度是描述物体运动快慢的物理量，也可以说是描述物体位置变化快慢的物理量。速度越大，表示物体运动越快。

4 方向：速度是矢量，速度的方向就是物体运动的方向，与位移方向相同。

5.　单位：在国际单位制中为 m/s ，常用单位还有 km/h。

1 m/s=3.6km/h.

【注意】比较两个速度是否相同，必须考虑其大小和方向是否都相同。比较两个速度的大小时只需比较其绝对值。

二、平均速度和瞬时速度

区别	平均速度是过程量，是矢量。表示物体在某段时间或某段位移内的平均运动快慢程度
	瞬时速度是状态量，表示物体在某一时刻或某一位置的运动快慢程度
联系	瞬时速度是运动时间Δt→0 时的平均速度，体现了极限的思想方法，例如光电门求瞬时速度就体现了此种方法。

三、平均速度和平均速率的比较

物理量 项目		平均速度	平均速率
区别	定义	平均速度=$\frac{位移}{时间}$	平均速率=$\frac{路程}{时间}$
	标矢性	矢量	标量
	物理意义	粗略描述物体位置变化的快慢	粗略描述物体运动的快慢
联系		都是粗略描述物体运动情况的物理量	
		表达式都可写成$\overline{v}=\frac{x}{t}$的形式，但注意“x”的意义不同	
		平均速度的大小不大于平均速率；只有在单方向直线运动中，平均速度的大小才等于平均速率	

四、速率：瞬时速度的大小，是标量。

【速度为矢量，等于位移除以时间；速率是标量，等于路程除以时间，同时要注意限速（瞬时速率）与区间测速（平均速率）的区别】汽车速度计不能显示车辆运动的方向，它的示数实际是表示汽车的速率。

【注意】

(1)平时所说的速度是平均速度还是瞬时速度，要根据上下文判断。

(2)瞬时速度始终为0，说明物体静止，平均速度为0的物体不一定静止。

(3)瞬时速度大，平均速度不一定大。反之，平均速度大的物体瞬时速度也不一定大。

速度与速率的区别

	速度	速率
物理意义	描述物体运动快慢和方向的物理量，是矢量	描述物体运动快慢的物理量，是标量
决定因素	平均速度由一段位移和一段时间决定	由瞬时速度大小决定
方向	平均速度方向与位移方向相同；瞬时速度方向为该点的运动方向	无方向
联系	它们的单位相同，速度的大小等于速率	

（4）求平均速度时，中间停留的时间要算进去。

（5）区分一半时间和一半位移的平均速度的不同

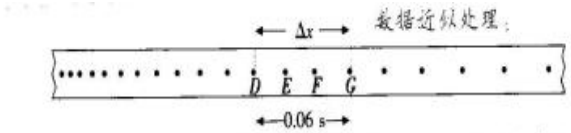
五、测量纸带的平均速度和瞬时速度

(1)测量平均速度：在纸带上选取两个点，测出两点间的位移 Δx 和所用的时间 Δt，则 $v=\frac{\Delta x}{\Delta t}$ 是纸带在这段时间内的平均速度。

(2)测量瞬时速度：Δt 很短时，用 $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ 求出的平均速度可以代表物体在 Δx 范围内某点的瞬时速度，并且 Δt 越短，平均速度越接近于该点的瞬时速度。

例如利用光电门测瞬时速度。

【计算瞬时速度】

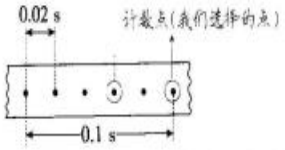


点 E 的瞬时速度可以近似地用包含 E 点在内的两点间的平均速度表示，$v_E\approx\overline{v}_{DG}$ 或 $v_E\approx\overline{v}_{DF}$。包含 E 点在内的间隔取得越小，算出的平均速度越接近于 E 点的瞬时速度。但两点间距离太小会增大测量误差，所以要根据需要和仪器情况，在要测量的点附近选取合适的位移及对应时间。

(3)注意区分计时点和计数点

①计时点：计时器实际打的点，若电源频率为 50 Hz，两计时点间的时间间隔为 0.02 s。

②计数点：人为选定的计时点，若电源频率为 50 Hz，两计数点间的时间间隔为 0.02n s（每 n 个计时点取一个计数点时）。



通常每隔 4 个计时点选取一个计数点（或者说每 5 个计时点选取一个计数点），则 n=5，相邻计数点间的时间间隔 T=5×0.02 s=0.1 s。

六、速度一时间图像（v-t 图像）

(1)图像意义：v —t 图像反映了运动物体的速度随时间变化的关系.

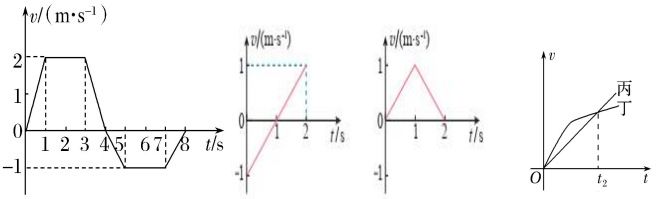
(2)斜率意义：v —t 图像的斜率反映运动物体的加速度.

①斜率的大小表示加速度的大小.

②斜率的正负表示加速度的方向.

(3)v—t 图像的应用(通过图像，可以明确以下信息)

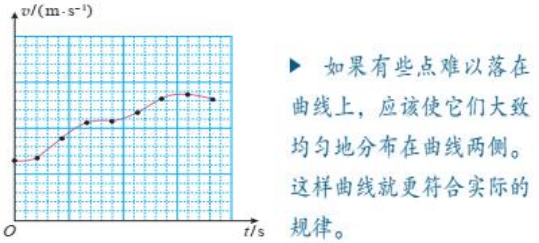
图像上某点的纵坐标	正、负号	表示瞬时速度的方向
	绝对值	表示瞬时速度的大小
图像的斜率	正、负号	表示速度增加还是减小
图像与坐标轴的交点	纵截距	表示初速度
	横截距	表示开始运动或速度为零的时刻
两图线的交点	表示速度相等	
图像与横轴所围图形的面积	表示位移，面积在横轴上方时位移为正值，在横轴下方时位移为负值	



特别注意：①v-t 图像只能描述直线运动

②v-t 图像不表示物体运动的轨迹。

用一条平滑的曲线来描出这些点，曲线所反映的情况就会与实际更加接近。



七、限速与区间测速

1.全程区间限速：是指在某一路段上对车辆的瞬时速率的限

制．说明有限速，但过程中不一定有测速．

2.**全程区间测速**：是指在同一路段上布设两个相邻的测速点，通过测量车辆经过前后两个测速点的时间来计算车辆在该路段行驶的平均速率，并依据该路段上的限速标准判定车辆是否超速．简单来说就是：

区间速率＝区间长度÷运行时间





第 4 节　速度变化快慢的描述-----加速度

1.加速度

（1）**定义：物体速度的变化量与发生这一变化所用时间的比值。**

（2）**定义式：**$a=\frac{\Delta v}{\Delta t}$，单位为 m/s^2。

（3）**物理意义：**描述物体速度变化快慢的物理量。

（4）**矢量性：**加速度为矢量，其方向与速度变化量的方向相同，由物体受到的合力方向决定。

【注意】速度变化快慢、速度变化率、加速度三者含义相同，速度变化快，也就是速度变化率大，加速度大。

速度、速度变化量与加速度的比较

	速度	速度变化量	加速度
物理意义	描述物体运动快慢和方向的物理量，是状态量	描述物体速度改变大小程度的物理量，是过程量	描述物体速度变化快慢和方向的物理量，是状态量
定义式	$v=x/t$ 或 $v=\Delta x/\Delta t$	$\Delta v=v_t-v_0$	$a=\frac{v_t-v_0}{t}$ 或 $a=\Delta v/\Delta t$
单位	m/s	m/s	m/s^2
决定因素	v 的大小由 x 与 t 决定	Δv 由 v_t 与 v_0 决定，而且 $\Delta v=a\cdot\Delta t$，也由 a 与 Δt 决定	a 不是由 v、Δt、Δv 来决定的，a 由 F 与 m 决定
方向	与位移 x 或 Δx 同向	由 $\Delta v=v_t-v_0$ 或 $\Delta v=a\cdot\Delta t$ 决定方向	与 Δv 方向一致，而与 v_0、v_t 方向无关
大小	①位移与时间的比值；②位移对时间的变化率；③$x-t$ 坐标系中曲线上该点切线的斜率大小	$\Delta v=v_t-v_0$	①速度对时间的变化率；②速度改变量与所用时间的比值；③$v-t$ 曲线上该点切线的斜率大小

2.判断加速运动与减速运动的方法

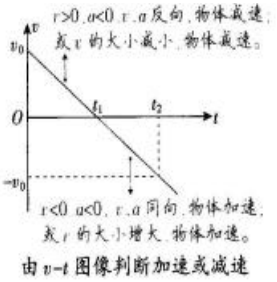
（1）根据 a 和 V_0 的关系判断

$$a\text{ 和 }v_0\text{ 同向}\xrightarrow[(\Delta v>0)]{\text{加速运动}}\begin{cases}a\text{ 恒定},v\text{ 均匀增加}\\a\text{ 增加},v\text{ 增加变快}\\a\text{ 减小},v\text{ 增加变慢}\end{cases}$$

$$a\text{ 和 }v_0\text{ 反向}\xrightarrow[(\Delta v<0)]{\text{减速运动}}\begin{cases}a\text{ 恒定},v\text{ 均匀减小}\\a\text{ 增加},v\text{ 减小变快}\\a\text{ 减小},v\text{ 减小变慢}\end{cases}$$

（2）根据 v-t 图像判断物体的运动情况

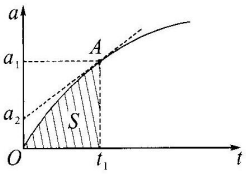
看随着时间的增加，速度的大小如何变化，若越来越大，则为加速运动，反之则为减速运动。



由 $v-t$ 图像判断加速或减速

3.　a-t 图像

如图所示为物体做直线运动的 $a-t$ 图像，a 为加速度。



(1)物理意义

反映物体做直线运动的加速度随时间变化的规律.

(2)图像斜率的意义

图像上某点切线的斜率大小表示该时刻加速度的变化率.

(3)图像与时间轴围成面积的意义

图像和时间轴所围面积表示该段时间内速度的变化量.

【拓展】1.“另类加速度”

历史上有些科学家曾把相等位移内速度变化相等的单向直线运动称为“匀变速直线运动”（现称“另类匀变速直线运动”），“另类加速度”定义为 $A=\frac{v_t-v_o}{s}$，其中 v_o 和 v_t 分别表示某段位移内的初速度和末速度，A>0 表示物体作加速运动。A<0 表示物体作减速运动。而现在物理学中加速度的定义为 $a=\frac{v_t-v_o}{t}$，下列说法正确的是（　C　）

A.若 A 不变，则 a 也不变

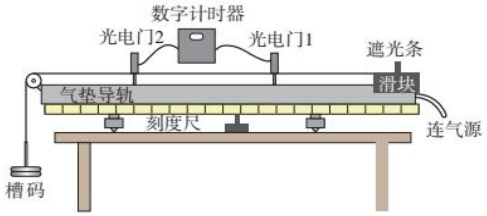
B.若 A 不变，则物体在中间位置的速度为 $\sqrt{\frac{v_0^2+v_t^2}{2}}$.

C.若 A>0 且保持不变，则 a 逐渐增大

D.若 A 不变，则物体在中间时刻处的速度为 $\frac{v_0+v_t}{2}$

【拓展】2.利用气垫导轨测滑块的加速度，滑

块上安装了宽度为2.0 cm的遮光条。如图1-5，滑块在牵引力作用下先后通过两个光电门，配套的数字计时器记录了遮光条通过第一光电门的时间 Δt_1 为0.20 s，通过第二个光电门的时间 Δt_2 为0.05 s，遮光条从开始遮住第一个光电门到开始遮住第二个光电门的时间 t 为2.5 s，试估算滑块的加速度。



【答案】$0.12m/s^2$，方向水平向左。

【记忆口诀】

物体模型用质点，忽略形状和大小；
地球公转当质点，地球自转要大小。
物体位置的变化，准确描述用位移；
运动快慢S比t，　a用ΔV与t来比。

第二部分　方法、规律与技巧

(一) 关于平均速度的求法问题

【典例1】一质点做单向直线运动。(1)若前一半时间的平均速度为 v_1，后一半时间的平均速度为 v_2，则全程的平均速度为多少？(2)若前一半位移间的平均速度为 v_1，后一半位移的平均速度为 v_2，则全程的平均速度为多少？

【答案】(1) $\frac{1}{2}(v_1+v_2)$　　(2) $\frac{2v_1v_2}{v_1+v_2}$

(二) 参考系的选择问题

【典例2】百货大楼一、二楼间有一正以恒定速度向上运动的自动扶梯，某人以相对梯的速度v沿梯从一楼向上跑，数得梯子有n级，到二楼后他又反过来以相对梯的速度v沿梯向下跑至一楼，数得梯子有m级，则该自动扶梯实际的级数为(　　)

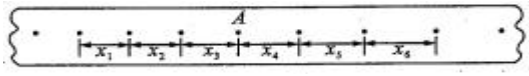
【解析】

设每级梯子高度为 h，一、二楼间共有 N 级梯子，扶梯向上运动的速度为 v'，则上楼时：$\frac{Nh}{v+v'}=\frac{nh}{v}$，下楼时：$\frac{Nh}{v-v'}=\frac{mh}{v}$，解得：$N=\frac{2mn}{m+n}$，

(三) 几种测速的方法

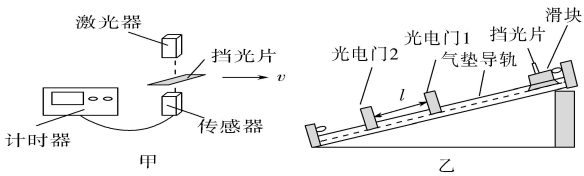
1.打点计时器法

利用打点计时器打出的纸带，选取合适的计数点，某个计数点的瞬时速度等于以该点为中间时刻的一段时间内的平均速度，即 $v_n=\frac{x_n+x_{n+1}}{2T}$.



2.光电门法

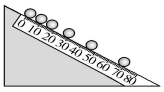
(1)光电门计时原理：如图甲所示为光电门的基本结构，当激光器发射的激光被传感器接收到，计时器不工作；挡光片经过时挡住激光，计时器开始计时；挡光片离开时，激光再次被传感器接收到，计时器就停止计时.



(2)光电门法测量物体瞬时速度的原理：极短时间内的平均速度大小可以近似为物体通过光电门的瞬时速度大小．根据光电门显示的挡光时间和挡光片的宽度就可以求出挡光片经过光电门时的瞬时速度大小，将挡光片固定在物体上则能测出物体的瞬时速度，如图乙所示．如某次宽为 d=1.5 cm 的挡光片通过光电门，计时器上显示的时间是 Δt=0.015 s，则挡光片通过光电门时的瞬时速度大小为 $v=\frac{d}{\Delta t}$=1.0 m/s.

3.频闪照相法

应用频闪照相技术照出的照片，与打点计时器一样，都可以记录物体运动的时间和位移．如图甲所示为小球沿斜面运动时每秒闪光10次拍摄出的频闪照片，照片中每两个相邻小球影像之间的时间间隔就是0.1 s，这样便记录了物体的运动时间．而物体的运动位移则可以用照片中的刻度尺量出．计算某时刻物体的速度的方法与利用纸带计算速度的方法相同.

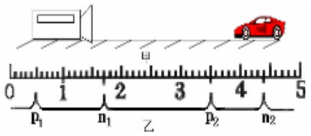


甲

4.借借助传感器（或雷达）用计算机测速度

【典例3】

如图是在高速公路上用超声波测速仪测量车速的示意图。测速仪发出并接收超声波脉冲信号，根据发出和接收到信号间的时间差，测出汽车的速度。图中，p_1、p_2是测速仪发出的超声波信号，n_1、n_2分别是p_1、p_2由汽车反射回来的信号。发射和接收到超声波信号对应的时刻如图所示，设测速仪匀速扫描，p_1、p_2对应时刻之间的时间间隔$\triangle t=1.0s$，超声波在空气中的传播速度是$v=340m/s$，若汽车是匀速行驶的，则根据图求:



(1)汽车在接收到p_1、p_2两个信号之间的时间内前进的距离。

(2)汽车的速度。

【解析】

(1) 由图可以看出，P_1、P_2间的刻度值为30个格，时间长为1秒，发出超声波信号P_1到接受到反射信号n_1间是12个格，则时间为:

$$t_1=12\times\frac{1}{30}=0.4s,$$

此时超声波前进的距离为:

$$S_1=\frac{1}{2}vt_1=\frac{1}{2}\times340m/s\times0.4s=68m$$

发出超声波信号P_2到接受到反射信号n_2的时间为: $t_2=9\times\frac{1}{30}=0.3s,$

此时汽车行驶的距离为:

$$S_2=\frac{1}{2}vt_2=\frac{1}{2}\times340m/s\times0.3s=51m$$

所以汽车接收到P_1、P_2两个信号之间的时间内前进的距离为:

$\triangle S=S_1-S_2=68m-51m=17m$。

(2)汽车运行$17m$的时间为汽车接收到P_1、P_2两个信号的时刻应分别对应于图中P_1n_1的中点和P_2n_2的中点，

其间有28.5小格，即汽车接收到P_1、P_2两个信号的时间间隔为n_1与n_2两个信号之间的间

隔，即：$t=28.5\times\frac{1}{30}=0.95s$；

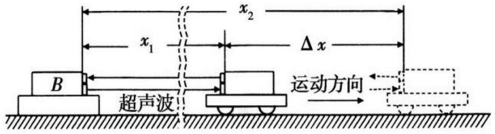
汽车的行驶速度为：

$v=\frac{s}{t}=\frac{17}{0.95}\approx18m/s$。

【典例 4】如图是用超声波测速仪测量小车速度的示意图,测速仪 B 发出和接收超声波信号,并记录了不同时刻发射和接收波的况. 在 t=0 时,B 第一次发出超声波,t=0.4 s 时,收到小车的反射波.t=1.6 s 时,B 第二次发出超声波,t=2.2 s 时,再次收到反射波.超声波在空气中传播的速度 v=340 m/s,小车是匀速行驶的.求:

(1)小车在第一次接收到超声波时与 B 之间的距离,小车在第二次接收到超声波时与 B 之间的距离;

(2)小车的速度大小.



【解析】(1)测速仪 B 两次从发射到接收到反射波的时间分别为 t_1=0.4 s,t_2=2.2 s-1.6 s=0.6 s

小车两次接收到超声波时的位置到 B 的距离分别是

$x_1=\frac{1}{2}vt_1=340\times\frac{1}{2}\times0.4\text{m}=68\text{ m}$　　$x_2=\frac{1}{2}vt_2=340\times\frac{1}{2}\times0.6\text{m}=102\text{ m}$.

(2)小车在两次接收到超声波之间运动的距离为 $\Delta x=x_2-x_1$=34 m

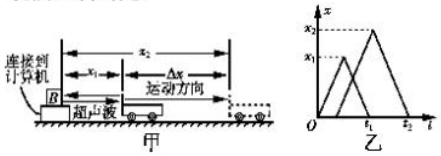
小车两次接收到超声波的时刻分别是

$t_3=\frac{1}{2}t_1=0.2$ s,　　$t_4=1.6\text{ s}+\frac{1}{2}\times0.6\text{ s}=1.9$ s

两列波到达小车的时间差为 $\Delta t=t_4-t_3$=1.7 s

小车运动的速度大小为 $v=\Delta x/\Delta t$ = 34÷1.7 m/s=20 m/s.

【典例 5】如图所示，甲是一种速度传感器的工作原理图,在这个系统中 B 为一个能发射超声波的固定小盒子,工作时小盒子 B 向被测物体发出短暂的超声波脉冲,脉冲被运动的物体反射后又被 B 盒接收,从 B 盒发射超声波开始计时,经时间 Δt_0 再次发射超声波脉冲,图乙是连续两次发射的超声波的位移－时间图像,则下列说法正确的是



A. 超声波的速度为 $v_{波}=\frac{2x_1}{t_1}$

B. 超声波的速度为 $v_{波}=\frac{2x_2}{t_2}$

C. 物体的平均速度为 $\bar{v}=\frac{2(x_2-x_1)}{t_2-t_1+2\Delta t_0}$

D. 物体的平均速度为 $\bar{v}=\frac{2(x_2-x_1)}{t_2-t_1+\Delta t_0}$

【答案】AD

【典例 6】用运动传感器可以测量运动物体的速度。如图所示,这个系统有一个不动的小盒子 B,工作时,小盒 B 向汽车 A 发出短暂的超声波脉冲,脉冲被汽车 A 反射后又被 B 接收,B 将信息输入计算机,由计算机处理该信息,可得到汽车 A 的速度。若 B 每间隔 1.5 s 发出一个超声波脉冲,而第一次收到超声波脉冲与第二次收到超声波脉冲间隔为 1.3 s,超声波在空气中的传播速度为 $v_{声}$=340 m/s。

(1)试判断汽车 A 远离小盒 B,还是靠近小盒 B;

(2)试求汽车 A 的速度大小。



【解析】(1)因发射超声波的时间间隔大于接收超声波的时间间隔,故汽车靠近小盒 B。

(2)设小盒 B 第一次发出的超声波经过时间 t_1 到达汽车处,则此时汽车与小盒 B 的距离 $s_1=v_{声}t_1$

设小盒 B 第二次发出的超声波经过时间 t_2 到达汽车处,则此时汽车与小盒 B 的距离 $s_2=v_{声}t_2$

汽车在两次与超声波相遇的过程中行驶了 $s=s_1-s_2$

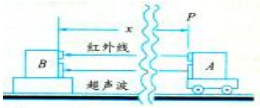
汽车行驶 s 共用了时间 t=1.5 s+t_2-t_1

另有 1.5 s+2t_2-2t_1=1.3 s

可得 t_1-t_2=0.1 s,t=1.4 s,$s=v_{声}(t_1-t_2)$=34 m

汽车的速度 $v=\frac{s}{t}$=24.3 m/s

【典例 7】如图是一种运动传感器的原理图，系统由 A、B 两个小盒子组成，A 盒装有红外线发射器和超声波发射器，它装在被测物体上，每隔 0.03S 可同时发射一个红外线脉冲和一个超声波脉冲；B 盒装有红外线接收器和超声波接收器。B 盒固定在桌面上。B 盒接收到红外线脉冲时开始计时，接收到超声波脉冲时停止计时。在某次测量中，B 盒记录到的连续两次的时间分别为 0.15S 和 0.20S，则该物体的速度为_____m/s,该物体是_____（选填“靠近”或“远离”）B 盒（声速取 340m/s）



解　红外线的传播时间极短，可以忽略不计。当第 1 次发射脉冲时，物体距 B 盒的距离 $x_1=340\text{ m/s}\times0.15\text{ s}=51\text{ m}$；当第 2 次发射脉冲时，物体距 B 盒的距离 $x_2=340\text{ m/s}\times0.20\text{ s}=68\text{ m}$。又 $\Delta t=0.03$ s，故 $v=\frac{x_2-x_1}{\Delta t}=\frac{68-51}{0.03}\text{ m/s}\approx567\text{ m/s}$。又 $x_2>x_1$，所以物体远离 B 盒。

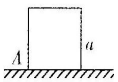
【答案】567　　远离

第三部分　物理方法概述

物理学科中的极限思维方法,实际就是将物理量的可能变化推向极限(最小、最大或者某个临界值),充分暴露物理量之间相互关系的合理性,从而准确判断结果合理与否的一种思维方法。常用方法还有：控制变量法、微元法、假设法、等效法、类比法等。

第四部分　易错、疑难题选

【例 1】水平地面上竖直放一个边长为 a 的正方形薄板，其左下角顶点上有一点 A，如图所示。现使该薄板在地面上不打滑地顺时针翻滚一周，则 A 点发生的位移大小和路程分别是（　　）



A. $4a$、$\left(1+\frac{\sqrt{2}}{2}\right)\pi a$　　B. $3a$、$\left(1+\frac{\sqrt{2}}{2}\right)\pi a$

C. $4a$、$\frac{3}{2}\pi a$　　D. $3a$、$\frac{3}{2}\pi a$

【答案】A

2. 如图所示，夹弹珠游戏时，游戏者从身后桌子 1 的容器中用筷子夹起弹珠，返身后沿直线运送到桌子 2 的目标容器并放下弹珠，随后再返身沿直线回到出发点，从而完成一次操作。此后重复上述操作，以规定时间内目标容器中弹珠多者为赢。则

A. 两容器相距较远时，游戏过程中容器可以视为质点

B. 从容器中夹起弹珠的过程中，弹珠可以视为质点

C. 完成一次操作，游戏者的平均速度为零

D. 游戏者从桌子 1 到桌子 2 与从桌子 2 到桌子 1 的平均速度相同

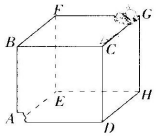


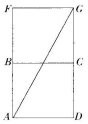
【答案】C

【例 3】如图所示，在一个棱长为 a 的正方体木箱的一个顶角 G 上，老鼠从猫的爪间逃出，沿着木箱的棱边奔向洞口 A，若老鼠在奔跑中，不重复跑过任意一条棱边，也不再回到 G 点，猫选择了一条最短的路线奔向洞口（设它们同时从 G 点出发），结果猫再次在 A 点捉到了老鼠。问：

（1）老鼠的位移大小及最短路程是多少？

（2）猫的位移大小和路程是多少？





【提示】

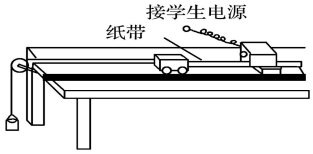
【答案】（1）$\sqrt{3}a$　3a　（2）$\sqrt{3}a$　$\sqrt{5}a$

第二章　匀变速直线运动的研究

第一部分　基础知识点

第 1 节　实验：探究小车速度随时间变化的规律

1.实验装置【接交流电源】



(a)



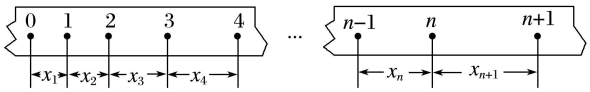
（b）

【b 图应接 AC（交流）】

2.利用纸带求瞬时速度

若 n 为纸带上第 n 个计数点，打点周期为 T，则 $v_n=\frac{x_n+x_{n+1}}{2T}$.

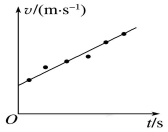
实验所得纸带如图所示，计算各测量点的瞬时速度：



$v_1=\frac{x_1+x_2}{2T}$，$v_2=\frac{x_2+x_3}{2T}$，$v_3=\frac{x_3+x_4}{2T}$，……，$v_n=\frac{x_n+x_{n+1}}{2T}$.

【计算起点或最后一点速度的方法：$V_0=V_1-aT$ 或由 $V_1=\frac{V_0+V_2}{2}$ 求解出 V_0】

3.用图象法研究速度随时间变化的规律

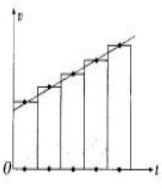


(1)建立 v－t 坐标系，并描点。

(2)画一条线，让这条线通过尽可能多的点，不在线上的点均匀分布在直线的两侧，偏差比较大的点忽略不计，如图所示．若 v－t 图象为直线，则说明物体做匀变速直线运动．

（3）等效替代法处理纸带

如图所示，将纸带从相邻计数点剪下，按顺序并排贴在直角坐标系内，因纸带宽度相等，可以把纸带宽度作为时间间隔 T，各段纸带的长度恰好是小车在这段时间内的位移 x_n，各时间间隔内的平均速度近似等于中间时刻的瞬时速度，即 $v_n=\bar{v}=\frac{x_n}{T}$，显然 $v_n\propto x_n$，故可用纸带长度表示速度，该图等效为小车的 v-t 图像。



【典例 1】

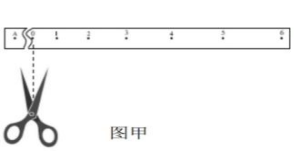
(1) 用打点计时器测量做匀加速直线运动物体的加速度，电源频率 f=50Hz。实验获:如图甲所示。选出零点，每隔 4 个点取 1 个计数点，沿各计数点垂直纸带将纸带剪的几段纸条并排贴在坐标纸上，各条紧靠但不重叠；最后将各纸条上端中心位置拟合，得到 v-t 图象如图乙所示。

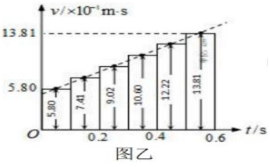
①纵坐标 5.80×10⁻¹m/s 表示的物理意义是（填写下面的字母选项）__▲__；

A．打计数点“0”时物体的速度　　B．打计数点“1”时物体的速度

C．第 1 段纸带对应物体的平均速度　　D．以上都不正确

②由图乙可知物体的加速度大小为__▲__m/s²（保留三位有效数字）；





图乙

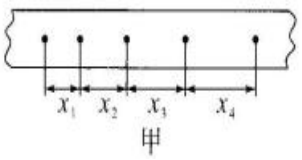
【答案】(1)①C　②1.60

4.利用 v－t 图象的斜率求物体的加速度

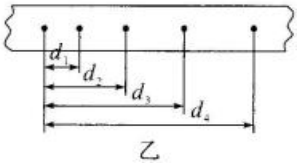
物体的加速度 $a=\frac{\Delta v}{\Delta t}$.【注意：a=k,但 a 不一定等于 tanα】

【注意】1.【本实验加速度一般在 1 m/s²-4 m/s² 之间】

【注意】2.区分两种纸带【测量数据时要一次性读取，以减小误差】例：如图甲、乙所示，图甲的测量误差相对图乙的测量误差较大，图乙的标注方式更合理。



甲

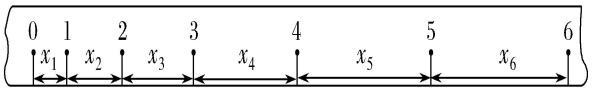


乙

【特别提醒】求加速度时要注意这两种纸带的区别

【注意】3.该实验不需要平衡摩擦力。

5.纸带加速度的求法（逐差法）



（1）若数据较多且为偶数段（如 4 或 6 段），则有：

$a=\frac{(x_3+x_4)-(x_1+x_2)}{(2T)^2}$　或　$a=\frac{(x_4+x_5+x_6)-(x_1+x_2+x_3)}{(3T)^2}$

（2）若数据较多且为奇数段（如 5 或 7 段），则去掉最密的那一段变为偶数段。

（3）若只有三段，则利用 $x_3-x_1=2aT^2$；$x_2-x_1=aT^2$ 再求 a 的平均值。

（4）若只有两段，则利用 $x_m-x_n=(m-n)aT^2$.

【拓展】平衡小车摩擦力问题小结：

平衡小车摩擦力的方法：将木板一端垫高，轻推小车，根据打点计时器打在纸带上的点的均匀程度判断小车是否做匀速运动。

①研究匀变速直线运动时，小车无须平衡摩擦力。

②验证牛顿第二定律时，需要平衡摩擦力。

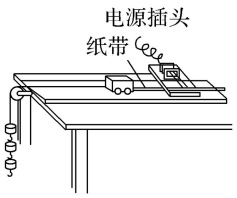
③探究动能定理时，需要平衡摩擦力。

④验证机械能守恒定律时，须消除摩擦力的影响。

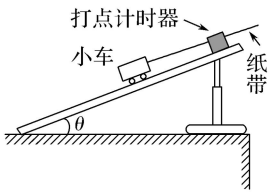
⑤ 验证动量守恒定律时，也需消除摩擦力的影响。

实验拓展创新

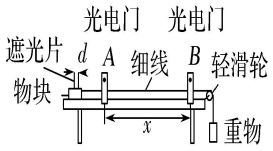
1.情景拓展



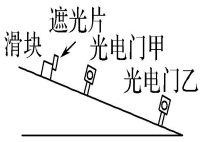
A



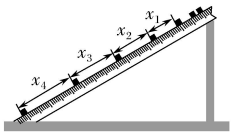
B



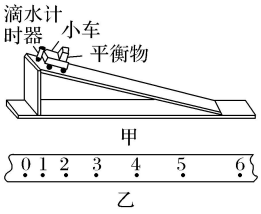
C



D

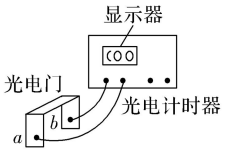


E. 频闪照相法



F. 滴水法

关于光电门【利用平均速度表示瞬时速度】



丙



丁

2.改进获取数据的方法

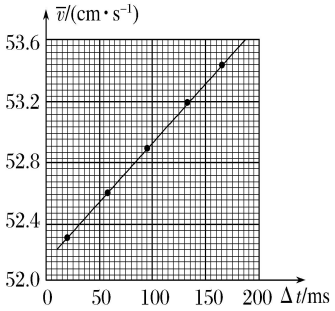
(1)加速度的获得：靠重物的拉力获得加速度$\xrightarrow{\text{改进}}$长木板倾斜靠重力获得加速度。

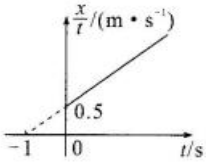
(2)速度的测量方法：由打点纸带求速度$\xrightarrow{\text{改进}}$测定遮光片的宽度 d 和遮光片通过光电门的挡光时间Δt，由 $v=\frac{d}{\Delta t}$求速度。

(3)加速度的测量方法：由打点纸带利用逐差法求加速度$\xrightarrow{\text{改进}}$利用经过两个光电门的瞬时速度，由速度—位移关系式求加速度。

3.数据处理的拓展-------【注意】此时 $k=\frac{1}{2}a$，而不是 a=k.

【由 $x=v_0t+\frac{1}{2}at^2$ 得 $\bar{v}=\frac{x}{t}=v_0+\frac{1}{2}at$ 】





【小结】此类问题应从位移公式通过变形得出对应规律。

第 2 节 匀变速直线运动的速度与时间的关系

一、定义：沿着一条直线，且加速度不变的运动叫匀变速直线运动。

二、特点：

（1）轨迹是直线。

（2）任意相等时间 Δt 内，速度的变化量 Δv 相同，即物体运动的加速度 a 不变。

三、分类

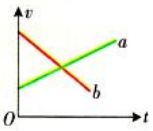
（1）匀加速直线运动：速度随时间均匀增大的匀变速直线运动。

（2）匀减速直线运动：速度随时间均匀减小的匀变速直线运动。

四、匀变速直线运动的 V-t 图像

(1)图线为一条倾斜的直线，如图中 a、b。

(2)图线 a 反映了速度随时间均匀增大，即匀加速直线运动。



(3)图线 b 反映了速度随时间均匀减小，即匀减速直线运动。

(4)$a=\frac{\Delta v}{\Delta t}$ 对应于图线的斜率，斜率的大小表示加速度的大小，斜率的正负表示加速度的方向。

五、匀变速直线运动的速度与时间的关系

1.匀速速直线运动的速度-时间关系式

$V=V_0+at$

2.对公式 $V=V_0+at$ 的理解

(1)**矢量性**：v_0、v、a 皆为矢量，一般规定 v_0 的方向为正方向。若 a 与 v_0 同向，则 v 逐渐增大，物体做匀加速直线运动；若 a 与 v_0 反向，则 v 逐渐减小或减为 0 后再反向增大，物体做匀减速直线运动，减为 0 后再反向做匀加速直线运动。

（2）适用范围：$V=V_0+at$ 只适用于匀变速直线运动。

3.公式的特殊形式

(1)当 $v_0=0$ 时，$v=at$（初速度为 0 的匀加速直线运动）。

(2)当 $a=0$ 时，$v=v_0$（匀速直线运动）。

（4）重要推论

①匀变速直线运动中，某段时间内的平均速度等于初、末速度的平均值，即 $\bar{v}=\frac{v_0+v}{2}$。

②匀变速直线运动中，某段时间中间时刻的瞬时速度等于这段时间内的平均速度，即 $v_{\frac{t}{2}}=\bar{v}$。

六、对 V-t 图像的理解

1.根据图像的形状判断物体的运动性质

（1）图线是直线：表示物体做匀变速直线运动（一条倾斜的直线）或匀速直线运动（一条平行于 t 轴的直线）。

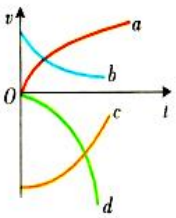
(2)**图线是曲线**：表示物体做变加速直线运动，图线上某点切线的斜率表示该点对应时刻的加速度，如图所示，为 a、b、c、d 四个物体的 v-t 图像。

①a 表示物体在做加速度减小的加速运动；

②b 表示物体在做加速度减小的减速运动；

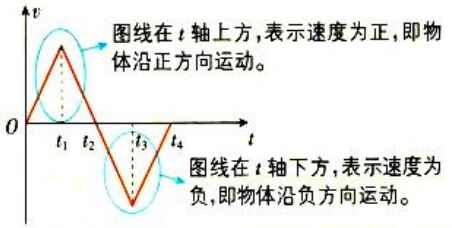
③c 表示物体在做加速度增大的减速运动；

④d 表示物体在做加速度增大的加速运动。



2.图像表示的物理意义

(1)图线在 t 轴上方，表示物体沿正方向运动；图线在 t 轴下方，表示物体沿负方向运动。图线斜率的大小表示加速度的大小，斜率的正负表示加速度的方向。



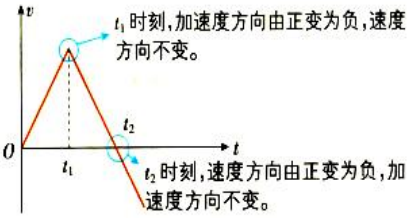
(2)两图线的交点：表示该时刻两物体速度相同，并不表示两物体相遇。

(3)图线与坐标轴的交点

①图线与 t 轴的交点表示该时刻速度为 0，即交点前、后速度方向相反，运动方向改变。

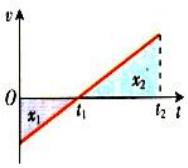
②图线在 v 轴的截距表示初速度。

(4)图线的转折点：表示加速度改变，速度出现极值。



(5)v-t 图像中位移和路程的表示

匀变速直线运动的 v-t 图像中，图线与坐标轴所围图形面积的大小等于物体在该段时间内的位移大小。如右图中两个阴影三角形的面积分别为 x_1、x_2，则



①0~t_1 时间内，路程和位移大小均为 x_1；

②t_1~t_2 时间内，路程和位移大小均为 x_2；

③0~t_2 时间内，路程大小为 x_1+x_2，位移大小为 $|x_1-x_2|$。

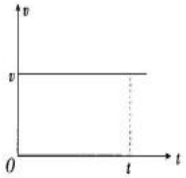
第 3 节　匀变速直线运动的位移与时间的关系

一、匀变速直线运动的位移

(1)匀速直线运动的位移

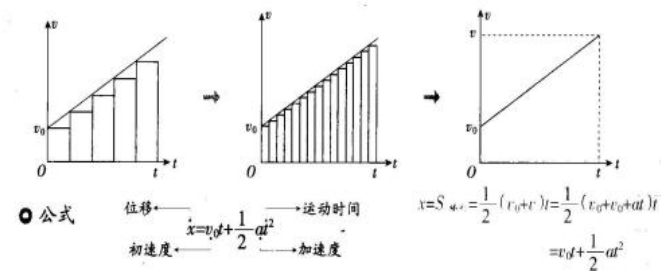
①位移公式：$x=vt$。

②匀速直线运动的速度 v 不随时间 t 变化，其 v-t 图像是一条平行于时间轴的直线，如图所示，图线与 t 轴所围的面积在数值上等于物体在这段时间内的位移。



(2)匀变速直线运动的位移

①推导：通过“微元法”可以得出，初速度为 v_0、做匀变速直线运动的物体，其 v-t 图像与 t 轴所围成的梯形的面积就代表物体的位移，如图所示，从而推导出位移公式。



公式　位移 $x=v_0t+\frac{1}{2}at^2$（运动时间、初速度、加速度）

②对公式的理解

- $x=v_0t+\frac{1}{2}at^2$ 只适用于匀变速直线运动，对其他运动不适用。
- 式中 x、v_0、a 都是矢量，应用公式时必须选取统一的正方向，一般以初速度 v_0 的方向为正方向。选定正方向后，各量带符号代入公式进行运算。
- 两种特殊形式：当 $a=0$ 时，$x=v_0t$（匀速直线运动）；当 $v_0=0$ 时，$x=\frac{1}{2}at^2$（初速度为 0 的匀加速直线运动）。如自由落体运动。

③匀变速直线运动的位移与时间是二次函数关系，x-t 图像是过原点的抛物线的一部分。匀变速直线运动的位移不随时间均匀变化。

【在处理较复杂的变化量问题时，常常先把整个区间化为若干个小区间，认为每一小区间内研究的量不变，再求和。这是物理学中常用的一种方法。】

二、匀变速直线运动的位移与速度的关系

1. 匀变速直线运动的位移-速度关系式

速度—时间关系式：$v=v_0+at$

位移—时间关系式：$x=v_0t+\frac{1}{2}at^2$

两式联立可得 $v^2-v_0^2=2ax$

其中 v_0 和 v 是初、末时刻的速度，x 是这段时间内的位移，a 为加速度。

2. 对公式 $v^2-v_0^2=2ax$ 的理解

(1)式中 v、v_0、a、x 均为矢量，应用时要选取统一的正方向。一般以 v_0 的方向为正方向，若物体做匀加速直线运动，$a>0$；若物体做匀减速直线运动，$a<0$。若计算结果 $x>0$、$v>0$，说明 x、v 与 v_0 方向相同，若 $x<0$、$v<0$，说明 x、v 与 v_0 方向相反。

(2)特殊形式

①当 $v_0=0$ 时，$v^2=2ax$（初速度为 0 的匀加速直线运动）。

②当 $v=0$ 时，$-v_0^2=2ax$（匀减速至停止）。

三、匀变速直线运动的公式小结：【知“三”求“二”】

（一）四个基本公式

(1)速度公式：　$v=v_0+at$

(2)位移公式：$x=v_0t+\frac{1}{2}at^2$

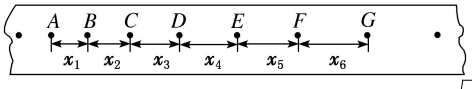
(3)速度与位移关系式：$v^2-v_0^2=2ax$

(4)平均速度公式：　$\bar{v}=\frac{1}{2}(v_0+v)$

（二）匀变速直线运动的三个推论

（1）匀变速直线运动的判别式：做匀变速直线运动的物体在任意两个连续相等的时间间隔 T 内，位移之差是一恒定值，即 $\Delta x=x_2-x_1=x_3-x_2=\cdots=x_n-x_{n-1}=aT^2$。

【注意】此公式可以延伸为 $x_m-x_n=(m-n)aT^2$，常用于纸带或闪光照片逐差法求加速度。

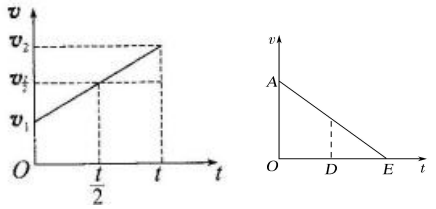


（2）中点位置的瞬时速度公式：$v_{\frac{x}{2}}=\sqrt{\frac{v_0^2+v^2}{2}}$.

（3）中间时刻的瞬时速度**公式**：做匀变速直线运动的物体，在任意一中间时刻的瞬时速度等于这段时间 t 内的平均速度还等于

这段时间初、末速度矢量和的一半．即 $\overline{v}=\frac{v_0+v}{2}=v_{\frac{t}{2}}$。

【相互关系：在匀变速直线运动中，$v_{\frac{x}{2}}>v_{\frac{t}{2}}$恒成立，如下图】



（三）初速度为 0 的匀加速直线运动的特殊规律

①1T 末、2T 末、3T 末…nT 末瞬时速度之比：

$v_1:v_2:v_3\cdots:v_n=1:2:3\cdots:n$

②1T 内、2T 内、3T 内…nT 内位移之比：

$x_1:x_2:x_3\cdots:x_n=1^2:2^2:3^2\cdots:n^2$

③第一个 T 内、第二个 T 内、第三个 T 内…第 N 个 T 内的位移之比：$x_{Ⅰ}:x_{Ⅱ}:x_{Ⅲ}\cdots:x_N=1:3:5\cdots:(2N-1)$

④通过 x_0、$2x_0$、$3x_0\cdots nx_0$ 所用时间之比：

$t_1:t_2:t_3\cdots:t_n=1:\sqrt{2}:\sqrt{3}\cdots:\sqrt{n}$

⑤通过第一个 x_0、第二个 x_0、第三个 $x_0\cdots$第 N 个 x_0 所用时间之比：$t_{Ⅰ}:t_{Ⅱ}:t_{Ⅲ}\cdots:t_N=1:(\sqrt{2}-1):(\sqrt{3}-\sqrt{2})\cdots:(\sqrt{n}-\sqrt{n-1})$

第 4 节　自由落体运动

一、定义：物体只在重力作用下从静止开始下落的运动叫自由落体运动。

二、条件：①初速度为 0　②只受重力作用。

三、性质：初速度为 0 的匀加速直线运动。

四、自由落体加速度

(1)概念：一切物体自由下落的加速度都相同，这个加速度叫自由落体加速度，也叫重力加速度。

(2)大小：在同一地点的重力加速度 g 相同，大小约为 9.8 m/s²。计算时若没有特殊说明 g 取 10 m/s²，均按 9.8 m/s² 进行计算。

(3)方向：重力加速度的方向始终竖直向下，而不是垂直向下，地球各处的重力加速度方向不同。

(4)产生原因：由地球对物体的吸引力引起。

(5)影响因素：纬度和高度。重力加速度 g 随着纬度的增加而增大，随着高度的增加而减小。（地球表面两极处重力加速度 g 最大，赤道处最小）

(6)g 的数值的测量：利用打点计时器或频闪照相等方法测量 g 的大小。

五、自由落体运动规律

(1)速度公式：$v=gt$。

(2)位移公式：$x=\frac{1}{2}gt^2$

(3)速度与位移关系式：$v^2=2gx$。

(4)平均速度公式：$\overline{v}=\frac{v}{2}=\frac{1}{2}gt$。

(5)推论：$\Delta x=gT^2$

【注意】自由落体运动隐含两个条件：初速度为零，加速度为 g。

六、竖直上抛运动

1.定义：将物体以一定的初速度竖直向上抛出去，物体只在重力作用下的运动叫竖直上抛运动。

2. 基本特点

（1）物体的初速度 $v_0\neq 0$ 且竖直向上。

（2）只受重力作用。

（3）加速度大小恒为 g，方向竖直向下。

3. 运动性质：匀变速直线运动

4. 基本规律：规定 $v_0>0$，a=-g.

(1)$v=v_0-gt$。

(2)$h=v_0t-\frac{1}{2}gt^2$。

(3)$v^2-v_0^2=-2gh$。

5. 推论

(1)上升到最高点所用的时间 $t=\frac{v_0}{g}$。

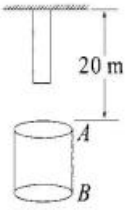
(2)上升的最大高度 $H=\frac{v_0^2}{2g}$。

(3)回到抛出点所用的时间 $T=\frac{2v_0}{g}$。

(4)回到抛出点的速度 $v=-v_0$。

【杆穿过一段距离的问题】

求木杆通过圆筒 AB 所用的时间（求时间差）



6.竖直上抛运动的三类对称

时间对称	物体上升到最高点所用时间与物体从最高点落回到原抛出点所用时间相等，即 $t_{上}=t_{下}=\frac{v_0}{g}$
	物体在上升过程中经过某两点之间所用的时间与下降过程中经过该两点之间所用的时间相等
速度对称	物体上抛时的初速度与物体又落回原抛出点时的速度大小相等、方向相反
	物体在上升阶段和下降阶段经过同一个位置时的速度大小相等、方向相反
能量对称	竖直上抛运动物体在上升和下降过程中经过同一位置时的动能、重力势能及机械能分别相等

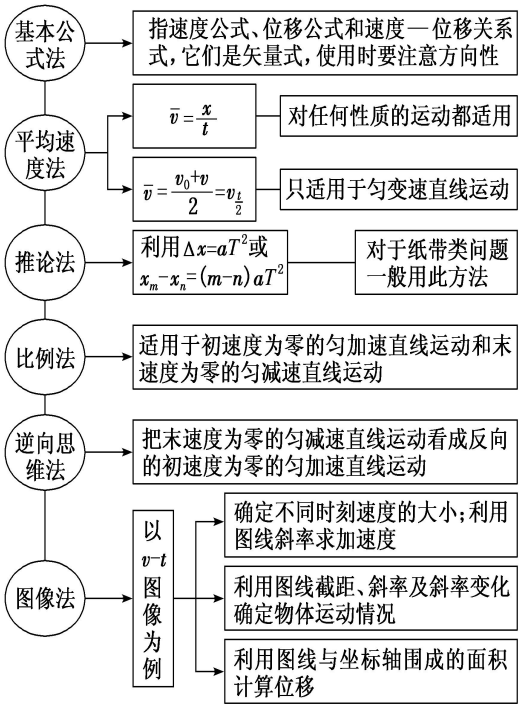
7. 多解性：由于运动的往复性，使物体能在不同时刻处于同一位置或不同时刻距抛出点有相同的距离，从而造成两解或三解的现象。

【记忆口诀】

运用一般公式法，平均速度是简法；
中间时刻速度法，初速为 0 比例法。
运动草图图像法，求解运动好方法；
自由落体是实例，初速为零 a 等 g.
竖直上抛知初速，上升最高心有数；
飞行时间上下等，整个过程匀减速。
中间时刻的速度，平均速度相等数；
求加速度有好方，Δx 等于 aT 方。

第二部分 方法、规律与技巧

一、解答匀变速直线运动问题常用 6 种方法



二、两个模型的区别

1.水平刹车与沿粗糙斜面上滑的区别

(1)当汽车在水平路面上刹车时，汽车速度为零后，汽车将停止运动。

求解汽车刹车类问题时，一定要认真分析清楚汽车的运动过程，一般都是先判断刹车时间或刹车位移，即判定汽车在给定时间内或位移内是否已停止，千万不能乱套公式.

(2)物体沿粗糙斜面上滑至最高点后，若有 mgsin θ≤μmgcos θ，则物体的运动规律与汽车在水平路面上的刹车问题类似。

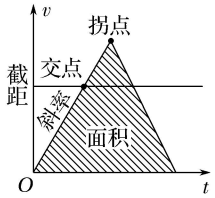
2.竖直上抛运动与沿光滑斜面上滑的区别

物体沿光滑斜面上滑时先做匀减速运动再反向做匀加速运动，且加速度的大小和方向均相同，其运动规律与竖直上抛运动规律相同。

三、平均速度公式、逐差相等公式、初速度为零的匀变速直线运动的比例式等，都适用于自由落体运动.

四、图像问题

分析图象问题时应注意“六看”



一看“轴”{x－t 图象纵轴表示位移；v－t 图象纵轴表示速度

二看“线”{x－t 图象上倾斜直线表示匀速直线运动；v－t 图象上倾斜直线表示匀变速直线运动

三看“斜率”{x－t 图象上斜率表示速度；v－t 图象上斜率表示加速度

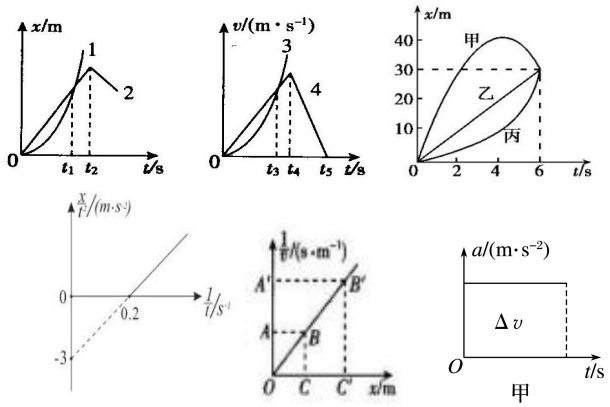
四看“面积”{v－t 图象上图线和时间轴围成的“面积”表示位移

五看“纵截距”{x－t 图象表示初位置；v－t 图象表示初速度

六看“特殊点”

{拐点（转折点）：一般表示从一种运动变为另一种运动

{交点：在 x－t 图象上表示相遇，在 v－t 图象上表示速度相等



甲

【注意】所有的 x-t 图和 v-t 图都只能反映直线运动。

图像问题规律总结

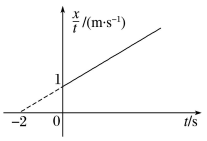
1. 解题思想

解答关于图像的问题时，关键在于分析图像截距、斜率和图像与横轴围成的面积三点的含义. 只有将图像的解析式表达出来，才能将以上三点的含义分析出来，并合理利用其中的含义进行解题.

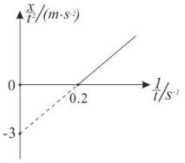
2. 常考的变式图像

（1）$\frac{x}{t}-t$ 图像或 $\frac{x}{t^2}-\frac{1}{t}$ 图像

由位移公式 $x=v_0t+\frac{1}{2}at^2$ 变形得 $\frac{x}{t}=v_0+\frac{1}{2}at$，$\frac{x}{t}-t$ 图像的截距为 v_0，斜率为 $\frac{1}{2}a$.

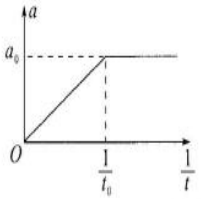


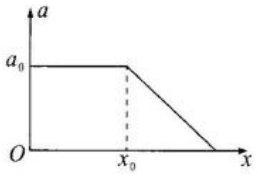
或 $\frac{x}{t^2}-\frac{1}{t}$ 图像



【由 x=v₀t+$\frac{1}{2}$at² 得 $\frac{x}{t^2}=\frac{v_0}{t}+\frac{1}{2}a$，此时 k=$v_0$，b=$\frac{1}{2}$a】

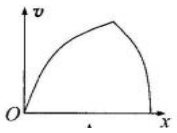
(2)$a-\frac{1}{t}$ 图像：分析图像时，从 $\frac{1}{t}=\infty$ 开始分析，$\frac{1}{t}=\infty$，即 $t=0$.



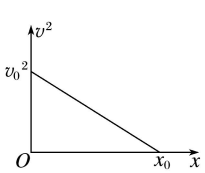


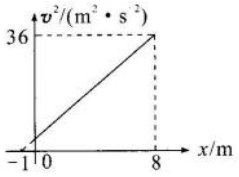
(3)$a-x$ 图像：由公式 $v^2-v_0^2=2ax$ 可知 $a-x$ 图像与横轴所围成的面积表示 $\frac{v^2-v_0^2}{2}$.

(4)$v-x$ 图像：由公式 $v^2-v_0^2=2ax$ 变形得 $v=\sqrt{v_0^2+2ax}$，一般情况下 $v_0=0$，即可得到 $v=\sqrt{2ax}=\sqrt{2a}\cdot\sqrt{x}$，图像是开口向右的抛物线.



(5)v^2-x 图像：由公式 $v^2-v_0^2=2ax$ 变形得 $v^2=v_0^2+2ax$，v^2-x 图像的截距为 v_0^2，斜率为 $2a$.





【知识拓展】 图象面积意义的拓展

物理图象中，图线与坐标轴所围的“面积”表示“x 量”与“y 量”乘积，如：

(1)v—t 图象的面积表示位移 x，且 x=vt。

(2)a—t 图象的面积表示速度的变化量Δv，且Δv=at。

(3)F—s 图象的面积表示功 W，且 W=Fs。

(4)F—t 图象的面积表示功 I，且 I=Ft。

(5)I—t 图象的面积表示电荷量 q,且 q=It。

【拓展】用数学方法讨论多解问题

由公式：$x=v_0t+\frac{1}{2}at^2$ 可画出 x-t 图，再利用图像讨论。

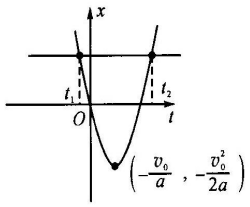


图 1 $a>0$ $x>0$

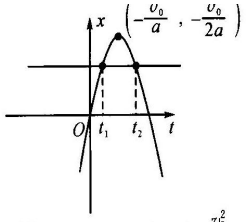


图 2 $a<0$ $0\leqslant x<-\frac{v_0^2}{2a}$

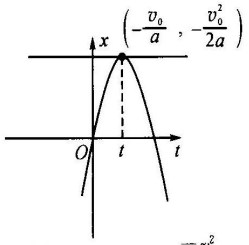


图 3 $a<0$ $x=\frac{-v_0^2}{2a}$

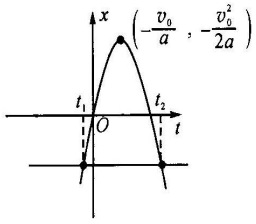
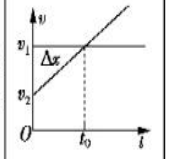
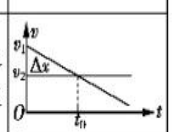
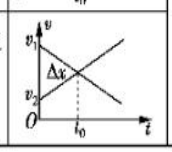


图 4 $a<0$ $x<0$

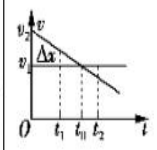
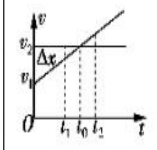
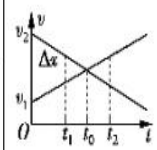
五、追及和相遇问题

1.追及问题的两类情况

(1)速度小者追速度大者

类型	图像	说明
匀加速追匀速		①$t=t_0$ 以前，后面物体与前面物体间距离增大； ②$t=t_0$ 时，两物体相距最远为 $x_0+\Delta x$； ③$t=t_0$ 以后，后面物体与前面物体间距离减小； ④能追及且只能相遇一次 **注**：x_0 为开始时两物体间的距离
匀速追匀减速		
匀加速追匀减速		

(2)速度大者追速度小者

类型	图像	说明
匀减速追匀速		开始追时，后面物体与前面物体间距离在减小，当两物体速度相等时，即 $t=t_0$ 时刻： ①若 $\Delta x=x_0$，则恰能追及，两物体只能相遇一次，这也是避免相撞的临界条件； ②若 $\Delta x<x_0$，则不能追及，此时两物体间最小距离为 $x_0-\Delta x$； ③若 $\Delta x>x_0$，则相遇两次，设 t_1 时刻 $\Delta x_1=x_0$ 两物体第一次相遇，则 t_2 时刻两物体第二次相遇 **注**：x_0 是开始时两物体间的距离
匀速追匀加速		
匀减速追匀加速		

【解题突破口】

两者速度相等时，是两者相距最近（或最远）的临界条件。

【规律小结】

(1)若后者能追上前者，追上时两者处于同一位置，且后者速度一定不小于前者速度。

(2)若后者追不上前者，则当后者速度与前者速度相等时，两者相距最近。

2.相遇问题

相向运动的物体，当各自发生的位移大小之和等于开始时两物体间的距离时即相遇。

【点拨】同向追及时，当追赶者位移等于被追赶者位移与初始间距之和时即相遇。

3.常用方法

①物理分析法：通过对物理情境和物理过程的分析，抓住一个条件、两个关系，然后列出方程求解.

②函数方程法：利用不等式求解，思路有二：其一是先求出在任意时刻 t 两物体间的距离 $y=f(t)$，若对任何 t，均存在 $y=f(t)>0$，则这两个物体永远不能相遇；若存在某个时刻 t，使得 $y=f(t)\leqslant 0$，则这两个物体可能相遇. 其二是设在 t 时刻两物体相遇，然后根据几何关系列出关于 t 的方程 $f(t)=0$，若方程 $f(t)=0$ 无正实数解，则说明这两物体不可能相遇；若方程 $f(t)=0$ 存在正实数解，则说明这两个物体可能相遇.

③图像法：$x-t$ 图像中，两个物体的位移图像相交，说明两物体相遇；$v-t$ 图像中速度图线与 t 轴包围的面积相等，说明两物体位移相等.

④相对运动法：在追及、相遇问题中，常把被追及物体作为参考系，这样追赶物体相对被追物体的各物理量即可表示为：$x_{相对}=x_{后}-x_{前}=x_0$，$v_{相对}=v_{后}-v_{前}$，$a_{相对}=a_{后}-a_{前}$，且上式中各物理量（矢量）的符号都应统一正方向.

【本章高频考点】

1.以生活中（体育、各类比赛、科研探索活动）的运动为背景考查质点、位移、时刻、速度、加速度等基本概念。

2.以匀变速或自由落体运动为背景考查X-t图和V-t图的区别和联系。

3.匀变速直线运动基本规律的考查。

4.以小车速度与时间的关系实验为载体考查打点计时器的使用和纸带的处理方法。

第三部分 物理方法概述

一、$x-t$图像法

借助$x-t$图像来求解涉及速度、位移、时间等问题的方法。

二、$v-t$图像法

$v-t$图像能够形象直观地把物体的运动过程表示出来。利用$v-t$图像求解物体运动过程中相关量的方法叫作$v-t$图像法。

三、相对运动法

将物体相对于地面的运动转化为相对于非地面的参考系的运动，其相对于该参考系的物理量分别由对地物理量转化得到，这种方法称为相对运动法。

第四部分 易错、疑难题选

【例1】一物体做匀加速直线运动，通过一段位移Δx所用时间为t_1，紧接着通过下一段位移Δx所用时间为t_2，则物体运动的加速度为（ ）

A. $\frac{2\Delta x(t_1-t_2)}{t_1t_2(t_1+t_2)}$　　B. $\frac{\Delta x(t_1-t_2)}{t_1t_2(t_1+t_2)}$

C. $\frac{2\Delta x(t_1+t_2)}{t_1t_2(t_1-t_2)}$　　D. $\frac{\Delta x(t_1+t_2)}{t_1t_2(t_1-t_2)}$

【答案】A

【例2】（多选）已知O、A、B、C为同一直线上的四点，A、B间的距离为l_1，B、C间的距离为l_2，物体自O点由静止开始沿此直线做匀加速运动，依此经过A、B、C三点。已知物体通过AB段与通过BC段所用的时间相等。则下列说法正确的是（ ）

A. 物体通过A、B、C三点的速度大小一定满足$v_B-v_A=v_C-v_B$

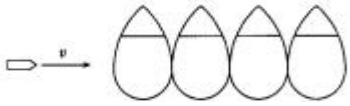
B. $l_1:l_2=1:3$

C. 物体通过B点的速度等于通过AC段的平均速度

D. O、A间的距离为$\frac{(3l_1-l_2)^2}{8(l_2-l_1)}$

【答案】ACD

【例3】四个完全相同的水球紧挨在一起水平排列，子弹在水球中沿水平方向做匀变速直线运动，恰好能穿出第四个水球，则可以判断（ ）



A，由题干信息可以确定子弹在每个水球中运动的时间相同。

B，由题干信息可以确定子弹穿过每个水球的时间。

C，子弹在每个水球中速度变化相同。

D，子弹穿过第三个水球的瞬时速度与全程的平均速度相等。

【答案】D

【例4】一杂技演员，用一只手抛球。他每隔0.40S抛出一球，接到球便立即把球抛出。已知抛、接球的时刻外，空中总有4个球，将球的运动看作竖直方向的运动，不计空气阻力，g=10m/s^2. 则球到达的最大高度为（从抛球点算起）（ ）

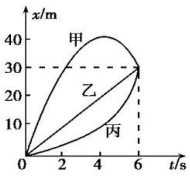
【答案】3.2m

【例5】有一喷泉，喷水管口的横截面积为S，流量（单位时间内流出水的体积）为Q，已知水的密度为ρ，重力加速度为g，假设喷出的水做竖直上抛运动，不计水流之间的相互作用和空气阻力的影响，则空中水的质量为（ ）

A. $\frac{\rho Q^2}{gS}$　　B. $\frac{2\rho Q^2}{gS}$　　C. $\frac{\rho Q^2}{2gS}$　　D. $\frac{4\rho Q^2}{gS}$

【答案】B

【例6】甲、乙、丙三个物体同时同地出发，6s末同时到达同一目的地，它们运动的“位移-时间”图像如图所示，则关于三者的路程s和位移大小x关系正确的是（ ）

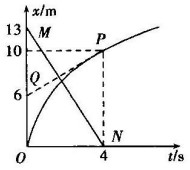


A，$s_{甲}>s_{丙}=s_{乙}$　　B. $s_{甲}>s_{丙}>s_{乙}$

C. $x_{甲}>x_{丙}>x_{乙}$　　D. $x_{甲}=x_{丙}>x_{乙}$

【答案】A

【例7】如图所示，图线op、MN分别是做直线运动的质点A、B的位移-时间图像，其中OP为开口向下抛物线的一部分，P为图像上一点。PQ为过P点的切线，与位移x轴交于点Q。则下列说法正确的是（ ）



A.$t=4$ s时，质点A的速率为3 m/s

B.质点A的加速度大小为0.25 m/s^2

C.质点A的初速度大小为6 m/s

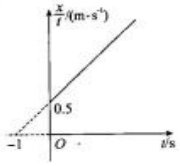
D.$t=2$ s时A、B相遇

【答案】D

【例8】一个物体沿直线运动，从t=0时刻开始，物体的位移x与运动时间t的关系如图所示，由此可知（ ）

A,物体做匀加速直线运动　　B,物体做变加速直线运动

C,物体的初速度大小为1m/s　　D,物体的加速度大小为0.5m/s^2



【答案】A

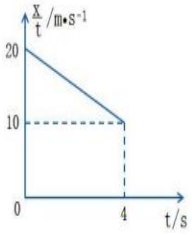
【例9】为检测某新能源动力车的刹车性能，现在平直公路上做刹车实验，如图所示是动力车在刹车过程中过程中位移和时间的比值$\frac{x}{t}$与t之间的关系图像，下列说法正确的是

A. 动力车的初速度为10 m/s

B. 刹车过程动力车的加速度大小为2.5 m/s^2

C. 刹车过程持续的时间为8 s

D. 从开始刹车时计时，经过8 s，动力车的位移为40 m



【答案】D

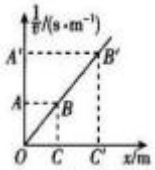
【例10】某质点做直线运动，运动速率的倒数$\frac{1}{v}$与位移x的关系如图，关于质点运动，下列说法正确的是（ ）

A.质点做匀加速直线运动

B.质点做匀减速直线运动

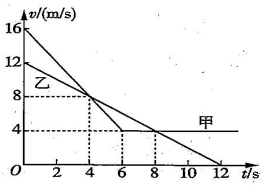
C. $\frac{1}{v}$-x图像的斜率等于质点运动的加速度

D.四边形 BB’C’C 的面积的物理意义是质点从 C 到 C’所用的时间。



【答案】D

【例 11】甲乙两车在同一水平道路上，一前一后相距 X=6m，乙车在前，甲车在后，某时刻两车同时开始运动，两车运动的速度 V-t 图，则两车有（　　）次相遇



【答案】3

【例 12】一辆客车从静止开始以加速度 $a=1.0\ \mathrm{m/s^2}$ 做匀加速直线运动的同时，在车的后面离车 $s=30\ \mathrm{m}$ 远的地方有一乘客正以某一速度 v 匀速追赶这辆车.

(1)要能追上这辆车,乘客的速度至少是多少?

(2)若已知客车司机通过观察后视镜能看到车后追赶的乘客离车的最远距离 $s_0=20\ \mathrm{m}$(即该乘客离车距离大于 20 m 就超出司机的视线范围)且需要在视线中出现的时间不少于 $t_0=1.0\ \mathrm{s}$,这样司机才能发现该乘客,并制动使客车停下来,该乘客要想乘坐上这辆客车,其追赶客车的速度的最小值是多少?

【解析】(1)能追上这辆客车的临界条件为人与车的速度相同,车的速度 $v=at$,

人的位移 $s_{人}=vt$,车的位移 $s_{车}=\frac{1}{2}at^2$,人追上车时有 $s_{人}-s_{车}=s$,

代入数据解得 $v=2\sqrt{15}\ \mathrm{m/s}$;

(2)从客车开始运动,经时间 t',客车前进 $s_1=\frac{1}{2}at'^2$,

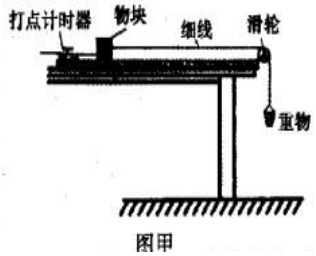
乘客运动的距离 $s_2=vt'$,由题意知 $s_1+s-s_2=s_0$,

联立得 $\frac{1}{2}at'^2+s-vt'-s_0=0$,整理得 $t'=\frac{v\pm\sqrt{v^2-2a(s-s_0)}}{a}$,

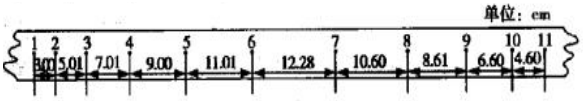
两根之差 $\Delta t=t_2'-t_1'=\frac{v+\sqrt{v^2-2a(s-s_0)}}{a}-\frac{v-\sqrt{v^2-2a(s-s_0)}}{a}$,

根据题意,有 $\Delta t\geqslant t_0$,代入数据解得 $v\geqslant 4.5\ \mathrm{m/s}$,最小值为 $4.5\ \mathrm{m/s}$.

【例 13】某同学利用图甲所示的实验装置，探究物块在水平桌面上的运动规律。物块在重物的牵引下开始运动，重物落地后，物块再运动一段距离停在桌面上（尚未到达滑轮处），从纸带上便于测量的点开始，每 5 个点取 1 个计数点，相邻计数点间的距离如图乙所示，打点计时器电源的频率为 50HZ。



图甲



图乙

(1)通过分析纸带数据,可判断物块在两相邻计数点_____和_____之间某时刻开始减速.

(2)计数点 5 对应的速度大小为_____m/s,计数点 6 对应的速度大小为_____m/s.(保留三位有效数字)

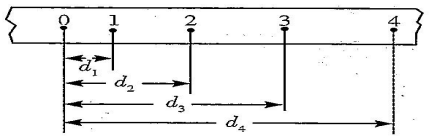
(3)物块减速运动过程中加速度的大小为 $a=$_____$\mathrm{m/s^2}$,若用$\frac{a}{g}$来计算物块与桌面间的动摩擦因数(g 为重力加速度),则计算结果比动摩擦因数的真实值_____(填“偏大”或“偏小”).

【答案】（1）6　7　（2）1.00　1.20　　（3）2.00　（4）偏大

【例 14】如图所示为匀加速直线运动的小车带动打点计时器打出的纸带，图中每相邻两点之间还有四个点没有画出，交流电的频率为 50HZ，测得第二个、第三个计数点与起点相距 d_2=6.00cm, d_3=10.00cm.则

（1）第一个、第四个计数点与起点相距 $d_1=$_____;$d_4=$_____.

（2）打点计时器打第一个、第二个计数点时小车的瞬时速度 $v_1=$_____,$v_2=$_____和小车的加速度 $a=$_____.



【答案】（1）$\frac{8}{3}$ cm　$\frac{44}{3}$ cm　（2）0.3m/s　0.367m/s　0.67m/s^2

第三章 相互作用-----力

第一部分 基础知识点

第 1 节　重力与弹力

一、力和力的图示

1.定义：力是物体与物体之间的相互作用。在国际单位制中，力的单位是牛顿，简称牛，符号是 N。

2.力的三要素：大小、方向、作用点。

力的大小用测力计(弹簧测力计)测量。力不仅有大小,而且有方向,要把一个力完全表达出来,还要说明它的方向。大小和方向都相同的力,作用在物体上的不同位置,即力的作用点不同,产生的效果一般不同。

3.力的基本性质

物质性	力不能脱离物体而独立存在
矢量性	力是矢量,既有大小,又有方向
相互性	任何两个物体之间的作用总是相互的,施力(受力)物体同时也一定是受力(施力)物体
独立性	一个力作用在物体上产生的效果,与这个物体是否受其他力无关

4.力的分类

(1)按力的性质分

重力、弹力、摩擦力、分子力、电磁力、核力等。按性质命名的力强调此力的特性。

(2)按力的效果分

拉力、压力、支持力、动力、阻力、回复力、向心力等。按效果命名的力强调力产生的效果，如改变运动或使物体发生形变。

⚠ 提醒

(1)不同效果的力，性质可能相同；同一性质的力，效果可能不同。如摩擦力可以是动力，也可以是阻力。

(2)对物体进行受力分析时，分析的是物体受到哪些“性质力”(按性质命名的力)，不要把“效果力”与“性质力”混淆，重复分析。

5.力的作用效果

力可以使物体发生形变，也可以改变物体的运动状态（速度），即产生加速度。

6.力的图示和力的示意图

(1)力的图示

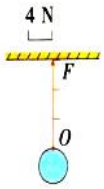
①定义：为了更形象、直观地表达力，我们可以用一条带箭头的线段来表示一个力的大小、方向和作用点(即力的三要素)，这种表示力的方法叫力的图示。

②画力的图示的步骤

a. 选定标度，用多长的线段表示多少牛的力。

a. 选定标度，用多长的线段表示多少牛的力。

b. 从作用点沿力的方向画一条线段，根据选定的标度和力的大小按比例确定线段的长度，并在线段上加刻度。

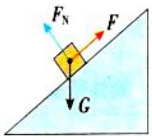


c. 在线段的一端加箭头表示力的方向，箭头或箭尾表示力的作用点，线段所在的直线叫力的作用线。

【提醒】（1）不能用不同标度画同一物体所受的不同的力。

（2）标度应根据力的大小合理设计。一般情况下，线段应取 2~5 段，不宜太多，也不可太少，不能小于 2 段。

(2)力的示意图：只需画出力的作用点和方向，按大致比例画出力的大小，称为力的示意图。



二、重力

1.定义：由于地球的吸引而使物体受到的力叫重力。

【拓展】(1)地球表面附近的物体都受到重力的作用。因此，受力分析时首先要分析重力。

(2)重力是由于地球的吸引而产生的，但不能说重力就是地球的吸引力。

(3)重力的施力物体是地球。

（4）重力只是万有引力的一分力（只有在两极位置两者才相同）。

2.重力的大小

(1)重力的大小由 $G=mg$ 计算，$g=9.8$ N/kg。

①g 是自由落体加速度，单位既可以是 N/kg，也可以是 m/s^2，且 1 N/kg=1 m/s^2。

②一般纬度越高 g 值越大，两极处最大；离地面越高，g 值越小。

③物体的重力大小与运动状态无关，与物体是否受其他力无关。

(2)重力的大小用弹簧测力计测量。将物体用弹簧测力计竖直悬挂，物体处于平衡状态(即静止或匀速直线运动状态)时，弹簧测力计的示数等于重力的大小。

3. 重力的方向：竖直向下（即垂直于水平面向下）

【垂直向下是指垂直于接触面】

4.重力和质量的关系

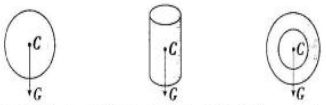
项目		质量	重力
区别	性质	物体本身的一种属性	是物体受到地球的引力的一个分力
	变化情况	不随地理位置的改变而发生变化	随着地理位置的不同而有所变化
	测量工具	天平（杠杆原理）	测力计（二力平衡原理）
	标矢性	标量	矢量
联系		$G=mg$，重力的大小由物体本身的质量和所处位置的重力加速度决定，与其他因素无关	

5.重力的作用点----重心

①一个物体的各部分都受到重力的作用，从效果上看，我们可以认为各部分受到的重力作用集中于一点，这一点叫物体的重心。

②重心的位置与物体的质量分布和形状有关。若一个物体的质量分布或形状发生变化，其重心位置一般也会发生变化。

③质量分布均匀、形状规则的物体的重心在其几何中心上。



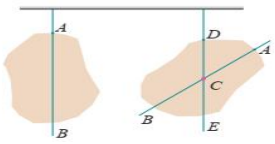
④物体的重心不一定在物体上，如篮球、足球等，它们的重心在球心，不在物体上。

⑥重心的位置与物体所在的位置及运动状态都无关。

【找不规则物体重心的方法】

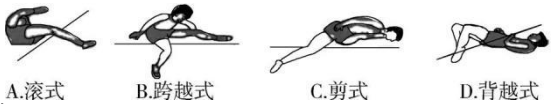
（1）悬挂法【适用于薄板（纸）型物体】

对于形状不规则的薄板物体。可采用悬挂法来确定物体的重心。



（2）支点法：用支点将薄板水平支起，当薄板水平静止时，支点处就可以认为是薄板的重心（也叫杠杆平衡法）。

【拓展 1】跳高运动员在如图所示的四种过杆姿势中，重心最接近甚至低于横杆的是 （ ）



A.滚式　B.跨越式　C.剪式　D.背越式

【答案】D

【拓展 2】如图所示，一被吊着的空心的均匀球壳内装满了细沙，底部有一带阀门的细管，打开阀门让细沙慢慢流出的过程中，球壳与球壳内剩余细沙组成的系统的重心将会（　　）



【答案】先下降后上升

二、形变

1.定义：物体在力的作用下形状或体积会发生改变，这种变化叫形变。

形变 {形状改变：拉伸、压缩、弯曲、扭转。
体积改变：海绵受压体积变小。

2.形变的分类

弹性形变	物体在发生形变后，撤去作用力能够恢复原状，如弹簧、橡皮筋等
塑性形变	物体在形变后，撤去作用力不能恢复原状，如橡皮泥的形变

【提醒】在中学阶段，我们所研究的形变都是指弹性形变。

3.弹性限度

若物体形变过大，超过一定限度，撤去作用力后，物体不能完全恢复原来的形状，这个限度叫弹性限度。例如，一根细弹簧，若用力过大，我们几乎可以将弹簧丝拉直，这就超过了弹性限度，此形变就不是弹性形变。

【观察微小形变的方法】------放大法

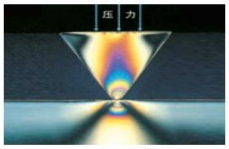
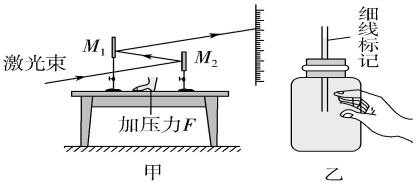


图 3.1-5　有机玻璃的形变



三、弹力【压力、拉力、推力、绳子的张力等都属于弹力】

（1）定义：发生弹性形变的物体，由于要恢复原状，对与它接触的物体产生力的作用。

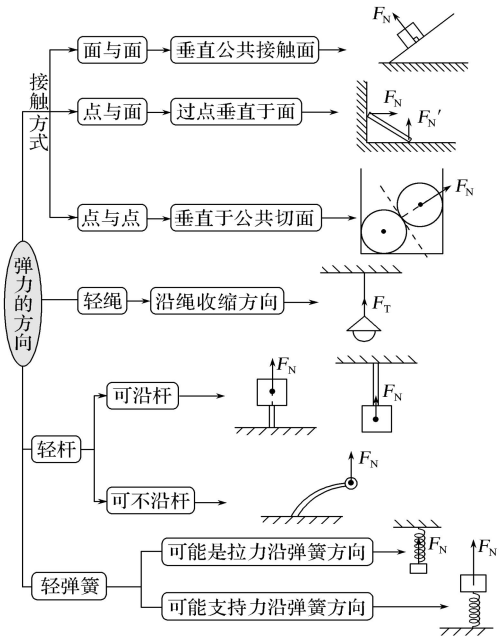
(2)产生条件：①直接接触②发生弹性形变。

【两个条件必须同时满足。】

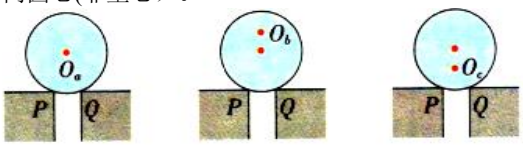
(3)弹力方向：与施力物体发生形变的方向相反。

【谁施力谁形变】

(4)常见模型中弹力的方向



【总结】面-面接触垂直于面；点--面接触垂直于面；点---点接触指向圆心(非重心）。



【如上图中的三种情况，弹力都指向圆心，且都相等，与重心位置无关】

【注意】弹力方向还可以根据共点力的平衡条件或牛顿第二定律判断。

（5）“三法”判断弹力的有无

(1) 条件法 — 根据弹力产生的两个条件——接触和弹性形变直接判断

(2) 假设法 — 假设两个物体间弹力不存在，看物体能否保持原有的状态。若运动状态不变，则此处可能不存在弹力；若运动状态改变，则此处一定有弹力

(3) 状态法 — 根据物体的运动状态，由平衡条件或牛顿第二定律进行判断

（6）计算弹力大小的方法

①弹簧、橡皮条等物体的弹力可以由胡克定律 F＝kx 计算。

②其他弹力可以根据物体的受力情况和运动情况，利用平衡条件或牛顿第二定律来确定大小。

【注意】一般物体的弹力与形变量不一定是正比关系，其关系为：形变量越大，产生的弹力越大。

四、胡克定律

1.胡克定律的内容：在弹性限度内，弹簧弹力 F 的大小跟弹簧的形变量 x 成正比。

2.公式：$F = kx$

式中 k 为弹簧的劲度系数，单位是牛顿每米，单位符号是 N/m。k 的大小由弹簧本身（材料、粗细、长度等）决定。x 表示弹簧长度的变化量（伸长量或缩短量），大小为|原长-现长|。

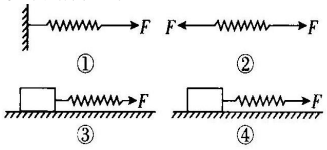
使用胡克定律时要注意：

(1)弹簧要在弹性限度内形变。

(2)x 为弹簧的伸长量或压缩量，并不是弹簧的长度。

(3)轻弹簧：即弹簧(或橡皮绳)的重力可视为零。

(4)弹簧发生形变时，可能被拉长，也可能被压缩，因此求弹簧的弹力时可能要分情况讨论。



【以上四种情况弹簧的形变量都相同】

(5)若把弹簧剪成两段长度相等的弹簧，则每段弹簧的劲度系数变成原来的 2 倍。

3.弹簧弹力的特性

(1)空间性：即弹力随形变（空间位置的变化）而变化，需要把长度（空间位置）的变化与力的大小结合起来考虑。

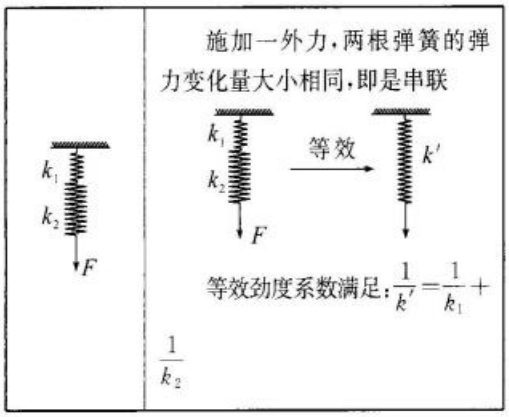
(2)对称性和双向性：即在弹簧形变量相同的条件下，伸长时和缩短时弹力大小相同，既能提供拉力，又能提供支持力。

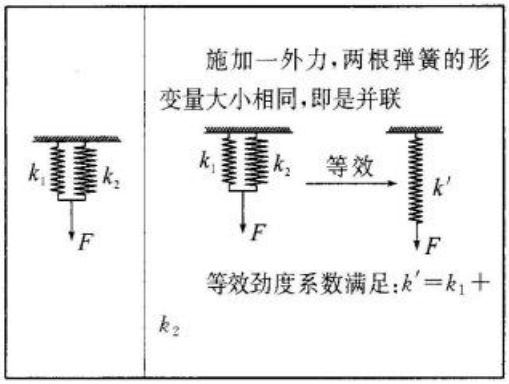
(3)**渐变性**：即弹力大小随弹簧长度的变化而逐渐变化，不会发生突变，这与轻绳模型瞬间变化有明显的差别。

4. 轻绳、轻杆、轻弹簧三种模型的比较

项目	轻绳	轻杆	轻弹簧
形变方向	拉伸	拉伸或压缩	拉伸或压缩
弹力效果	拉力	拉力或支持力	拉力或支持力
弹力方向	沿绳	不一定沿杆	沿弹簧轴线
形变量大小	形变不明显	形变不明显	有显著形变
弹力的瞬时性	可以突变	可以突变	不能突变
备注	①轻杆、轻弹簧与物体不固定连接时只能对物体产生支持力； ②弹簧测力计只能对物体施加拉力		

5.弹簧的串并联问题





6. 实验：探究弹簧弹力与形变量的关系

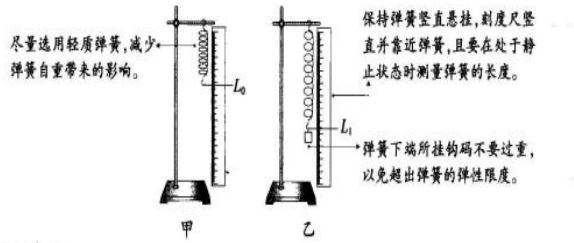
(1)**实验思路**：通过改变弹簧下端的钩码数量，控制弹簧产生的弹力，用刻度尺测量弹簧的形变量，由此探究弹簧弹力和形变量的定量关系。

(2)**实验过程**

①将弹簧的一端固定在铁架台的横杆上，让其自由下垂，用刻度尺测出弹簧自然状态的长度 L_0，即原长，如图甲所示。

②将钩码悬挂在弹簧的下端，平衡时测量弹簧的总长度 L_1，并计算钩码受到的重力，如图乙所示。弹簧的弹力等于钩码的重力。

③改变所挂钩码的个数，重复实验过程②多次。

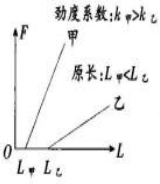


(3)**数据分析**

以弹力 F 为纵轴，以弹簧的伸长量 $x(x=L_n-L_0)$ 为横轴，用描点法作图，得出弹力 F 随弹簧伸长量 x 变化的图线。

(4)**另一种图像**

若作 F-L 图像（L 为弹簧总长），由 $F=kx=k(L-L_0)$ 知，图像的斜率表示劲度系数 k，横轴截距表示弹簧原长 L_0。



第 2 节　摩擦力

一、滑动摩擦力

1. **定义**：两个相互接触的物体，当它们相对滑动时，在接触面上会产生一种阻碍相对运动的力，这种力叫滑动摩擦力。

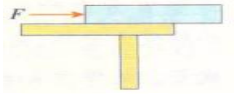
2.产生条件：①接触面粗糙②存在挤压（有弹力）③有相对运动

(3)**方向**：滑动摩擦力的方向总是沿着接触面（如果接触面是曲面，滑动摩擦力的方向与接触面相切），并且跟物体相对运动的方向相反。

(4)**大小**：$F_f=\mu F_N$。μ 是动摩擦因数，与接触面的材料、粗糙程度有关，与接触面的面积和物体运动速度无关。μ 没有单位。F_N 是两物体间的压力，F_N 不一定等于物体的重力。

【注意】

如图中，在木板发生翻转之前，滑动摩擦力大小不变（压力不变）



⚠ 提醒

“相对运动方向”可能与运动方向相同，也可能相反，“相对”是相对于接触物体来说。例如，在汽车启动的过程中，车内的物体可能相对汽车向后滑动，但在路边的人看来，物体总是向前运动的。

二、静摩擦力

1. **定义**：两个相互接触的物体之间只有相对运动的趋势，而没有相对运动，这时的摩擦力叫静摩擦力。

2. 产生条件

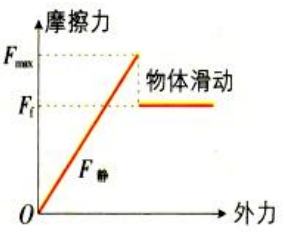
（1）相互接触的物体间有弹力。

（2）接触面粗糙。

（3）两物体有相对运动趋势。

3. 静摩擦力的大小

(1)静摩擦力的大小随运动趋势的强弱而变化，在 0 到最大静摩擦力 F_{max} 之间变化，即 $0<F_{静}\leq F_{max}$。



与相对运动趋势的强弱程度有关，与接触面间压力 F_N 无直接联系。

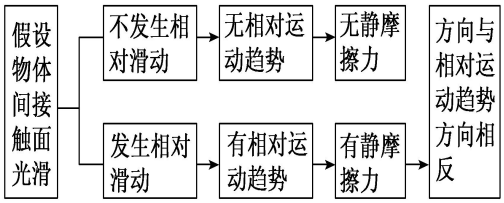
(2)静摩擦力的大小与压力无关，但最大静摩擦力的大小与压力成正比。最大静摩擦力略大于滑动摩擦力，若无特殊说明，可认为二者数值相等。

4. 静摩擦力的方向

静摩擦力的方向与接触面相切，并与物体相对运动趋势的方向相反。

5.静摩擦力的有无及方向的判断方法

(1)假设法



(2)状态法

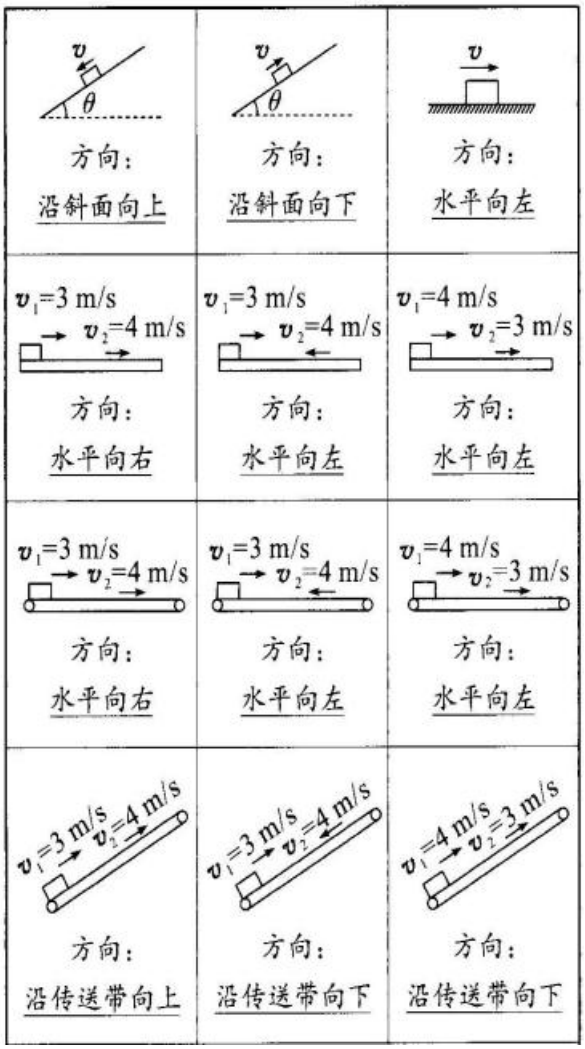
根据平衡条件、牛顿第二定律，判断静摩擦力的方向。

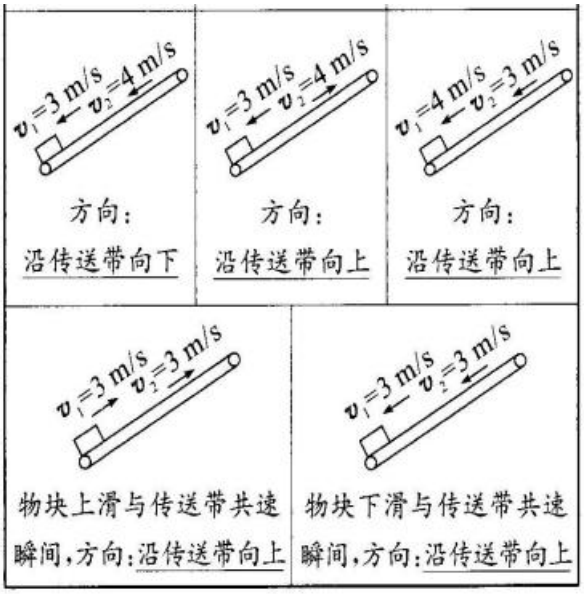
(3)牛顿第三定律法

先确定受力较少的物体受到的静摩擦力的方向，再根据“力的相互性”确定另一物体受到的静摩擦力方向。

三、摩擦力的常见问题

1.常见摩擦力方向的小结





【注意】1,弹力和摩擦力属于电磁相互作用

2,有摩擦力一定有弹力；但有弹力，不一定有摩擦力。

3.弹力和摩擦力的方向相互垂直。

2.摩擦力大小的计算（一定要先判断是动摩擦还是静摩擦）

摩擦力的计算流程



3.计算摩擦力大小时的“三点注意”

(1)公式 $F=\mu F_N$ 中的 F_N 是两个物体接触面上的压力，称为正压力(垂直于接触面的力)，性质上属于弹力，它不一定等于物体的重力，许多情况下需结合物体的平衡条件等加以确定。

(2)滑动摩擦力 F 的大小与物体的运动速度无关，与接触面积的大小无关。

(3)该公式适用于滑动摩擦力大小的计算。求静摩擦力的大小时，该公式不成立。静摩擦力的大小：$0<F\leqslant F_{max}$.

4.运动的物体可以受静摩擦力的作用，静止的物体也可以受滑动摩擦力的作用。

5.摩擦力常见误区

【误区一】误认为只有静止的物体才受静摩擦力，滑动摩擦力一定产生于运动的物体间。

【误区二】误认为摩擦力方向一定与物体的运动方向相反。

【误区三】误认为物体间压力越大，摩擦力越大。

【误区四】误认为摩擦力一定是阻力。

6.注意日常交通工具所受路面的摩擦力

(1)自行车在骑着行驶时，前轮受到的摩擦力向后，后轮受到的摩擦力向前。

(2) 自行车在推着行驶时，前后轮受到的摩擦力都向后。

加速时，驱动轮受到的摩擦力与加速方向相同，随动轮受到的摩擦力方向与运动方向相反；

减速时，驱动轮与随动轮的方向均与运动方向相反，从而阻碍车的运动，速度减慢.

（3）前轮驱动的汽车：（4）后轮驱动的汽车：

（5）四轮驱动的汽车【前后轮受到的摩擦力都向前】：

7.摩擦力的突变问题

（1）“静—静”突变

物体在摩擦力和其他力的作用下处于静止状态，当作用在物体上的其他力的合力发生变化时，如果物体仍然保持静止状态，则物体受到的静摩擦力的大小和方向将发生突变。

（2）“静—动”突变或“动—静”突变

物体在摩擦力和其他力作用下处于静止状态，当其他力变化时，如果物体不能保持静止状态，则物体受到的静摩擦力将“突变”成滑动摩擦力。

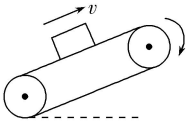
（3）“动—动”突变

某物体相对于另一物体滑动的过程中，若突然相对运动方向变了，则滑动摩擦力方向发生“突变”。

8.摩擦力方向与运动方向的三类关系

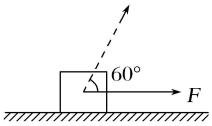
摩擦力的方向与物体间的相对运动或相对运动趋势方向相反，但与物体的实际运动方向可能相同、可能相反、也可能不共线。

(1)第一类：摩擦力方向与运动方向相同



如图所示，皮带运输机将物体匀速地送往高处，受到沿皮带向上的摩擦力作用。

(2)第二类：摩擦力方向与运动方向相反



(3)第三类：摩擦力方向与运动方向不共线

9. 立体空间的摩擦力问题---【基本方法：转化为平面图】

【典例 1】质量为 m 的物体静止地放在与水平面成 θ 角的粗糙斜面上，动摩擦因数为 μ，现在物体上加一个水平方向的力 F，如图所示，物体仍静止. 设最大静摩擦力等于滑动摩擦力，重力加速度为 g，求：

(1)此时物体所受摩擦力的大小；

(2)物体保持静止时 F 的最大值.



【答案】（1）摩擦力的大小为 $f=\sqrt{F_{f1}^2+F_{f2}^2}=\sqrt{F^2+(mg\sin\theta)^2}$.

(2)当物块受到的摩擦力达到最大值时，F 最大，由(1)可知物体受到的摩擦力为 $\sqrt{F^2+(mg\sin\theta)^2}$.

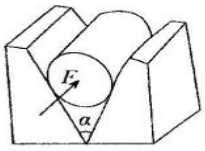
又最大静摩擦力等于滑动摩擦力，则

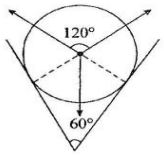
$F_{max}=\mu mg\cos\theta$，

即 $\sqrt{F^2+(mg\sin\theta)^2}=\mu mg\cos\theta$，解得

$F=mg\sqrt{\mu^2\cos^2\theta-\sin^2\theta}$.

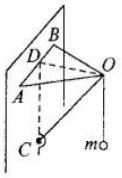
【典例 2】如图所示，在一个两侧底角均为α=60^{0}的 V 形槽中有一个所受重力为 $G=100$ N 的均匀圆柱体，圆柱体与槽之间的动摩擦因数为 $\mu=0.2$，要使圆柱体沿水平轴方向匀速运动，沿水平轴方向所加的推力应为多大？





【答案】40N

【典例 3】如图所示，A、B 为竖直墙面上等高的两点，AO、BO 为长度相等的两根轻绳，CO 为一根轻杆，转轴 C 在 AB 中点 D 的正下方，AOB 在同一水平面内，$\angle AOB=60°$，$\angle COD=60°$. 若在 O 点处悬挂一个质量为 m 的物体，则平衡时 （ ）



A. 绳 AO 所受的拉力大小为 $\frac{mg}{3}$

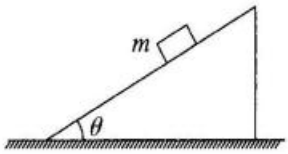
B. 绳 AO 所受的拉力大小为 $\frac{2\sqrt{3}mg}{3}$

C. 杆 OC 所受的压力大小为 $\frac{mg}{3}$

D. 杆 OC 所受的压力大小为 $\frac{2\sqrt{3}mg}{3}$

【答案】AD

10.关于斜面上物体所受摩擦力问题



【规律】

(1)若 $\mu>\tan\theta$，即最大静摩擦力大于“下滑力”，则物块可静止在斜面上；若 $\mu=\tan\theta$，即最大静摩擦力等于“下滑力”，则物块可静止在斜面上，也可沿斜面匀速下滑.

(2)以上几种情况下，斜面均不受地面摩擦力的作用.

第 3 节 牛顿第三定律

一、作用力和反作用力

(1)定义：两个物体之间的作用总是相互的，物体间相互作用的这一对力通常叫作用力和反作用力。把其中任意一个力叫作用力，另一个力就叫反作用力。

（2）作用力和反作用力的关系

相互性	作用力和反作用力总是相互的、成对出现的
同时性	作用力和反作用力总是同时产生，同时变化，同时消失
同质性	作用力和反作用力一定是同种性质的力。例如，作用力是摩擦力，反作用力也一定是摩擦力
异体性	作用力和反作用力分别作用在两个物体上，产生的效果（加速度、形变）不能抵消
普遍性	作用力和反作用力的关系适用于任何物体之间，与物体的运动状态无关，与参考系的选择也无关

（3）作用力与反作用力的“六同、三异、二无关”

①六同：大小相同、性质相同、同一直线、同时产生、同时变化、同时消失。

②三异：方向相反、不同物体、不同效果。

③二无关：与物体的运动状态无关、与物体是否受其他力无关。

二、牛顿第三定律

1 内容：两个物体之间的作用力和反作用力总是大小相等、方向相反、作用在同一条直线上。

2. 表达法

(1)$F=-F'$，负号表示两个力方向相反。

(2)定律中的“总是”强调对于任何物体，无论在什么情况下，一对相互作用力等大、反向、共线的关系都成立。即牛顿第三定律对于任何物体，在任何情况下都成立。

【特别提醒】 定律中的“总是”二字说明对于任何事物，在任何条件下牛顿第三定律都是成立的。

3.一对作用力和反作用力与一对平衡力的比较

内容 比较		一对作用力 和反作用力	一对平衡力
不同点	作用对象	作用在两个相互作用的物体上	作用在同一物体上
	依赖关系	相互依存，不可单独存在，同时产生，同时变化，同时消失	无依赖关系，撤除一个，另一个依然可存在
	叠加性	两力作用效果不可叠加，不可求合力	两力作用效果可相互抵消，可叠加，可求合力，且合力为零
	力的性质	一定是同种性质的力	可以是同种性质的力，也可以是不同种性质的力
相同点		大小相等、方向相反、作用在同一条直线上	

4.牛顿第三定律在受力分析中的应用

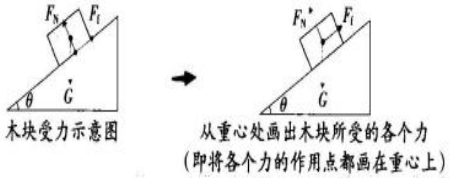
转换研究对象法在受力分析中的应用：转换研究对象法是将 A 物体作为研究对象无法求解结果时，可以选与 A 相互作用的 B 物体为研究对象进行求解的方法，该方法往往用到牛顿第三定律。

5.拔河问题总结：（1）地面光滑时，胜利属于质量大的人。

(2)地面粗糙时，谁与地面的最大静摩擦力大，谁获得胜利。

三、物体的受力分析

1.定义：把研究对象在给定的物理环境中受到的各个外力都分析出来，并画出物体的受力示意图的过程。



木块受力示意图　　从重心处画出木块所受的各个力（即将各个力的作用点都画在重心上）

2. 受力分析的步骤和技巧

受力分析是解题的开始，是分析物理问题的工具.进行受力分析应注意以下几个方面：

(1)明确研究对象(可以是一个点、一个物体或一个系统等).

(2)按顺序找力(一“重”、二“弹”、三“摩擦”、四“其他”).

(3)画好受力图后，要检查，防止多力和少力.

(4)受力分析口诀：地球周围受重力，绕物一周找弹力，考虑有无摩擦力，其他外力细分析，合力分力不重复，只画受力抛施力.

(5)在受力分析的过程中，要注意题目给出的物理条件(如光滑——不计摩擦；轻物——重力不计；运动时空气阻力忽略等).

(6)只分析根据性质命名的力(如重力、弹力、摩擦力等)，不分析按效果命名的力(如下滑力、动力、阻力等).

【向心力、回复力、合力等均为效果力】

(7)不能把作用在其他物体上的力通过“力的传递”作用在研究对象上.

（8）每分析一个力，都应找出施力物体。

【下滑力、惯性力、离心力高中阶段认为不存在】

【特别注意】

【作用力可能是某一个力，也可能为几个力的合力】

实验：探究作用力与反作用力的关系

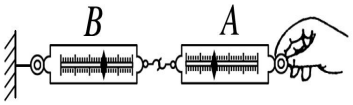
1.实验器材

弹簧测力计 3 个、包装用泡沫塑料（增强测力计的“记忆功能”）若干、小刀 1 把、木块 1 个、力传感器 2 只、数据采集器 1 台及计算机 1 台等.

2.实验原理

(1)用两只弹簧测力计探究作用力与反作用力的关系

利用如图所示的器材探究作用力与反作用力的关系．A、B 两个弹簧测力计连接在一起，B 的一端固定，用手拉弹簧测力计 A，可以看到两个弹簧测力计的指针同时移动.



(2)用传感器探究作用力与反作用力的关系

把力传感器连在计算机上，传感器的钩子上挂木块，钩子受力的大小随时间变化的情况，可以由计算机屏幕显示.

研究静止状态、匀速直线运动状态和加速或减速状态下作用力与反作用力之间的关系.

3.注意事项

(1)使用弹簧测力计和传感器前，都应调零.

(2)用弹簧测力计和传感器对接时作用力都应在同一直线上.

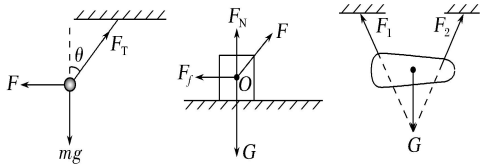
(3)实际的弹簧测力计往往存在一定的示值误差.

检测方法：将弹簧测力计 A 和 B 分别与弹簧测力计 C 互拉，通过与 C 的示数进行比较确定两弹簧测力计的拉力是否相等，是一种“等效替代”的方法.

第 4 节　力的合成与分解

一、共点力

1.定义：一个物体受到的力作用于物体上的同一点或者它们的作用线交于一点，这样的一组力叫共点力。（我们这里讨论的共点力，仅限于同一平面内的共点力）



2.力的作用线

经过作用点且沿力的方向所在的直线称为力的作用线，即力的图示中所在的直线。

二、合力与分力

1. 合力：假设一个力单独作用的效果跟几个力共同作用的效果相同，这个力就叫那几个力的合力。

2. 分力：假设几个力共同作用的效果跟某个力单独作用的效果相同，这几个力就叫那个力的分力。

3. 合力与分力的三个特点

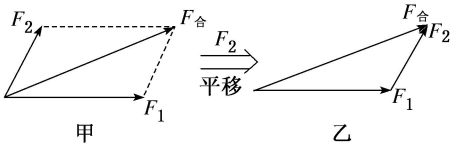


三、力的合成

(1)定义：求几个力的合力的过程叫力的合成。

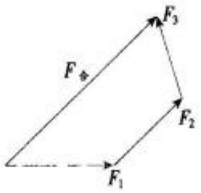
(2)平行四边形定则：求两个互成角度的共点力的合力，若以表示这两个力的有向线段为邻边作平行四边形，这两个邻边之间的对角线就代表合力的大小和方向。

(3)三角形定则：把两个矢量首尾相接，从第一个矢量始端指向第二个矢量末端的有向线段就表示合矢量。



（4）多边形定则：首尾顺次相连，从起点指向终点的连线即为合力。

可将三角形定则推广为多边形定则。几个矢量首尾相接，从第一个矢量始端指向最后一个矢量末端的有向线段表示合矢量。



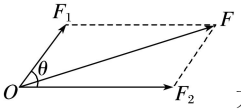
(5)两个共点力的合成：$|F_1-F_2| \leqslant F \leqslant F_1+F_2$。

即两个力的大小不变时，其合力随夹角的增大而减小，当两个力共线反向时，合力最小，为$|F_1-F_2|$；

当两力共线同向时，合力最大，为 F_1+F_2。

(6)当 F_1、F_2 夹角为θ时，则有

$$F=\sqrt{F_1^2+F_2^2+2F_1F_2\cos\theta}$$



方向：$\tan\alpha=\dfrac{F_1\sin\theta}{F_2+F_1\cos\theta}$

(7)三个共点力的合成。

①三个力共线且同向时，其合力最大为 $F=F_1+F_2+F_3$；

②以这三个力的大小为边，如果能组成封闭的三角形，则其合力最小值为零，若不能组成封闭的三角形，则合力最小值的大小等于最大的一个力减去另外两个力的大小之和。

四、实验：探究两个互成角度的力的合成规律

（一）**教材原型实验【等效替代法】**

1.**实验器材**

木板、白纸、图钉若干、两根细绳、橡皮条、弹簧测力计 2 个、**三角板**（作图时使用刻度尺，并借助三角板，使表示两力的对边保持平行）、刻度尺等.

2.**实验步骤**

(1)把木板平放在桌面上，用图钉把一张白纸钉在木板上.

(2)用图钉把橡皮条的一端固定在木板上的 A 点，橡皮条的另一端 B 拴上两个细绳套.

(3)用两个弹簧测力计分别钩住两个细绳套，互成角度地拉橡皮条，使橡皮条伸长，结点到达某一位置 O，如图 1 所示. 用铅笔描下结点 O 的位置和两个细绳套的方向，并记录弹簧测力计的读数 F_1、F_2，利用刻度尺和三角板根据平行四边形定则求出合力 F.

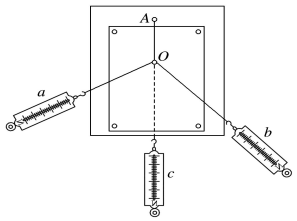


图 1

(4)只用一个弹簧测力计，通过细绳套把橡皮条的结点拉到与前面相同的位置 O，记下弹簧测力计的读数 F′ 和细绳套的方向.

(5)比较 F′ 与用平行四边形定则求得的合力 F，看它们在实验误差允许的范围内是否相同.

3.**注意事项**

(1)正确使用弹簧测力计，不能超量程，正确读数.

(2)在同一次实验中，使橡皮条拉长时结点的位置一定要相同.

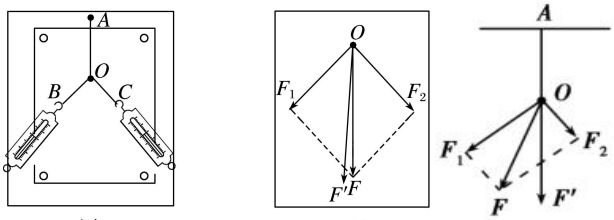
(3)用两个弹簧测力计钩住细绳套互成角度地拉橡皮条时，其夹角不宜太小，也不宜太大（60°-120°）.

(4)在同一次实验中，画力的图示选定的标度要相同，并且要恰当选定标度，使力的图示稍大一些.

(5)弹簧测力计拉动时要尽量与木板上表面平行.

【若弹簧测力计外壳与木板存在摩擦，不影响实验结果】

（6）若只有一只弹簧秤也可以完成该实验（通过 3 次实验操作）。



乙图中 F 为理论值，F’为实验值

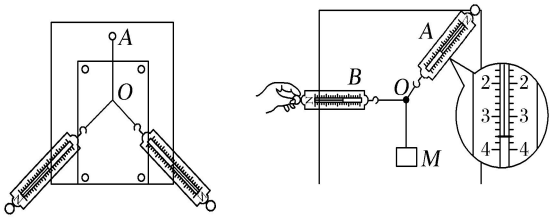
(7)**操作不忘“三”“二”“一”**

用两个弹簧测力计拉橡皮条时的“**三记录**”(记录两弹簧测力计示数、两细绳方向和结点 O 的位置)，用一个弹簧测力计拉橡皮条时的“**二记录**”(记录弹簧测力计示数和细绳方向)及“**一注意**”(结点 O 的位置必须在同一位置)等。

【实验拓展创新的两种方法】

以本实验为背景，以实验中操作的注意事项、误差来源设置条件，或通过改变实验条件、实验仪器设置题目。

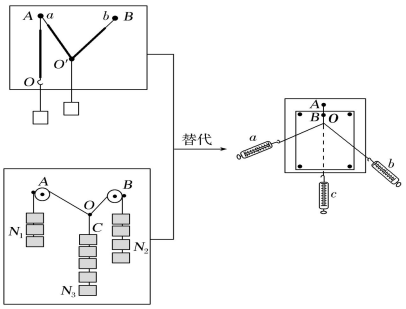
1.对实验原理的理解、实验方法的迁移



2.实验器材的改进

(1)橡皮筋$\xrightarrow{\text{替代}}$弹簧测力计

(2)钩码$\xrightarrow{\text{替代}}$弹簧测力计



五、力的分解

1.定义：求一个力的分力叫力的分解。力的分解同样遵循力的平行四边形定则。

2.力的分解方法

（1）按力的实际作用效果分解（如图所示）

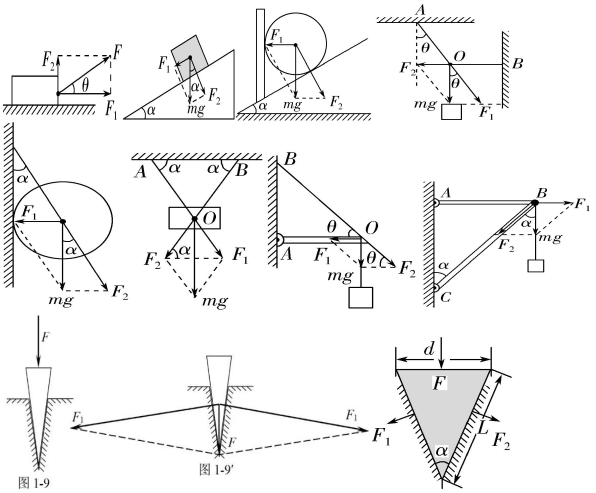
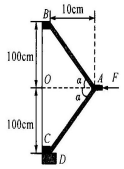


图 1-9

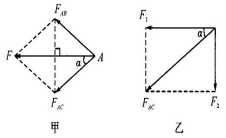
图 1-9'

【拓展】力的二次分解（可以解决生产、生活中的一些实际应用问题，如压榨机、千斤顶等，以“四两拨千斤”的机械）

例 1 榨油在我国已有上千年的历史，较早时期使用的是直接加压式榨油法。某压榨机的结构如图所示，B 为固定铰链，C 为滑块，可沿光滑壁移动，D 为被压榨的物体。已知 O 到 B 和 C 的距离均为 100cm，A 到直线 BOC 的距离是 10cm，当在铰链 A 处作用压力 F 时，物体 D 所受的压力多大？



例 1 图

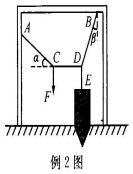


甲　　乙

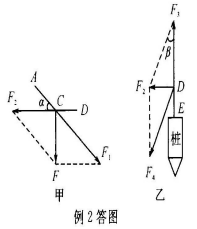
例 1 答图

【答案】5F

例 2 如图是常见的拔桩架示意图，绳 CD 水平，DE 竖直，绳 AC 与水平方向成 α 角（$\alpha<45°$），绳 BD 与竖直方向成 β 角（$\beta<45°$），若在 C 点施加竖直向下的力 F，则绳 DE 产生的拔桩力多大？



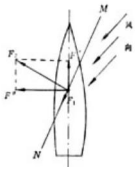
例 2 图



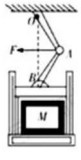
甲　　乙

例 2 答图

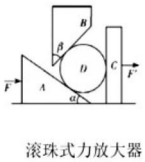
答案： $F'=F\cot\alpha\cdot\cot\beta$



“逆风”行船



压榨机



滚珠式力放大器

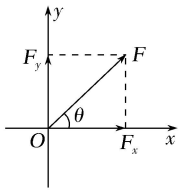
$\frac{F'}{F}=1+\cot\alpha\cot\beta$

（2）**正交分解法**

①定义：将已知力按互相垂直的两个方向进行分解的方法。

②建立坐标轴的原则：一般选共点力的作用点为原点。在静力学中，以少分解力和容易分解力为原则(即使尽最多的力落在坐标轴上)；在动力学中，一般以加速度方向和垂直加速度方向为坐标轴建立坐标系较为方便。

③应用：物体受到多个力作用 F_1、F_2、F_3…，求合力 F 时，可把各力沿相互垂直的 x 轴、y 轴分解。



x 轴上的合力：$F_x=F_{x1}+F_{x2}+F_{x3}+\cdots$

y 轴上的合力：$F_y=F_{y1}+F_{y2}+F_{y3}+\cdots$

合力的大小：$F=\sqrt{F_x^2+F_y^2}$

合力方向：与 x 轴夹角为θ，则 $\tan\theta=\frac{F_y}{F_x}$。

第 5 节　共点力的平衡

一、共点力平衡的条件

（1）平衡状态：物体保持静止或匀速直线运动状态，即 a=0.

（2）**共点力平衡的条件**：$F_{合}=0$

$$\begin{cases}F_{x合}=0\\F_{y合}=0\end{cases}$$

【特别提醒】　“静止”和“v=0”不是一回事，

$$v=0\begin{cases}a=0\text{ 时，是静止，是平衡状态}\\a\neq0\text{ 时，不是平衡状态}\end{cases}$$

二、平衡条件的推论

(1)如果物体在两个力的作用下处于平衡状态，这两个力必定大小相等、方向相反，为一对平衡力.

(2)如果物体在三个力的作用下处于平衡状态，其中任意两个力的合力一定与第三个力大小相等、方向相反.

(3)如果物体受多个力作用而处于平衡状态，其中任何一个力与其他力的合力大小相等、方向相反.

(4)当物体处于平衡状态时，沿任意方向物体所受的合力均为零.

【记忆口诀】

解力学题堡垒坚，受力分析是关键；

分析受力性质力，一重二弹三摩擦，

其他外力莫忘记，根据效果来处理。

第二部分　方法、规律与技巧

一、平衡问题常见处理方法

方法	内容
合成法	物体受三个共点力的作用而平衡，则任意两个力的合力一定与第三个力大小相等，方向相反
分解法	物体受三个共点力的作用而平衡，将某一个力按力的效果分解，则其分力和其他两个力满足平衡条件
正交分解法	物体受到三个或三个以上力的作用时，将物体所受的力分解为相互垂直的两组，每组力都满足平衡条件
力的三角形法	对受三力作用而平衡的物体，将力的矢量图平移使三力组成一个首尾依次相接的矢量三角形，根据正弦定理、余弦定理或相似三角形等数学知识求解未知力

二、动态平衡问题

1.**动态平衡**：通过控制某些物理量，使物体的状态发生缓慢的变化，而在这个过程中物体又始终处于一系列的平衡状态，在问题的描述中常用“缓慢”等语言叙述。

2.**基本思路**：化“动”为静，“静”中求动。

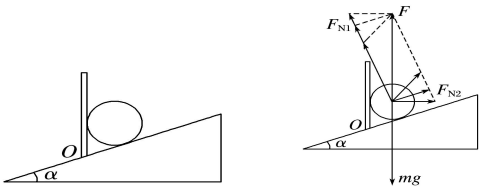
3.基本方法：

(1)图解法

此法常用于求解三力平衡且有一个力是恒力、另有一个力方向不变（适用于一力一夹角不变的情形）的问题。一般按照以下流程解题。

受力分析 → 化“动”为“静” → 画不同状态下的平衡图

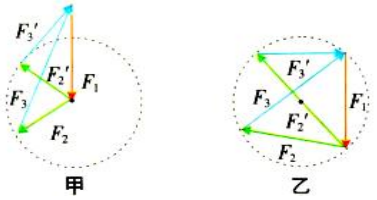
“静”中求“动” → 确定力的变化



(2)解析法

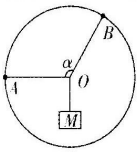
对研究对象进行受力分析，先画出受力示意图，再根据物体的平衡条件，得到因变量与自变量的关系表达式(适用于三力能围成直角三角形的情形）通常要用到三角函数，最后根据自变量的变化确定因变量的变化。

（3）动态圆（辅助圆法）：物体受三个共点力而平衡，①当其中一个力的大小、方向恒定，另一个力的大小恒定时，可借助辅助圆，如图甲所示。②当其中中一个力的大小、方向恒定，另外两个力的夹角恒定时，根据“同弧（弦）所对的圆周角相等”也可借助辅助圆，如图乙所示。



【典例 1】

(多选)如图所示，两根轻绳一端系于结点 O，另一端分别系于固定环上的 A、B 两点，O 点下面悬挂一物体 M，绳 OA 水平，拉力大小为 F_1，绳 OB 与 OA 夹角 $\alpha=120°$，拉力大小为 F_2. 将两绳同时缓慢顺时针转过 75°，并保持两绳之间的夹角 α 始终不变，且物体始终保持静止状态. 则在旋转过程中，下列说法正确的是 （　　）

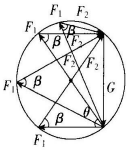


A. F_1 逐渐增大　　B. F_1 先增大后减小

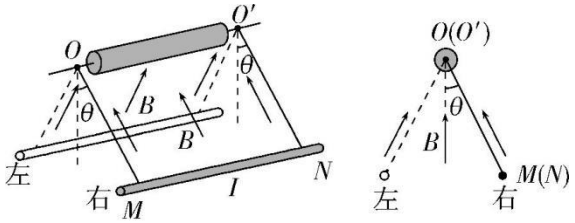
C. F_2 逐渐减小　　D. F_2 先减小后增大

【答案】BC

BC 【解析】解法一(“动态圆”法)：对结点 O 受力分析，受竖直向下的拉力(大小等于物体 M 的重力 G)，OA 的拉力 F_1，OB 的拉力 F_2，始终保持静止，合力为零，所以 G、F_1、F_2 构成封闭的矢量三角形，如图甲所示，由于重力以及 F_1 和 F_2 夹角 $\alpha=120°$ 不变，即 $\beta=60°$，当 $\theta=\beta=60°$，即 OB 绳水平时，F_1 为圆的直径最大，所以 F_1 先增大后减小，F_2 一直减小. 故 B、C 正确.



【典例 2】如图(a)，直导线 MN 被两等长且平行的绝缘轻绳悬挂于水平轴 OO'上，其所在区域存在方向垂直指向 OO'的磁场，与 OO'距离相等位置的磁感应强度大小相等且不随时间变化，其截面图如图(b)所示。导线通以电流 I，静止后，悬线偏离竖直方向的夹角为θ。下列说法正确的是(　　)



图(a)　　图(b)

A.当导线静止在图(a)右侧位置时，导线中电流方向由 N 指向 M

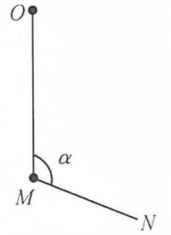
B.电流 I 增大，静止后，导线对悬线的拉力不变

C.tan θ与电流 I 成正比

D.sin θ与电流 I 成正比

【答案】D

典例 3：(2017·全国高考Ⅰ卷)如图所示，柔软轻绳 ON 的一端 O 固定，其中间某点 M 拴一重物，用手拉住绳的另一端 N。初始时，OM 竖直且 MN 被拉直，OM 与 MN 之间的夹角为 $\alpha\left(\alpha>\frac{\pi}{2}\right)$。现将重物向右上方缓慢拉起，并保持夹角 α 不变。在 OM 由竖直被拉到水平的过程中(　　)。



A. MN 上的张力逐渐增大

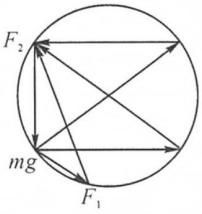
B. MN 上的张力先增大后减小

C. OM 上的张力逐渐增大

D. OM 上的张力先增大后减小

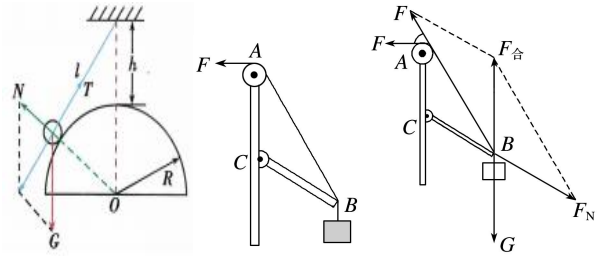
【答案】AD

解法 2：以重物为研究对象，受重力 mg，OM 绳上拉力 F_2，MN 上拉力 F_1，由题意知，三个力合力始终为零，矢量三角形如图所示，在 F_2 转至水平的过程中，MN 上的张力 F_1 逐渐增大，OM 上的张力 F_2 先增大后减小，所以 A、D 正确，B、C 错误。



(4)相似法（适用于多力多角变化的情形）

在三力平衡问题中，如果有一个力是恒力，另外两个力方向都变化，且题目给出了空间几何关系，多数情况下力的矢量三角形与空间几何三角形相似，可利用相似三角形对应边成比例进行计算。



三、平衡中的临界、极值问题

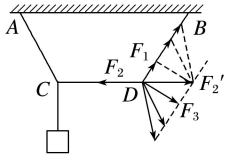
1.临界问题

当某物理量变化时，会引起其他几个物理量的变化，从而使物体所处的平衡状态“恰好出现”或“恰好不出现”，在问题的描述

中常用“刚好”“刚能”“恰好”等语言叙述。

2.极值问题

平衡物体的极值，一般是指在力的变化过程中的最大值和最小值问题。



【规律】

为使物体做匀速直线运动或匀加速直线运动，不论是斜面还是平面，斜拉力与速度方向成α角时（tan α=μ），斜拉力最小。

3.解题思路

解决共点力平衡中的临界、极值问题“四字诀”

定——确定研究对象，并对其受力分析

画——画出力的平行四边形或三角形

明——明确变量和不变量，结合数学规律对比分析

转——动态问题转化为静态问题

抽象问题转化为形象化问题

4.涉及极值、临界问题的三种解答方法

(1)图解法

根据平衡条件作出力的矢量图，如只受三个力，则这三个力构成封闭矢量三角形，然后根据矢量图进行动态分析，确定最大值和最小值。

(2)假设推理法

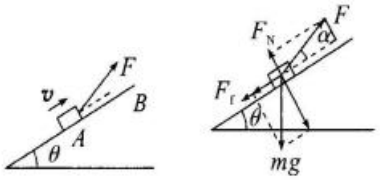
先假设某种临界情况成立，然后根据平衡条件及有关知识进行论证、求解。

(3)数学方法

根据物体的平衡条件列方程，在解方程时采用数学知识求极值。通常用到的数学知识有二次函数求极值、讨论公式求极值、三角函数求极值以及几何法求极值等。

【典例】如图所示，一质量为 m 的小物块在与斜面成某一夹角的拉力 F 的作用下，沿斜面向上做匀速运动，已知斜面倾角为 θ，物块与斜面之间的动摩擦因数为 μ，重力加速度为 g，求：

拉力 F 的最小值



联立解得 $F=\dfrac{mg\sin\theta+\mu mg\cos\theta}{\cos\alpha+\mu\sin\alpha}=\dfrac{mg\sin\theta+\mu mg\cos\theta}{\sqrt{1+\mu^2}\sin(\theta+\varphi)}$，且 $\tan\varphi=\dfrac{1}{\mu}$.

当 $\sin(\theta+\varphi)=1$ 时，F 取最小值 $\dfrac{mg\sin\theta+\mu mg\cos\theta}{\sqrt{1+\mu^2}}$.

总结

若物体在水平面上因受到斜向上外力牵引而做匀速运动，则牵引力的最小值 $F=\dfrac{\mu mg}{\sqrt{1+\mu^2}}$；

若物体在倾角为 α 的斜面上因受到外力牵引而沿斜面向上做匀速运动，则牵引力的最小值 $F=\dfrac{mg\sin\alpha+\mu mg\cos\alpha}{\sqrt{1+\mu^2}}$；

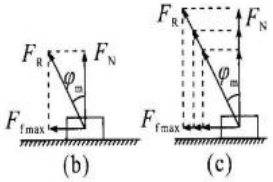
若物体做匀加速运动，则可利用“惯性力”，将匀加速运动等效为匀速运动求解.

规律总结：分母为 $\sqrt{1+\mu^2}$，分子为忽略外力 F 时的物体的合力.

【说明：本题应用“全反力”求解更方便】

四、全反力和摩擦角

“摩擦角”的定义：当物体处于滑动的临界状态时，静摩擦力 F_f 达到最大值 F_{fmax}（$F_{fmax}=\mu F_N$），此时最大静摩擦力 F_{fmax} 与支持力 F_N 的合力 F_R 与支持力 F_N 的夹角也最大，此时的 φ_m 称为摩擦角，其中 $\tan\varphi_m=\mu$，F_R 称为“全反力”，如图(b)所示.



当物体滑动时，给物体施加外力 F，物体受到的支持力 F_N 与地面的摩擦力 F_f（$F_f=\mu F_N$）等比例增大或减小，但支持力与摩擦力的合力 F_R 的方向仍沿着原来的方向，如图(c)所示.

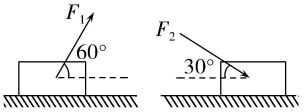
【规律小结】

1. f 和 N 等比例缩放，F_R 方向不变，$\tan\Phi=\mu$大小不变。

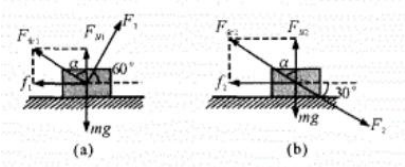
2. 适用于平衡类或非平衡类（匀变速）问题，适用于平面类或斜面类问题的求解。

【应用题例】

【典例 1】如图所示 ，一物块置于水平地面上，当用与水平方向成 60°角的力 F_1 拉物块时，物块做匀速直线运动；当改用与水平方向成 30°角的力 F_2 推物块时，物块仍做匀速直线运动. 若 F_1 和 F_2 的大小相等，则物块与地面之间的动摩擦因数为(**B**)



A. $\sqrt{3}-1$　　B. $2-\sqrt{3}$　　C. $\dfrac{\sqrt{3}}{2}-\dfrac{1}{2}$　　D. $1-\dfrac{\sqrt{3}}{2}$



解析：两次作用力下物块都向右做匀速直线运动，两次全反力大小不同但方向相同，受力分析如图 3 所示. 现将两次全反力 $F_{全}$，重力 mg 及拉力 F 矢量平移可得到如图 4 所示的矢量图.

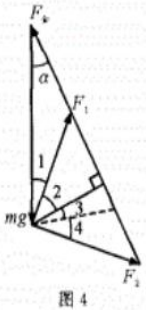


图 4

因　$\angle 2+\angle 3=60^\circ$

有　$\angle 1=30^\circ$

又因　$\angle 4=30^\circ$

则　$\angle 4+\angle 2+\angle 3=90^\circ$

由题意知 F_1，F_2 相等，则 F_1，F_2 关于垂线段对称. 则 $\angle 2=45^\circ$；所以全反角 $\alpha=15^\circ$. 即有

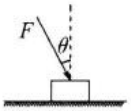
$$\mu=\tan\alpha$$

又　$$\tan 15^\circ=\frac{\sin 30^\circ}{1+\cos 30^\circ}$$

可解得　$\mu=2-\sqrt{3}$

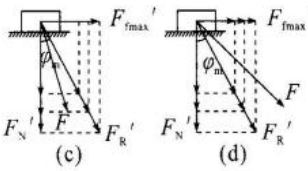
重力 mg 重合在同一竖直线上，如图 6(c) 所示，由于滑块沿斜面向下匀速滑动，显然拉力应该为零，选项 D 错误. 选项 A，B 分析略.

【典例 2】如图所示，一质量为 m 的物体静止放在粗糙的地面上，地面动摩擦因数 $\mu=0.75$. 现给物体施加一个外力 F，与竖直方向的夹角为 θ，当 θ 减小超过某一临界值 θ_0 时，无论外力 F 为多大，都不能使物体沿平面运动，最大静摩擦力等于滑动摩擦力，求这一临界角的大小.



【利用摩擦角解题】

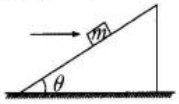
当外力 F 与竖直方向的夹角小于等于 φ_m 时，将 F 分解到水平方向与竖直方向，可以被对应的支持力与静摩擦力抵消，此时的摩擦力为静摩擦力，小于该力对应的最大静摩擦力，故物体不会运动，如图(c)所示.



当外力 F 与竖直方向的夹角大于 φ_m 时，将 F 分解到水平方向与竖直方向，无法被对应的支持力与摩擦力抵消，因为此时压力对应的最大静摩擦力小于 F 的水平分量，故物体无法保持静止，如图(d)所示.

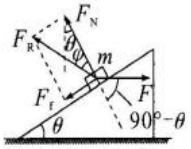
综上所述，只要 F 与支持力 F_N 间的夹角小于等于摩擦角 φ_m，物体就不会发生滑动，且 $\tan\varphi_m=\mu=0.75$，即 $\theta_0=37^\circ$.

【典例 3】如图所示，一质量为 m 的物体静止放在粗糙的斜面上，当斜面的倾角为 30° 时，物体恰好能匀速下滑，对物体施加一个大小为 F 的水平向右的恒力，物体可沿斜面匀速向上滑行，设最大静摩擦力等于滑动摩擦力，当斜面的倾斜角增大到某一临界值时，无论水平恒力 F 多大，都不能使物体沿斜面上滑，求斜面的临界倾斜角的大小.



解法一：利用“摩擦角”解题.

对物体进行受力分析，如图所示，当 F 与支持力 F_N 间的夹角小于等于摩擦角 φ 时，物体就不会发生滑动.



当斜面的倾角为 30°时，物体恰好能匀速下滑，故斜面的动摩擦因数为 $\mu=\tan 30^\circ=\frac{\sqrt{3}}{3}$.

由几何关系知 F 与支持力 F_N 间的夹角为 $(90^\circ-\theta)$.

摩擦角 φ：$\tan\varphi=\mu=\tan 30^\circ$，解得 $\varphi=30^\circ$.

当 F 与支持力 F_N 间的夹角小于等于摩擦角 φ 时，物体就不会发生滑动，即 $90^\circ-\theta\leqslant\varphi$，解得 $\theta\leqslant 60^\circ$.

综上所述，斜面的临界倾斜角为 60°.

五、自锁现象

由于存在摩擦力，因此会出现无论驱动力如何增大，也无法使物体运动的现象，这种现象称为机械自锁。特别注意：自锁现象与质量无关。

【典例】拖把是由拖杆和拖把头构成的擦地工具(如图 2-8-14). 设拖把头的质量为 m，拖杆质量可忽略；拖把头与地板之间的动摩擦因数为常数 μ，重力加速度为 g. 某同学用该拖把在水平地板上拖地时，沿拖杆方向推拖把，拖杆与竖直方向的夹角为 θ.



图 2-8-14

(1)若拖把头在地板上匀速移动，求推拖把的力的大小.

(2)设能使该拖把在地板上从静止刚好开始运动的水平推力与此时地板对拖把的正压力的比值为 λ. 已知存在一临界角 θ_0，若 $\theta\leqslant\theta_0$，则不管沿拖杆方向的推力多大，都不可能使拖把从静止开始运动. 求这一临界角的正切 $\tan\theta_0$.

【答案】（1）$\dfrac{\mu mg}{\sin\theta-\mu\cos\theta}$　　（2）tanθ=λ

六、整体法与隔离法

当物理情境中涉及物体较多时，就要考虑采用整体法和隔离法.

(1)整体法{研究外力对物体系统的作用 / 各物体运动状态相同

同时满足上述两个条件即可采用整体法.

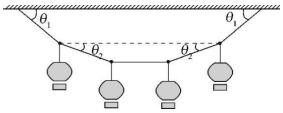
(2)隔离法{分析系统内各物体、各部分间的相互作用 / 各物体的运动状态不同

必须将物体从系统中隔离出来，单独地进行受力分析，列出方程.

(3)整体法和隔离法的交替运用

对于一些复杂问题，比如连接体问题，通常需要多次选用研究对象，这样整体法和隔离法要交替使用.

【典例 1】如图所示，由五根等长的轻质细绳悬挂起四个质量相等的灯笼，中间的细绳是水平的，另外四根细绳与水平面所成的角分别是θ_1和θ_2。关于θ_1和θ_2，下列关系式中正确的是(　　)



A.$\theta_1=\theta_2$　　B.$\theta_1=2\theta_2$

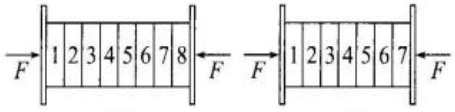
C.$\sin\theta_1=2\sin\theta_2$　　D.$\tan\theta_1=2\tan\theta_2$

【答案】 D

【典例 2】如图甲所示，有 8 个完全相同的砖块水平叠放在一起，砖块的质量为 m，在外力 F 的作用下将砖块夹在两块相同的木板之间，使砖块水平静止；若木板与砖块间的动摩擦因数为 $\mu_1=0.5$，砖块与砖块间的动摩擦因数为 $\mu_2=0.2$，最大静摩擦力等于滑动摩擦力，重力加速度为 g，求：

(1)水平外力 F 的最小值；

(2)若将 8 个砖块改成 7 个砖块，如图乙所示，水平外力 F 的最小值.

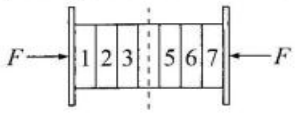


甲　　乙

【答案】（1）F 的最小值为 15mg.

（2）F 的最小值为 12.5mg.【第 2 问提示如下】

(2)将第 4 块砖分割成左、右两个相同的小砖块，则砖块的总数为偶数，将砖 1、2、3 与左侧小砖块看成一个整体，将右侧小砖块与砖块 5、6、7 看成另一个整体，两部分仍对称，故本题可等效成第(1)问进行分析.

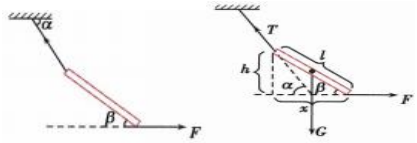


总结

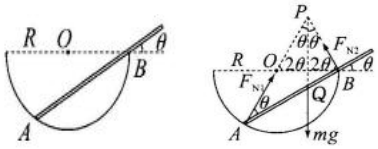
系统关于竖直方向完全轴对称，对称轴处无摩擦力，若例题中左、右两物体的质量不相同，则系统不关于竖直方向轴对称，此时两物体间存在摩擦力的作用.

七、三力汇交原理：

如果物体在三个力的作用下处于平衡状态，则这三个力必定共面，且这三个力必定相交于一点。

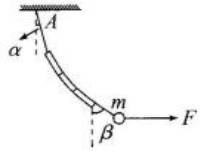


【典例 1】如图所示，质量为 m 的匀质细杆静止在光滑的半球碗中，碗的半径为 R，细杆与水平方向的夹角为θ=30^0，求细杆的长度。



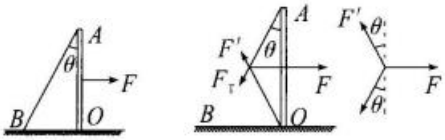
【答案】细杆的长度为$\dfrac{4\sqrt{3}}{3}$R .

【典例 2】如图所示，一根铁链一端用细绳悬挂于 A 点，为了测量这根铁链的质量，在铁链的下端用一根细绳系一质量为 m 的小球，待整个装置稳定后，测得两细绳与竖直方向的夹角分别为 α 和 β，若 $\tan\alpha:\tan\beta=1:3$，求铁链的质量.



【答案】M=2m

【典例 3】有一轻杆 AO 竖直放置于粗糙水平面上，A 端用轻绳系住，轻绳另一端固定于地面 B 点. 已知 θ 为 30°，若在 AO 杆的中点施加一大小为 F 的水平力，使杆处于静止状态，求这时地面对 O 端的作用力大小.



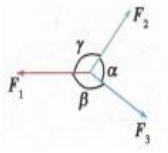
水平方向：$F'\sin 30°+F_T\sin 30°=F$，

竖直方向：$F'\cos 30°=F_T\cos 30°$，

联立解得 $F_T=F'=F$.

八、拉密定理

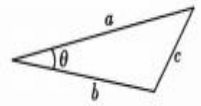
如图所示，质点在三个共点力作用下处于平衡状态时，其大小满足如下关系式：



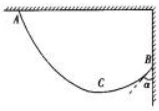
$\dfrac{F_1}{\sin\alpha}=\dfrac{F_2}{\sin\beta}=\dfrac{F_3}{\sin\gamma}$

九、余弦定理

有时还需用到余弦定理，如在图中，有 $c^2=a^2+b^2-2ab\cos\theta$。

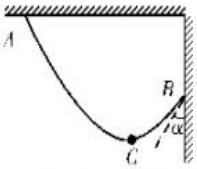


十、重绳与轻绳



【小结】轻绳的弹力一定沿绳子收缩的方向；重绳每点的弹力方向一定沿该点的切线方向。

【典例】如图所示，在墙角有一根质量为 m 的均匀柔软细绳，一端悬于天花板上的 A 点，另一端悬于竖直墙壁上的 B 点，平衡后最低点为 C 点，现测得 AC 段长度是 BC 段长度的两倍，且细绳在 B 端附近的切线与墙壁夹角为 α. 求绳在最低点 C 处的张力大小和在 A 处的张力.

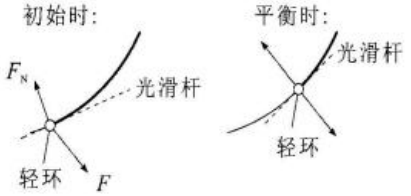


【答案】 $\frac{1}{3}mg\tan\alpha;\frac{mg}{9}\sqrt{4+\tan^2\alpha}$，与竖直方向夹角为 $\arctan\frac{\tan\alpha}{2}$

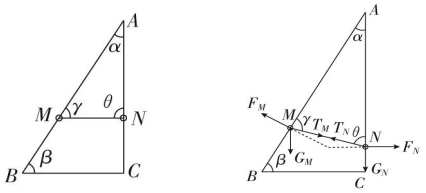
十一、重环与轻环

轻环：不计质量.重环：计质量（计重力）

当轻环套在光滑杆上受到外力牵引时，轻环会缓慢运动。当轻环静止时，外力应与轻环受到的弹力二力平衡，如图所示。

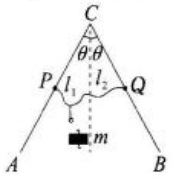


轻环静止的条件：杆对环的弹力与外力等大反向，即外力一定垂直杆或垂直杆的切线方向.



【注意】当 P,Q 为轻环时，则绳的弹力一定垂直于杆。

【典例】如图所示，ACB 是一光滑的、足够长的、固定在竖直平面内的“∧”形框架，其中 CA、CB 边与竖直方向的夹角均为 θ. P、Q 两个轻质小环分别套在 CA、CB 上，两根细绳的一端分别系在 P、Q 环上，另一端和一绳套系在一起，结点为 O. 将质量为 m 的钩码挂在绳套上，OP、OQ 两根细绳拉直后的长度分别用 l_1、l_2 表示，若 $l_1:l_2=2:3$，求两绳受到的拉力 $F_1:F_2$ 之比.



【答案】$F_1:F_2=1:1$

十二、死结与活结

（1）“死结”可理解为把绳子分成两段，且不可以沿绳子移动的结点。“死结”两侧的绳因结而变成了两根独立的绳，因此由“死结”分开的两段绳子上的弹力不一定相等（如图 1）。

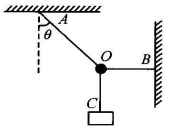


图 1

（2）“活结”可理解为把绳子分成两段，且可以沿绳子移动的结点。“活结”一般是由绳跨过滑轮或者绳上挂一光滑挂钩而形成的。绳子虽然因“活结”而弯曲，但实际上是同一根绳，所以由“活结”分开的两段绳子上弹力的大小一定相等，两段绳子合力的方向一定沿这两段绳子夹角的平分线（图 2）。

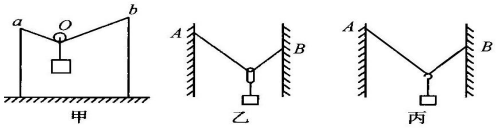


图 2

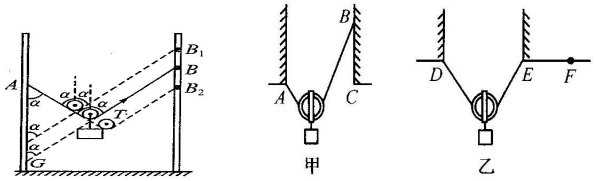
（3）活结问题讨论：

①如图 A 点固定，B 点缓慢上移或下移，求绳子的弹力的变化

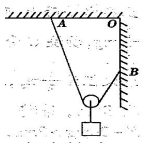
【不变】

②如图 A 点固定，杆子向左或向右平移，求绳子的弹力的变化

【左移变小，右移变大】

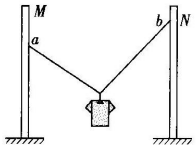


【典例 1】如图所示，将一条轻而柔软的细绳一端固定在天花板上的 A 点，另一端固定在竖直墙上的 B 点，A 和 B 到 O 点的距离相等，绳长为 OA 的两倍。滑轮的大小与质量均可忽略，滑轮下悬挂一质量为 m 的重物。忽略一切摩擦力，求平衡时绳中拉力的大小（$\frac{\sqrt{3}}{3}mg$）



【拓展】1. 若绳子有摩擦力

【典例 2】如图所示，轻质不可伸长的晾衣绳两端分别固定在竖直杆 M、N 上的 a、b 两点，a 点比 b 点低，晾衣绳粗糙，悬挂衣服的衣架钩在晾衣绳中点和在杆 M、N 中间位置时都不滑动。衣架静止，下列说法正确的是 （ ）



A.衣架钩在晾衣绳中点时,左、右两边绳子拉力大小相等

B.衣架钩在晾衣绳中点时,右边绳子拉力小于左边绳子拉力

C.衣架钩在杆 M、N 中间位置时,左、右两边绳子拉力大小相等

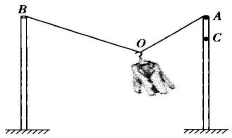
D.衣架钩在杆 M、N 中间位置时,右边绳子拉力大于左边绳子拉力

【提示】由于摩擦力的作用，相当于“死结”模型（即两拉力、两夹角可以不同

【答案】D

【拓展】2. 若衣服受到水平向右的恒定风力作用，则可把风力和重力等效成一个“等效重力”进行处理。

【典例 3】如图所示，晾晒衣服的绳子两端分别固定在两根等高的竖直杆上,绳子的质量及绳与衣架挂钩间摩擦均忽略不计。原来保持静止,一阵恒定的风吹来,衣服受到水平向右的恒力而发生滑动,并在新的位置保持静止。下列说法中正确的是 （ ）



A.在新位置时挂钩左右两边绳的拉力不再相等

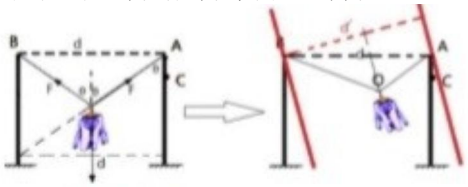
B.有风和无风两种情况下绳的拉力大小相等

C.有风和无风两种情况下,绳子的张角 $\angle AOB$ 保持不变

D.在有风的情况下,将绳子的右端从 A 点移到 C 点,则绳子的拉力变小

【答案】D

【提示】把重力与风力等效成一个力



十三、定杆与动杆

（1）定杆：如图 1，杆子在 B 点固定不动，此时杆对 C 点的弹力不一定沿杆的方向。

（2）动杆：如图 2，杆子可绕 H 点转动（或铰链相连），此时 G 点的弹力一定沿杆的方向。

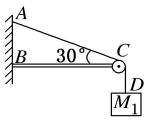


图 1

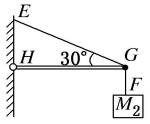
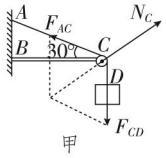
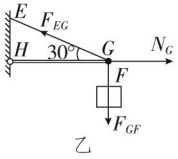


图 2



甲



乙

【记忆口诀】

力学问题方法多，整体隔离和假设；

整体只需看外力，求解内力隔离做，

状态相同用整体，否则隔离用得多，

图解相似解析法，处理动态最有效。

定杆动杆活死结，重轻绳杆要区分。

临界极值等问题，数学方法来解决，

正交分解选坐标，轴上矢量尽量多。

【本章高频考点】

1.以生活中物体（降落伞、叠加体、攀岩、晾衣服、打印出纸、劈柴、运送建筑材料、低头族等）受力分析或求解某一个力。

2.物体的动态平衡问题（考查图解法、相似法、解析法、数学方法）

3.多物体的平衡问题（考查整体法与隔离法）

4.各类模型（死结与活结、定杆与动杆、轻绳与重绳、轻环与重环）

5.力的合成实验。

第三部分 物理方法概述

一、合成法

三个力的平衡问题,一般将任意两个力合成,则合力与第三个力等大反向,从而得到平衡力的解题方法。

二、正交分解法

物体受多个力作用时,可将各力分解到 x 轴和 y 轴上,运用两坐标轴上的平衡条件 F_x=0、F_y=0 进行分析求解的方法。

三、图解法

图解法也叫图形法,是一种利用几何图形规律求解物理问题的方法。解答共点力作用下物体的动态平衡问题时经常用图解法。

四、整体法和隔离法

整体法就是把几个物体视为一个整体,受力分析时,只分析这一整体之外的物体对整体的作用力,不考虑整体内部物体之间的相互作用力。隔离法就是把要分析的物体从相关的物体系统中隔离出来,只分析该物体以外的物体对该物体的作用力,不考虑该物体对其他物体的作用力。

五、假设法

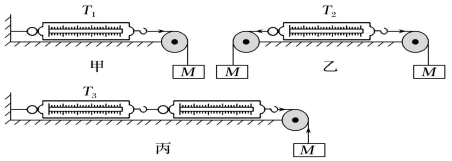
假设法是对于待求解的问题,在与原题所给条件不相违的前提下,人为地加上或减去某些条件,以使原题方便求解的方法。

六、相似三角形法

相似三角形法指的是在对物体进行受力分析(尤其是动态平衡过程)时找到两个相似三角形,其中一个三角形的边长表示长度(我们称之为“几何三角形”),另一个三角形的边长表示力的大小(我们称之为“矢量三角形”)的解题方法。

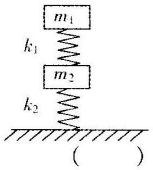
第四部分 易错、疑难题选

【例 1】在如图所示的甲、乙、丙三种情况中，砝码的质量均为 M，不计一切摩擦和弹簧秤的重力，则三个弹簧秤的示数 T_1、T_2、T_3 的关系是（ ）



【答案】$T_1=T_2=T_3$

【例 2】如图所示，劲度系数为 k_1 的弹簧两端分别与质量为 m_1、m_2 的物块相连,劲度系数为 k_2 的弹簧上端与质量为 m_2 的物块相连,整个装置放在水平地面上,开始时两物块都处于静止状态. 现缓慢用力提上面的物块,直到下面的弹簧刚离开地面时,上面物块移动的距离为(重力加速度为 g) （ ）

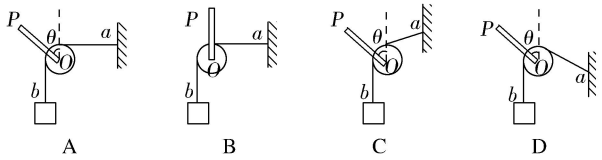


A. $\frac{(m_1+m_2)g}{k_1}$　　B. $\frac{(m_1+m_2)g}{k_1+k_2}$

C. $(m_1+m_2)g\left(\frac{1}{k_1}+\frac{1}{k_2}\right)$　　D. $\frac{(m_1+m_2)g}{k_2}$

【答案】C

【例 3】在如图所示的 A、B、C、D 四幅图中，滑轮本身的重力忽略不计，滑轮的轴 O 安装在一根轻木杆 P 上，一根轻绳 ab 绕过滑轮，a 端固定在墙上，b 端下面挂一个质量都是 m 的重物，当滑轮和重物都静止不动时，图 A、C、D 中杆 P 与竖直方向的夹角均为θ，图 B 中杆 P 在竖直方向上，假设 A、B、C、D 四幅图中滑轮受到木杆弹力的大小依次为 F_A、F_B、F_C、F_D，则以下判断中正确的是(　　)



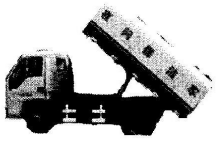
A　　B　　C　　D

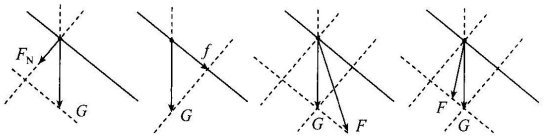
A．$F_A=F_B=F_C=F_D$　　B．$F_D>F_A=F_B>F_C$

C．$F_A=F_C=F_D>F_B$　　D．$F_C>F_A=F_B>F_D$

【答案】B

4. 为保障垃圾分类工作顺利进行，环卫部门一方面辛勤加班工作，一方面引进先进的设备，图示是自卸式夜间保洁车工作时的情景. 某次卸车时，车辆及底板保持静止，车上只有一个垃圾包，垃圾包沿倾斜的车厢底板正加速下滑，下列力的示意图中画出了垃圾包的重力 G、垃圾包对底板的压力 F_N、垃圾包对底板的摩擦力 f、垃圾包对底板的作用力 F，其中正确的是　(　　)





A　　B　　C　　D

【答案】D

【变式】如图为停在水平路面上的翻斗车将静止于车斗底部平面某处的箱子卸下。操控机械使车斗底部从水平开始缓慢倾斜，直至箱子开始做匀加速直线运动时随即保持倾斜程度不变，则箱子(　　)



A．相对车斗静止过程中，翻斗车对箱子的支持力大小保持不变

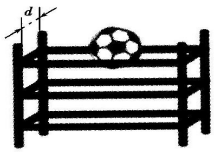
B．相对车斗静止过程中，地面对翻斗车的摩擦力一定大于翻斗车对箱子的摩擦力

C．箱子在车斗上做匀加速下滑过程中，地面对翻斗车的支持力不变

D．箱子在车斗上做匀加速下滑过程中，地面对翻斗车的摩擦力一定大于翻斗车对箱子的摩擦力

【答案】C

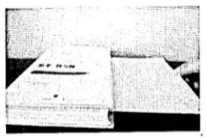
【例 5】如图，某同学将一足球静止摆放在收纳架上。他测得足球的直径约为20 cm，质量约为0.48 kg，收纳架两根平行等高的横杆之间的距离 d 约为 12 cm。忽略足球的形变以及球与横杆之间的摩擦，重力加速度 g 取 10 m/s^2，则可估算出一根横杆对足球的弹力约为　　(　　)



A.2.4 N　　B.3.0 N　　C.4.0 N　　D.4.8 N

【答案】B

6. 一本书重约6N，有424 页，书本正面朝上。现将一张 A4 纸夹在 106～107 页间，A4 纸能够覆盖几乎整个书页，如图所示。若要将 A4 纸抽出，至少需用约 1N 的拉力。不计书皮及 A4 纸的质量，则 A4 纸和书之间的摩擦因数最接近

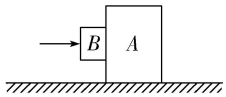


第 6 题图

A. 0.33　　B. 0.45　　C. 0.56　　D. 0.67

【答案】A

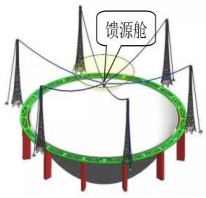
【例 7】如图，滑块 A 置于水平地面上，滑块 B 在一水平力作用下紧靠滑块 A(A、B 接触面竖直)，此时 A 恰好不滑动，B 刚好不下滑．已知 A 与 B 间的动摩擦因数为μ_1，A 与地面间的动摩擦因数为μ_2，最大静摩擦力等于滑动摩擦力．A 与 B 的质量之比为(　　)



A. $\frac{1}{\mu_1\mu_2}$　　B. $\frac{1-\mu_1\mu_2}{\mu_1\mu_2}$　　C. $\frac{1+\mu_1\mu_2}{\mu_1\mu_2}$　　D. $\frac{2+\mu_1\mu_2}{\mu_1\mu_2}$

【答案】B

8．如图所示为被誉为“中国天眼”的射电天文望远镜（FAST）示意图，质量为 3×10^4kg 的馈源舱用对称的六索六塔装置悬吊在球面镜正上方，相邻的两塔顶间水平距离为 300m，每根连接塔顶和馈源舱的绳索长 600m，不计绳索重力，可估算每根绳索承受的拉力大小为



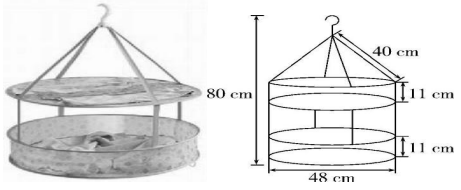
第 8 题图

A. 1×10^5N　　B. 3×10^4N

C. 4×10^5N　　D. 6×10^4N

【答案】D

【变式】图甲为挂在架子上的双层晾衣篮。上、下篮子完全相同且保持水平，每个篮子均由两个质地均匀的圆形钢圈穿进网布构成，两篮通过四根等长的轻绳与钢圈的四等分点相连，上篮钢圈用另外四根等长轻绳系在挂钩上。晾衣篮的有关尺寸如图乙所示，则图甲中上、下各一根绳中的张力大小之比为(　　)



甲　　乙

A. 1∶1　　B. 2∶1　　C. 5∶2　　D. 5∶4

【答案】C

【例 9】如图所示，攀岩者仅凭借鞋底和背部的摩擦停留在竖直的岩壁间，鞋子、背部与岩壁间的动摩擦因数分别为 0.80 和 0.60。为了节省体力，他尽可能减小身体与岩壁间的正压力，使自己刚好不下滑。假设最大静摩擦力等于滑动摩擦力，下列判断正确的是(　　)



A. 攀岩者受到三个力的作用

B. 鞋子受到的静摩擦力方向竖直向下

C. 岩壁对鞋子的支持力大于岩壁对背部的支持力

D. 攀岩者背部受到的静摩擦力支撑了体重的$\frac{3}{7}$

【答案】D

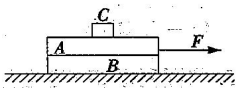
【例 10】如图所示，在水平桌面上叠放着质量相等的 A,B 两块木板，在木板 A 上放着质量为 m 的物块 C，木板和物块均处于静止状态。A，B,C 之间以及 B 与地面之间的动摩擦因数均为 μ，设最大静摩擦力与滑动摩擦力大小相等，重力加速度为 g，现用水平恒力 F 向右拉木板 A，则下列说法正确的是（　）

A.不管 F 多大，木板 B 一定保持静止

B.B 受到地面的滑动摩擦力大小一定小于 F

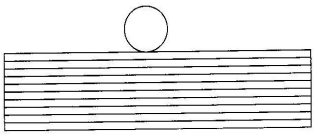
C.A、C 之间的摩擦力大小一定等于 μmg

D.A、B 之间的摩擦力大小不可能等于 F



【答案】A

【例 11】（多选）如图所示，水平放置的复印机纸盒里有 10 张叠放的复印纸,每一张纸的质量均为 m。摩擦轮竖直向下压第 1 张纸，并以一定的角速度逆时针转动。摩擦轮与第 1 张纸之间的动摩擦因数为 μ_1,纸张间的动摩擦因数均为 μ_2,且有 $\mu_1>\mu_2$。设最大静摩擦力与滑动摩擦力大小相等,则下列说法正确的是　　（　　）



A.第 1 张纸受到摩擦轮的摩擦力方向向左

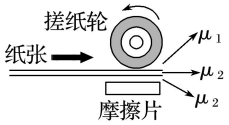
B.第 2 张纸受到的合外力为零

C.第 2 张纸到第 10 张纸之间不可能发生相对滑动

D.第 10 张纸不受第 9 张纸对它的摩擦力作用

【答案】BC

【例 12】 打印机是现代办公不可或缺的设备，正常情况下，进纸系统能做到“每次只进一张纸”，进纸系统的结构如图所示．设图中刚好有 10 张相同的纸，每张纸的质量均为 m，搓纸轮按图示方向转动时带动最上面的第 1 张纸匀速向右运动，搓纸轮与纸张之间的动摩擦因数为μ_1，纸张与纸张之间、纸张与底部摩擦片之间的动摩擦因数均为μ_2，重力加速度为 g，打印机正常工作时，下列说法正确的是(　　)



A．第 1 张纸受到搓纸轮的摩擦力方向向左

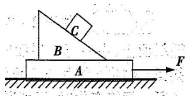
B．第 2 张与第 3 张纸之间的摩擦力大小为 $2\mu_2 mg$

C．第 10 张纸与摩擦片之间的摩擦力为 0

D．要做到“每次只进一张纸”，应要求$\mu_1>\mu_2$

【答案】D

【例 13】如图所示，物体 A,B,C 在外力 F 的作用下在水平面上向右做匀加速直线运动，则有关 A,B,C 三个物体的受力情况，下列说法中正确的是（　　）



A.物体 A 一定受 5 个力作用

B.物体 B 可能受 4 个力作用，也可能受 5 个力作用

C.物体 C 一定受 3 个力作用

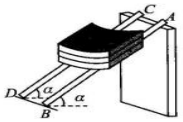
D.物体 A 可能受 4 个力作用，也可能受 5 个力作用

【答案】B

【例 14】在建筑工地上有时需要将一些建筑材料由高处送到低处，为此工人们设计了一种如图所示的简易滑轨：两根圆柱形木杆 AB 和 CD 相互平行，斜靠在竖直墙壁上，把一摞瓦放在两木杆构成的滑轨上，瓦将沿滑轨滑到低处。在实际操作中发现瓦滑到底端时速度较大，有可能摔碎，为了防止瓦被损坏，下列措施可行的是（　　）

A.减小两杆之间的距离　　B.增大两杆之间的距离

C.减小每次运送瓦的块数　　D.增多每次运送瓦的块数



【答案】B

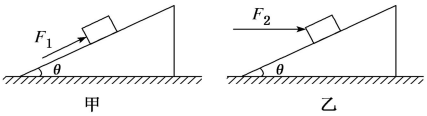
【例 15】如图黑板擦在手施加的恒力 F 的作用下匀速擦黑板。已知黑板擦与竖直黑板间的动摩擦因数为 μ，不计黑板擦的重力，则它所受的摩擦力的大小为（　　）



A. F　　B. μF　　C. $\frac{\mu F}{\sqrt{1+\mu^2}}$　　D. $\frac{\sqrt{1+\mu^2}}{\mu}F$

【答案】C

【例 16】如图所示，质量为 m 的物体置于倾角为θ的固定斜面上，物体与斜面之间的动摩擦因数为μ，先用平行于斜面的推力 F_1 作用于物体上使其能沿斜面匀速上滑，若改用水平推力 F_2 作用于物体上，也能使物体沿斜面匀速上滑，则两次的推力之比$\frac{F_1}{F_2}$为(　　)



【答案】$\cos\theta-\mu\sin\theta$

【例 17】

如图所示,风筝借助于均匀的风和牵线对其作用,在空中处于平衡状态。图中风筝质量 $m=0.5$ kg,某时刻风筝平面与水平面的夹角为 37°,主线 OA 对风筝的拉力与风筝平面成 53°角。已知风对风筝的作用力与风筝平面垂直,$\sin 53°=0.8$,$\cos 53°=0.6$,取 $g=10$ m/s^2。则此时主线 OA 对风筝的拉力 T 的大小和风对风筝的作用力 F 的大小为



A. $T=4$ N

B. $T=6.25$ N

C. $F=7$ N

D. $F=8$ N

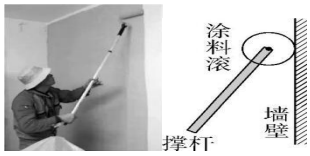
【答案】D

【例 18】发现,经常低头玩手机会引起各类疾病。当人体直立时,颈椎所承受的压力等于头部的重力;低头玩手机时,颈椎受到的压力会随之变化。现将人体头颈部简化为如图所示的模型,P 点为头部的重心,PO 为提供支持力的颈椎(视为轻杆),可绕 O 点转动,PQ 为提供拉力的肌肉(视为轻绳)。当某人低头时,PO、PQ 与竖直方向的夹角分别为 30°、60°,此时颈椎受到的压力与直立时颈椎受到的压力之比约为(　　)



【答案】$\sqrt{3}:1$

【例 19】如图甲,工人正使用“涂料滚”给墙壁粉刷涂料。如图乙,粉刷时工人手持撑杆使涂料滚沿竖直墙壁缓慢移动,若涂料滚在向上缓慢移动过程中对墙壁的压力大小保持不变,则(　　)



甲　　乙

A.涂料滚受到的摩擦力方向向上,大小不变

B.涂料滚受到的摩擦力方向向上,大小变大

C.涂料滚受到的摩擦力方向向下,大小变大

D.涂料滚受到的摩擦力方向向下,大小变小

【答案】C

【变式 1】

4. 如图为空调外挂机通过三角形支架固定在外墙上，如果空调重力作用线恰好通过横梁和斜梁的连接点 O，横梁和斜梁对点 O 施加的力分别沿 OA 和 OB 方向。保持连接点 O 位置不变，只减小斜梁长度，横梁仍然水平，下列说法正确的是（　　）

A. 横梁 OA 对点 O 的力不变

B. 横梁 OA 对点 O 的力变小

C. 斜梁 OB 对点 O 的力变小

D. 斜梁 OB 对点 O 的力变大



（第 4 题图）

【答案】D

【变式 2】

如图所示，将一个人字梯置于水平地面上，其顶部用活页连在一起，在两梯中间某相对的位置用两根轻绳系住。当小明先、后站在 A、B 两位置时，下述说法正确的是

A. 站 B 位置时梯子受地面的支持力大

B. 站 A 和 B 位置时梯子受地面的支持力一样大

C. 绳子不张紧时，站 A 位置时梯子所受地面的摩擦力大

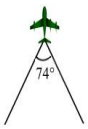
D. 绳子被张紧时，站 B 位置时梯子所受地面的摩擦力大



【答案】B

【变式 3】

航母阻拦索是航母阻拦装置的重要组成部分，实现了舰载机在有限长度的航母甲板上的安全着舰。一舰载机的质量 2×10^4kg，以速度 216km/h 着舰的同时其尾钩钩住阻拦索，此后舰载机视为匀减速直线运动，运动 90m 时速度为零，如图所示，某时刻两条阻拦索之间的夹角 74°，不计着舰过程中的其它阻力，cos37°=0.8，此时阻拦索上的弹力为



第 6 题图

A．2.5×10^5N　　B．5×10^5N

C．6.5×10^6N　　D．1.3×10^7N

【答案】A

【例 20】如图 1 所示，细绳 AD 跨过固定的水平轻杆 BC 右端的定滑轮挂住一个质量为 M_1 的物体，∠ACB＝30°；图 2 中轻杆 HG 一端用铰链固定在竖直墙上，另一端 G 通过细绳 EG 拉住，EG 与水平方向也成 30°，在轻杆的 G 点用细绳 GF 拉住一个质量为 M_2 的物体，求：

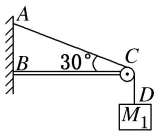


图 1

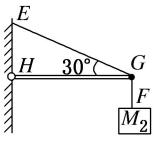


图 2

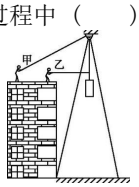
(1)细绳 AC 段的张力 F_{TAC} 与细绳 EG 的张力 F_{TEG} 之比；

(2)轻杆 BC 对 C 端的支持力；

(3)轻杆 HG 对 G 端的支持力。

【答案】(1)$M_1:2M_2$　(2)M_1g，方向与水平方向成 30°角指向右上方　(3)$\sqrt{3}M_2g$，方向水平向右

【例 21】小明老家自建五层用房时,看到建筑工人用一个简单装置将工件从地面提升并运送到楼顶,如图所示.若当重物提升到一定高度后,工人甲一直站在工人乙的身后拉紧绳索,工人乙通过一始终保持水平的轻绳将工件缓慢拉到楼顶,不计滑轮的摩擦力,则工件在向左移动过程中（　　）



A.楼顶对乙的摩擦力不变

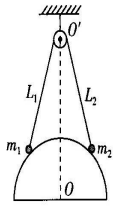
B.楼顶对甲的摩擦力大于楼顶对乙的摩擦力

C.绳索对甲的拉力不断减小

D.楼顶对甲的支持力不变

【答案】B

【例 22】表面光滑、半径为 R 的半球固定在水平地面上,球心 O 的正上方 O' 处有一无摩擦定滑轮,轻质细绳两端各系一个可视为质点的小球挂在定滑轮上,如图所示. 两小球处于平衡状态时,若滑轮两侧细绳的长度分别为 $L_1=2.4R$ 和 $L_2=2.5R$,这两个小球的质量之比为 $\frac{m_1}{m_2}$,小球与半球之间的弹力大小之比为 $\frac{N_1}{N_2}$,则以下说法正确的是　　（　　）



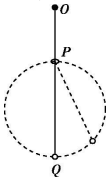
A. $\frac{m_1}{m_2}=\frac{24}{25}$　B. $\frac{m_1}{m_2}=\frac{25}{24}$　C. $\frac{N_1}{N_2}=1$　D. $\frac{N_1}{N_2}=\frac{24}{25}$

【答案】B

【例 23】如图所示,将质量为 m 的小球用橡皮筋(橡皮筋的拉力与伸长量的关系满足胡克定律)悬挂在竖直墙的 O 点,小球最终静止在 Q 点,P 为 O 点正下方的一点,O、P 间的距离等于橡皮筋原长,在 P 点固定一光滑圆环,橡皮筋穿过圆环.现对小球施加一个外力 F,使小球沿以 PQ 为直径的圆弧缓慢向上运动,不计一切摩擦阻力,重力加速度为 g.小球从 Q 点向 P 点运动的过程中(　　)

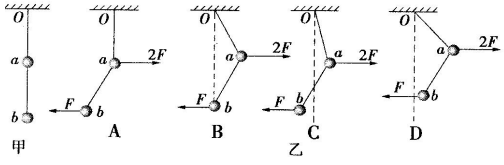
A.外力 F 逐渐减小　　B.外力 F 先变大再变小

C.外力 F 的方向始终水平向右　D.外力 F 的方向始终与橡皮筋垂直



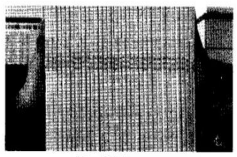
【答案】D

【例 24】两等长细绳连着两质量相等的小球 a,b,悬挂于 O 点，现在两小球上分别加上水平方向的外力 F,2F,则平衡时的可能位置为：（　　）



【答案】C

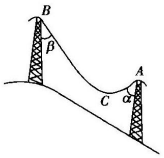
【例 25】
如图所示，一位同学用双手水平夹起一摞书，并停留在空中。已知手掌与书间的动摩擦因数μ_1=0.3，书与书间的动摩擦因数μ_2=0.2，设最大静摩擦力的大小等于滑动摩擦力大小。若每本书的质量为0.2kg，该同学对书的水平正压力为200N，每本书均呈竖直状态，则下列说法正确的是


第 6 题图

A. 每本书受到的摩擦力的合力大小不等
B. 书与书之间的摩擦力大小均相等
C. 他最多能夹住 42 本书
D. 他最多能夹住 60 本书

【答案】C

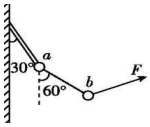
【例 26】如图所示，山坡上两相邻高压塔 A、B 之间架有匀质粗铜线，平衡时铜线呈弧形下垂，最低点在 C。已知弧线 BC 的长度是 AC 的$\sqrt{3}$倍，而左塔 B 处铜线切线与竖直方向成β=30°角，则右塔 A 处铜线切线与竖直方向成角α应为（　　）



A.30°　　B.45°　　C.60°　　D.75°

【答案】B

【例 27】如图所示，质量均为 m 的小球 a、b 之间用轻绳相连，小球 a 通过轻杆固定在左侧竖直墙壁上，轻杆与竖直墙壁的夹角为 30°，重力加速度为 g.现改变作用在小球 b 上的外力的大小和方向，轻绳与竖直方向的夹角保持 60°不变，则　　（　　）



A.轻绳上的拉力一定小于 mg

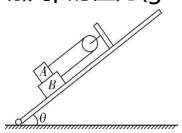
B.外力 F 的最小值为$\frac{\sqrt{3}}{2}mg$

C.轻杆对小球 a 的作用力方向不变

D.轻杆对小球 a 的作用力最小值为 $0.5mg$

【答案】B

【例 28】如图所示，一轻质光滑定滑轮固定在倾斜木板上，质量分别为 m 和 3m 的物块 A、B 通过不可伸长的轻绳跨过滑轮连接并静置于木板上，A、B 间的接触面和轻绳均始终与木板平行。A 与 B 间的动摩擦因数为μ，B 与木板间的动摩擦因数为 2μ，设最大静摩擦力等于滑动摩擦力。缓慢增加木板与水平面间的夹角θ至 37°时，物块 A、B 刚好要滑动，则μ的值为($g=10\ m/s^2$)（　　）



A.0.1　　B.0.15　　C.0.2　　D.0.25

【答案】B

【例 29】图甲为用等效替代法“验证力的平行四边形定则”的装置图

（1）本实验中“等效替代”的含义是_____.

A. 橡皮筋可以用细绳替代
B. 左侧弹簧测力计的作用效果可以替代右侧弹簧测力计的作用效果
C. 右侧弹簧测力计的作用效果可以替代左侧弹簧测力计的作用效果
D. 两弹簧测力计共同作用的效果可以用一个弹簧测力计的作用效果替代

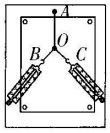
（2）请将下面实验的主要步骤补充完整.

①将橡皮筋的一端固定在木板上的 A 点，另一端拴上两根绳套，每根绳套分别连着一个弹簧测力计；

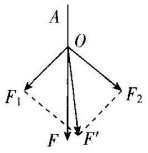
②沿着两个方向拉弹簧测力计，将橡皮筋的活动端拉到某一位置，记录_____，并记录两个拉力的大小及方向；

③再用一个弹簧测力计将橡皮筋的活动端也拉至 O 点，记录_____.

（3）如图乙所示，是某同学根据实验数据按照一定的标度（标度未画出）画出的力的图示.



甲



乙

F_1、F_2、F、F'中不是由弹簧测力计测得的力是_____（填字母）.

（4）在“验证力的平行四边形定则”的实验中，下列操作必要的是_____.

A. 实验前，将两个弹簧测力计相互钩住，水平反向拉伸，检查读数是否相同
B. 实验时，应保持绳套与纸面平行
C. 实验时，为便于计算，拉力 F_1 和 F_2 必须相互垂直
D. 确定拉力的方向时，应使两个点的距离尽量远一些

【答案】（1）D

（2）②结点 O 的位置　③拉力的大小及方向　（3）F'　（4）ABD

第四章 运动和力的关系

第一部分 基础知识点

第 1 节　牛顿第一定律

一、对力和运动关系的认识历程

(1)亚里士多德的观点：力是维持物体运动的原因。

(2)伽利略的观点：如果没有摩擦，水平面上的物体一旦具有某一速度，将保持这个速度永远运动下去。即力不是维持物体运动的原因。

(3)笛卡儿的观点：如果运动中的物体没有受到力的作用，它将继续以同一速度沿同一直线运动，既不会停下来，也不会偏离原来的方向。

二、牛顿第一定律

1. 内容：一切物体总保持匀速直线运动状态或静止状态，除非作用在它上面的力迫使它改变这种状态。



2. 成立条件

宏观、低速运动的物体，物体处于惯性参考系。

3. 意义

(1)**提示了运动和力的关系**：力是改变物体运动状态的原因（即力是产生加速度的原因），而不是维持物体运动的原因。

(2)**定义了惯性**：任何物体都具有保持原来运动状态的性质——惯性。

(3)牛顿第一定律指出了物体不受外力作用时的运动规律，它描述的只是一种理想状态，实际中不受外力作用的物体是不存在的，当物体所受合力为 0 时，其效果跟不受外力作用时相同。因此，我们可以把“不受外力作用”推广为“合力为 0”。

三、惯性与质量

(1)定义:物体保持原来匀速直线运动状态或静止状态的性质叫惯性。

(2)对惯性的理解　　质量是惯性大小的唯一量度。

①惯性是物体的一种固有属性,任何物体在任何状态下都具有惯性。

②惯性的大小只与物体的质量有关。质量大的物体惯性大,质量小的物体惯性小。

③惯性不是力,不能说"物体受到惯性""惯性力""由于惯性作用"等。

④惯性大小反映了物体运动状态改变的难易程度。惯性大,运动状态难改变;惯性小,运动状态易改变。

⑤物体的惯性总是以"保持原状"或"反抗改变"两种形式表现出来。

(3)对质量的再认识

①质量:描述物体惯性的物理量是它的质量。　从物质的角度:质量是物体所含物质的多少。

②标矢性:质量是标量,只有大小,没有方向。

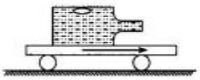
③单位:在国际单位制中,质量的单位是千克,符号是kg。

四、惯性参考系

(1)定义:如果在一个参考系中,一个不受力的物体会保持匀速直线运动状态或静止状态,这样的参考系叫惯性参考系,简称惯性系。

(2)实例:以地面或相对于地面静止或做匀速直线运动的物体为参考系,都是惯性系。

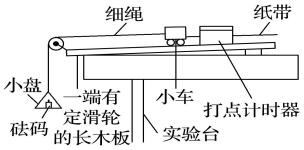
【典例】做匀速直线运动的小车上水平放置一密闭的装有水的瓶子，瓶内有一气泡，当小车突然停止运动时，分析气泡相对于瓶子的运动方向。



【答案】气泡相对于瓶向后运动

第 2 节　实验：探究加速度与力、质量的关系

一．**实验装置如图所示**

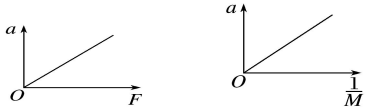


二．**实验原理：采用控制变量法**

探究加速度与力的关系时，应保持小车的质量不变；探究加速度与质量的关系时，应保持小车所受拉力不变，即保持悬挂盘中砝码(或砂)的质量不变.

三．**数据处理：图象法**

(1)保持小车质量一定时，作 a－F 图象，若图象是一条通过原点的直线，则说明 a 与 F 成正比，如图所示.



(2)保持拉力一定时，作 a－$\frac{1}{M}$图象，若图象是一条过原点的直线，则说明 a 与 M 成反比，如图所示.

四．**注意事项**

1.**平衡摩擦力：**在平衡摩擦力时，不要悬挂小盘，但小车应连着纸带且接通电源。用手给小车一个初速度，如果在纸带上打出的点的间隔是均匀的，表明小车受到的阻力跟它的重力沿斜面向下的分力平衡。

2.**不重复平衡摩擦力：**平衡了摩擦力后，不管以后是改变小盘和砝码的总质量还是改变小车和砝码的总质量，都不需要重新平衡摩擦力。

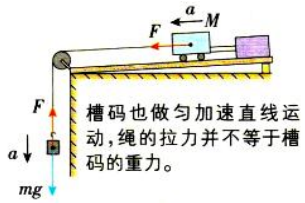
3.**实验条件：**M≫m。实验中始终要求槽码的总质量远小于小车和砝码的总质量。前者的总质量最好不要超过后者的 $\frac{1}{10}$.只有这样，槽码的总重力才能近似视为小车受到的拉力。故纸带的加速度较小【一般小于 1 m/s²】

4.**一先一后一按住：**改变拉力和小车质量后，每次开始时小车应尽量靠近打点计时器，并应先接通电源，后放开小车，且应在小车到达滑轮前按住小车。

5.**作图：**作图时两轴标度比例要适当，各量须采用国际单位，这样作图线时，坐标点间距不至于过密，误差会小些。

五.**误差分析**

1.因实验原理不完善引起的误差：本实验用小盘和砝码的总重力 mg 代替小车的拉力，而实际上小车所受的拉力要小于小盘和砝码的总重力。

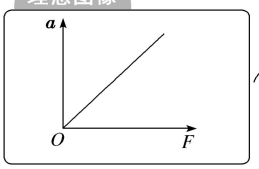


对小车和槽码分别应用牛顿第二定律有 $F=Ma$，

$mg-F=ma$，联立可得 $F=\frac{mg}{1+\frac{m}{M}}$，可见只有当 $M\gg m$ 时，$F\approx mg$。

2.摩擦力平衡不准确、质量测量不准确、计数点间距测量不准确、纸带和细绳不严格与木板平行都会引起误差。

理想图像



图像是一条过原点的直线，可判断 $a\propto F$。

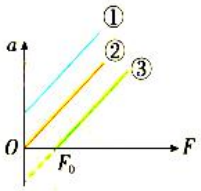
实际图像

【点拨】关于平衡摩擦力的图像

(1)图线①说明平衡摩擦力过度(F=0 时,已产生加速度)。

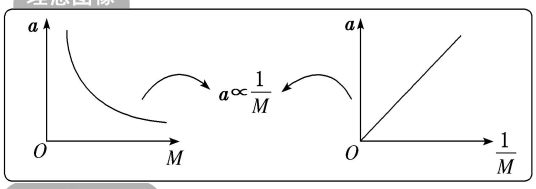
(2)图线②说明平衡摩擦力合适。

(3)图线③说明未平衡摩擦力或平衡摩擦力不足(拉力大于 F_0 时,才产生加速度)。



根据多组(a, M)数据作出 $a-M$ 和 $a-\frac{1}{M}$ 图像。

理想图像



实际情况分析

图像解析式为 $a=\frac{1}{M}\cdot\frac{mg}{1+\frac{m}{M}}$

可见连接数据点和坐标系原点的直线斜率为 $\frac{mg}{1+\frac{m}{M}}$。

若 m 为定值，则随着 M 的减小，此斜率会减小，当 M 不再远大于 m 时，图像向下弯曲。

M 无限增大时，小车具有非零的加速度 a

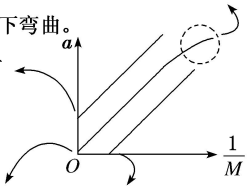
↓

平衡摩擦力过度

M 无限增大时，a 无限减小；M 为有限值时，$a\neq 0$，M 为无穷大时，$a=0$

↓

摩擦力被平衡



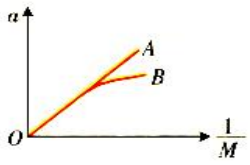
当 M 减小到某值时，小车才具有非零的加速度 a

↓

平衡摩擦力不足或没有平衡摩擦力

【点拨】关于图线弯曲的问题

理论上 $a-\frac{1}{M}$ 图像为图线 A；当不能满足 $M\gg m$ 时，图线会出现弯曲，如图线 B。



六.实验拓展创新

1.实验器材的改进

(1)气垫导轨(不用平衡摩擦力)$\xrightarrow{\text{替代}}$长木板(如图 1)

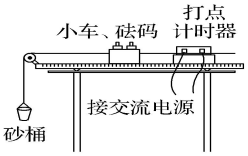


图 1

(2)利用光电门测速度(如图 2)

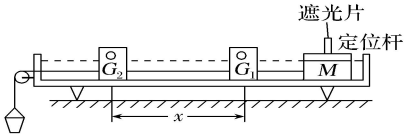


图 2

(3)利用位移传感器测位移(如图 3)

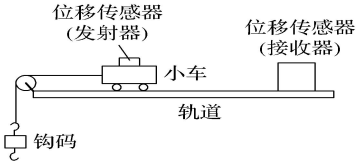
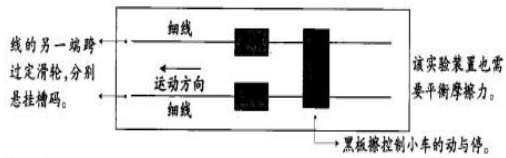


图 3

（4）通过位移之比测量加速度之比

①原理：如果测出两个初速度为 0 的匀加速直线运动在相同时间内发生的位移 x_1、x_2，则位移之比等于加速度之比，即 $\frac{x_1}{x_2}=\frac{a_1}{a_2}$。

②保持两小车质量相同，分别悬挂不同的槽码，抬起黑板擦，两小车同时开始运动；按下黑板擦，两小车同时停下来。分别测出两小车移动的位移 x_1、x_2，则 $\frac{a_1}{a_2}=\frac{x_1}{x_2}$。



③在悬挂槽码相同的情况下，通过增减小车中的重物，使两小车质量不同，用同样的方法测出两小车移动的位移 x_1'、x_2'，则 $\frac{a_1'}{a_2'}=\frac{x_1'}{x_2'}$。

④由此研究 a 与 F、a 与 M 的关系。

2.数据测量的改进

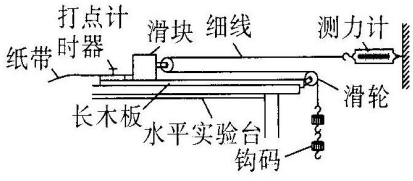
测定通过的时间，由 $a=\frac{1}{2x}\left[\left(\frac{d}{t_2}\right)^2-\left(\frac{d}{t_1}\right)^2\right]$ 求出加速度

小车的加速度由位移传感器及与之相连的计算机得到

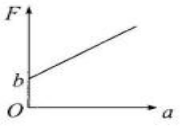
替代 → 通过打点纸带求加速度

3.实验的拓展延伸

以“探究加速度与力、质量的关系”为背景测量物块与木板间的动摩擦因数。【不能平衡摩擦力】



实验原理：改变钩码的质量，测得多组数据，作出 $F-a$ 图像，如图所示。



对小车进行受力分析，由牛顿第二定律得

$F-F_f=ma$，解得 $F=\frac{m}{2}a+\frac{\mu mg}{2}$，

由图像截距得 $b=\frac{\mu mg}{2}$，解得 $\mu=\frac{2b}{mg}$。

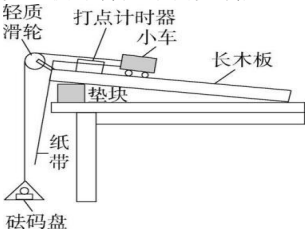
七.关于是否需要平衡摩擦力和满足 M>>m 的问题

以下三种情况都不需要满足 M>>m.其中（1）不需要平衡摩擦力，但（2）和（3）变式需要补偿阻力，即平衡摩擦力。

（1）如图所示装置，调节砝码盘和砝码的总质量 m，使小车匀速下滑。去掉 m，使小车下滑，则有 Ma=mg.

（挂上 m，小车匀速下滑时满足：Mgsinθ=f+mg;去掉 m 时，满足：$F_{合}$ =Mgsinθ-f=ma，联立得 Ma=mg.）

【该变式既不需要平衡摩擦又不需要满足 M》m】



【典例 1】

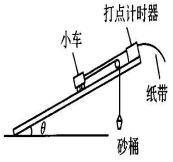
在探究“加速度与力和质量的关系”实验时，某老师对传统实验进行了改进，其实验操作如下：

①如图所示，先将砂和砂桶通过滑轮悬挂于小车一端，调节平板的倾角 θ，使小车沿斜面向下做匀速直线运动，测出砂和砂桶的总质量 m；

②保持平板倾角 θ 不变，去掉砂和砂桶，小车即在平板上沿斜面向下做匀加速直线运动，通过纸带测量其加速度 a；

③保持小车质量 M 不变，多次改变砂和砂桶的总质量 m，每次重复①②两步操作，得到小车加速度与合力的关系；

④多次改变小车的质量，进行适当的操作，得到小车加速度和质量的关系。



第 2 题图

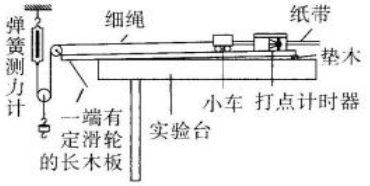
(1)在操作②中，小车所受的合力大小等于_____(用题中所给定的字母以及重力加速度 g 表示)；

(2)在本实验中_____(填“需要”或“不需要”)满足砂和砂桶的质量远小于小车的总质量；在操作④中，每次改变小车质量后，_____(填“需要”或“不需要”)重新调节平板的倾角。

【答案】(1)mg　(2)不需要　需要

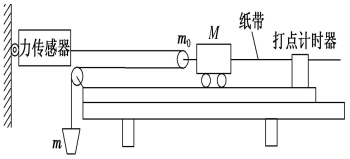
(2）加力传感器或弹簧秤【该变式需平衡摩擦力】

改变实验装置，如图所示，加入弹簧测力计或力学传感器来测定拉力。



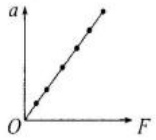
此时有：$a_{车}=2a_{砝}$

或者



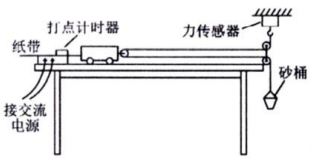
此时有：$a_{物}=2a_{车}$

实验原理：改变钩码的质量，测得多组数据，小车所受拉力始终能利用弹簧测力计准确测出，$a-F$ 图像不会出现弯曲，如图所示.

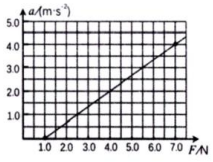


【典例 2】

（1）在探究"物体质量一定时，加速度与力的关系"实验中，小方同学做了如图甲所示的实验改进，在调节桌面水平后，添加了力传感器来测细线中的拉力。



甲



乙

①实验时，下列说法正确的是____▲____

A. 需要用天平测出砂和砂桶的总质量，

B. 小车靠近打点计时器，先接通电源，再释放小车，打出一条纸带，同时记录拉力传感器的示数

C. 使用电磁打点计时器时应选用220V的交流电源

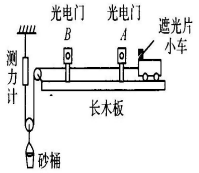
D. 为减小误差，实验中一定要保证砂和砂桶的质量远小于小车的质量

②由实验得到小车的加速度a与力传感器示数F的关系如图乙所示。则小车运动过程中的阻力F=____▲____N，小车的质量M=____▲____kg。

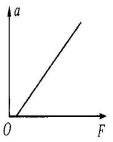
【答案】（1）①B　②2.0　3.0

【典例 3】

.如图甲所示是某同学在探究"物体质量一定时，加速度与合外力的关系"的实验装置，实验时将小车从光电门 A 的右侧由静止释放，与光电门连接的数字计时器可以测量遮光片经过光电门 A，B 所用的时间 t_A，t_B，回答下列问题。



甲



乙

(1)下列实验要求必须满足的是_____。

A. 保证砂桶和砂的质量远小于小车的质量

B. 保持砂和砂桶的质量不变

C. 保持穿过光电门的细线与长木板平行

D. 保持小车的质量不变

(2)为测算小车的加速度，实验中还需要测量的物理量有_____和_____。

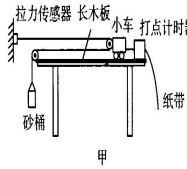
(3)实验中改变砂和砂桶的质量，得到小车加速度 a 与测力计示数 F 的对应关系如图乙所示，图线不经过原点，可能的原因是_____。

【答案】(1)CD　(2)遮光片的宽度，光电门 A，B 间的距离

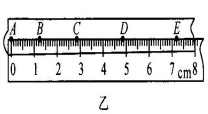
(3)未平衡阻力或平衡阻力不足

【典例 4】

.如图甲所示是"探究加速度与力和质量的关系"的实验装置，带滑轮的长木板水平固定，跨过小车上的定滑轮的两根细线均处于水平状态。



甲



乙

第 5 题图

(1)实验时，一定要进行的操作是_____(填序号)。

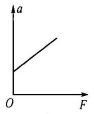
A. 为减小误差，实验中一定要保证砂和砂桶的总质量远小于小车的质量

B. 用天平测出砂和砂桶的质量

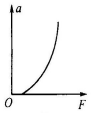
C. 小车靠近打点计时器，先接通电源，再释放小车，打出一条纸带，同时记录拉力传感器的示数 F_0

D. 改变砂和砂桶的质量，打出几条纸带

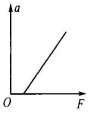
(2)设拉力传感器示数 F_0 的二倍为 F，现以 F 为横坐标，加速度 a 为纵坐标，画出的 $a-F$ 图像如图所示，则可能正确的图像是_____。



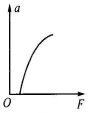
A



B



C

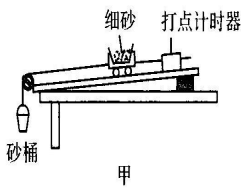


D

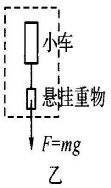
(3)在实验中得到一纸带，A，B，C，D，E 为 5 个相邻的计数点，相邻的两个计数点之间还有四个点未画出。用刻度尺测量计数点间距离如图乙所示。已知打点计时器的工作频率为 50Hz，根据纸带数据，可知打点 E 时小车的速度 v_E=_____m/s(结果保留两位有效数字)。

【答案】（1）CD　（2）C　（3）0.26

（3）用如图所示的实验装置探究加速度与物体质量、物体受力的关系。测量悬挂重物的重力 mg，悬挂重物与小车所组成的系统所受的合外力 F 的大小等于所悬挂重物的重力，即 F=mg.（此方案中，研究对象是悬挂重物与小车组成的系统。研究对象的质量是指系统的总质量。保持质量不变，探究加速度与力的关系时，只要将车上的重物逐渐转移到悬挂物上，或将悬挂物上的重物逐渐转移到车上，使系统所受的外力改变，但系统的总质量不变。）



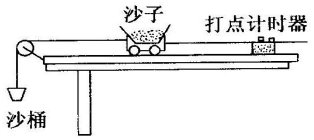
甲



乙

【变式】小车上固定一个盒子，盒子内盛有沙子。沙桶的总质量（包括桶以及桶内沙子质量）记为 m，小车的总质量（包括车、盒子及盒子内沙子质量）记为 M。将沙子不断转移到沙桶中，测处 mg 与 a 的关系。

【此实验需要平衡摩擦力，但不需要满足 M》m】



【典例 5】

(1)验证在质量不变的情况下，加速度与合外力成正比：从盒子中取出一些沙子，装入沙桶中，称量并记录沙桶的总重力 mg，将该力视为合外力 F，对应的加速度 a 则从打下的纸带中计算得出。多次改变合外力 F 的大小，每次都会得到一个相应的加速度。本次实验中，桶内的沙子取自小车中，故系统的总质量不变. 以合外力 F 为横轴，以加速度 a 为纵轴，画出 $a-F$ 图像，图像是一条过原点的直线。

①$a-F$ 图像斜率的物理意义是_____。

②你认为把沙桶的总重力 mg 当作合外力 F 是否合理？

答：_____。(填"合理"或"不合理")

③本次实验中，是否应该满足 $M\gg m$ 这样的条件？

答：_____(填"是"或"否")；

理由是_____。

(2)验证在合外力不变的情况下，加速度与质量成反比：保持桶内沙子质量 m 不变，在盒子内添加或去掉一些沙子，验证加速度与质量的关系。本次实验中，桶内的沙子总质量不变，故系统所受的合外力不变。用图像法处理数据时，以加速度 a 为纵横，应该以_____倒数为横轴。

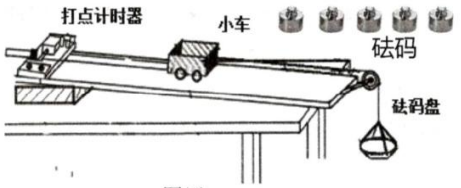
【答案】

(1)①$\frac{1}{M+m}$　②合理　③否　因为实验的研究对象是整个系统,系统受到的合外力就等于mg　(2)$M+m$

[解析]:(1)将车内的沙子转移到桶中,就保证了$M+m$不变,即系统的总质量不变,研究对象是整个系统,$a=\frac{F_{合}}{M+m}=\frac{mg}{M+m}$,可见$a-F$图像斜率的物理意义是$\frac{1}{M+m}$,系统的合外力就等于所悬挂沙桶的重力$mg$,不必满足$M\gg m$这样的条件。

(2)向小车内添加或去掉部分沙子,是改变系统的总质量$M+m$,而系统的合外力仍等于所悬挂沙桶的重力mg,保证了合外力不变。

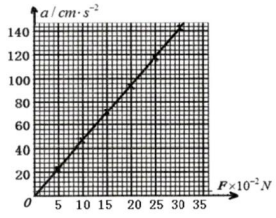
【变式】如图加所示是探究加速度与力关系的实验装置



图甲

实验步骤:

a. 把长木板放在桌面上，固定好打点计时器，装好纸带和小车，再调节木板的倾斜程度，平衡摩擦力;



图乙

b. 已知砝码盘和每个砝码的质量均为5克，将5个砝码放到小车上，并把小车用细线跨过轻质滑轮与砝码盘相连，打开电源，释放小车，得到第一条纸带，算出小车的加速度a_1;

c. 取小车的上的一个砝码放入砝码盘中，打开电源，释放小车，得出第二条纸带，同时算出小车的加速度a_2;

d. 依次重复上述c操作，直至将5个砝码全部转移到砝码盘中;

e. 描点分析加速度与力的关系得到如图乙所示。

(1) 图乙中横坐标F表示为__▲__

A. 砝码的重力　B. 砝码和砝码盘的重力

(2) 该实验方案是否必需保证砝码和砝码盘的质量远小于小车和车上砝码的质量?

__▲__。(填“是”或“否”)

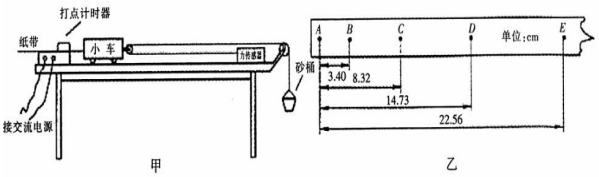
(3) 依据图乙可计算出小车的质量为__▲__g(结果保留三位有效数字)。

【说明】

(2)由题意可知,此次实验中一共有$N=5$个钩码,假设小车的质量为M_0,一个钩码的质量为m_0,某次实验时,挂在线左端的钩码个数为n,则小车内放入的钩码个数为$N-n$,根据牛顿第二定律有$nm_0g-T=nm_0a$,$T=[M_0+(N-n)m_0]a$,联立可得$a=\frac{nm_0g}{M_0+Nm_0}$,可知这样操作实验不需要钩码质量远远小于小车质量,这样设计实验比不在小车上放钩码而进行同样的实验,系统误差会更小。

【答案】(1)B　(2)否　(3) 181g±4g

【典例6】(7分)(1)在探究小车加速度与力关系的实验中,小刘和他的同学设计了如图甲所示的实验方案。将一端带有定滑轮的长木板置于水平桌面上,小车前端也安装有定滑轮,细绳一端系有砂桶,另一端通过两个滑轮与一拉力传感器相连,拉力传感器固定并可显示绳中拉力F的大小,改变桶中砂的质量进行多次实验。完成下列问题:



甲　　乙

①实验时,下列操作或说法正确的是__▲__

A. 需要用天平测出砂和砂桶的总质量

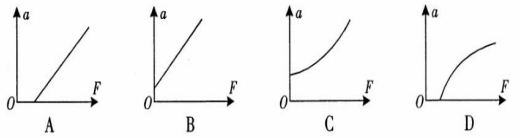
B. 小车靠近打点计时器,先接通电源,再释放小车,打出一条纸带,同时记录拉力传感器的示数

C. 选用电磁打点计时器比选用电火花计时器实验误差小

D. 为减小误差,实验中一定要保证砂和砂桶的总质量远小于小车的质量

②实验中得到一条纸带,相邻计数点间有四个点未标出,各计数点到A点的距离如图乙所示。电源的频率为50Hz,则打点计时器打B点时砂桶的速度大小为__▲__m/s。

③以拉力传感器的示数F为横坐标,以加速度a为纵坐标,画出的a-F图像可能是下图的__▲__。



④若作出a-F图线,求出其“斜率”为k,则小车的质量为__▲__。

【答案】111.(1) B　0.832　A　$\frac{2}{k}$

【典例7】如图甲所示，在“探究质量不变的情况下加速度与合外力的关系”实验中，操作如下：

①用天平测出小车的质量M_1和小盘的质量m_1;

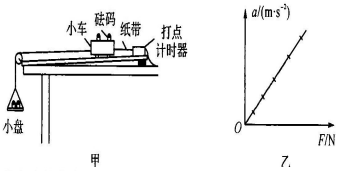
②取一盒总质量为$m_0=0.2$kg的砝码放置在小车上,不挂小盘,调节斜木板的倾角,使小车能匀速滑下;

③挂上小盘,使小车无初速度滑下,用打点计时器打出纸带,并根据纸带计算加速度;

④从小车上取质量为m_2的砝码放到小盘中,重复步骤③,测出对应的加速度;

⑤改变m_2的大小,重复步骤④;

⑤得到盘和砝码的质量为$m=(m_1+m_2)$,合外力就是$F=mg=(m_1+m_2)g$,根据F及a的数据,作出$a-F$的图线。



在该实验中,步骤②的方法简称为_____;该实验_____(填“需要”或“不需要”)满足$m\ll M$这个条件。

分析与解:在该实验的步骤②中不挂小盘,调节斜木板的倾角,使小车能匀速滑下,目的使小车总重力沿斜面方向的分力与系统受到的阻力平衡,该方法简称为平衡阻力。

盘和砝码的总质量为$m=(m_1+m_2)$,小车的总质量为$M=(M_1+m_0-m_2)$,对于小车、小盘、砝码整个系统来说,总质量$(m_1+m_0+M_1)$保持不变,合外力就是$F=mg=(m_1+m_2)g$,根据牛顿第二定律得

$F=(m_1+m_2)g=(m_1+m_0+M_1)a$,

$a=\frac{1}{(m_1+m_0+M_1)}(m_1+m_2)g=\frac{1}{(m_1+m_0+M_1)}F$,

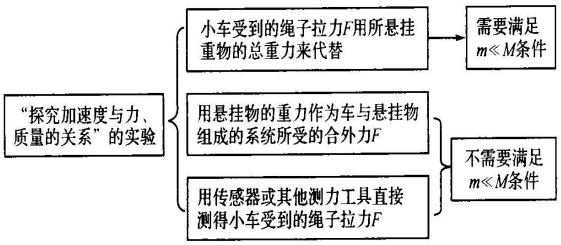
即$a=\frac{1}{(m+M)}mg=\frac{1}{(m+M)}F$。

得到系统总质量保持不变时,$a\propto F$。

可见,在该实验中,用盘和砝码的总重力作为系统所受合外力F,不需要满足$m\ll M$的条件。

答案:平衡阻力;不需要

【规律总结】



第 3 节　牛顿第二定律

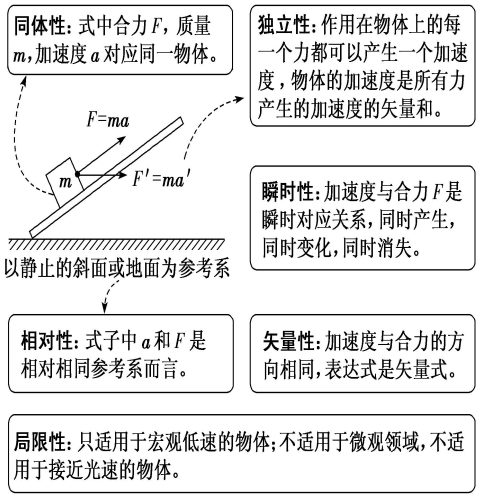
一、牛顿第二定律

1.内容：物体加速度的大小跟它受到的作用力成正比，跟它的质量成反比，加速度的方向跟作用力的方向相同。

2. 公式：$F=kma$，当公式中的各物理量均采用国际单位制时，$k=1$，即公式 $F=kma$ 简化为 $F=ma$。

3. 力的单位：在国际单位制中，力的单位为牛顿，用符号 N 表示。物理意义：使质量为 1 kg 的物体产生 1 m/s² 的加速度的力为 1 N，即 1 N=1 kg·m/s²。

4.牛顿第二定律的 6 个性质

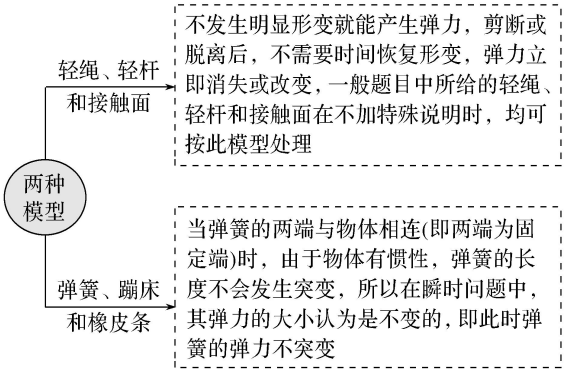


5.合力、加速度、速度的关系

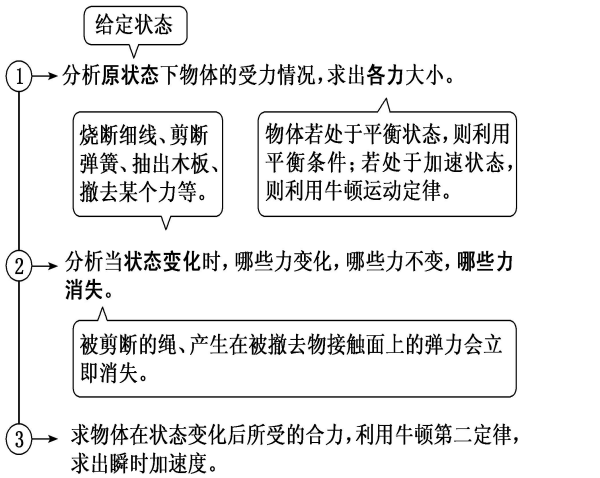
- 物体所受合力的方向决定了其加速度的方向，只要合力不为零，不管速度大小，物体都有加速度。
- 合力与速度同向时，物体加速运动；合力与速度反向时，物体减速运动；合力与速度不共线时，物体做曲线运动，但合力与速度无必然联系。
- $a=\frac{\Delta v}{\Delta t}$ 是加速度的定义式，a 与 Δv、Δt 无直接关系。
- $a=\frac{F}{m}$ 是加速度的决定式，$a\propto F$，$a\propto\frac{1}{m}$。

二、牛顿第二定律的瞬时性

1.两种模型



2.求解瞬时加速度的一般思路



【注意】加速度可以随着力的突变而突变，而速度的变化需要一个积累的过程，不会发生突变。

【典例 1】如图所示，A、B 的质量均为 m，绳为轻绳，杆为轻杆，弹簧为轻弹簧，不计一切摩擦力，甲图剪断 OA，乙图抽走木板 C，丙图剪断 OA 和 OB 的瞬间，重力加速度为 g，求 A、B 的加速度大小。



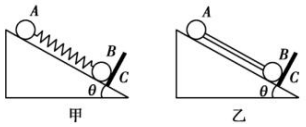
【答案】

图甲 左图：$a_A=a_B=g$。右图：$a_A=2g$；$a_B=0$。

图乙 左图：$a_A=a_B=g$。右图：$a_A=0$；$a_B=2g$。

图丙 左图：$a=g\sin\theta$。右图：$a=g\tan\theta$。

【变式 1】把挡板 C 抽走瞬间，分别求 A、B 的加速度。

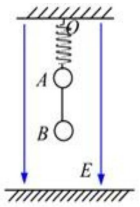


【答案】图甲中 A 球加速度为 0，B 球的加速度为 2gsin θ。

图乙中 A、B 球的加速度均为 gsin θ

【变式 2】

如图所示，质量均为m的A、B两个小球通过绝缘细线连在一起并通过绝缘弹簧悬于O点。A球带电量为+q，B球不带电，整个空间存在方向竖直向下的匀强电场，场强大小E=$\frac{mg}{q}$。



当把A、B间的细线剪断瞬间（　　）

A. A球所受的电场力变为零

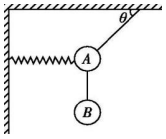
B. 弹簧弹力变为$F_{弹}$=2mg

C. A球的加速度大小a=g

D. B球的加速度大小a=2g

【答案】C

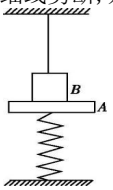
【典例 2】如图所示，两个质量均为 m 的小球 A、B 用细绳相连，小球 A 与一个轻弹簧相连，弹簧另一端固定在竖直墙上，小球用一根细线连在天花板上，开始时，两小球都静止不动，此时细线与水平方向的夹角是 $\vartheta=45°$，弹簧水平，重力加速度为 g。现突然把天花板与 A 相连的细线剪断，则在剪断线的瞬间，小球 A 的加速度大小为（　　）



A.$2\sqrt{2}g$　　B.$\sqrt{5}g$　　C.$2g$　　D.$\sqrt{2}g$

【答案】B

【典例 3】如图所示，质量为 3 kg 的物体 *A* 静止在竖直的轻弹簧上面，质量为 2 kg 的物体 *B* 用细线悬挂，*A*、*B* 间相互接触但无压力.*g* 取 10 m/s². 若某时刻将细线剪断，则细线剪断瞬间（　　）



A.*B* 对 *A* 的压力大小为 10 N　　B.弹簧弹力大小为 20 N

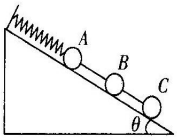
C.*B* 的加速度大小为 4 m/s²　　D.*A* 的加速度为零

【答案】C

【变式】如图所示，A、B、C 三球质量均为 m，轻质弹簧一端固定在斜面顶端、另一端与 A 球相连，A、B 间固定一个轻杆，B、C 间由一细线连接. 倾角为 θ 的光滑斜面固定在地面上，弹簧、轻杆与细线均平行于斜面，开始时系统处于静止状态. 在细线被烧断的瞬间，下列说法正确的是（　　）

A. A 球的受力情况未变，加速度为零

B. C 球的加速度沿斜面向下，大小为 g

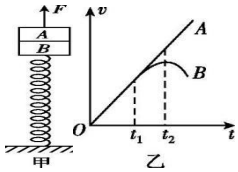


C. A、B 之间杆的拉力大小为 $\frac{3}{2}mg\sin\theta$

D. A、B 两个小球的加速度均沿斜面向上，大小均为 $\frac{1}{2}g\sin\theta$

【答案】CD

【典例 4】如图甲所示，一轻质弹簧的下端固定在水平面上，上端叠放两个质量均为 *M* 的物体 *A*、*B*（*B* 物体与弹簧连接）弹簧的劲度系数为 *k*，初始时物体处于静止状态.现用竖直向上的拉力 *F* 作用在物体 *A* 上，使物体 *A* 开始向上做加速度为 *a* 的匀加速运动，测得两个物体的 *v*-*t* 图像如图乙所示（重力加速度为 *g*），则（　　）



A.*A*、*B* 在 t_1 时刻分离，此时弹簧弹力恰好为零

B.弹簧恢复到原长时，物体 *B* 的速度达到最大值

C.施加外力的瞬间，*A*、*B* 间的弹力大小为 *M*(*g*+*a*)

D.*B* 与弹簧组成的系统的机械能先逐渐减小，后保持不变

【答案】D

三、惯性力

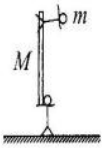
惯性系：加速度为零的参考系称为惯性系，如地面或匀速运动的物体.

非惯性系：加速度不为零的参考系称为非惯性系. 例如，汽车加速运动时，以汽车为参考系，汽车有加速度，该汽车为非惯性系.

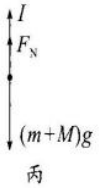
以地面为参考系，“惯性力”的大小为 $I=ma$，I 为“惯性力”的符号，方向与加速度的方向相反.

引入“惯性力”的意义：将动力学问题转化成静力学问题，即将动力学问题转化成共点力平衡问题，非惯性系中牛顿运动定律不适用.

【典例 1】如图所示为杂技“顶杆”表演的示意图. 一人站在地上，肩上扛一质量为 M 的竖直竹竿，当竿上一质量为 m 的人以加速度 a 加速下滑时，求竿对“底人”的压力大小.



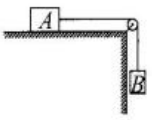
研究 m，引入“惯性力”，则 m 所受合力为零，如图丙所示，已知 $I=ma$，则 $F_N=(M+m)g-I=(M+m)g-ma$.



丙

根据作用力与反作用力的性质，杆对“底人”的压力大小为 $(M+m)g-ma$.

【典例 2】如图所示，光滑水平面上放置着物块 A，它通过轻绳和轻质滑轮连接物块 B，已知 A 的质量为 m，B 的质量为 M，由静止释放物块 A、B，重力加速度大小为 g，求：绳子的拉力大小.



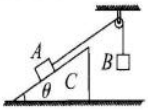
研究 B 时引入“惯性力”，则 B 所受合力为 0，如图丙所示，则有 $F_T=Mg-I=Mg-Ma$，解得 $F_T=\frac{mMg}{m+M}$.



丙

【典例 3】如图所示，倾角为θ的光滑斜面体 C 固定在水平面上，物块 A 置于斜面上，A 通过细绳跨过光滑的轻质定滑轮与物块 B 相连，连接 A 的一段细绳与斜面平行，已知 A 的质量为 m，B 的质量为 M，连接体由静止释放，A 沿斜面上滑，B 下降，重力加速度为 g，求：

绳的拉力大小.



研究 B 时，引入“惯性力”，则 B 所受合力为 0，如图丙所示，有 $F_T=Mg-I=Mg-Ma$，解得 $F_T=\dfrac{mMg(1+\sin\theta)}{m+M}$.



丙

第 4 节　力学单位制

“基本量”既可以采用国际单位制中的单位，也可以采用其他单位制中的单位，如厘米、英寸、斤等常用单位，并且不同的单位制规定的基本量不尽相同。

- (1)国际单位制
  - 力学单位制
    - 基本单位
      - 长度：米(m)
      - 质量：千克(kg)
      - 时间：秒(s)
    - 导出单位
      - 速度：米每秒(m/s)
      - 功率：瓦特(W)
      - 压强：帕斯卡(Pa)
  - 其他单位制
- (2)常用单位制
  - 力学单位制
    - 基本单位
      - 长度：厘米(cm)、千米(km)
      - 质量：克(g)、吨(t)
      - 时间：小时(h)、分钟(min)
    - 导出单位
      - 速度：千米每小时(km/h)、厘米每秒(cm/s)
      - 功率：千瓦(kW)
      - 压强：千帕(kPa)
  - 其他单位制

国际单位制中的基本物理量和基本单位

物理量名称	物理量符号	单位名称	单位符号
长度	l	米	m
质量	m	千克(公斤)	kg
时间	t	秒	s
电流	I	安[培]	A
热力学温度	T	开[尔文]	K
物质的量	$n,(\nu)$	摩[尔]	mol
发光强度	$I,(I_v)$	坎[德拉]	cd

⚠ 提醒

(1)在物理计算中，如果所有已知量都用同一单位制中的单位表示，在计算过程中就不必一一写出各个量的单位，直接在数字计算式后写出所求物理量的单位即可。计算前要注意把各已知量的单位统一为同一单位制中的单位。在物理计算中，一般都采用国际单位制。

(2)有时由于计算中的疏忽，没有将各物理量的单位统一到同一单位制时，可以通过单位运算，即考察等式两边单位是否平衡来检验结果是否正确，若不平衡，说明计算有错误，要予以改正。

第 5 节　牛顿第二定律的应用

一、动力学的两类基本问题

1. 已知物体的受力情况，求解物体的运动情况

解这类题目，一般先应用牛顿第二定律求出物体的加速度，再根据物体的初始条件，应用运动学公式，求出物体的运动情况，即求出物体在任意时刻的位置、速度及运动轨迹。流程图如下：

物体的受力情况 → 物体受的合力 → 加速度 → 运动学公式 → 物体的运动情况

2. 已知物体的运动情况，求解物体的受力情况

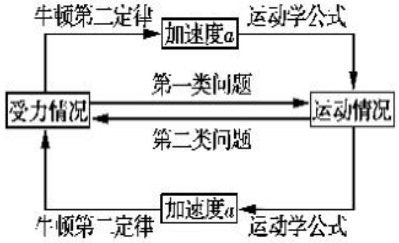
解这类题目，一般先应用运动学公式求出物体的加速度，再应用牛顿第二定律求出物体所受的合力，进而求出物体所受的其他外力。流程图如下：

物体的运动情况 → 运动学公式 → 加速度 → 牛顿第二定律 → 物体受的合力

3.解决两类基本问题的方法

以加速度为“桥梁”，由运动学公式和牛顿第二定律列方程求解，具体逻辑关系如下：

解决两类动力学问题的思路



(1) 无论是哪种情况，联系力和运动的“桥梁”都是加速度. 利用牛顿第二定律解决动力学问题的关键是寻找加速度与未知量的关系，然后利用运动学规律、牛顿第二定律和力的运算法则列式求解.

(2) 物体的运动情况由受力情况及物体运动的初始条件共同决定.

4.两类动力学问题的解题步骤

- 明确研究对象 → 利用整体法或隔离法确定研究对象
- 受力分析和运动状态分析 → 画好受力示意图、运动情景图，明确物体的运动性质和运动过程
- 选取力的处理方法 → 合成法或正交分解法
- 选取正方向 → 通常规定初速度的方向为正方向
- 确定合外力列方程求解 → ①根据牛顿第二定律 $F_{合}=ma$ 或 $\begin{cases}F_x=ma_x\\F_y=ma_y\end{cases}$；②由运动学公式列出辅助方程

二、正交分解法在动力学问题中的应用

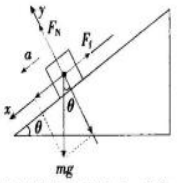
(1)正交分解法是解答动力学问题的基本工具，物体受到三个或三个以上不在同一直线上的力时，一般应用正交分解法。

(2)牛顿第二定律的正交分解形式 $\begin{cases} F_{x合}=F_{1x}+F_{2x}+F_{3x}+\cdots=ma_x \\ F_{y合}=F_{1y}+F_{2y}+F_{3y}+\cdots=ma_y \end{cases}$

(3)建立坐标系时通常有两种情况

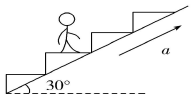
①分解力而不分解加速度：此时我们一般沿 a 的方向和垂直于 a 的方向建立坐标系，并规定 a 的方向为 x 轴正方向。

②分解加速度而不分解力：若物体受的几个力在相互垂直的两个方向上，且加速度不沿这两个方向，此时若分解力会比较烦琐，可以沿这两个相互垂直的方向分解加速度。



物体沿斜面运动时，通常分解力而不分解加速度。

【拓展】有时分解加速度更方便。当物体受到的力相互垂直时，沿这两个相互垂直的方向分解加速度，再应用牛顿第二定律求解。



三、牛顿第二定律的推广：

当连接体各部分运动状态不同时，整体的合外力等于各部分质量与各自加速度乘积的矢量和，即

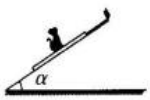
$F_{合}=m_1a_1+m_2a_2+.....$，写成分量形式有：

$$F_{合x}=m_1a_{1x}+m_2a_{2x}+.....$$

$$F_{合y}=m_1a_{1y}+m_2a_{2y}+.....$$

【注意】如果待求的问题不涉及系统内部的相互作用时，就可以采用整体法。

【典例 1】如图所示，在倾角为α的固定光滑斜面上，有一轻绳拴着的长木板，木板上站着一只猫，已知木板的质量是猫的质量的 2 倍. 当轻绳突然断开，猫立即沿着板向上跑，以保持其相对斜面的位置不变，重力加速度为 g，求木板沿斜面下滑的加速度大小.

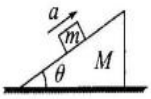


【答案】$a=\frac{3}{2}g\sin\alpha$，方向沿斜面向下.

【典例 2】如图所示，倾斜角为θ、质量为 M 的斜面始终静止在粗糙地面上，一质量为 m 的物块在斜面上滑动(方向未知)，加速度为 a，方向沿斜面向上，重力加速度为 g，求：

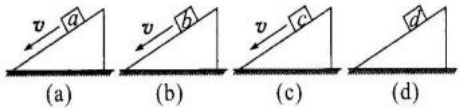
(1)地面对斜面的摩擦力大小和方向；

(2)地面对斜面的支持力大小.



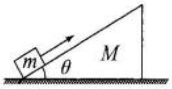
联立解得 $F_f=ma_x=ma\cos\theta$，方向与水平加速度的方向相同，即水平向右；$F_N=Mg+mg+ma\sin\theta$，方向竖直向上.

【典例 3】如图所示，四个质量、形状都相同的斜面体放在粗糙的水平面上，将四个质量相同的物块放在斜面顶端，物块与斜面的摩擦力不同，四个物块的运动情况不同，物块 a 匀加速下滑，物块 b 匀速下滑，物块 c 匀减速下滑，物块 d 静止在斜面上，四种情况下斜面体均保持静止，斜面体对地面的压力依次为 F_1、F_2、F_3、F_4，分析并比较它们的大小关系.



【答案】$F_1<F_2=F_4<F_3$

【典例 4】如图所示，斜劈形物体的质量为 M，放在水平地面上，质量为 m 的粗糙物块以某一初速度沿斜劈的斜面向上滑，滑至速度为零后又加速返回，而斜劈形物体始终保持静止，重力加速度为 g，在物块 m 上下滑动的整个过程中(　　).



A. 地面对斜劈形物体 M 的摩擦力方向先向左后向右

B. 地面对斜劈形物体 M 的摩擦力方向没有改变

C. 地面对斜劈形物体 M 的支持力大于 $(M+m)g$

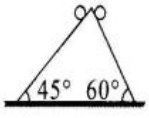
D. 物块 m 向上、向下滑动时的加速度大小相同

【答案】B

【典例 5】如图所示，斜面体放置在水平地面上，左倾角为 45°，右倾角为 60°，质量相等的两个小球同时从斜面顶端分别沿左、右两个斜面由静止下滑，小球的质量为 m，斜面体的质量为 M，小球与斜面间无摩擦，斜面体始终处于静止状态，重力加速度为 g，求：

(1)地面对斜面体的摩擦力大小和方向；

(2)地面对斜面体支持力的大小.



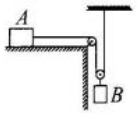
故地面对斜面体的摩擦力的大小为 $\frac{2-\sqrt{3}}{4}mg$，方向水平向左；地面对斜面体的支持力的大小为 $\frac{3}{4}mg+Mg$.

总结

(1)若连接体的运动状态不同，则仍可以整体分析，系统合力给系统提供加速度，连接体的加速度可以不同.

(2)利用整体法解题，受力非常简单且受力个数少，但是只能求解外力、加速度，无法求解内力.

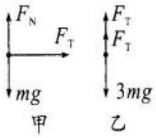
【典例 6】如图所示，光滑水平面上放置着物块 A，它通过轻绳和轻质滑轮连接物块 B，已知 A 的质量为 m，B 的质量为 $3m$，重力加速度大小为 g，由静止释放物块 A、B，求 A、B 的加速度大小和绳的拉力大小.



若物块 A 移动的距离为 $2s$，则物块 B 移动的距离为 s，路程之比为 $2:1$，故速度之比为 $2:1$.

设物块 A、B 的加速度大小分别为 a_A、a_B，由 A 和 B 的速度关系得 $a_A=2a_B$.

设绳的张力为 F_T，对 A、B 分别隔离受力分析，如图甲、乙所示.



由牛顿第二定律得

对 A：$F_T=ma_A$，

对 B：$3mg-2F_T=3ma_B$，

联立解得 $a_A=\frac{6g}{7}$，$a_B=\frac{3g}{7}$，$F_T=\frac{6mg}{7}$.

【典例 7】

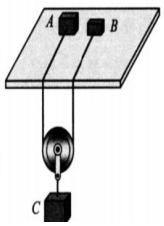
如图所示，质量为 $2m$ 和 m 的滑块 A 和 B 置于光滑水平桌面上，连接两滑块的细线通过桌子边缘拉着一个动滑轮，动滑轮下面挂质量为 $4m$ 的物块 C。已知左右两侧细线互相平行，重力加速度 g 取 10m/s^2，不计一切摩擦和动滑轮的质量。现将 A、B、C 三者同时由静止释放，在 A、B 滑出桌面之前，下列说法正确的是

A. 滑块 A 和 B 的速度始终相等

B. 物块 C 的机械能在不断增大

C. 滑块 A 的加速度大小为 3.0m/s^2

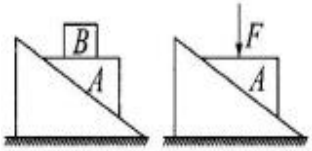
D. 物块 C 的加速度大小为 6.0m/s^2



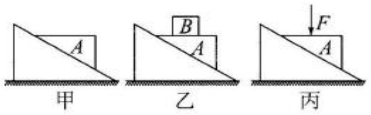
【答案】D

四、几个易混模型

(1)加 F=Mg 的压力与加 Mg 的物体时物体的加速度不同。



【典例 1】如图甲所示，滑块 A 以加速度 a_1 沿固定粗糙斜面匀加速下滑；如图乙所示，在滑块 A 上放一物体 B，物体 B 始终与 A 保持相对静止，以加速度 a_2 沿斜面匀加速下滑；如图丙所示，在滑块 A 上施加一竖直向下的恒力 F，滑块 A 以加速度 a_3 沿斜面匀加速下滑，重力加速度为 g，分析并比较 a_1、a_2、a_3 大小的关系.



【答案】$a_1=a_2<a_3$.

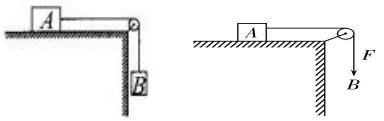
总结

两种等效思想：

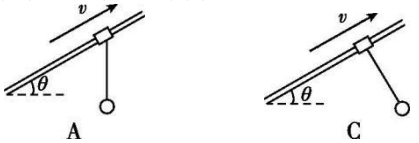
(1)施加一物体等效质量变化，重力加速度不变.

(2)施加一竖直恒力等效重力加速度变化，质量不变.

(2)施加 F=mg 的拉力与悬挂 mg 的物体时 A 的加速度不同。



（3）小球匀速与加速不同



【典例 2】

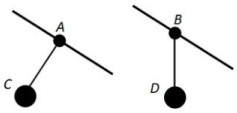
两个倾角相同的滑杆上分别套 A、B 两圆环，两环上分别用细线悬吊着两物体 C、D，如图所示，当它们都沿滑杆向下滑动时，A 的悬线与杆垂直，B 的悬线竖直向下。则(　　)

A. A 环与杆无摩擦力

B. B 环与杆无摩擦力

C. A 环做的是匀速运动

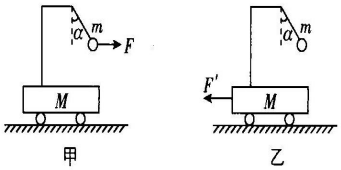
D. B 环做的是匀速运动



【答案】AD

（4）F 加在小球与小车上的区别

【典例 3】质量为 M 的小车放在光滑水平面上，小车上用细线悬挂另一质量为 m 的小球且 $M>m$. 用一力 F 水平向右拉小球，使小球和小车一起以加速度 a 向右运动，细线与竖直方向成 α 角，细线的拉力大小为 F_1，如图甲所示. 若用一力 F' 水平向左拉小车，使小球和车一起以加速度 a' 向左运动时，细线与竖直方向也成 α 角，细线的拉力大小为 F_1'，如图乙所示，则　　(　　)



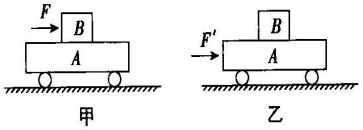
A. $a'=a, F_1'=F_1$　　B. $a'>a, F_1'>F_1$

C. $a'<a, F_1'=F_1$　　D. $a'>a, F_1'=F_1$

【答案】D

（5）F 作用在 B 与 A 上的区别

【典例 4】在光滑水平面上有乙辆小车 A，其质量为 $m_A=2.0\ \text{kg}$，在小车上放一个物体 B，其质量为 $m_B=1.0\ \text{kg}$. 如图甲所示，给 B 一个水平推力 F，当 F 增大到稍大于 3.0 N 时，A、B 开始相对滑动. 如果撤去 F，对 A 施加一水平推力 F'，如图乙所示. 要使 A、B 不相对滑动，则 F' 的最大值 F_{max} 为（　　）



甲　　乙

A. 2.0 N　　B. 3.0 N

C. 6.0 N　　D. 9.0 N

【答案】C

五、临界问题

(1)绳子的松弛与绷紧：绳中张力为 0。

(2)接触面间的分离：弹力为 0，分离瞬间垂直于接触面的速度与加速度的分量仍相等。

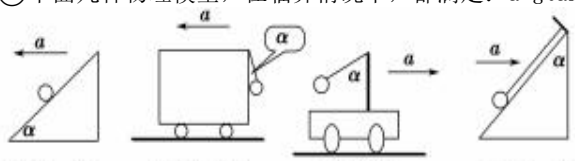
(3)接触面间相对滑动：静摩擦力达到最大静摩擦力（通常计算中认为等于滑动摩擦力），临界状态下两物体速度与加速度仍相同。

(4)绳子断裂：绳中张力达到能承受的最大值。

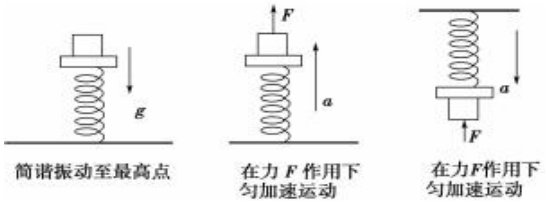
临界状态往往是极值出现的时刻，题目中常出现隐含临界状态的词语，如“最大”“最小”“刚好”等。

【模型分析】

①下面几种物理模型，在临界情况下，都满足：a=gtanα.



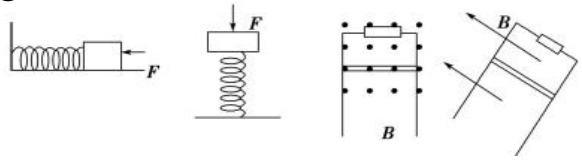
②物体与弹簧模型，物体刚好脱离时的特点为：弹力为 0，速度相等，加速度也相等（可用整体法、隔离法求解）。



【例】当 P、Q 分离时，两者作用力（支持力）为零，但此时两者的加速度相等。

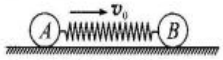


③以下几个模型，速度最大时合力为 0，速度为 0 时加速度最大。

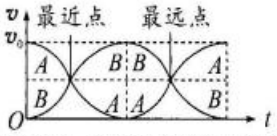


④弹簧类问题分析——V-t 图的应用

【典例】如图所示，质量均为 m 的小球 A、B 与一轻质弹簧连接，并静止在足够长的光滑水平面上，现给小球 A 一初速度 v_0，分析小球 A、B 的运动状态.



小球的 $v-t$ 图像如图所示.



重要结论：弹簧压缩至最短或拉伸至最长时 A、B 共速.

第 6 节　超重、失重

1.实重与视重

(1)实重：物体实际所受的重力。物体所受重力不会因物体运动状态的改变而变化。

(2)视重：当物体在竖直方向有加速度时（即 $a_y\neq 0$），物体对弹簧测力计的拉力或对台秤的压力将不等于物体的重力，此时弹簧测力计或台秤的示数叫物体的视重。

⚠ 提醒

正因为当物体在竖直方向有加速度时视重不再等于实重，所以我们在用弹簧测力计测物体的重力时，强调应在静止状态或匀速运动状态下进行。

2. 超重与失重的比较

项目	超重	失重	完全失重
定义	物体对支持物的压力（或对悬挂物的拉力）大于物体所受重力的情况	物体对支持物的压力（或对悬挂物的拉力）小于物体所受重力的情况	物体对支持物的压力（或对悬挂物的拉力）为 0 的状态
产生条件	物体有向上的加速度	物体有向下的加速度	加速度大小为 g，方向竖直向下
视重	$F=m(g+a)$	$F=m(g-a)$	$F=0$
运动状态	加速上升，减速下降	加速下降，减速上升	无阻力的抛体运动
判断依据	与物体的运动（速度）方向无关，取决于物体的加速度的方向		

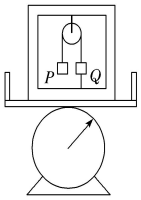
3.对超重和失重的“三点”深度理解

①不论超重、失重或完全失重，物体的重力都不变，只是“视（示）重”改变。

②物体在完全失重状态下，一切由重力引起的现象（液体的浮力压强等）将完全消失，此时单摆无法摆动、天平也无法使用。

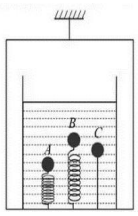
③物体是否处于超重或失重状态，不在于物体向上运动还是向下运动，而在于物体的加速度方向，只要其加速度在竖直方向上有分量，物体就会处于超重或失重状态。

【典例 1】台秤上放一个木箱，木箱内有质量分别为 m_1 和 m_2 的两物体 P、Q，用细绳通过光滑定滑轮相连，$m_1>m_2$。现剪断 Q 下端的细绳，在 P 下落但还没有到达箱底的过程中，台秤的示数与未剪断前的示数相比将 （　　）



【答案】变小

【典例 2】（2019 年 4 月浙江卷）如图所示，A、B、C 为三个实心小球，A 为铁球，B、C 为木球。A、B 两球分别连在两根弹簧上，C 球连接在细线一端，弹簧和细线的下端固定在装水的杯子底部，该水杯置于用绳子悬挂的静止吊篮内。若将挂吊篮的绳子剪断，则剪断的瞬间相对于杯底（不计空气阻力，$\rho_{木}<\rho_{水}<\rho_{铁}$）（　　）



A．A 球将向上运动，B、C 球将向下运动

B．A、B 球将向上运动，C 球不动

C．A 球将向下运动，B 球将向上运动，C 球不动

D．A 球将向上运动，B 球将向下运动，C 球不动

【答案】D

4.判断超重和失重的方法

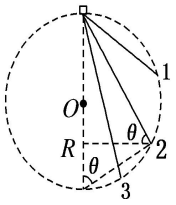
从受力的角度判断	当物体所受向上的拉力(或支持力)大于重力时，物体处于超重状态；小于重力时，物体处于失重状态；等于零时，物体处于完全失重状态
从加速度的角度判断	当物体具有向上的加速度时，物体处于超重状态；具有向下的加速度时，物体处于失重状态；向下的加速度(a＝g)时，物体处于完全失重状态
从速度变化的角度判断	①物体向上加速或向下减速时，超重 ②物体向下加速或向上减速时，失重

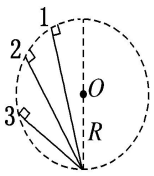
【小结】不计空气阻力时，物体无论做竖直上抛或竖直下落运动，其加速度大小均为 g，方向竖直向下，考虑空气阻力时，物体竖直上抛，其加速度大小为 $a_1=g+a$，a 为空气阻力产生的加速度；物体竖直下落时，其加速度大小为 $a_2=g-a$.

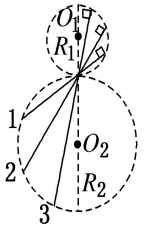
第二部分 方法、规律与技巧

牛顿运动定律的常见模型

(一) 等时圆模型【$\mu=0$，若轨道粗糙则不成立】



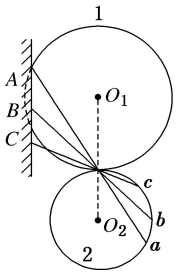


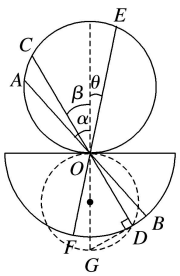


【结论】即在竖直面内的同一个圆周上，各斜面的顶端都在竖直圆周的最高点，底端都落在该圆周上【或从圆周上不同点出发都落到圆周上的最低点】（也就是必须满足：起于最高点或汇于最低点这一条件，小球在不同轨道上运动时时间才相等）

【证明】由 $2R\cdot\sin\theta=\frac{1}{2}\cdot g\sin\theta\cdot t^2$，可推得：$t_1=t_2=t_3=2\sqrt{\frac{R}{g}}$。

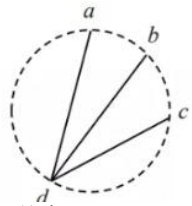
【变式 1】双圆模型

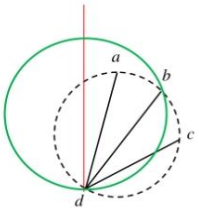




【结论】图 1 中有 $t_c>t_a>t_b$　　图 2 中有 $t_{AB}>t_{CD}>t_{EF}$

【典例 1】如图所示，ad、bd、cd 是竖直面内三根固定的光滑细杆，a、b、c 位于同一圆周上，a 点为圆周的最高点，bd 为圆周的一条直径，每根杆上都套着一个小滑环（图中未画出），三个滑环分别从 a、b、c 处静止释放，用 t_1、t_2、t_3 依次表示滑环到达 d 所用时间，则 （　）

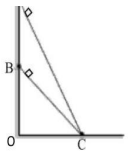




【答案】$t_1<t_2<t_3$

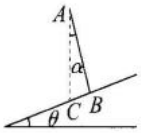
【典例 2】如图所示，在竖直墙面上有 A、B 两点。离地面的高度分别为 $H_A=8m$ 和 $H_B=4m$，现从 A、B 两点与地面上的某个位置 C 之间架设两条光滑的轨道，使小滑块从 A、B 两点由静止开始下滑到地面所用的时间相等，那么位置 C 离墙角 O 点的距离为（ ）

A.4m　　B. $4\sqrt{2}$ m　　C. $2\sqrt{3}$ m　　D.6m

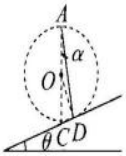


【答案】B

【典例 3】如图所示，在倾角为θ的斜面上方的 A 点处放置一光滑的木板 AB，B 端刚好在斜面上，木板与竖直方向 AC 所成角度为 α，一小物块由 A 端沿木板由静止滑下，要使物块滑到斜面的时间最短，分析 α 与 θ 角的大小关系.

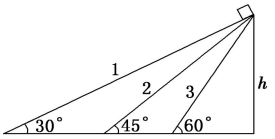


如图所示，A 点是物块运动的最高点，也应该是等时圆的最高点，则在竖直线 AC 上选取一点 O，以适当的长度为半径画圆，使该圆过 A 点且与斜面相切于 D 点，相切时圆的半径最小，故运动的时间最短.



将木板下端 B 点与 D 点重合即可，而 $\angle COD=\theta$，由几何关系知 $\alpha=\frac{\theta}{2}$.

【变式 2】等高斜面

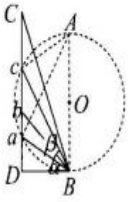


由 $t=\frac{1}{\sin\theta}\sqrt{\frac{2h}{g}}$，可知倾角越小，时间越长，

结论：$t_1>t_2>t_3$

【变式 3】等时三角形

如图所示，△BCD 为直角三角形，BD 边水平，质点从 CD 上任意一点沿直线滑到 B 点，不计阻力，现使质点分别从 a、b、c 点由静止开始下滑到 B 点，aB 与水平面的夹角为 α，cB 与水平面的夹角为 β，且 $\alpha+\beta=90°$，bB 与水平面的夹角为 45°，所用时间分别为 t_a、t_b、t_c，分析并比较 t_a、t_b、t_c 的大小关系.



【答案】$t_a=t_c\rangle t_b$

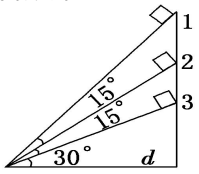
【规律】

在等时三角形中：

(1)若直角边 DC 上任意两点与 B 点连线形成的斜边与 BD 的夹角之和为 90°，则从该两点沿对应的斜边滑到 B 点的时间相等.

(2)当直角边上的点与最低点连线的夹角为 45°时，滑到 B 点的时间最短.

【实例】同底斜面



【证明】由 $t=\sqrt{\frac{4d}{g\sin 2\theta}}$ 知，θ=45°时时间最短

结论：$t_1=t_3>t_2$.

【方法推广】

借助 V-t 图求解不同轨道上的运动时间问题

【方法】

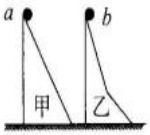
路程不同时，利用等时圆或等时三角形比较运动时间的长短；路程相同时，利用速率－时间图像比较时间长短.

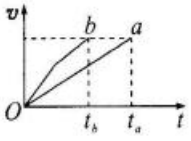
利用速率－时间图像解题时的要点：

(1)等高时两物体的速度大小相等.

(2)图像与横轴围成的面积相等.

【典例 4】如图所示，两光滑斜面的总长度相等，高度也相同，a、b 两球由静止分别从甲、乙顶端下滑，若球在转折点无能量损失，分析两球谁先着地.

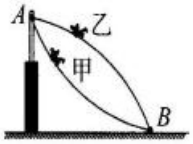


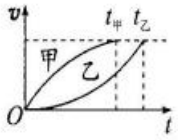


【答案】b 球先着地

【典例 5】如图所示，游乐场中，从高处 A 到水面 B 处有两条长度相同的光滑轨道. 甲、乙两小孩沿不同轨道同时从 A 处自由滑向 B 处，分析：

甲、乙谁先到达 B 处.

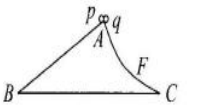


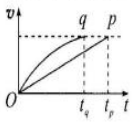


【答案】甲比乙先到达底端。

【典例 6】有一个固定在水平面上的光滑物块，其左侧面是斜面 AB，右侧面是曲面 AC，如图所示. 已知 AB 和 AC 的长度相同. 两个小球 p、q 同时从 A 点分别沿 AB 和 AC 由静止开始下滑，分析并比较小球 p、q 到达水平面所用时间的长短.

作速率－时间的图像，如图所示.





【答案】小球 q 先到达底端

（二）连接体模型

1.连接体

多个相互关联的物体连接(叠放、并排或由绳子、细杆联系)在一起构成的物体系统称为连接体. 连接体一般具有相同的运动情况(速度、加速度).

2.常见连接体的类型

(1)同速连接体(如图 1)

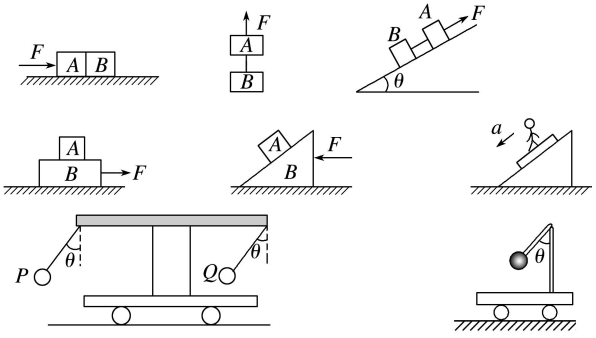


图 1

特点：两物体通过弹力、摩擦力作用，具有相同速度和相同加速度.

处理方法：用整体法求出 a 与 $F_{合}$ 的关系，用隔离法求出 $F_{内力}$ 与 a 的关系.

(2)关联速度连接体(如图 2)

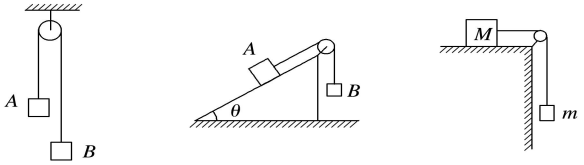
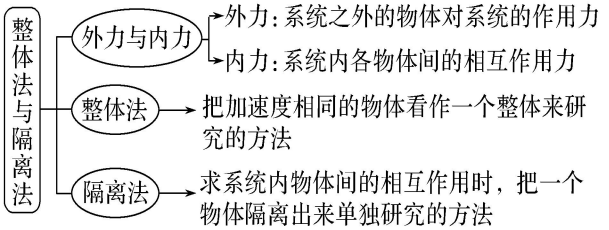


图 2

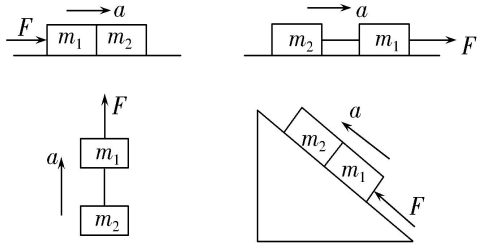
特点：两连接物体的速度、加速度大小相等，方向不同，但有所关联.

处理方法：分别对两物体隔离分析，应用牛顿第二定律进行求解.

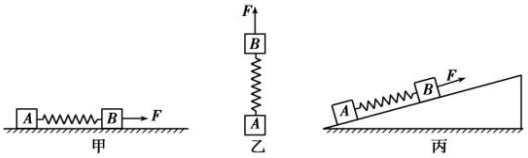


【规律总结】

1.按照质量分配协议：以下模型（在第一组图中 F_T 指 m_2 受到 m_1 或绳子的拉力，在第二组图中 F_T 指 A 受到弹簧的弹力），均为 $F_T=\frac{m_2\cdot F}{m_1+m_2}$；

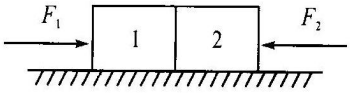


图组 1



图组 2

2.内力公式：如下图所示，物块 1、2 之间的弹力满足：$F_N=\frac{m_1F_2+m_2F_1}{m_1+m_2}$ 其中 m_1 一侧的作用外力为 F_1，m_2 一侧的作用外力为 F_2，不论是在水平面、竖直面还是斜面，也不论接触面光滑还是粗糙（摩擦因素相等），该结论总成立。



【说明】

1. 内力公式成立的条件

(1)连接体必须做匀变速直线运动，若连接体受力平衡，则内力公式不成立.

(2)牵引力与运动的方向共线.

2. 注意

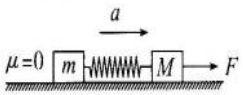
(1)地面的摩擦力已经按质量的比例直接作用在物体上(因两物体与地面间的动摩擦因数相同，故摩擦力之比等于质量之比)，无须通过内力去传递，故地面是否光滑不影响弹簧弹力的大小.

(2)若两物体与地面间的动摩擦因数不同，则弹力 F_N 不再等于 $\frac{mF}{M+m}$，需利用“两个牵引力的内力公式”求解.

【题型探讨】

1.一个牵引力的内力公式

【典例 1】如图所示，地面光滑，M 与 m 通过轻弹簧连接，现给 M 施加一水平恒力 F，系统向右做匀加速直线运动，M、m 相对静止，求弹簧的弹力大小.

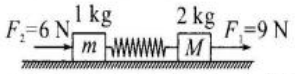


【答案】

$$F_N=m\cdot\frac{F}{M+m}.$$

2.两个牵引力的内力公式

【典例 2】如图所示，地面光滑，物体 m 与物体 M 通过轻弹簧连接，已知 $m=1$ kg，$M=2$ kg，现给系统施加两水平恒力 $F_1=9$ N 和 $F_2=6$ N，系统一起向右做加速运动，M、m 相对静止，求弹簧的弹力大小.



切记：不能将 F_1 与 F_2 合成为 15 N 后，再利用内力公式求解弹簧的弹力大小.

解题方法如下：

(1)先研究 F_1，此时不考虑 F_2，由内力公式得

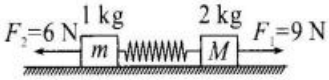
$$F_{N1}=m\cdot\frac{F_1}{M+m}=3\ \text{N},F_{N1}\text{ 使弹簧拉伸.}$$

(2)研究 F_2，此时不考虑 F_1，由内力公式得

$$F_{N2}=M\cdot\frac{F_2}{M+m}=4\ \text{N},F_{N2}\text{ 使弹簧压缩.}$$

综上所述，F_{N1} 使弹簧伸长，F_{N2} 使弹簧压缩，使弹簧压缩的弹力为正，则矢量合成后 $F_N=-F_{N1}+F_{N2}=1$ N，弹簧处于压缩状态.

【变式】如图所示，地面光滑，物体 m 与物体 M 通过轻弹簧连接，已知 $m=1$ kg，$M=2$ kg，现给系统施加两水平恒力 $F_1=9$ N 和 $F_2=6$ N，系统向右做加速运动，M、m 相对静止，求弹簧的弹力大小.



切记：不能将 F_1 与 F_2 合成为 3 N 后，再利用内力公式求解.

解题方法如下：

(1)先研究 F_1，此时不考虑 F_2，由内力公式得

$$F_{N1}=m\cdot\frac{F_1}{M+m}=3\ \text{N},F_{N1}\text{ 使弹簧伸长.}$$

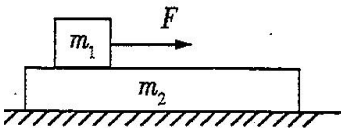
(2)研究 F_2，此时不考虑 F_1，由内力公式得

$$F_{N2}=M\cdot\frac{F_2}{M+m}=4\ \text{N},F_{N2}\text{ 使弹簧伸长.}$$

综上所述，F_{N1} 使弹簧伸长，F_{N2} 使弹簧伸长，使弹簧拉伸的弹力为正，则矢量合成后 $F_N=F_{N2}+F_{N1}=7\ \text{N}$，弹簧处于伸长状态.

（三）滑块-----滑板模型

【模型】质量为 m_1 的物体叠放在质量为 m_2 的物体上，在水平拉力 F 的作用下在运动（如图所示），设 m_1 与 m_2 的动摩擦因数为 μ_1，m_2 与地面的动摩擦因数为 μ_2）。



①若 m_2 固定不动，要使 m_1 相对 m_2 发生滑动，只需满足：

$F>\mu_1 m_1 g$。

②若 m_2 不固定，要使 m_1 相对 m_2 发生滑动，则需满足：

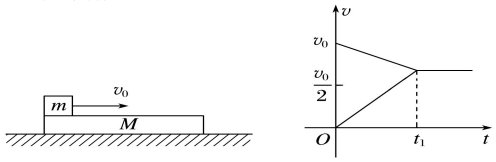
$a_1 \geq a_2$。

若 F 作用在 m_2 上，要使 m_2 相对 m_1 滑动，则需满足：

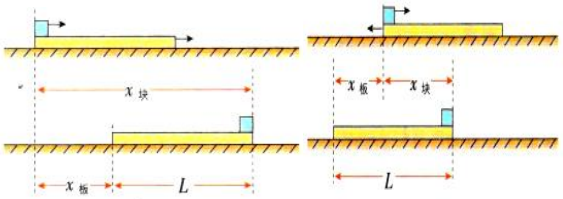
$a_2 \geq a_1$。

【其中 $a_1=\dfrac{F-\mu_1 m_1 g}{m_1}$，$a_2=\dfrac{\mu_1 m_1 g-\mu_2(m_1+m_2)g}{m_2}$】

【方法总结】解决此类问题的核心方法为：先假设两者发生相对滑动，求出各自的加速度，再进行比较。同时要注意两者的位移关系，借助 V-t 图求解。



两种位移关系



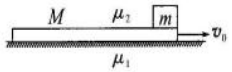
板块模型的解题逻辑：

(1)地面粗糙时，利用 $v-t$ 图像来解题. 地面粗糙，导致板块运动过程过多，利用图像记录运动过程，使分析更加简便.

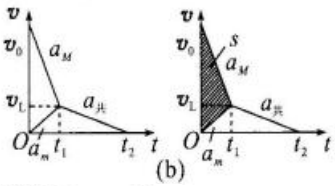
(2)地面光滑且不受外力牵引时，系统动量守恒，利用动量再结合能量求解相关问题.

(3)求解木板移动的路程(注意是路程非位移)时，无论地面是否光滑，均使用 $v-t$ 图像求解.

【典例】如图所示，木板的质量为 M 且足够长(物块不会掉出木板)，物块的质量为 m，地面的动摩擦因数为 μ_1，板块间的动摩擦因数为 μ_2，初始时木板具有向右的初速度 v_0，物块由静止放上木板右端，重力加速度为 g，最大静摩擦力等于滑动摩擦力，分析板块的运动状态.

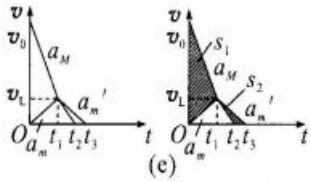


情况一：$\mu_2 \geqslant \mu_1$.



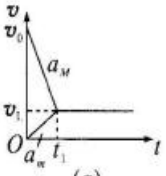
(b)

情况二：$\mu_2 < \mu_1$.



(c)

情况三：$\mu_1=0$，即地面光滑.



(g)

总结

(1)木板的最短长度：物块相对木板滑动的最大位移.

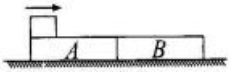
(2)相对滑动的路程：板块 $v-t$ 图像所围成的面积之和.

(3)距板端的距离：相对滑动的位移的矢量叠加.

(4)计算动摩擦因数：利用 $v-t$ 图像中任意两条图线解题，将两条图线对应的加速度用含有动摩擦因数的式子表达出来，即可求出.

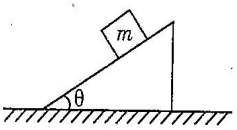
(5)相对滑动产生的焦耳热：滑动摩擦力与相对滑动距离的乘积.

【拓展：两块板模型】



【规律】当物块在左侧板上运动时，两板相当于一个长木板；当物块在右侧板上运动时，物块与右侧板形成一个新板块，此时左侧板与右侧板分离。

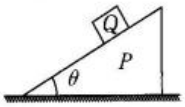
（四）斜面模型



【规律一】

①若μmgcos θ>mgsin θ，即μ＞tan θ，物体静止不动
②若μmgcos θ=mgsin θ，即μ=tan θ，物体匀速运动
③若μmgcos θ<mgsin θ,即μ＜tan θ，物体加速下滑

【典例 1】如图所示，粗糙斜面 P 始终静止在水平面上，斜面倾角为 θ，动摩擦因数为 μ，斜面足够长，在斜面上有一质量为 m 的物块 Q，重力加速度为 g，若给 Q 一个沿斜面向下或向上的初速度 v_0，分析：



情况一：初速度 v_0 沿斜面向下，物块沿斜面下滑的加速度大小为 $a=g\sin\theta-\mu g\cos\theta$.

(1)当 $\mu>\tan\theta$ 时，加速度方向沿斜面向上，物块减速下滑，最终静止在斜面上.

(2)当 $\mu=\tan\theta$ 时，物块沿斜面向下匀速下滑.

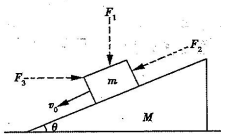
(3)当 $\mu<\tan\theta$ 时，加速度方向沿斜面向下，物块一直沿斜面加速下滑.

情况二：初速度 v_0 沿斜面向上，加速度大小为 $a=g\sin\theta+\mu g\cos\theta$，方向沿斜面向下，物块减速上滑.

(1)当 $\mu\geqslant\tan\theta$ 时，物块减速运动到最高点后静止不动.

(2)当 $\mu<\tan\theta$ 时，物块运动到最高点后再沿斜面向下滑动，上滑时加速度为 $g\sin\theta+\mu g\cos\theta$，方向沿斜面向下；下滑时加速度为 $g\sin\theta-\mu g\cos\theta$，方向沿斜面向下.

【规律二】若μmgcos θ=mgsin θ，即物体沿斜面匀速下滑时，任意方向对物体施加外力，则地面对斜面的摩擦力始终为 0.



总结

初始时，若物块沿斜面匀速下滑，无论给物体施加任一方向的外力，在物体停止前，地面与斜劈间一直不存在摩擦力.

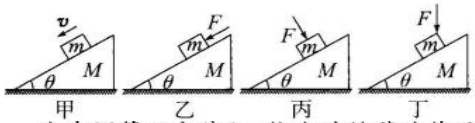
注意：上述结论在物体停止前才成立，当物体静止时，由于外力的存在，支持力与摩擦力的合力方向不一定竖直向上.

【典例 2】如图甲所示，质量为 M，倾角为θ的斜劈始终静止在地面上，斜面粗糙，动摩擦因数为 μ，一质量为 m 的物块沿斜面匀速下滑，重力加速度为 g.

(1)现在 m 上施加一沿斜面向下的恒力 F，如图乙所示，在 m 停止运动前，求地面对 M 产生的摩擦力大小；

(2)现在 m 上施加一垂直斜面的恒力 F，如图丙所示，在 m 停止运动前，求地面对 M 产生的摩擦力大小；

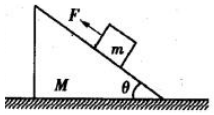
(3)现在 m 上施加一竖直向下的恒力 F，如图丁所示，在 m 停止运动前，求地面对 M 产生的摩擦力大小.



由牛顿第三定律知，物块对斜劈的作用力始终竖直向下，故对面对斜劈始终无摩擦力作用.

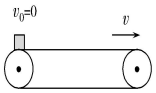
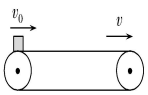
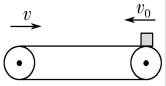
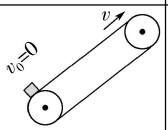
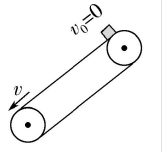
【规律三】若物体有加速度时，可以用牛顿第二定律的推广式 $F_{合}=m_1a_1+m_2a_2+.....$，或分量式：

$F_{合x}=m_1a_{1x}+m_2a_{2x}+.....$ $F_{合y}=m_1a_{1y}+m_2a_{2y}+.....$



(五) 传送带模型

【核心】判断摩擦力的方向→找清物体与传送带的相对运动。同时 结合（利用）V-t 图求解问题。

类型	图示	滑块运动情况
水平传送带	($v_0=0$) 	(1)可能一直加速； (2)可能先加速后匀速
	 ($v_0\neq0$ 且与 v 同向)	(1)$v_0>v$ 时，可能一直减速，也可能先减速再匀速； (2)$v_0<v$ 时，可能一直加速，也可能先加速再匀速
	 ($v_0\neq0$ 且与 v 反向)	(1)传送带较短时，滑块一直减速到达左端； (2)传送带较长时，滑块先向左运动，减速到零后再向右运动，再回到右端
倾斜传送带	 (倾斜向上传送)	1，若μmgcos θ>mgsin θ，可能一直加速，则向上加速且 a=μgcos θ-gsin θ ；也可能先加速后匀速。， 2，若μmgcos θ<mgsin θ，则向下加速且 a=gsinθ−μgcosθ
	 (倾斜向下传送)	刚开始物体向下加速且有 a＝gsin θ＋μgcos θ当物体速度达到 V 传时， ①若μmgcos θ<mgsin θ ，则继续向下加速，摩擦力反向，此时 a= gsin θ－μgcos θ， ②若μmgcos θ>mgsin θ，则一起向下匀速运动

【注意】解决变速传送带求划痕问题，优先利用 V-t 图求解。

利用“面积”法求划痕长度。

【记忆口诀】

运动和力建桥梁，牛二定律来帮忙。
牛一理想牛二实，牛三对象易弄错。
斜面滑块传送带，等时模型超失重。
瞬时问题及弹簧，临界条件定乾坤。

【本章高频考点】

1.牛顿第二定律的瞬时性问题（弹簧的弹力不能突变，轻绳轻杆的弹力可以突变）。
2.“四大模型”----等时圆、斜面、滑块滑板、传送带模型。
3.超重与失重（电梯、过山车、体重计读数、举重等）。
4.牛顿第二定律实验（误差分析、纸带处理、实验改进等）。

第三部分 物理方法概述

一、加速度分解法

当物体受到两个以上的力作用而产生加速度时，常用正交分解法解题，多数情况下是把力正交分解在加速度方向和垂直加速度方向上，而有的情况下分解加速度比分解力更简单，这时有 $F_x=ma_x$，$F_y=ma_y$。

二、假设法

在应用牛顿第二定律解题的过程中，根据所研究的具体问题，从题设条件的各种可能的情况中，做出某种假设，然后从这一假设出发，运用物理概念和规律进行推理或计算，从而寻找问题的正确答案的方法。

三、整体法和隔离法

在运用牛顿运动定律处理连接体问题时，若将连接体作为整体，则不必分析物体之间的相互作用，只需分析外界对整体的作用力，从而简化分析过程，加快解题速度，这就是所谓的“整体法”；题中若求解物体之间的相互作用力，这时必须将物体隔离出来，化内力为外力，才能求解，这就是“隔离法”。

四、程序法

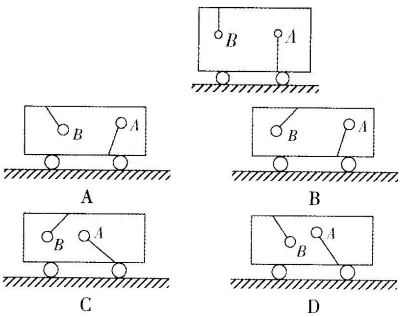
所谓程序法，是按时间的先后顺序对题目给出的物理过程进行分析，划分出不同的过程，对每一过程，具体分析出其速度、位移、时间的关系，然后利用各过程的具体特点列方程解题。

五、临界条件法

一种物理现象转化为另一种物理现象的转折状态叫临界状态，利用临界条件解决临界问题的方法称为临界法。

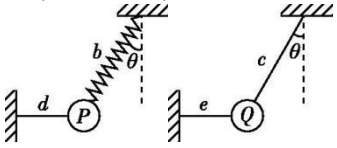
第四 易错、疑难题选

【例 1】如图所示，在车厢中的 A 是用绳拴在底部上的氢气球，B 是用绳挂在车厢顶部的金属球，开始时它们和车一起向右做匀速直线运动，若忽然刹车使车向右做匀减速运动，则下列能正确表示刹车期间车内情况的是（　　）



【答案】D

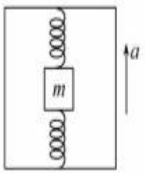
【例 2】如图所示,小球 P、Q 质量均为 m,分别用轻弹簧 b 和细线 c 悬挂在天花板下,再分别用细线 d、e 与左边的固定墙相连,静止时细线 d、e 水平,b、c 与竖直方向的夹角均为θ=37°.重力加速度为 g,sin 37°=0.6,cos 37°=0.8,下列判断正确的是(　　)



A.剪断 d 瞬间,P 的加速度大小为 0.6g
B.剪断 d 瞬间,P 的加速度大小为 0.75g
C.剪断 e 前,c 的拉力大小为 0.8mg
D.剪断 e 瞬间,c 的拉力大小为 1.25mg

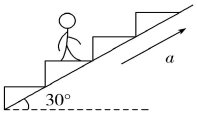
【答案】B

【例 3】如图所示，将质量为 m=0.2kg 的物体用两个完全一样的竖直轻弹簧固定在升降机内，当升降机以 3 m/s² 的加速度加速向上运动时上面弹簧对物体的拉力为 0.8N；当升降机以 6 m/s² 的加速度加速向上运动时上面弹簧对物体的拉力为（　　）



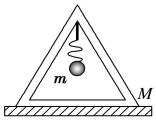
【答案】1.1N

【例 4】如图所示，电梯与水平面夹角为 30°，当电梯加速向上运动时，人对梯面压力是其重力的$\frac{6}{5}$，则人与梯面间的摩擦力是其重力的多少倍？



【答案】$\sqrt{3}$ /5

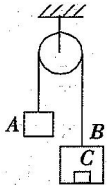
【例 5】如图所示，质量为 M 的框架放在水平地面上，一轻弹簧上端固定在框架上，下端固定一个质量为 m 的小球，小球上下振动时，框架始终没有跳起，当框架对地面压力为零瞬间，小球的加速度大小为(　　)



【答案】$\frac{(M+m)g}{m}$

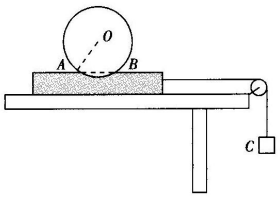
【例 6】如图所示，质量为 m_1 =2kg 的物体 A 经跨过定滑轮的轻绳与质量为 M=5kg 的箱子 B 相连，箱子底板上放一质量为 m_2 =1kg 的物体 C，不计定滑轮的质量和一切阻力，在箱子加速下落的过程中，取 g=10 m/s²,下列正确的是（　）

A.物体 A 处于失重状态，加速度大小为 10 m/s²
B.物体 A 处于超重状态，加速度大小为 20 m/s²
C.物体 C 处于失重状态，对箱子的压力大小为 5N
D.轻绳对定滑轮的作用力大小为 80N



【答案】C

【例 7】质量为 m 的光滑小球恰好放在质量也为 m 的圆弧槽内,它与槽左、右两端的接触处分别为 A 点和 B 点,圆弧槽的半径为 R,OA 与水平线 AB 成 60°角,槽放在光滑的水平桌面上,通过细线和滑轮与重物 C 相连,细线始终处于水平状态。通过实验知道,当槽的加速度很大时,小球将从槽中滚出,滑轮与线质量都不计,要使小球不从槽中滚出,则重物 C 的最大质量为　　(　　)

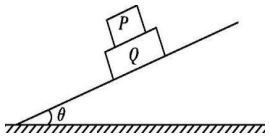


A.$\frac{2\sqrt{3}}{3}m$　　B.$2m$

C.$(\sqrt{3}-1)m$　　D.$(\sqrt{3}+1)m$

【答案】D

【例 8】如图所示，斜面倾角为ϑ，质量分别为 m 和 $2m$ 的滑块 P 和 Q 叠放在斜面上，Q 的上表面与斜面平行.P、Q 一起沿斜面以加速度 a_0 向下滑行，P、Q 之间恰好没有摩擦力.现在对 P 施加一个沿斜面向上的拉力(大小设为 F)，P、Q 一起沿斜面以加速度 a_0 向上滑行，P、Q 间的摩擦力大小设为 F_f，P、Q 间的动摩擦因数设为μ，已知最大静摩擦力大小等于滑动摩擦力，则下列判断正确的是（　　）

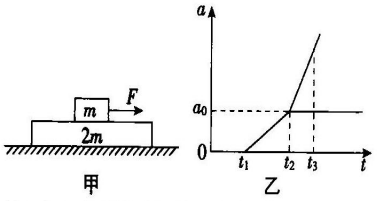


A.$F=4ma_0$　　B.$F_f=4ma_0$

C.μ可能为$\frac{5}{2}\tan\vartheta$　　D.μ可能为$\frac{7}{2}\tan\vartheta$

【答案】B

【例 9】（多选）如图甲所示，在水平面上有一质量为$2m$的足够长的木板，其上叠放一质量为m的木块.现给木块施加一随时间增大的水平力$F=kt(k$是常数)，木块加速度的大小随时间变化的图线如图乙所示，木块与木板之间的动摩擦因数为μ_1、木板与水平面之间的动摩擦因数为μ_2.假定接触面之间的最大静摩擦力和滑动摩擦力相等，则下列说法正确的是（　　）



甲　　乙

A.$0\sim t_1$时间内木块受到的摩擦力大小为$\mu_1 mg$

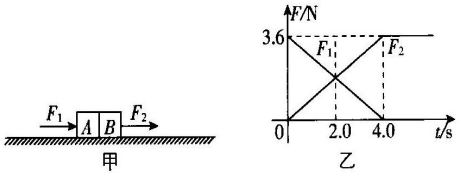
B.$\mu_1<2\mu_2$

C.乙图中$a_0=\left(\frac{\mu_1-3\mu_2}{2}\right)g$

D.$t_1\sim t_2$与$t_2\sim t_3$时间内对应的两段图线的斜率绝对值之比为1∶3

【答案】CD

【例 10】（多选）如图甲所示，用粘性材料粘在一起的A、B两物块静止于光滑水平面上，两物块的质量分别为$m_A=1$ kg、$m_B=2$ kg，当A、B之间产生拉力且大于0.3 N时，A、B将会分离.$t=0$时刻开始对物块A施加一水平推力F_1，同时对物块B施加同一方向的拉力F_2，使A、B从静止开始运动.运动过程中F_1、F_2方向保持不变，F_1、F_2的大小随时间变化的规律如图乙所示.则下列关于A、B两物块受力及运动情况的分析，正确的是（　　）



甲　　乙

A.$t=2.0$ s时刻A、B之间作用力大小为0.6 N

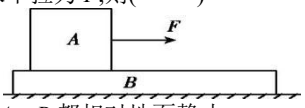
B.$t=2.0$ s时刻A、B之间作用力为零

C.$t=2.5$ s时刻A对B的作用力方向向左

D.从$t=0$时刻到A、B分离，它们运动的位移为5.4 m

【答案】AD

【例 11】如图所示，A、B两物块的质量分别为$2m$和m，静止叠放在水平地面上.已知A、B间的动摩擦因数为μ，B与地面间的动摩擦因数为$\frac{1}{2}\mu$，最大静摩擦力等于滑动摩擦力，重力加速度为g.现对A施加一水平拉力F，则(　　)



A.当$F<2\mu mg$时，A、B都相对地面静止

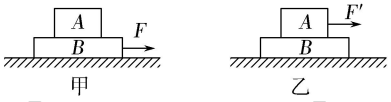
B.当$F=\frac{5}{2}\mu mg$时，A的加速度为$\frac{1}{3}\mu g$

C.当$F>3\mu mg$时，A相对B滑动

D.无论F为何值，B的加速度都不会超过$\frac{1}{2}\mu g$

【答案】BCD

【例 12】如图所示，木块A、B静止叠放在光滑水平面上，A的质量为m，B的质量为$2m$。现施水平力F拉B(如图甲)，A、B刚好不发生相对滑动，一起沿水平面运动。若改用水平力F'拉A(如图乙)，使A、B也保持相对静止，一起沿水平面运动，则F'不得超过(　　)

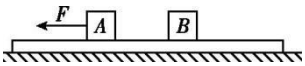


甲　　乙

A．$2F$　　B.$\frac{F}{2}$　　C．$3F$　　D.$\frac{F}{3}$

【答案】B

【例 13】一长轻质薄硬纸片置于光滑水平地面上，薄硬纸片上放质量均为1 kg的A、B两物块，A、B与薄硬纸片之间的动摩擦因数分别为μ_1=0.3、μ_2=0.2，水平恒力F作用在A物块上，如图所示，已知最大静摩擦力等于滑动摩擦力，g取10 m/s².下列说法正确的是（　　）



A.若F=1 N，则物块、薄硬纸片都静止不动

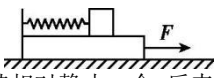
B.若F=1.5 N，则A物块所受摩擦力大小为1.5 N

C.若F=8 N，则B物块的加速度为4.0 m/s²

D.无论力F有多大，A与薄硬纸片都不会发生相对滑动

【答案】D

【例 14】如图所示，一个质量为M=2 kg的小木板放在光滑的地面上，在小木板上放着一个质量为m=1 kg的小物体，它被一根水平方向上压缩了的弹簧推着而静止在小木板上，这时弹簧的弹力为2 N.现沿水平向右的方向对小木板施以作用力，使小木板由静止开始运动起来，运动过程中力F由0逐渐增加到9 N，以下说法正确的是（　　）



A.物体与小木板先保持相对静止一会，后来相对滑动

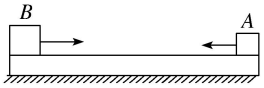
B.物体受到的摩擦力一直减小

C.当力F增大到6 N时，物体不受摩擦力作用

D.小木板受到 9 N 拉力时,物体受到的摩擦力为 3 N

【答案】C

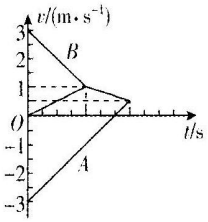
【例 15】如图，两个滑块 A 和 B 的质量分别为 m_A＝1 kg 和 m_B＝5 kg，放在静止于水平地面上的木板的两端，两者与木板间的动摩擦因数均为μ_1＝0.5；木板的质量为 m＝4 kg，与地面间的动摩擦因数为μ_2＝0.1。某时刻 A、B 两滑块开始相向滑动，初速度大小均为 v_0＝3 m/s.A、B 相遇时，A 与木板恰好相对静止。设最大静摩擦力等于滑动摩擦力，取重力加速度大小 g＝10 m/s²。求：



(1)B 与木板相对静止时，木板的速度；

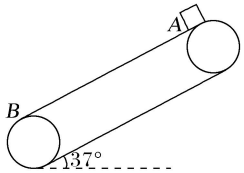
(2)A、B 开始运动时，两者之间的距离。

【提示】画出 v-t 图（如下图）



【答案】(1)1 m/s　(2)1.9 m

【例 16】如图所示，倾角为 37°，长为 l＝16 m 的传送带，转动速度为 v＝10 m/s，物体与传送带间的动摩擦因数为μ＝0.5，在传送带顶端 A 处无初速度地释放一个质量为 m＝0.5 kg 的物体。(已知 sin 37°＝0.6，cos 37°＝0.8，g＝10 m/s²。)求：

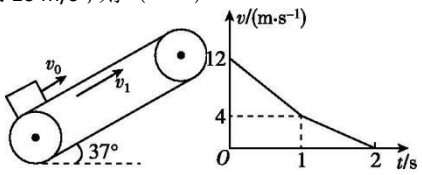


(1)传送带顺时针转动时，物体从顶端 A 滑到底端 B 的时间；

(2)传送带逆时针转动时，物体从顶端 A 滑到底端 B 的时间。

【答案】(1)4 s　(2)2 s

【例 17】如图甲所示,倾斜的传送带正以恒定速率 v_1 沿顺时针方向转动,传送带的倾角为 37°,一物块以初速度 v_0 从传送带的底部冲上传送带并沿传送带向上运动,其运动的 v-t 图像如图乙所示,物块到传送带顶端时速度恰好为零.sin 37°=0.6, cos 37°=0.8, g 取 10 m/s², 则（　　）



甲　　乙

A.由图乙可知, 0~1 s 内物块受到的摩擦力大于 1~2 s 内的摩擦力

B.摩擦力方向一直与物块运动的方向相反

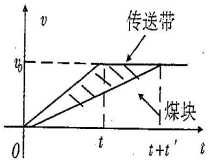
C.物块与传送带间的动摩擦因数为 $\frac{1}{4}$

D.传送带底端到顶端的距离为 11 m

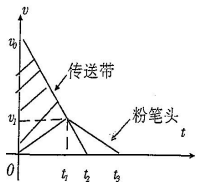
【答案】C

【例 18】一水平的浅色长传送带上放置一煤块(可视为质点)，煤块与传送带之间的动摩擦因数为μ。初始时，传送带与煤块都是静止的。现让传送带以恒定的加速度 a_0 开始运动，当其速度达到 v_0 后，便以此速度做匀速运动。经过一段时间，煤块在传送带上留下了一段黑色痕迹后，煤块相对于传送带不再滑动。求此黑色痕迹的长度。

【答案】$\frac{v_0^2(a_0-\mu g)}{2a_0\mu g}$　　【提示】

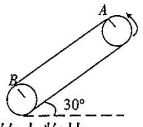


【例 19】将一粉笔头轻放在 v_0 =2m/s 的恒定速度运动的水平传送带上后，传送带上留下一条长度为 4m 的划线；若使传送带改做匀减速运动（加速度大小为 a=1.5m/s²）,并且在传送带开始做匀减速运动的同时，将另一支粉笔头放在传送带上，该粉笔头在传送带上能留下一条多长的划线？（设传送带足够长，g 取 10 m/s²）



【答案】1m　　【提示】

【例 20】如图所示，皮带传动装置与水平面夹角为 30°,轮半径 $R=\frac{1}{2\pi}$(单位:m) ,两轮轴心相距 $L=3.75m$,A、B 分别是传送带与两轮的切点,轮缘与传送带之间不打滑,一个质量为 $0.1kg$ 的小物块与传送带间的动摩擦因数为 $\mu=\frac{\sqrt{3}}{6}$。小物块相对于传送带运动时,会在传送带上留下痕迹。当传送带沿逆时针方向匀速运动时,小物块无初速度地放在 A 点,运动至 B 点飞出。传送带上留下的痕迹最长,传送带匀速运动的速度 v 至少多大?g 取 $10m/s^2$。



【答案】v=12.5m/s.

【例 21】

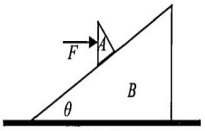
如图所示，质量为 m 的三角形木楔 A，置于静止在水平面上的斜面体 B 上，斜面体 B 倾角为 θ，A 与 B 之间的动摩擦因数为 μ，一水平力 F 作用在木楔 A 的竖直面上，在力 F 的推动下，木楔 A 沿斜面以恒定的加速度 a 向上滑动，此时斜面体 B 仍静止，则

A. F 的大小为 $\frac{m(a-g\sin\theta)}{(\cos\theta+\mu\sin\theta)}$

B. F 的大小为 $\frac{m[a+g(\sin\theta+\mu\cos\theta)]}{\cos\theta}$

C. 若增大 F，方向不变，斜面体 B 一定仍保持静止

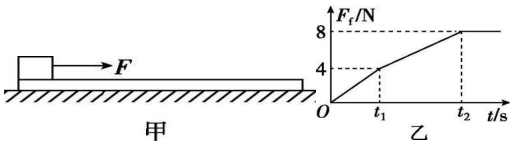
D. 若增大 F，方向不变，斜面体 B 将可能向右运动



第 13 题图

【答案】D

【例 22】如图甲所示,一滑块置于足够长的长木板左端,木板放置在水平地面上.已知滑块和木板的质量均为 2 kg.现在滑块上施加一个 F=0.5t(N)的变力,从 t=0 时刻开始计时,滑块所受摩擦力随时间变化的关系如图乙所示.设最大静摩擦力与滑动摩擦力相等,重力加速度 g 取 10 m/s².下列说法正确的是　(　)



甲　　乙

A.滑块与木板间的动摩擦因数为 0.4

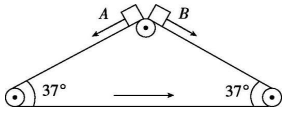
B.木板与水平地面间的动摩擦因数为 0.2

C.图乙中 t_2=24 s

D.木板的最大加速度为 2 m/s²

【答案】ACD

【例 23】如图所示,三角形传送带以 1 m/s 的速度逆时针匀速转动,两边的传送带长都是 2 m 且与水平方向的夹角均为 37°.两个小物块 A、B 从传送带顶端都以 1 m/s 的初速度沿传送带下滑,物块与传送带间的动摩擦因数都是 0.5.g 取 10 m/s²,sin 37°=0.6,cos 37°=0.8.下列说法正确的是(　)



A.物块 A 先到达传送带底端

B.物块 A、B 同时到达传送带底端

C.传送带对物块 A、B 均做负功

D.物块 A、B 在传送带上的划痕长度之比为 1∶3

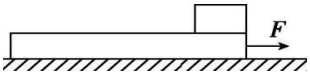
【答案】BCD

【例 24】如图所示,质量 M=3 kg 的长木板放在光滑的水平面上,在水平拉力 F=11 N 作用下,木板由静止开始向右运动.当速度达到 1 m/s 时,将质量 m=4 kg 的物块轻轻放到木板的右端.已知物块与木板间的动摩擦因数μ=0.2,物块可视为质点.(g 取 10 m/s^2)

(1)物块刚放置在木板上时,物块和木板的加速度分别为多大?

(2)木板至少多长,物块才能与木板最终保持相对静止?

(3)物块与木板相对静止后,物块受到的摩擦力为多大?



【答案】(1)2 m/s^2　1 m/s^2　(2)0.5 m　(3)6.29 N

【例 25】

(9分) 如图甲所示为某商场从一楼直达四楼的自动扶梯，其简化模型如图乙所示，倾角为37°，若没有顾客时电梯速度可视为零，当顾客踏上电梯 A 端时，电梯沿图乙所示方向匀加速运行，电梯加速度大小为 a=0.5m/s^2，最大速度可达 v_m=1m/s。某质量为 60kg 的测试员从 A 点出发踏上静止的电梯，到达电梯顶端 B 点的过程中始终相对电梯静止。假设商场每层层高相同且为 5m，取 g=10m/s^2。求：

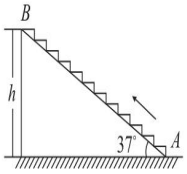
(1) 测试员从 A 点至 B 点运动过程中的平均速度；

(2) 测试员在加速运动时受到电梯对他的作用力大小；

(3) 测试员从 A 点至 B 点运动过程中电梯对他所做的功和摩擦力对他所做的功分别为多少。



甲



乙

解：(1) 加速时间 $t_1=\dfrac{v_m}{a}=2\text{s}$　(1分)

加速位移 $x_1=\dfrac{1}{2}at^2=1\text{m}$

匀速时间 $t_2=\dfrac{25-1}{1}\text{s}=24\text{s}$　(1分)

平均速度 $\bar{v}=\dfrac{25}{24+2}\text{m/s}=\dfrac{25}{26}\text{m/s}$或$0.96\text{m/s}$　(1分)

(2) $f=ma\cdot\cos37°=24\text{N}$　(1分)

$F_N=mg+ma\sin37°=618\text{N}$　(1分)

$F=\sqrt{f^2+F_N^2}=\sqrt{382500}\text{N}\approx618\text{N}$　(1分)

(3) $W_{电}-mgh=\dfrac{1}{2}mv_m^2$　(1分)

$W_{电}=9030\text{J}$　(1分)

$W_f=f\cdot x_1\cdot\cos37°=19.2\text{J}$　(1分)

第五章 抛体运动

第一部分　基础知识点

第 1 节 曲线运动

一、曲线运动

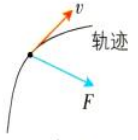
项目		内容	说明
定义		运动轨迹是曲线的运动叫曲线运动	由于曲线运动中运动方向时刻改变，故曲线运动一定是变速运动
物体做曲线运动的条件		合力(或加速度)的方向与速度方向不在同一直线上	合力与速度方向间的夹角决定速度的大小变化
特点	速度	速度沿轨迹的切线方向	速度的方向一定改变，但速度的大小不一定改变
	加速度	加速度一定不为 0	加速度一定不为 0，但不一定发生改变
	位移	从起点到终点的有向线段	曲线运动需在二维或三维坐标系中表示位移
	合力	合力与速度不在同一直线上，指向轨迹弯曲的内侧	合力一定不为 0，但不一定变化，可为恒力，每一瞬间与加速度仍遵从 $F_{合}=ma$
分类		匀变速曲线运动	合力是恒力，如平抛运动
		非匀变速曲线运动	合力是变力，如圆周运动

二、力与运动的关系

1. 合力方向与轨迹的关系

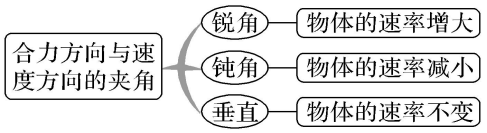
(1)无力不拐弯，拐弯必有力，曲线运动物体的运动轨迹必定在物体速度方向和所受合外力方向之间.

(2)运动物体的曲线轨迹必定向合外力方向弯曲，即合外力方向指向曲线的内侧.

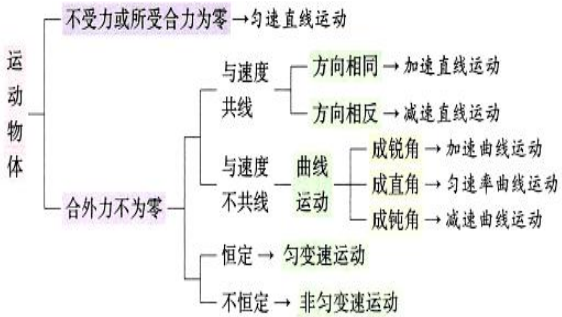


曲线运动的轨迹与合力的关系

2. 力与速度大小的变化情况



3.力与运动的关系



4.**运动的性质**：做曲线运动的物体，速度的方向时刻在改变，所

以曲线运动一定是变速运动。

5.曲线运动的常见误区

（1）认为曲线运动的物体速度大小、方向均发生变化。

（2）认为做曲线运动的物体速度变化，加速度也一定变化。

（3）认为变速运动一定是曲线运动。

（4）认为受力作用的物体一定做曲线运动。

第 2 节　运动的合成与分解

1.合运动与分运动

（1）定义：如果一个物体同时参与几个运动，通常情况下，物体参与的这几个运动叫分运动，物体的实际运动叫合运动。

(2)合运动与分运动的关系

等时性	合运动与各分运动同时发生和结束，时间相同
等效性	各分运动的共同效果与合运动效果相同
独立性	各分运动之间彼此独立，互不影响。即某个方向的分运动不会因其他分运动的存在而受到影响
同一性	合运动和它的各个分运动必须是对应于同一物体的，对应于同一时刻或同一段运动过程的
矢量性	合运动与分运动的位移、速度、加速度均可进行矢量运算

【关于等时性的深入理解】合运动与分运动的时间相等，即 t=$\frac{\text{合运动位移}}{\text{合速度}}=\frac{\text{各分运动位移}}{\text{各分运动对应速度}}$.

2. 运动的合成与分解

(1)定义：已知分运动求合运动叫运动的合成，已知合运动求分运动叫运动的分解。

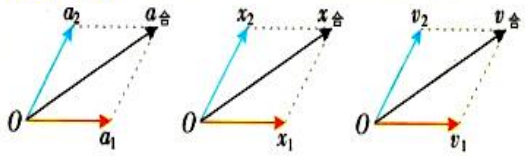
(2)运动的合成与运动的分解互为逆运算

合运动 $\underset{\text{运动的合成}}{\overset{\text{运动的分解}}{\rightleftharpoons}}$ 分运动

(3)运动的合成与分解的运算法则

①运动的合成与分解是指描述运动的各物理量，即位移、速度、加速度的合成与分解。由于它们都是矢量，所以都遵从平行四边形定则。

②三角形定则与平行四边形定则具有等效性，同样适用。



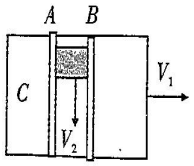
(4)意义：合成与分解的目的是将复杂运动转化为简单运动，将曲线运动转化为直线运动，以便于研究。

3. 两个直线运动的合运动性质的判断

两个互成角度的分运动	合运动的性质
两个匀速直线运动	匀速直线运动
一个匀速直线运动、一个匀变速直线运动	匀变速曲线运动
两个初速度为 0 的匀加速直线运动	匀加速直线运动
两个初速度不为 0 的匀变速直线运动	如果 $v_{合}$ 与 $a_{合}$ 共线，为匀变速直线运动
	如果 $v_{合}$ 与 $a_{合}$ 不共线，为匀变速曲线运动

4. 运动的合成典例

【典例 1】如图所示，质量为 m 的物体放在水平放置的钢板 C 上，与钢板的动摩擦因数为 μ。由于受到相对地面静止的光滑导槽 AB 的控制，物体只能沿水平导槽运动。现使钢板以速度 V_1 向右匀速运动，同时用力 F 拉动物体（方向沿导槽方向）使物体以速度 V_2 沿导槽匀速运动，求拉力 F 的大小。



【答案】$\mu mg\frac{V_2}{\sqrt{V_1^2+V_2^2}}$

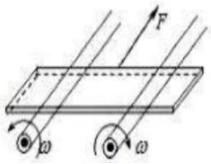
【典例 2】如图所示，两根完全相同，轴线在同一水平面内的平行长圆柱上放一均匀木板，木板的重心与两圆柱等距，其中圆柱的半径 r=2cm，木板质量 m=5kg，木板与圆柱间的动摩擦因数 μ=0.2，两圆柱以角速度 ω 绕轴线作相反方向转动。现施加一过木板重心且平行圆柱轴线的拉力 F 于木板上。使其以速度 V=0.6m/s 沿圆柱表面作匀速运动。下列说法正确的是（　　）

A.不论 ω 多大，所需水平拉力恒为 10N

B. ω 越大，所需水平拉力越大

C.若 ω =40rad/s，则水平拉力 F=6N

D.若 ω =40rad/s，水平拉力恒为 20N，则木板做匀加速运动



【答案】C

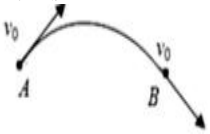
【典例 3】如图所示，一个做匀变速曲线运动的物体的轨迹示意图，运动至 A 时速度大小为 v_0，经一段时间后物体运动至 B 点，速度大小仍为 v_0，但相对 A 点时的速度方向改变了 90^0，则在此过程中（　　）

A.物体的运动轨迹 AB 可能是某个圆的一段圆弧

B.物体的速度可能先增大后减小

C.物体的速度不可能小于 $\frac{\sqrt{2}}{2}v_0$

D.B 点的加速度方向与速度垂直



【答案】C

【例4】有一半径 r 为 0.2 m 的圆柱体绕竖直轴 OO' 以角速度 ω 为 9 rad/s 匀速转动，现用水平力 F 把质量 m 为 1 kg 的物体 A 压在圆柱体的侧面。由于受挡板上竖直的光滑槽的作用，物体 A 在水平方向上不能随圆柱体转动，而以 v_0 为 2.4 m/s 的速率匀速下滑，如图 1-7 所示。若物体 A 与圆柱体间的动摩擦因数 μ 为 0.25，试求水平推力 F 的大小。(g 取 10 m/s^2)

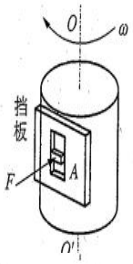


图 1-7

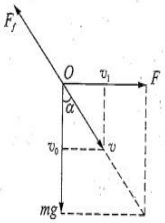
解：如图 1-8 所示，在垂直于圆柱面的方向上有压力 $F_N=F$。物体相对圆球面的速度为 v；

且 $v=\sqrt{v_0^2+(\omega_0 r)^2}=\sqrt{2.4^2+(9\times0.2)^2}\ \text{m/s}=3\ \text{m/s}$，

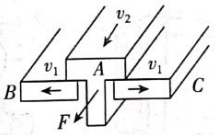
物体所受摩擦力的方向跟 v 的方向相反。由物体的平衡条件得

$F_f\cos\alpha=mg$，又 $F_f=\mu F_N$；$\cos\alpha=\dfrac{v_0}{v}=\dfrac{2.4}{3}=0.8$，故

$$F=\frac{mg}{\mu\cos\alpha}=\frac{1\times10}{0.25\times0.8}\ \text{N}=50\ \text{N}.$$



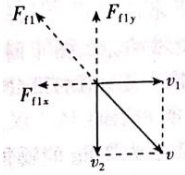
5. 如图所示，均匀 T 形物块 A 质量为 m，夹在两个相同的水平垫板中，A 与垫板间的动摩擦因数为 μ，重力加速度为 g。当垫板 B、C 以相同的水平速率 v_1 对称且匀速地向两侧退开时，要使 A 以速率 v_2 匀速前移，作用在 A 中央位置上与 v_2 同向的水平拉力 F 的大小应满足 （ A ）



A. $F<\mu mg$　　B. $F=\mu mg$

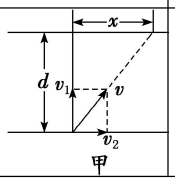
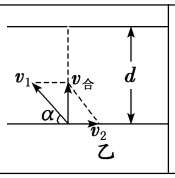
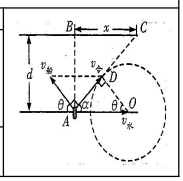
C. $F>\mu mg$　　D. 不能确定

[解析] 对 A 进行受力分析，可知 A 在水平方向上受到 B 和 C 对 A 的摩擦力和拉力的作用，由于滑动摩擦力的方向与相对运动的方向相反，所以 A 相对 B 的运动方向如图中实线所示，滑动摩擦力的方向以及滑动摩擦力的分解如图中虚线所示，由对称性可知，B 与 C 对 A 的支持力都是 $\frac{1}{2}mg$，则 B 对 A 的摩擦力 $F_{f1}=\frac{1}{2}\mu mg$，由图可知，由于 $F_{f1}=\sqrt{F_{f1x}^2+F_{f1y}^2}$，所以 $F_{f1y}<F_{f1}=\frac{1}{2}\mu mg$；同理，沿 y 方向，C 对 A 的摩擦力也满足 $F_{f2y}<F_{f2}=\frac{1}{2}\mu mg$，所以作用在 A 中央位置上与 v_2 同向的水平拉力 F 的大小满足 $F=F_{f1y}+F_{f2y}<\mu mg$，故 A 正确.



5.两类典型问题

(1)小船渡河的两类模型

	时间最短	位移最短	
渡河情景	 甲	 乙	

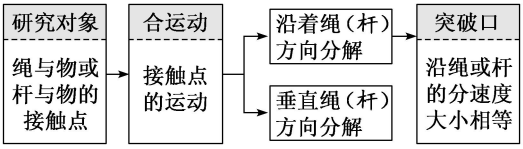
渡河条件	船头垂直于河岸	船头斜向上游且 $v_{船}>v_{水}$	船头斜向上游，与合速度方向垂直，且 $v_{水}>v_{船}$
渡河结果	最短时间 $t_{min}=\dfrac{d}{v_{船}}$	最短位移为河宽 d	最短位移为 $\dfrac{v_{水}}{v_{船}}d$

【总结】小船渡河模型的分析思路

合运动：小船的实际运动 $\xrightarrow{\text{分解}}$ 分运动一：船相对于静水的划行运动船在静水中的划行速度 $v_{船}$　分运动二：船随水漂流的运动水流的速度 $v_{水}$ $\xrightarrow{\text{合成}}$ 合速度：船相对于岸的实际速度 $v_{合}$

(2) 绳子末端速度问题

1.绳(杆)端速度的分解思路



---即沿绳子被拉（杆子伸长）方向和垂直于绳沿绳（杆）摆动的方向分解速度。

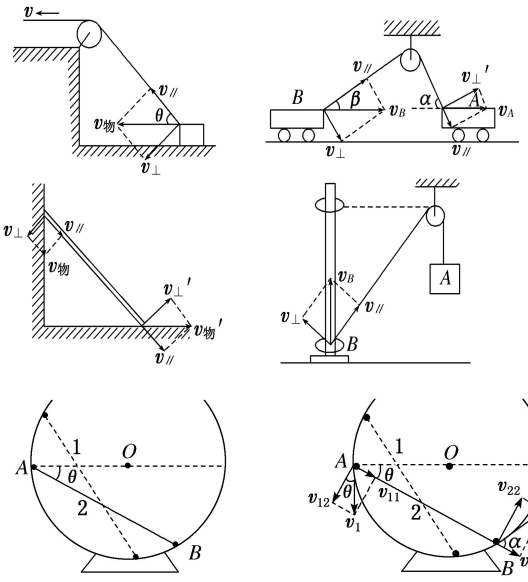
2.模型特点

在运动过程中，绳、杆等有长度的物体，其两端点的速度是不同的，但两端点的速度是有联系的，我们称之为关联速度。两个物体通过绳(或杆)关联时，两物体沿绳(或杆)方向的速度分量大小相等。

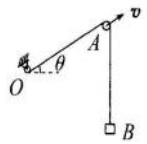
【拓展】接触模型

相互接触并挤压的两个物体速度各不相同，称为接触模型。接触模型的特点是两物体沿弹力方向的分速度相等，否则两物体会分离。

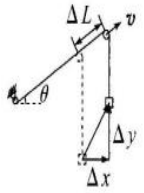
3.四种常见的速度分解模型



【变式 1】如图所示，轻绳一端固定在 O 点，另一端通过动滑轮 A 与物体 B 连接，现使定滑轮 A 以速度 v 做匀速运动，速度斜向右上方且与水平面的夹角为 θ，求物体 B 的速度大小.



利用微元法解题，如图所示，在极短的时间 Δt 内，滑轮运动的距离 $\Delta L=v\Delta t$，物体 B 向右运动的距离为 Δx，物体 B 向上运动的距离为 Δy.



水平方向：$\Delta x=\Delta L\cdot\cos\theta$，

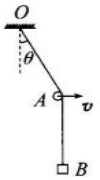
竖直方向：$\Delta y=\Delta L+\Delta L\cdot\sin\theta$，

$v_x=\dfrac{\Delta x}{\Delta t}=v\cdot\cos\theta$，$v_y=\dfrac{\Delta y}{\Delta t}=v+v\cdot\sin\theta$，$v_B=\sqrt{v_x^2+v_y^2}$，

联立解得

$v_B=\sqrt{v_x^2+v_y^2}=v\cdot\sqrt{2+2\sin^2\theta}$.

【变式 2】如图所示，轻绳一端固定在天花板的 O 点，另一端跨过轻动滑轮 A 连接物体 B，动滑轮以速度 v 水平向右匀速运动，当绳与竖直方向的夹角为 θ 时，求物体 B 的速度大小.

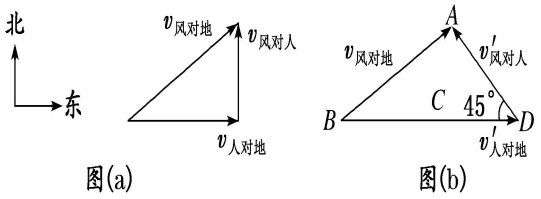


【答案】$v_B=v\cdot\sqrt{1+\sin^2\theta}$.

【补充】*刮风下雨问题宜用矢量三角形求解*

【典例】一人骑自行车向东行驶，当车速为 4 m/s 时，他感到风从正南方向吹来，当车速增加到 7 m/s 时，他感到风从东南方向(东偏南 45^0 °)吹来。假设风速的方向和大小恒定，则风对地的速度大小为(　　)

【答案】当车速为 4 m/s 时，人感到风从正南方向吹来，画出矢量图如图(a)所示，故风对地的速度大小沿行驶方向的分速度为 4 m/s，当车速增加到 7 m/s 时，他感到风从东南方向(东偏南 45°)吹来，画出矢量图如图(b)所示，可知，风对地的速度大小沿着垂直行驶方向的分速度大小为 3 m/s，因此风对地的速度大小为 5 m/s。



第 3 节　实验：探研究平抛运动的特点

一、抛体运动（理想化模型）

(1)定义：以一定的速度将物体抛出，在空气阻力可以忽略的情况下，物体只受重力的作用，这时的运动叫抛体运动。抛体运动开始的速度叫初速度。

(2)分类　根据初速度方向进行分类。

①平抛运动：初速度沿水平方向的抛体运动。

②斜抛运动：初速度斜向上方或斜向下方的抛体运动。

二、实验：探究平抛运动的特点

(1)探究平抛运动的特点

①方案一：频闪照相法。用频闪照相的方法记录做平抛运动的小球在不同时刻的位置。以小球抛出点为原点，沿水平方向和竖直向下的方向建立直角坐标系，将小球中心点的横坐标和纵坐标作为实验数据，探究平抛运动的特点。

②方案二：对比实验法

三、实验探究

1.实验原理

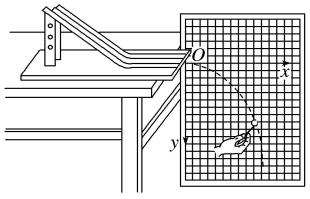
平抛运动可以分解为水平方向的匀速直线运动和竖直方向的自由落体运动．使小球做平抛运动，建立坐标系，利用描迹法描出小球的运动轨迹，测出轨迹曲线上某一点的坐标 x 和 y，根据公式：$x=v_0t$ 和 $y=\frac{1}{2}gt^2$，就可求得 $v_0=x\sqrt{\frac{g}{2y}}$，即小球做平抛运动的初速度．

2.实验器材

斜槽(带小球)、木板及竖直固定支架、坐标纸(白纸)、图钉、重锤线、三角板、铅笔、刻度尺．

3.实验步骤

(1)实验装置如图所示，安装调整斜槽：使其末端伸出桌面，切线沿水平方向．



(2)调整木板：用悬挂在槽口的重垂线把木板调整到竖直方向，并使木板平面与小球下落的竖直面平行，然后把重垂线方向记录到钉在木板上的白纸上，固定木板，使在重复实验的过程中，木板与斜槽的相对位置保持不变．

(3)确定坐标原点 O：把小球放在槽口处，用铅笔记下小球在槽口时球心在木板上的水平投影点 O，O 点即为坐标原点．

(4)确定运动轨迹上的点：将小球从斜槽上某一位置由静止滑下，小球从轨道末端射出，先用眼睛粗略确定做平抛运动的小球在某一 x 值处的 y 值，然后让小球由同一位置自由滚下，在粗略确定的位置附近用铅笔较准确地描出小球通过的位置，并在白纸上记下该点．用同样的方法确定轨迹上其他各点的位置．(不同的器材方法有所不同)

4.数据处理

(1)描绘运动轨迹：取下白纸，用平滑的曲线把记下的一系列点【个别误差较大的点舍去】连接起来即得小球做平抛运动的轨迹.

(2)计算初速度：以 O 点为原点画出竖直向下的 y 轴和水平向右的 x 轴，并在曲线上选取六个不同的点，用刻度尺分别测出它们的坐标(x，y)，然后用公式 $v_0=x\sqrt{\frac{g}{2y}}$ 计算出小球的初速度 v_0.

5.注意事项

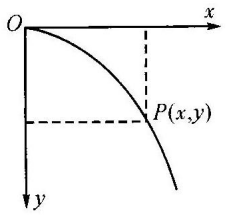
(1)实验中必须保证通过斜槽末端点的切线水平，木板必须处在竖直面内且与小球运动轨迹所在的竖直平面【利用重锤线找竖直方向】平行，并使小球的运动靠近木板但不接触.

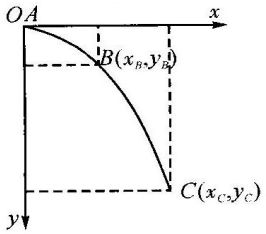
(2)小球每次必须从斜槽【不要求光滑】上同一位置由静止滚下.

(3)坐标原点(小球做平抛运动的起点)不是槽口的端点，应是小球在槽口时球的球心在木板上的水平投影点.

6.数据处理方法：

（一）若 O 点是起点，在抛物线轨迹上任选一点 P（x,y）则有 $v_0=x\sqrt{\frac{g}{2y}}$





（二）若 O 点不是起点，为便于计算，在轨迹上取三点 A、B、C，使 A、B 间与 B、C 间的水平距离相等，均为 X，以 A 为原点建立直角坐标系。

由平抛运动的水平规律可知，A、B 间与 B、C 间所用时间相等，设为 t，则由竖直运动规律得 $\Delta y=y_{BC}-y_{AB}=gt^2$，解得 $t=\sqrt{\frac{y_{BC}-y_{AB}}{g}}$。

所以初速度 $v_0=\frac{x}{t}=x\sqrt{\frac{g}{y_{BC}-y_{AB}}}$。

O 点是否为起点的判断方法：

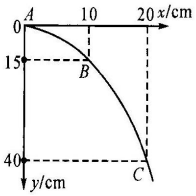
（1）若 $y_1:y_2=1:3$，则 O 点是起点。

（2）若 $y_1:y_2\neq1:3$，则 O 点不是起点。

（三）平抛运动抛出点位置的确定。

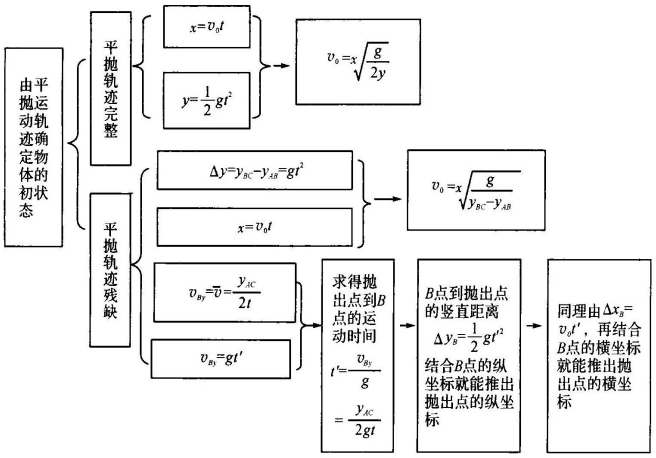
在上述平抛轨迹残缺情况中，B 点的竖直分速度 $v_{By}=\bar{v}=\frac{y_{AC}}{2t}$，则抛出点到 B 点的运动时间 $t'=\frac{v_{By}}{g}=\frac{y_{AC}}{2gt}$，$B$ 点到抛出点的竖直距离 $\Delta y_B=\frac{1}{2}gt'^2$。结合 B 点的纵坐标就能推出抛出点的纵坐标。同理 B 点到抛出点的水平距离 $\Delta x_B=v_0t'$，结合 B 点的横坐标就能推出抛出点的横坐标。

【典例 1】在“探究平抛运动的特点”实验中，某同学记录了运动轨迹上三点 A、B、C，如图所示，以 A 为坐标原点，建立坐标系，各点坐标值已在图中标出，则小球平抛的初速度大小为_____，小球经过 B 点的速度大小为_____，小球做平抛运动的抛出点的坐标是_____。



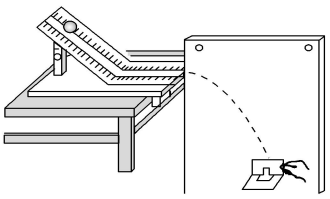
答案：1m/s　$\sqrt{5}$m/s　(−10cm,−5cm)

【方法小结】



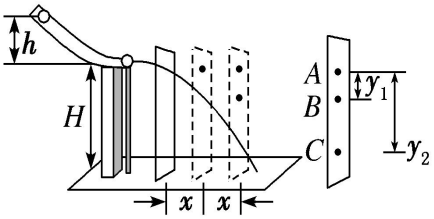
7.关于描点问题

若小球的大小不可忽略，则：可以描球心的轨迹，也可以描最上端、最下端、最右边的轨迹。【即竖直挡板描最右端、水平挡板描最下端轨迹】



可以用挡板接球：挡板水平平移或竖直平移

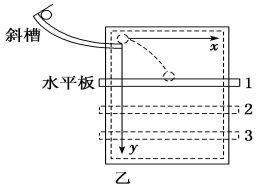
【变式 1】



由 $\Delta h=(y_2-y_1)-y_1=gT^2$ 及 $v_0=\frac{x}{T}$ 得

$v_0=x\sqrt{\frac{g}{y_2-2y_1}}$。

【变式 2】



乙

小球先后三次做平抛，将水平板依次放在如图乙中 1、2、3 的位置，且 1 与 2 的间距等于 2 与 3 的间距。若三次实验中，小球从抛出点到落点的水平位移依次为 x_1、x_2、x_3，则有：$x_2-x_1>x_3-x_2$

【典例 2】

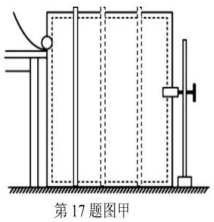
（7 分）（1）在“研究平抛运动”的实验中，为了测量小球平抛运动的初速度，采用如图甲所示的实验装置。实验操作的主要步骤如下：

a. 将坐标纸用图钉固定在木板上，并将木板竖直固定；

b. 将斜槽安装在木板左端，调节斜槽末端轨道水平，同时将重锤线挂在水平轨道边缘；

c. 在斜槽上端一固定位置静止释放小球，同时记录抛出点位置 *O*，记录重锤线方向；

d. 小球从 *O* 点飞出后，撞到与木板平面垂直的竖直挡条上。小球撞击挡条时，会在挡条上留下一个痕迹点。



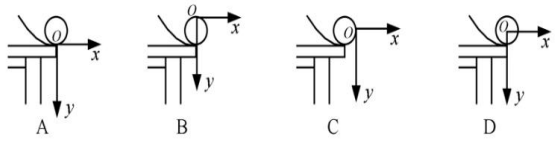
第 17 题图甲

用铅笔将痕迹点的投影点记录在坐标纸上；

e. 向右移动竖直挡条，从斜槽上相同的位置无初速度释放小球，小球撞击挡条后，再次将挡条上痕迹点的投影点记录在坐标纸上，重复以上操作；

f. 取下白纸，描绘平抛运动轨迹，研究轨迹的性质，求出小球平抛运动的初速度大小。

①实验过程中，要建立直角坐标系。在下图中，坐标原点选择正确的是__▲__。



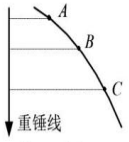
②关于这个实验，下列说法正确的是__▲__。

A. 斜槽的末端一定要水平

B. 一定要使用秒表来测量平抛运动的时间

C. 竖直挡条每次向右移动距离一定要相等

D. 一定要记录抛出点的位置，才能求出小球的初速度

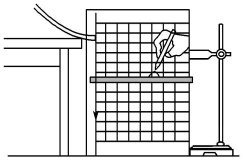


第 17 题图乙

③某同学在实验中，只记下斜槽末端悬挂重锤线的方向，根据实验描绘出一段轨迹。如图乙所示，选取 *A*、*B*、*C* 三点，测得三点离重锤线的距离分别为 x_1=21.5cm、x_2=35.5cm、x_3=49.5cm，并测得 *AB* 两点间的高度差 h_{AB}=20.0cm、*BC* 两点间的高度差 h_{BC}=30.0cm，则小球平抛的初速度 v_0=__▲__m/s，小球的半径 *R*=__▲__cm。

【答案】（1）①C　②A　③1.4　0.5

【典例 3】在“研究平抛运动”实验中.

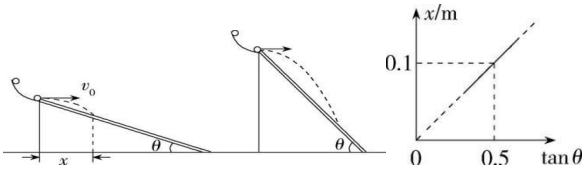


(1)如图是横挡条卡住平抛小球，用铅笔标注小球最高点，确定平抛运动轨迹的方法，坐标原点应选小球在斜槽末端点时的（　　）

A．球心　　B．球的上端　　C．球的下端

【答案】B

【实验变式】斜面上的平抛-----寻求表达式



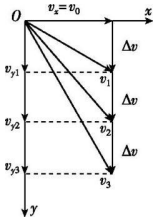
第 4 节 抛体运动的规律

一、平抛运动

1.**定义**：以一定的初速度沿水平方向抛出的物体，只在重力作用下的运动。

2.**性质**：平抛运动是加速度为 g 的匀加速曲线运动，其运动轨迹是抛物线。

3.速度变化特点：任意相等的时间间隔 Δ t 内速度的变化量相同，$\Delta v = g\Delta t$，方向竖直向下，如图所示。

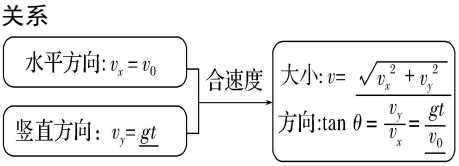


4.**平抛运动的条件**：(1)$v_0 \neq 0$，沿水平方向；(2)只受重力作用。

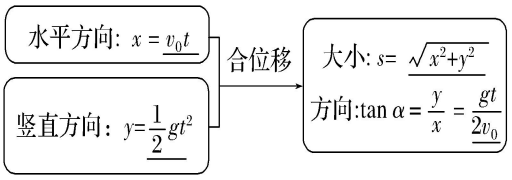
5.**研究方法**：平抛运动可以分解为水平方向的匀速直线运动和竖直方向的自由落体运动。

6.**基本规律**

（1）**速度关系**

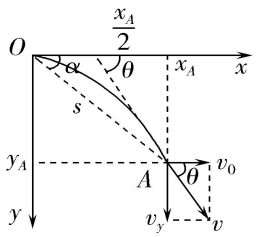


（2）**位移关系**



7.**平抛运动的两个推论**

(1)做平抛(或类平抛)运动的物体任一时刻的瞬时速度的反向延长线一定通过此时水平位移的中点，如图所示。

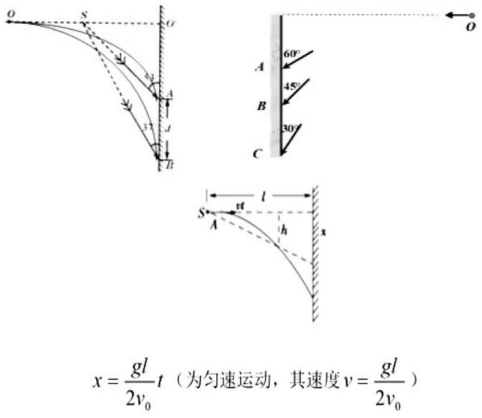


（2）做平抛(或类平抛)运动的物体在任意时刻，设其速度方向与水平方向的夹角为θ，位移方向与水平方向的夹角为α，则

tan θ＝2tanα

【注意】：tanθ ＝2tanα ，但不是θ＝2α

8.掷飞镖、点光源下平抛运动的投影



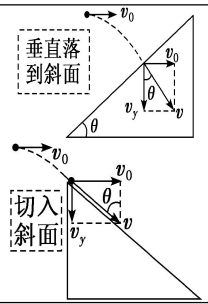
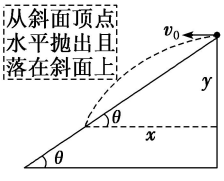
$x=\frac{gl}{2v_0}t$（为匀速运动，其速度 $v=\frac{gl}{2v_0}$）

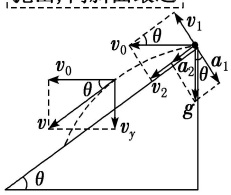
9.斜面上的平抛运动

【核心方法】

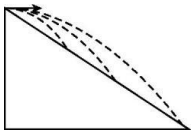
（1）分清到底是分解速度还是分解位移。

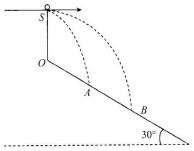
（2）求出时间，因为时间是联系水平方向和竖直方向的纽带。

图示	方法	基本规律	运动时间
	分解速度，构建速度的矢量三角形	水平 $v_x=v_0$ 竖直 $v_y=gt$ 合速度 $v=\sqrt{v_x^2+v_y^2}$	由 $\tan\theta=\frac{v_0}{v_y}=\frac{v_0}{gt}$ 得 $t=\frac{v_0}{g\tan\theta}$
	分解位移，构建位移的矢量三角形	水平 $x=v_0t$ 竖直 $y=\frac{1}{2}gt^2$ 合位移 $x_{合}=\sqrt{x^2+y^2}$	由 $\tan\theta=\frac{y}{x}=\frac{gt}{2v_0}$ 得 $t=\frac{2v_0\tan\theta}{g}$

<table>
<tr>
<td rowspan="2">【平抛运动的另一种分解方法】
从斜面顶点水平抛出，离斜面最远
</td>
<td>在运动起点同时分解 v_0、g</td>
<td>由 $0=v_1-a_1t$，$0-v_1^2=-2a_1d$ 得 $t=\frac{v_0\tan\theta}{g}$，$d=\frac{v_0^2\sin\theta\tan\theta}{2g}$</td>
</tr>
<tr>
<td>分解平行于斜面的速度 v</td>
<td>由 $v_y=gt$ 得 $t=\frac{v_0\tan\theta}{g}$</td>
</tr>
</table>

10.【规律】若小球以不同速度平抛，均落在斜面上，则末速度方向相同（平行）即： $\alpha_1=\alpha_2$

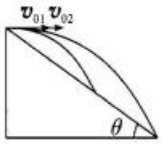




【注意】此情况上述结论不成立】

【拓展】落点在斜面上的平抛运动规律

将小球以不同的初速度 v_{01} 与 v_{02} 从倾角为 θ 的斜面顶端水平抛出，已知小球均落在斜面上.



(1)运动时间为 $t=\frac{2v_0\tan\theta}{g}$.

(2)运动时间的比值为 $t_1:t_2=v_{01}:v_{02}$.

(3)水平位移的比值为 $x_1:x_2=v_{01}^2:v_{02}^2$.

(4)竖直位移的比值为 $H_1:H_2=v_{01}^2:v_{02}^2$.

(5)末速度的比值为 $v_1:v_2=v_{01}:v_{02}$，且末速度的方向平行(因位移角均相等，故速度角相等，即末速度的方向平行).

(6)小球沿斜面方向做匀加速直线运动，垂直斜面方向做类竖直上抛运动.

(7)离斜面最远的时间 $t=\frac{v_0\tan\theta}{g}$.

(8)离斜面最远的距离 $H=\frac{v_0^2\sin^2\theta}{2g\cos\theta}$.

【典例 1】

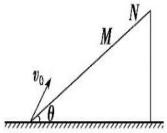
如图所示，一小球（视为质点）以速度 v_0 从倾角为 θ 的斜面底端斜向上抛出，落到斜面上的 M 点且速度水平向右。现将该小球以 $2v_0$ 的速度从斜面底端朝同样方向抛出，落在斜面上的 N 点。下列说法正确的是

A. 落到 M 和 N 两点时间之比大于 1∶2

B. 落到 M 和 N 两点速度之比大于 1∶2

C. 落到 N 点时速度方向水平向右

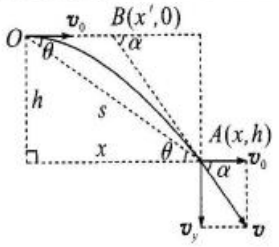
D. M 和 N 两点距离斜面底端的高度之比为 1∶2



【答案】C

【拓展】1.“打点公式”

【典例 2】如图所示，小球以某一初速度从 O 点水平抛出，最终落在 A 点，平抛的竖直位移为 h，位移与水平方向的夹角为 θ，重力加速度为 g，求小球平抛的初速度大小.



由推论知 $\tan\theta=\frac{h}{x}$，联立解得 $v_0=\frac{\sqrt{2gh}}{2\tan\theta}$.

总结

必记二级公式：$v_0=\frac{\sqrt{2gh}}{2\tan\theta}$（$\theta$ 为位移角).

打点公式的优点：已知竖直位移与水平位移，即可一步求出平抛的初速度大小，节省解题时间.

【拓展】2.落点问题

【典例 3】一阶梯每级台阶的高度合宽度都是 0.4 m，一小球从台阶最高点边缘以水平速度 $v=5$ m/s 飞出，g 取 10 m/s^2，求小球打在第几阶台阶上.

解法一：利用打点公式求解.

若小球打在第 n 级台阶的外边缘上，竖直高度 $h=nd$，水平位移 $x=nd$，位移与水平方向的夹角为 45°，由打点公式可知 $v_1=\frac{\sqrt{2gH}}{2\tan\theta}$，解得 $v_1=\sqrt{2n}$；

若小球打在第$(n-1)$级台阶的外边缘上，竖直高度$h=(n-1)d$，水平位移$x=(n-1)d$，位移与水平方向的夹角为$45°$，由打点公式可知$v_2=\frac{\sqrt{2gH}}{2\tan\theta}$，解得$v_2=\sqrt{2(n-1)}$.

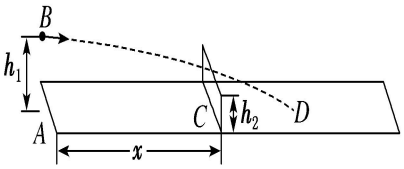
故打在第n阶台阶的速度范围为$\sqrt{2(n-1)}\ \text{m/s}<v\leqslant\sqrt{2n}$.

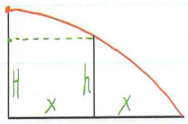
当$v=5\ \text{m/s}$时，$\sqrt{24}\ \text{m/s}<v<\sqrt{26}$，故小球打在第13阶台阶上.

解法二：将台阶看成倾角为$45°$的斜面，由二级公式知飞行时间$t=\frac{2v_0\tan\theta}{g}=1\ \text{s}$，则下落高度$h=\frac{1}{2}gt^2=5\ \text{m}$，

台阶数$n=\frac{5}{0.4}=12.5$(阶)，因台阶数只能取整数，故落点为第13阶台阶.

11.体育运动中的抛体运动

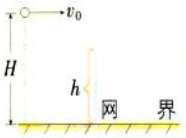




【规律】发球的临界高度为：既触网又过界。

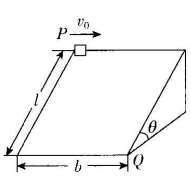
【拓展】乒乓球的“擦网”与“出界”问题分析

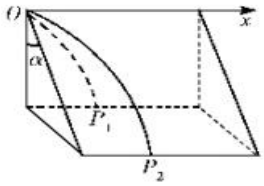
(1)发球高度H一定时，由$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}$知落地时间一定，由$x=v_0t$知，v_0越大越容易出界，v_0越小越容易不过网。



(2)发球速度v_0大小一定时，由$x=v_0t=v_0\sqrt{\frac{2H}{g}}$知，$H$越大越容易出界，$H$越小越容易不过网。

12.类平抛运动【此时 a=gsinθ】

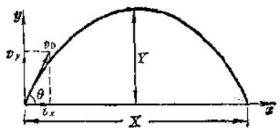




二、斜抛运动

1.**定义**：以一定的初速度与水平方向成一定的夹角抛出的物体只在重力作用下的运动。

2.**性质**：斜抛运动是加速度为g的匀变速曲线运动，其运动轨迹是抛物线。



3.规律：

(1)速度

水平方向上：$v_x=v_0\cos\theta$(θ为初速度与水平方向夹角)；

竖直方向上：$v_y=v_0\sin\theta-gt$(或$v_y=v_0\sin\theta+gt$)。

(2)位移

水平方向上：$x=v_0\cos\theta\cdot t$；

竖直方向上：$y=v_0\sin\theta\cdot t-\frac{1}{2}gt^2$(或$y=v_0\sin\theta\cdot t+\frac{1}{2}gt^2$)。

(4)射程：$X=\frac{v_0^2\sin2\theta}{g}$，$\theta=45°$时射程最大。

(5)射高：$Y=\frac{v_0^2\sin^2\theta}{2g}$。

(6)时间：到最高点时间$t=\frac{v_0\sin\theta}{g}=\sqrt{\frac{2Y}{g}}$。

(7)对称性

①轨迹关于通过最高点的竖直线对称；

②同一高度速率相等；

③从某一点到最高点的时间与从最高点下降至该点的时间相等。

【核心】分解速度，分析水平方向和竖直方向的运动分别列方程求解。同时结合数学方法求最值。

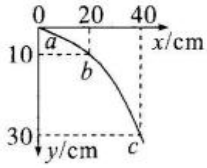
【拓展】斜上抛运动在最高点的速度水平，若从最高点考虑，可看成两段平抛运动处理。

第二部分 方法、规律与技巧

平抛运动的常见问题

一、平抛轨迹的初始点问题

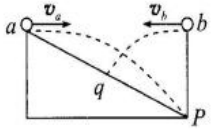
【典例1】如图所示为平抛轨迹的一部分，根据图中数据求出物体的初速度为_____，抛出点的坐标为_____.(g取$10\text{m/}s^2$)



【答案】2m/s　　(-10cm,1.25cm)

二、多平抛轨迹的规律问题

【典例2】如图所示，在斜面顶端a处以速度v_a水平抛出一小球，经过时间t_a恰好落在斜面底端P处；在P点正上方与a等高的b处以速度v_b水平抛出另一小球，经过时间t_b恰好落在斜面的中点处. 若不计空气阻力，求两球的初速度之比与运动时间之比.



【答案】$v_a=\sqrt{2}v_b$，$t_a=\sqrt{2}t_b$.

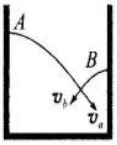
总结

第一步：利用竖直位移之比，分析运动时间之比；

第二步：利用水平位移与运动时间之比求初速度之比.

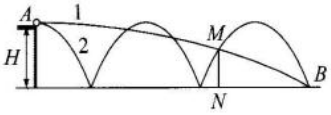
三、多平抛轨迹的交点问题

【典例 3】如图所示，将 a、b 两小球均以大小为 20 m/s 的初速度分别从 A、B 两点间隔 3 s 先后水平相向抛出，两小球恰好在空中相遇，且相遇时速度方向相互垂直，不计空气阻力，取 $g=10\ \mathrm{m/s^2}$，求抛出点 A、B 间的水平距离.



【答案】$x=v_0t+v_0(t-3)=100m$.

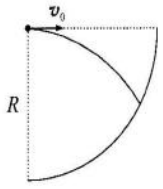
【典例 4】如图所示，从 A 点先后平抛两个小球 1 和 2，球 1 刚好直接越过竖直挡板 MN，落在水平地面上的 B 点，球 2 与地面弹性碰撞两次后，刚好越过竖直挡板 MN，也落在 B 点，A 点与地面间的高度差为 H，重力加速度为 g，求竖直挡板 MN 的高度.



【答案】$\frac{5}{9}\mathrm{H}$

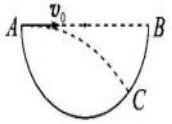
四、平抛速度的极值问题

【典例 5】如图所示，可看成质点的小球从半径为 R 的 $\frac{1}{4}$ 圆弧轨道的圆心处以初速度 v_0 做平抛运动，重力加速度为 g，求小球的初速度 v_0 取何值时，小球落到轨道上的速度最小.



【答案】$v_0=\sqrt{\frac{\sqrt{3}}{3}gR}$

【典例 6】如图所示，在半球面的球心等高处 A 点，以任意初速度将小球从 A 点水平抛出，分析小球是否可以垂直打到球面上.



【答案】小球不可能垂直打在球面上.

【典例 7】如图所示，飞镖以不同速度从同一点平抛，分别打到甲、乙两点，速度与墙的夹角已知，甲、乙的高度差为 d，重力加速度为 g，求平抛点到墙壁的距离.



【答案】$x=\frac{2d\tan\alpha\tan\beta}{\tan\alpha-\tan\beta}$.

【记忆口诀】

曲线运动速度变，　方向就是该切线。
运动轨迹为曲线，合力必在凹侧显。
抛体运动平和斜，分解运动是关键。
平抛斜面有区别，撞分速度落位移。
都落斜面方向同，位移速度角不同。

【本章高频考点】

1.速度的分解（关联速度问题）。
2.平抛运动（以斜面上的平抛，体育运动的平抛为背景）。
3.平抛运动实验（以求初速度和瞬时速度，操作细节为主）。

第三部分　物理方法概述

一、对称法

所谓对称法，实际上是根据某些物理现象、物理规律、物理过程或几何图形的对称性进行解题的一种方法，也称为镜像法。利用此方法分析解决问题可以避免复杂的数学演算和推导，直接抓住问题的实质，可以达到出奇制胜之效。常见的应用有时间对称和空间对称等。

二、逆向思维法

逆向思维法是指把运动过程的“末态”当成“初态”来反向研究问题的方法。该方法一般用于末态已知的情况或末态很容易确定的情况。如匀减速直线运动可反向看成匀加速直线运动，竖直上抛运动的上升阶段可反向看成自由落体运动。

三、结论法

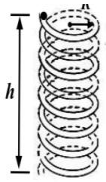
结论法是指利用已知的规律、定理或由它们推导出的一些正确结论进行解题的方法。利用结论法解题，可以避免繁琐的运算过程，快速得出正确答案。

四、类比法

所谓类比法，实际上是根据两个(或两类)对象或事物在某些属性上相同或相似而推出它们在另一些属性上也相同或相似的一种推理方法。遇到陌生的物理情景时，应用类比法，通常可将其与熟悉的物理情景联系起来，用已知的物理规律去对照、描述陌生的物理情景，可使题目难度大大降低。

第四部分 易错、疑难题选

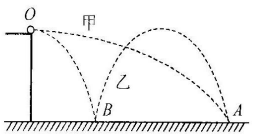
1. 如图所示，竖直放置的等螺距螺线管是用长为 l 的硬质细管弯制而成，螺线管高为 h，半径为 R（硬质细管内径远小于 l、h、R）。一光滑小球从上端管口由静止释放，则此小球



A. 到达底端的时间与 R 无关
B. 到达底端的时间与 h 无关
C. 到达底端管口时的速度大小与 l 有关
D. 受管道的最大作用力只与 h、l 有关

【答案】A

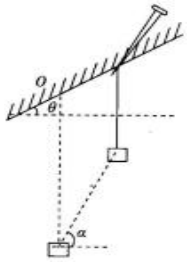
2. 有这样一个弹球游戏，如图所示，在从桌子边缘 O 点将小球水平弹出，落到地面上小孔 A 中。一同学将甲球以水平速度 v_1 弹出，球直接落在 A 点。另一同学将乙球以水平速度 v_2 弹出，落在水平地面上的 B 点反弹后恰好也落在 A 点。两球质量均为 m。若乙球落在 B 点时的速度与地面的夹角为 60°，且与地面发生弹性碰撞，不计碰撞时间和空气阻力，下列说法正确的是 （ ）



A. 由 O 点到 A 点，甲、乙两球运动时间之比是 1∶1
B. 甲球落地时速度与水平地面的夹角为 45°
C. 设地面处势能为 0，甲、乙两球在运动过程中的机械能之比为 3∶1
D. 若乙球要在地面上弹两次后落在 A 点，则乙球的初速度应变为 $\frac{v_2}{2}$

【答案】C

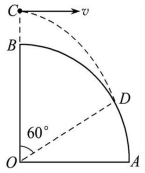
3.如图所示，一块橡皮用细线悬挂于 O 点，用钉子靠着线的左侧，沿与水平方向成 θ 角的斜面向右上以速度 v 匀速运动，运动中始终保持悬线竖直，橡皮的速度方向与水平方向的夹角为 α。下列说法正确的是 （ ）



A. 若 $\theta=0$，则 α 随钉尖的速度 v 的增大而增大
B. 若 $\theta=0$，则 α 随钉尖的速度 v 的增大而减小
C. 若 $\theta=45^\circ$，钉尖的速度为 v，则橡皮的速度为 $2\sqrt{2}v$
D. 若 $\theta=45^\circ$，钉尖的速度为 v，则橡皮的速度为 $\sqrt{2+\sqrt{2}}v$

【答案】D

4.如图所示为四分之一圆柱体 OAB 的竖直截面，半径为 R，在 B 点上方的 C 点水平抛出一个小球，小球轨迹恰好在 D 点与圆柱体相切，OD 与 OB 的夹角为 60°，则 C 点到 B 点的距离为（ ）

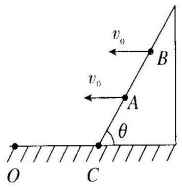


A.R　　B. $\frac{1}{2}$R　　c. $\frac{3}{4}$R　　D. $\frac{1}{4}$R

【答案】D

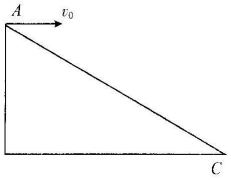
5.如图所示，有一倾角为θ的固定斜面，从斜面上的 A、B 两点分别以相同初速度 $v_0=\sqrt{5}$ m/s 水平抛出两个小球，两个小球恰好能落到同一点 O。已知 OC 距离 $d=\frac{2}{3}$ m，$\tan\theta=3$，重力加速度 g 取 10 m/s²，不计空气阻力，下列说法正确的是 （ ）

A. A、B 两点的高度之比为 9∶25
B. A、B 两点间的距离为 3 m
C. 若将小球以速度 v_0 在 AB 中点水平抛出，落点位置位于 O 点左侧
D. 斜面上还存在能以初速度 $v_0=\sqrt{5}$ m/s 水平抛出打中 O 点的第三个位置



【答案】C

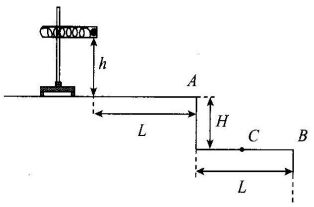
6.从足够长斜面的顶端 A 点以不同的初速度沿水平方向抛出一小球落到斜面上 B 点（未标出），关于小球飞行的时间 t、落点与抛出点（A、B 之间）的距离 L、落点处的动能 E_k、落点处速度与斜面夹角等物理量与初速度 v_0 的关系，下列说法正确的是（不计空气阻力） （ ）



A. 飞行的时间 t 与 v_0 的平方成正比
B. A、B 之间的距离 L 与 v_0 成正比
C. 落点处的动能 E_k 与 v_0 的平方成正比
D. 落点处速度与斜面夹角的正切值与初速度 v_0 成正比

【答案】C

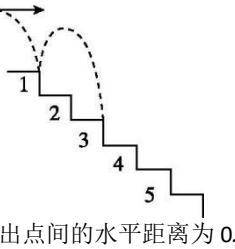
7. 如图所示，在楼梯口，用弹射器向第一级台阶弹射小球。台阶高为 H，宽为 L，A 为竖直踢脚板的最高点，B 为水平踏脚板的最右侧点，C 是水平踏脚板的中点。弹射器沿水平方向弹射小球，弹射器高度 h 和小球的初速度 v_0 可调节，小球被弹出前与 A 的水平距离也为 L。某次弹射时，小球恰好没有擦到 A 而击中 B，为了能击中 C 点，需调整 h 为 h'，调整 v_0 为 v_0'，下列判断正确的是 （ ）



A. h' 的最大值为 $2h$　　B. h' 的最小值为 $2h$
C. v_0' 的最大值为 $\frac{\sqrt{15}}{6}v_0$　　D. v_0' 的最小值为 $\frac{\sqrt{15}}{6}v_0$

【答案】C

8. 如图所示，一小球从某一高度水平抛出后，恰好落在第 1 级台阶的右边缘处，反弹后再次下落至第 3 级台阶的右边缘处。已知小球第一、二次与台阶相碰之间的时间间隔为 0.3 s，每级台阶的宽度和高度均为 18 cm。小球每次与台阶碰撞后速度的水平分量保持不变，而竖直分量大小变为碰前的 $\frac{1}{4}$，g 取 10 m/s²，则小球（ ）



A.第一次落点与小球抛出点间的水平距离为 0.144 m

B.第一次落点与小球抛出点间的竖直距离为 0.72 m

C.抛出时的初速度为 1.0 m/s

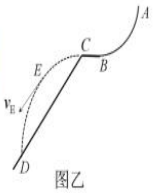
D.会与第 5 级台阶相撞

【答案】A

9. 第 24 届冬季奥运会于 2022 年 2 月在北京召开，如图甲所示为运动员跳台滑雪运动瞬间，运动示意图如图乙所示，运动员从助滑雪道 AB 上由静止开始滑下，到达 C 点后水平飞出，落到滑道上的 D 点，运动轨迹上的 E 点的速度方向与轨道 CD 平行，设运动员从 C 到 E 与从 E 到 D 的运动时间分别为 t_1 与 t_2，（忽略空气阻力，运动员可视为质点），下列说法正确的是



图甲



图乙

A. $t_1<t_2$

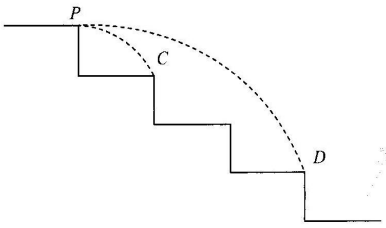
B. $t_1>t_2$

C. 若运动员离开 C 点的速度加倍，则落在斜面上的速度方向不变

D. 若运动员离开 C 点的速度加倍，则落在斜面上距 C 的距离也加倍

【答案】C

10. 如图所示，台阶的高与宽之比为 2∶3，现将两个质量相等小球 A、B 分别在 P 点以一定的初速度水平抛出，分别击中第一台阶上的 C 点和第三台阶上的 D 点，已知 A 球击中 C 点时的动能为 E，不计空气阻力，则 B 球击中 D 点时的动能是 （　　）



A. $3E$　　B. $6E$　　C. $\frac{5}{2}E$　　D. $\frac{5}{4}E$

【答案】A

11. 王师傅给孙子做了一个抛物线状圆管滑梯轨道 AB，如图所示，该轨道正好与物体 P 的平抛轨迹相吻合，已知物体 P 以 3 m/s 速度水平抛出，水平射程为 1.2 m，现将一个小球 Q 从轨道最高点 A 无初速释放，小球 Q 的直径略小于圆管直径，不计摩擦，则小球 Q 滑到轨道底端 B 时的水平速度大小是 （　　）

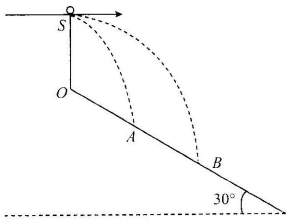


A. 1.2 m/s　　B. 1.8 m/s

C. 2.4 m/s　　D. 3 m/s

【答案】C

12. 如图所示，竖直平面内有一足够长且与水平方向成 30°角的斜面，斜面上有 A、B 两点，S 点在 O 点正上方，其中 OS、OA、AB 的长度均为 l，若以初速度 v_0 从 S 点水平射出一个小球，正好可以击中 A 点，不计空气阻力，当地重力加速度为 g，以下说法正确的是 （　　）



A. 若将发射速度增大到 $2v_0$ 则正好击中 B 点

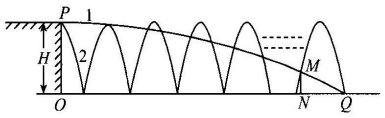
B. 小球分别击中 A 点和 B 点时速度与斜面间的夹角相同

C. 调整 v_0 大小，使小球击中 B 点，则击中时速度大小为 $\frac{\sqrt{3}}{2}\sqrt{gl}$

D. 若小球以 $3v_0$ 的速度射出，则落到斜面的时间为 $\frac{\sqrt{3}+\sqrt{11}}{2}\sqrt{\frac{l}{g}}$

【答案】D

13. 如图所示，从高 H 处的 P 点先后水平抛出两个小球，球 1 刚好直接越过竖直挡板 MN 落在水平地面上的 Q 点，球 2 与地面碰撞 $N(N\geqslant 1)$ 次后，刚好越过高为 h 的挡板 MN（h 可调节）也落在 Q 点. 假设球 2 每次与地面的碰撞都是弹性碰撞，两球的空气阻力均可忽略，则 （　　）



A. h 与 H 之比可能为 1∶2

B. h 与 H 之比可能为 11∶36

C. 球 1 与球 2 速度之比可能为 2∶1

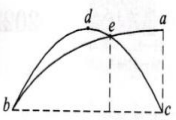
D. 球 1 与球 2 速度之比可能为 16∶1

【答案】B

14. 排球比赛中，某次运动员将飞来的排球从 a 点水平击出，球击中 b 点；另一次将飞来的排球从 a 点的正下方 c 点斜向上击出，也击中 b 点，且 b 点与 c 点等高。第二次排球运动的最高点 d 与 a 点等高，且两轨迹交点恰好为排球网上端点 e。不计空气阻力，下列说法正确的是



甲



乙

第 13 题图

A. 两个过程中，排球运动到 b 点的速度大小可能相等

B. b 点与 c 点到球网平面的水平距离之比为 3:2

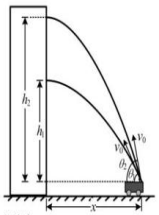
C. a、c 两点高度差与 e、c 两点高度差之比为 4:3

D. 运动员两次击球对排球所做的功可能相等

【答案】D

15. 如图所示是中国航天科工集团研制的一种投弹式干粉消防车。灭火车出弹口到高楼水平距离为 x，在同一位置灭火车先后向高层建筑发射 2 枚灭火弹，且灭火弹均恰好垂直射入建筑玻璃窗，假设发射初速度大小均为 v_0，v_0 与水平方向夹角分别为 θ_1、θ_2，击中点离出弹口高度分别为 h_1、h_2，空中飞行时间分别为 t_1、t_2。灭火弹可视为质点，两运动轨迹在同一竖直面内，且不计空气阻力，重力加速度为 g。则下列说法正确的是





第 13 题图

A. 高度之比 $\frac{h_1}{h_2}=\frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2}$

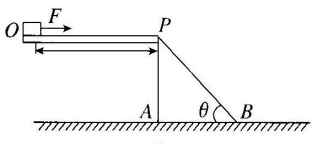
B. 时间之比 $\frac{t_1}{t_2}=\frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2}$

C. 两枚灭火弹的发射角满足 $\theta_1+\theta_2=90°$

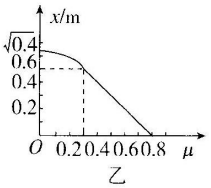
D. 水平距离与两枚灭火弹飞行时间满足 $x=2gt_1t_2$

【答案】C

16.铺有不同材料的水平桌面的右端 P 与倾斜角度θ=45°的斜面 PAB 对接，斜面的 AB 边置于水平地面上，如图甲所示。一物块在水平恒力 F 作用下，由静止从 O 点开始运动到 P 点时撤去 F，物块随即做平抛运动，图乙所示为桌面的动摩擦因数 μ 与物块平抛运动时的水平射程 x（第一落点与 P 点的水平位移）之间的图像，设最大静摩擦力等于滑动摩擦力，则 （　　）



甲



乙

A. 物块质量为 1 kg

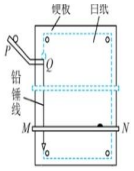
B. OP 的距离为 0.25 m

C. 恒力 F 的大小为 8 N

D. 平抛运动的最大速度为 $\sqrt{14}$ m/s

【答案】BD

17. 用如图 1 所示装置研究平抛运动。将白纸和复写纸对齐重叠并固定在竖直硬板上。钢球沿斜槽轨道 PQ 滑下后从 Q 点飞出，落在水平挡板 MN 上。由于挡板靠近硬板一侧较低，钢球落在挡板上时，钢球侧面会在白纸上挤压出一个痕迹点。移动挡板，重新释放钢球，如此重复，白纸上将留下一系列痕迹点。



（1）下列实验操作合理的有__▲__。

A. 安装斜槽轨道，需使其末端保持水平

B. 背板应保持竖直

C. 每次钢球需从斜槽同一位置由静止释放

D. 每次必须等距离的下降挡板，记录钢球位置

E. 钢球在斜槽上释放的位置离斜槽末端的高度尽可能低一些

（2）请在图 2 中选择最合理抛出点位置__▲__（填写“甲”、“乙”或“丙”）。

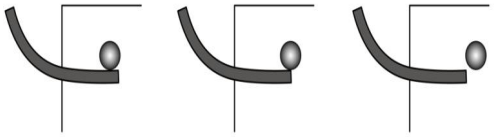


图 2

（3）在“探究平抛运动水平方向运动的特点”的实验中，将白纸换成方格纸，每个小方格边长 L=5cm。实验记录了小球在运动中的 4 个点迹，如图 3 所示，则 t_{AB}__▲__t_{BC}（填“<”、“=”或“>”），该小球做平抛运动的初速度为__▲__m/s。（计算结果保留两位有效数字）

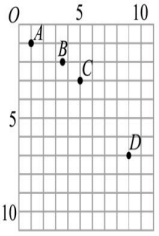


图 3

（4）为了得到平抛物体的运动轨迹，同学们还提出了以下三种方案，其中可行的是__▲__。

A. 从细管水平喷出稳定的细水柱，拍摄照片，即可得到平抛运动轨迹

B. 用频闪照相在同一底片上记录平抛小球在不同时刻的位置，平滑连接各位置，即可得到平抛运动轨迹

C. 将铅笔垂直于竖直的白纸板放置，笔尖紧靠白纸板，铅笔以一定初速度水平抛出，将会在白纸上留下笔尖的平抛运动轨迹

（5）伽利略曾研究过平抛运动，他推断：从同一炮台水平发射的炮弹，如果不受空气阻力，不论它们能射多远，在空中飞行的时间都一样。这实际上揭示了平抛物体__▲__。

A. 在水平方向上做匀速直线运动

B. 在竖直方向上做自由落体运动

C. 在下落过程中机械能守恒

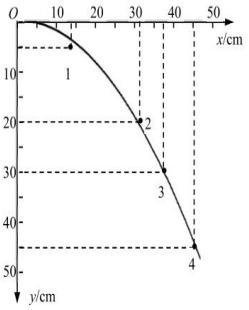
【答案】（1）ABC　（2）图乙　（3）$t_{AB}>t_{BC}$　2.0m/s　（4）AB　（5）B

18.

（7 分）(1)如图 1 所示为“探究平抛运动的特点”的实验装置。小钢球从斜槽末端水平抛出，落到水平放置的可上下调节的倾斜挡板上后，通过复写纸在固定于竖直背板的白纸上留下印迹。调节挡板，在白纸上记录钢球的多个印迹。



第 17 题图 1



第 17 题图 2

①下列说法正确的是__▲__（单选）

A. 挡板每次调节的高度应相等

B. 钢球直接挤压白纸留下印迹

C. 钢球离开轨道末端时的坐标原点 O 为球心位置

D. 钢球抛出的速度越小，在白纸上留下的印迹越多，误差越小

②O 点为抛出点，正确操作后，描绘出图 2 所示的轨迹，在图示的 4 个数据点中，在计算平抛初速度时，应选取数据点__▲__（选填“1”、“2”“3”或“4”）。若 g 取 10m/s^2，由此得到的平抛初速度为　▲　m/s（结果保留二位有效数字）

【答案】（1）①C　②4 ；1.5

第六章　圆周运动

第一部分　基础知识点

第 1 节　圆周运动

1.定义：做圆周运动的物体，若在相等的时间内通过的圆弧长相等，就是匀速圆周运动。

2.特点：加速度大小不变，方向始终指向圆心，是变加速运动。

3.条件：合外力大小不变、方向始终与速度方向垂直且指向圆心。

【注意】物体做匀速圆周运动还是偏离圆形轨道完全是由实际提供的向心力和所需的向心力间的大小关系决定的。

4.角速度、线速度、向心加速度

描述圆周运动的物理量

- 线速度
  - 方向：沿圆周的切线方向
  - 公式：$v=\frac{\Delta s}{\Delta t}=\frac{2\pi r}{T}$
- 角速度
  - 物理意义：描述物体绕圆心转动的快慢
  - 公式：$\omega=\frac{\Delta\theta}{\Delta t}=\frac{2\pi}{T}$
- 周期
  - 定义：物体沿圆周运动一周所用的时间
  - 公式：$T=\frac{2\pi}{\omega}=\frac{2\pi r}{v}$
- 转速
  - 定义：单位时间内转过的圈数
  - 公式：$n=\frac{1}{T}$
- 向心加速度
  - 方向：始终指向圆心
  - 公式：$a_n=\frac{v^2}{r}=\omega^2 r=\frac{4\pi^2}{T^2}r=\omega v$

⚠ 提醒

(1)线速度就是做圆周运动的物体的瞬时速度。

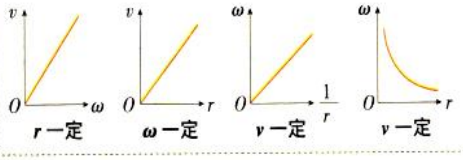
(2)线速度或角速度都无法全面准确地反映圆周运动的快慢，我们用线速度描述运动快慢，用角速度(或周期、频率)描述转动快慢。

(3)对关系式 $v=\omega r$ 的理解

当 r 一定时，v 与 ω 成正比；

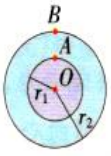
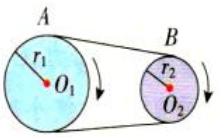
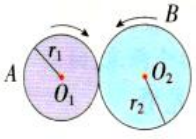
当 ω 一定时，v 与 r 成正比；

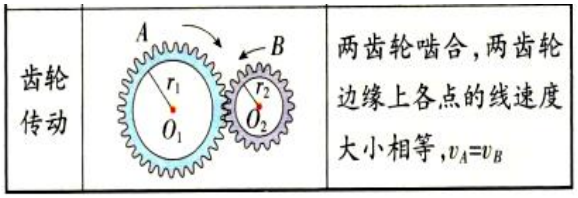
当 v 一定时，ω 与 $\frac{1}{r}$ 成正比、与 r 成反比。



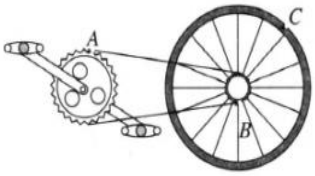
5.几类常见问题

（一）传动装置问题

项目	图示	规律
同轴转动		绕同一转轴转动的物体，各点的角速度相等，$\omega_A=\omega_B$
皮带传动		皮带不打滑时，两轮边缘上各点的线速度大小相等，$v_A=v_B$
摩擦传动		两轮边缘接触且不打滑时，两轮边缘上各点线速度大小相等，$v_A=v_B$



【口诀】同皮等线速，同轴等角速



（二）时钟问题



此类问题要紧扣时针、分针、秒针的周期之比为突破口。

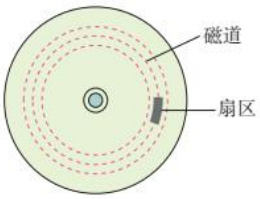
$T_{时}$：$T_{分}$：$T_{秒}$=720：60：1.再利用相关公式求解 V、ω、a 等。

（三）光盘磁道问题

某计算机上的硬磁盘的磁道和扇区如图 6.1-7 所示。这块硬磁盘共有 9 216 个磁道（即 9 216 个不同半径的同心圆），每个磁道分成 8 192 个扇区（每扇区为 $\frac{1}{8\,192}$ 圆周），每个扇区可以记录 512 个字节。电动机使盘面以 7 200 r/min 的转速匀速转动。磁头在读、写数据时是不动的，盘面每转一圈，磁头沿半径方向跳动一个磁道。

（1）一个扇区通过磁头所用的时间是多少？

（2）不计磁头转移磁道的时间，计算机 1 s 内最多可以从一个盘面上读取多少个字节？

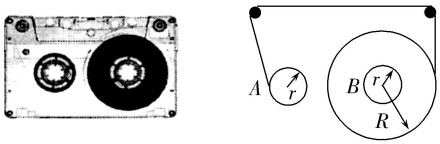


提示：（1）磁盘转动的周期为 $T=\frac{1}{120}$ s，扫描每个扇区的时间 $t=\frac{T}{8\,192}=1.0\times10^{-6}$ s。

（2）每个扇区的字节数为 $n_0=512$ 个，1 s 内读取的字节数为个 $n=n_0\times\frac{1}{t}=\frac{512}{1.0\times10^{-6}}$ 个 $=5.12\times10^8$ 个。

（四）磁带问题

图甲为磁带录音机的磁带盒，可简化为图乙所示的传动模型，*A*、*B* 为缠绕磁带的两个轮子，两轮的半径均为 *r*，在放音 s 时 B 是主动轮，磁头处的线速度不变。结束时，磁带全部绕到了 *B* 轮上，磁带的外缘半径 $R=3r$，现在进行倒带，使磁带绕到 *A* 轮上．倒带时 *A* 轮是主动轮，其角速度是恒定的，*B* 轮是从动轮．



甲　　乙

【小结】磁带放音转动时，紧扣线速度（V）不变，倒带时角速度（ω）不变，半径 R 在变化的特点。

第 2 节　向心力

一、匀速圆周运动的向心力

1.**作用效果**：向心力产生向心加速度，只改变速度的方向，不改变速度的大小（不做功）。

2.**大小**：$F=ma=m\frac{v^2}{r}=m\omega^2r=m\frac{4\pi^2}{T^2}r=m\omega v=4\pi^2mf^2r$。

3.**方向**：始终沿半径指向圆心方向，时刻在改变，即向心力是一个变力。

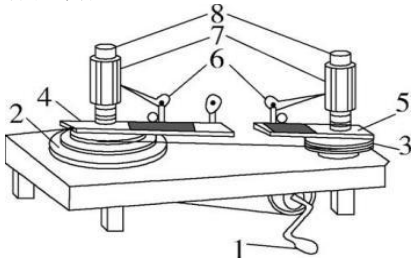
4.对向心力的理解

①向心力是按力的作用效果命名的，重力、弹力、摩擦力等各种性质的力都可以作为向心力。

②向心力可以由某个力提供，也可以由几个力的合力提供，还可以由某个力的分力提供。

【实验】探究向心力大小 *F* 与质量 *m*、角速度 *ω* 及半径 *r* 之间关系

如图所示是探究向心力大小 *F* 与质量 *m*、角速度 *ω* 及半径 *r* 之间关系的实验装置图。转动手柄 1，可使变速塔轮 2 和 3 以及长槽 4 和短槽 5 分别随之匀速转动。皮带分别套在塔轮 2 和 3 上的不同圆盘上，可使两个槽内的小球分别以几种不同的角速度做匀速圆周运动。小球做圆周运动的向心力由横臂 6 的挡板对小球的压力提供，球对挡板的反作用力通过横臂 6 的杠杆作用使弹簧测力套筒 7 下降，从而露出标尺 8，标尺 8 上露出的红白相间的等分格子数与两个球的向心力成正比。

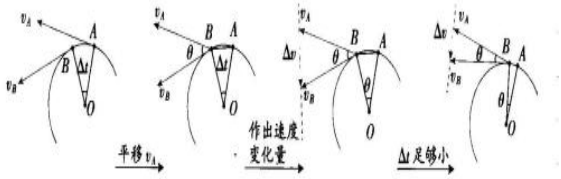


第 3 节　向心加速度

(1)定义：任何做匀速圆周运动的物体，其加速度都指向圆心，这个加速度称为向心加速度。

(2)大小：$a_n=\frac{v^2}{r}=\omega^2r=\frac{4\pi^2}{T^2}r=\omega v=4\pi^2f^2r$。

【推导过程】---微元法



当 Δt 足够小时，v_A、v_B 的夹角 θ 就足够小，Δv 与 v_A、v_B 都几乎垂直，指向圆心，a 与 Δv 方向一致。

由三角形相似得 $\frac{v}{r}=\frac{\Delta v}{L}$，故 $\Delta v=\frac{Lv}{r}$（L 为弦长）

当 $\Delta t\to0$ 时，$\Delta v=\frac{\Delta s\cdot v}{r}$（$\Delta s$ 为弧长）　$\Delta t\to0$ 时 $\Delta s\approx L$

则 $a=\frac{\Delta v}{\Delta t}=\frac{\Delta s\cdot v}{r\Delta t}=\frac{v^2}{r}$。

(3)**方向**:向心加速度总是沿半径指向圆心,始终与线速度方向垂直,方向时刻变化。

(4)**作用效果**:向心加速度只改变线速度的方向,不改变线速度的大小。

(5)**物理意义**:向心加速度的大小表示线速度方向改变的快慢。

【提醒】

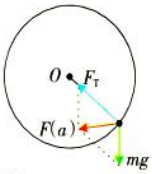
向心加速度的方向时刻变化,故匀速圆周运动是一种加速度变化的曲线运动,即变加速曲线运动。

(6)**合加速度和向心加速度**

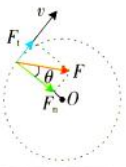
①物体做匀速圆周运动时,向心加速度就是物体的合加速度。

②物体做变速圆周运动时,合加速度必有一个沿切线方向的分量和一个指向圆心方向的分量,其指向圆心方向的分量是向心加速度。

③变速圆周运动举例:如图所示,小球受绳子拉力 F_T 与重力 mg,合力斜向左,即小球的合加速度斜向左。沿半径方向(径向)的加速度为向心加速度。

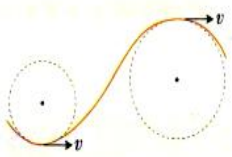


(7) 匀速圆周运动与变速圆周运动的比较

项目	匀速圆周运动	变速圆周运动
定义	物体沿着圆周运动,且线速度的大小处处相等的运动	物体沿着圆周运动,且线速度大小变化的运动
运动特点	线速度大小不变,方向时刻改变	线速度大小、方向时刻在改变
受力特点	合力全部提供向心力	合力一般不指向圆心,合力不只提供向心力
运动性质	变加速曲线运动(加速度大小不变、方向时刻变化)	变加速曲线运动(加速度大小、方向均时刻变化)
条件	合力大小不变,方向始终与速度方向垂直且指向圆心	合力一般不指向圆心,指向圆心的径向分力改变速度方向,切向分力改变速度大小,如图 

【拓展】一般的曲线运动的研究方法

把曲线分割为许多很短的小段,质点在每小段的运动都可以看成圆周运动的一部分。这样,在分析物体在曲线上某点的运动时,就可以利用圆周运动规律处理。

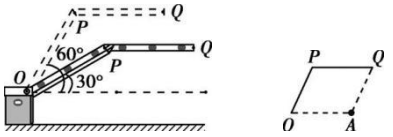


(8)关于门闸问题

A、B 为小区门口自动升降杆上的两点,A 在杆的顶端,B 在杆的中点处。在杆从水平位置匀速转至竖直位置的过程中(A、B 两点同轴转动,则角速度相等,故角速度之比为 1∶1;根据 $v=\omega r$,因为 $r_A=2r_B$,故 A、B 两点线速度大小之比为 2∶1。根据 $a_n=\omega^2 r$,因为 $r_A=2r_B$,$\omega_A=\omega_B$,故 A、B 两点向心加速度大小之比为 2∶1,且 A、B 两点向心加速度的方向相同,均指向转轴)

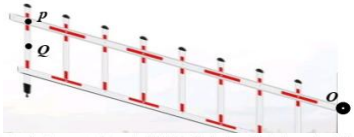


【变式 1】(曲杆道闸)道闸由转动杆 OP 与横杆 PQ 链接而成,P、Q 为横杆的两个端点。在道闸抬起过程中,杆 PQ 始终保持水平。则 P 以 O 点为圆心、OP 为半径做匀速圆周运动,Q 点也做匀速圆周运动,设其圆心为 A,AQ 为半径,如图所示。



【变式 2】

如图甲为某小区出入口采用的栅栏道闸。如图乙所示,OP 为栅栏道闸的转动杆,PQ 为竖杆。P 为两杆的交点,Q 为竖杆上的点。在道闸抬起过程中,杆 PQ 始终保持竖直,当杆 OP 绕 O 点从与水平方向成 30°匀速转动到 60°的过程中



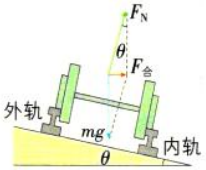
【详解】由于 P、Q 两点在同一杆上,而且杆运动时始终保持竖直,所以在 30°匀速转动到 60°的过程中,两点都做半径相同的匀速圆周运动,故两点的线速度、角速度、加速度和路程都相等。

第 3 节　生活中的圆周运动

1.火车转弯

(1)铁路弯道处外轨略高于内轨。

(2)火车转弯时的向心力由重力 G 和支持力 F_N 的合力提供,沿水平方向指向圆心。



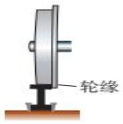
(3)火车转弯的速度

$$F_n=m\frac{v_0^2}{r}\qquad F_合=mg\tan\theta$$

$$F_合=F_n \Rightarrow v_0=\sqrt{gr\tan\theta}$$

由于θ很小,则有 $\tan\theta\approx\sin\theta=\frac{h}{L}$(h 为垫高,L=1435mm 为两铁轨间的距离),故

可求出转弯时的车速 $v_0=\sqrt{\frac{ghR}{L}}$。其中 h、L、R 各量都是确定的。



(4)火车转弯的实际速度与侧压力

①当 $v=v_0$ 时,轮缘与轨道间没有挤压力。

②当 $v>v_0$ 时,外轨对轮缘有向内的侧压力。

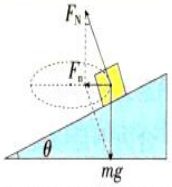
③当 $v<v_0$ 时,内轨对轮缘有向外的侧压力。

(5)汽车在水平路面上转弯时,摩擦力提供向心力;

汽车在"外高内低"的路面转弯时,与火车转弯类似,重力和支持力的合力提供向心力。

⚠ 提醒

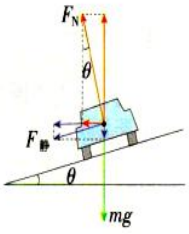
因为车辆转弯时，重心的高度一直不变，在同一水平面内，故车辆转弯的圆周平面是水平面，不是斜面。



并且与运动方向相反的摩擦力不影响向心力。

(6)汽车转弯的打滑问题

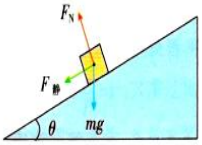
当汽车转弯的速度大于规定速度时，即 $v>\sqrt{gr\tan\theta}$，汽车会受到沿斜面向下的静摩擦力 $F_{静}$，则有



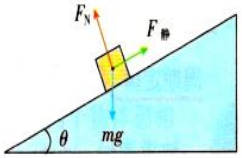
$$\begin{cases} F_n=F_{静}\cos\theta+F_N\sin\theta=m\dfrac{v^2}{r} \\ F_N\cos\theta=mg+F_{静}\sin\theta \end{cases}$$

当静摩擦力达到最大静摩擦力时，此时的 v 为汽车不打滑的最大速度。

车辆以不同的速度转弯时（未打滑）的受力情况

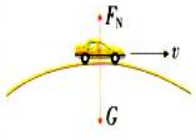
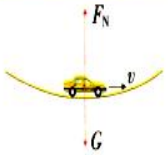


$v>\sqrt{gr\tan\theta}$ 时车辆的受力示意图



$v<\sqrt{gr\tan\theta}$ 时车辆的受力示意图

2.汽车过拱桥

项目	汽车过拱形桥	汽车过凹形路面
受力分析		
动力学方程	$mg-F_N=m\dfrac{v^2}{r}$ $\Rightarrow F_N=mg-m\dfrac{v^2}{r}$	$F_N-mg=m\dfrac{v^2}{r}$ $\Rightarrow F_N=mg+m\dfrac{v^2}{r}$
牛顿第三定律	$F_N'=F_N=mg-m\dfrac{v^2}{r}$	$F_N'=F_N=mg+m\dfrac{v^2}{r}$
讨论	v 增大，F_N' 减小；当 v 增大到 $\sqrt{gr}$ 时 $F_N'=0$	v 增大，F_N' 增大
注意	汽车在拱形桥最高点时的临界速度为 $\sqrt{gr}$，超过这一速度，汽车会“飞”起来	汽车在凹形路面最低点时处于超重状态，容易爆胎

3.航天器中的失重现象

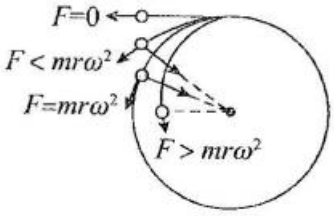
(1)航天器中的航天员受到地球的引力，还可能受到飞船座舱对他的支持力 F_N，引力与支持力的合力为他提供了绕地球做匀速圆周运动所需的向心力，即 $mg-F_N=m\dfrac{v^2}{R}$，则 $F_N=m\left(g-\dfrac{v^2}{R}\right)$。

(2)当 $v=\sqrt{Rg}$ 时，座舱对航天员的支持力 $F_N=0$，航天员处于完全失重状态。

4.离心运动

(1)**定义**：做圆周运动的物体，在向心力突然消失或合力不足以提供所需的向心力的情况下，就做逐渐远离圆心的运动，即离心运动。

(2)受力特点及轨迹如图所示.



①当 $F_n=mr\omega^2$ 时，物体做匀速圆周运动；

②当 $F_n=0$ 时，物体沿切线方向飞出；

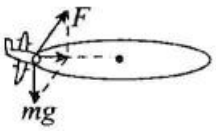
③当 $F_n<mr\omega^2$ 时，物体逐渐远离圆心，做离心运动；

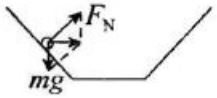
④当 $F_n>mr\omega^2$ 时，物体逐渐靠近圆心，做近心运动.

（3）**本质**：做圆周运动的物体，由于本身的惯性，总有沿着圆周切线方向飞出去的趋势。

5.常见变式模型

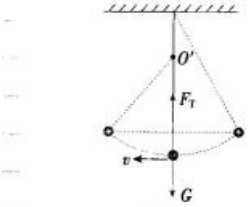
①飞机水平拐弯　　②飞车走壁





第二部分　方法、规律与技巧

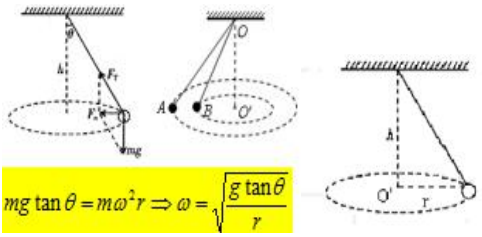
一、碰钉子问题【规律】线速度不能突变



$$\left.\begin{aligned} F_{合}&=F_n=ma_n \\ F_{合}&=F_T-G \end{aligned}\right\}\Rightarrow ma_n=F_T-G$$

绳碰到钉子瞬间，绳的拉力 F_T 发生突变，导致 a_n 突变。

二、圆锥摆模型



$$mg\tan\theta=m\omega^2 r\Rightarrow\omega=\sqrt{\frac{g\tan\theta}{r}}$$

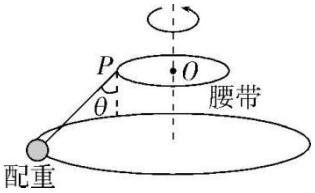
【规律】同心共面（等高）等周期。

即圆锥摆运动周期由高度决定，$T=2\pi\sqrt{\dfrac{h}{g}}$ 与运动半径、摆角、摆长、摆球质量等无关。

【典例 1】智能呼啦圈轻便美观,深受大众喜爱。如图甲,腰带外侧带有轨道,将带有滑轮的短杆穿入轨道,短杆的另一端悬挂一根带有配重的轻绳,其简化模型如图乙所示。可视为质点的配重质量为 0.5 kg,绳长为 0.5 m,悬挂点 P 到腰带中心点 O 的距离为 0.2 m。水平固定好腰带。通过人体微小扭动,使配重随短杆做水平匀速圆周运动,绳子与竖直方向夹角为θ,运动过程中腰带可看作不动,重力加速度 g 取 10 m/s^2,sin 37°=0.6,下列说法正确的是(　　)



甲



乙

A.当θ从 37°增加到 53°时,配重的周期变小

B.当θ稳定在 37°时,配重的角速度为 5 rad/s

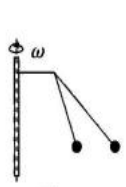
C.若增大转速,腰带受到的合力变大

D.若增大配重的线速度,则角速度变小,θ变大

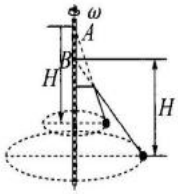
【答案】　A

【变式 1】等周期则等高度差

【典例 2】如图甲所示，竖直轻杆上有一长为 L 的水平支杆，支杆右端连接两根长度不同的细线，细线另一端分别悬挂小球，若两个小球以相同的角速度绕竖直轻杆在水平面内做匀速圆周运动，则在运动过程中，重力加速度为 g，分析两球是否处于同一高度.



甲

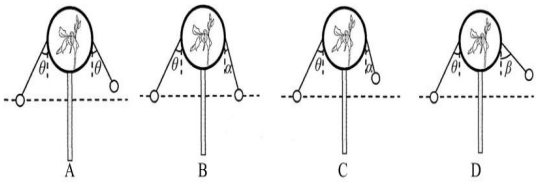


乙

【答案】两球不在同一高度上。

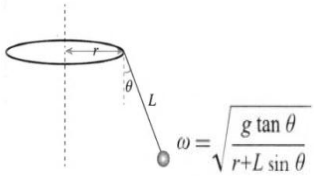
【典例 3】

拨浪鼓最早出现在战国时期，宋代时小型拨浪鼓已成为儿童玩具。拨浪鼓上分别系有长度不等的两根细绳，绳一端系着小球，另一端固定在关于手柄对称的鼓沿。现使鼓绕竖直放置的手柄匀速转动，两小球在水平面内做周期相同的圆周运动。下列各图中两球的位置关系可能正确的是(图中细绳与竖直方向的夹角$\alpha<\theta<\beta$)



【答案】C

【变式 2】飞椅模型



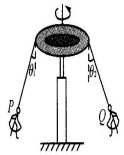
【典例 4】（多选）游乐园里的“飞椅”用钢绳系着（如图），钢绳上端的悬点固定在顶部水平转盘的圆周上。转盘绕穿过其中心的竖直轴匀速转动。稳定后，每根钢绳(含飞椅及游客)与转轴在同一竖直平面内。图中 P,Q 两位游客悬于同一个圆周上，P 所在钢绳的长度大于 Q 所在钢绳的长度，钢绳与竖直方向的夹角分别为 θ_1、θ_2。不计钢绳的质量，则下列判断正确的是　(　　)

A. P,Q 两个飞椅的线速度大小相同

B. 无论两个游客的质量分别有多大，θ_1 一定大于 θ_2

C. 如果两个游客的质量相同，则有 θ_1 等于 θ_2

D. 如果两个游客的质量相同，则 Q 的向心力一定小于 P 的向心力

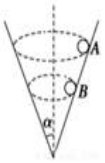


例 1 图

分析与解：由 $mg\tan\theta=m\omega^2 h\tan\theta$ 得，$h_P=h_Q$(h 为钢绳延长线与转轴交点与游客水平面的高度)；由 $h=\frac{r}{\tan\theta}+L\cos\theta$(其中 r 为圆盘半径，L 为钢绳长度)得，L 越小则 θ 越小，则 $\theta_1>\theta_2$，与质量无关；由 $R=r+L\sin\theta$ 可得，$R_P>R_Q$，则 $v_P>v_Q$；由向心力公式 $F=mg\tan\theta$，可知 Q 的向心力一定小于 P 的向心力，故选项 B,D 正确，A,C 错误；故选 BD。

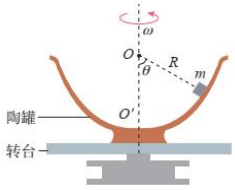
答案：BD

【变式 3】圆锥筒模型（设无摩擦时）



$$\text{小球}\frac{mg}{\tan\alpha}=m\omega^2 r$$

【规律】越高线速度越大、角速度越小。



总结

圆锥筒模型中，锥面与水平面的夹角为 θ，小球做圆周运动的向心加速度为 $g\tan\theta$.

(1)若碗壁光滑，增大小球转动的角速度，小球沿弧面上升；减小小球转动的角速度，小球沿弧面下降.

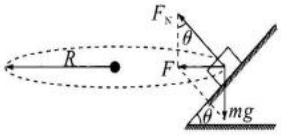
(2)若碗壁粗糙：

①$a=g\tan\theta$，向心力由重力和弹力提供，小球不受摩擦力的作用；

②$a>g\tan\theta$，小球有沿弧面向上运动的趋势，小球的摩擦力方向沿弧面切线向下；

③$a<g\tan\theta$，小球有沿弧面向下运动的趋势，小球的摩擦力方向沿弧面切线向上.

(3)等效理解成汽车或火车拐弯，弯道的倾斜角为 θ，拐弯半径为 R.

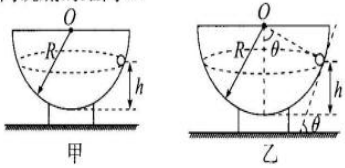


①$a=g\tan\theta$，向心力由重力和弹力提供，车不受沿倾斜路面方向的摩擦力；

②$a>g\tan\theta$，车有向外侧运动的趋势，摩擦力的方向指向倾斜路面内侧；

③$a<g\tan\theta$，车有向内侧运动的趋势，摩擦力的方向指向倾斜路面外侧.

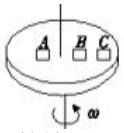
【典例 4】如图甲所示，在半径为 R 的半球形碗的光滑内表面上，一质量为 m 的小球以角速度 ω 在水平面内做匀速圆周运动，求小球离碗底的距离 h.



【答案】$h=R(1-\cos\theta)=R-\dfrac{R}{\omega^2}$.

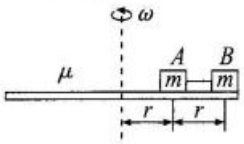
三、水平面内的圆周运动模型

【模型一】离轴距离不等无绳子相连



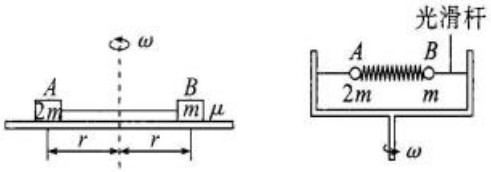
【规律 1】同角速越远越易滑

【模型二】物体处于同侧，离轴距离不等有绳子相连



【规律 2】当 B 未达到最大静摩擦力之前，绳子处于松弛状态，当 B 达到最大静摩擦力后，绳子绷紧，弹力增大，A、B 未打滑前，B 的摩擦力不变，A 的摩擦力一直在增大。

【模型三】物体处于异侧，离轴距离相等（不等）有绳子相连



【规律总结】“手拉手”模型

质量为 m_1 的质点 A 与质量为 m_2 的质点 B 相距 L，两质点绕二者连线上某点做圆周运动，质点 A 的半径为 r_1，质点 B 的半径为 r_2，向心力由两质点间的内力提供，向心力始终等大、反向，质点 A 的向心加速度为 a_1，质点 B 的向心加速度为 a_2，运动过程中满足：

$r_1+r_2=L$，

$m_1a_1=m_1r_1\omega^2=m_2r_2\omega^2=m_2a_2$.

总结运动规律：

$\dfrac{a_1}{a_2}=\dfrac{r_1}{r_2}=\dfrac{m_2}{m_1}$，

$r_1=\dfrac{m_2}{m_1+m_2}L$，$r_2=\dfrac{m_1}{m_1+m_2}L$.

四、竖直平面内的圆周运动

1.运动特点

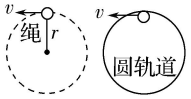
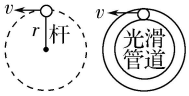
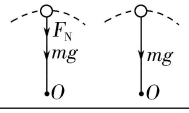
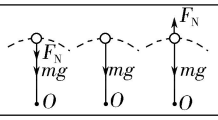
(1)竖直面内的圆周运动一般是变速圆周运动。

(2)只有重力做功的竖直面内的变速圆周运动机械能守恒。

(3)竖直面内的圆周运动问题，涉及知识面比较广，既有临界问题，又有能量守恒的问题，要注意物体运动到圆周的最高点的速度。

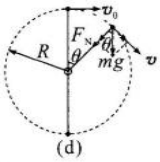
(4)一般情况下，竖直面内的圆周运动问题只涉及最高点和最低点的两种情形。

2.常见模型

物理情景	最高点无支撑【轻绳模型】	最高点有支撑【轻杆模型】
实例	球与绳连接、水流星、沿内轨道运动的“过山车”等	球与杆连接、球在光滑管道中运动等
图示		
受力特征	除重力外，物体受到的弹力方向：向下或等于零	除重力外，物体受到的弹力方向：向下、等于零或向上
受力示意图		
力学方程	$mg+F_N=m\dfrac{v^2}{R}$	$mg\pm F_N=m\dfrac{v^2}{R}$
临界特征	$F_N=0$ $mg=m\dfrac{v_{min}^2}{R}$ 即 $v_{min}=\sqrt{gR}$	$v=0$ 即 $F_{向}=0$ $F_N=mg$
过最高点的条件	在最高点的速度 $v\geqslant\sqrt{gR}$	$v\geq0$

3.轻杆受力的变化规律

以最高点为初始点，设小球在初始点的速度为 v_0，小球运动到某点的速度为 v，杆扫过的角度为 $\theta(0\leqslant\theta\leqslant360^\circ)$，设杆受到的力指向圆心的方向为正方向，如图(d)所示.



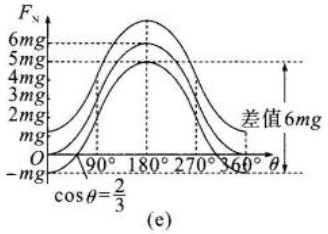
(d)

由动能定理得 $mgR(1-\cos\theta)=\dfrac{1}{2}mv^2-\dfrac{1}{2}mv_0^2$.

向心力：$F_{向}=\dfrac{mv^2}{R}=\dfrac{mv_0^2}{R}+2mg-2mg\cos\theta$.

对小球进行受力分析，设杆对小球的弹力指向圆心，由受力分析得 $F_{向}=F_N+mg\cos\theta$.

综上所述，$F_N=\dfrac{mv_0^2}{R}+2mg-3mg\cos\theta$，轻杆弹力与扫过的角度 θ 的变化图像如图(e)所示，当弹力 $F_N=0$ 时，$\cos\theta=\dfrac{2}{3}+\dfrac{v_0^2}{3gR}$.



(e)

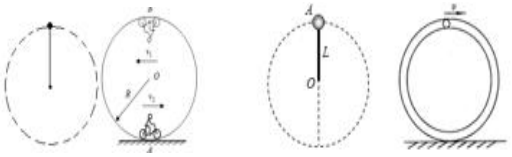
【讨论】当圆周运动的最高点的速度范围为 $0\leqslant v_0\leqslant\sqrt{gR}$ 时，存在杆弹力为 0 的点，即图像与横轴的交点．轻杆弹力为 0 的点对应的半径与竖直方向夹角的余弦值的表达式为 $\cos\theta=\frac{2}{3}+\frac{v_0^2}{3gR}$，其中 $\frac{2}{3}\leqslant\cos\theta\leqslant1$．

【规律总结】

在光滑竖直圆周运动中，有以下结论：

（1）竖直圆周运动的最低点与最高点的向心加速度大小的差值为 4g，竖直圆周运动的最高点或最低点与圆心等高处的向心加速度大小的差值为 2g.此结论对绳系小球也成立，且与绳长无关。

（2）在竖直圆周运动的最高点与最低点，轻杆对小球的弹力的矢量差值为 6mg.此结论对绳系小球也成立，且与绳长无关。（如图所示）



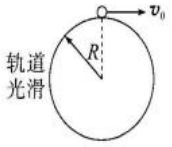
（3）最低点与圆心等高处弹力之差为 3mg.

（4）绳、内轨、水流星最高点的最小速度为 $\sqrt{gR}$，最低点的最小速度为 $\sqrt{5gR}$。

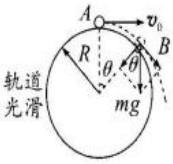
五、脱轨问题

1.外轨脱离问题（汽车过拱桥问题）

【典例 1】如图所示，半径为 R 的光滑圆轨道竖直放置，小球位于轨道的最高点，现在给小球一初速度 $v_0(v_0<\sqrt{gR})$，重力加速度为 g，分析小球脱轨位置．



小球脱离轨道前，对轨道会产生压力．小球脱离轨道的临界条件：小球对轨道的压力为 0，小球的轨迹图如图所示．



脱离轨道时向心力由重力的分力提供，由牛顿第二定律得 $mg\cos\theta=\frac{mv^2}{R}$，

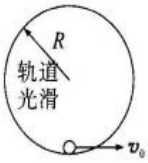
小球从最高点运动到脱离点，由动能定理得 $mgR(1-\cos\theta)=\frac{1}{2}mv^2-\frac{1}{2}mv_0^2$，

联立解得 $\cos\theta=\frac{2}{3}+\frac{v_0^2}{3gR}$．

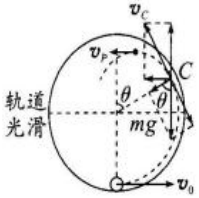
若 $v_0\leqslant\sqrt{gR}$，则脱离点的半径与竖直方向夹角的余弦值的范围为 $\frac{2}{3}\leqslant\cos\theta\leqslant1$，脱离点处于弧 AB 之间；若 $v_0\geqslant\sqrt{gR}$，则小球在最高点 A 点脱离．

2.内轨脱离问题

【典例 2】如图所示，半径为 R 的光滑圆轨道竖直放置，小球位于内轨道的最低点，现给小球一初速度 v_0，初速度的范围为 $\sqrt{2gR}<v_0<\sqrt{5gR}$，重力加速度为 g，分析小球脱轨位置．



小球脱离轨道前，对轨道会产生压力．小球脱离轨道的临界条件：小球对轨道的压力为 0，小球的轨迹图如图所示．



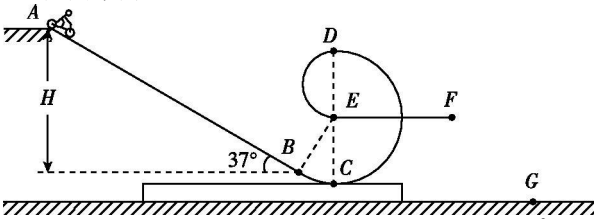
脱离时向心力由重力的分力提供，由牛顿第二定律得 $mg\cos\theta=\frac{mv^2}{R}$，

小球从最低点运动到脱离点，由动能定理得 $-mgR(1+\cos\theta)=\frac{1}{2}mv^2-\frac{1}{2}mv_0^2$，

联立解得 $\cos\theta=-\frac{2}{3}+\frac{v_0^2}{3gR}$．

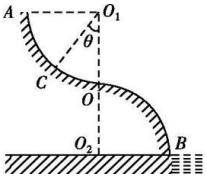
脱离点的半径与竖直方向夹角的余弦值的范围为 $0<\cos\theta<1$，脱离点的速度大小为 $v=\sqrt{gR\cos\theta}$，小球脱离轨道后做斜抛运动，到达最高点 P 的速度 $v_P=v\cos\theta=\cos\theta\cdot\sqrt{gR\cos\theta}$．

3.【应用举例 1】



【特别注意】1.小球要通过 D 点，应满足：$mg=m\frac{v^2}{r}$，其中 r 为大圆半径。

2.当物体脱离轨道瞬间，可以认为重力沿径向的分力提供向心力。



3.物体不脱离轨道还有一种情形是：到达 $\frac{1}{4}$ 圆弧（前）处速度减为 0

【应用举例 2】（过山车模型）甲、乙、丙、丁是游乐场中比较常见的过山车情景，甲、乙两图的过山车在轨道的外侧做圆周运动，丙、丁两图的过山车在轨道的内侧做圆周运动，两种过山车都有安全锁（由上、下、侧三个轮子组成），把过山车套在了轨道上。

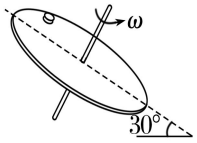

甲

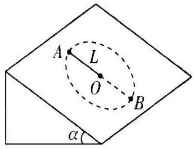

乙


丙


丁

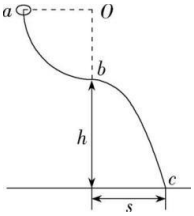
六、类竖直平面内的圆周运动【设轨道光滑】





【总结】类竖直圆周运动的最高点、最低点与竖直圆周运动最高点、最低点等效理解。

七、有形抛物线轨道与无形抛物线轨道

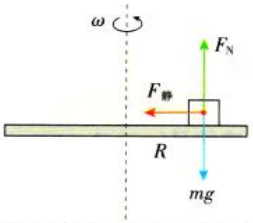


【规律】物体沿抛物线 bc 从静止开始下滑和作平抛运动时的轨迹为 bc 时的联系为：两种情况 C 点的速度方向相同。

八、临界问题

模型一：单物体的圆周运动

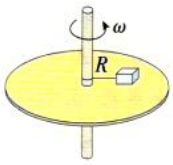
(1)接触面间发生滑动的临界问题：分析出静摩擦力最大这一临界状态下的角速度（或线速度）等。



(2)绳松弛或张紧的临界问题：分析出绳子恰好无弹力这一临界状态下的角速度（或线速度）等。

已知最大静摩擦力 $F_{max}=\mu mg$。

①当细绳的拉力 $F_T=0$ 时，细绳处于松弛状态，此时由静摩擦力提供物块随圆盘一起转动所需的向心力。存在



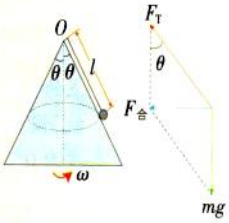
临界角速度 ω_{max}，满足 $F_{max}=mR\omega_{max}^2$，$\omega_{max}=\sqrt{\frac{\mu g}{R}}$。

②当 $\omega>\omega_{max}$ 时，细绳处于张紧状态，有 $F_T+F_{max}=m\omega^2R$，则 $F_T=m\omega^2R-\mu mg$。

【提醒】一般情况下认为最大静摩擦力 $F_{max}=\mu mg$。

(3)接触面分离的临界条件：分析出接触面间恰好无弹力这一临界状态下的角速度（或线速度）。

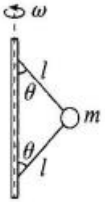
①细线系一小球在水平面内绕锥体（光滑）的轴做匀速圆周运动，若小球刚好离开锥面，则小球与锥面间弹力 $F_N=0$，



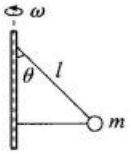
拉力 F_T 和重力 mg 的合力提供向心力，则 $F_{合}=mg\tan\theta=m\omega_0^2 l\sin\theta$，临界角速度 $\omega_0=\sqrt{\frac{g}{l\cos\theta}}$。

②当角速度 $\omega\geq\omega_0$ 时，小球与锥面间无弹力，小球“飘”起来；当 $\omega<\omega_0$ 时，小球与锥面间有弹力。

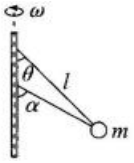
模型二：多绳系球问题【当ω不断增大时】



临界情况：下绳伸长但无拉力作用。



临界情况：下绳伸长但无拉力作用。



临界情况一：下绳伸长但无拉力作用。

临界情况二：上绳伸长但无拉力作用。

【记忆口诀】

圆周运动向心力，供需关系要找清。
径向合力提供足，需 mV 平方比 R，
mrw 平方也需，供求平衡不心离。
轻绳轻杆有差异，临界条件要谨记。

【本章高频考点】

圆周运动（以汽车拐弯、摩天轮、竖直平面内的圆周运动为背景，分析受力和极值问题）。

第三部分 物理方法概述

一、假设法

假设法是一种常用的解题方法。就是根据题目中的已知条件或结论做出某种假设，然后按已知条件进行推算，根据结果出现的矛盾做适当调整，从而找到正确答案。

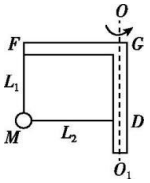
二、临界分析法

一种物理现象过渡为另一种物理现象的转折状态叫临界状态，在这种状态下具有的条件，叫临界条件，利用临界条件，推导出有关物理量的取值范围，这就是临界分析法。有些题目会直接给出临界状态，有些题目则需要自己推导临界状态，提取临界条件。

第四部分 易错、疑难问题选

1.如图所示，有一个竖直放置的 L 形框架且∠*FGD* 为直角，通过两

根不会伸长的轻质细绳 L_1、L_2 把质量为 M 的小球系于这个 L 形框架上，L_1 处于竖直状态且长度为 a，L_2 处于水平状态且长度为 b，整个装置绕着 GD 的中心轴 OO_1 以角速度 ω 匀速转动(轻质杆的粗细忽略不计，不计空气阻力，重力加速度为 g)，则在转动过程中(　　)



A.在匀速转动过程中，绳 L_1 的拉力为 $Mg+M\omega^2a$

B.绳 L_2 的拉力为零

C.因某个原因，框架被卡住，绳 L_2 也瞬间被切断，则这时小球的加速度变为 $\dfrac{(\omega a)^2}{b}$

D.因某个原因，框架被卡住，绳 L_2 也瞬间被切断，要使小球能在绳 L_2 断后做圆周运动，则框架在被卡住前做圆周运动的最小角速度为 $\omega_{min}=\dfrac{\sqrt{5ga}}{b}$

【答案】D

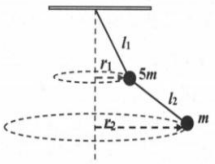
2. 如图所示，质量忽略不计、长度分别为 l_1 和 l_2 的不可伸长的轻绳，分别系质量为 $5m$ 和 m 的小球，它们以相同的转速绕中心轴线做匀速圆周运动。稳定时绳子与竖直方向夹角的正切值分别为 $\frac{1}{\sqrt{5}}$ 及 $\frac{2}{\sqrt{5}}$，圆周运动半径分别为 r_1 和 r_2，两绳子中的张力分别为 T_1 和 T_2，则

A. $r_1:r_2=2:5$

B. $T_1:T_2=5:2$

C. $l_1:l_2=1:1$

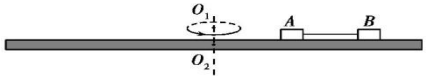
D. $l_1:l_2=3:2\sqrt{6}$



第 12 题图

【答案】A

3.如图所示，两个可视为质点的、相同的木块 A 和 B 放在转盘上，两者用长为 L 的细绳连接，对于木块与转盘，最大静摩擦力均为各自重力的 k 倍，A 放在距离转轴 L 处，整个装置能绕通过转盘中心的转轴 O_1O_2 转动，开始时，绳恰好伸直但无弹力，现让该装置从静止开始转动，使角速度缓慢增大，以下说法不正确的是(　　)



A. 当 $\omega>\sqrt{\dfrac{kg}{2L}}$ 时，绳子一定有弹力

B. ω 在 $\sqrt{\dfrac{kg}{2L}}<\omega<\sqrt{\dfrac{kg}{3L}}$ 范围内增大时，B 所受摩擦力变大

C. ω 在 $0<\omega<\sqrt{\dfrac{2kg}{3L}}$ 范围内增大时，A 所受摩擦力一直变大

D. 当 $\omega>\sqrt{\dfrac{2kg}{3L}}$ 时，A、B 相对于转盘会滑动

【答案】B

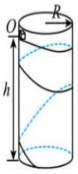
4.如图所示，内壁光滑的空心圆柱体竖直固定在水平地面上，圆柱体的内径为 R，沿着水平切向给贴在内壁左侧 O 点的小滑块一个初速度 v_0，小滑块将沿着柱体的内壁旋转向下运动，最终落在柱体的底面上。已知小滑块可看成质点，质量为 m，重力加速度为 g，O 点距柱体的底面距离为 h。下列判断正确的是

A. v_0 越大，小滑块在圆柱体中运动时间越短

B. 小滑块运动中的加速度越来越大

C. 小滑块运动中对圆柱体内表面的压力越来越大

D. 小滑块落至底面时的速度大小为 $\sqrt{v_0^2+2gh}$



【答案】D

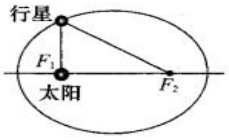
第六章　万有引力与宇宙航行

第一部分　基础知识点

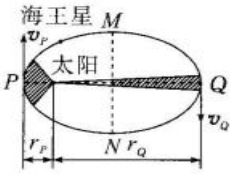
第 1 节　行星的运动

一、开普勒行星运动定律

1.开普勒第一定律(轨道定律)：所有行星绕太阳运动的轨道都是椭圆，太阳处在椭圆的一个焦点上.



2.开普勒第二定律(面积定律)：对任意一个行星来说，它与太阳的连线在相等的时间内扫过相等的面积.【$v_p\times r_p=v_Q\times r_Q$】

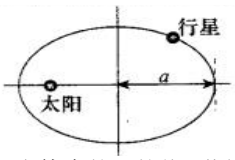


$$\frac{1}{2}v_P\cdot\Delta t\cdot r_P=\frac{1}{2}v_Q\cdot\Delta t\cdot r_Q,$$

解得 $\dfrac{v_P}{v_Q}=\dfrac{r_Q}{r_P}$.

推论：$\dfrac{v_P}{v_Q}=\dfrac{r_Q}{r_P}$，近日点、远日点的速度与各自到太阳的距离成反比.

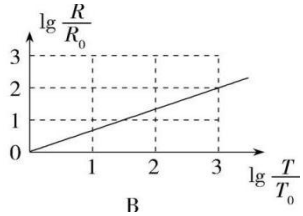
3.开普勒第三定律(周期定律)：所有行星的轨道的半长轴的三次方跟它的公转周期的二次方的比值都相等，其表达式为 $\dfrac{a^3}{T^2}=k=\dfrac{GM}{4\pi^2}$.



【注意】开普勒第三定律中的 a 的值，若轨道为椭圆则为半长轴，若为圆轨道则为圆的半径。

【拓展】开普勒行星运动定律不仅适用于行星，也适用于卫星。依然满足 $\frac{a^3}{T^2}=k'$，只不过比值 k' 是由行星的质量所决定的另一常量，且与卫星无关。

开普勒第三定律也可以用图像表达

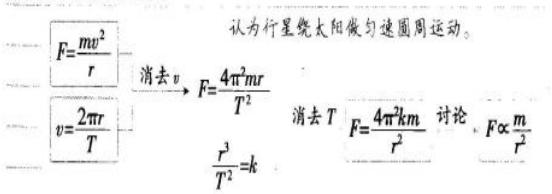


B

第 2 节　万有引力定律

一、行星与太阳间的引力

(1)太阳对行星的引力



结论：太阳对行星的引力与行星的质量成正比，与太阳、行星之间的距离的二次方成反比。

(2)行星对太阳的引力

$F\propto\frac{m}{r^2}$ 类比法 → 牛顿第三定律 → $F'\propto\frac{m_{太}}{r^2}$ 太阳对行星的引力与行星对太阳的引力是一对作用力与反作用力。

结论：行星对太阳的引力与太阳的质量成正比，与行星、太阳之间的距离的二次方成反比。

(3)太阳与行星间的引力 太阳与行星引力的方向沿着二者的连线。

$F\propto\frac{m}{r^2}$

$F'\propto\frac{m_{太}}{r^2}$

$F\propto\frac{m_{太}m}{r^2}\Rightarrow F=G\frac{m_{太}m}{r^2}$ G与太阳、行星都没有关系。

$F=F'$

结论：太阳与行星间的引力大小与太阳质量、行星质量成正比，与二者距离的二次方成反比。

二、月----地检验

(1)假设：地球对苹果、月球的吸引力是同一种力，则

$\frac{a_{月}}{a_{苹}}=\frac{G\frac{m_{地}}{r^2}}{G\frac{m_{地}}{R^2}}=\frac{R^2}{r^2}=\frac{1}{60^2}\approx2.78\times10^{-4}$ $G\frac{m_{月}m_{苹}}{r^2}=m_{苹}a_{苹}\Rightarrow a_{苹}=G\frac{m_{地}}{r^2}$

(2)验证：$a_{月}=\frac{4\pi^2}{T^2}r=\frac{4\times(3.14)^2}{(2.36\times10^6)^2}\times3.8\times10^8\ m/s^2\approx2.70\times10^{-3}\ m/s^2$

$\frac{a_{月}}{a_{苹}}=\frac{2.70\times10^{-3}\ m/s^2}{9.8\ m/s^2}\approx2.76\times10^{-4}$ $a_{苹}=g=9.8\ m/s^2$

(3)结论：地球对苹果、月球的吸引力是同一种力，遵从相同的规律。

三、万有引力定律

1.内容：自然界中任何两个物体都相互吸引，引力的方向在它们的连线上，引力的大小与物体的质量 m_1 和 m_2 的乘积成正比，与它们之间距离 r 的二次方成反比。

2.公式：$F=G\frac{m_1m_2}{r^2}$。其中 G 是卡文迪什通过扭秤实验测出来的，一般取 $G=6.67\times10^{-11}\ \mathrm{N}\cdot m^2/kg^2$。

关于万有引力常量 G--卡文迪什被称为“能称量地球质量的人”

①数值：$G=6.67\times10^{-11}\ \mathrm{N}\cdot m^2/kg^2$

②测定人：英国物理学家卡文迪什于 1798 年利用扭秤测定。

③物理意义：数值上等于两个质量都是 1kg 的物体相距 1m 时的相互引力的大小。

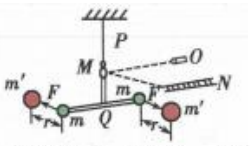
④测定意义

(1)有力证明了万有引力的存在。

(2)使定量计算得以实现。

(3)开创了测量弱相互作用的新时代。

⑤实验装置



P：石英丝 M：平面镜 O：光源 N：刻度尺 Q：倒立 T 形架。

⑥实验思想

主要思想：放大。

(1)利用四个球间引力。

(2)利用 T 形架的转动即利用力矩增大引力的可观察效果。

(3)利用小平面镜对光的反射来增大可测量的扭转角度。

3.适用条件

(1)可视为质点的物体间的相互作用。

(2)质量分布均匀的球体间的相互作用。

⚠ 提醒

当 $r\to0$ 时，两物体不能再看成质点，$F=G\frac{m_1m_2}{r^2}$ 不再成立，不能得出 $F\to\infty$ 的结论。

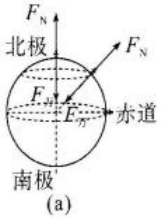
4.万有引力的特点

特点	解释
普遍性	万有引力不仅存在于天体之间，还存在于任何客观存在的有质量的物体之间
相互性	两个物体间的万有引力是一对作用力和反作用力，它们之间的关系遵循牛顿第三定律，即大小相等，方向相反，作用在同一条直线上
宏观性	通常情况下，万有引力非常小，只有在质量巨大的天体间或天体与其附近的物体间，它的存在才有实际的物理意义
确定性	两物体间的万有引力只与它们本身的质量和距离有关，与物体所在空间的性质、是否受到其他外力等因素无关

四、万有引力与重力的关系

情况一：忽略地球自转

如图(a)所示，假设地球是理想球体，忽略地球自转，质量为 m 的物体在地球上不同位置的万有引力大小均相等，重力加速度大小均相等，方向均指向地心；地球对物体的支持力大小均相等，方向指向地球的外侧，与接触点的切面垂直.



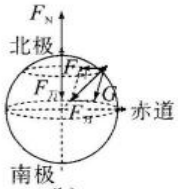
(a)

结论：忽略地球自转，万有引力等于重力，地球表面的重力加速度大小 g_0 均相等，即 $F_{万}=mg_0$，$a_{万}=g_0$.

情况二：考虑地球自转

(1)物体位于两极点上

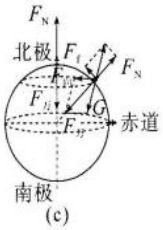
如图(b)所示，假设地球是理想球体，两极点位于地球自转的转轴上，不存在向心力，因此物体在两极点处的重力等于万有引力.



(b)

(2)物体位于赤道与两极点间

如图(c)所示，假设地球是理想球体，物体位于赤道与两极之间，物体随地球一起自转做圆周运动，物体的向心力与重力是万有引力的分力.



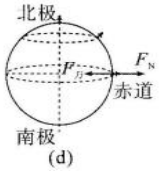
(c)

将万有引力分解为向心力 $F_{向}$ 与另一分力 $F_{分}$，$F_{分}$ 即为重力 mg，$F_{分}$ 使物体对地表施加压力，地面支持力 F_N 垂直接触点的所在切面，F_N 与 $F_{分}$ 并不共线，需静摩擦力来平衡，物体受到的静摩擦力平行于切面.

结论：在赤道与两极点间，物体的重力不指向地心，重力仅是万有引力的一个分力；物体受到静摩擦力的作用，静摩擦力的方向平行于接触点所在的切面.

(3)物体位于赤道上

如图(d)所示，假设地球是理想球体，质量为 m 的物体处于赤道上，随地球一起自转做圆周运动，物体的向心力与重力是万有引力的分力且共线，设赤道上重力加速度为 g，由受力分析知 $F_{万}=F_{向}+mg$.



(d)

物体位于赤道时，向心力最大，设地球的半径为 R，自转角速度为 ω，可得 $F_{向}=mR\omega^2$，

由相互作用力可知地面的支持力 $F_N=G=mg$，

由牛顿第二定律可得 $F_{向}=F_{万}-F_N$，$a_{向}=a_{万}-g$.

总结

(1)随着地球转动角速度的增大，物体对地面的压力逐渐减小，对地面压力为 0 的临界条件：$F_{向}=F_{万}$.

(2)假设地球上的物体因万有引力结合在一起，随着地球转动角速度的增大，地球可能会解体，地球解体的临界条件：$F_{向}=F_{万}$.

(3)已知赤道和两极点的重力或重力加速度，可算出地球自转的角速度或周期，解法点拨：$g_0-g=R\omega^2$.

(4)已知赤道和两极的重力或重力加速度，以及地球自转的角速度或周期，可算出地球的密度.

(5)在赤道上：$G\frac{Mm}{R^2}=mg_1+m\omega^2R$。

(6)在两极上：$G\frac{Mm}{R^2}=mg_2$。

五、星体表面上的重力加速度（黄金代换式）

1.在地球表面附近的重力加速度 g(不考虑地球自转)

由 $mg=G\frac{mM}{R^2}$，得 $g=\frac{GM}{R^2}$

2.在地球上空距离地心 r＝R＋h 处的重力加速度为 g′，

由 $mg'=\frac{GMm}{(R+h)^2}$，得 $g'=\frac{GM}{(R+h)^2}$

所以 $\frac{g}{g'}=\frac{(R+h)^2}{R^2}$

六、两个有用的推论和技巧

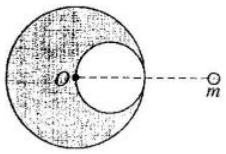
1.两个推论

①推论 1：在匀质球壳的空腔内任意位置处，质点受到球壳的万有引力的合力为零，即 $\Sigma F_{引}=0$.

②推论 2：在匀质球体内部距离球心 r 处的质点(m)受到的万有引力等于球体内半径为 r 的同心球体(M')对其的万有引力，即 $F=G\frac{M'm}{r^2}$.

2.万有引力计算的技巧

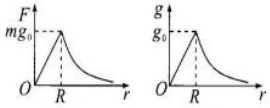
技巧一：割补法



技巧二：匀质空腔对内部任意一质点的万有引力合力为 0.

七、地球内、外重力的变化规律总结

(1)万有引力 F 与到地心的距离 r 的关系图像、重力加速度 g 与到地心的距离 r 的关系图像分别如图甲、乙所示，忽略地球自转，地表重力加速度为 g_0.



甲　　乙

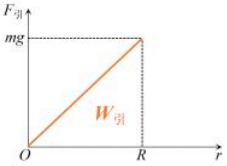
$0\sim R$ 部分的解析式：$F=\frac{mg_0}{R}r$，$g=\frac{g_0}{R}r$，

$R\sim\infty$ 部分的解析式：$F=\frac{mg_0R^2}{r^2}$，$g=\frac{g_0R^2}{r^2}$.

(2)求解地球内部万有引力做功的方法：利用图像法(或平均力法)求解重力做的功.

(3) 均匀球体内部的万有引力与物体到球心的距离成正比，此时万有引力做功可以用图像求解。

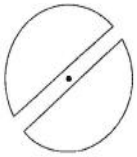
$$F_{引}=G\frac{Mm}{r^2}=\frac{G\frac{4}{3}\pi r^3\rho m}{r^2}=\frac{4}{3}G\pi\rho m\cdot r$$



【典例】如图所示，有人设想要“打穿地球”，从中国建立一条通过地心的光滑隧道直达巴西。若只考虑物体间的万有引力，则从隧道口抛下一物体，物体的加速度(　　)

A．一直增大　　B．一直减小

C．先增大后减小　　D．先减小后增大



【答案】D

第 3 节　万有引力理论的成就

一、解决天体运动问题的两条基本思路

1.处理天体之间的运动问题，紧扣一个“绕”字，据万有引力=向心力列方程求解。

$$G\frac{Mm}{r^2}=\left(r=R_{地}+h\right)\begin{cases} m\dfrac{v^2}{r}\to v=\sqrt{\dfrac{GM}{r}}\to v\propto\dfrac{1}{\sqrt{r}} \\ m\omega^2 r\to\omega=\sqrt{\dfrac{GM}{r^3}}\to\omega\propto\dfrac{1}{\sqrt{r^3}} \\ m\dfrac{4\pi^2}{T^2}r\to T=\sqrt{\dfrac{4\pi^2r^3}{GM}}\to T\propto\sqrt{r^3} \\ ma\to a=\dfrac{GM}{r^2}\to a\propto\dfrac{1}{r^2} \end{cases}\text{越高越慢}$$

“绕”时满足“越高越慢”的规律。但运行天体所受万有引力无法确定，因为还与运行天体的质量 m 有关。

2.处理星球表面的物体运动问题，紧扣一个“随”字，据万有引力=重力列方程求解。（黄金代换式）

$$mg=\frac{GMm}{R^2}\begin{cases} gR^2=GM \\ g'(R+h)^2=GM \\ g'(R-h)^2=GM' \end{cases}$$

二、求解中心天体的质量和密度

1.天体质量的计算（只能求中心天体的质量）

使用方法	已知量	利用公式	表达式	说明
借助外援法：利用环绕天体的运动情况	r、T	$G\frac{Mm}{r^2}=mr\frac{4\pi^2}{T^2}$	$M=\frac{4\pi^2r^3}{GT^2}$	只能计算中心天体的质量，无法计算环绕天体的质量
	r、v	$G\frac{Mm}{r^2}=m\frac{v^2}{r}$	$M=\frac{rv^2}{G}$	
	v、T	$G\frac{Mm}{r^2}=m\frac{v^2}{r}$ $v=\frac{2\pi r}{T}$	$M=\frac{v^3T}{2\pi G}$	
自力更生法：利用天体表面的重力加速度	g、R	$mg=G\frac{Mm}{R^2}$	$M=\frac{gR^2}{G}$	不考虑天体自转

2.天体密度的计算（要已知星球半径 R，利用 $V_{球}=\frac{4}{3}\pi R^3$ 求解）

使用方法	已知量	利用公式	表达式	说明
借助外援法：利用环绕天体的运动情况	r、T、R	$G\frac{Mm}{r^2}=mr\frac{4\pi^2}{T^2}$ $M=\rho\cdot\frac{4}{3}\pi R^3$	$\rho=\frac{3\pi r^3}{GT^2R^3}$ 当 $r=R$ 时， $\rho=\frac{3\pi}{GT^2}$	利用近地卫星，只需测出其运行周期
自力更生法：利用天体表面的重力加速度	g、R	$mg=G\frac{Mm}{R^2}$ $M=\rho\cdot\frac{4}{3}\pi R^3$	$\rho=\frac{3g}{4\pi GR}$	不考虑天体自转

地球不会因为自转而瓦解的最小密度为：

$$\rho\geqslant\frac{3\pi}{GT^2}=18.9\text{kg/m}^3.$$

三、预言哈雷彗星回归

(1)哈雷彗星的周期：哈雷彗星的轨道半长轴约为地球公转半径的 18 倍，则由 $\frac{a_{哈}^3}{T_{哈}^2}=\frac{r_{地}^3}{T_{地}^2}$，得 $T_{哈}\approx76$ 年。应用开普勒第三定律。

(2)哈雷彗星的下次回归将在 2061 年左右。

四、几个易混概念

“中心天体”与“运行天体”、“天体半径”与“轨道半径”、“轨道半径”与“引力距离”（在双星、多星问题中二者不同）

第 4 节　宇宙航行

一、三个宇宙速度的比较

宇宙速度	数值(km/s)	意义
第一宇宙速度	7.9	①人造地球卫星的最小发射速度，②也是人造地球卫星绕地球做圆周运动的最大运行速度③人造地球卫星在地面附近环绕地球做匀速圆周运动的速度【环绕速度】
第二宇宙速度	11.2	使物体挣脱地球引力束缚的最小发射速度【逃逸速度】
第三宇宙速度	16.7	使物体挣脱太阳引力束缚的最小发射速度【脱离速度】

第二宇宙速度与第一宇宙速度的关系：$v_2=\sqrt{2}v_1$。



【关于黑洞】其逃逸速度大于光速，即 $\sqrt{\frac{2GM}{R}}>C$，故对于一个质量为 m 的球状物体，当其半径 R 不大于 $\frac{2Gm}{C^2}$ 时，即是一个黑洞。

【总结】宇宙速度与运动轨迹的关系

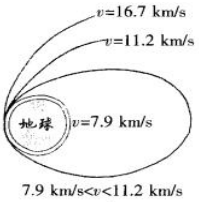
①当 $v_{发}<7.9$km/s 时，被发射的物体做抛体运动，最终会落回地面。

②$v_{发}=7.9$ km/s 时，卫星绕地球做匀速圆周运动。

③7.9 km/s$<v_{发}<$11.2km/s，卫星绕地球运动的轨迹为椭圆。

④11.2km/s≤$v_{发}$＜16.7 km/s,，卫星绕太阳做椭圆运动。

⑤$v_{发}$≥16.7 km/s，卫星将挣脱太阳引力的束缚，飞到太阳系以外的空间。



三个宇宙速度

【注意】月球探测器发射速度在v_1和v_2之间。火星探测器发射速度在v_2和v_3之间。

二、第一宇宙速度的两种求法

(1)因为$\frac{GMm}{R^2}=m\frac{v_1^2}{R}$，所以$v_1=\sqrt{\frac{GM}{R}}$.

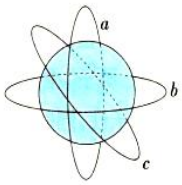
(2)因为$mg=\frac{mv_1^2}{R}$，所以$v_1=\sqrt{gR}$.

三、人造卫星的运行轨道

(1)a是极地轨道，即轨道通过两极。

(2)b是赤道轨道，即轨道平面与赤道平面重合。

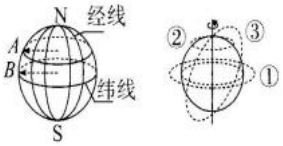
(3)c是一般轨道，即轨道平面与赤道平面可以成任意角度。



（4）不论哪种卫星其轨道平面一定通过地球的球心，即轨道圆的圆心与地球球心重合。

第二部分 方法、规律与技巧

一、卫星轨道规律总结



1. 卫星的向心力由万有引力提供，卫星轨道平面与地球球心必须重合，若卫星轨道为图中轨道②，则卫星会被万有引力“拉下来”.

2. 同步卫星轨道平面与赤道平面重合，如图中轨道①所示，且位于赤道的正上方，轨道半径$r\approx7R$(R为地球半径)；同步卫星的轨道只有一条，所有同步卫星均在同一轨道上.

3. 极地卫星轨道经过两极点，可与任意一条经线重合，由于地球自转，极地卫星可以实现全球覆盖，非极地卫星无法覆盖全球，存在盲区.

4. 卫星发射方向与地球自转方向(自西向东)相同，地球自转相当于给卫星一个初速度(获得一个初动能)，且纬度越低，初速度越大，发射难度降低.

二、几类特殊卫星及其特点

（1）近地卫星：贴近地球表面运行的卫星，其特点为：

①轨道半径 r=地球半径 R

②线速度 v=7.9km/s

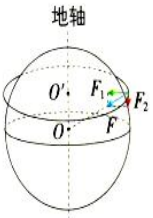
③加速度 a=g

④有最小周期T_{min}=84.8min≈85min.

（2）同步（通讯）卫星:指相对于地面静止的卫星．所有同步卫星的共同特点为：

①轨道平面一定与赤道平面共面．即只能在赤道上空。

【拓展】假设同步卫星的轨道平面与赤道面不共面，同步卫星由于受到地球指向地心的万有引力F的作用，绕地轴做圆周运动，F的一个分力F_1提供向心力，而另一个分力F_2将使同步卫星不断地移向赤道面，直至与赤道面重合为止(此时万有引力F全部提供向心力)，故同步卫星不可能定点在我国某地的正上方。



②周期一定：与地球自转周期相同，即 T＝24 h＝86 400 s.

③角速度一定：与地球自转的角速度相同.

④轨道高度一定：卫星离地面高度 h＝3.59×10^4 km≈5.6$R_{地球}$.

⑤速率一定：运行速度 v≈3.08 km/s.

⑥绕行方向一定：与地球自转的方向一致.

（3）极地卫星

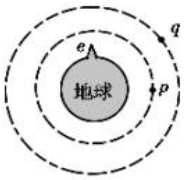
极地卫星运行时每圈都经过南北两极，由于地球自转，极地卫星可以实现全球覆盖。

（4）倾斜地球同步卫星：虽然 T=24h.但位置不在赤道上空，故同一天不同时刻观察到的位置不同，但每天同一时刻观察到的位置相同。

（5）太阳同步卫星：离地球表面 517Km 的位置，其周期为 96 分钟，一天绕地球约 15 圈。

三、赤道上的物体、近地卫星、同步卫星三者的比较

项目	近地卫星(r_1、ω_1、v_1、a_1)	同步卫星(r_2、ω_2、v_2、a_2)	赤道上随地球自转的物体(r_3、ω_3、v_3、a_3)
向心力	万有引力	万有引力	万有引力的一个分力
轨道半径	$r_2>r_1=r_3$		
角速度	由$\frac{GMm}{r^2}=m\omega^2r$得$\omega=\sqrt{\frac{GM}{r^3}}$，故$\omega_1>\omega_2$		同步卫星的角速度与地球自转角速度相同，故$\omega_2=\omega_3$
	$\omega_1>\omega_2=\omega_3$		
线速度	由$\frac{GMm}{r^2}=\frac{mv^2}{r}$得$v=\sqrt{\frac{GM}{r}}$，故$v_1>v_2$		由$v=r\omega$得$v_2>v_3$
	$v_1>v_2>v_3$		
向心加速度	由$\frac{GMm}{r^2}=ma_n$得$a_n=\frac{GM}{r^2}$，故$a_1>a_2$		由$a_n=\omega^2r$得$a_2>a_3$
	$a_1>a_2>a_3$		

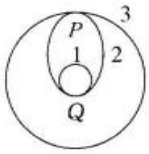


【规律】1.赤道上的物体与同步卫星具有相同的周期

2.近地卫星与同步卫星满足：越高越慢的特点。

四、卫星的变轨和对接问题

人造卫星的发射过程要经过多次变轨方可到达预定轨道，如图所示。



(1)为了节省能量，在赤道上顺着地球自转方向发射卫星到圆轨道Ⅰ上。

(2)在 Q 点点火加速，由于速度变大，万有引力不足以提供向心力，卫星做离心运动进入椭圆轨道 2。【需增大卫星的瞬时速度时，必须使喷气发动机沿卫星运动的反方向喷气，反之向卫星的运动方向喷气】

(3)在 P 点(远地点)再次点火加速进入圆形轨道 3。

【记忆】

规律 1：低轨道加速进入高轨道，反之减速

规律 2：切点 Q：$a_1=a_2, v_2>v_1$;切点 P：$a_2=a_3, v_3>v_2$

规律 3：正常运行时 $v_1\rangle v_2\rangle v_3$；$V_Q>v_1>v_3>V_P$。（$V_Q$、$V_P$ 指在轨道 2 上过 Q 点和 P 点的速率）

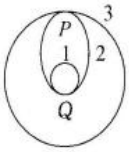
规律 4：口诀：高轨道，大周期（$T_1<T_2<T_3$），大机械能。

规律 5：卫星要对接时，先减速降低轨道再加速进入高轨道对接。

【拓展】对卫星变轨和对接问题的深入讨论

1.第一种变轨：加速升轨

如图所示，卫星在近地圆周轨道 1 近地点 Q 点点火加速进入轨道 2，在轨道 2 远地点 P 点再次点火加速进入圆周轨道 3.



总结：

(1)比较三个轨道在 P、Q 两点的加速度大小：

$a_{Q1}=a_{Q2}>a_{P2}=a_{P3}$.

(2)比较三个轨道在 P、Q 两点的速度大小：

$v_{Q2}>v_{Q1}>v_{P3}>v_{P2}$.

(3)比较卫星在三个轨道的机械能大小：$E_3>E_2>E_1$.

2.第二种变轨：摩擦降轨

摩擦降轨：人造卫星因受稀薄空气的阻力作用，轨道半径逐渐变小.

总结：

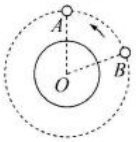
摩擦降轨时，卫星速度的变化规律是卫星速度先减小后增大.

(1)降轨瞬间，由于摩擦力的作用，速度减小，万有引力大于向心力，卫星做近心运动.

(2)降轨后摩擦力做负功，引力做正功，当 W_G 大于 W_f 时，卫星的速度增大.

3.变轨对接问题

如图所示，卫星 A、B 在同一轨道上逆时针运动，分析卫星 B 与卫星 A 的对接方式.



对接方式一：卫星 B 先减速，减速降轨，角速度增大，等 B 运行到卫星 A 后方合适位置时，加速升轨，完成与卫星 A 的对接.

对接方式二：卫星 A 先加速，加速升轨，角速度减小，等 B 运行到卫星 A 后方合适位置时，A 再减速降轨，完成与卫星 B 的对接.

总结：由于升轨更消耗能量，因此现实中常采取先降轨后升轨的方法完成卫星的对接.

常见误区：认为卫星 B 直接加速即可与卫星 A 完成对接，卫星 B 加速后会做离心运动而升轨，不可能与卫星 A 完成对接.

五、卫星轨道的能量问题

1. 圆周轨道的机械能

动能 $E_k=\frac{1}{2}mv^2=\frac{GMm}{2r}$（$r$ 为轨道半径），

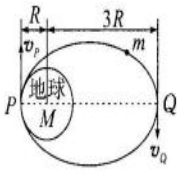
引力势能 $E_p=-\frac{GMm}{r}$（取无穷远处势能为零），

机械能 $E=E_k+E_p=-\frac{GMm}{2r}$.

若卫星运行的轨道为椭圆轨道，则 $r=\frac{a}{2}$，a 为椭圆轨道的长轴.

2. 椭圆轨道的机械能

如图所示，质量为 m 的卫星在椭圆轨道上运行，椭圆轨道与地球相切，地球的半径为 R、质量为 M，远地点与地心间的距离为 $3R$，引力势能为 $E_p=-\frac{GMm}{r}$，取无穷远处的势能为零，推导卫星在椭圆轨道上的机械能与近、远地点的速度大小.



由开普勒第二定律得 $v_P=3v_Q$，

近地点 P 的机械能为 $\frac{1}{2}mv_P^2-\frac{GMm}{R}$，

远地点 Q 的机械能为 $\frac{1}{2}mv_Q^2-\frac{GMm}{3R}$.

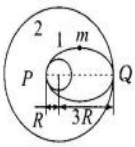
由机械能守恒得

$\frac{1}{2}mv_P^2-\frac{GMm}{R}=\frac{1}{2}mv_Q^2-\frac{GMm}{3R}$，

联立解得 $v_P=\sqrt{\frac{3GM}{2R}}$，$v_Q=\sqrt{\frac{GM}{6R}}$，　机械能 $E=E_k+E_p=-\frac{GMm}{4R}$.

3. 两种轨道的能量差

如图所示，质量为 m 的卫星在椭圆轨道上运行，椭圆轨道与地球相切，地球的半径为 R、质量为 M，远地点与地心间的距离为 $3R$，引力势能为 $E_p=-\frac{GMm}{r}$，取无穷远处的势能为零，推导卫星由轨道 1 的远地点 Q 加速进入轨道 2 消耗能量.



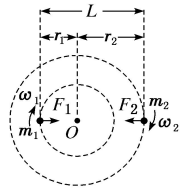
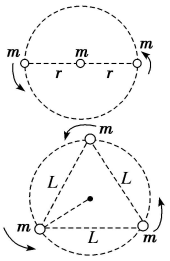
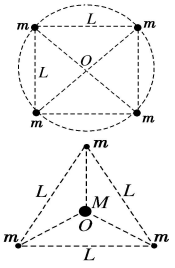
轨道 1 的机械能 $E_1=-\frac{GMm}{4R}$，

轨道 2 的机械能 $E_2=-\frac{GMm}{6R}$，

故变轨需消耗的能量 $W=E_2-E_1=\frac{GMm}{12R}$.

六、双星及多星系统

1.模型比较

	“双星”模型	“三星”模型	“四星”模型
情景图			
运动特点	转动方向、周期、角速度相同，运动半径一般不等	转动方向、周期、角速度、线速度大小均相同，圆周运动半径相等	转动方向、周期、角速度、线速度大小均相同，圆周运动半径相等
受力特点	两星间的万有引力提供两星圆周运动的向心力	各星所受万有引力的合力提供圆周运动的向心力	各星所受万有引力的合力提供圆周运动的向心力
规律	$\frac{Gm_1m_2}{L^2}=m_1\omega^2r_1$ $\frac{Gm_1m_2}{L^2}=m_2\omega^2r_2$	$\frac{Gm^2}{r^2}+\frac{Gm^2}{(2r)^2}=ma_{向}$ $\frac{Gm^2}{L^2}\times\cos 30°\times 2=ma_{向}$	$\frac{Gm^2}{L^2}\times 2\cos 45°+\frac{Gm^2}{(\sqrt{2}L)^2}=ma_{向}$ $\frac{Gm^2}{L^2}\times 2\times\cos 30°+\frac{GmM}{r^2}=ma_{向}$
关键点	$m_1r_1=m_2r_2$ $r_1+r_2=L$	$r=\frac{L}{2\cos 30°}$	$r=\frac{\sqrt{2}}{2}L$ 或 $r=\frac{L}{2\cos 30°}$

2. 双星系统规律总结【手拉手或大手拉小手模型】

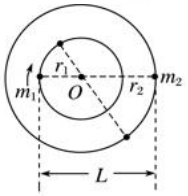
①比值关系：$\frac{a_1}{a_2}=\frac{r_1}{r_2}=\frac{m_2}{m_1}$.

半径关系：$r_1=\frac{m_2}{m_1+m_2}L$，$r_2=\frac{m_1}{m_1+m_2}L$.

②双星的运动角速度、周期：

$\omega=\sqrt{\frac{G(m_1+m_2)}{L^3}}$，$T=2\pi\sqrt{\frac{L^3}{G(m_1+m_2)}}$.

③双星的总质量：$m_1+m_2=\frac{4\pi^2L^3}{GT^2}$.



【注意】双星系统中的引力距离与轨道半径并不相等。

3.解题关键点（双星、三星问题均适用）

(1)每个运行天体所需向心力由系统内其余天体对其万有引力的合力来提供。

(2)系统内，每个运行天体的角速度相等。

(3)系统内，天体间的引力距离与天体做圆周运动的轨道半径并不相等。

七、天体运动中的追及相遇问题

1. 人造卫星的“追及”与“相遇”问题主要研究同一中心天体的两颗卫星相距最近或最远的情况。

(1)当两卫星与中心天体在同一直线上，且位于中心天体同一侧时，相距最近。

(2)当两卫星与中心天体在同一直线上，且位于中心天体异侧时，相距最远。

2. 若 A、B 起点在同一直线上

（1）角度关系

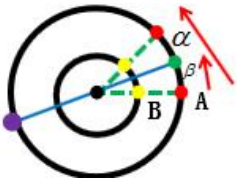
设天体 1(离中心近些)与天体 2 某时刻相距最近，如果经过时间 t，两天体与中心连线半径转过的角度之差(或和)等于 2π的整数倍，则两天体又相距最近，即 $\omega_1t-\omega_2t=2n\pi$(同向)或 $\omega_1t+\omega_2t=2n\pi$(n=1,2,3，…)(反向)；如果经过时间 t′，两天体与中心连线半径转过的角度之差(或和)等于π的奇数倍，则两天体又相距最远，即 $\omega_1t'-\omega_2t'=(2n-1)\pi$(n=1,2,3，…)(同向)或 $\omega_1t'+\omega_2t'=(2n-1)\pi$(n=1,2,3，…)(反向)。

（2）圈数关系

最近：$\frac{t}{T_1}-\frac{t}{T_2}=n$(同向)，$\frac{t}{T_1}+\frac{t}{T_2}=n$(n=1,2,3，…)(反向)

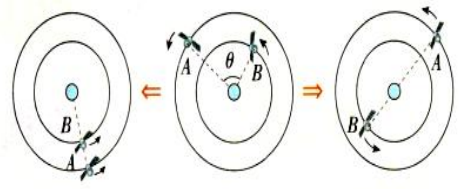
最远：$\frac{t}{T_1}-\frac{t}{T_2}=\frac{2n-1}{2}$(同向)，$\frac{t}{T_1}+\frac{t}{T_2}=\frac{2n-1}{2}$(n=1,2,3，…)(反向)

【例：若 2 天相遇 3 次，则周期之比为 5：2，即每相遇一次多转一周】



3. 若 A、B 初始位置不在同一直线上（以两卫星同向运转为例）

(1)卫星 B 的角速度大，转动快，则当 $\varphi_B-\varphi_A=\theta$ 时，即 $\omega_Bt-\omega_At=\theta$ 时，第一次相距最近；当 $\varphi_B-\varphi_A=\theta+2\pi n(n=0,1,2,\cdots)$ 时，第 $n+1$ 次相距最近。



以两卫星同向运转为例

(2)卫星 B 的角速度大，转动快，则当 $\varphi_B-\varphi_A=\theta+\pi$ 时，即 $\omega_B t-\omega_A t=\theta+\pi$ 时，第一次相距最远；当 $\varphi_B-\varphi_A=\theta+\pi(2n+1)(n=0,1,2,\cdots)$ 时，第 $n+1$ 次相距最远。

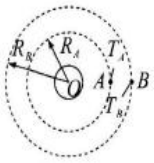
4. 天体的相遇

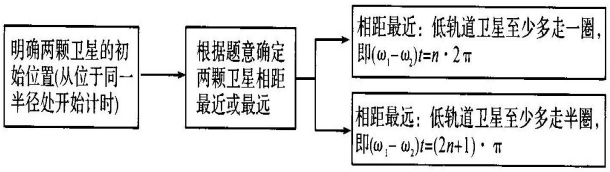
如图所示，卫星 A、B 在不同轨道上同向运行，卫星 A 的周期为 T_A，卫星 B 的周期为 T_B，认为卫星 A、B 相距最近记为一次相遇，初始时卫星 A、B 与地球三点共线，设卫星 A、B 相遇 1 次或 n 次的时间为 t，由几何关系知

$$(\omega_A-\omega_B)t=n\cdot 2\pi,$$

解得 $t=\dfrac{nT_AT_B}{T_B-T_A}(n=1,2,3\cdots)$，

两卫星在 T_0 时间内相遇的次数 $N=\dfrac{T_0}{t'}$，$t'=\dfrac{T_AT_B}{T_B-T_A}$.



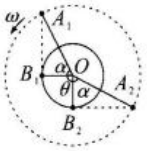


【注意】在物理学中，引力波是指时空弯曲中的涟漪，通过波的形式从辐射源向外传播，并以引力辐射的形式传输能量。

八、卫星中的几何问题

1.观察卫星问题

【典例 1】如图所示，地球的半径为 R_0，自转周期为 T_0，卫星的轨道半径为 $2R_0$，周期为 T，轨道平面与赤道平面共面，卫星的运动方向与地球的自转方向相同，求赤道上的人能连续看到该卫星的时间.



某时刻(日出)地面上的人在 B_1 点恰能看到卫星在轨道上的 A_1 点，经一段时间 t，人随地球自转到了 B_2 点，这时卫星转到 A_2 点，恰不能看到.

由几何关系知 $\angle A_1OB_1=\angle A_2OB_2=\dfrac{\pi}{3}$，$\angle B_1OB_2=\theta$，

卫星的运动角度、周期和时间的关系为

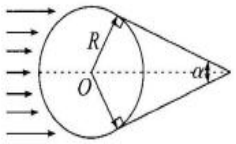
$$\frac{\frac{2}{3}\pi+\theta}{2\pi}=\frac{t}{T},$$

观察者随地球运动的角度、周期和时间的关系为 $\dfrac{\theta}{2\pi}=\dfrac{t}{T_0}$，

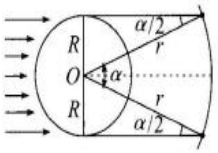
联立解得 $t=\dfrac{TT_0}{3(T_0-T)}$.

2.卫星的日全食、收集太阳光的问题

【典例 2】如图所示，卫星以周期 T 绕地球做圆周运动，张角为 α，会经历“日全食”过程，地球的半径为 R，太阳光可看作平行光，求卫星经历“日全食”的时间.

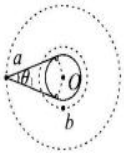


几何图解如图所示，由几何图解可知“日全食”的圆心角为 α，则“日全食”经历的时间 $t=\dfrac{\alpha}{\omega}=\dfrac{\alpha T}{2\pi}$.

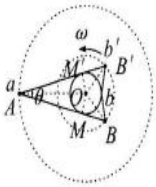


3.卫星通信盲区问题

【典例 3】如图所示，同步卫星 a、低轨道卫星 b 同向运行，卫星 a、b 的张角分别为 θ_1 和 θ_2(θ_2 未标出)，a 的半径是 b 的半径的 4 倍，卫星 a 的周期为 T，由于地球的遮挡，卫星 b 会进入卫星 a 的通信盲区，求卫星 b 每次在盲区运行的时间.



卫星 b 的角速度大于卫星 a 的角速度，以卫星 a 为参考系，如图所示，假设某时刻卫星 a 在 A 位置、卫星 b 在 B 位置，此时两卫星恰好能通信，经过时间 t，卫星 b 到达 B' 位置，此时恰好也能通信.



由几何关系知

$$\angle BOA=\angle B'OA=180^\circ-\frac{\theta_1+\theta_2}{2},$$

$$\angle BOB'=360^\circ-(\angle BOA+\angle B'OA)=\theta_1+\theta_2.$$

由开普勒第三定律得 $\dfrac{(4r)^3}{T_a^2}=\dfrac{r^3}{T_b^2}$，$T_a=T$，解得 $T_b=\dfrac{T}{8}$.

又 $\omega_a=\dfrac{2\pi}{T_a}$，$\omega_b=\dfrac{2\pi}{T_b}$，

以卫星 a 为参考系，卫星 b 运动的角速

度 $\omega=\omega_b-\omega_a$，

故 $\theta_1+\theta_2=\omega t$，

联立解得 $t=\dfrac{\theta_1+\theta_2}{14\pi}T$.

九、注意区分几组概念

(1) 两种速度-----运行速度和发射速度
(2) 两种半径-----天体半径和轨道半径
(3) 两种向心加速度-----随地球自转的向心加速度和环绕运行的向心加速度
(4) 两种周期----自转周期和公转周期
(5) 两类运行------稳定运行和变轨运行
(6) 两种轨道-----圆形轨道和椭圆轨道
(7) 两种卫星----同步卫星和一般卫星
(8) 两种圆周运动----①赤道上的物体和近地卫星②赤道上随地球自转的物体和同步卫星。

第 5 节 相对论时空观与牛顿力学的局限性

一、狭义相对论

(1)经典的相对性原理

力学规律在任何惯性系中都是相同的，这个论述叫伽利略相对性原理.

(2)狭义相对论的两个基本假设

①狭义相对性原理：在不同的惯性参考系中，一切物理规律都是相同的.

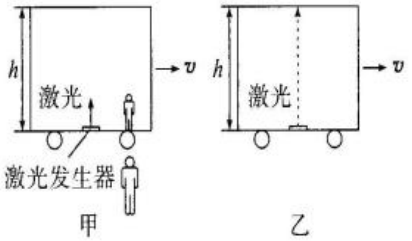
②光速不变原理：真空中的光速在不同的惯性参考系中都是相同的，光源、观测者间的相对运动对光速没有影响.

二、相对论效应：时间和空间的相对性

（1）时间延缓效应（也称钟慢效应）：时间的相对性（天上一日，地上一年）

【推导】

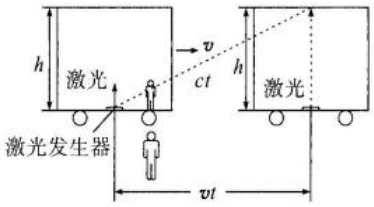
如图甲所示，一车厢以速度 v 匀速向右运动，车厢高度为 h，车厢底部有一激光发生器，某时刻激光发生器发射一竖直向上的激光.



甲　　乙

分析一：如图乙所示，以车厢为参考系，设车厢里的人测得激光到达厢顶的时间为 τ，则 $h=c\tau$，c 为光速.

分析二：如图丙所示，以地面为参考系，由于车厢匀速向右运动，地面上的人看到激光到达厢顶的路径并不是竖直向上的，而是倾斜的虚线.



丙

狭义相对论的基本假设：光速不变原理，真空中的光速在不同的惯性参考系中都是相同的.

设地面上的人测得激光到达厢顶的时间为 t，则倾斜虚线的长度 $l=ct$.

由勾股定理得 $(ct)^2=(vt)^2+h^2$，

又 $h=c\tau$，

联立解得 $t=\dfrac{\tau}{\sqrt{1-\left(\dfrac{v}{c}\right)^2}}$.

地面观察者认为运动系统中的时钟变慢了.

假设事件发生在某个运动系统中，运动系统中的观察者所测得的时间为 $\Delta\tau$，地面上的观察者所测得的时间为 Δt，由相对论可得

$$\Delta t=\frac{\Delta\tau}{\sqrt{1-\left(\dfrac{v}{c}\right)^2}}.$$

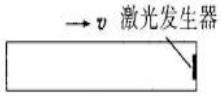
由于 $1-(\dfrac{v}{c})^2<1$，所以总有 $\Delta t>\Delta\tau$，

由式可得 $\Delta t>\Delta\tau$，地面观察者认为运动系统中的时钟变慢了.

（2）长度收缩效应（尺缩效应）：长度的相对性

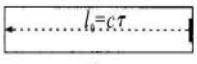
【推导】

利用激光测量火车的长度，如图甲所示，以速度 v 匀速向右运动的火车厢右侧壁上装有激光发生器.



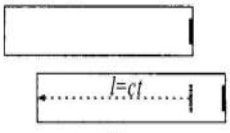
甲

分析一：如图乙所示，以车厢为参考系，设车厢里的人测得激光从右侧壁到达左侧壁的时间为 τ，则车厢的长度 $l_0=c\tau$.



乙

分析二：如图丙所示，以地面为参考系，设地面上的人测得激光从右侧壁到达左侧壁的时间为 t，则车厢的长度 $l=ct$.



丙

由钟慢效应得 $t=\dfrac{\tau}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}}$，

联立解得 $l=l_0\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}$.

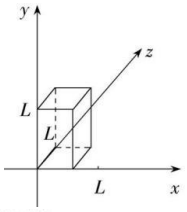
由式可得 $l<l_0$，地面观察者认为运动系统中的长度变短了.

假设杆随某个运动系统一起运动，运动系统中的观察者所测得的长度为 l_0，地面上的观察者所测得的长度为 l，由相对论可得 $l=l_0\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}$.

由于$1-(\frac{v}{c})^2<1$，所以总有 $l<l_0$，

由式可得 $l<l_0$，地面观察者认为运动系统中的长度变短了.

【典例】如图所示，惯性系 S 中有一边长为 L 的正方体，从相对 S 系沿 x 方向以接近光速匀速飞行的飞行器上观察，则该正方体的形状为图示：（根据相对论时空观的长度收缩效应可知，沿 x 轴方向正方体长度缩短，而沿 y 轴方向正方体长度没有改变）



(3)质增效应：质量的相对性

①物体的质量随物体速度的增加而增大，物体以速度 v 运动时的质量 m 与静止时的质量 m_0 之间关系为

$$m=\frac{m_0}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}}.$$

②物体运动时的质量总要大于静止时的质量 m_0.

(4)质能方程

用 m 表示物体的质量，E 表示它具有的能量，则爱因斯坦质能方程为 $E=mc^2$.

特别注意：质能方程反映质量与能量的关系，不能认为质量转化成能量，只有功能之间可以互相转化.

由于质增效应与质能方程的推导需要利用洛伦兹变换，难度系数高，因此不再介绍.

简单地科普一下质增效应：根据质增效应，随着速度的增加，物体的质量增大，惯性增大，为了使物体的速度进一步变大，需要消耗更多的能量，就算将所有的能量用来给物体加速，也不可能使物体的速度加速到光速.

四、牛顿力学的局限性

(1)从 19 世纪末到 20 世纪初，人们相继发现了电子、质子、中子等微观粒子，发现它们不仅具有粒子性，同时还具有波动性，它们的运动规律在很多情况下不能用经典力学来描述。

(2)20 世纪 20 年代，量子力学建立，用量子力学理论可以很好地描述微观粒子的运动规律。

【提醒】（1）经典力学的适用范围：低速、宏观物体的运动。

（2）量子力学的适用范围：高速、微观粒子的运动。

【记忆口诀】

皆因天体质量大，万有引力显神通。
卫星绕着天体行，快慢运行距离定。
近距高速周期小，加速才能入高轨。
近地同步赤道处，同周同绕需区分。
同步卫星六一定，近地也有四特点。
双星三星和多星，周期相同找合力。
追及相遇看绕向，角度相差是依据。

【本章高频考点】

1.开普勒第三定律和万有引力定律的综合应用（求质量、密度、周期等问题）。
2.卫星的运行规律（万有引力提供向心力）。
3.几类特殊卫星（近地、同步、极地、倾斜轨道）。
4.卫星的发射，变轨与相遇问题。
5.双星、三星及多星系统。

第三部分 物理方法概述

一、填补法

有些题目中，所研究的物体被挖去一部分，求解时先填补被挖部分，使物体恢复对称性，从而使题目变得更易理解，这种解题方法叫作填补法。

二、对称法

对称现象普遍存在于各种物理现象和物理规律中，一般情况下表现为研究对象在结构上的对称性、物理过程在时间和空间上的对称性、物理量在分布上的对称性及作用效果的对称性等。利用对称法分析解决物理问题，可以避免复杂的数学演算和推导，大大简化解题步骤。

三、数理结合法

数理结合法指运用数学知识(函数图像、函数表达式)，对所研究的物理问题进行定量分析的方法。

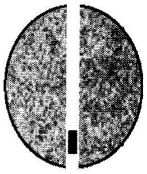
第四部分 易错、疑难问题选

1.利用三颗位置适当的地球同步卫星，可使地球赤道上任意两点之间保持无线电通讯。目前，地球同步卫星的轨道半径约为地球半径的 6.6 倍。假设地球的自转周期变小，若仍仅用三颗同步卫星来实现上述目的，则地球自转周期的最小值约为（　　）

A. 1h　　B. 4h　　C. 8h　　D. 16h

【答案】B

2.在科幻电影《全面回忆》中有一种地心车，无需额外动力就可以让人在几十分钟内到达地球的另一端，不考虑地球自转的影响、车与轨道及空气之间的摩擦，乘客和车的运动为简谐运动，则（　　）



A. 乘客做简谐运动的回复力是由车对人的支持力提供的

B. 乘客达到地心时的速度最大，加速度最大

C. 乘客只有在地心处才处于完全失重状态

D. 乘客所受地球的万有引力大小与到地心的距离成正比

【答案】D

3. 有一星球的密度跟地球密度相同，但它表面处的重力加速度是地球表面处重力加速度的4倍，则该星球的质量是地球质量的（忽略其自转影响）（　　）

【答案】 64倍

4.轨道1、3均是卫星绕地球做圆周运动的轨道，轨道1的半径为R，轨道2是一颗卫星绕地球做椭圆运动的轨道，轨道3与轨道2相切于B点，O点为地球球心，AB为椭圆的长轴，三轨道和地心都在同一平面内. 已知在1、2两轨道上运动的卫星的周期相等，引力常量为G，地球质量为M，三颗卫星的质量相等，则下列说法正确的是（　　）

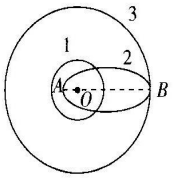


图5-8

A. 卫星在轨道3上的机械能小于在轨道2上的机械能

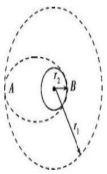
B. 若卫星在轨道1上的速率为v_1，卫星在轨道2上A点时的速率为v_A，则$v_1<v_A$

C. 若卫星在轨道1、3上的加速度大小分别为a_1、a_3，卫星在轨道2上A点时的加速度大小为a_A，则$a_A<a_1<a_3$

D. 若$OA=0.4R$，则卫星在轨道2上B点时的速率$v_B>\sqrt{\frac{5GM}{8R}}$

【答案】B

5. 有一卫星在赤道上空轨道半径为r_1的圆形轨道上绕地运行的周期为T，该卫星运动方向与地球自转方向相同，有一天文爱好者在赤道上城市内罗毕（肯尼亚）旅游时通过观察发现每二天恰好三次看到卫星掠过其正上方. 假设某时刻，该卫星在A点变轨进入椭圆轨道（如图），近地点B到地心距离为r_2. 设卫星由A到B运动的时间为t，地球自转周期为T_0，不计空气阻力，则



A. $T=\frac{2}{5}T_0$

B. $t=\frac{(r_1+r_2)T}{2r_1}\sqrt{\frac{r_1+r_2}{2r_1}}$

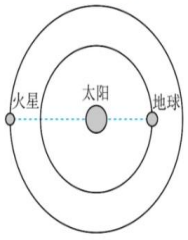
C. 卫星在图中椭圆轨道由A到B过程中，机械能不断减小

D. 卫星由图中圆轨道进入椭圆轨道过程中，机械能不变

【答案】A

【变式】

北京时间2021年9月中旬到10月下旬出现了“火星合日”现象，即当火星和地球分别位于太阳两侧与太阳共线干扰无线电时，影响通信的天文现象，因此中国首辆火星车“祝融号”发生短暂“失联”。已知地球与火星绕太阳做匀速圆周运动的方向相同。火星的公转周期为T_1，地球的公转周期为T_2，“祝融号”在火星赤道表面附近做匀速圆周运动的周期为T，“祝融号”的质量为m，火星的半径为R，引力常量为G，则下列说法正确的是



A. 火星的公转周期T_1小于地球的公转周期T_2

B. 太阳的质量$M=4\pi^2\frac{R^3}{GT_1^2}$

C. 火星的第一宇宙速度大小为$\frac{2\pi R}{T}$

D. 相邻两次“火星合日”的时间间隔为$\frac{T_1T_2}{T_2-T_1}$

【答案】C

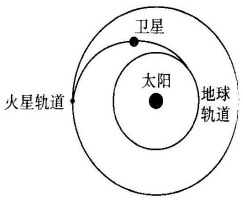
6.双星系统由两颗恒星组成，两恒星在相互引力的作用下，分别围绕其连线上的某一点做周期相同的匀速圆周运动. 研究发现，双星系统演化过程中，两星的总质量、距离和周期均可能发生变化. 若某双星系统中两星做圆周运动的周期为T，经过一段时间演化后，两星总质量变为原来的k倍，两星之间的距离变为原来的n倍，则此时圆周运动的周期为

A. $\sqrt{\frac{n^3}{k^2}}T$　　B. $\sqrt{\frac{n^3}{k}}T$

C. $\sqrt{\frac{n^2}{k}}T$　　D. $\sqrt{\frac{n}{k}}T$

【答案】B

7. 发射火星探测卫星时，卫星首先进入近地轨道，然后变轨使卫星进入椭圆转移轨道，到火星表面附近再变轨围绕火星做匀速圆周运动. 若转移轨道和地球绕日轨道的切点正好为转移轨道的近日点，和火星绕日轨道的切点为转移轨道的远日点，卫星在转移轨道运动时，忽略地球和火星引力对卫星飞行的影响. 则说法正确的是（　　）



A. 从近地轨道上某处直接进入椭圆形轨道，必须使卫星速度增加，但不能超过11.2 km/s

B. 如果测得卫星在围绕火星的轨道的运行周期，就能估算出火星的密度

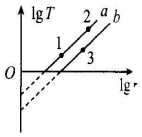
C. 卫星在近日点的速度比远日点小

D. 若日地距离为R，近日点和远日点距离为L，则卫星经转移轨道到火星轨道的时间$\frac{1}{4\sqrt{2}}\left(\frac{R+L}{R}\right)^{\frac{3}{2}}$年

【答案】B

8. 如图所示是卫星绕不同行星在不同轨道上运动的$\lg T-\lg r$图像，其中T为卫星的周期，r为卫星的轨道半径. 卫星M绕行星P运动的图线是a，卫星N绕行星Q运动的图线是b，若卫星绕行星的运动可以看成匀速圆周运动，则（





A. 直线a的斜率与行星P质量有关

B. 行星P的质量大于行星Q的质量

C. 卫星M在1处的向心加速度小于在2处的向心加速度

D. 卫星M在2处的向心加速度小于卫星N在3处的向心加速度

【答案】D

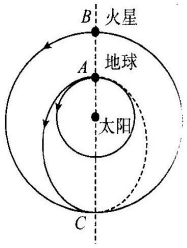
9. 2020年7月23日，我国首次火星探测任务“天问一号”探测器，在中国文昌航天发射场，应用“长征五号”运载火箭送入地火转移轨道. 为了节省燃料，我们要等火星与地球之间相对位置合适的时候发射探测器，受天体运行规律的影响，这样的发射机会很少. 已知火星的公转周期约是地球公转周期的1.9倍，为简化计算，认为地球和火星在同一平面上、沿同一方向绕太阳做匀速圆周运动，如图所示. 根据上述材料，结合所学知识，下列说法正确的是（　　）

A. 地球的公转向心加速度小于火星的公转向心加速度

B. 探测器从A点运动到C点的过程中处于加速状态

C. 如果火星运动到B点时，地球恰好在A点，此时发射探测器，那么探测器沿轨迹AC运动到C点时，恰好与火星相遇

D. 如果错过某一发射时机，那么下一个发射时机需要再等约2.1年



【答案】D

【变式】

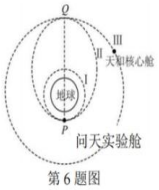
2022年7月25日，问天实验舱成功对接天和核心舱。本次发射及对接过程可简化为如图所示的模型，问天实验舱首先发射到离地面大约200km的低轨道Ⅰ，在P点加速变轨进入轨道Ⅱ，在远地点Q与轨道Ⅲ上做匀速圆周运动的天和核心舱对接。下列说法正确的是（　　）

A. 问天实验舱在轨道Ⅰ的线速度小于天和核心舱在轨道Ⅲ的线速度

B. 问天实验舱在轨道Ⅱ上运行时经过P点的速度大于经过Q点的速度

C. 问天实验舱从轨道Ⅰ运行到轨道Ⅲ过程中机械能守恒

D. 问天实验舱在轨道Ⅰ运行周期大于同步卫星的周期



第6题图

【答案】B

10.设同步卫星离地心的距离为r，运行速率为v_1，加速度为a_1；地球赤道上的物体随地球自转的向心加速度为a_2，第一宇宙速度为v_2，地球的半径为R，则下列比值正确的是（　　）

A. $\frac{a_1}{a_2}=\frac{R^2}{r^2}$　B. $\frac{a_1}{a_2}=\frac{r}{R}$　C. $\frac{v_1}{v_2}=\frac{r}{R}$　D. $\frac{v_1}{v_2}=\sqrt{\frac{r}{R}}$

【答案】B

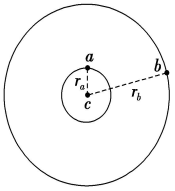
11.(多选)如图所示，三个质点a、b、c的质量分别为m_1、m_2、M(M远大于m_1及m_2)，在c的万有引力作用下，a、b在同一平面内绕c沿逆时针方向做匀速圆周运动，已知轨道半径之比为$r_a:r_b=1:4$，则下列说法正确的有（　　）

A. a、b运动的周期之比为$T_a:T_b=1:8$

B. a、b运动的周期之比为$T_a:T_b=1:4$

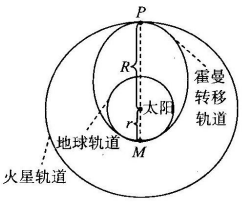
C. 从图示位置开始，在b转动一周的过程中，a、b、c共线12次

D. 从图示位置开始，在b转动一周的过程中，a、b、c共线14次



【答案】AD

12.“天问一号”探测器需要通过霍曼转移轨道从地球发送到火星，地球轨道和火星轨道看成圆形轨道，此时霍曼转移轨道是一个近日点M和远日点P都与地球轨道、火星轨道相切的椭圆轨道（如图所示）.在近日点短暂点火后“天问一号”进入霍曼转移轨道，接着“天问一号”沿着这个轨道直至抵达远日点，然后再次点火进入火星轨道.已知引力常量为G，太阳质量为m，地球轨道和火星轨道半径分别为r和R，地球、火星、“天问一号”运行方向都为逆时针方向.下列说法正确的是（　　）



A. 两次点火方向都与运动方向相同

B. 两次点火之间的时间为$\frac{\pi}{2\sqrt{2}}\sqrt{\frac{(r+R)^3}{Gm}}$

C. “天问一号”在地球轨道上的角速度小于在火星轨道上的角速度

D. “天问一号”在转移轨道上近日点的速度大小等于地球公转速度大小

【答案】B

13.

我国自主研发建设的全球卫星导航系统—北斗三号系统，由24颗中圆地球轨道卫星、3颗地球静止轨道卫星和3颗倾斜地球同步轨道卫星组成，其中中圆地球轨道卫星距离地面约2×10^4km。下列说法正确的是

A. 中圆地球轨道卫星的向心加速度最小

B. 24颗中圆地球轨道卫星的线速度均不同

C. 3颗地球静止轨道卫星受到地球的引力大小均相等

D. 倾斜地球同步轨道卫星每天同一时刻出现在不同地区上空

【答案】B

第八章　机械能守恒定律

第一部分　基础知识点

第1节　功与功率

一、功

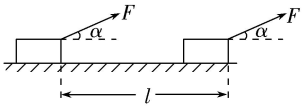
1.**定义**：一个物体受到力的作用，如果在力的方向上发生了一段位移，就说这个力对物体做了功。

2.**做功的两个要素**

(1)作用在物体上的力；

(2)物体在力的方向上发生了位移。

3.**公式**：W＝FLcosα。如图所示。

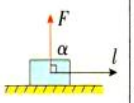
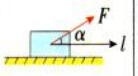
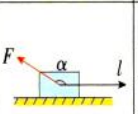


(1)α是力与位移方向之间的夹角，L为力的作用点的位移。

(2)该公式只适用于求恒力做的功。

【1大卡=1000卡；1卡=4.2焦耳】

4.功的正负

α	$\cos\alpha$	W	图示	物理意义
$\alpha=\frac{\pi}{2}$	$\cos\alpha=0$	$W=0$		表示力F对物体不做功
$0\leqslant\alpha<\frac{\pi}{2}$	$\cos\alpha>0$	$W>0$		表示动力F对物体做正功
$\frac{\pi}{2}<\alpha\leqslant\pi$	$\cos\alpha<0$	$W<0$		表示阻力F对物体做负功
备注	(1)一个力的做功情况与其他力是否做功无关 (2)一个力做负功，习惯上说物体克服这个力做了功(取绝对值)			

5.**关于做功公式的三点理解**

（1）L为质点相对地面的位移【人从地面跳起时，地面没有对人做功；引体向上运动时，单杠对人不做功】

（2）功是标量。比较功的大小要比较其绝对值。

(例：$W_1=5J$ <W_2=－7J)

（3）F和L必须同时发生。

6.**判断力是否做功及做正、负功的方法**

从做功定义的角度理解：分析力与位移的夹角，通过两者夹角的大小，确定该力的做功情况.

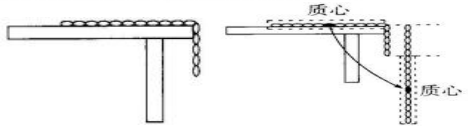
从系统机械能守恒的角度理解：系统机械能守恒，单体机械能不一定守恒，通过某一单体机械能的变化量分析出另一单体机械能的变化量，间接分析内力的做功情况.

从系统动量守恒的角度理解：系统动量守恒，通过某一单体的动量变化量分析出另一单体的动量变化量，间接分析内力的做功情况.

7. 非质点做功的计算

【典例】如图所示，一根均匀、柔软的均质绳

质量为m、长为L，绳长的$\frac{1}{4}$悬于桌面下，从绳子开始下滑至绳子刚好全部离开桌面的过程中，重力加速度为g，求重力对绳做的功.



故重力做的功为$W=\frac{3}{4}mg\cdot\frac{5}{8}L=\frac{15}{32}mgL$.

8. 流体做功的计算

人的心脏每跳一次大约输送$8\times10^{-5}\ m^3$的血液，正常人的血压可看作是输送血液的压强，平均值为$1.5\times10^4\ Pa$，求心脏每跳一次对血液做的功.

$W=FL=pSL=p\Delta V=1.2\ J$.

综上所述，心脏每跳一次对血液做的功为1.2 J.

由本题的推导知流体做功的计算公式为$W=p\Delta V$，$p-V$图像与横轴围成的面积表示该体积变化量下该推力对流体做的功.

9.**恒力做功的计算方法**：直接用 W＝FLcos α计算。

10.**合力做功的计算方法**

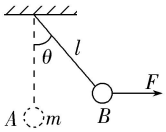
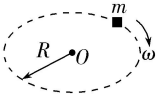
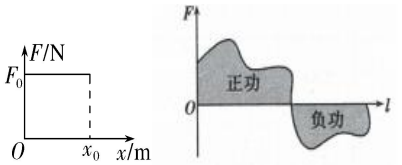
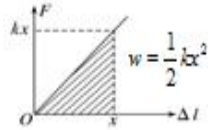
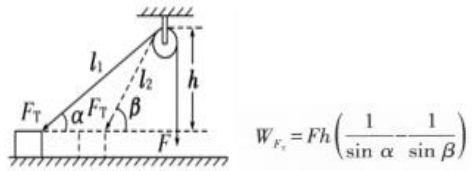
方法一：先求合力 $F_{合}$，再用 $W_{合}=F_{合}Lcos\ \alpha$求功

【适合于各力都为恒力的情形】。

方法二：先求各个力做的功 W_1、W_2、W_3…，再应用 $W_{合}=W_1+W_2+W_3+\cdots$求合力做的功（代数和：即正功代入正值，负功代入负值）。

（例：两相互垂直的力 F_1、F_2 对物体做的功分别为 4J、3J，则总功为 7J）

11.变力做功的计算

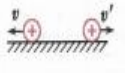
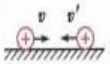
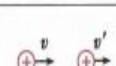
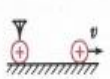
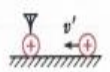
方法	以例说法
应用动能定理	 用力 F 把小球从 A 处缓慢拉到 B 处，F 做功为 W_F，则有：$W_F-mgl(1-\cos\theta)=0$，得 $W_F=mgl(1-\cos\theta)$
微元法	 质量为 m 的木块在水平面内做圆周运动，运动一周克服摩擦力做功 $W_f=F_f\cdot\Delta x_1+F_f\cdot\Delta x_2+F_f\cdot\Delta x_3+\cdots=F_f(\Delta x_1+\Delta x_2+\Delta x_3+\cdots)=F_f\cdot2\pi R$ 【注意】微元法的前提是力 F 大小不变，方向时刻与速度（或位移）方向相同或相反，此时 W=力 x 路程
W＝Pt	恒定功率启动问题中牵引力是变力，但牵引力做功可以用 W＝Pt 计算。这是一种等效代换的观点，用 W＝Pt 计算功时，必须满足变力的功率是恒定的。
面积法	 一水平拉力 F_0 拉着一物体在水平面上运动的位移为 x_0，图线与横轴所围面积表示拉力所做的功，$W=F_0x_0$.在$F-l$图像中，图线与坐标轴所围面积表示 F 做的功，若“面积”在l轴上方，表示 F 做正功，若“面积”在l轴下方，表示 F 做负功。
平均力求变力做功	当物体受到的力方向不变，而大小随位移均匀变化（即为线性关系）时，则可以认为物体受到一大小为$\overline{F}=\frac{F_1+F_2}{2}$的恒力作用，$F_1$、$F_2$ 分别为物体在初、末位置所受到的力，然后用公式 $W=\overline{F}l\cos\alpha$求此变力所做的功。（如图面积为弹簧弹力做的功） 
化变力为恒力	

12.几种常见力做功

①一对相互作用力，可能都做正功，可能都做负功，可能一个力做正功、另一个力做负功，也可能一个力做功、另一个力不做功。所以，一对相互作用力做的总功可正、可负，也可为 0。

【作用力与反作用力做功无必然联系】

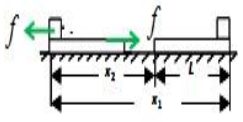
图例分析：

做功情形		图例	备注
都做正功			(1)一对相互作用力做的总功与参考系无关 (2)一对相互作用力做的总功 $W=Fl\cos\alpha$，l 是相对位移，α 是 F 与 l 间正向夹角 (3)一对相互作用力做的总功可正、可负，也可为零
都做负功			
一正一负			
一为零	一为正		
	一为负		

②静摩擦力可以对物体做正功，也可以做负功，也可以不做功。但一对静摩擦力做功的代数和为 0，不会生热。

静摩擦力做功时，只引起机械能在相互作用的物体之间转移，而不引起机械能与其他形式能量之间的转化。

③ 一对滑动摩擦力做功的代数和总小于 0，其绝对值等于摩擦生热。热量等于摩擦力与相对路程的乘积。

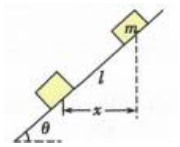


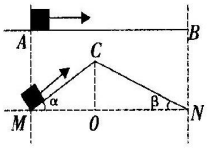
滑动摩擦力做功时，可同时引起机械能的转移及机械能向其他形式能量的转化。

13.斜面上摩擦力做功的两个结论

【结论一】沿斜面滑动的物体，滑动摩擦力所做的功与斜面倾角无关，只取决于 u、m 和物体发生的水平位移，即

$W_f=\mu mg\cos\theta\cdot l=\mu mgx$ 。





W= μ mgx

【推广】斜面的粗糙程度相同，且斜面水平投影的长度相同，物体沿不同倾角的斜面顶端运动到底端，摩擦力对物体做的功均相等。

【结论二】当斜面与平面的动摩擦因数相同时，将物块从同一位置释放，无论沿哪条折线轨道运动（圆弧轨道除外），最终小球停止的位置均相同（如图 1）。

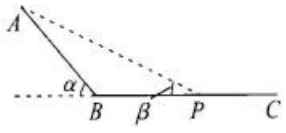


图 1

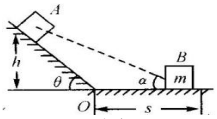


图 2

在全过程中应用动能定理，有

$$mgh-\left(\mu mg\cos\theta\cdot\frac{h}{\sin\theta}+\mu mgs\right)=0,$$

解得 $$\mu=\frac{h}{h\cot\theta+s}=\tan\alpha.$$

其中 α 为物体初末两位置 A、B 连线与水平面夹角.

【变式结论】如图 2，物体沿任意粗糙程度相同曲面由静止下滑到最后静止，动摩擦因数总等于初末两位置连线与水平面夹角的正切值。

二、功率

1.**定义**：功与完成这些功所用时间的比值。

2.**物理意义**：描述力对物体做功的快慢。

3.公式

(1)P=$\frac{W}{t}$，P 为时间 t 内的平均功率。

(2)P＝Fvcosα(α为 F 与 v 的夹角)

①若 v 为平均速度，则 P 为平均功率。

②若 v 为瞬时速度，则 P 为瞬时功率。

⚠ 提醒

(1)P、F、v 是对应于同一物体的三个物理量，且具有同时性。

(2)F、v 方向相同时，$P=Fv$。

(3)用 $P=Fv\cos\alpha$ 求平均功率时，F 要求是恒力，v 为平均速度。

4.瞬时功率的计算方法

(1)利用公式 P＝Fvcos α，其中 v 为 t 时刻的瞬时速度。

(2)利用公式 P＝Fv_F，其中 v_F 为物体的速度 v 在力 F 方向上的分速度。

(3)利用公式 P＝F_vv，其中 F_v 为物体受到的外力 F 在速度 v 方向上的分力。

5.求解功率时应注意的三个问题

(1)首先要明确所求功率是平均功率还是瞬时功率。

(2)平均功率与一段时间(或过程)相对应，计算时应明确是哪个力在哪段时间(或过程)内做功的平均功率。

(3)瞬时功率计算时应明确是哪个力在哪个时刻(或状态)的功率。

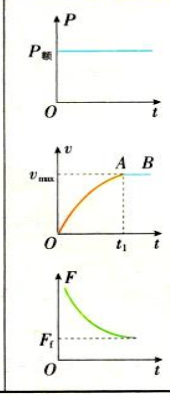
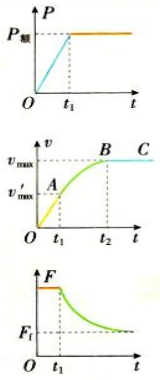
【思考】跳绳问题求重力的平均功率问题时，时间是否包含上升时间？

6.额定功率与实际功率

(1)额定功率是指动力机械长时间正常工作时最大的输出功率，是动力机械重要的性能指标。一个动力机械的额定功率是一定的，通常都在铭牌上标明。动力机械工作时必须受额定功率的限制。

(2)实际功率是动力机械工作时实际的输出功率，实际功率可以小于、等于额定功率，有时也会略大于额定功率，实际功率长时间大于额定功率会损坏动力机械。

7.机车启动问题【两个图像三大关系式】

两种方式		以恒定功率启动	以恒定加速度启动
相关图像			
OA段	过程分析	$v\uparrow\Rightarrow F=\frac{P_{额}(不变)}{v}\downarrow$ $\Rightarrow a=\frac{F-F_f}{m}\downarrow$	$a=\frac{F-F_f}{m}$(不变)$\Rightarrow F$(不变)$\Rightarrow P=Fv\uparrow$，直到 $P_{额}=Fv'_{max}$
	运动性质	加速度减小的加速直线运动	匀加速直线运动，维持时间 $t_1=\frac{v'_{max}}{a}$
AB段	过程分析	$F=F_f\Rightarrow a=0\Rightarrow$ $F_f=\frac{P_{额}}{v_{max}}$	$v\uparrow\Rightarrow F=\frac{P_{额}}{v}\downarrow$ $\Rightarrow a=\frac{F-F_f}{m}\downarrow$
	运动性质	以 v_{max} 做匀速直线运动	加速度减小的加速直线运动
BC段		——	$F=F_f\Rightarrow a=0\Rightarrow$ 以 $v_{max}=\frac{P_{额}}{F_f}$ 做匀速直线运动

【突破口】三个重要关系式

(1)P=FV (F 为牵引力)　(2)a=$\frac{F-f_{阻}}{m}$　(3)$v_m=\frac{p_{额}}{f_{阻}}$。

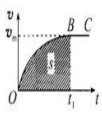
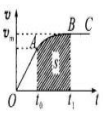
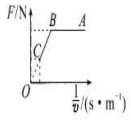
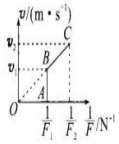
⚠ 提醒

(1)无论怎样启动，机车的最大速度都等于其匀速运动时的速度，即 $v_{max}=\frac{P}{F_{min}}=\frac{P_{额}}{F_f}$（式中 F_{min} 为最小牵引力，其值等于阻力 F_f）。

(2)机车以恒定加速度启动的运动过程中，匀加速过程结束时，功率最大，速度不是最大，即 $v'_{max}=\frac{P_{额}}{F}<v_{max}=\frac{P_{额}}{F_f}$。

(3)机车以恒定功率运动时，牵引力做的功 $W=Pt$。

【拓展 1】图形变换问题

阴影部分面积（表示位移）		
	$\frac{1}{2}mv_m^2-0=Pt_1-F_{阻}s$	$\frac{1}{2}mv_m^2-\frac{1}{2}mv_1^2=P(t_1-t_0)-F_{阻}s$
拓展	 AB 段为恒 F 启动 BC 段为恒 P 启动	 AB 段为恒 F 启动 BC 段为恒 P 启动

【手动档汽车变速杆】



【拓展 2】机车启动中的阻力突变问题

1. 阻力突然增大，所以 $F<F_{阻}$，车做减速运动.

先做加速度减小的减速运动：$v\downarrow\Rightarrow F=\frac{P(不变)}{v}\uparrow\Rightarrow a=\frac{F_{阻}-F}{m}\downarrow$，

最终做匀速运动：$F=F_{阻}\Rightarrow a=0\Rightarrow F_{阻}=\frac{P}{v_m}$.

2. 阻力突然减小，所以 $F>F_{阻}$，车做加速运动.

先做加速度减小的加速运动：$v\uparrow\Rightarrow F=\frac{P(不变)}{v}\downarrow\Rightarrow a=\frac{F-F_{阻}}{m}\downarrow$，

最终做匀速运动：$F=F_{阻}\Rightarrow a=0\Rightarrow F_{阻}=\frac{P}{v_m}$.

3. 两种情况下都是先做加速度减小的变速运动，最终都做匀速直线运动.

【拓展 3】机车启动中的功率突变问题

1. 功率突然变大，F 瞬间增大，所以 $F>F_{阻}$，车做加速运动.

先做加速度减小的加速运动：$v\uparrow\Rightarrow F=\frac{P(不变)}{v}\downarrow\Rightarrow a=\frac{F-F_{阻}}{m}\downarrow$，

最终做匀速运动：$F=F_{阻}\Rightarrow a=0\Rightarrow F_{阻}=\frac{P}{v_m}$.

2. 功率突然变小，F 瞬间减小，所以 $F<F_{阻}$，车做减速运动.

先做加速度减小的减速运动：$v\downarrow\Rightarrow F=\frac{P(不变)}{v}\uparrow\Rightarrow a=\frac{F_{阻}-F}{m}\downarrow$，

最终做匀速运动：$F=F_{阻}\Rightarrow a=0\Rightarrow F_{阻}=\frac{P}{v_m}$.

3. 两种情况下都是先做加速度减小的变速运动，最终都做匀速直线运动.

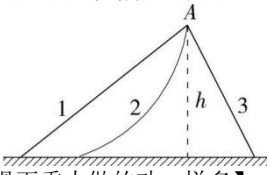
第 2 节　重力势能

一、重力做功与重力势能

1.重力做功的特点

(1)重力做功与路径无关，只与始、末位置的高度差有关。

(2)重力做功不引起物体机械能的变化。



【沿三条轨道滑下重力做的功一样多】

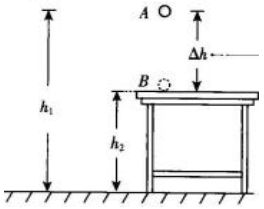
2.重力势能

(1)表达式：$E_p=mgh$。

(2)重力势能的特点

①系统性：重力势能是物体和地球所共有的。

②相对性：重力势能的大小与参考平面的选取有关，但重力势能的变化与参考平面的选取无关。



3.重力做功与重力势能变化的关系

(1)定性关系：重力对物体做正功，重力势能就减小；重力对物体做负功，重力势能就增大。

(2)定量关系：重力对物体做的功等于物体重力势能的减小量，即 $W_G=-(E_{p2}-E_{p1})=-\Delta E_p$。

【提醒】重力势能的改变只与重力做功有关，与其他力做功无关。

（3）重力势能的变化量是绝对的，与参考平面的选取无关。

二、弹性势能

1.定义：物体由于发生弹性形变而具有的能。

2.弹力做功与弹性势能变化的关系：弹力做正功，弹性势能减小；弹力做负功，弹性势能增加，即 $W=-\Delta E_p$。

【注意】对同一弹簧，形变量相同，弹性势能相同。

2，弹簧的弹性势能表达式：$E_p=\frac{1}{2}kx^2$

三、势能（位能）

(1)势能也叫位能，与相互作用的物体的相对位置有关。

(2)重力势能是由地球和地面上物体的相对位置决定的，弹性势能是由发生弹性形变的物体各部分的相对位置决定的。

(3)重力势能的变化只取决于重力做功，弹性势能的变化只取决于弹力做功，与物体是否受其他力、做什么运动等无关。

【拓展】其他势能

（1）电势能是由电荷之间的相对位置决定的，电势能的变化只取决于电场力做功。

（2）分子势能是由分子之间的相对位置决定的，分子势能的变化只取决于分子力做功。

【保守力（重力、弹簧的弹力、电场力、分子力）做功只会引起动能、势能之间的相互转化】

第 3 节　动能和动能定理

一、动能

1.定义：物体由于运动而具有的能叫动能。

2.公式：$E_k=\frac{1}{2}mv^2$。【转动动能 $E_k=\frac{1}{2}I\omega^2$，I 为转动惯量，单个质点的 $I=mr^2$，m 为质点的质量，r 为转动半径】

3.单位：焦耳，1 J=1 N·m=1 kg·m²/s²。

4.矢标性：动能是标量，只有正值。

5.**状态量**：动能是状态量，因为 v 是（相对地面的）瞬时速度。

二、动能定理（由演绎推理得出：由牛顿第二定律通过数学推导）

1.**内容**：**合外力**在一个过程中对物体做的功，等于物体在这个过程中动能的变化量。

2.**表达式**：$W=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2$或 $W=E_{k2}-E_{k1}$。

3.**物理意义**：合外力的功是物体动能变化的量度。

4.**适用条件**

(1)动能定理既适用于直线运动，也适用于曲线运动。既适用于恒力做功，也可用于变力做功；既可分段处理，也可整过程处理。

(2)力可以是各种性质的力，既可以同时作用，也可以间断作用。

【凡是涉及力、位移、速度等问题，优先考虑动能定理】

5.**应用动能定理解决的典型问题大致分为两种**

(1)单一物体的单一过程或者某一过程；

(2)单一物体的多个过程。动能定理由于不涉及加速度和时间，比动力学研究方法要简便。

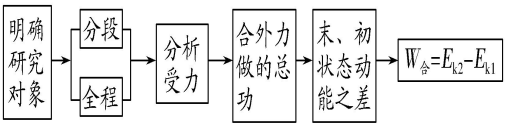
6.**对动能定理的三点理解**

(1)做功的过程就是能量转化的过程，动能定理表达式中的“＝”的意义是一种因果关系，在数值上相等的符号，它并不意味着“功就是动能增量”，也不意味着“功转变成了动能”，而是意味着“功引起物体动能的变化”。

(2)动能定理叙述中所说的“外力”，既可以是重力、弹力、摩擦力，也可以是电场力、磁场力或其他力。

(3)合外力对物体做正功，物体的动能增加；合外力对物体做负功，物体的动能减少；合外力对物体不做功，物体的动能不变。

7.**应用动能定理解决问题的步骤**



8.**应用动能定理的六点注意**：

(1)动能定理中的位移和速度必须是相对于同一参考系而言的，一般以地面或相对地面静止的物体为参考系。

(2)动能定理的表达式是一个标量式，不能在某方向上应用动能定理。

(3)动能定理往往用于单个物体或能视为单个物体的系统的运动过程，由于不涉及加速度和时间，比应用牛顿第二定律和运动学公式更简便。

【拓展】系统的动能定理

(1)对于由相互作用的几个物体组成的系统，系统动能的变化量在数值上等于一切外力、一切内力所做的功的代数和，称为系统的动能定理。

(2)由于一对相互作用力做功的代数和不一定为 0，同学们应用系统的动能定理时较容易出错，所以建议分别对每个物体应用动能定理较为合适。

(4)当物体的运动包含多个不同过程时，可分段应用动能定理，也可对全过程应用动能定理。

（5）功的正负

（6）左边写功，右边写动能的变化量（反映因果关系）。

9.**应用动能定理解决多过程问题**

(1)首先需要建立运动模型，选择合适的研究过程能使问题得以简化。当物体的运动过程包含几个运动性质不同的子过程时，可以选择一个、几个或全部子过程作为研究过程。

(2)当选择全部子过程作为研究过程，涉及重力、大小恒定的阻力或摩擦力做功时，要注意运用它们的做功特点：

①重力的功取决于物体的初、末位置，与路径无关；

②大小恒定的阻力或摩擦力的功等于力的大小与路程的乘积。

(3)关注过程与过程的连接状态的受力特征与运动特征(比如：速度、加速度或位移)。

(4)列整体(或分过程)的动能定理方程。

注意区分以下两个概念（不能重复计算）：

①摩擦力做功 $w_f=fl_{对地}$（研究对象为单个物体）

----用于动能定理

②摩擦生热 $Q_f=fl_{相对}$（（研究对象为整个系统）

----用于能量守恒

三、动能定理与图象结合的问题

1.**解决物理图象问题的基本步骤**

(1)观察题目给出的图象，弄清纵坐标、横坐标所对应的物理量及图线所表示的物理意义。

(2)根据物理规律推导出纵坐标与横坐标所对应的物理量间的函数关系式。

(3)将推导出的物理规律与数学上与之相对应的标准函数关系式相对比，找出图线的斜率、截距、图线的交点、图线下方的面积所对应的物理意义，根据对应关系列式解答问题。

2.**四类图象所围“面积”的含义**

(1) $v-t$图象 —依据$x=vt$— $v-t$图线围成的面积表示物体的位移

(2) $a-t$图象 —依据$\Delta v=at$— $a-t$图线围成的面积表示物体速度的变化量

(3) $F-x$图象 —依据$W=Fx$— $F-x$图线围成的面积表示力所做的功

(4) E_k-x图象 —依据$Fx=E_k-E_{k0}$— E_k-x图线的斜率表示合外力

四、拓展：系统动能定理

动能定理 $W_{合}=E_{k2}-E_{k1}$ 实质上是一个质点的功能关系，是针对单个物体或可看做单个物体的物体系而言的。所谓能看成单个物体的物体系，简单来说就是物体系内各物体之间的相对位置不变，从而物体系的各内力做功之和为零，物体系的动能变化就取决于所有外力做的总功了。

若质点系由 n 个质点组成，对所有 n 个质点的动能定理求和就有

$$W_{外}+W_{内}=E_k-E_{k_0}$$

质点系所有外力做功之和加上所有内力做功之和等于质点系总动能的改变量.

第 4 节　机械能守恒定律

一、机械能守恒定律及应用

1.**机械能**：动能和势能统称为机械能，其中势能包括弹性势能和重力势能。

2.**机械能守恒定律**

(1)内容：在只有重力或弹簧弹力做功的物体系统内，动能与势能可以相互转化，而总的机械能保持不变。

(2)表达式：$\frac{1}{2}mv_1^2+mgh_1=\frac{1}{2}mv_2^2+mgh_2$。

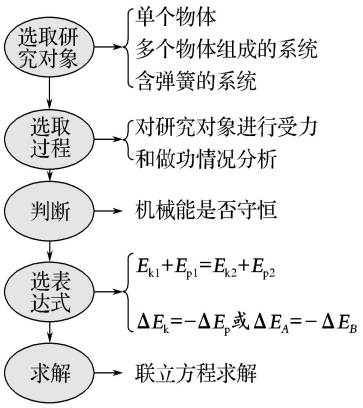
【提醒】机械能守恒指的是整个过程中机械能始终不变，并不只是初态、末态的机械能相等。

【小结】机械能守恒的三种表达式对比

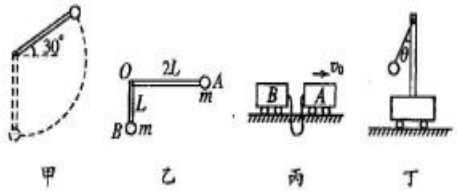
	守恒角度	转化角度	转移角度
表达式	$E_1=E_2$	$\Delta E_k=-\Delta E_p$	$\Delta E_{A增}=\Delta E_{B减}$
物理意义	系统初状态机械能的总和与末状态机械能的总和相等	表示系统(或物体)机械能守恒时，系统减少(或增加)的重力势能等于系统增加(或减少)的动能	若系统由A、B两部分组成，则A部分物体机械能的增加量与B部分物体机械能的减少量相等
注意事项	应用时应选好重力势能的零势能面，且初、末状态必须用同一零势能面计算势能	应用时关键在于分清重力势能的增加量和减少量，可不选零势能面而直接计算初、末状态的势能差	常用于解决两个或多个物体组成的系统的机械能守恒问题

3.**守恒条件**：只有重力或弹簧的弹力做功。

4.**用机械能守恒定律解题的基本思路**

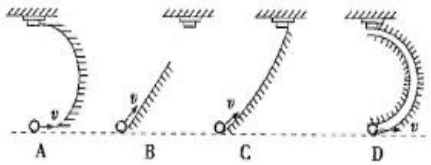


5. 机械能守恒的判断



【问题】上图物体（系统）机械能是否守恒？

6. 最大高度问题



【问题】上图小球是否能到达最高点？

二、功能关系

力学中常见的功能关系

几种常见力做功		对应的能量变化	数量关系式
重力	正功	重力势能减少	$W_G=-\Delta E_p$
	负功	重力势能增加	
弹簧等的弹力	正功	弹性势能减少	$W_{弹}=-\Delta E_p$
	负功	弹性势能增加	
电场力	正功	电势能减少	$W_{电}=-\Delta E_p$
	负功	电势能增加	
合力	正功	动能增加	$W_{合}=\Delta E_k$
	负功	动能减少	
重力(弹力)以外的其他力	正功	机械能增加	$W_{其}=\Delta E$
	负功	机械能减少	
安培力	正功	电能转化机械能	转化时有能量损失（导体发热）
	负功	机械能转化电能	

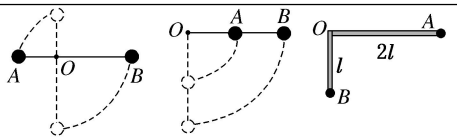
【注意】1.功不是能，功也不能变为能，只是能量转化的途径，转化多少能量，就需要做多少功。

【注意】2.何时考虑内力的影响：对于一个系统而言，只有在研究功能问题时必须考虑内力，否则内力一概不予考虑。即“谈作用只看外部，谈能量内外兼顾”。

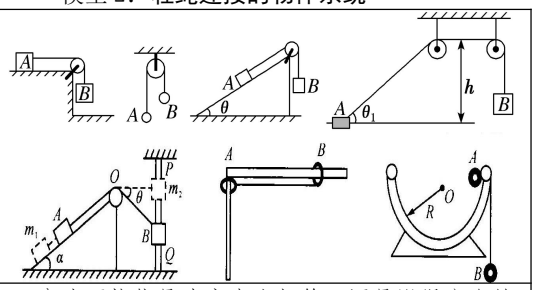
三、机械能守恒定律的推广

1.系统机械能守恒定律

模型1：**轻杆连接的物体系统**

常见情景	
三大特点	(1)平动时两物体线速度相等，转动时两物体角速度相等。 (2)杆对物体的作用力并不总是沿杆的方向，杆能对物体做功，单个物体机械能不守恒。 (3)对于杆和球组成的系统，忽略空气阻力和各种摩擦且没有其他力对系统做功，则系统机械能守恒。

模型2：**轻绳连接的物体系统**

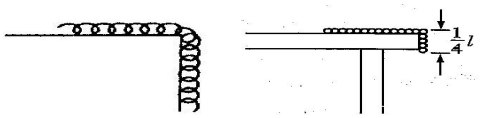
常见情景	
三点提醒	(1)分清两物体是速度大小相等，还是沿绳方向的分速度大小相等。 (2)用好两物体的位移大小关系或竖直方向高度变化的关系。 (3)对于单个物体，一般绳上的力要做功，机械能不守恒；但对于绳连接的系统，机械能则可能守恒。

模型3：**轻弹簧连接的物体系统**

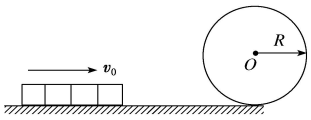
题型特点	由轻弹簧连接的物体系统，一般既有重力做功又有弹簧弹力做功，这时系统内物体的动能、重力势能和弹簧的弹性势能相互转化，而总的机械能守恒。
两点提醒	(1)对同一弹簧，弹性势能的大小由弹簧的形变量完全决定，无论弹簧伸长还是压缩。 (2)物体运动的位移与弹簧的形变量或形变量的变化量有关。

2.非质点类机械能守恒问题

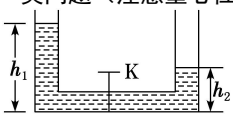
模型 1：落链模型（分段讨论）



模型 2：“过山车”类问题（找质心位置变化）



模型 3：“液柱”类问题（注意重心位置的变化）

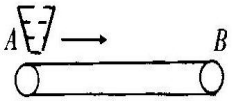


当两筒水面高度相等时，水柱的动能是$\frac{1}{4}\rho gS(h_1-h_2)^2$

第二部分 方法、规律与技巧

一、几个容易忽略的问题

1.无初速度放到匀速运转的传送带上的物体，在达到与传送带同速的过程中，产生的内能和物体增加的动能相等。



【典例 1】

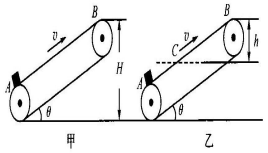
.如图所示，将甲、乙两种粗糙面不同的传送带，倾斜于水平地面放置，以同样的恒定速率 v 向上传送。现将一质量为 m 的小物体(可视为质点)轻轻放在 A 处，小物体在甲传送带上到达 B 处时恰好达到传送带的速率 v，在乙传送带上到达离 B 竖直高度为 h 的 C 处时达到传送带的速率 v。已知 B 处离地面的高度皆为 H，则在小物体从 A 到 B 的过程中 （ ）

A. 两种传送带与小物体之间的动摩擦因数相同

B. 将小物体传送到 B 处，两种传送带消耗的电能相等

C. 两种传送带对小物体做功相等

D. 将小物体传送到 B 处，两种系统产生的热量相等



甲 乙

第 6 题图

【答案】C

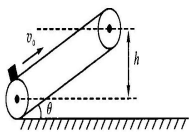
2.求电动机因传送物体而多消耗的电能：根据能的转化与守恒定律，多消耗的电能等于系统其他能量的增加。以倾斜向上运动的物体为例，多消耗的电能 $E=\Delta E_p+\Delta E_k+Q_{摩擦}$。

【典例 2】

.如图所示，绷紧的传送带与水平面的夹角 $\theta=30°$，皮带在电动机的带动下，始终保持 $v_0=2m/s$ 的速率运行。现把一质量为 $m=10kg$ 的工件(可视为质点)轻轻放在皮带的底端，经过时间 1.9s，工件被传送到 $h=1.5m$ 的高处，g 取 $10m/s^2$。求：

(1)工件与传送带间的动摩擦因数。

(2)电动机由于传送工件而多消耗的电能。



【答案】(1)$\frac{\sqrt{3}}{2}$ (2)230J

【典例 3】

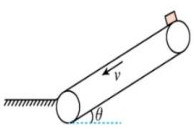
某工厂利用倾斜传送带将货物从高处运至地面。如图所示，该传送带以恒定速度 $v=10m/s$ 逆时针运行，传送带与水平面的夹角 $\theta=37°$，传送带长度为 $L=16m$。现将质量 $m=1kg$ 的货物（可视为质点）轻放到传送带顶端，经过一段时间后，货物被送到地面。已知货物与传送带间的动摩擦因数 $\mu=0.5$，不计其他损耗（g 取 $10m/s^2$，$\sin37°=0.6$，$\cos37°=0.8$），则：

A. 物块在斜面上运动的过程中所受的摩擦力始终沿斜面向下。

B. 货物刚放到传送带顶端时的加速度大小为 $2m/s^2$

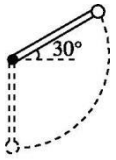
C. 货物从传送带顶端运送到底端所用的时间为 2s

D. 货物从传送带顶端运送到底端的过程中，货物与传送带之间因摩擦而产生的热量为 20J

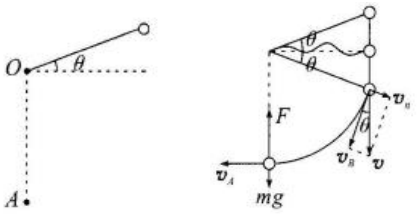


【答案】C

3.落杆与落球的区别

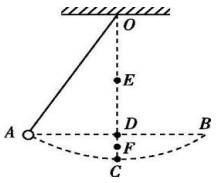


（全过程机械能守恒）

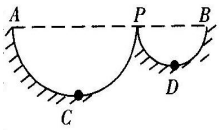


（绳子绷紧过程能量有损失）

4.突变问题【碰到钉子瞬间，小球线速度不变】。



5.将单摆的细线水平拉直，无初速度释放摆球，则小球运动到最低点时，细线的拉力恒为 T=3mg,向心加速度恒为 a=2g,与绳长无关。



【规律延伸】若小球沿不同半径的无摩擦下滑到最低点，最低点小球受到的支持力恒为 3mg,与轨道半径无关。

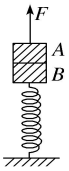
二、弹簧与能量问题

一、解题的基本思路

（1）找清初末状态分别列方程。

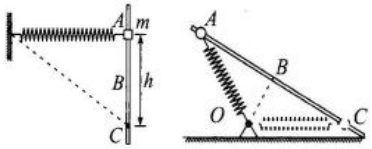
（2）根据从初状态到末状态受力和能量变化列方程。

（3）利用 V-t 图像分析运动过程。



二、各类题型及方法

1.弹簧连接体的功能关系



【无摩擦时系统机械能守恒】

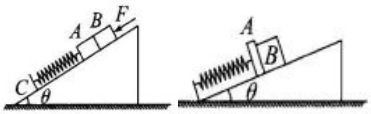
2.弹簧端物体分离的临界条件

分离的临界条件：两物体的运动状态相同，且物体间的相互作用力为 0.

要点总结：

(1)分离时：物体间的相互作用力为 0.

(2)分离时：两物体的加速度相同.



3.弹簧端物体对地面或挡板无弹力的临界条件

(1)物体与地面或挡板间的弹力恰好等于0.

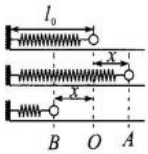
(2)恰无弹力时,物体的速度与加速度为0.



4.弹簧端物体离开地面的临界条件

①水平方向的弹簧振子

如图所示,地面光滑,弹簧原长处为O点,小球与弹簧连接,若将小球拉至A处释放,小球将关于O点对称做周期性左右运动,小球的位移与时间满足正弦变化规律,这种运动称为简谐振动.



规律总结:

(1)小球的振动关于O点对称,O点为平衡点.

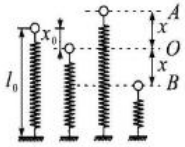
(2)振动幅度相等:$BO=AO$.

(3)关于O点对称的两点,加速度、速度大小都相等.

(4)关于O点对称的两点,弹簧的弹性势能相等.

②竖直方向的弹簧振子

如图所示,轻弹簧竖直放置,质量为m的小球与弹簧连接,弹簧原长为l_0,将小球拉至A处释放,小球将关于O点做简谐振动.



规律总结:

(1)小球的振动关于O点对称,O点为平衡点,小球在O点受力平衡,有$kx_0=mg$.

(2)振动幅度相等:$BO=AO$.

(3)关于O点对称的两点,加速度、速度大小都相等.

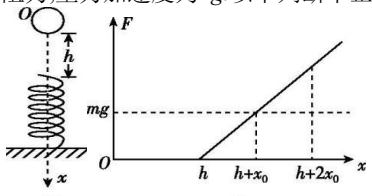
3.物体与弹簧组成的系统:

若物体机械能最小,则弹簧弹性势能最大;若物体机械能最大,则弹簧弹性势能最小;

若物体动能最小,则重力势能与弹性势能之和最大;若物体动能最大,则重力势能与弹性势能之和最小;

若物体重力势能最小,则动能与弹性势能之和最大;若物体重力势能最大,则动能与弹性势能之和最小.

【典例1】如图甲所示,轻弹簧竖直放置,下端固定在水平地面上,一质量为m的小球从离弹簧上端高h处由静止释放.某同学在研究小球落到弹簧上后继续向下运动到最低点的过程,他以小球开始下落的位置为原点,沿竖直向下方向建立坐标轴Ox,作出小球所受弹力F的大小随小球下落的位置坐标x变化的图像,如图乙所示,不计空气阻力,重力加速度为g.以下判断不正确的是(　　)



甲　　乙

A.当$x=h+x_0$时,小球的重力势能与弹簧的弹性势能之和最小

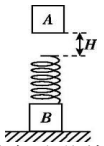
B.小球落到弹簧上向下运动到最低点的过程中,加速度先减小后增大

C.当$x=h+2x_0$时,小球的加速度大小为g

D.小球动能的最大值为$mgh+mgx_0$

【答案】D

【变式1】某课外活动小组为探究能量转换关系,设计了如图所示的实验. 质量为m的物块B静放在水平地面上,劲度系数为k的轻质弹簧固定在B上,弹簧上端装有特制锁扣,当物体与其接触时即被锁住.每次实验让物块A从弹簧正上方的恰当位置由静止释放,都使物块B刚好离开地面.整个过程无机械能损失.实验表明,物块A的质量M不同,释放点距弹簧上端的高度H就不同.当物块A的质量为m时,释放点高度$H=h$.下列说法中正确的是(重力加速度为g)(　　)



A.物块A下落过程中速度最大时,物块B对地面的压力最大

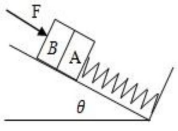
B.物块A下落到最低点时,物块B对地面的压力最大

C.当A的质量$M=2m$时,释放点高度$H=\dfrac{h}{2}$

D.当A的质量$M=2m$时,释放点高度$H=\dfrac{1}{2}\left(h+\dfrac{mg}{k}\right)$

【答案】BD

【变式2】



如图所示，劲度系数为k的轻弹簧的一端固定在墙上，另一端与置于倾角为θ的斜面上质量为m的物体A连接（另有一个完全相同的物体B紧贴着A，不粘连），弹簧与斜面平行且处于静止状态。现用沿斜面的力F缓慢推动物体B，在弹性限度内弹簧长度被压缩了x_0，此时物体A、B静止。撤去F后，物体A、B开始向上运动，已知重力加速度为g，物体A、B与斜面间的动摩擦因数为μ（μ＜tanθ）。则（　）

A. 施加力F前，弹簧被压缩了$\frac{2mgsin\theta}{k}$

B. 撤去F瞬间，物体A、B的加速度大小为（$\frac{kx_0}{2m}$-μgcosθ-gsinθ）

C. 撤去F后，物体A和B先做匀加速运动，再做匀减速运动

D. 若物体A、B向上运动要分离，则分离时向上运动距离为（x_0-$\frac{2\mu mgcos\theta}{k}$）

【答案】B

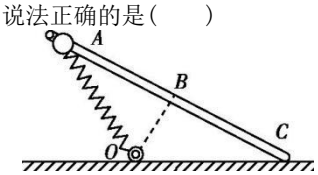
A、施加力F前，把AB作为一个整体受力分析，在斜面方向上，重力的下滑分力与弹簧的弹力和摩擦力的合力平衡，即2mgsinθ=$F_{弹}$+f，胡克定律$F_{弹}$=kx联立得x=$\frac{2mgsin\theta-f}{k}$，故A错误；

B、撤去F瞬间，把AB作为一个整体受力分析有$F_{合}$=kx_0-2μmgcosθ-2mgsinθ，a=$\frac{F_{合}}{2m}$，解得a=$\frac{kx_0}{2m}$-μgcosθ-gsinθ，故B正确；

C、由B项的分析可知，物体向上运动时弹簧伸长量发生变化即弹力发生变化，物体所受合外力发生变化，加速度变化，故不会做匀加速运动，故C错误；

D、若物体A、B向上运动要分离，则A、B两物体会在弹簧达到原长时分离，故D错误。

【典例 2】如图所示，轻质弹簧一端固定在水平面上 *O* 点的转轴上(转轴处摩擦不计)，另一端与一质量为 *m*、套在粗糙固定直杆 *A* 处的小球(可视为质点)相连，直杆的倾角为 30°，*OA=OC*，*B* 为 *AC* 的中点，*O* 到 *B* 的距离等于弹簧的原长.小球从 *A* 处由静止开始下滑，加速度大小为 a_A，第一次经过 *B* 处的速度为 *v*，所用的时间为 t_1，再经过时间 t_2 运动到 *C* 处速度恰好为 0，后又以大小为 a_C 的加速度由静止开始向上滑行.设最大静摩擦力等于滑动摩擦力，重力加速度为 *g*.下列说法正确的是(　　)



A.$t_1=t_2$

B.$a_A-a_C=2g$

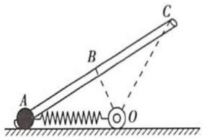
C.弹簧具有的最大弹性势能为$\frac{1}{2}mv^2$

D.撤去弹簧，小球可以静止在直杆上

【答案】C

［解析］由牛顿第二定律可知，小球从 *A* 到 *B* 的加速度大于从 *B* 到 *C* 的加速度，根据 $x=\frac{1}{2}at^2$ 可知，t_1 小于 t_2，故 A 错误.根据牛顿第二定律，在 *A* 点时有 *F*cos 30°+*mg*sin 30°-F_f=ma_A，在 *C* 点时有 *F*cos 30°-F_f-*mg*sin 30°=ma_C，解得 $a_A-a_C=g$，故 B 错误.设小球从 *A* 运动到 *B* 的过程克服摩擦力做功为 W_f，*A*、*B* 间的竖直距离为 *h*，小球的质量为 *m*，弹簧具有的最大弹性势能为 E_p，根据能量守恒定律得，对于小球从 *A* 到 *B* 的过程有 $mgh+E_p=\frac{1}{2}mv^2+W_f$，从 *A* 到 *C* 的过程有 $2mgh+E_p=2W_f+E_p$，解得 $W_f=mgh$，$E_p=\frac{1}{2}mv^2$，故 C 正确.设从 *A* 运动到 *C* 过程中摩擦力的平均值为 $\overline{F_f}$，*AB=s*，由 $W_f=mgh$ 得 $\overline{F_f}s=mgs\sin 30°$，在 *B* 点时，摩擦力 $F_f=\mu mg\cos 30°$，由于弹簧对小球有拉力(除 *B* 点外)，小球对杆的压力大于 $\mu mg\cos 30°$，所以 $\overline{F_f}>\mu mg\cos 30°$，可得 $mg\sin 30°>\mu mg\cos 30°$，因此撤去弹簧，小球不能在直杆上处于静止，故 D 错误.

【典例 3】（多选）如图所示，粗糙直杆倾斜固定在水平面上，与水平面成 30°角；轻质弹簧一端固定在光滑转轴 *O* 点上，另一端与质量为 *m* 的带有孔的小球相连，小球套在倾斜直杆上(小球可视为质点)，图中 *O*、*A* 连线水平，*OA=OC*，*AB=BC=l*，*OB* 等于弹簧原长。将小球从 *A* 点由静止释放时，小球恰好能上滑到 *B* 点；将小球从 *C* 点由静止释放时，小球恰好能下滑到 *A* 点。则下列说法正确的是（　　）



A.将小球从 *B* 点静止释放，小球能滑到 *A* 点

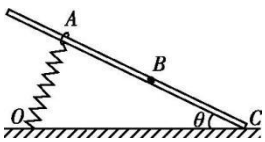
B.将小球从 *C* 点静止释放，则小球滑过 *B* 点的速度为 $\sqrt{2gl}$

C.小球在 *A*、*C* 两点时，弹簧的弹性势能相等，大小等于 *mgl*

D.为使小球能从 *A* 点滑到 *C* 点，则小球在 *A* 点的初动能不能小于 *2mgl*

3.BCD　小球从 *A* 点静止释放，由能量守恒有 $E_{p弹}=mgl\sin 30°+W_f$；从 *C* 点静止释放，由能量守恒有 $mg\cdot 2l\sin 30°=2W_f$，*C* 到 *B* 由能量守恒有 $E_{p弹}+mgl\sin 30°=\frac{1}{2}mv_B^2+W_f$；解得 $v_B=\sqrt{2gl}$，$E_{p弹}=mgl$，$W_f=\frac{1}{2}mgl$，故 B、C 正确。从 *B* 点由静止释放若能到 *A* 点，有 $mgl\sin 30°=E_{p弹}+\frac{1}{2}mv_A^2+W_f$，则 $E_{p弹}+\frac{1}{2}mv_A^2=0$，与事实不符，故 A 错误。若恰能从 *A* 点上滑到 *C* 点，有 $\frac{1}{2}mv_A^2=mg\cdot 2l\sin 30°+2W_f$，则 $\frac{1}{2}mv_A^2=2mgl$，故 D 正确。

【典例 4】如图所示，固定的倾斜粗糙细杆与水平地面间的夹角为 ϑ=37°，质量为 1 kg 的圆环套在细杆上.轻质弹簧的一端固定在水平地面上的 *O* 点，另一端与圆环相连，当圆环在 *A* 点时弹簧恰好处于原长状态且与轻杆垂直.将圆环从 *A* 点由静止释放，滑到细杆的底端 *C* 点时速度为零.若圆环在 *C* 点获得沿细杆向上且大小等于 2 m/s 的初速度，则圆环刚好能再次回到出发点 *A*.已知 *B* 为 *AC* 的中点，弹簧原长为 0.3 m，在圆环运动过程中弹簧始终在弹性限度内，重力加速度 *g* 取 10 m/s²，sin 37°=0.6，cos 37°=0.8.下列说法正确的是（　　）



A.下滑过程中，圆环受到的合力一直在增大

B.下滑过程中，圆环与细杆摩擦产生的热量为 2 J

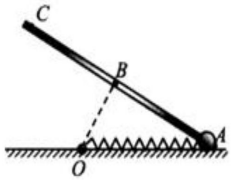
C.在圆环从 *C* 点回到 *A* 点的过程中，弹簧对圆环做的功为 1.2 J

D.圆环下滑经过 *B* 点的速度一定小于上滑经过 *B* 点的速度

【答案】D

【变式】

如图所示，轻质弹簧一端固定在水平面O点的转轴上，另一端与可视为质点的小球相连。小球在A处以初速度v_0开



始向上滑行，经过B点时速度为v，到达C点的速度恰好为零，B为光滑倾斜直杆AC的中点，OB垂直直杆，长度等于弹簧原长。下列说法正确的是（　　）

A. 上滑过程中，小球机械能始终不变

B. 速度最大值出现在AB段

C. 经过AB，BC段的时间相等

D. 弹簧的最大弹性势能为$\frac{1}{4}mv^2-\frac{1}{4}mv_0^2$

【答案】B

A、因弹簧对小球先做正功再做负功，则小球的机械能先增大后减小，故A错误；

B、速度最大时，加速度为零，则合力为零，此时重力沿杆的分力与弹力向上沿杆的分力相等，此位置在AB之间的某一点，故B正确；

C、AB，BC段长度相等，但AB段平均速度大，所用时间短，故C错误；

D.AC过程中，由动能定理可得$mg\times 2h=\frac{1}{2}mv_0^2$

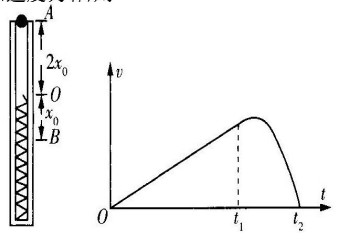
AB段，由动能定理可得$W_{弹}-mgh=\frac{1}{2}mv^2-\frac{1}{2}mv_0^2$，

解得$W_{弹}=\frac{1}{2}mv^2-\frac{1}{4}mv_0^2$，

根据功能关系可得$E_P=W_{弹}=\frac{1}{2}mv^2-\frac{1}{4}mv_0^2$，故D错误。

【典例5】

如图甲所示，在一直立的光滑管内放置一轻质弹簧，上端O点与管口A的距离为$2x_0$，一质量为m的小球从管口由静止下落，将弹簧压缩至最低点B，压缩量为x_0，速度传感器描绘出小球速度随时间变化的关系图象如图乙所示，其中$0\sim t_1$时间内的图线是直线，$t_1\sim t_2$时间内的图线是正弦曲线的一部分，不计空气阻力，重力加速度为g，则



图甲　　图乙

A. 小球运动的最大速度为$2\sqrt{gx_0}$

B. 小球运动到O点下方$\frac{x_0}{2}$处的速度最大

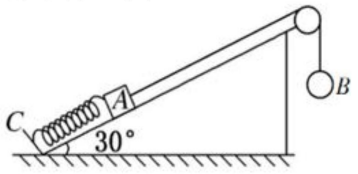
C. 弹簧的劲度系数$k>\frac{2mg}{x_0}$

D. 小球从管口A至速度最大所用时间等于从速度最大至最低点B所用时间的2倍

【答案】C

【解题思路】设小球刚运动到O点时的速度为v，则有$mg\times 2x_0=\frac{1}{2}mv^2$，解得$v=2\sqrt{gx_0}$，小球接触弹簧后先做加速度减小的加速运动，故小球运动的最大速度大于$2\sqrt{gx_0}$，A项错误；若小球从O点开始由静止释放，设弹簧的最大压缩量为x，小球做简谐运动，根据简谐运动的对称性可知，小球运动到O点下方$\frac{x}{2}$处的速度最大，在此处小球受力平衡，因小球从O点上方下落，弹簧的最大压缩量$x_0>x$，当速度最大时，弹簧的弹力与小球的重力大小相等，则小球仍在$\frac{x}{2}$处速度最大，且$\frac{x}{2}<\frac{x_0}{2}$，故$k=\frac{2mg}{x}>\frac{2mg}{x_0}$，B项错误，C项正确；由以上分析可知，小球从管口$A$至速度最大处的位移是从速度最大处至最低点$B$位移的2倍还多，而由$v-t$图象可知，小球从管口$A$至速度最大处的平均速度比从速度最大处至最低点$B$的小，由$t=\frac{x}{v}$可知，小球从管口至速度最大处所用的时间与从速度最大处至最低点B所用时间的比值比位移的比值大，D项错误。

【典例6】如图所示，在倾角为30^0的光滑斜面上，劲度系数为k的轻质弹簧一端连接固定挡板C，另一端连接质量为m的物体A，一轻质细绳通过定滑轮，一端系在物体A上，另一端与质量也为m的物体B相连，细绳与斜面平行，斜面足够长，用手托住物体B使细绳刚好没有拉力，然后由静止释放物体B（运动过程中物体B未落地），则：（　）



A. 物体B运动到最低点时，细绳上的拉力为mg

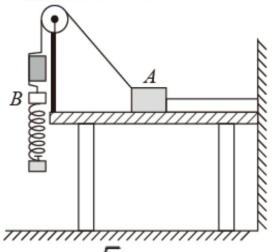
B.弹簧恢复原长时，细绳上的拉力为$\frac{3}{4}mg$

C. 物体A沿斜面向上运动的最大速度为$\sqrt{\frac{mg^2}{k}}$

D. 物体A沿斜面向上运动的最大速度为$\sqrt{\frac{mg^2}{2k}}$

【答案】BD

【典例7】如图所示，质量为M的物块A放置在光滑水平着面上，右侧连接一固定于墙面的水平轻绳，左侧通过一倾斜轻绳跨过光滑定滑轮与一竖直轻弹簧相连。现将质量为m的钩码B挂于弹簧下端，当弹簧处于原长时，将B由静止释放，当B下降到最低点时（未着地），A对水平桌面的压力刚好为零，此时A左边轻绳与水平方向夹角为45°。轻绳不可伸长，弹簧始终在弹性限度内，物块A始终处于静止状态。以下判断正确的是（　　）



A．$M=\frac{\sqrt{2}}{2}m$

B．$M=\sqrt{2}m$

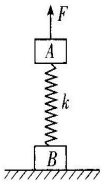
C．在B从释放位置运动到最低点的过程中，所受合力对B先做负功后做正功

D．在B从释放位置运动到速度最大的过程中，B克服弹簧弹力做的功等于B动能的增加量

【答案】B

【典例8】如图所示，物块A、B和轻弹簧静止竖立在水平

地面上，轻弹簧的两端与两物体拴接，其劲度系数为 k，重力加速度为 g. 在物体 A 上施加一个竖直向上的恒力，若恒力大小为 F_0，则物体 B 恰好不会离开地面；若恒力大小为 $2F_0$，则在物体 B 刚好离开地面时物体 A 的速度为 $\sqrt{\frac{3F_0g}{k}}$. 设整个过程中弹簧都处于弹性限度内，则物体 A 与物体 B 的质量之比为 （　　）

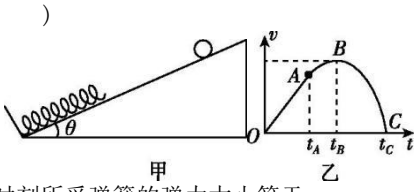


A. 2∶1　　B. 1∶2

C. 3∶1　　D. 1∶3

【答案】A

【典例 9】如图甲所示，倾角ϑ=30°的光滑斜面固定在水平面上，自然伸长的轻质弹簧一端固定在斜面底端的挡板上.一质量为 *m* 的小球从离弹簧上端一定距离的位置由静止释放，接触弹簧后继续向下运动，小球运动的 *v-t* 图像如图乙所示，其中 *OA* 段为直线，*AB* 段是与 *OA* 相切于 *A* 点的平滑曲线，*BC* 是平滑曲线，不考虑空气阻力，重力加速度大小为 *g*.关于小球的运动过程，下列说法正确的是（　　）



甲　　乙

A. 小球在 t_B 时刻所受弹簧的弹力大小等于 mg

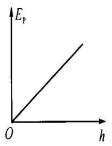
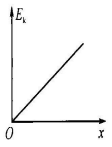
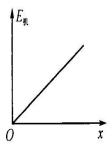
B. 小球在 t_C 时刻的加速度大小等于 $\frac{1}{2}g$

C. 小球从 t_C 时刻所在的位置由静止释放后，能回到出发点

D. 小球从 t_A 时刻到 t_C 时刻的过程中，重力势能的减少量等于弹簧弹性势能的增加量

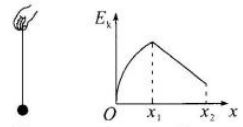
【答案】C

三、图像问题

功能关系	图像	斜率
重力势能 $E_p=mgh$	E_p-h 图像 	重力 mg
动能定理 $W=\Delta E_k$，当 F 为恒力时，$Fx=\Delta E_k$	E_k-x 的图像 	合外力 F
功能关系 $W=\Delta E_{机}$，当 $F_{其他}$ 为恒力时，$F_{其他}x=\Delta E_{机}$	$E_{机}-x$ 图像 	其他力（除了重力和弹簧弹力）

1. 动能：E_k-x 图像

【典例 1】如图甲所示，手通过轻绳向上拉小球，小球在竖直方向运动，初始时小球向上运动，小球的动能 E_k 与位移 x 的关系图像如图乙所示，且绳子拉力一直存在，分析小球的运动状态与机械能的变化情况.



甲　　乙

运动状态的分析：

$0\sim x_1$，速度方向向上，速度大小逐渐增大，加速度大小逐渐减小，小球做加速度逐渐减小的加速运动；

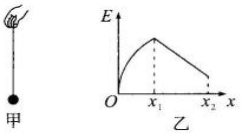
$x_1\sim x_2$，速度方向向上，速度大小逐渐减小，加速度大小不变，方向竖直向下，小球做匀减速直线运动.

机械能的变化情况：

$0\sim x_2$，外力为轻绳拉力，轻绳拉力与运动方向同向，一直做正功，小球的机械能一直增加.

2. 机械能：$E-x$ 图像

【典例 2】如图所示，手通过轻绳向上拉小球，小球在竖直方向运动，初始时小球向上运动，小球的机械能 E 与路程 x 的关系图像如图乙所示，分析小球的运动状态与机械能的变化情况.



甲　　乙

机械能的变化情况：

$0\sim x_1$，机械能增加，轻绳拉力做正功，轻绳拉力与运动方向同向，小球竖直向上运动；

$x_1\sim x_2$，机械能减小，轻绳拉力做负功，小球竖直向下运动；

x_1 处，机械能最大，此时小球运动到最高点，速度大小为零.

运动状态的分析：

初始时与小球运动到 x_1 处的速度均为零，故小球先做加速运动后做减速运动.

对于 $0\sim x_1$，分过程进行分析：

①初始时 $F_T>mg$，加速度 a 的方向竖直向上，小球竖直向上做加速运动，由于 F_T 逐渐减小，加速度逐渐减小，因此小球做加速度逐渐减小的加速运动；

②当 $F_T=mg$ 时，加速度 $a=0$，竖直向上的速度达到最大；

③当 $F_T<mg$ 时，加速度 a 的方向竖直向下，小球竖直向上运动，由于 F_T 继续减小，加速度反向增大，因此小球做加速度逐渐增大的减速运动，到达 x_1 时速度减至零.

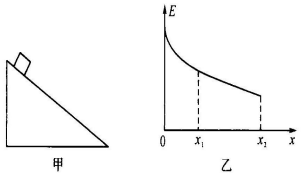
$x_1 \sim x_2$ 的过程分析：

轻绳拉力为定值，小球的合力竖直向下，

小球竖直向下做匀加速直线运动.

【典例 3】

如图甲所示，以斜面底部所在平面为重力势能的零势能面，一物体在平行斜面的拉力作用下，由静止开始沿光滑斜面向下运动。运动过程中物体的机械能与物体位移关系的图像($E-x$ 图像)如图乙所示，其中 $0\sim x_1$ 过程的图线为曲线，$x_1\sim x_2$ 过程的图线为直线。根据该图像，下列判断正确的是 （ ）



A. $0\sim x_1$ 过程中物体所受拉力可能沿斜面向下

B. $0\sim x_2$ 过程中物体的动能一定增大

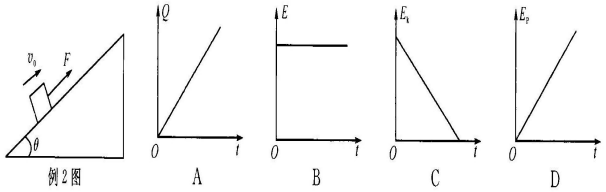
C. $x_1\sim x_2$ 过程中物体可能在做匀速直线运动

D. $x_1\sim x_2$ 过程中物体可能在做匀减速直线运动

【答案】B

【典例 4】

(多选)如图所示，质量为 m 的滑块以一定的初速度 v_0 滑上倾角为 θ 的足够长的固定斜面并在沿斜面向上的恒力 $F=mg\sin\theta$ 作用下运动。已知滑块与斜面间的动摩擦因数 $\mu=\tan\theta$，取斜面底部所在水平面为零重力势能面，则滑块在从斜面底端运动至最高点的过程中，因滑块与斜面摩擦而产生的热量 Q、滑块的动能 E_k、重力势能 E_p 以及系统的机械能 E 随时间 t、位移 x 变化的关系图像可能是图中的 （ ）



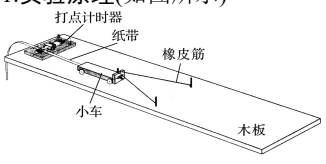
【答案】BCD

【记忆口诀】

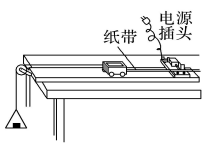
做功位移力夹角，正负只表动阻力。
比较大小看数值，多力做功代数和。
做功快慢用功率，平均瞬时要区分。
机车启动两方式，两图三式要对应。
重力弹性势能变，两力做功来定夺。
确定状态找动能，分析过程找力功，
合力做功动能变，动能增量与它同。
明确两态机械能，再看过程力做功，
“重力”之外功为零，初态末态能量同。
确定状态找量能，再看过程力做功。
有功就有能转变，初态末态能量同。
摩擦生热需滑动，静摩只能做零功。
各大模型要记牢，最烦弹簧来参与，
分类讨论过程多，临界极值不等式。

实验 1：探究做功与物体速度的关系（删减）

1.实验原理(如图所示)



方案一



方案二

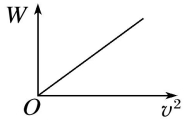
方案一：通过变力做功的探究

原理：让橡皮筋拉动小车做功使小车的速度增加，使拉小车的橡皮筋的条数由 1 条变为 2 条、3 条……则橡皮筋对小车做的功为 W、2W、3W……通过对打点计时器所打纸带的测量计算出每次脱离橡皮筋后小车的速度，最后分析每次做的功与速度变化的关系.

方案二：通过恒力做功的探究

原理：在砝码和小盘总质量 m 远小于小车质量 M 的情况下，可认为小车受到的拉力为 F＝mg.从纸带上读出位移 x，即可以求拉力做的功.

2.数据处理：以拉力对小车做的功 W 为纵坐标，小车获得的速度的平方 v^2 为横坐标，作出 W－v^2 图线，如图，从图线可以得出 W 与 v^2 的关系，从而判断恒力做功与物体动能改变的关系.



3.注意事项

(1)平衡摩擦力很关键，将木板一端垫高，使小车重力沿斜面向下的分力与摩擦力平衡.

(2)在方案一中测小车速度时，纸带上的点应选均匀部分的，也就是选小车做匀速运动的部分.

(3)在方案一中，我们用 2 根、3 根……相同的橡皮筋进行第 2 次、第 3 次……实验时，每次实验时使小车从同一位置由静止释放，使橡皮筋伸长的长度保持一致.

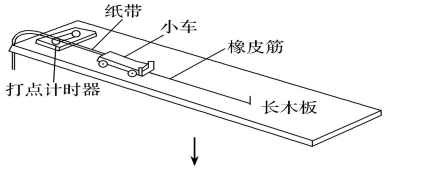
(4)橡皮筋应选规格一样的. 力对小车做的功以一条橡皮筋做的功为单位即可，不必计算出具体数值.

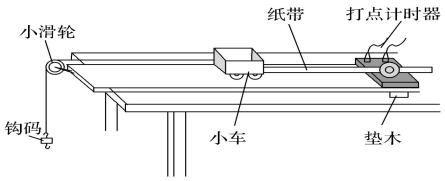
(5)本实验中物体运动速度可以使用速度传感器直接采集，小车受到的外力也可以用拉力传感器采集，也可以把长木板换成气垫导轨.

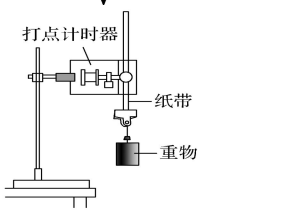
【注意】纸带先加速后匀速，应选择匀速段计算小车的速度。

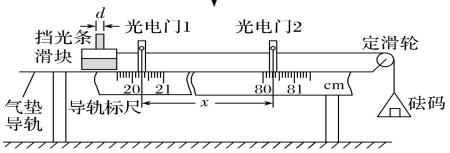
实验拓展创新

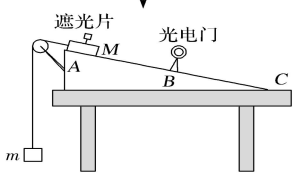
1.装置时代化

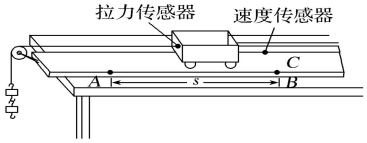












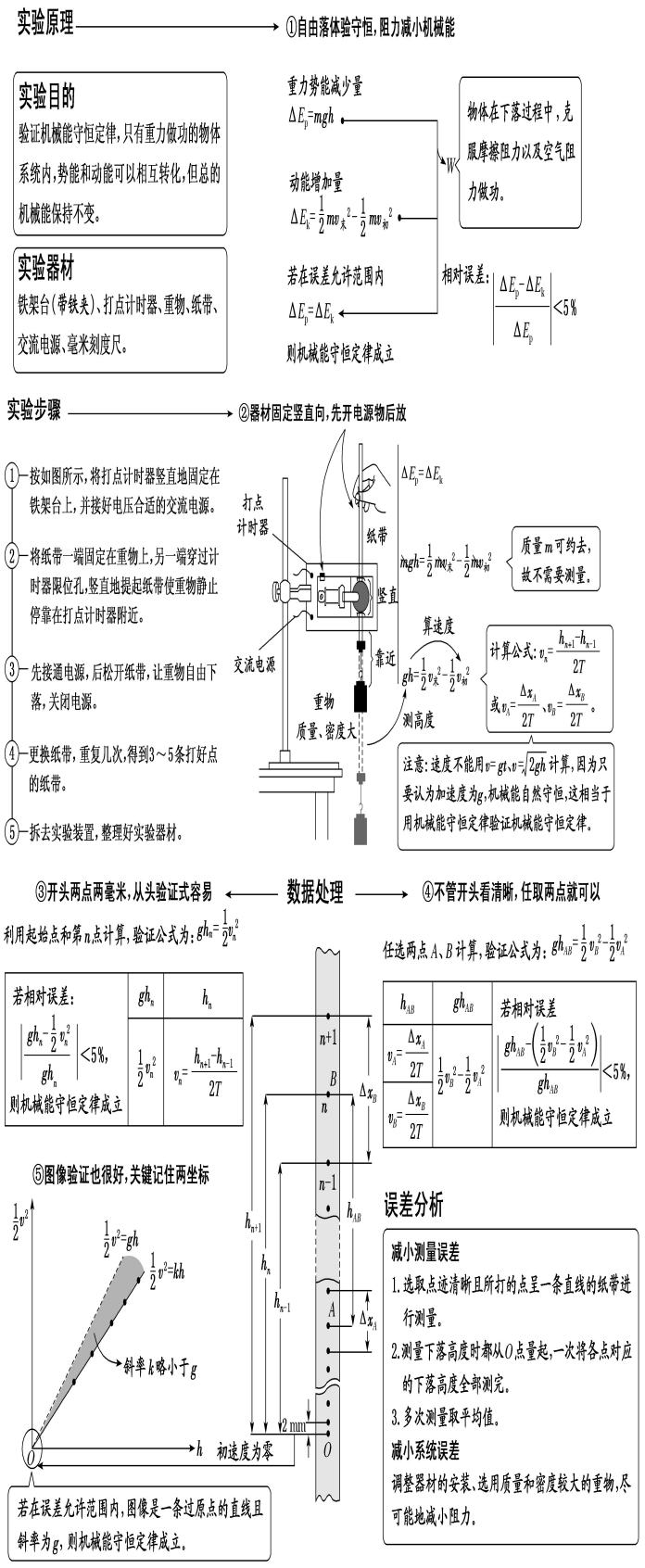
2.求解智能化

(1)摩擦阻力问题：靠小车重力的下滑分力平衡摩擦力→自由下落阻力减少→气垫导轨减少摩擦力。

(2)速度的测量方法：匀速运动速度→测量纸带上各点速度→光电

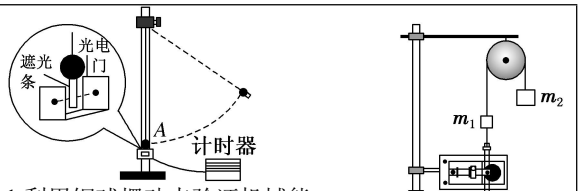
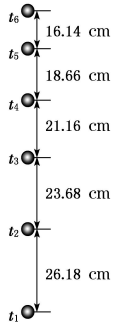
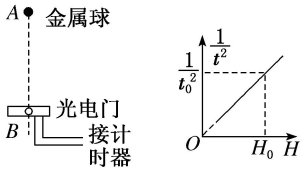
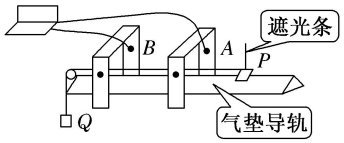
门 $v=\frac{d}{\Delta t}$→速度传感器直接显示速度大小。

实验 2：验证机械能守恒定律



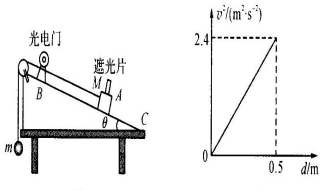
【注意】当纸带上 1-2 两点间距约 2mm 时，说明初速度为 0，且 g 取 9.8m / s²

【实验创新】

实验原理的创新	 1.利用钢球摆动来验证机械能守恒定律。 $mgl(1-\cos\theta)=\frac{1}{2}mv^2$ 2.利用光电门测定摆球的瞬时速度。 3.系统的机械能守恒（需要测量m_1、m_2、h、v） $(m_A-m_B)gh=\frac{1}{2}m_Av^2+\frac{1}{2}m_Bv^2$ $(m_A-m_B)gh=\frac{1}{2}(m_A+m_B)v^2$
实验器材的创新	 1.小球在重力作用下做竖直上抛运动。 2.利用频闪照片获取实验数据。
实验过程的创新	 1.用光电门测定小球下落到 B 点的速度。 2.结合$\frac{1}{t^2}$-H 图线判断小球下落过程中机械能守恒。 3.分析实验误差$\Delta E_p-\Delta E_k$随 H 变化的规律。
实验过程的创新	 1.利用系统机械能守恒代替单个物体的机械能守恒。 2.利用光电门测算滑块的瞬时速度。

【典例 6】

.利用气垫导轨“验证机械能守恒定律”，实验装置如图甲所示，水平桌面上固定着一倾斜的气垫导轨，导轨上 A 点处有一带长方形遮光片的滑块，其总质量为 M，左端由跨过轻质光滑定滑轮的细绳与一质量为 m 的小球相连；遮光片两条长边与导轨垂直，导轨上 B 点有一光电门，可以测量遮光片经过光电门时的挡光时间 t，用 d 表示 A 点到光电门 B 处的距离，b 表示遮光片的宽度，将遮光片通过光电门的平均速度看作滑块通过 B 点时的瞬时速度 v，实验时滑块在 A 处由静止开始运动。



甲　　乙

(1)某次实验测得倾角 $\theta=30°$，重力加速度用 g 表示，滑块从 A 处到达 B 处时 m 和 M 组成的系统动能增加量可表示为 $\Delta E_k=$_____，系统的重力势能减少量可表示为 $\Delta E_p=$_____，在误差允许的

范围内，若 $\Delta E_k=\Delta E_p$，则可认为系统的机械能守恒。(用题中所给字母表示)

(2)按上述实验方法，某同学改变 A、B 间的距离，得到滑块到 B 点时对应的速度，作出 v^2-d 图像如图乙所示，并测得 $M=m$，则重力加速度 $g=$_____ m/s^2。

【答案】(1)$\dfrac{(M+m)b^2}{2t^2}$　$\left(m-\dfrac{M}{2}\right)gd$　(2)9.6m/s²

【本章高频考点】

1.日常生活现象中的做功和功率问题（跳高、跳绳、引体向上、投篮、喷泉、洒水车）。

2.动能定理的综合应用（以弹射器、过山车、高楼逃生等为背景，结合平抛、圆周运动、传送带、弹簧等问题，往往要进行分类讨论，求解最值）。

3.各类小模型（流体模型、等效场模型、速度分解模型）。

4.做功与速度的关系，机械能守恒定律实验（以纸带处理为主）。

第三部分 物理方法概述

一、微元法

所谓“微元法”是指将研究对象分割成若干微小单元，或从研究对象上选取某一“微元”加以分析，从而可以化曲为直，使变量、难以确定的量转化为常量、容易确定的量。微元法在中学物理中的应用大致可分为两类：一是将不能简化为“质点”的物体分解成无数的质点；二是在非均匀变化过程中取极小的一段过程(微元化)，此过程内物体可视为均匀变化，然后进行累积求和。

二、转换法

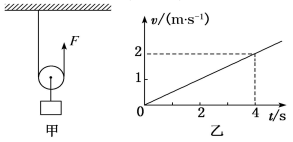
转换思想在物理学科中的应用很广，通常在遇到陌生情境、难以测量或计算的物理量时，要考虑能否将其转换为熟悉情境、容易测量或计算的物理量。

三、等效法

等效法是常用的科学思维方法，就是在保证效果相同的前提下，将陌生的、复杂的、难处理的问题等效为熟悉的、容易的、易处理的问题的一种方法。研究链条、液柱等非质点类物体在运动过程中的重力势能变化时，可等效视为物体的一部分从一个位置移动到另一位置，其他部分不动，使问题大大简化。

第四部分 易错、疑难问题选

1.如图甲所示，滑轮质量、摩擦均不计，质量为 2 kg 的物体在拉力 F 作用下由静止开始向上做匀加速运动，其速度随时间的变化关系如图乙所示，由此可知(　　)

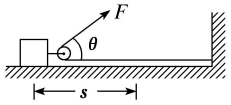


A．物体加速度大小为 2 m/s²　　B．F 的大小为 21 N

C．4 s 末 F 的功率为 42 W　　D．4 s 内 F 的平均功率为 42 W

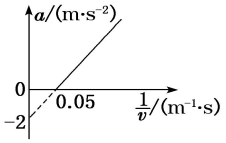
【答案】C

2.一木块前端有一滑轮，轻绳的一端系在右方固定处，水平穿过滑轮，另一端用恒力 F 拉住，保持两股绳之间的夹角θ不变，如图所示。当用力 F 拉绳使木块前进位移 s 时，力 F 做的功(不计滑轮摩擦)是(　　)



【答案】W＝Fs(1＋cos θ)

3.一辆汽车在平直的公路上以某一初速度运动，运动过程中保持恒定的牵引功率，其加速度 a 和速度的倒数$\frac{1}{v}$图像如图所示。若已知汽车的质量，则根据图像所给的信息，不能求出的物理量是(　　)



A．汽车的功率　　B．汽车行驶的最大速度

C．汽车所受到的阻力　　D．汽车运动到最大速度所需的时间

【答案】D

4.2018 年 7 月 1 日，由我国自行研制的全球最长高铁列车 16 节长编组“复兴号”在北京南站正式上线运营.“复兴号”动车组由 16 节车厢组成，其中第 1、2、5、6、9、10、13、14 节车厢为动车，其余为拖车.假设动车组各车厢质量均为 m，每节动车的额定功率均为 P，动车组在水平直轨道上运行过程中阻力与车重成正比(比例系数为 k)，重力加速度为 g.下列说法正确的是(　　)

A.“复兴号”行驶的最大速度 $v=\dfrac{8p}{kmg}$

B.“复兴号”的配置如果改成 12 节动车和 4 节拖车，最大速度将提高到原来的 2 倍

C.“复兴号”进站做匀减速直线运动时，一位乘客单手持手机浏览网页，手对手机的力与车厢运动方向相反

D.“复兴号”做匀加速直线运动时，第 13、14 节车厢间的作用力与第 2、3 节车厢间的作用力之比为 1∶2

【答案】D

5. 质量为 m 的小球在竖直向上的拉力作用下从静止开始运动，其 v-t 图像如图 6-8 所示(竖直向上为正方向，DE 段为直线).已知重力加速度大小为 g，下列说法正确的是(　　)

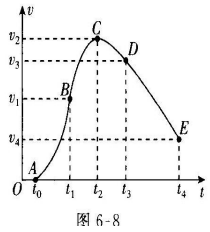


图 6-8

A. $t_3\sim t_4$ 时间内，小球竖直向下做匀减速直线运动

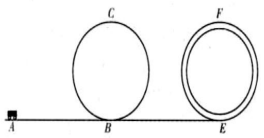
B. $t_0\sim t_2$ 时间内，合力对小球先做正功后做负功

C. $0\sim t_2$ 时间内，小球的平均速度一定为$\dfrac{v_2}{2}$

D. $t_3\sim t_4$ 时间内，拉力做的功为$\dfrac{m(v_3+v_4)}{2}[(v_4-v_3)+g(t_4-t_3)]$

【答案】D

6. 如图所示，质量为 0.1kg 的电动小车（视为质点）在 A 点以恒定功率启动，并驶上足够长的水平轨道 AB，经过一定时间后关闭电动机，然后冲上半径为 0.32 m 的圆环，恰好经过圆环最高点 C。回到圆环最低点 B 后，又沿水平轨道 BE 进入半径也为 0.32 m 的圆管最低点 E(管的尺寸忽略不计)，已知 BE 长为 1 m，小车在 AB、BE 段所受阻力为小车重力的$\dfrac{1}{4}$，其余部分阻力均忽略不计，则



A. 小车通过 C 点时对圆环的压力为 mg

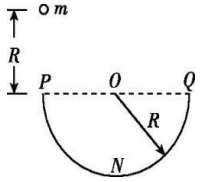
B. 小车能通过圆管的最高点 F

C. 电动小车输出的机械功率不能小于 1 W

D. 若仅把圆环和圆管位置互换，小车仍能通过圆环的最高点 C

【答案】C

7.如图所示，一半径为 R、粗糙程度处处相同的半圆形轨道竖直固定放置，直径 POQ 水平. 一质量为 m 的质点从 P 点正上方高为 R 处由静止开始下落，恰好从 P 点进入轨道.质点滑到轨道最低点 N 时，对轨道的压力为 $4mg$，g 为重力加速度的大小.用 W 表示质点从 P 点运动到 N 点的过程中克服摩擦力所做的功，则(　　)



A.$W=\frac{1}{2}mgR$,质点恰好可以到达 Q 点

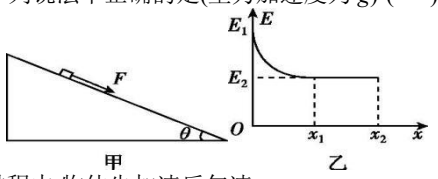
B.$W>\frac{1}{2}mgR$,质点不能到达 Q 点

C.$W=\frac{1}{2}mgR$,质点到达 Q 点后,继续上升一段距离

D.$W<\frac{1}{2}mgR$,质点到达 Q 点后,继续上升一段距离

【答案】C

8.如图甲所示,在倾角为θ的粗糙斜面上,有一个质量为 m 的物体在沿斜面方向的力 F 的作用下由静止开始向下运动,物体与斜面间的动摩擦因数为μ,物体的机械能 E 随位移 x 的变化规律如图乙所示,其中 0~x_1 过程的图线是曲线,x_1~x_2 过程的图线为平行于 x 轴的直线.下列说法中正确的是(重力加速度为 g) (　　)



A.在 0~x_2 过程中,物体先加速后匀速

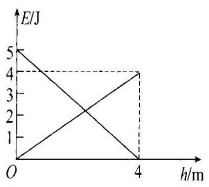
B.在 0~x_1 过程中,物体的加速度一直减小

C.在 x_1~x_2 过程中,物体的加速度为 $g\sin\theta$

D.在 0~x_2 过程中,拉力 F 做的功为 $W_F=E_1-E_2+\mu mgx_2$

【答案】C

9.将小球以某一初速度从地面竖直向上抛出,取地面为零势能参考平面,小球在上升过程中的动能 E_k、重力势能 E_p 与上升高度 h 间的关系如图所示.取 $g=10\ m/s^2$,下列说法正确的是　　(　　)



A.小球的质量为 0.2 kg

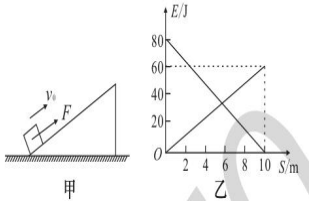
B.小球受到的阻力大小为 0.2 N

C.小球上升到 2 m 时,动能与重力势能之差为 0.5 J

D.小球动能与重力势能相等时的高度为$\frac{25}{9}$ m

【答案】C

10.可视为质点的小滑块 m 受到沿斜面向上的 F=2N 的恒力作用，从倾角 37^0 固定斜面底端以初速度 v_0 向上运动，如图甲所示，斜面足够长，取底端处为零势能参考平面，小滑块在上升过程中的动能 E_k、重力势能 E_P 与沿斜面上升的距离 S 间的关系如图乙所示，取 $g=10m/s^2$。下列说法正确的是(　　)



A. 滑块的质量为 m=0.6kg

B. 滑块与斜面间的摩擦因数为 μ=0.5

C. 滑块到达最高点后将沿斜面返回底端

D. 当 S=6m 时滑块动能与势能相等

【答案】B

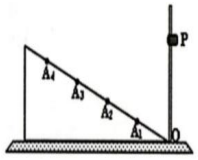
11. 如图所示为一游戏弹射装置，足够长的竖直细杆上有一高度可调节的弹珠发射器 P（可视为质点），细杆和有特定靶位 A_1、A_2、A_3、A_4……的足够长的斜面固定在同一水平底座上，细杆下端 O 与斜面底端重合，O、A_1、A_2、A_3、A_4……相邻两点间距离均相等。设弹珠水平发射后垂直击中斜面上的靶位才算有效击中。先调节 P 的位置和水平发射速度最终以动能 E_k 有效击中靶位 A_2，则在另一次游戏中弹珠有效击中靶位 A_3 时的动能为

A. $1.5E_k$

B. $2.25E_k$

C. $3E_k$

D. $4.5E_k$



【答案】A

12 如图 1 为某体校的铅球训练装置，图 2 是示意图，假设运动员以 6m/s 速度将铅球从倾角为 30° 的轨道底端推出，当铅球向上滑到某一位置时，其动能减少了 72J，机械能减少了 12J，已知铅球（包括其中的上挂设备）质量为 8kg，滑动过程中摩擦阻力大小恒定，重力加速度取 $10m/s^2$。则下列判断正确的是


图 1

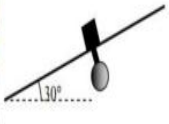


图 2

A. 铅球上滑过程中减少的动能全部转化为重力势能

B. 铅球下滑过程的加速度大小为 $4m/s^2$

C. 铅球返回底端时的动能为 120J

D. 运动员每推一次消耗的能量至少为 48J

【答案】B

13. 某商场安装了一台倾角为 30° 的自动扶梯，该扶梯在电压为 380 V 的电动机带动下以 0.4 m/s 的恒定速率向斜上方移动，电动机的最大输出功率为 4.9 kW. 不载人时测得电动机中的电流为 5 A，若载人时扶梯的移动速率与不载人时相同，忽略电动机内阻的热损耗，假设每个人的质量均为 60 kg，则这台自动扶梯可同时乘载的最多人数为　　(　　)



A. 12 人　　B. 25 人

C. 30 人　　D. 40 人

【答案】B

14. 将三个木板 1、2、3 固定在墙角，木板与墙壁和地面构成了三个不同的三角形，如图 7-10 所示，其中 1 与 2 底边相同，2 与 3 高度相同. 现将一个可以视为质点的物块分别从三个木板的顶端由静止释放，并沿木板下滑到底端，物块与木板之间的动摩擦因数 μ 均相同. 在这三个过程中，下列说法不正确的是　　(　　)

A. 沿着 1 和 2 下滑到底端时，物块的速率不同；沿着 2 和 3 下滑到底端时，物块的速率相同

B. 沿着 1 下滑到底端时，物块的速度最大

C. 物块沿着 3 下滑到底端的过程中，产生的热量是最多的

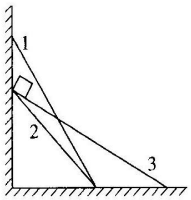
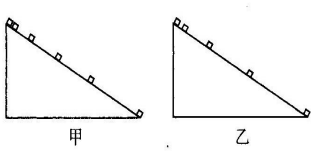


图 7-10

D. 物块沿着 1 和 2 下滑到底端的过程中，产生的热量是一样多的

【答案】A

15.滑块第一次从粗糙斜面顶端由静止下滑到底端，第二次以一定的初速度从斜面底端上滑刚好到达顶端。如图甲、乙所示，小王同学记录了滑块运动的频闪照片，若照片的时间间隔都相同，下列说法正确的是（　　）


甲　　乙

A. 图甲是滑块上滑的照片

B. 滑块下滑时的加速度大于上滑时的加速度

C. 滑块下滑到底端时的速度大于刚开始上滑时的初速度

D. 滑块下滑过程中克服摩擦力做功的平均功率小于上滑过程中克服摩擦力做功的平均功率

【答案】D

16.为了更好地利用自然资源，某地区利用风力发电为当地生活生产提供电能，如图所示. 已知该地区的风速约为 10 m/s，空气的密度约为 1.3 kg/m³. 若使风力发电机转动的风通过的截面积约为 400 m²，且风能的 25%可转化为电能，则发电功率约为（　　）

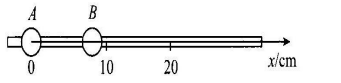


A. 6.5×10^4 W　　B. 1.3×10^5 W

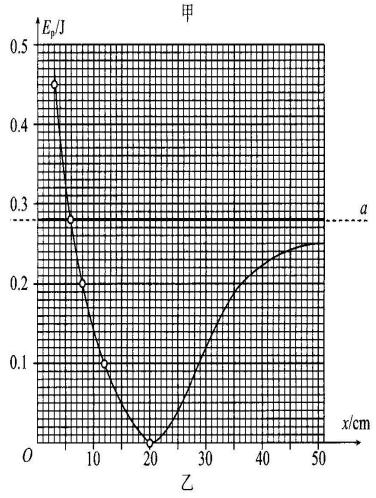
C. 2.6×10^5 W　　D. 1.04×10^6 W

【答案】A

17.用特殊材料做成的、质量均为 m=0.4kg 的 A、B 两球，套在一根水平光滑直杆上，并将 A 球固定. 以 A 的位置为坐标原点，杆的位置为 x 轴，建立坐标系，如图甲所示. 两球间存在沿 x 轴的作用力，且大小随间距的变化而变化. 两球之间因受到相互作用力而具有一定的势能，若其间的作用力做正功则势能减少，做负功则势能增加. 根据这一规律，测出了其间的势能随位置坐标 x 的变化规律，如图乙所示. 其中图线最低点的横坐标 $x=20$ cm，图线右端的渐近线为虚线 a（对应 0.28 J）. 运动中不考虑其他阻力的影响，杆足够长，以下说法错误的是（　　）



甲



乙

A. 将小球 B 从 $x=8$ cm 处由静止释放后，它开始向 x 轴正方向运动

B. 将小球 B 从 $x=8$ cm 处由静止释放后，它在运动中能达到的最大速度为 1 m/s

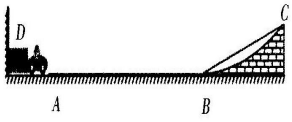
C. 将小球 B 从 $x=4$ cm 处由静止释放后，它不可能第二次经过 $x=20$ cm 的位置

D. 将小球 B 从 $x=12$ cm 处由静止释放后，它仅有一次经过 $x=20$ cm 的位置

【答案】D

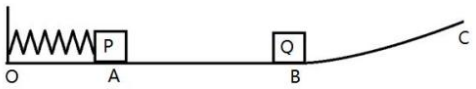
18.如图所示为某一游戏的局部简化示意图。D 为弹射装置，AB 是长为 21m 的水平轨道，倾斜直轨道 BC 固定在竖直放置的半径为 R=10m 的圆形支架上，B 为圆形的最低点，轨道 AB 与 BC 平滑连接，且在同一竖直平面内。某次游戏中，无动力小车在弹射装置 D 的作用下，以 v_0=10m/s 的速度滑上轨道 AB，并恰好能冲到轨道 BC 的最高点。已知小车在轨道 AB 上受到的摩擦力为其重量的 0.2 倍，轨道 BC 光滑，则小车从 A 到 C 的运动时间是（　　）

A. 5s　　B. 4.8s　　C. 4.4s　　D. 3s



【答案】A

19.轨道 OABC 是由光滑直轨道 OB 与一段半径 40 米的圆弧 BC 在 B 点相切而成，将物块 P 紧靠在固定于墙面的弹簧右侧放置在 A 处，A 与 B 相距 16m，此时弹簧处于原长。现用水平推力 F 向左缓慢推物块 P，当 F=32N 时物块稳定后突然撤去力 F，P 离开弹簧后经过一段时间的运动与 Q 发生碰撞，然后 PQ 粘在一起运动刚好到达最高点 C，随后返回。其中 P,Q 均可视为质点且质量均为 1kg，弹簧的劲度系数为 100N/m，弹簧的弹性势能为 $E_p=\frac{1}{2}kx^2$，则从 P 离开弹簧到 P 再次接触弹簧经过的时间约为（　　）



【答案】21. 3s

20. 一半径为 R 的半圆形竖直圆柱面，用轻质不可伸长的细绳连接的 A、B 两球，悬挂在圆柱面边缘两侧，A 球质量为 B 球质量的 2 倍，现将 A 球从圆柱边缘处由静止释放，如图6-38所示，已知 A 球始终不离开圆柱内表面，且细绳足够长，若不计一切摩擦. 求：

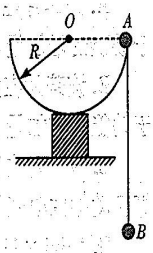


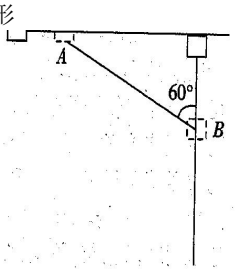
图6-38

(1) A 球沿圆柱内表面滑至最低点时速度的大小.

(2) A 球沿圆柱内表面运动的最大位移.

【答案】（1）$v=2\sqrt{\frac{2-\sqrt{2}}{5}gR}$　　（2）$s=\sqrt{3}R$

21.有一竖直的“T”形架，表面光滑，滑块 A、B 分别套在水平杆与竖直杆上，A、B 用一不可伸长的轻细绳相连，A、B 质量相等，且可看作质点，如图所示，开始时细绳水平伸直，A、B 静止。

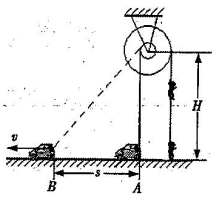


由静止释放 B 后，当细绳与竖直方向的夹角为 60°时，B 沿着竖直杆下滑的速度为 v，则连接 A、B 的绳长为

A. $\frac{4v^2}{g}$　　B. $\frac{3v^2}{g}$　　C. $\frac{3v^2}{4g}$　　D. $\frac{4v^2}{3g}$

【答案】D

22.某摄制组在某大楼外拍摄武打片，要求特技演员从地面飞到房顶. 为此导演在某房顶离地高 $H=8$ m 处架设了轮轴，如图所示，轮和轴的直径之比为 3∶1，特技演员的质量 $m=60$ kg，若轨道车从图



中 A 处前进 $s=6$ m 到 B 处时速度 $v=5$ m/s,人和车可视为质点,轮轴的质量不计,轮轴的大小相对于 H 可忽略,g 取 10 m/s^2. 则在这一过程中

A. 演员上升的高度 $h=5$ m

B. 演员上升的高度 $h=6$ m

C. 钢丝对演员做的功 $W=6\,540$ J

D. 钢丝对演员做的功 $W=6\,030$ J

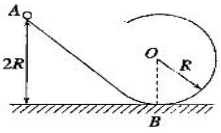
【答案】BD

23.如图所示，光滑斜面的下端与半径为 R 的圆轨道平滑连接。现在使小球从斜面上端距地面高度为 2R 的 A 点由静止滑下，进入圆轨道运动，轨道摩擦不计。求：

（1）小球到达圆轨道最低点 B 时的速度大小；

（2）小球在最低点 B 时对轨道的压力大小；

（3）小球能否到达圆轨道的最高点，若能，求出小球到达最高点的速度；若不能，求小球在某高处脱离圆轨道后能到达的最大高度。



【答案】

(1)小球从 A 运动到 B 的过程中,由机械能守恒定律

$mg\cdot 2R=\frac{1}{2}mv^2$,解得 $v=2\sqrt{gR}$。

(2)在 B 点,由牛顿第二定律得 $F_{NB}-mg=m\frac{v^2}{R}$

解得 $F_{NB}=5\,mg$

由牛顿第三定律知,小球在最低点 B 时对轨道的压力大小为 $5\,mg$。

(3)根据机械能守恒,小球不可能到达圆周最高点,但在圆心以下的圆弧部分速度不等于0,轨道弹力不等于0,小球不会离开轨道。设小球在 C 点(OC 与竖直方向的夹角为 θ)脱离圆轨道,则在 C 点轨道弹力为0,

有 $mg\cos\theta=m\frac{v_C^2}{R}$,

小球从 A 到 C 的过程中,由机械能守恒定律得

$mg\cdot 2R=mgR(1+\cos\theta)+\frac{1}{2}mv_C^2$

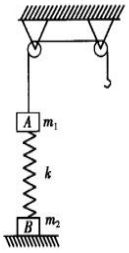
由以上两式得 $\cos\theta=\frac{2}{3}$,$v_C=\sqrt{\frac{2gR}{3}}$

离开 C 点后小球做斜上抛运动,水平分速度为 $v_C\cos\theta$,设小球离开圆轨道后能到达最大高度为 h 的 D 点,则 D 点的速度即水平分速度,大小等于 $v_C\cos\theta$,从 A 到 D 点的过程中由机械能守恒定律得

$mg\cdot 2R=\frac{1}{2}m(v_C\cos\theta)^2+mgh$

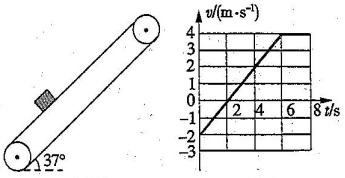
解得 $h=\frac{50}{27}R$。

24.如图所示，质量为 m_1 的物体 A 经一轻质弹簧与下方地面上为 m_2 的物体 B 相连，弹簧的劲度系数为 K，A、B 都处于静止状态。一条不可伸长的轻绳绕过轻质滑轮，一端连物体 A，另一端连一轻挂钩。开始时各段绳都处于伸直状态，A 上方的一段绳沿竖直方向。现在挂钩上挂一质量为 m_3 的物体 C，并从静止状态释放，已知它恰好能使 B 离开地面而但不继续上升。若将 C 换成另一质量为 m_1+m_3 的物体 D，仍从上述初始位置由静止状态释放，则这次 B 刚离地时，D 的速度大小是多少？（已知重力加速度为 g）



【答案】$v=\sqrt{\frac{2m_1(m_1+m_2)g^2}{(2m_1+m_3)k}}$

25.如图甲所示，一倾角为 37^0 的传送带以恒定速度运行。现将一质量 m=1kg 的物体抛上传送带，物体相对地面的速度随时间变化的关系如图乙所示，取沿传送带向上为正方向，g 取 10 m/s^2，则下列说法正确的是（　　）



图甲　　图乙

A. 0～8 s 内物体位移的大小是 18 m

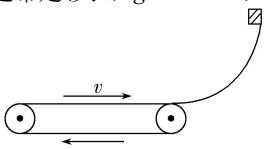
B. 0～8 s 内物体机械能增量是 90 J

C. 0～8 s 内物体机械能增量是 84 J

D. 0～8 s 内物体与传送带摩擦产生的热量是 126 J

【答案】BD

26.如图所示，一水平方向的传送带以恒定的速度 $v=2$ m/s 沿顺时针方向匀速转动，传送带右端固定着一光滑的四分之一圆弧面轨道，并与弧面下端相切。一质量 $m=1$ kg 的物体自圆弧面轨道的最高点静止滑下，圆弧轨道的半径 $R=0.45$ m，物体与传送带之间的动摩擦因数为 $\mu=0.2$，不计物体滑过曲面与传送带交接处时的能量损失，传送带足够长，$g=10$ m/s^2，求：

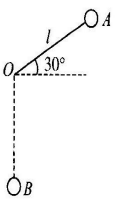


(1)物体从第一次滑上传送带到离开传送带经历的时间；

(2)物体从第一次滑上传送带到离开传送带的过程中，传送带对物体做的功及由于摩擦产生的热量。

【答案】(1)3.125 s　(2)−2.5 J　12.5 J

27.如图所示，用长为 l、不可伸长的轻绳。一端系质量为 m 的小球，另一端固定在 O 处. 把小球拉到轻绳与水平面间夹角为 30°的 A 点静止释放，则小球下落到最低点 B 时轻绳的拉力 F_T 的大小为　　（　　）



A. $F_T=\frac{7}{2}mg$　　B. $F_T=3mg$

C. $F_T=4mg$　　D. $F_T=mg$

【答案】A

28.如图所示是滑块翻越碰撞游戏的示意图.弹射装置将滑块以一定初速度从 A 点弹出,滑块沿粗糙桌面运动,从 B 点进入竖直光滑圆轨道,沿圆轨道运动一周后离开轨道,向桌面边缘的 C 点运动.滑块在 C 点水平抛出,恰好在 D 点沿 DE 方向进入光滑倾斜轨道.固定在轨道底端的弹性板 EF 与轨道垂直,滑块与弹性板碰撞后反弹,碰撞过程中有能量损失.已知可视为质点的滑块质量 $m=0.1$ kg,滑块与桌面间的动摩擦因数 $\mu=0.2$,桌面 AB 和桌面 BC 长度分别为 $x_1=2.25$ m 与 $x_2=1.0$ m,C、D 两点高度差 $h=0.2$ m,轨道的倾角

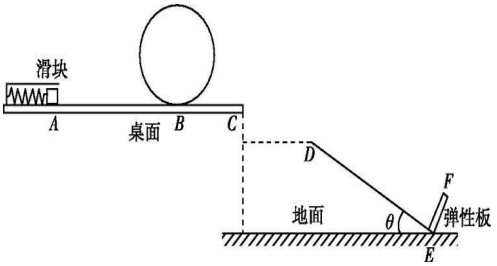
θ=30°,DE 长度 L=0.9 m,每次滑块与弹性板碰撞后速度大小变为碰前的$\frac{3}{5}$,g 取 10 m/s^2.求:

(1)滑块从 C 点运动到 D 点的时间;

(2)滑块在 A 点时的动能大小;

(3)竖直圆轨道的最大半径;

(4)滑块在倾斜轨道上运动的路程.



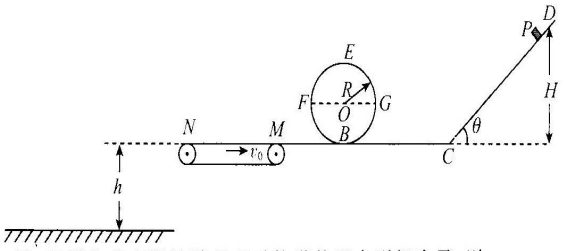
【答案】(1)0.2 s　(2)1.25 J　(3)0.32 m　(4)3.712 5 m

29.（12 分）如图所示，竖直放置的半径为 R=0.2m 的螺旋圆形轨道 $BGEF$ 与水平直轨道 MB 和 BC 平滑连接，倾角为 θ=30°的斜面 CD 在 C 处与直轨道 BC 平滑连接.水平传送带 MN 以 v_0=4 m/s 的速度顺时针方向运动，传送带与水平地面的高度差为 h=0.8 m，MN 间的距离为 L_{MN}=3.0 m，滑块 P 与传送带和 BC 段轨道间的动摩擦因数 μ=0.2，轨道其他部分均光滑.直轨道 BC 长 L_{BC}=1 m，滑块 P 质量为 m=1 kg.

(1)若滑块 P 第一次到达圆轨道与圆心 O 等高的 F 点时，对轨道的压力刚好为零，求滑块 P 从斜面静止下滑处与 BC 轨道高度差 H；

(2)若滑块 P 从斜面高度差 H=1.0 m 处静止下滑，求滑块从 N 点平抛后到落地过程的水平位移；

(3)滑块 P 在运动过程中能二次经过圆轨道最高点 E 点，求滑块 P 从斜面静止下滑的高度差 H 范围.



解:(1)滑块 P 在圆轨道 F 点对轨道的压力刚好为零，则

v_F=0

$mg(H-R)-\mu mgL_{BC}=0$　(2 分)

解得 $H=\mu L_{BC}+R$=0.4 m　(1 分)

(2)当 H=1.0 m 时，设滑块运动到 N 点时的速度为 v_N，从开始到 N 点应用动能定理有

$$mgH-\mu mg(L_{BC}+L_{MN})=\frac{1}{2}mv_N^2-0 \quad (1\text{ 分})$$

解得 v_N=2 m/s

从 N 点滑块做平抛运动，水平位移为

$$x=v_N\sqrt{\frac{2h}{g}}=0.8\text{ m} \quad (2\text{ 分})$$

(3)设滑块 P 在运动过程中恰好能第一次经过 E 点必须具有的高度为 H_1，从开始到 E 点应用动能定理有

$$mgH_1-\mu mgL_{BC}-2mgR=\frac{1}{2}mv_E^2-0 \quad (1\text{ 分})$$

在 E 点时有 $mg=m\frac{v_E^2}{R}$　(1 分)

解得 H_1=0.7 m

滑块滑上传送带时的速度为 v_M

$$mgH_1-\mu mgL_{BC}=\frac{1}{2}mv_M^2-0$$

$v_M=\sqrt{10}$ m/s<4 m/s

滑块做减速运动的位移为 $L=\frac{v_M^2}{2\mu g}$=2.5 m<L_{MN}

因此滑块返回 M 点时的速度也为 $v_M=\sqrt{10}$ m/s，因此能第二次经过 E 点　(1 分)

设高度为 H_2 时，滑块从传送带返回 M 点时的最大速度为

$v=\sqrt{2\mu gL_{MN}}=\sqrt{12}$ m/s　(1 分)

从开始到 M 点应用动能定理有

$$mgH_2-\mu mgL_{BC}=\frac{1}{2}mv^2-0 \quad (1\text{ 分})$$

解得 H_2=0.8 m

二次经过 E 点后，当滑块再次从 B 点滑上圆轨道时在 B 点的速度为 v_B，则有

$$mgH_2-3\mu mgL_{BC}=\frac{1}{2}mv_B^2-0$$

v_B=2 m/s<$\sqrt{10}$ m/s，所以不会第三次过 E 点

则能二次经过 E 点的高度 H 范围是

0.7 m≤H≤0.8 m　(1 分)

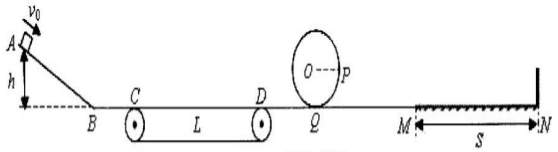
30.（12 分）如图所示，倾斜轨道 AB 与水平直轨道 $BCDQMN$ 在 B 处平滑连接，C、D 间安装着水平传送带，C、D 为两轮切点，间距 L=6m，皮带轮半径 r=0.1m；Q 处安装着半径 R=1m 的竖直光滑圆轨道，在底部 Q 处微微错开；N 处安装着竖直弹性挡板。质量 m=0.1kg 的小滑块由 A 点以初速度 v_0=6m/s 滑下，经传送带和圆轨道后与挡板相撞，撞后原速率弹回。滑块与传送带间的动摩擦因数μ_1=0.2，与 MN 间的动摩擦因数为μ_2=0.4，其余轨道均光滑。已知 A 点离地面高度 h=1.5m，MN 段的长度 s=4.5m，g=10m/s^2，滑块视为质点，空气阻力不计。

(1) 若传送带静止，求滑块经过与圆心 O 等高的 P 点时对轨道的压力；

(2) 若皮带轮以角速度ω_1=20 rad/s 逆时针匀速转动，在滑块经过传送带的过程中，求滑块损失的机械能；

(3) 若皮带轮以角速度ω_2=90 rad/s 顺时针匀速转动，求滑块最后静止时离 M 点的距离；

(4) 在皮带轮顺时针匀速转动的情况下，求滑块在 MN 段内滑行的总路程 x 与角速度ω的关系式。



第 20 题图

(1) A---P 动能定理：$\frac{1}{2}mv_P^2-\frac{1}{2}mv_0^2=mgh-\mu_1 mgL-mgR$　(1 分)

在 P 点：$m\frac{v_P^2}{R}=F_N$　(1 分)

由牛顿第三定律可知：$F_N=F_N'$，　$F_N'=2.2N$　(1 分)

(2) 若皮带轮以角速度ω_1=20 rad/s 逆时针匀速转动时，摩擦力一直对滑块做负功，则

损失的机械能：$\Delta E_{机}=\mu_1 mgL$　(1 分)

所以：$\Delta E_{机}=1.2J$　(1 分)

(3) A---C 机械能守恒：$\frac{1}{2}mv_0^2+mgh=\frac{1}{2}mv_C^2$　得：$v_C=\sqrt{66}m/s$

皮带的线速度 $v=\omega\cdot r_2=9m/s>v_C$

设滑块加速至 9m/s 时，通过位移为 x_1

由 $\frac{1}{2}mv^2-\frac{1}{2}mv_C^2=\mu_1 mgx_1$，得 $x_1=\frac{15}{4}m<L=6m$

所以，滑块先匀加速，后以 v=9m/s 匀速。即 $v_D=v_Q=9m/s$　（1 分）

判断滑块能否过圆轨道最高点：

$\frac{1}{2}mv_Q^2=4.05J>\frac{1}{2}m(\sqrt{Rg})^2+mg\cdot 2R=2.5J$，所以能过最高点。

滑块第 1 次返回到 M 点时，剩余动能为 E_{k1}，由 $E_{K1}-\frac{1}{2}mv_Q^2=-2\mu_2 mgS$

可得：$E_{K1}=0.45J<mgR=1J$；所以滑块只能在 QN 之间来回滑动，不会越过或脱离圆轨道。最终停在 MN 之间的某一位置。设滑埠停止前在 MN 通过的总路程为 x；

滑块由 Q 点至停下位置，动能定理：$0-\frac{1}{2}mv_Q^2=-\mu_2 mgx$　（1 分）

可得：$x=\frac{81}{8}m$；所以滑块停在离 M 点 1.125m 处。　（1 分）

（4）若滑块一直被传送带减速后，到达 D 点的速度为 $v_1=\sqrt{42}m/s$

若滑块一直被传送带加速后，到达 D 点的速度为 $v_2=\sqrt{90}m/s$

滑块要过圆轨道最高点时，需满足：$\frac{1}{2}mv_3^2\geq\frac{1}{2}m(\sqrt{Rg})^2+mg\cdot 2R$，

所以，滑块到达 D 点的速度 $v_3\geq\sqrt{50}m/s$

综上所述，

当 $v_{带}\leq\sqrt{50}m/s$ 时，即 $\omega\leq 10\sqrt{50}\,rad/s$ 时，滑块将脱离轨道，无法计算；

当 $\sqrt{50}m/s\leq v_{带}\leq\sqrt{90}m/s$ 时，即 $10\sqrt{50}\,rad/s\leq\omega\leq 10\sqrt{90}\,rad/s$ 时　（1 分）

由 $\frac{1}{2}m(r\omega)^2=\mu_2 mgx$，得 $x=\frac{\omega^2}{800}$　（1 分）

当 $v_{带}\geq\sqrt{90}m/s$ 时，即 $\omega\geq 10\sqrt{90}\,rad/s$ 时　（1 分）

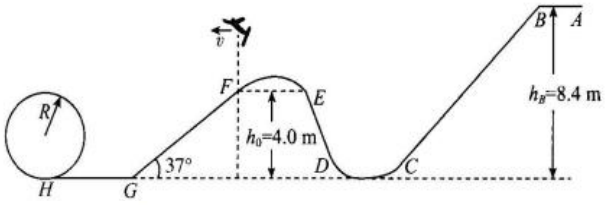
由 $\frac{1}{2}m(\sqrt{90})^2=\mu_2 mgx$，得 $x=\frac{45}{4}m$　（1 分）

31. 如图所示为一自由式滑雪空中技巧比赛场地示意图，比赛场地由出发区 AB、助滑坡 BC、第一过渡区 CD、跳台 DE、第二过渡区 EF、着陆坡 FG 和终点区 GH 组成，在 H 处安置半径为 $R=2.0$ m 的圆形轨道，入、出口靠近但相互错开. 第一过渡区和终点区的最低点在同一水平地面上，出发区距地面的高度 $h_B=8.4$ m，跳台最高点 E 和着陆坡最高点 F 离地面的高度均为 $h_0=4.0$ m，着陆坡坡度为 37°. 运动员从助滑坡顶端 B 由静止滑下，离开跳台在空中完成预定动作后到达 F 点正上方以水平速度 $v=4.0$ m/s 飞出，在落到倾斜雪道 FG 上时，运动员靠改变姿势进行缓冲使自己只保留沿斜面的分速度而不弹起. 假设运动员连同滑雪板的总质量 $m=100$ kg，除缓冲外运动员可视为质点，滑雪板与雪道 GH 的动摩擦因数 $\mu=0.2$，不计其余滑道和空气的阻力，$\sin37°=0.6$，$\cos37°=0.8$，求：

(1) 运动员到达 F 点正上方时离地面的高度 h；

(2) 运动员在倾斜雪道 FG 上滑行的距离；

(3) 若运动员能够不脱离圆形轨道顺利通过最高点，雪道 GH 的最大长度.



20.（1）运动员连同滑雪板从 B 点运动到 F 点正上方过程，根据机械能守恒定律得：

$mgh_B=mgh+\frac{1}{2}mv^2$　2分

$h=h_B-\frac{v^2}{2g}=\left(8.4-\frac{16}{2\times10}\right)m=7.6m$　1分

（2）设运动员落在倾斜雪道 K 点，离地高度为 h_1

根据平抛运动规律得：

$h-h_1=\frac{1}{2}gt^2$　1分

$\frac{h_0-h_1}{\tan37^o}=vt$　1分

代入数据后解得：$h_1=0.4m$ 或 $5.8m$（不合题意）　1分

运动员在倾斜雪道 FG 上滑行的距离 $KG=\frac{h_1}{\sin37^o}=\frac{0.4}{0.6}m\approx0.67m$　1分

（3）运动员落在倾斜雪道 K 点保留沿斜面的速度

$v_K=v\cos37^o+v_y\sin37^o$　1分

$v_y^2=2g(h-h_1)$　1分

代入数据后解得：$v_K=10.4m/s$

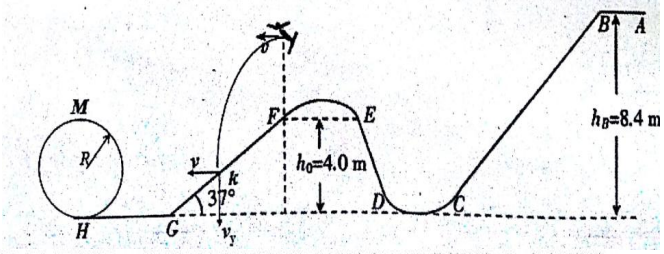
当运动员恰好不脱离圆形轨道通过最高点时，$mg=m\frac{v_M^2}{R}$　1分

从 K 点运动到 M 点过程，根据动能定理得：

$mgh_1-\mu mgl-2mgR=\frac{1}{2}mv_M^2-\frac{1}{2}mv_K^2$　1分

代入数据后解得：$l=4.04m$

运动员不脱离圆形轨道顺利通过最高点，雪道 GH 的最大长度为 4.04m　1 分

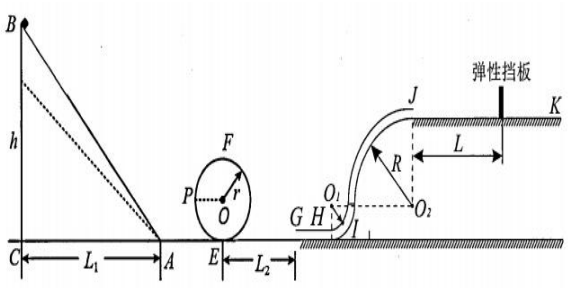


32.（12 分）如图所示，一游戏装置由安装在水平台面上的高度 h 可调的斜轨道 AB、竖直圆轨道（在最低点 E 分别与水平轨道 AE 和 EG 相连）、细圆管道 $GHIJ$（HI 和 IJ 为两段四分之一圆弧）和与 J 相切的水平直轨道 JK 组成。可认为所有轨道均处在同一竖直平面内，连接处均平滑。已知，滑块质量为 m=30g 且可视为质点，竖直圆轨道半径为 r=0.45m，小圆弧管道 HI 和大圆弧管道 IJ 的半径之比为 1:4，L_1=1.5m 不变，L_2=0.5m，滑块与 AB、EG 及 JK 间摩擦因数均为 μ=0.5，其他轨道均光滑，不计空气阻力，忽略管道内外半径差异。现调节 h=2m，滑块从 B 点由静止释放后，贴着轨道恰好能滑上水平直轨道 JK，求

(1) 大圆弧管道 IJ 的半径 R；

(2) 滑块经过竖直圆轨道与圆心 O 等高的 P 点时对轨道的压力 F_1 与运动到圆弧管道最低点 H 时对轨道的压力 F_2 大小之比；

(3) 若在水平轨道 JK 上某一位置固定一弹性挡板，当滑块与之发生弹性碰撞后能以原速率返回，若第一次返回时滑块不脱轨就算游戏闯关成功。调节斜轨道的高度为 h=3m，仍让滑块从 B 点由静止滑下，问弹性挡板与 J 的间距 L 满足什么条件时游戏能闯关成功。



（1）解：恰好通过管道进入水平轨道，则 $v_J=0$，（1 分）

滑块从 B 到 J 点过程中，运用动能定理得

$$mgh-\mu mg(L_1+L_2)-mg\frac{5}{4}R=0 \quad (1\text{ 分})$$

解得 $R=0.8\text{m}$ （1 分）

（2）滑块从 B 到 P 点过程中由动能定理得

$$mgh-\mu mgL_1-mgr=\frac{1}{2}mv_P^2-0$$

在 P 点，由向心力公式得

$$F_1=\frac{mv_P^2}{r}=\frac{32}{9}mg \quad (2\text{ 分})$$

滑块从点 H 至 J 点，由动能定理得

$$-mg\frac{5R}{4}=0-\frac{1}{2}mv_H^2$$

在 H 点，由向心力公式得

$$F_2-mg=\frac{mv_H^2}{\frac{R}{4}}$$

$F_2=11mg$ （2 分）

由牛顿第三定律得，滑块对这两处的压力比为：

$$\frac{F_1}{F_2}=\frac{32}{99} \quad (1\text{ 分})$$

（3）当 h=3m 时，物块从释放到达 J 时的速度为

$$mgh-\mu mg(L_1+L_2)-mg\frac{5R}{4}=\frac{1}{2}mv_J^2-0$$

$v_J=2\sqrt{5}m/s$ （1 分）

i：物块能够与弹簧挡片发生碰撞且反弹后无法进入 JI 轨道

$2\mu gL\le v_J^2\le 2\mu g\times 2L$

$1m\le L\le 2m$ （1 分）

ii：物块经反弹后通过圆弧轨道恰能到达 P 点

$$-\mu mg\times 2L+mg\frac{5R}{4}-\mu mgL_2-mgr=0-\frac{1}{2}mv_J^2$$

L=1.3m(舍)，因为物块已经在水平面 JK 上停止，

从 J 点无初速度下滑可证物块一定会超过 P 点 （1 分）

iii：物块反弹后恰能通过圆周最高点 F

$$-\mu mg\times 2L+mg\frac{5R}{4}-\mu mgL_2-mg2r=\frac{1}{2}mv_F^2-\frac{1}{2}mv_J^2$$

$$mg=m\frac{v_F^2}{r}$$

得 $L=0.625m$ 即 $L\le 0.625m$ 时能过最高点 F （1 分）

综上所述，当弹性挡板与 J 的间距 L 满足 $L\le 0.625m$ 或 $1m\le L\le 2m$ 时游戏能闯关成功。

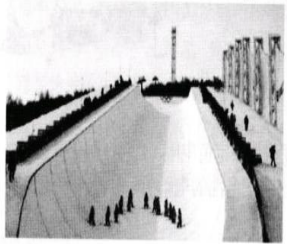
33. （12 分）我国选手谷爱凌在北京冬奥会自由式滑雪女子 U 型场地技巧决赛中夺得金牌

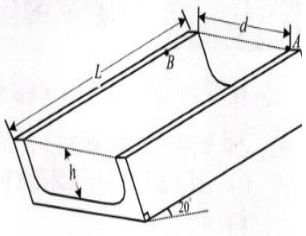
图所示，某比赛用 U 型池场地长度 L=160m、宽度 d=20m、深度 h=7.25m，两边竖直与池底平面雪道通过圆弧雪道连接组成，横截面像“U”字形状，池底雪道平面与水平角为 θ=20°。为测试赛道，将一质量 m=1kg 的小滑块从 U 型池的顶端 A 点以初 $v_0=\sqrt{0.7}$ m/s 滑入；滑块从 B 点第一次冲去 U 型池，冲出 B 点的速度 v_B=10m/s，与竖向夹角为 α（α未知），再从 C 点重新落回 U 型池（C 点图中未画出）。已知 A、B 两直线距离为 25m，不计滑块所受的空气阻力，sin20°=0.34，cos20°=0.94，tan20°=0.36

（1）A 点至 B 点过程中，求小滑块克服雪道阻力所做的功 W_f；

（2）忽略雪道对滑块的阻力，若滑块从池底平面雪道离开，求滑块离开时速度 v 的大

（3）若保持 v_B 大小不变，调整速度 v_B 与竖直方向的夹角为 α_0 时，滑块从冲出 B 点至落回 U 型池的时间最长，求 $\tan\alpha_0$。





0．（12分） (1) A、B高度差 $h_{AB}=\sqrt{l_{AB}^2-d^2}\sin 20^\circ=5.1\text{m}$ (1分)

（求高度差的关系式 $h_{AB}=\sqrt{l_{AB}^2-d^2}\sin 20^\circ$ 写对也给1分）

对小滑块从A至B由动能定理: $mgh_{AB}-W_f=\frac{1}{2}mv_B^2-\frac{1}{2}mv_0^2$ (2分)

（动能定理 写成 能量守恒 $mgh_{AB}=\frac{1}{2}mv_B^2-\frac{1}{2}mv_0^2+Q_f$ 也给2分）

得: $W_f=1.35\text{J}$ (1分)

(2) A与池底平面雪道高度差: $h_{池}=L\sin 20^\circ+h\cos 20^\circ=61.215\text{m}$ (1分)

（求高度差的关系式 $h_{池}=L\sin 20^\circ+h\cos 20^\circ$ 写对也给1分）

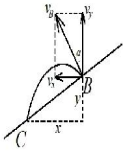
对小滑块从A至离开平面雪道: $mgh_{池}=\frac{1}{2}mv^2-\frac{1}{2}mv_0^2$ (1分)

得: $v=35\text{m/s}$ (1分)

(3) 从B到C小滑块做斜抛运动，全段法得:

$x=v_B\sin a_0 t$ (1分)

$y=-v_B\cos a_0 t+\frac{1}{2}gt^2$ (1分)



（分段列出斜抛的运动分解公式也给1分）

由 $\tan 20^\circ=\frac{y}{x}=\frac{-v_B\cos a_0 t+\frac{1}{2}gt^2}{v_B\sin a_0 t}$ (1分)

（写出关系式 $\tan 20^\circ=\frac{y}{x}$ 也得1分）

得: $t=\frac{3.6\sin a_0+10\cos a_0}{5}=\frac{\sqrt{3.6^2+10^2}\sin(a_0+j)}{5}$ (1分)

其中 $\tan j=\frac{10}{3.6}$

取最大值时，$\tan a_0=0.36$ (1分)

注：以上各步用其他方法解题的，只要合理，得同样的分。

$$\frac{n_1}{n_2}=\frac{1}{3}$$

⑥ (2分)

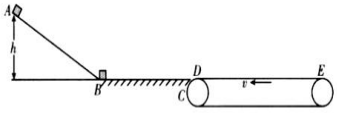
（得出 $\frac{n_1}{n_2}=\frac{1}{3}$ 直接给2分，没有结果按照 ④、⑤结果分步骤给分，总分2分）

34. (12 分)如图所示，高 $h=1$ m 的光滑斜面 AB 与长 $L_1=1.6$ m 的水平面 BC 平滑连接，再与长 $L_2=10$ m 的水平传送带 DE 紧密连接，传送带恒以 $v=8$ m/s 的速度逆时针匀速转动。位于斜面顶端 A 处质量为 $m=1$ kg 的物体 P(视为质点)以初动能 $E_{k0}=62$ J 沿斜面向下运动，在 B 处撞击质量同为 $m=1$ kg 的静止物体 Q(视为质点)，碰撞以后两物体粘合在一起，已知粘合体与水平面 BC、传送带 DE 的动摩擦因数均为 $\mu=0.5$，视最大静摩擦力等于滑动摩擦力。则：

(1)求碰撞以后粘合体的速度大小；

(2)求粘合体最终静止时与 B 点的距离；

(3)要使粘合体最终能静止在粗糙水平面 BC 段，求 A 处给物体 P 初动能可能值中的最大值。



第 20 题图

(12 分)解：

(1)A 到 B　$mgh+E_{k0}=\frac{1}{2}mv_1^2$　1 分

$v_1=12$ m/s　1 分

P、Q 碰撞动量守恒：$mv_1=2mv_2$　1 分

$v_2=6$ m/s　1 分

(2)$\frac{1}{2}\times 2mv_2^2=\mu 2mgx$　1 分

$x=3.6$ m　1 分

所以物体最终静止在距离 B 点 0.4 m 处位置　1 分

(3)若物体到达斜面顶端的 A，则物体经传送带返回的速度为 v

$\frac{1}{2}\times 2mv^2=2mgh+\mu 2mgx_{BC}$

$v=6$ m/s　1 分

$2ax'=v^2$　$x'=3.6$ m <10 m　没有从右侧滑出　1 分

B 到 C　$\frac{1}{2}\times 2mv^2+\mu 2mgx_{BC}=\frac{1}{2}\times 2mv_2^2$

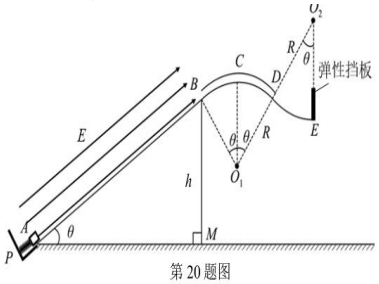
$v_2=\sqrt{52}$ m/s　1 分

碰撞前速度 $v_1=2\sqrt{52}$ m/s　1 分

A 到 B　$mgh+E_{k0}=\frac{1}{2}mv_1^2$

$E_{k0}=94$ J　1 分

35.（12 分）如图所示，在竖直平面内，某一游戏轨道由直轨道 AB、光滑圆弧细管道 BCD 和光滑圆弧轨道 DE 平滑连接组成，两段圆弧半径相等 $R=0.5$m，B、D 等高，图中 θ 角均为 37°，AB 与圆弧相切，AM 水平。直轨道 AB 上方有与 AB 相平行的匀强电场 $E=10^8$N/C，且电场只分布在 AB 之间。直轨道 AB 底端装有弹射系统



第 20 题图

（弹簧长度很短，长度和质量不计，可以认为滑块从 A 点射出），具有初始弹性势能 $E_p=2.5$J，某次弹射系统将尺寸略小于管道内径的带正电的滑块弹出，冲上直轨道 AB，直轨道 AB 上铺有特殊材料，使滑块与轨道 AB 间的动摩擦因数 μ 大小可调。滑块进入光滑圆轨道后，最后能在 E 点与弹性挡板相互作用后以等速率弹回。已知滑块的质量为 $m=0.1$kg，带电量为 $q=+8.0\times10^{-9}$C，B 点的高度 $h=1.8$m，整个过程中滑块可视为质点，所带电量保持不变，$\sin37°=0.6$，$\cos37°=0.8$。

（1）若调节 AB 间的特殊材料，使其变为光滑，求滑块在最高点 C 点时对轨道的作用力；

（2）现调节 AB 间的动摩擦因数 μ，求滑块首次到达 E 点时的速率 v_E 与 μ 之间的关系式；

（3）若滑块与弹性挡板相碰后最终能静止在轨道 AB 的中点，求动摩擦因数 μ。

解：(1) 由几何关系得：$l=\frac{h}{\sin\theta}=3$m

由 A 点到 C 点的动能定理：$E_P+Eql-mgh-mgR(1-\cos\theta)=\frac{1}{2}mv_C^2$【1 分】

在 C 点根据牛顿运动定律：$F_N+mg=m\frac{v_C^2}{R}$【1 分】

解得：$F_N=11$N【1 分】

牛顿第三定律：$F_N'=F_N=11$N，方向：竖直向上【1 分】

（2）由 A 点到 C 点的动能定理：

$E_P+Eql-mgh+mgR(1-\cos\theta)-\mu mg\cos\theta\cdot l=\frac{1}{2}mv_E^2-0$【1 分】

解得：$v_E=\sqrt{64-48\mu}$(m/s)【1 分】

考虑到滑块需先过 C 点：

$E_P+Eql-mgh-mgR(1-\cos\theta)-\mu mg\cos\theta\cdot l\geq 0$【1 分】

所以：$\mu\leq\frac{5}{4}$

所以：$v_E=\sqrt{64-48\mu}$（且 $\mu\leq\frac{5}{4}$）【1 分】

（3）滑块经多次碰撞，最终在轨道 AB 中点速度减为 0，由动能定理可得：

$E_P+Eq\frac{l}{2}-mg\frac{h}{2}-\mu mg\cos\theta\cdot(\frac{3}{2}l+nl)=0$，其中 $n=0,1,2,3...$【1 分】

解得：$\mu=\frac{7}{3(2n+3)}$，其中 $n=0,1,2,3...$【1 分】

要让滑块在中点能停住：$Eq-mg\sin\theta\leq\mu mg\cos\theta$【1 分】

所以：$\mu\geq\frac{1}{4}$

因此，只有 n=0，1，2，3 时满足条件

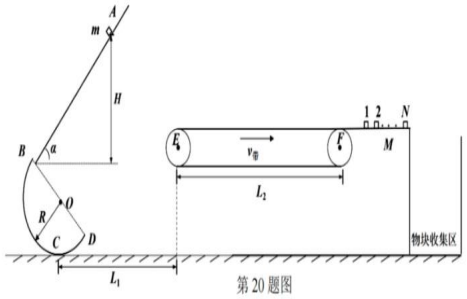
所以动摩擦因数 μ 只能取 $\frac{7}{9},\frac{7}{15},\frac{1}{3},\frac{7}{27}$ 这 4 个值【1 分】

36.(12 分)如图为一游戏装置的示意图，倾角 $\alpha=53^0$ 的轨道 AB 与半径 $R=0.50$m 半圆轨道相切。水平放置的传送带以 $v_{带}=2$m/s 的恒定速度顺时针转动，传送带两端 EF 长 $L_2=3$m，传送带右端与一光滑水平面平滑对接，水平面上依次摆放 N 个完全相同的物块，物块的质量 $M=0.3$kg、且数量 N 足够的多。游戏开始时，让质量为 $m=0.1$kg 的物块 m 从轨道 AB 上由静止滑下，到达轨道最低点 C 时对轨道的压力为 6.8N。物块 m 与轨道 AB 间的动摩擦因数 $\mu_1=0.5$、与传送带间的动摩擦因数 $\mu_2=0.1$。轨道其余部分均光滑。碰撞均为对心弹性碰撞，物块均可视为质点，整个装置处于同一竖直平面内。（$\sin53^0=0.8$，$\cos53^0=0.6$）

(1)求物块 m 到达 C 点时的速度大小 v_C 和从轨道 AB 释放的高度 H；

(2)若物块 m 恰好从传送带左端 E 点沿水平方向落入传送带，求 CE 两点的水平距离 L_1；

(3)求物块 m 在传送带上运动的总时间 $t_{总}$。



第 20 题图

解析：

(1)在 C 点，由牛顿第二定律得

$F_{NC}-mg=m\frac{v_C^2}{R}$　$v_C=\sqrt{29}m/s$　（1 分）

A 运动至 C，由动能定理得

$mg(H+R+R\cos53^0)-\mu mg\cos53^0\frac{H}{\sin53^0}=\frac{1}{2}mv_C^2-0$　$H=1.04$m　（2 分）

(2)C 运动至 D，由动能定理得

$-mg(R-R\cos53^0)=\frac{1}{2}mv_D^2-\frac{1}{2}mv_C^2$　$v_D=5m/s$　（1 分）

在 D 点，

$v_{Dx}=v_D\cos53^0=3m/s$

$v_{Dy}=v_D\sin53^0=4m/s$

$t_{DE}=\frac{v_{Dy}}{g}=0.4s$　（2 分）

$L_1=R\sin53^0+v_{Dx}t_{DE}=1.6m$　（1 分）

(3)$v_E=v_{Dx}=3m/s$

因为 $x_1=\frac{v_{带}^2-v_E^2}{-2\mu g}=2.5m<L_2=3.0m$，所以物块 m 从 E 运动到 F 先减速后匀速，

传送带上运动时间 $t_0=\frac{v_{带}-v_E}{-\mu g}+\frac{L_2-x_1}{v_{带}}=1.25s$

到达传送带右端速度 $v_0=v_{带}=2m/s$ （1分）

因为物块1、2、3...、N中任意相邻两物块间碰撞时均发生速度交换，所以物块m每次从传送带返回到右边水平面上与物块1碰撞前，物块1的速度均为零。设物块m第n次与物块1碰前的速度为v_{n-1}，碰后速度为v_n，物块1碰后的速度为v_n'，由动量守恒和能量守恒得

$$mv_{n-1}=mv_n+Mv_n'$$
$$\frac{1}{2}mv_{n-1}^2=\frac{1}{2}mv_n^2+\frac{1}{2}Mv_n'^2$$

由以上两式得 $v_n=-\frac{1}{2}v_{n-1}$　　$v_1=-\frac{1}{2}v_0=-1m/s$ （1分）

所以，$\frac{|v_n|}{|v_{n-1}|}=\frac{1}{2}$

因为 $x_2=\frac{-v_1^2}{-2\mu g}=0.5m<L_2=3.0m$，所以物块$m$在传送带上先向左减速后反向加速回到水平面上，物块$m$第一次与物块1碰撞后到第二次与物块1碰撞前在传送带上运动时间

$t_1=2\frac{|v_1|}{\mu g}=2s$， （1分）

同理 $t_{n-1}=2\frac{|v_{n-1}|}{\mu g}$，$t_n=2\frac{|v_n|}{\mu g}$，所以 $\frac{t_n}{t_{n-1}}=\frac{|v_n|}{|v_{n-1}|}=\frac{1}{2}$

所以 $t=\frac{2\times\left[1-(\frac{1}{2})^n\right]}{1-\frac{1}{2}}$，当$n\to+\infty$时，$t=4s$ （1分）

所以物块m在传送带上运动的总时间为 $t_{总}=t_0+t=5.25s$ （1分）

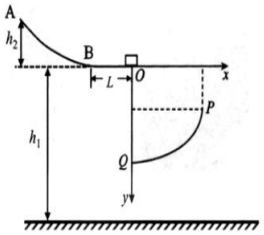
3637. （12分）如图所示，BO是长为L的平直导轨，物块与导轨间动摩擦因数为μ，AB为光滑弧形轨道，与平直导轨平滑连接。B与地面间高度差为h_1，AB间高度差为h_2，以平直轨道末端O点为坐标原点，建立平面直角坐标系xOy，x轴的正方向水平向右，y轴的正方向竖直向下，已知重力加速度为g。

（1）若一质量为m的物块在水平恒力作用下从O点静止开始向左运动，到达B点时撤去恒力，物块经过A点向左抛出后落地。

①若物体落地动能为E_1，求经过B点的动能E_{KB}；

②若要物块落地时动能小于E_1，求恒力必须满足的条件；

（2）若滑块m从光滑曲面上不同位置由静止开始下滑，经过O点落到弧形轨道PQ上的动能均相同，弧形轨道P端坐标为（2L，L），Q端在y轴上，求PQ的曲线方程。



（1）①从B到落地过程中机械能守恒，设地面为零势能面，则

$mgh_1+E_{KB}=E_1$　1分

得 $E_{KB}=E_1-mgh_1$　1分

②整个过程中根据动能定理得：$F_{max}L-\mu mgL+mgh_1=E_1$　1分

$F_{max}=(E_1+\mu mgL-mgh_1)/L$　1分

若物体恰能达到B点，根据动能定理得：$F_{min}L-\mu mgL-mgh_2=0$　1分

$F_{min}=(\mu mgL+mgh_2)/L$

综上所述可得：$(\mu mgL+mgh_2)/L<F<(E_1+\mu mgL-mgh_1)/L$　1分

（2）物块从O点飞出后做平抛运动，设飞出的初速度为v_0，落在弧形轨道上的坐标为(x,y)，将平抛运动分别分解到水平方向的匀速直线运动和竖直方向的自由落体运动，有

$x=v_0t$，$y=\frac{1}{2}gt^2$　1分

联立解得水平初速度为

$v_0^2=\frac{gx^2}{2y}$　1分

物块A从O点到轨道上落点，根据动能定理可知

$mgy=E_k-\frac{1}{2}mv_0^2$　1分

解得落点处动能为

$E_k=mgy+\frac{1}{2}mv_0^2=mgy+\frac{mgx^2}{4y}$　1分

因为物块A从O点到弧形轨道上动能均相同，将落点$P(2L,L)$的坐标代入，可得

$E_k=mgy+\frac{mgx^2}{4y}=mg\times L+\frac{mg(2L)^2}{4\times L}=2mgL$　1分

化简可得 $y+\frac{x^2}{4y}=2L$

即 $x=2\sqrt{2Ly-y^2}$（其中，$L\le y\le 2L$）　1分

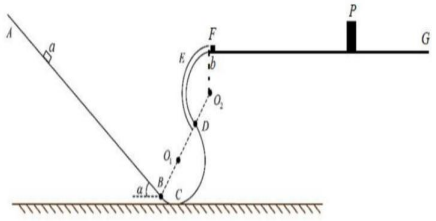
曲线方程形式可以不同，$L\le y\le 2L$　范围没写不得分

38. （12分）如图所示，处于竖直平面内的一探究装置，由倾角$\alpha=60^0$的光滑直轨道AB、圆心为O_1的半圆形光滑轨道BCD、圆心为O_2圆心角为120^0的光滑细圆管轨道DEF、水平粗糙直轨道FG组成，B、D和F为轨道间的相切点，弹性板P可垂直轨道固定在轨道FG上任意位置。已知可视为质点的滑块a的质量m_a=0.3kg，滑块b的质量m_b=0.1kg，轨道BCD和DEF的半径R=0.3m，两滑块与轨道FG间的动摩擦因数μ均为0.45，滑块与弹性板P作用后，以等大速度弹回。现将滑块b静止放在水平轨道FG的左端点F右侧靠近管口处，将滑块a从轨道AB上距B点的长度$l=\frac{4\sqrt{3}}{5}$m处静止释放。

（1）求滑块a运动到圆弧轨道BCD的到最低C的时速度大小；

（2）求滑块a运动到达圆形轨道DEF最高F点时（此时还未与b相碰）对轨道的作用力；

（3）在确保a与b只发生一次弹性碰撞的前提下，求a、b两滑块均静止时相距的距离s和挡板P距F点距离d之间的关系。



第20题图

（1）滑块a运动到最低C点的过程中

A到B　$\frac{1}{2}m_av_B^2-0=m_agl\sin 60^0$　（1分）

B到C　$\frac{1}{2}m_av_C^2-\frac{1}{2}m_av_B^2=m_agR(1-\cos 60^0)$　（1分）

得：$v_C=3\sqrt{3}m/s$　（1分）

（2）C到F过程中：$\frac{1}{2}m_av_F^2-\frac{1}{2}m_av_C^2=m_agR(2+2\cos 60^0)$　（1分）

在F点：$F+m_ag=\frac{m_av_F^2}{R}$　（1分）

根据牛顿第三定律可知，滑块a对轨道的作用力大小为6N方向向上　（1分）

（3）a与b发生弹性碰撞有：$m_av_F=m_av_a+m_bv_b$　（1分）

$\frac{1}{2}m_av_F^2=\frac{1}{2}m_av_a^2+\frac{1}{2}m_bv_b^2$　（1分）

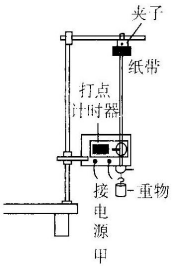
碰后a运动的总路程为$x_a=\frac{v_a^2}{2ug}=0.25m$　（1分）

碰后a运动的总路程为$x_b=\frac{v_b^2}{2ug}=2.25m$　（1分）

当$d\ge x_b$=2.25m时，$s=x_b-x_a$=2.00m　（1分）

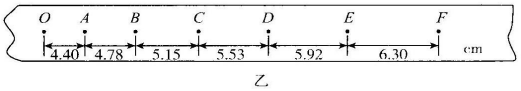
当1.25m<d<2.25m时，$s=2d-2.25-0.25=2d-2.5$(m)　（1分）

39.某同学用如图甲装置来测定当地的重力加速度，进行了如下几个操作：



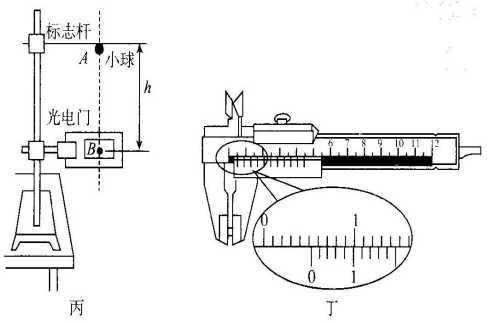
（1）按图示的装置安装器件；把电磁打点计时器接线端连接到周期T=0.02 s的低压交流电源上；

（2）先接通电源，再松开夹子，打出了一条如图乙所示的纸带.由纸带上的数据可得C点的速度v_C=_____ m/s（结果保留三位有效数字），重物下落的加速度$g_{测}$=_____ m/s^2（结果保留两位有效数字）；



乙

(3)进一步分析，发现本实验存在较大误差，为此对实验进行了改进，如图丙所示，让小球的顶端紧靠标志杆处的 A 点自由下落，下落过程中经过光电门 B 时，通过与之相连的毫秒计时器（图中未画出）记录挡光时间 t，用毫米刻度尺测出 A、B 之间的距离 h，用游标卡尺（如图丁）测得小球的直径 d=_____ mm. 若测得的重力加速度值大于当地的重力加速度值，试分析造成此结果的原因可能是_____.



A. 小球受到空气阻力的作用

B. 小球下落过程中球心偏离了光电门

C. 小球直径过大

D. 用 h 替代 $(h-\frac{d}{2})$ 进行计算

【答案】（2）2.67　　9.5（或 9.6）　（3）5.04　　B

第九章　静电场及其应用

第一部分 基础知识点

第 1 节　电荷

一、电荷

1.电荷的种类及相互作用

(1)自然界中只有两种电荷：正电荷和负电荷.

正电荷：丝绸摩擦玻璃棒，玻璃棒带正电荷；

负电荷：毛皮摩擦橡胶棒，橡胶棒带负电荷。

命名者：命名正、负电荷的科学家是富兰克林。

【注意】带电体能吸引轻小物体.

(2)电荷间的相互作用：同种电荷相互排斥，异种电荷相互吸引.

2.三种起电方式：

项目	摩擦起电	感应起电	接触起电
产生条件	两个不同绝缘体摩擦	导体靠近带电体时	导体与带电体接触时
现象	两物体带上等量异种电荷	导体两端出现等量异种电荷	导体带上与带电体电性相同的电荷
微观解释	不同物质的原子核对核外电子束缚力不同，摩擦时电子从一个物体转移到另一个物体	导体中的自由电子受到带电体对它的排斥（或者吸引）而移向导体的远端（或近端）	电荷间的相互作用，使自由电子在带电体和导体上转移且重新分布
实质	均为电荷在物体之间或物体内部的转移		

【注意】摩擦起电是电子从一个物体转移到另一个物体上；
感应起电是电子从物体的一部分转移到另一部分.
物体带电的实质是得失电子。

3.电量平分原理

完全相同的金属球接触时，若原来两球带同种电荷，电荷量相加后均分；若原来两球带有异种电荷，则电荷先中和再均分.

①完全相同的两个金属球分别带有同种电荷，电荷量分别为 Q_1 和 Q_2，接触后各自带的电荷量相等。

$Q_1'=Q_2'=\frac{Q_1+Q_2}{2}$。

②完全相同的两个带异种电荷的金属球，电荷量分别为 Q_1 和 $-Q_2$，接触后各自的带电荷量相等。$Q_1'=Q_2'=\frac{Q_1-Q_2}{2}$。

③若不是完全相同的金属球接触时，不满足平分原理。

4.电荷量与元电荷

（1）物体带电的多少叫电荷量，在国际单位制中，它的单位是库仑，简称库，用 C 表示. 最小的电荷量叫做元电荷，用 e 表示，$e=1.60\times10^{-19}$ C.

（2）元电荷是最小的电荷单位，不是带电体，也不是点电荷，任何带电体的电荷量都是元电荷的整数倍，说明电荷量是不连续的。

(3)比荷：带电体的电荷量 q 与其质量 m 之比叫比荷。例如，电子的比荷为 $\frac{e}{m_e}=\frac{1.60\times10^{-19}\ \text{C}}{0.91\times10^{-30}\ \text{kg}}\approx1.76\times10^{11}\ \text{C/kg}$。

【注意】元电荷、点电荷、带电体的区别

(1)元电荷是一个电子或一个质子所带电荷量的绝对值，是电荷量的最小单位。

(2)点电荷是理想化的模型，是特殊的带电体，实际中并不存在。研究问题时，不考虑带电体的大小和形状，只考虑所带电荷量。点电荷所带电荷量可以很大，也可以很小，但一定是元电荷的整数倍。

(3)有一定体积和形状、带有电荷的物体为带电体，带电体分为带电导体和带电绝缘体。如果受到其他电荷作用时，带电导体上的电荷由于静电感应一般会重新分布，而带电绝缘体则不会。

5.电荷守恒定律

（1）电荷既不会创生，也不会消灭，它只能从一个物体转移到另一个物体，或者从物体的一部分转移到另一部分；在转移的过程中，电荷的总量保持不变.

（2）电荷守恒定律的另一种表述

一个与外界没有电荷交换的系统，电荷的代数和保持不变。

【拓展】(1)电荷守恒定律是自然界的普遍适用规律，既适用于宏观系统，也适用于微观系统。

(2)中性与中和的区分

①中性：物体内部有电荷存在，但正、负电荷绝对值相等，对外不显电性。

②中和：两个带有等量异种电荷的带电体相接触达到电中性的过程。

二、静电感应

(1)定义：当一个带电体靠近导体时，由于电荷间相互吸引或排斥，导体中的自由电荷便会趋向或远离带电体，使导体靠近带电体的一端带异种电荷，远离带电体的一端带同种电荷。这种现象叫静电感应。

(2)感应起电：利用静电感应使金属导体带电的过程。

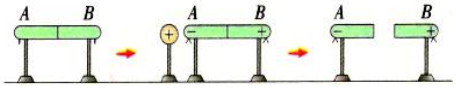
（3）感应起电的两种方法：

(1)方法一：

①如图甲所示，将导体 A 和 B 彼此接触。

②把带电体 C 移近导体 A。

③把 A 和 B 分开，然后移去 C，则 A 带上和 C 异种的电荷，B 带上和 C 同种的电荷。



甲

⚠ 提醒

如果先移走 C，再分开 A、B，则原来 A、B 上感应出的异种电荷会立即中和，不会使 A、B 带电。

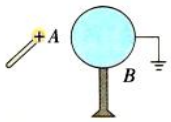
若 A、B 任意一点接地，则 AB 都带上同种电荷-负电荷。

(2)方法二：

①如图乙所示，将一个带电体 A 靠近导体 B。

②用手接触一下导体 B(相当于将 B 接地一下)，再将手拿开。

③移去带电体 A，则这时 B 带上了和带电体 A 异种的电荷。



乙

第 2 节　库仑定律

一、电荷之间的作用力

（一）点电荷

点电荷：形状和大小对研究问题的影响可忽略不计的带电体称为点电荷．点电荷类似于力学中的质点，也是一种理想化模型．

（二）库仑定律

1.内容：真空中两个静止点电荷之间的相互作用力，与它们的电荷量的乘积成正比，与它们的距离的二次方成反比，作用力的方向在它们的连线上．公式为：$F=k\frac{q_1q_2}{r^2}$，其中比例系数 k 叫做静电力常量【麦克斯韦通过电磁理论推导出来的】，$k=9.0\times10^9$ $N\cdot m^2/C^2$.在其他介质中，有 $F=k\frac{q_1q_2}{\varepsilon r^2}$，其中 ε 为相对介电常数。

2. 适用条件：真空中的静止点电荷

(1)在空气中，两个点电荷的作用力近似等于真空中的情况，可以直接应用公式.

(2)当两个带电体间的距离远大于其本身的大小时，可以把带电体看成点电荷.

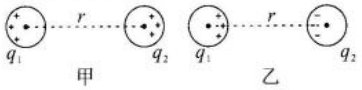
3. 库仑力的方向

库仑力的方向由相互作用的两个带电体决定，即同种电荷相互排斥，异种电荷相互吸引.

【注意】

对于两个均匀带电的绝缘球体，可将其视为电荷集中在球心的点电荷，r 为球心间的距离.

对于两个带电金属球，要考虑表面电荷的重新分布情况，如图所示.



甲　　乙

(1)同种电荷：$F<k\frac{q_1q_2}{r^2}$.

(2)异种电荷：$F>k\frac{q_1q_2}{r^2}$.

不能根据公式错误地认为当 $r\to0$ 时，库仑力 $F\to\infty$，因为当 $r\to0$ 时，两个带电体已不能看作点电荷了.

4. 电荷量符号的处理方法

一般将计算库仑力的大小与判断库仑力的方向分别进行，即用公式计算库仑力大小时，不必将电荷量 q_1、q_2 的正、负号代入公式，只将其电荷量的绝对值代入公式计算库仑力的大小；力的方向根据同种电荷相互排斥、异种电荷相互吸引判断。

5. 扭秤实验装置----放大法



【说明】库仑最初的实验是用带电木髓小球进行的，并非金属小球。关系式 $F=k\frac{q_1q_2}{r^2}$ 是由库仑作为假设提出来的。本实验可以看作是对这个假设的检验。

二、静电力计算

(1)库仑定律与万有引力定律的对比

项目	库仑定律	万有引力定律
表达式	$F=k\frac{q_1q_2}{r^2}$	$F=G\frac{m_1m_2}{r^2}$
存在表现	电荷相吸或相斥	物体相吸
作用介质	电场	引力场
适用条件	真空中静止的点电荷	质点
统一性	遵循距离的“平方反比”规律，都是“场”的作用	

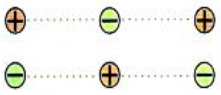
（2）电场力的叠加

任意点电荷同时受到多个库仑力的作用时，可利用平行四边形定则或正交分解法求合力。

（3）三个自由点电荷的平衡问题

1. 条件：另外两个点电荷在某电荷处的合场强为 0，或每个点电荷受到的两个库仑力必须大小相等，方向相反。

2. 规律：“三点共线”——三个点电荷分布在同一条直线上；



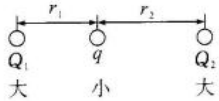
三点共线、两同夹异

“两同夹异”——正、负电荷相互间隔；

“两大夹小”——“中间”电荷的电荷量最小；

“近小远大”——“中间”电荷靠近电荷量较小的电荷。

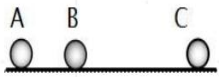
如图所示，若三个电荷均处于静止状态，则有以下结论：



(1) $\frac{Q_1}{Q_2}=\frac{r_1^2}{r_2^2}\cdot\frac{q}{Q_1}=\frac{r_2^2}{(r_1+r_2)^2}\cdot\frac{q}{Q_2}=\frac{r_1^2}{(r_1+r_2)^2}$.

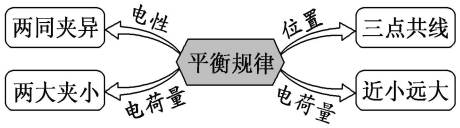
(2)Q_1、q、Q_2 处的电场强度均为 0.

（3）真空中，在光滑水平桌面上，三个自由点电荷仅在它们系统的静电力作用下处于平衡状态时，每个点电荷都是平衡的，则电荷量的关系 $\sqrt{Q_AQ_C}=\sqrt{Q_AQ_B}+\sqrt{Q_BQ_C}$



【证明：对 A 电荷，有 $\frac{kQ_AQ_B}{L_1^2}=\frac{kQ_AQ_C}{(L_1+L_2)^2}$ 得 $\frac{\sqrt{Q_AQ_B}}{\sqrt{Q_AQ_C}}=\frac{L_1}{L_1+L_2}$①，对 C 电荷，同理得 $\frac{kQ_AQ_C}{(L_1+L_2)^2}=\frac{kQ_BQ_C}{L_2^2}$ 得 $\frac{\sqrt{Q_BQ_C}}{\sqrt{Q_AQ_C}}=\frac{L_2}{L_1+L_2}$②，①+②即可得】

3.三个自由点电荷的平衡问题的速解技巧



第 3 节 电场　电场强度

一、电场（物质存在的一种形式）

1. 定义：电荷的周围存在着一种特殊物质叫电场，电荷通过电场与其他电荷发生作用。静止的电荷在它周围产生的电场叫静电场。

⚠ 提醒

(1)电场并非由分子、原子等实物粒子组成，是一种特殊物质，客观存在。

(2)电场的基本性质是对场中的电荷有力的作用。电场对电荷的作用力叫电场力。

2. 电荷间的相互作用是通过电场发生的

例如，电荷 A 对电荷 B 的作用力是 A 在空间中产生的电场对 B 发生了作用，电荷 B 对电荷 A 的作用力是 B 在空间中产生的电场对 A 发生了作用。



二、电场强度

1.试探电荷与场源电荷

(1)试探电荷：为了研究电场的性质而引入试探电荷，试探电荷不改变原电场。



(2)场源电荷：激发电场的带电体所带的电荷叫场源电荷或源电荷。

2. 电场强度

（1）**定义及定义式：**试探电荷 q 在电场中某个位置所受的电场力与它的电荷量的比值叫该点的电场强度，简称场强，用字母 E 表示。

（2）定义式：$E=\frac{F}{q}$

【说明】①$E=\frac{F}{q}$是电场强度的定义式，没有决定关系，适用于一切静电场。

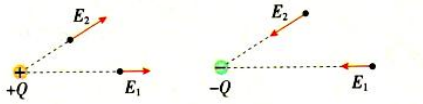
②电场中某点的电场强度由电场本身决定，与是否放入试探电荷及试探的电性无关，不能说 $E\propto F$、$E\propto\frac{1}{q}$ 等。

（3）单位：N/C 或 v/m.

（4）**方向：**与在该点的正电荷所受静电力的方向相同，与负电荷的受力方向相反。

3.点电荷和匀强电场的场强

（1）真空中**点电荷场强的决定式：**$E=\frac{kQ}{r^2}$，其中 Q 为场源电荷，r 为研究点到场源电荷的距离。在介质中，有 $E=k\frac{Q}{\varepsilon r^2}$。



（2）在匀强电场中，有 $E=\frac{U}{d}$（其中 d 为沿场强方向的距离）。

【小结】

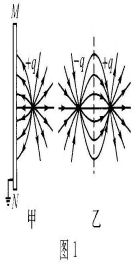
场强的三个表达式的比较

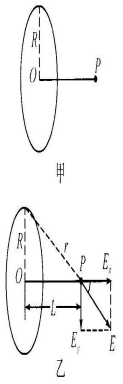
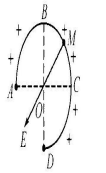
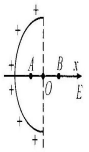
表达式	$E=\frac{F}{q}$	$E=\frac{kQ}{r^2}$	$E=\frac{U}{d}$
公式意义	电场强度的定义式	真空中点电荷的决定式	匀强电场中 E 与 U 的关系式
适用范围	一切电场	①真空 ②点电荷	匀强电场
决定因素	电场本身决定，与 q 无关	场源电荷 Q 和场源电荷到该点的距离 r 共同决定	电场本身决定，d 为沿电场方向的距离

【拓展】

在一般情况下可由上述三个公式计算电场强度，但在求解带电圆环、带电平面等一些特殊带电体产生的电场强度时，上述公式无法直接应用。这时，如果转换思维角度，灵活运用叠加法、对称法、补偿法、微元法、等效法等巧妙方法，可以化难为易。

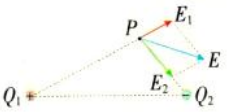
非点电荷电场叠加常见方法：

方法	典型实例	
等效法：在保证效果相同的前提下，将复杂的电场情景变换为简单的或熟悉的电场情景	如图 1 甲所示，一个点电荷 $+q$ 与一个无限大接地薄金属板形成的电场，可以等效为如图 1 乙所示的两个异种点电荷形成的电场	图 1

微元法：将带电体分成许多元电荷，每个元电荷看成点电荷，先根据库仑定律求出每个元电荷的场强，再结合对称性和场强叠加原理求出合场强	如图2甲所示，均匀带电圆环所带电荷量为Q，半径为R，圆心为O，P为垂直于圆环平面中心轴上的一点，$OP=L$，P点的场强；如图2乙所示，将圆环看成由n个小段组成，当n相当大时，每一小段都可以看成点电荷，其所带电荷量$Q'=\frac{Q}{n}$，由点电荷场强公式可求得每一小段带电体在P处产生的场强为$E=\frac{kQ}{nr^2}=\frac{kQ}{n(R^2+L^2)}$； 由对称性可知，各小段带电体在$P$处垂直于中心轴的分量$E_y$相互抵消，而其轴向分量$E_x$之和即为带电圆环在$P$处的场强$E_P$，$E_P=nE_x=nk\frac{Q}{n(R^2+L^2)}\cos\theta=k\frac{QL}{(R^2+L^2)^{\frac{3}{2}}}$	 甲 乙 图2
对称法：利用空间上对称分布的电荷形成的电场具有对称性的特点，使复杂电场的叠加计算问题简化	如图3所示，均匀带电的$\frac{3}{4}$球壳在O点产生场强，根据对称性，弧AB和弧CD在O点产生的场强叠加为零，整段弧$ABCD$等效为弧BC产生的场强，弧BC产生的场强方向，又等效为弧的中点M在O点产生的场强方向(微元法)	 图3
填补法：将有缺口的带电圆环或圆板补全为圆环或圆板，或将半球面补全为球面，从而化难为易，达到事半功倍的效果	如图4所示，正电荷均匀分布在半球面上，Ox为通过半球顶点与球心O的轴线，A，B为轴上的点，且$AO=OB$，分析A，B两点的电场强度(已知均匀带电球壳内部电场强度处处为零，电势处处相等)：将半球壳补成一个完整的球壳，且带电均匀，设左、右半球在A点产生的场强大小分别为E_1和E_2，均匀带电球壳内部电场强度处处为零，则知$E_1=-E_2$，则根据对称性可知，左、右半球在B点产生的场强大小分别为E_2和E_1，且$E_1=-E_2$。则在图示电场中，A的场强大小为E_1，方向向右，B的场强大小为E_2，方向向右，所以A点的电场强度与B点的电场强度相同	 图4

三、电场强度的叠加

如果场源是多个点电荷，则电场中某点的电场强度为各个点电荷单独在该点产生的电场强度的矢量和。



【点拨】电场强度是矢量，电场强度的叠加本质是矢量的叠加，所以遵从平行四边形定则。

四、电场线

1.定义：为了形象地描述电场中各点场强的大小及方向，在电场中画出一些曲线，曲线上每一点的切线方向都跟该点的场强方向一致，曲线的疏密表示电场的强弱.

2.电场线的特点

电场线的特点：
- ①不闭合：电场线起始于正电荷(或无穷远处)，终止于无穷远处(或负电荷)
- ②不相交：在电场中两条电场线不相交
- ③同一电场中，电场线密的地方电场强度大
- ④沿电场线方向电势降低
- ⑤电场线和等势面在相交处垂直

【小结】 ①疏密表大小，切线表方向；
②始正终负，实际并不存在；
③“三不”特点（不相交、不闭合、不中断）；
④不一定为带电粒子的运动轨迹。

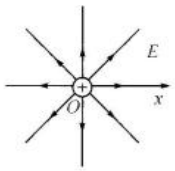
【说明】

①法拉第提出的是“力线”的概念，“场”是由麦克斯韦等人完善后形成的概念。

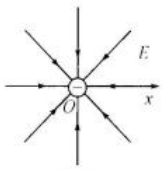
②电场线的形状可以用实验来**模拟**。把头发碎屑悬浮在蓖麻油里，加上电场，碎屑就按电场强度的方向排列起来，显示电场线的分布情况。

3.几种典型电场的电场线分布

（一）孤立正负点电荷电场线的分布及电场力的性质



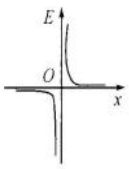
孤立正点电荷



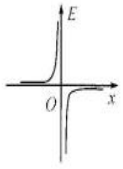
孤立负点电荷

【记忆】正电荷“光芒四射”，负电荷“万箭穿心”

正(负)点电荷的电场线呈空间球对称分布指向外(内)部；离点电荷越近，电场线越密，场强大小越大，反之越小；以点电荷为球心作一球面，则电场线与球面垂直，球面上任意一点的场强大小相等，方向不同.



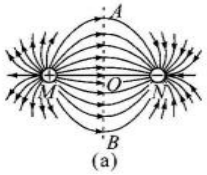
规定沿x轴正方向为E的正方向



规定沿x轴正方向为E的正方向

（二）等量异种电荷的电场线分布及电场力的性质

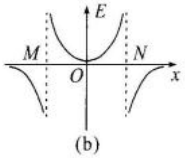
等量异种电荷的电场线分布图如图(a)所示.



(a)

【记忆】等量异种“中灯笼”

(1)连线上场强的变化规律图像如图(b)所示，定义水平向右为正方向.

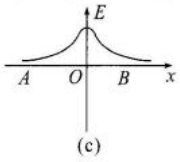


(b)

连线上场强的变化规律：

MON场强的变化：从$M\to O\to N$，先减小后增大，MON上O点的场强最小，AOB上O点的场强最大；M点左侧、N点右侧的场强大小均逐渐减小.

(2)垂直平分线上场强的变化规律图像如图(c)所示，定义水平向右为正方向.



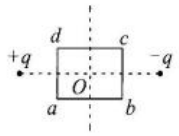
(c)

垂直平分线上场强的变化规律：

AOB 场强的变化：从 $A\to O\to B$，先增大后减小.

(3)对称点上的规律总结

由于电场线关于 MON 对称，具有对称性，a、b、c、d 为中心在 O 点的矩形的四个顶点.



①a、b、c、d 的场强大小均相等；

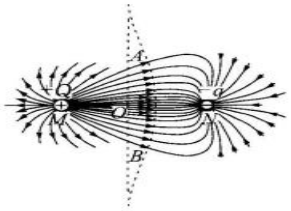
②a 与 c、b 与 d 的场强方向相同；

③a 与 d、b 与 c 的场强方向关于连线 MON 对称；

④关于 O 点对称的点的场强大小、方向均相同.

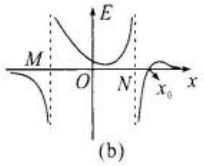
【拓展】不等量异种电荷的电场线分布及电场力的性质

不等量异种电荷($Q>q$)的电场线分布图如图(a)所示.



(a)

连线上场强的变化规律图像如图(b)所示，定义水平向右为正方向.



(b)

连线上场强的变化规律：

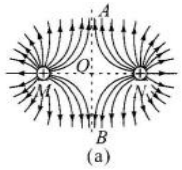
MON 场强的变化：先减小后增大，因 $Q>q$，故场强最小值的点由中点向右平移稍许，M 点左侧的场强逐渐减小.

N 点的右侧场强的变化分析：由“两大夹小”“两同夹异”的三个电荷平衡知，N 点右侧一定存在场强为 0 的 P 点；P 点左侧，q 占主导作用，场强向左；P 点右侧，Q 占主导作用，场强向右.

从 N 点到 P 点，场强逐渐减小至 0；从 P 点到右侧无穷远处，场强先增大后再次减小至 0.

注意：q 的右侧存在场强为 0 的点，场强在这里的变化情况较为复杂.

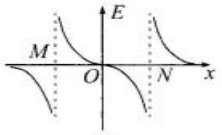
（三）等量同种点电荷（正电荷）及电场力的性质



(a)

【记忆】等量同种“中钱孔”，同时注意电场线先变密后变疏。

(1)连线上场强的变化规律图像如图(b)所示，定义水平向右为正方向.

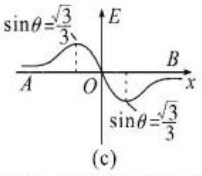


(b)

连线上场强的变化规律：

MON 场强的变化：从 $M\to O\to N$，先减小至 0 后反向增大，O 点场强为 0；M 点左侧、N 点右侧的场强大小均逐渐减小.

(2)垂直平分线上场强的变化规律图像如图(c)所示，定义竖直向上为正方向.



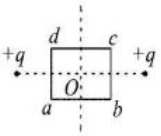
(c)

垂直平分线上场强的变化规律：

AOB 场强的变化：从 $A\to O\to B$，先增大后减小至 0 后再反向增大再减小，O 点场强为 0；$\angle AMO$ 的正弦值为 $\frac{\sqrt{3}}{3}$ 时，场强大小最大.

(3)对称点上的规律总结

由于电场线关于 AOB、MON 对称，具有对称性，a、b、c、d 为中心在 O 点的矩形的四个顶点.



①a、b、c、d 的场强大小均相等；

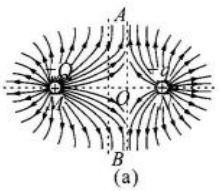
②a 与 d、b 与 c 的场强方向关于连线 MON 对称；

③a 与 b、c 与 d 的场强方向关于垂直平分线 AOB 对称；

④a 与 c、b 与 d 的场强方向关于 O 点中心对称.

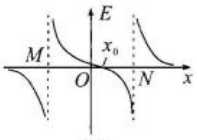
【拓展】不等量同种电荷的电场线分布及电场力的性质

不等量同种电荷($Q>q$)的电场线分布图如图(a)所示.



(a)

连线上场强的变化规律图像如图(b)所示，定义水平向右为正方向.



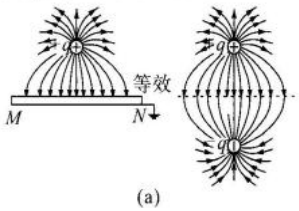
(b)

连线上场强的变化规律：

MON 场强的变化：从 $M\to x_0\to N$，先减小后增大；M 点左侧、N 点右侧的场强大小均逐渐减小，因 $Q>q$，故场强为 0 的点由中点向右平移稍许.

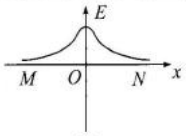
（四）点电荷与接地带电平行板的电场线分布及电场力的性质

点电荷与金属板 MN 发生静电平衡后产生的电场线分布图与等量异种电荷产生的电场线分布图如图(a)所示.



(a)

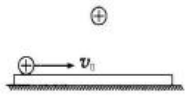
金属板表面 MN 上的场强变化图像如图(b)所示，定义竖直向下为正方向.



(b)

金属板上表面的场强变化规律：从 $M\to N$，先增大后减小，金属板表面的场强方向均垂直于金属板.

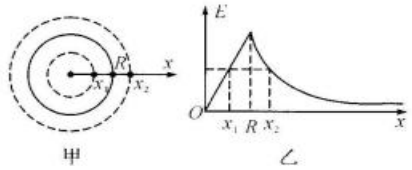
【典例】如图所示，一水平放置的金属板正上方有一固定的正电荷 Q，一表面绝缘的带正电小球(可视为质点且不影响 Q 的电场)，从左端以初速度 v_0 滑上金属板的上表面，已知金属板上表面光滑，分析小球在向左运动到右端的过程中速度的变化规律.



【答案】小球做匀速运动

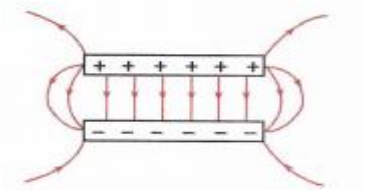
【拓展】

真空中一半径为 R、电荷量为+Q 的均匀带电球体，以球心为坐标原点，沿半径方向建立 x 轴. x 轴上各点的电场强度随 x 变化的关系图像如图乙所示。

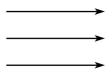


甲　　乙

（五）带电平行金属板

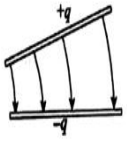


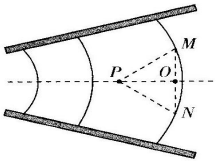
【中间部分可以看成匀强电场】



【记忆】：匀强电场“等距且平行”

【变式】若两块不平行的导体板组成的电容器，若使两板分别带有电量为+q 和—q 的电荷，则它们之间的电场线分布图为：





（电场线与导体板表面垂直且左端密集）

【注意区分几个概念】

一、电荷

1.电荷。2.电荷量。3.元电荷。4 点电荷。5.感应电荷。6.场源电荷。7.试探电荷。8.净电荷。9.比荷

二、电场力与静电力

1.带电体之间或电荷之间的相互吸引或排斥力就叫静电力，也叫库仑力，其实质是电场力。

2.电场力是指电场对放入其中的电荷的作用力。

第 4 节　静电的防止与利用

一、静电平衡∽力的平衡

1. 静电感应

当把一个不带电的金属导体放在电场中时，导体的表面两端分别感应出等量的正、负电荷，“近端”出现与施感电荷异种的感应电荷，“远端”出现与施感电荷同种的感应电荷，这种现象叫静电感应.

2. 静电平衡

(1)**定义**

导体放入电场中，感应电场与原电场在导体内部任意一点产生大小相等、方向相反的场强，使得叠加场强为零，自由电荷不再发生定向移动，导体处于静电平衡状态.

(2)**静电平衡的导体具有的特点**

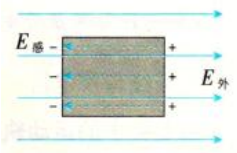
①导体内部场强处处为零；

②导体是一个等势体，导体表面是等势面；

③导体表面的场强方向与导体表面垂直；

④导体内部没有净电荷，净电荷只分布在导体的外表面；

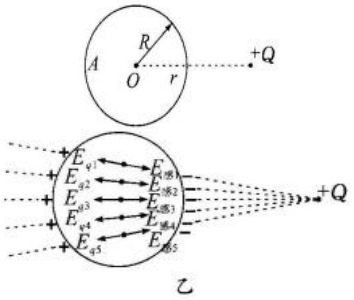
⑤在导体外表面越尖锐的位置，净电荷的密度(单位面积上的电荷量)越大，凹陷位置几乎没有净电荷.



【说明】

处于静电平衡状态的导体，其内部的电场强度处处为 0，并不是导体内部完全不存在电场，而是导体内感应电荷的电场与外加的电场叠加后的合场强为 0，利用此规律可以求解感应电荷在导体中某点产生的电场强度，$E_{感}=-E_{外}$。

【典例】如图所示，一点电荷+Q置于金属球壳A右侧，球壳半径为R，球壳中心O与点电荷之间的距离为r，球壳将发生静电感应现象，分析金属球壳静电感应的过程并求平衡时感应电场在O点产生的场强.



乙

二、尖端放电

(1)定义：导体尖端的强电场可以使空气发生电离，变成带负电的自由电子和正离子，这些带电粒子在强电场作用下加速，撞击空气中的分子，产生更多的带电粒子，其中与导体尖端电荷电性相反的粒子被吸引与尖端上的电荷中和，叫尖端放电。

(2)尖端放电的利用：避雷针是利用尖端放电避免雷击的一种设施。

将尖锐的金属棒安装在建筑物的顶端，用粗导线与埋在地下的金属板连接，保持与大地的良好接触，就成为避雷针（图9.4-3）。当带电的雷雨云接近建筑物时，由于静电感应，金属棒出现与云层相反的电荷。通过尖端放电，这些电荷不断向大气释放，中和空气中的电荷，达到避免雷击的目的。

(3)尖端放电的防止：为防止电能的损失，高压设备中的导体表面应尽量光滑。

（4）夜间野外高压线周围有时会出现一层绿色光晕，俗称电晕，这是一种微弱的尖端放电现象。

（5）在燃气灶和燃气热水器中，常常安装电子点火器，点火器的放电电极是钉尖形，就是利用尖端放电现象。

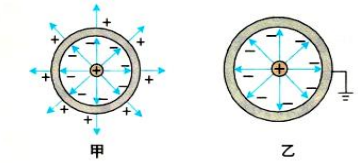
三、静电屏蔽

(1)静电屏蔽：空腔导体（包括金属网罩、金属容器、铁皮房等）在外电场中处于静电平衡状态时，内部电场强度处处为0。空腔导体把外电场“遮住”，即起屏蔽作用，使其内部不受外电场的影响，这种性质在技术上很有实用价值。例如，把电学仪器放入金属壳内，可免受外电场的影响；超高压带电作业的工人所穿衣服中掺入金属丝，以保障工人安全作业。

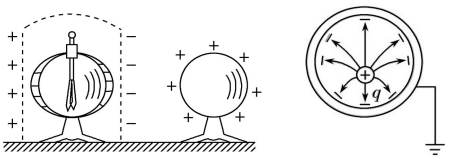
(2)另一类静电屏蔽现象：屏蔽外界。

①如图甲所示，空腔导体内有正带电体时，由于静电感应，空腔内、外表面上将分别出现等量的负、正电荷。导体外表面上正电荷的电场对外界会产生影响，起不到对外部的屏蔽作用。

②如图乙所示，如果把空腔导体接地，其外表面上的电荷被大地中的自由电子中和，空腔内带电体对外界的影响消除，起到了对外界的屏蔽作用。


甲　　乙

【现象1】由于静电感应，导体外表面感应电荷的电场与外电场在导体内部任一点的场强的叠加结果为零，从而外部电场影响不到导体内部，如图甲所示。



甲　　乙

【现象2】由于静电感应，接地导体壳内表面感应电荷产生的电场与壳内电场在导体壳外表面以外空间叠加结果为零，从而使接地的封闭导体壳内部电场对壳外空间没有影响，如图乙所示。

【规律】在静电屏蔽现象中，若金属网罩不接地，则外电场不影响网罩内部，但网罩内部的电场可以影响外部。若金属网罩接地，则内外互不影响。

实现静电屏蔽不一定要用密封的金属容器，金属网也能起到屏蔽作用。野外高压输电线受到雷击的可能性很大，所以在三条输电线的上方还有两条导线，它们与大地相连，形成一个稀疏的金属“网”，把高压线屏蔽起来，免遭雷击。



四、静电吸附

(1)原理：在电场中，带电粒子受到静电力的作用，会向着电极运动，最后被吸附在电极上。

(2)应用：静电除尘、静电喷漆、静电复印。

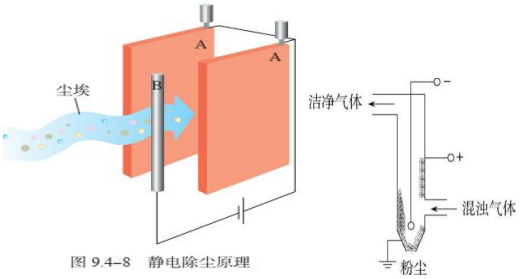


图 9.4-8　静电除尘原理

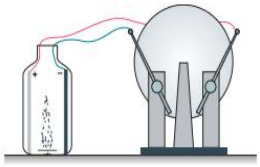
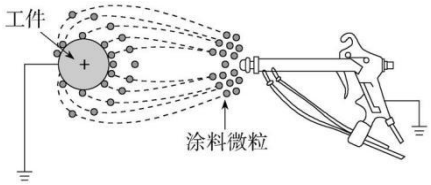
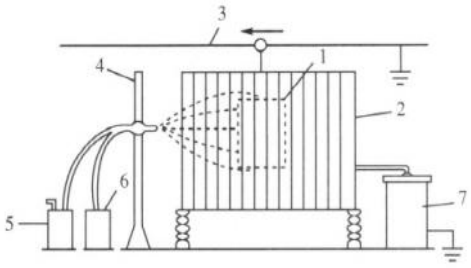


图 9.4-10

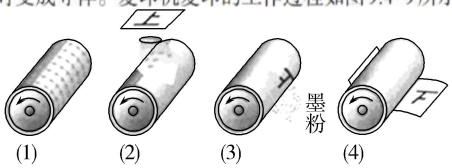




1. 涂件；2. 栅网式放电极；3. 输送器；4. 喷射器支架；5. 空气泵；6. 涂料泵；7. 直流高压电源。

图9-16　栅网式静电喷涂法

复印机也应用了静电吸附。复印机的核心部件是有机光导体鼓，它是一个金属圆柱，表面涂覆有机光导体（OPC）[①]。没有光照时，OPC 是绝缘体，受到光照时变成导体。复印机复印的工作过程如图9.4-9所示。



【备注】20 世纪 90 年代以前没有有机光导体，那时金属圆柱表面镀硒，具有同样的功能，圆柱叫作硒鼓。

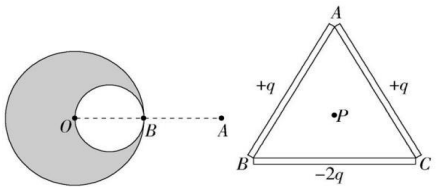
【记忆口诀】

库仑定律电荷力，万有引力是场力。
好比李生两兄弟，kQq 与 r 平方比。
电荷周围有电场，用 F 比 q 来定义。
KQ 比 r 方点电荷，U 比 d 是匀电场。
电场强度是矢量，正电受力定方向。
描绘电场用场线，疏密切线表其量。

第二部分 物理方法概述

一、补偿法

有些物理问题根据已有条件不能建立完整的模型，这时就需要给原来的问题补充一些条件，组成一个完整的新模型，这样，求解原模型的问题就变为求解新模型与补充条件的差值问题。这就是补偿法。求解有缺口的均匀带电圆环、均匀带电球体等的场强问题时，可采用补偿法。

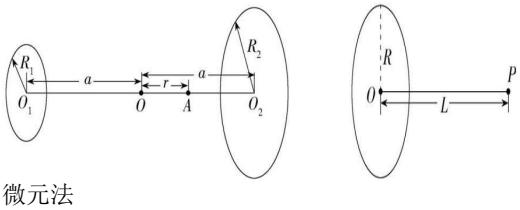


二、对称法

对称法是指在研究物理问题时，利用研究对象的对称特性来分析和处理问题的方法。通过对物理问题中出现的各种对称特性，如：物理过程的对称性、运动轨迹的对称性、几何形状的对称性等，进行分析和推理，可以避免烦琐的物理分析和数学推导，而直接利用事物之间的对称关系得出结论，从而快速解题，事半功倍。

三、极限法

极限法是把某个物理量的变化推向极端，从而作出科学的推理分析，给出判断或导出一般结论。用极限法分析某些物理过程时，可以使问题化难为易，化繁为简，达到事半功倍的效果。

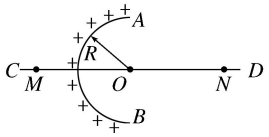


四、微元法

微元法就是将研究对象分割成若干微小的单元，或从研究对象上选取某一“小单元”加以分析，从而可以化繁为简，使变量、难以确定的量转化为常量、容易确定的量。用该方法可以使一些复杂的物理过程用我们熟悉的物理规律表示，使所求的问题简单化。

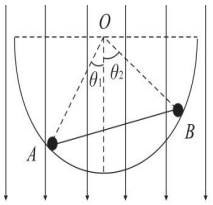
第四部分　易错、疑难问题选

1.均匀带电的球壳在球外空间产生的电场等效于电荷集中于球心处产生的电场。如图所示，在半球面 AB 上均匀分布正电荷，总电荷量为 q，球面半径为 R，CD 为通过半球面顶点与球心 O 的轴线，在轴线上有 M、N 两点，OM＝ON＝2R。已知 M 点的场强大小为 E，则 N 点的场强大小为



【答案】$\frac{kq}{2R^2}-E$

2. 如图所示，内壁光滑、绝缘的半球形槽固定在地面上，整个半球形槽处于竖直向下的匀强电场中，质量相等的带异种电荷的 A、B 两小球用轻质绝缘细杆固定连接，两球置于半球形槽中且处于静止状态时，小球 A、B 与半球形槽球心 O 点的连线与竖直方向的夹角分别为 θ_1、θ_2，已知 $\theta_1<\theta_2$，则（　　）



A. 无法判断 A、B 两小球的电性
B. 一定是 A 球带正电，B 球带负电
C. 现用外力将小球 B 向下移动一小段距离，A、B 两小球的电势能将增大
D. 突然撤去匀强电场，则两小球组成的系统仍能静止在原处

【答案】BC

3. 如图所示的高压输电线路，在铁塔的顶端还有两条导线（图中箭头所指），它们与大地相连，这两条导线的主要功能是

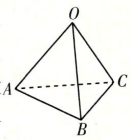
A. 输送电能
B. 各变电站之间通讯
C. 连接各铁塔，使铁塔更稳固
D. 预防雷电击中下方的输电线



第 3 题图

【答案】D

4. [2021 河北辛集一中考试]水平面上 A、B、C 三点固定着三个电荷量均为 Q 的正点电荷，将另一质量为 m 的带正电的小球（可视为点电荷）放置在 O 点，$OABC$ 恰构成一棱长为 L 的正四面体，如图所示。已知静电力常量为 k，重力加速度为 g。为使小球能静止在 O 点，小球所带的电荷量为

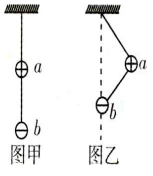


A. $\frac{mgL^2}{3kQ}$　B. $\frac{2\sqrt{3}mgL^2}{9kQ}$　C. $\frac{\sqrt{6}mgL^2}{6kQ}$　D. $\frac{\sqrt{2}mgL^2}{6kQ}$

【答案】C

5.用两根等长的轻质绝缘细线，把两个带异种电荷的小球 a、b 悬挂起来，如图甲所示。小球 a、b 质量分别为 m_1、m_2，带电荷量大小分别为 q_1、q_2。如果在该空间加一水平向右的匀强电场，且线始终拉紧。最后达到的平衡状态如图乙所示，则关于两球质量大小及带电荷量多少，下列组合符合要求的有

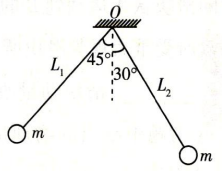
A. $m_1=m_2, q_1=q_2$
B. $m_1=2m_2, q_1=4q_2$
C. $m_1=m_2, q_1=3q_2$
D. $2m_1=m_2, 2q_1=5q_2$



【答案】BCD

6.如图所示，两根长分别为 l_1、l_2 的细线，一端栓在同一悬点 O

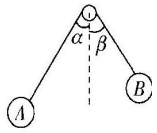
上，另一端各系一个小球，两球的质量均为 m,因两球带有同种电荷而使两线张开一定角度，两细线与竖直方向的夹角分别为 45^0 和 30^0，则线长 l_1 与 l_2 之比为（　　）



A. $1:\sqrt{2}$　　B. $\sqrt{2}:1$　　C. $\sqrt{2}:\sqrt{3}$　　D. $\sqrt{3}:\sqrt{2}$

【答案】A

【变式 1】如图所示，两个带电小球 A、B 被系在一根轻绳的两端，质量分别为 m_1、m_2，电荷量分别为 q_1、q_2，轻绳跨过光滑的圆柱形挂钉，系统处于平衡状态，此时两小球与竖直方向的夹角分别为 α 和 β. 下列说法中正确的是　　（　　）



A. A、B 两小球带异种电荷

B. 若 $q_1>q_2$，则 $\alpha>\beta$

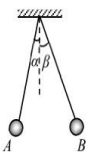
C. 若 $m_1>m_2$，则 $\alpha>\beta$

D. 不论两球质量、电荷量如何，α 始终等于 β

【答案】D

【变式 2】

两根细绳一端悬挂在同一点，另一端分别连接两个带电小球 A、B，A、B 处在同一水平面上，与竖直方向的夹角 $\alpha<\beta$，如图所示，则



A. A 的质量一定大于 B 的质量

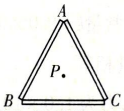
B. B 的质量一定大于 A 的质量

C. A 的电荷量一定大于 B 的电荷量

D. B 的电荷量一定大于 A 的电荷量

【答案】A

7.如图所示，三根均匀带电的等长绝缘棒组成等边三角形 ABC，在三角形的正中心 P 放置电荷量为 $-q(q>0)$ 的试探电荷，其所受电场力大小为 F_1，方向由 P 指向 A。将 BC 棒取走，试探电荷所受电场力大小变为 F_2，方向由 A 指向 P。设 AB 棒在 P 处激发的电场强度大小为 E_1，BC 棒在 P 处激发的电场强度大小为 E_2，则



A. AB 棒带正电，所带电荷量的绝对值大于 BC 棒

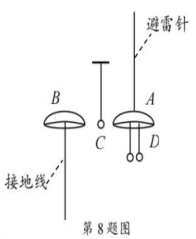
B. AB 棒带负电，所带电荷量的绝对值小于 BC 棒

C. $E_1=\dfrac{F_1}{q}$，$E_2=\dfrac{F_1-F_2}{q}$

D. $E_1=\dfrac{F_2}{q}$，$E_2=\dfrac{F_1+F_2}{q}$

【答案】BD

8. 富兰克林为研究雷电现象，设计了如图所示的装置，避雷针线路与接地线分开，并在分开处装上帽形的金属钟 A 与 B，两钟之间以丝线悬挂一个金属小球 C，A 钟下方用导线连接两个很轻的金属小球形成验电器 D，避雷针上空附近的云不带电时，三个金属小球均静止下垂。若带负电的云接近避雷针顶端时，则



第 8 题图

A. 避雷针顶端带负电

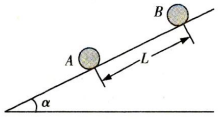
B. 接地线上有正电荷流入大地

C. 验电器 D 上的两个金属小球最后会下垂并相互接触

D. 金属小球 C 会在 A 与 B 之间摆动，不断来回撞击 A 与 B

【答案】D

9.如图所示，在倾角为α的足够长光滑斜面上放置两个质量分别为 $2m$ 和 m 的带电小球 A 和 B（均可视为质点），它们相距 L，两球同时由静止开始释放时，B 球的初始加速度恰好等于 0，经过一段时间后，当两球距离为 L' 时，A、B 的加速度大小之比为 $a_1:a_2=11:5$，静电力常量为 k，重力加速度大小为 g，下列说法正确的是



A. 若 B 球带正电荷，则 A 球带负电荷

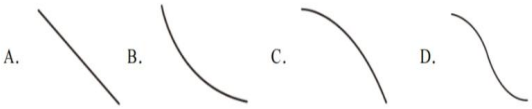
B. 若 B 球所带电荷量为 q，则 A 球所带电荷量为 $\dfrac{mgL^2\sin\alpha}{kq}$

C. 两球相互排斥，运动一段距离后库仑力大于 $mg\sin\alpha$

D. $\dfrac{L'}{L}=\dfrac{2}{3}$

【答案】B

10. 一条均匀带电的绝缘飘带，悬于天花板（粗细一致质量均匀分布，带正电）放置于水平向右的匀强电场中，当飘带稳定时，飘带实际形态最接近的是（　　）



【答案】A

11. 如图所示，小明同学在坐飞机的时候发现机翼末端边缘有一条条针一样的装置，此装置作用是



A. 防止闪电击中飞机，起到避雷针的作用

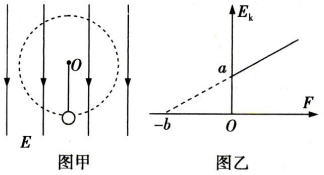
B. 加强电磁通讯信号，起到天线的作用

C. 通过尖端放电使云层中的电荷消失

D. 释放飞机表面的静电

【答案】D

12.如图甲所示，用长为 L（未知）的轻绳拴着一质量为 m 带正电的小球（带电荷量 q 未知）在竖直面内绕 O 点做圆周运动，竖直面内加有竖直向下的匀强电场，电场强度为 E。小球运动到最高点时的动能 E_k 与绳中张力大小 F 间的关系如图乙所示。当地的重力加速度为 g，不计一切阻力，由图可推知



图甲　　图乙

A. 轻绳的长度为 $\dfrac{2a}{b}$

B. 小球所带电荷量为 $\dfrac{b+mg}{E}$

C. 小球在最高点的最小速度为 $\sqrt{\dfrac{2a}{m}}$

D. 小球在最高点的最小速度为 $\sqrt{\dfrac{5a}{m}}$

【答案】AC

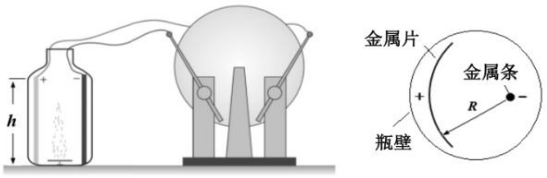
13. 在一次科学晚会上，一位老师表演了一个“魔术”：如图甲，一个空塑料瓶中固定着一根细金属条和一块易拉罐(金属)片，将金属片和金属条分别与静电起电机正、负极相连。在塑料瓶里放一盘点燃的蚊香，很快就看见整个透明塑料瓶里烟雾缭绕。摇动起电机，顿时塑料瓶清澈透明，停止摇动，又是烟雾缭绕，图乙为其俯视图。已知金属片是半径为 R 的圆弧，金属条恰好位于其圆心，两者的高度均为 h。若匀速摇动起电机时，两极间的电压恒为 U，则

A. 未摇动起电机时，烟尘在金属片与金属条之间下落的最大时间为 $\sqrt{\frac{2h}{g}}$

B. 匀速摇动起电机时，金属片与金属条之间的电场强度为 $\frac{U}{R}$

C. 除尘过程中带电量为 q 的烟尘增加的电势能最大为 qU

D. 质量为 m、带电量为 q 的烟尘被金属片吸附时水平方向受到的冲量不大于 $\sqrt{2mqU}$

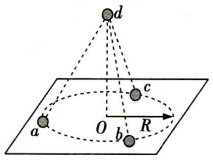


甲　　乙

第 13 题图

【答案】D

14.如图所示，a、b、c、d 四个质量均为 m 的带电小球恰好构成“三星拱月”之形，其中 a、b、c 三个完全相同的带电小球位于



同一光滑绝缘水平面内，且绕同一点 O 做半径为 R 的匀速圆周运动，三小球所在位置恰好将圆周等分。小球 d 位于 O 点正上方高 h 处，且在外力 F 作用下处于静止状态。已知 a、b、c 三小球的电荷量均为 q，d 球的电荷量为 $6q$，$h=\sqrt{2}R$，重力加速度为 g，静电力常量为 k，小球均可视为质点，则

A. 小球 d 一定带正电

B. 小球 b 的转动周期为 $\frac{2\pi R}{q}\cdot\sqrt{\frac{\sqrt{3}mR}{k}}$

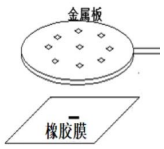
C. 小球 c 的加速度大小为 $\frac{\sqrt{3}kq^2}{mR^2}$

D. 外力 F 方向竖直向上，大小等于 $mg+\frac{2\sqrt{6}kq^2}{R^2}$

【答案】BD

15. 小明同学做一个“静电散花”的小实验。如图所示，将纸屑放在带绝缘柄的金属板上，用毛皮摩擦橡胶膜使其带上负电荷，并放到金属板的正下方，用手接触金属板后移开，再将橡胶膜从金属板的下面移走，看到金属板上的纸屑向上飞散开来，则下列说法正确的是

A. 当带负电的橡胶膜放到金属板的正下方时，金属板上表面感应出正电荷



B. 当用手接触金属板，金属板上的正电荷从手流入大地

C. 将橡胶膜从金属板的下面移走后，金属板的上表面带正电荷

D. 向上飞散的纸屑都带负电荷

【答案】C

16. 衍射现象限制了光学显微镜的分辨本领，最好的光学显微镜也只能分辨 200nm 大小的物体，而场致发射显微镜的分辨率大大提高。其原理如图所示，在真空玻璃泡中心放置待测金属针（这根金属针的针尖即是该显微镜的观察对象），泡的内壁涂有荧光导电膜，在金属针和荧光导电膜间加很高的电压，形成如图所示的辐射状的电场。在泡内充以少量氦气，氦原子碰到针尖时会失去一个电子形成氦离子，然后向荧光屏运动，引起荧光材料发光，在荧光屏上就看到了针尖的某种像，如分辨率足够高，还可以分辨出针尖端个别原子的位置。若把氦离子改成电子，并将电极方向互换，打到荧光屏上分辨率会降低。忽略氦离子和电子的重力，其初速度可视为零，不考虑运动过程中带电粒子间相互作用，下列说法中正确的是



A. 氦离子运动过程中加速度不断增大

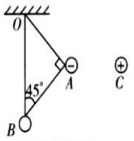
B. 氦离子运动过程中电势能不断增大

C. 分辨率降低是因为电子的德布罗意波长比氦离子的长

D. 若所加电压为 U，玻璃泡的半径为 r，则距离针尖 $\frac{1}{2}r$ 处的电场强度大小为 $\frac{U}{r}$

【答案】C

17. 用三根绝缘轻杆将质量均为 m 的 A、B 两小球相连后悬挂于 O 点，其中 A 球带电量为 $-q$，B 球不带电。现将带电量为 $+q$ 的小球 C 放置在某处，恰使 A 静止在与 C 相距为 x 的等高处，且三根细杆组成如图所示的等腰直角三角形，其中 O、B 间的细杆竖直。已知静电力常量为 k，重力加速度为 g，小球的大小均可忽略，则



第 11 题图

A. O、B 间轻杆拉力小于 mg

B. A、C 间距 $x=\sqrt{\frac{kq^2}{2mg}}$

C. 撤去 C 的瞬间，A 的加速度大小为 g

D. 若将 C 放置在 A 的正上方相距为 x 的位置，O、B 间细杆也可以保持竖直

【答案】D

第十章　电场中的能量【类比】

第一部分 基础知识点

第 1 节 电势能和电势

一、静电力做功的特点∽重力做功的特点

在静电场中移动电荷时，静电力做的功与电荷的起始位置和终止位置有关，与电荷经过的路径无关.

【提醒】这个结论既适用于匀强电场，也适用于非匀强电场。

二、电势能 ∽重力势能

1.**定义**：电荷在电场中具有的势能，电势能用 E_p 表示．公式：$E_p=q\varphi$【带正负号进行计算】

2. 静电力做功与电势能变化的关系：静电力做的功决定电势能的变化量，即 $W_{AB}=E_{pA}-E_{pB}$。静电力做了多少正功，电荷电势能一定减少多少；静电力做了多少负功，电荷电势能一定增加多少。

且 $W_{电}=-E_{电势能}$

3. 电势能的特点

（1）系统性：电势能是电场和电荷所共有的。

(2)相对性：电势能大小是相对的，与选定的零势能位置有关。

(3)标矢性：电势能是标量，有正负，无方向。正负号表示电荷的电势能比零势能位置的电势能大或小。

⚠ 提醒

通常把电荷在离场源电荷无限远处或大地表面的电势能规定为 0。

4.电势能大小的判断

判断方法	方法解读
公式法	将电荷量、电势连同正负号一起代入公式 $E_p=q\varphi$，正 E_p 的绝对值越大，电势能越大；负 E_p 的绝对值越大，电势能越小
电势法	正电荷在电势高的地方电势能大 负电荷在电势低的地方电势能大
做功法	电场力做正功，电势能减小 电场力做负功，电势能增加
能量守恒法	在电场中，若只有电场力做功时，电荷的动能和电势能相互转化，动能增加，电势能减小，反之，动能减小，电势能增加。

三、电势φ∽高度 h

1.定义：电荷在电场中某一点的电势能 E_p 与它的电荷量 q 的比值，叫做这一点的电势.

2.表达式：$\varphi=\frac{E_p}{q}$，E_p 表示电荷 q 的电势能，φ的单位为伏特，符号为 V.

3. 电势的特点：

(1)沿着电场线方向电势逐渐降低。

(2)相对性：电势是相对的，电场中某点的电势与零电势点的选取有关。通常选取离场源电荷无限远处或大地为零电势点。

(3)固有性：电场中某点的电势由电场本身的性质和零电势点决定，与该点是否放有电荷及所放电荷的电荷量和电势能均无关。

(4)标矢性：电势是标量，只有大小，没有方向。规定了零电势点后，电场中各点电势可能是正值，可能是负值。正值表示该点电势高于零电势，负值表示该点电势低于零电势。

【规律】某点的电势若有多个电场共同产生，则只需各电场的电势代数相加减即可。

【拓展】1.点电荷电场中的电势

(1)选无限远处为零电势点，则孤立点电荷产生的电场中某点电势 $\varphi=\frac{kQ}{r}$，r 为某点到点电荷的距离，Q 为点电荷的电荷量，且 Q 为正电荷时代入正值，Q 为负电荷时代入负值。

(2)选无限远处为零电势点时，正点电荷的电场中电势都大于 0，且离正点电荷越近电势越高；负点电荷的电场中电势都小于 0，且离负点电荷越近电势越低。

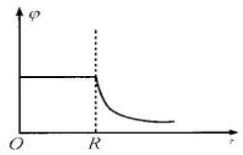
【拓展】2.均匀带电球壳内外的电势

设有一半径为 R，总带电量为 Q 的均匀带电球壳，球壳内外的电场强度有：

$$E=\begin{cases}0, & 0\leqslant r<R,\\ k\dfrac{Q}{r^2}, & r\geqslant R.\end{cases}$$

，则有

$$\varphi=\begin{cases}k\dfrac{Q}{R}, & 0\leqslant r<R,\\ k\dfrac{Q}{r}, & r\geqslant R.\end{cases}$$



【拓展】3.无限大均匀带电平行板电场中的电势：$\varphi=Ed$.

d 为某点到所设零电势点间的沿电场方向的距离。

4. 电势高低的判断

判断依据	判断方法
电场线方向	沿电场线方向电势逐渐降低
场源电荷的正负	取无穷远处电势为零，正电荷周围电势为正值，负电荷周围电势为负值；靠近正电荷处电势高，靠近负电荷处电势低
电势能的高低	正电荷在电势较高处电势能大，负电荷在电势较低处电势能大
电场力做功	根据 $U_{AB}=\frac{W_{AB}}{q}$，将 W_{AB}、q 的正负号代入，由 U_{AB} 的正负判断 φ_A、φ_B 的高低

第 2 节　电势差 ∽高度差 h_{AB}

一、电势差

1.定义：电荷 q 在电场中从 A 移动到 B 时，静电力所做的功 W_{AB} 跟它的电荷量 q 的比值，叫做 A、B 间的电势差，电势差也叫电压.

2.定义式：$U_{AB}=\frac{W_{AB}}{q}$. 单位：伏(V). 【带符号计算】

3. 标矢性：电势差是标量，其正负代表 A、B 两点电势的高低关系。如 $U_{AB}=-6$ V，说明 B 点的电势比 A 点的电势高 6 V。

4. 对电势差的理解

(1)电场中两点的电势差，由电场本身的性质决定。在确定的电场中，无论放不放电荷，任何两点间的电势差都有确定的值。

（2）求电势差时一定要明确是哪两点的电势差。

即 $U_{AB}=\varphi_A-\varphi_B$，$U_{BA}=\varphi_B-\varphi_A$，$U_{BA}=-U_{BA}$

【提醒】电场中，电势是相对的，与零电势点的选取有关；电势差是绝对的，与零电势点的选取无关。

二、静电力做功与电势差的关系

(1)公式：$W_{AB}=qU_{AB}$ 或 $U_{AB}=\frac{W_{AB}}{q}$。

(2)对公式的理解

①电势差反映电场本身的性质，与 W_{AB}、q 无关，不能认为 U_{AB} 与 W_{AB} 成正比、与 q 成反比。

②该式适用于任何电场。

③该式在应用时各量需带符号代入公式进行运算。

（3）电势、电势差和电势能的区别与联系

项目	电势 φ	电势差 $U_{AB}=\varphi_A-\varphi_B$	电势能 E_p
物理意义	反映电场的能的性质的物理量	电场中两点间对电荷做功的本领	电荷在电场中某点所具有的能量
相关因素	电场中某一点的电势 φ 的大小，只跟电场本身有关，跟检验电荷 q 无关	电势差由电场和电场中两点间的位置决定	电势能是由点电荷 q 和该点电势 φ 共同决定的
单位	伏特 V	伏特 V	焦耳 J
联系	$\varphi=\frac{E_p}{q}$，$W=qU_{AB}$，$E_p=q\varphi$，$W=-\Delta E_p$		

4.电场力做功与功能关系

电场力做功的计算	功的定义法 $W=qEl\cos\alpha$；电势差法 $W_{AB}=qU_{AB}$；四种方法；电势能法 $W_{AB}=E_{pA}-E_{pB}$；动能定理法 $W_{电场力}+W_{其他}=\Delta E_k$
电场中的功能关系	(1)电场力做正功，电势能减少，电场力做负功，电势能增加，即：$W=-\Delta E_p$。 (2)如果只有电场力做功，则动能和电势能之间相互转化，二者总和不变，即：$\Delta E_k=-\Delta E_p$。∽机械能守恒定律

三、等势面∽等高线

1. 定义：电场中电势相同的各点构成的面叫等势面。

2. 特点

(1)在同一个等势面上移动电荷，静电力不做功。

(2)任意两个等势面都不相交。

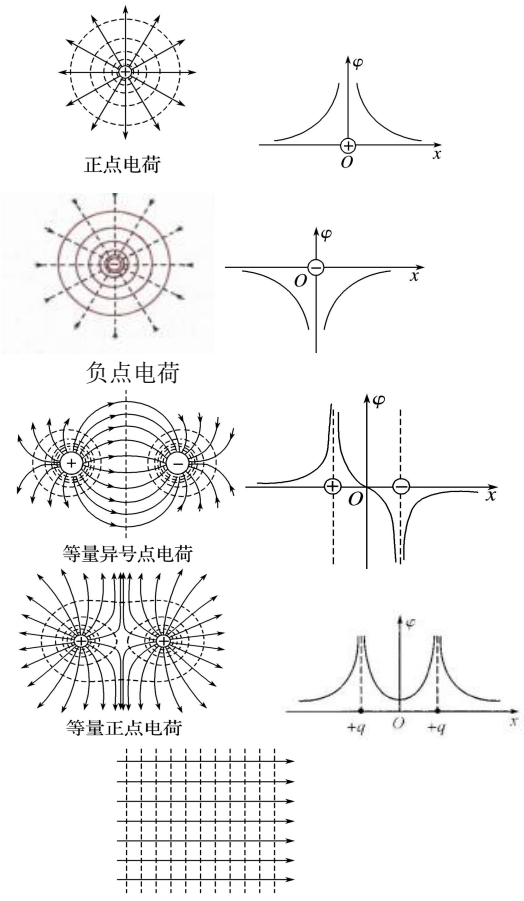
(3)电场线跟等势面垂直。

(4)电场线由电势高的等势面指向电势低的等势面。

(5)同一电场中，电场线越密的地方，等差等势面也越密。因此，等差等势面的疏密也可以用来描述电场的强弱。

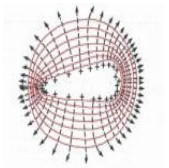
(6)处于静电平衡状态的导体是等势体，表面是等势面。

3.几种常见电场的等势面的分布图：



4.任意形状的带电体电场的等势面

（1）分布图



(2)特点

①在越接近带电体时，等势面的形状越接近带电体外表面的形状，离带电体越远的等势面形状越接近于球面。

②导体表面越尖锐的位置，电场线越密集，等势面分布也越密集。

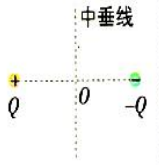
③导体表面附近，电场线与导体表面是相互垂直的

判断带电体电场线与等势线的方法：等势线与带电体表面垂直

【小结 1】

电场	等势面(虚线)分布	特点
匀强电场	电场线 等势面	垂直于电场线的等距、平行的平面
点电荷的电场	电场线 等势面	以点电荷为球心的同心球面
等量异种点电荷的电场		在两点电荷的连线上，从正电荷到负电荷电势越来越低；中垂线是一等势面，电势为 0
等量同种点电荷的电场		在两正点电荷的连线上，中点电势最低；而在中垂线上，中点电势最高

【拓展】选无限远处为零电势点，以等量异种点电荷为例，分析电势变化。设电荷量分别为$+Q$、$-Q$，则有 $\varphi=\varphi_+ +\varphi_-=\frac{kQ}{r_1}+\frac{k(-Q)}{r_2}$。在中垂线上 $r_1=r_2$，故 $\varphi_{中垂线}=0$，即中垂线是个等势面，且电势为 0。在两点电荷连线上越靠近正电荷 φ 越大，越靠近负电荷 φ 越小，故从正电荷到负电荷电势越来越低。

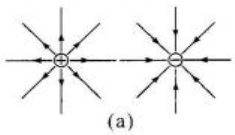


【规律】电势为 0，场强不一定为 0；场强为 0，电势不一定为 0.

【小结 2】

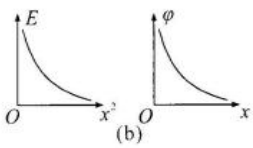
1. 点电荷的电场能性质

点电荷的电场线分布图如图(a)所示.



(a)

正点电荷周围场强(定义沿电场线方向为正方向)与电势的变化规律图像如图(b)所示.



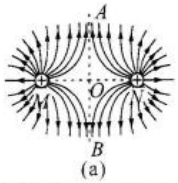
(b)

定义无穷远处电势 $\varphi=0$，离正场源电荷越近，电势越高，正场源电荷的电场中每一点电势都大于零；离负场源电荷越近，电势越

低，负电荷电场中每一点电势都小于零.

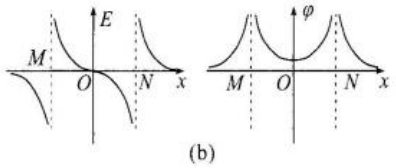
2. 等量同种电荷的电场能性质

等量同种电荷的电场线分布图如图(a)所示.



(a)

(1)连线上场强(定义水平向右为正方向)与电势的变化规律图像如图(b)所示.

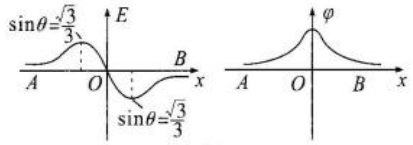


(b)

连线上电势的变化规律：

定义无穷远处的电势 $\varphi=0$，从 $M\rightarrow O\rightarrow N$，电势先减小后增大，$O$ 点的电势最低且不为 0；M 左侧与 N 右侧的电势逐渐减小.

(2)垂直平分线上的场强(定义竖直向上为正方向)与电势的变化规律图像如图(c)所示.



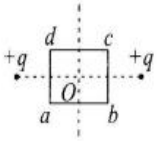
(c)

垂直平分线上电势的变化规律：

定义无穷远处的电势 $\varphi=0$，从 $A\rightarrow O\rightarrow B$ 电势先增大后减小.

(3)对称点上的规律总结

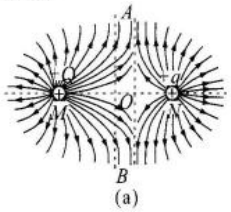
由于电场线关于 AOB、MON 对称，具有对称性，a、b、c、d 为中心在 O 点的矩形的四个顶点.



规律总结：a、b、c、d 的电势均相等；关于 AOB、MON 对称的两点的电势相等.

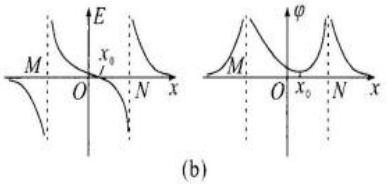
3. 不等量同种电荷的电场能性质

不等量同种电荷($Q>q$)的电场线分布图如图(a)所示.



(a)

连线上场强(定义水平向右为正方向)与电势的变化规律图像如图(b)所示.



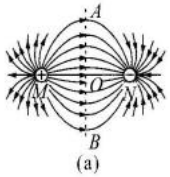
(b)

连线上电势的变化规律：

定义无穷远处的电势 $\varphi=0$，从 $M\rightarrow O\rightarrow N$，先减小后增大，电势最低点由中点向右移动；$M$ 左侧与 N 右侧的电势逐渐减小.

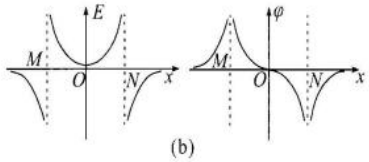
4. 等量异种电荷的电场能性质

等量异种电荷的电场线分布图如图(a)所示.



(a)

(1)连线上场强(定义水平向右为正方向)与电势的变化规律图像如图(b)所示.

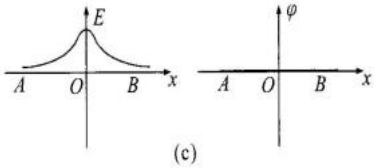


(b)

连线上电势的变化规律：

定义无穷远处的电势 $\varphi=0$，从 $M\rightarrow O\rightarrow N$，电势一直减小，$O$ 点的电势为 0；M 左侧的电势逐渐减小，N 右侧的电势逐渐增大.

(2)垂直平分线上场强(定义水平向右为正方向)与电势的变化规律图像如图(c)所示.

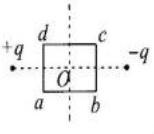


(c)

由于通过 AOB 的电场线均与 AOB 垂直，因此 AOB 为等势线，等于无穷远处的电势，电势为 0.

(3)对称点上的规律总结

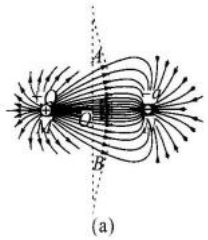
由于电场线关于 MON 对称，有对称性，a、b、c、d 为中心在 O 点的矩形的四个顶点.



规律总结：关于 MON 对称的两点的电势相等.

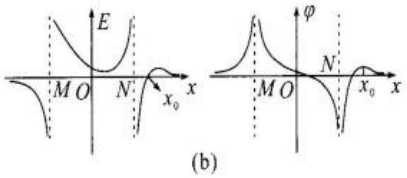
5. 不等量异种电荷的电场能性质

不等量异种电荷($Q>q$)的电场线分布图如图(a)所示.



(a)

连线上场强(定义水平向右为正方向)与电势的变化规律图像如图(b)所示.



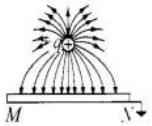
(b)

连线上电势的变化规律:

定义无穷远处的电势 $\varphi=0$,从 $M\to O\to N$,电势一直减小,电势为 0 的位置由中点向右平移稍许;M 左侧的电势逐渐减小,N 右侧的电势先增大后减小.

6. 点板模型的电场能性质

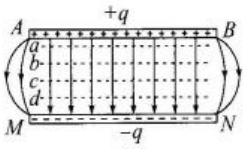
点电荷与金属板 MN 发生静电平衡后产生的电场线分布图如图所示.



规律总结:由于电场线均与金属板上表面 MN 垂直,MN 为等势面,金属板与大地相接,金属板与大地形成等势体,通常定义地球的电势为 0,因此金属板表面的电势均为 0.

7. 匀强电场的电场能性质

两带电金属板间形成匀强电场的电场线分布图如图(a)所示,匀强电场中电场线处处平行.



(a)

规律总结:匀强电场中电场线处处平行且间距均匀,沿着电场线方向电势降低;因电场线处处平行,故等势面处处平行;图中 a、b、c、d 为等势面,若相邻等势面的电势差相等,则等势面的间距也相等.

【小结 3】

电场线、电势、电势能、等势面之间的关系

(1)电场线与电场强度

电场线越密的地方表示电场强度越大,电场线上某点的切线方向表示该点的电场强度方向.

(2)电场线与电势

沿电场线方向,电势降低最快.

(3)电场线与等势面

电场线与等势面垂直,并从电势较高的等势面指向电势较低的等势面.

(4)电场强度大小与电势

无直接关系,零电势点可人为选取,电场强度的大小由电场本身决定,电场强度大的地方,电势不一定高.

(5)电势能与电势

正电荷在电势高的地方电势能大,负电荷在电势低的地方电势能大.

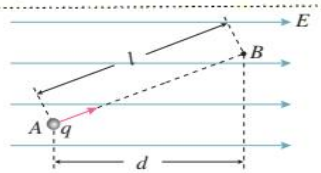
第 3 节　电势差与电场强度的关系

1. 匀强电场中两点间的电势差等于电场强度与这两点沿电场方向的距离的乘积。

公式:$U_{AB}=Ed$ 或 $E=\frac{U_{AB}}{d}$。

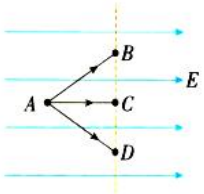
⚠ 提醒

公式中,d 必须是沿电场强度方向的距离,如果电场中两点不沿电场强度方向,d 的取值应为两点连线间的距离在电场强度方向上的投影。

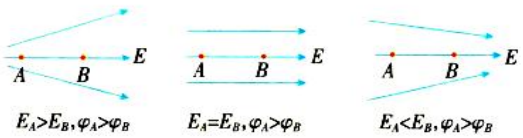


2. 电场强度与电势的关系

(1)沿着电场线方向电势降低,但电势降低的方向不一定是电场强度的方向,电势降低最快的方向才是电场强度的方向。如图所示,B、C、D 三点处在同一等势面上,沿 $A\to B$、$A\to C$、$A\to D$ 都是电势降低的方向,其中沿 $A\to C$ 电势降低得最快,该方向即电场强度的方向。



(2)电场强度的大小与电势的高低并无直接关系,如图所示的三种情景(图中带箭头的线段代表电场线)。



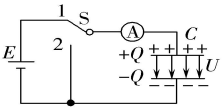
第 4 节 电容器的电容

一、电容器

(1)定义：任何两个彼此绝缘又相距很近的导体，都可以看作一个电容器，电容器是储存电荷和电场能的装置.

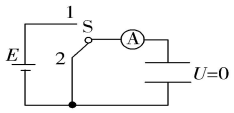
(2)充电和放电：让不带电的电容器两极板分别带上等量异种电荷的过程叫充电；让两极板上的电荷中和，电容器又不带电的过程叫放电.

(3)电容器的充、放电



电容器充电示意图

甲



电容器放电示意图

乙

(4)充电过程的特点

①有电流，电流方向为由电源的正极流向电容器正极板，电流由大到小。

②电容器所带电荷量增加。

③电容器两极板间电势差增大。

④电容器中电场强度增强。

电源的能量不断储存在电容器中。

⑤当电容器充电结束后，电容器所在电路中无电流，电容器两极板间电势差与充电电压相等，两极板带有一定量的等量异种电荷。

(5)放电过程的特点

①有电流，电流方向是从电容器正极板经电阻流向负极板，电流由大到小。

②电容器所带电荷量减少。

③电容器两极板间电势差减小。

④电容器中电场强度减弱。

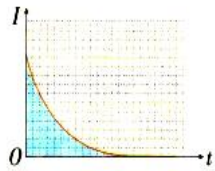
电容器把储存的能量通过电流做功转化为电路中其他形式的能量。

⑤当电容器放电结束后，电路中无电流，两极板间电势差为 0，带电荷量为 0。

充放电过程中电流随时间的变化图像

【拓展】电容器的充、放电图像

电容器充、放电时的 I-t 图像如图所示，图线与 t 轴所围面积表示充电、放电的电荷量。



【注意】

1. 电容器的电荷量 Q 是指任意极板所带电量的绝对值。
2. 充电完毕的电容器相当于断路。

(6) 电容器的分类

- 电容器
  - 固定电容器（电容固定不变）
    - 聚苯乙烯电容器（符号 ⊣⊢）
    - 电解电容器（符号 ⊣⊢，电容较大）
  - 可变电容器（符号 ⫽）（电容可以改变）



甲　　乙

图 10.4-7　固定电容器



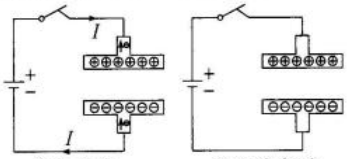
图 10.4-8　可变电容器

超级电容器是20世纪70年代根据电化学原理研发的一种新型电容器，它的出现使电容器的容量得到了巨大的提升。超级电容器的充电时间短，储存电能多，放电功率大，使用寿命长。这些优点展现了它作为新型动力电源的广阔发展前景。

【拓展】充放电过程的深入探讨

1. 电容器的充电过程

充电：电容器充电后电容器两极板带上等量异种电荷，电容器中储存电场能.



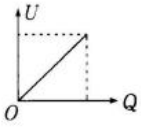
充电过程　　充电稳定后

充电过程：如图所示，将开关闭合，电源正极的电势高于上极板的电势，金属板上的电子由于电场力的作用，向电源正极流动；同理连接电源负极的下极板上的电子由于电场力的作用，流向负极，电子的定向移动形成了电流，电子均是逆时针流动的，此时的电容器相当于电阻，故充电过程中回路中有电流.

充电完成后，上极板与电源正极的电势相等，下极板与电源负极的电势相等，电子不再定向移动，回路中不再有电流，两极板的电荷量不再发生变化，两极板中存在电场，故存在电场能.

2. 电场能

作出 $U-Q$ 图像，如图所示.

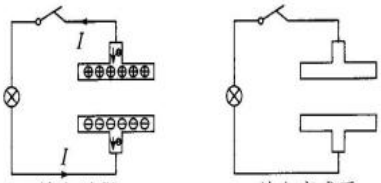


图像与横轴围成的面积 $S=W=\frac{1}{2}CU^2$，

综上所述，电场能 $E=\frac{1}{2}CU^2$.

3. 电容器的放电过程

放电：电容器放电过程中电场能转化为其他形式的能.



放电过程　　放电完成后

放电过程：如图所示，电容器放电时，电子由负极板流向正极板，此时电容器相当于电源，电流通过灯泡时，灯泡发光，随着放电的持续进行，平行板上电荷量逐渐减少，电容器两端的电压逐渐降低，电流逐渐减小，直至电流减为 0，此过程中电场能转化成内能.

总结

(1)电容器充电过程中，电容器相当于电阻，回路中存在电流；充电过程中，电荷移动需要时间，即电容器的电荷量在一瞬间无法改变，电容器与弹簧类似，具有瞬时性，在极短的时间内，认为极板上的电荷量不变.

(2)电容器充电完成后，电容器相当于断开的开关，回路中不存在电流，此时电容器的电场能 $E=\frac{1}{2}CU^2$.

(3)电容器放电的过程中，电容器相当于电源，回路中存在电流.

二、电容

(1)定义：电容器所带的电荷量 Q 与电容器两极板间的电势差 U 的比值.

(2)定义式：$C=\frac{Q}{U}=\left|\frac{\Delta Q}{\Delta U}\right|$.C 是比值法定义的物理量，与 Q、U 无关.

(3)物理意义：表示电容器容纳电荷本领的物理量.

(4)决定因素：由电容器本身物理条件（大小、形状、相对位置及电介质决定，与电容器是否带电及电压无关。）

(5)单位：基本单位是 F(法)，此外还有μF(微法)、pF(皮法)，

$1\ F=10^6\ \mu F=10^{12}\ pF$.

【拓展】单位制中的常用词头的含义

词头	数量级	中文名称
k	10^3	千
M	10^6	兆
m	10^{-3}	毫
μ	10^{-6}	微
p	10^{-12}	皮

（6）击穿电压和额定电压

(1)击穿电压：加在电容器两极板上的电压不能超过某一限度，超过这个限度，电介质将被击穿，电容器损坏，这个极限电压叫击穿电压。

(2)额定电压：是电容器长期正常工作时所能承受的电压，电容器外壳上标的是额定电压。额定电压低于击穿电压。

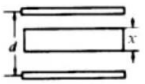
三、平行板电容器的电容

1.**决定式因素**：平行板电容器电容大小与极板的正对面积成正比，与两板间距离成反比，还与电介质的介电常数有关.

2.决定式：$C=\frac{\varepsilon_r S}{4\pi kd}$（其中 k 为静电力常量）

当插入厚为 x 的金属板时，则电容变为：

$$C=\frac{\varepsilon S}{4k\pi(d-x)}$$



【说明】

(1)空气与真空的相对介电常数 ε_r 取值为 1，其他电介质的相对介电常数都大于 1。

(2)平行板电容器内部为匀强电场。

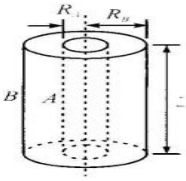
(3)在电容器两极板间加金属板时，相当于板间距离 d 减小。

3. 两个电容公式的比较

公式	公式类别	适用范围	制约因素
$C=\frac{Q}{U}$ $C=\frac{\Delta Q}{\Delta U}$	定义式	适用于任何电容器	电容器的电容由其本身的性质决定(不能说 C 与 Q 成正比，与 U 成反比)
$C=\frac{\varepsilon_r S}{4\pi kd}$	平行板电容器电容的决定式	仅对平行板电容器适用	平行板电容器的电容与极板的正对面积 S、距离 d、电介质的相对介电常数 ε_r 有关，$C\propto\frac{\varepsilon_r S}{d}$

【拓展】

1. 同轴圆柱形电容器



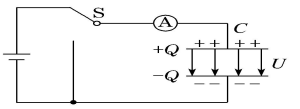
$$C=\frac{Q}{U_{AB}}=\frac{L}{2k\ln\frac{R_B}{R_A}}.$$

2. 同心球形电容器

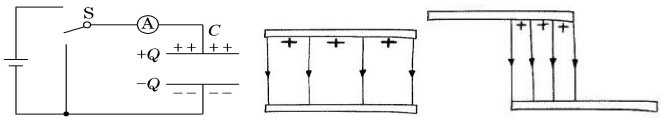
$$C=\frac{Q}{U}=\frac{\varepsilon_r R_1 R_2}{k(R_2-R_1)}.$$

四、**电容器的两类基本问题**

1.如果平行板电容器充电后始终连接在电源上，两极板间的电势差 U 就保持不变。

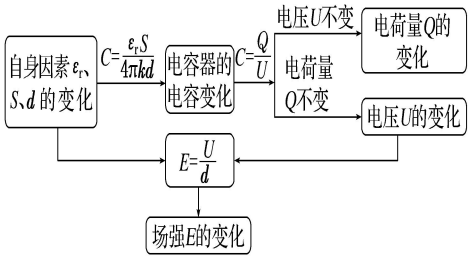


2.若平行板电容器充电后切断与电源的连接，并保持两极板绝缘，电容器既不充电也不放电，电容器的电荷量 Q 就保持不变。



【规律】在 Q 不变时，改变两板间距离，E 不变；S 增大，E 减小，S 减小 E 增大。

3.平行板电容器动态问题的分析思路



【拓展】关于电容器的题型讨论

1.电容器的瞬时性

电荷移动需要时间，即电容器的电荷量在一瞬间无法改变，电容器与弹簧类似，具有瞬时性，在极短的时间内，极板上的电荷量保持不变.

2. 等 U 型与等 Q 型的动态分析

(1)**两类典型问题:等U型与等Q型**

①**等U型**:电容器始终与恒压电源相连,改变电容大小,电容器两极板间的电势差U保持不变.

②**等Q型**:电容器充电稳定后与电源断开,改变电容大小,电容器两极板所带电荷量Q保持不变.

(2)**动态分析解题思路**

①**等U型解题思路**

根据决定式$C=\frac{\varepsilon_r S}{4\pi kd}$,分析出电容的变化情况;根据定义式$C=\frac{Q}{U}$,分析出电荷量的变化情况;根据$E=\frac{U}{d}$,分析出板间场强的变化情况.

②**等Q型解题思路**

根据决定式$C=\frac{\varepsilon_r S}{4\pi kd}$,分析出电容的变化情况;根据定义式$C=\frac{Q}{U}$,分析出两板间电势差的变化情况;根据$E=\frac{U}{d}$,分析出板间场强的变化情况.

等Q型动态分析的结论:正对面积不变,改变两板间距,板间场强不变;两板间距不变,增大正对面积,板间场强减小,减小正对面积,板间场强增大.

3. 电容器含有静电平衡的动态分析

在平行板电容器板间插入或拔出绝缘物质时,相当于改变介电常数ε_r的大小;在平行板电容器板间插入或拔出金属导体时,金属导体由于静电感应达到静电平衡,相当于改变板间距.这属于不同题型.

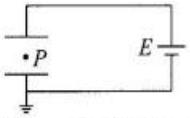
4.电容器接地的动态分析

电容器接地时,分析板间P点电势变化的解题思路:

第一步:根据决定式与定义式,分析出板间电场强度的变化;

第二步:判断P点与接地极板间的电压来判断P点电势的变化.(选择接地金属板的原因:接地金属板的电势已知,电势为0)

【典例1】如图所示,平行板电容器与直流



电源连接,下极板接地,一带电油滴位于电容器中的P点且处于静止状态,现将上极板竖直向上移动一小段距离,则(　　).

A. 带电油滴将沿竖直方向向上运动

B. P点的电势将降低

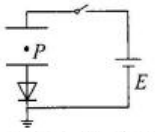
C. 电容器的电容减小,极板所带电荷量减小

D. 带电油滴的电势能保持不变

【答案】BC

5.电容器与二极管串联的动态分析

【典例2】如图所



示,平行板电容器与直流电源、理想二极管连接,电源负极接地.初始时电容器不带电,闭合开关稳定后,一带电油滴位于电容器中的P点且处于静止状态.下列说法正确的是(　　).

A. 减小极板间的正对面积,带电油滴会向上移动,且P点的电势会降低

B. 若将上极板向下移动,则P点的电势不变

C. 若将下极板向下移动,则P点的电势升高

D. 无论哪个极板向上移动还是向下移动,带电油滴都不可能向下运动

【答案】AD

【电容器问题规律总结】

(1)电容器与恒压电源相连,当电容器电容增大时,电源给电容器充电;当电容器电容减小时,电容器会放电,此时电容器相当于电源.

(2)电路中含有二极管时,由于二极管具有单向导电性,因此电流只能单向流动,电容器只充电不能放电或只放电不能充电.常考类型是只能充电不能放电.

(3)判断板间某点电势变化问题的解题方法:通过分析该点与极板间的电势差来分析该点的电势的变化情况,该极板的电势一定要已知.

【注意】验电器与静电计

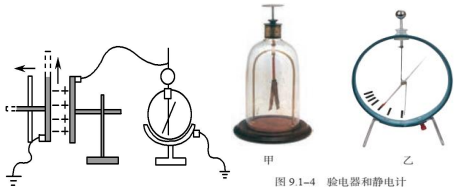


图 9.1-4　验电器和静电计

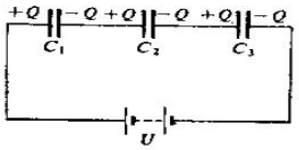
验电器:只能检验物体是否带电,不能判断电性

静电计:测量电压的仪器,指针偏角越大表示电压越高

【思考】这里能否用电压表代替静电计?(否)

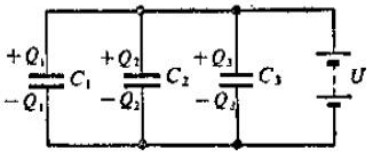
【补充】电容器的串并联

(一)串联



$$\frac{1}{C}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}.$$

(二)并联



$$C=C_1+C_2+C_3,$$

第 5 节　带电粒子在电场中的运动

一、带电粒子在电场中的加速

1.带电粒子在电场中运动时重力的处理

(1)微观粒子(如电子、质子、α粒子等)在电场中运动时，通常不必考虑其重力及运动中重力势能的变化。

(2)普通的带电体(如油滴、尘埃、小球等)在电场中运动时，除题中说明外，一般要考虑其重力及运动中重力势能的变化。

【注意】忽略粒子的重力并不是不计粒子的质量，只是重力远小于电场力，故重力可忽略不计。

2.两种观点分析问题

【凡不涉及时间或加速度问题，优先考虑用动能定理求解】

(1)用动力学观点分析（只适用于匀强电场）

$a=\frac{F_{合}}{m}$，$E=\frac{U}{d}$，$v^2-v_0^2=2ad$

(2)用功能观点分析（适用于一切静电场）

匀强电场中：$W=qEd=qU=\frac{1}{2}mv^2-\frac{1}{2}mv_0^2$

非匀强电场中：$W=qU=E_{k2}-E_{k1}$

二、带电粒子在电场中的偏转

1.基本运动模型：当带电粒子以 V_0 垂直电场射入时，带电粒子作类平抛运动。

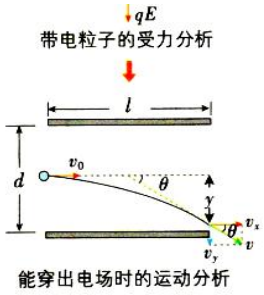
2.处理带电粒子的偏转问题的方法---------运动的分解

一般用分解的思想来处理，即将带电粒子的运动分解为沿电场力方向上的匀加速直线运动和垂直电场力方向上的匀速直线运动(类平抛运动)。

3.基本规律

(1)粒子沿 v_0 方向做匀速直线运动，有 $v_x=v_0, x=v_0t$。

(2)粒子在沿电场力方向做初速度为 0 的匀加速直线运动，有 $v_y=at, y=\frac{1}{2}at^2$。



能穿出电场时的运动分析

(3)粒子在板间运动的最长时间：$t=\frac{l}{v_0}$。

(4)侧移距离：$y=\frac{1}{2}at^2=\frac{1}{2}\left(\frac{qU}{md}\right)\left(\frac{l}{v_0}\right)^2=\frac{qUl^2}{2mv_0^2d}$。

(5)偏转角度：$\tan\theta=\frac{v_y}{v_x}=\frac{at}{v_0}=\frac{qUl}{mv_0^2d}$。

4. 带电粒子在电场中运动的两个常用推论

(1)若不同的带电粒子从静止经过同一加速电场(电压为 U_0)加速后，又进入同一偏转电场(电压为 U)后射出，则由动能定理有 $qU_0=\frac{1}{2}mv_0^2$

由此得 $y=\frac{qUl^2}{2mv_0^2d}=\frac{Ul^2}{4U_0d}$，$\tan\theta=\frac{qUl}{mv_0^2d}=\frac{Ul}{2U_0d}$。

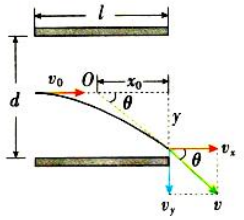
结论：不同的带电粒子从静止经过同一电场加速后进入同一偏转电场，离开偏转电场时的偏转角度和侧移距离总是相同的。

即：不同带电粒子从同一电场加速再进入同一偏转电场，所有粒子都从同一点射出，荧光屏上只有一个亮斑。

【但要注意：进入偏转电场的速度不一定相同，在偏转电场中运动的时间也不一定相同，可能先后落在同一个点上】

总时间和末速度与 q 、m 有关。做功和末动能与 q 有关。

(2)粒子从偏转电场中射出时的侧移距离 $y=\frac{1}{2}at^2=\frac{qUl^2}{2mv_0^2d}$，作粒子速度的反向延长线，与初速度方向交于一点，设该点与电场边缘的距离为 x_0，则 $x_0=\frac{y}{\tan\theta}=\frac{\frac{qUl^2}{2mv_0^2d}}{\frac{qUl}{mv_0^2d}}=\frac{l}{2}$。



结论：粒子从偏转电场中射出时，就像是从极板间的 $x_0=\frac{l}{2}$ 处的 O 点沿直线射出的。

【推广】

带电粒子的重力不计，当带电粒子的速度与匀强电场的电场线垂直时，带电粒子做类平抛运动，平抛运动中的相关结论在类平抛运动中均成立；当带电粒子的速度与匀强电场的电场线不垂直也不共线时，带电粒子做类斜抛运动，斜抛运动中的相关结论在类斜抛运动中均成立.

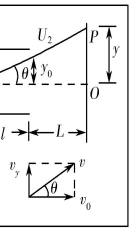
5.先加速再偏转最后直行的处理技巧【利用相似法更简洁】

偏转 $v\perp E$ → 类平抛运动（只受电场力）

偏转角：$\tan\theta=\frac{v_y}{v_0}=\frac{qU_2l}{mdv_0^2}=\frac{U_2l}{2U_1d}=\frac{2y_0}{l}$

侧移距离：$y_0=\frac{qU_2l^2}{2mdv_0^2}=\frac{U_2l^2}{4dU_1}$

$y=y_0+L\tan\theta=\left(\frac{l}{2}+L\right)\tan\theta$

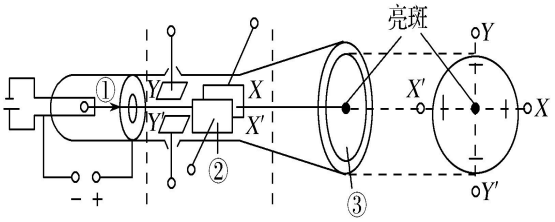


（或由 $\frac{y_0}{y}=\frac{\frac{l}{2}}{\frac{l}{2}+L}$ 求 y）

三、示波管

1.示波管的构造

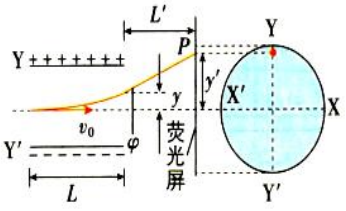
(1)电子枪，(2)偏转极板，(3)荧光屏。(如图所示)



2.示波管的工作原理

(1)偏转电极不加电压时，从电子枪射出的电子将沿直线运动，射到荧光屏中心形成一个亮斑。

(2)在 YY′(或 XX′)加电压时，电子偏转后射到荧光屏 YY′(或 XX′)所在直线上某一点，形成一个亮斑(不在中心)，如图所示。



在图中，设偏转电压为 U，电子电荷量为 e，质量为 m，则电子在电场中的侧移距离

$$y=\frac{1}{2}at^2=\frac{eU}{2dm}t^2(d\text{ 为两极板的间距})\qquad①$$

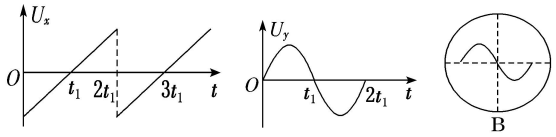
水平方向有 $t=\frac{L}{v_0}$ ②

又 $\tan\varphi=\frac{v_y}{v_x}=\frac{at}{v_0}=\frac{eUt}{mdv_0}$ ③

由①②③式得荧光屏上的侧移距离

$$y'=y+L'\tan\varphi=\tan\varphi\left(L'+\frac{L}{2}\right)。$$

(3)示波管实际工作时，一般加在 YY′偏转电极上的电压是待测的信号电压，加在 XX′偏转电极上的电压是扫描电压，若二者周期相同，在荧光屏上会显示出信号电压随时间变化的波形图。

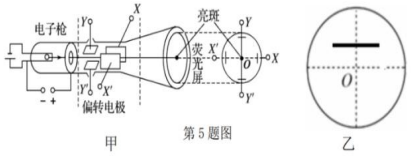


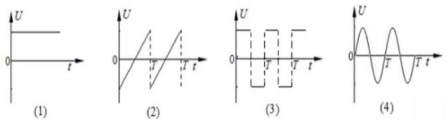
B

【规律】当水平方向加扫描电压时，竖直方向加什么信号，则示波器上就显示什么信号】

【典例】

如图甲是示波管的原理图，它由电子枪、偏转电极(XX′和 YY′)、荧光屏等组成，管内抽成真空，给电子枪通电后，如果在偏转电极 XX′和 YY′上都没有加电压，电子束将打在荧光屏的中心 O 点。试分析当 XX′和 YY′所加电压哪种组合可使荧光屏显示如图乙的图案





A. XX′加图（4）所示电压，YY′加图（1）所示电压
B. XX′加图（4）所示电压，YY′加图（3）所示电压
C. XX′加图（3）所示电压，YY′加图（1）所示电压
D. XX′加图（1）所示电压，YY′加图（2）所示电压

【答案】A

【扫描电压若为（1），则为一个亮点；若为（2）则形成一自左向右的移动亮点；若为（3）则形成左右对称的两个亮点；若为（4）则形成从原点开始先向右到最远点再返回原点，再向左运动到最左，再返回原点的往返运动的亮点】

一、等效重力场问题

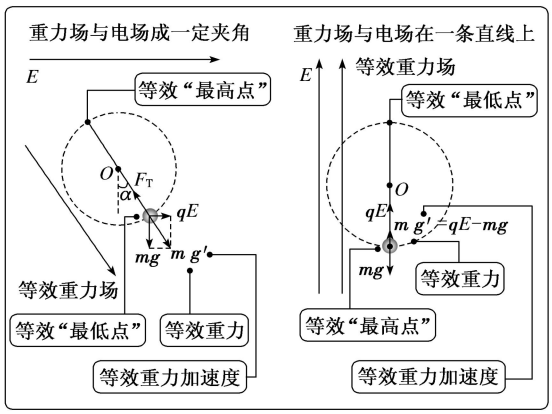
内容

物体仅在重力场中的运动是最常见、最基本的运动，但是对于处在匀强电场和重力场中物体的运动问题就会变得复杂一些。此时可以将重力场与电场合二为一，用一个全新的“复合场”来代替，可形象称之为“等效重力场”。

与等效重力场的对应概念及解释

等效重力场	物理意义	重力场、电场叠加而成的复合场
等效重力		重力、电场力的合力
等效重力加速度		等效重力与物体质量的比值
等效“最低点”		物体做圆周运动时与等效重力场方向平行的直径与圆轨道的第二个交点（沿等效重力场的方向看）
等效“最高点”		物体做圆周运动时与等效重力场方向平行的直径与圆轨道的第一个交点（沿等效重力场的方向看）

举例



等效法求解电场中圆周运动问题的解题思路

1→求出重力与电场力的合力 $F_{合}$，将这个合力视为一个“等效重力”。

2→将 $a=\frac{F_{合}}{m}$ 视为“等效重力加速度”。

3→找出等效“最低点”和等效“最高点”。

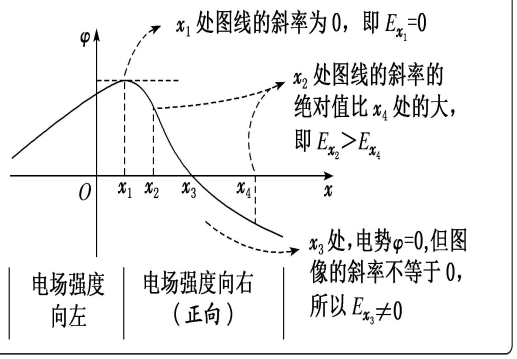
4→将物体在重力场中做圆周运动的规律迁移到等效重力场中分析求解。

二、图像问题

(1) φ-x 图像

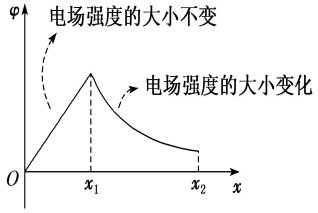
01 电场强度的大小等于 φ-x 图线的斜率的绝对值，电场强度为零处，φ-x 图线存在极值，其切线的斜率为零。

02 在φ-x图像中可以直接判断各点电势的大小，并可根据电势大小关系确定电场强度的方向。



03 在φ-x图像中分析电荷移动时电势能的变化，可用$W_{AB}=qU_{AB}$，进而分析W_{AB}的正负，然后作出判断。

04 在φ-x图像中可以判断电场类型，如果图线是曲线，则表示电场强度的大小是变化的，电场为非匀强电场；如果图线是倾斜的直线，则表示电场强度的大小是不变的，电场为匀强电场。



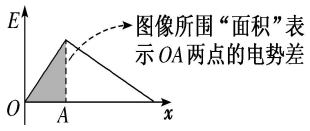
05 在φ-x图像中可以判断电荷的受力方向。已知电场强度的方向，可得电荷在电场中的受力方向。

φ-x图像的斜率判断电场强度随位置变化的规律：$k=\frac{\Delta\varphi}{\Delta x}=\frac{U}{d}=E_x$，斜率的大小表示电场强度的大小，正负表示电场强度的方向。

(2) E-x 图像

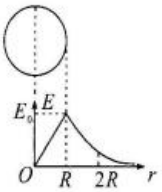
01 E-x图像反映了电场强度随位移变化的规律，$E>0$表示电场强度沿x轴正方向；$E<0$表示电场强度沿x轴负方向。

02 在给定了电场的E-x图像后，可以由图线确定电场强度的变化情况，电势的变化情况，E-x图线与x轴所围图形“面积”表示电势差，两点的电势高低根据电场方向判定。在与粒子运动相结合的题目中，可进一步确定粒子的电性、动能变化、电势能变化等情况。



03 在这类题目中，还可以由E-x图像画出对应的电场，利用这种已知电场的电场线分布、等势面分布或场源电荷来处理相关问题。

【典例】均匀带正电荷的球体的半径为R，在空间产生球对称的电场，场强大小沿半径分布的规律如图所示。已知E_0的大小，图像与横轴围成的面积中$0\sim R$部分的面积恰好等于$R\sim 2R$部分的面积，则(　　).



A. 可以判断$E-r$曲线与坐标r轴所围成的面积单位是库仑

B. 球心与球表面间的电势差$\Delta U=RE_0$

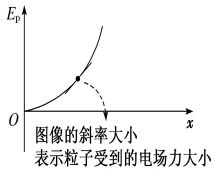
C. 若电荷量为q的正电荷在球面R处由静止释放，则它运动到$2R$处时电场力做功qRE_0

D. 已知带电球在$r\geqslant R$处的场强$E=k\frac{Q}{r^2}$，Q为该球体的总电荷量，则该球所带的电荷量为$Q=\frac{E_0R^2}{k}$

【答案】D

(3)E_p-x 图像

电势能与位移的关系图像(E_p-x 图像)的斜率大小表示粒子受到的电场力大小。



仅在电场力作用下，粒子运动的轨迹可能与电场线重合也可能不重合，当电场线为直线且粒子初速度为0或速度方向与电场力方向在同一直线上时，粒子的运动轨迹与电场线重合。



【解题思路】

1. 由电势能的表达式$\Delta E_p=qE\Delta x$得$qE=\frac{\Delta E_p}{\Delta x}$，因此图像的斜率大小表示电场力的大小，可进一步分析出场强的变化规律.

2. 利用图像转化分析出电势的变化规律：电势能$E_p=q\varphi$，将E_p-x图像转化为$\varphi-x$图像，利用$\varphi-x$图像分析电势的变化规律.

若电荷带正电，则$\varphi-x$图像与E_p-x图像的变化规律完全相同；若电荷带负电，则$\varphi-x$图像与E_p-x图像的变化规律完全相反.

3. 利用电势能的变化规律分析出电场对电荷或带电体的做功特点：电场力做正功，电势能减小；克服电场力做功，电势能增大.

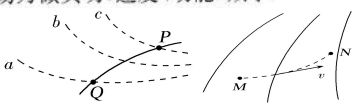
三、带电粒子的运动轨迹问题

1. 判断速度方向：带电粒子运动轨迹上某点的切线方向为该点的速度方向.

2. 判断电场力（或电场强度）的方向：带电粒子仅受电场力作用做曲线运动，粒子运动的过程中所受电场力的方向指向轨迹的凹侧，再根据粒子的正负判断场强方向.

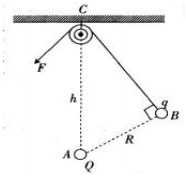
3. 判断电势能的变化：若电场力与速度的方向成锐角，则电场力做正功，电势能减少；若电场力与速度的方向成钝角，则电场力做负功，电势能增加.

4. 判断速度或动能的变化：若电场力与速度的方向成锐角，则电场力做正功，速度（动能）增大；若电场力与速度的方向成钝角，则电场力做负功，速度（动能）减小.

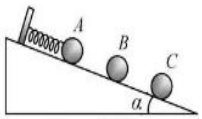


四、平衡类问题

【方法一】相似法（适合多力多夹角变化的三力平衡问题）

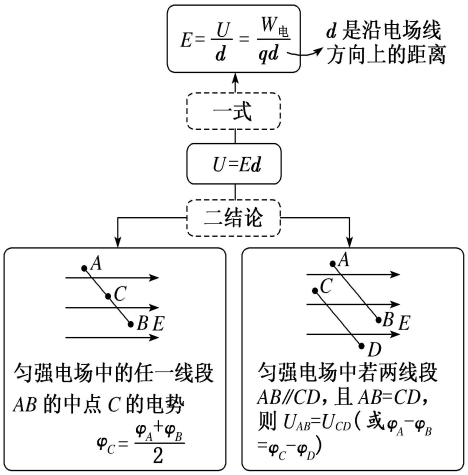


【方法二】整体法与隔离法（适合多个电荷的平衡问题的处理）



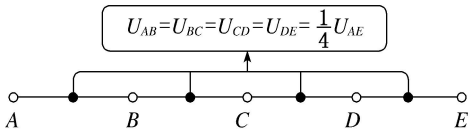
五、在匀强电场中找等势点，画电场线求场强问题

1.在匀强电场中由公式 U＝Ed 得出的“一式二结论”

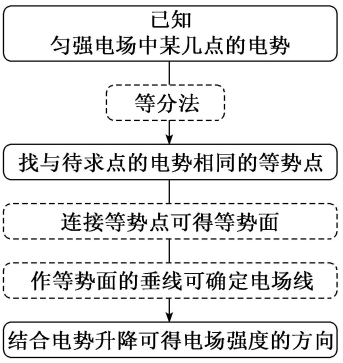


2.等分法及其应用

如果把某两点间的距离等分为 n 段，则每段两端点的电势差等于原电势差的$\frac{1}{n}$，采用这种等分间距求电势问题的方法，叫做等分法。



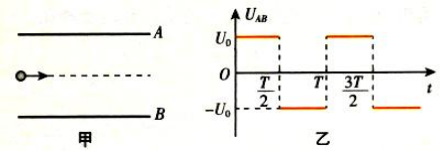
用“等分法”求匀强电场中某点的电势以及电场强度方向的方法



六、带电粒子在交变电场中的运动问题

1. 对于此类问题，一定要充分利用图像，尤其是 a-t 图像和 v-t 图像，可由 a-t 图像推出 v-t 图像，由 v-t 图像获得速度和相应位移信息，同时要充分利用对称性。

2. 对于偏转运动问题，要进行运动的分解，充分利用运动的独立性和等时性。



七、带电体在匀强电场中的运动

1. 电场力与重力共线

将重力与电场力的合力等效成新的重力场，等效重力场的重力加速度大小为 $g'=\frac{qE\pm mg}{m}$，方向可能竖直向上，也可能竖直向下，再利用运动学公式与能量关系解决相关问题.

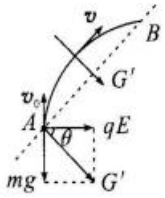
2. 电场力与重力不共线（一定是特殊角）

若重力与电场力不共线，则重力与电场力的合力必须与速度方向共线，否则带电体无法做直线运动，通过合力的方向求解相关问题.

3.类平抛、类斜抛运动

若电场力与重力不共线，利用矢量三角形定则或平行四边形定则合成，合力等效成新的重力场，等效重力场的重力加速度 $g'=\frac{F_{合}}{m}$.

带电体做曲线运动，如带电体做类平抛运动或类斜抛运动时，利用平抛运动或斜抛运动的相关解题技巧解决相关问题.



【方法思路总结】

重力与电场力均为恒力，可能相互垂直，也可能是其他角度，但一定是特殊角，合力也为恒力. 带电体做类平抛或类斜抛运动，题型有以下几类：

1. 求解电场力与重力的比值

从题中条件已知轨迹上某两点的速度大小与方向，根据电场力与重力的夹角特点，将曲线运动分解成两个互相垂直的的分运动，一分运动的方向与重力方向共线，另一分运动与重力方向垂直，利用分运动的等时性，找到电场力与重力之间的关系.

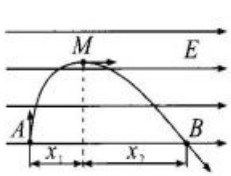
2. 求解粒子运动轨迹中速度的最小值

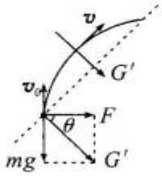
解法一：利用等效重力场思想，将重力与电场力的合力等效成新的重力场，带电体做类平抛或类斜抛运动，根据类平抛或类斜抛的运动特点，在等效重力场的最高点时速度最小.

解法二：利用数学函数思想，构造数学函数模型，利用函数的极值解出带电体速度的最小值.

3. 求解轨迹的位移的极值问题

带电体在某个方向上位移的极值问题的解题思路：将曲线运动分解成两个互相垂直的分运动，一分运动的方向与该方向共线，另一分运动的方向与该方向垂直，当带电体在该方向上的速度减小至 0 时，带电体在该方向上运动的距离最远.





4.电场中的功能关系

1. 若带电粒子只在电场力作用下运动，则其动能和电势能之和保持不变.

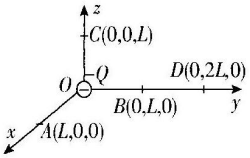
2. 若带电体只在重力和电场力作用下运动，则其机械能和电势能之和保持不变.

3. 若带电体在重力、电场力和其他力的作用下运动，则其机械能、电势能与其他力做的功相互转化.

八、立体空间电场问题

基本思路：把立体图转化为平面图。

【典例 1】在空间直角坐标系 $O-xyz$ 中，C、A、O、B 为四面体的四个顶点，坐标位置如图所示，在坐标原点 O 处固定着一个负点电荷. 下列说法正确的是 （ ）



A. A、B、C 三点电势相等

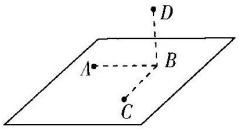
B. D 点的场强大小为 B 点的 $\frac{1}{2}$

C. 将质子由 D 点移到 A 点，电场力做负功

D. 电子在 A 点的电势能大于其在 D 点的电势能

【答案】AD

【典例 2】如图所示，A、B、C 三点在同一水平面上，D 点在 B 点正上方，A、C 到 B 的距离均为 d，D 到 B 的距离为 $\frac{\sqrt{2}}{2}d$，AB 垂直于 BC. 空间存在着匀强电场，一个质量为 m、电荷量为 $+q$ 的粒子从 A 移到 D 时，电场力做的功为零，从 C 移到 D 时，电场力做的功也为零，从 B 移到 D 时，克服电场力做的功为 W，则下列说法正确的是 （ ）



A. 粒子从 A 移到 C 时，电场力做正功

B. 电场强度既垂直于连线 AD，又垂直于连线 AC

C. 电场强度的大小为 $\frac{W}{qd}$

D. B 点和 C 点间的电势差为 $\frac{W}{q}$

【答案】B

【记忆口诀】

场能性质是电势，场线方向电势降。
场力做功是 qU ，动能定理不能忘。
电场特点类重力，理解困难用类比。
电容充放储能量，两类问题抓不变。
带电粒子加偏转，动能定理类平抛。
图像平衡力学法，等效重力帮大忙。

【本章高频考点】

1.电势、电势能、电势差问题（电场力做功等问题）。
2.含电容器的电路（动态）分析，讨论 Q、U、E、φ、E_p 的变化。
3.带电粒子在电场中的加速与偏转。
4.等效重力场问题。

第三部分 物理方法概述

一、图像法

物理图像能从整体上反映出两个或两个以上物理量的定性或定量关系，根据题意画出图像，再利用图像分析寻找答案，能够避免烦琐的计算，迅速找出正确选项。

二、等效转换法

等效转换法是指在用常规思维方法无法求解那些有新颖情境的物理问题

时，灵活地转换研究对象或采用等效转换法将陌生的情境转换成我们熟悉的情境，进而快速求解的方法。

第四部分 易错、疑难问题选

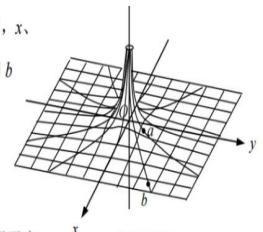
1. 如图所示为计算机生成的点电荷电势分布三维图，x、y 轴组成被研究的平面，φ 轴为电势的大小，a 和 b 为图中的两点，若取无穷远处电势为零，则

A. 该点电荷带负电

B. a 点所在曲线为电场线

C. a 点处位置的电场强度大于 b 点处位置的电场强度

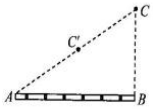
D. 负电荷从 a 点处位置移动到 b 点处位置，其电势能减小



第 11 题图

【答案】C

2.如图所示，AB 为均匀带有电荷量为 $+Q$ 的细棒，C 为 AB 棒附近的一点，CB 垂直于 AB. AB 棒上电荷形成的电场中 C 点的电势为 φ_0，φ_0 可以等效成 AB 棒上电荷集中于 AB 上某点 P（未画出）处、带电荷量为 $+Q$ 的点电荷所形成的电场在 C 点的电势. 若 PC 的距离为 r，由点电荷电势的知识可知 $\varphi_0 = k\frac{Q}{r}$. 若某点处在多个点电荷形成的电场中，则电势为每一个点电荷在该点所产生的电势的代数和. 根据题中提供的知识与方法，我们可将 AB 棒均分成两段，并看成两个点电荷，就可以求得 AC 连线中点 C' 处的电势为 （ ）

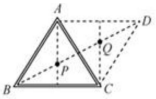


A. φ_0　　B. $\sqrt{2}\varphi_0$

C. $2\varphi_0$　　D. $4\varphi_0$

【答案】C

3.三等长绝缘棒 AB、BC、CA 连成正三角形，每根棒上均匀分布等量同种电荷，测得图种 P、Q 两点（均为相应正三角形得中心）的电势分别 U_p 和 U_Q，若撤去 AC 棒，则 P、Q 两点的电势分别为（ ）

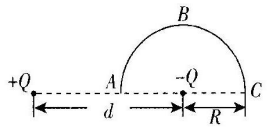


A. $\frac{2}{3}U_P$，$\frac{1}{2}U_Q+\frac{1}{6}U_P$　　C. $\frac{1}{3}U_P$，$\frac{1}{2}U_Q+\frac{1}{6}U_P$

B. $\frac{2}{3}U_P$，$U_Q-\frac{1}{3}U_P$　　D. $\frac{1}{3}U_P$，$\frac{2}{3}U_Q$

【答案】B

【变式】对于真空中电荷量为 q 的静止点电荷而言，当选取离点电荷无穷远处的电势为零时，离点电荷距离为 r 处的电势为 $\varphi=\frac{kq}{r}$（k 为静电力常量）. 如图所示，两电荷量大小均为 Q 的异种点电荷相距为 d，现将一质子（电荷量为 e）从两电荷连线上的 A 点沿以负电荷为圆心、半径为 R 的半圆形轨迹 ABC 移到 C 点，在质子从 A 点到 C 点的过程中，系统电势能的变化情况为 （ ）



A. 减少 $\frac{2kQeR}{d^2-R^2}$　　B. 增加 $\frac{2kQeR}{d^2+R^2}$

C. 减少 $\frac{2kQe}{d^2-R^2}$　　D. 增加 $\frac{2kQe}{d^2+R^2}$

【答案】A

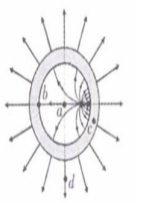
4. 一空心金属球壳内球心右侧放一带正电点电荷，于是在球内外形成如图所示电场，其中 a 在球心，b 在球壳内壁，c 在球壳内，d 在球外，若以无穷远电势为 0，下列说法正确的是

A. b 点和 c 点电势均为 0

B. c 点电场强度大于 a 点电场强度

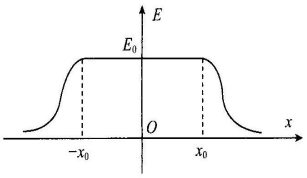
C. 若一电子从 a 点运动到 b 点，电势能减少

D. a、b 两点电势差小于 a、d 两点的电势差



【答案】D

5.完全相同的平行金属板 A、B 带等量异种电荷，两板正中心记为 O 点，以 O 点为坐标原点建立 x 轴，规定



由 A 板垂直指向 B 板的方向为场强的正方向，得出了 x 轴上的场强 E 随坐标 x 变化的图像，如图所示. 根据图像判断下列说法正确的是 （ ）

A. 沿 x 轴正方向电势降低

B. A、B 两板的电势差一定为 $2x_0E_0$

C. 将电子由 O 点静止释放，电势能增加

D. 使电子沿 x 轴在板间移动，电势能不变

【答案】D

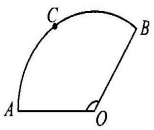
6. 如图所示，扇形 OAB 的圆心角 $\angle AOB=120°$，半径 OA 为 2 m，C 点为 AB 弧的中点. 已知匀强电场的电场线平行于扇形所在的平面，一个电荷量为 1×10^{-7} C 的正点电荷 q_1 由 O 点移到无穷远处（电势为 0）克服电场力做功为 5×10^{-7} J，若将电荷量为 2×10^{-7} C 的负点电荷 q_2 从 O 点移到 A 点电势能增加 4×10^{-7} J，将此负电荷沿圆弧从 A 移到 C 电场力做功 8×10^{-7} J，则 （ ）

A. O 点电势为 5 V

B. A 点的电势高于 O 点电势

C. 电场强度大小为 2 V/m

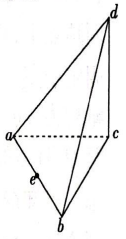
D. 电荷 q_1 在 B 点的电势能为 1×10^{-7} J



【答案】C

7.如图所示，有四面体 abcd，

$dc\perp$底面abc，$ab=bc=ac=cd=10$ cm，e为ab的中点。空间中存在匀强电场，把一个电荷量$q=2.0\times10^{-4}$ C的正电荷从c点移到e点，电场力做的功$W=2\times10^{-3}$ J，而将其从d点分别移到a点、b点，电场力做的功均为零。已知c点电势$\varphi_c=-2$ V。则



A. 电场强度的方向由$c\to e$

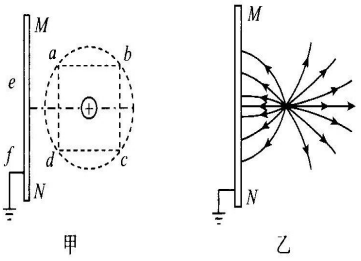
B. 电场强度的大小为$\frac{100\sqrt{21}}{3}$ V/m

C. a点的电势为8 V

D. cb中点的电势为-7 V

【答案】BD

8. 如图甲所示，MN为无限大的不带电的金属平板，且与大地连接. 现将一个电荷量为$+Q$的点电荷置于板的右侧，电场线分布如图乙所示. a、b、c、d四个点是以点电荷为圆心的圆上的四个点，四点的连线刚好组成一个正方形，其中ab、cd与金属平板垂直，下列说法不正确的是（　　）



A. b、c两点具有相同的电势

B. a、d两点具有相同的电场强度E

C. 将一个正试探电荷从平板上的e点沿着板移到f点的过程中，电势能一直保持不变

D. 将一个负试探电荷q从a点沿着ad方向移动到d点的过程中，电势能先减小后增大

【答案】B

9. 如图所示，在直角坐标系中，先固定一不带电金属导体球B，半径为L，球心O'坐标为$(2L,0)$。再将一点电荷A固定在原点O处，带电量为$+Q$。a、e是x轴上的两点，b、c两点对称地分布在x轴两侧，a、b、c点到坐标原点O距离相等，Od与金属导体球B外表面相切于d点，已知金属导体球B处于静电平衡状态，则下列说法正确的是

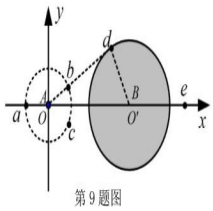
A. 各点的电势关系为$\varphi_a=\varphi_b=\varphi_c>\varphi_d>\varphi_e$

B. 将电子从b点移至e点，电势能减小

C. 导体球B上的感应电荷在外表面d处的场强大小

$$E=\frac{kQ}{3L^2}$$

D. 仅将导体球B的内部变成空心，则空间的电场线分布不会发生变化



第9题图

【答案】D

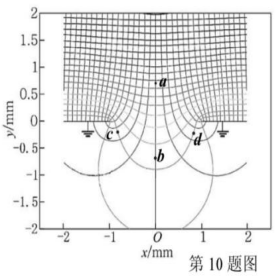
10. 有一块带有狭缝的无限大导体板，现将导体板接地，并在上方真空区域加一个匀强电场，缝隙附近的电场线和等势线的分布如图10所示。下列说法正确的是

A. ab所在的直线为电场线

B. b点的电场强度大于a点

C. 缝隙两边的导体板带异种电荷

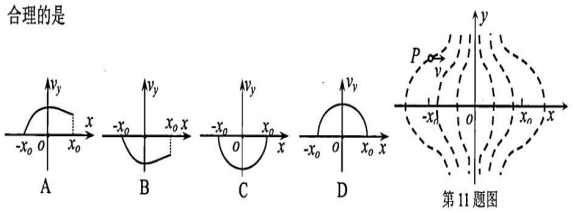
D. cb两点间的电势差U_{cb}与bd两点间的电势差U_{bd}满足$U_{cb}=U_{bd}$



第10题图

【答案】A

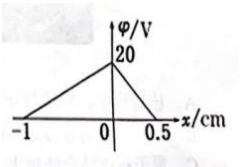
11. 静电透镜是利用电场使电子束汇聚或发散的装置，其中部分静电场分布如图所示。虚线表示静电场在xoy平面内的一簇等势线，其形状关于ox轴、oy轴对称。等势线的电势沿x轴正向增大，且相邻两等势线的电势差相等。一个电子经过P点（其横坐标为$-x_0$）时，速度与ox轴平行。适当控制实验条件，使该电子通过电场区域时仅在ox轴上方运动。在通过电场区域过程中，该电子沿y方向的分速度v_y，随位置坐标x变化的示意图合理的是



第11题图

【答案】B

12. 反射式速调管是常用的微波器件之一，它利用电子团在电场中的振荡来产生微波，其振荡原理与下述过程类似。已知静电场的方向平行于x轴，其电势φ随x的分布如图所示。一质量$m=2.0\times10^{-20}$kg，电荷量$q=2.0\times10^{-9}$C的带负电的粒子从（-1，0）点由静止开始，仅在电场力作用下在x轴上往返运动。则（　　）



A. x轴左侧电场强度E_1和右侧电场强度E_2的大小之比$\frac{E_1}{E_2}=2$

B. 粒子在0～0.5cm区间运动过程中的电势能减小

C. 该粒子运动过程中电势能变化量的最大值为4.0×10^{-8}J

D. 该粒子运动的周期$T=4.0\times10^{-8}$s

【答案】C

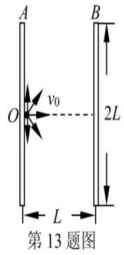
13. 如图所示，竖直放置的平行金属板A、B，板间距离为L，板长为$2L$，A板内侧中央O处有一个体积不计的放射源，在纸面内向A板右方均匀地以等大的速率朝各个方向辐射正离子，离子质量$m=8.0\times10^{-26}$kg，离子电荷量$q=8.0\times10^{-19}$C，离子的速率$v_0=2.0\times10^5$m/s，若不计离子重力与离子间相互作用，忽略极板的边缘效应，则

A. 当$U_{AB}=0$时，打到B板上的离子占总离子数的$\frac{3}{5}$

B. 当$U_{AB}=640$V时，能打到B板上的离子速度均相同

C. 当$U_{AB}=1280$V时，打到B板的离子占总离子数的$\frac{53}{90}$

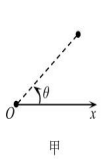
D. 当$U_{AB}=-1280$V时，所有离子均不能打在B板上



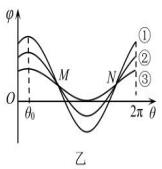
第13题图

【答案】C

14. 为了测定某平行于纸面的匀强电场的场强，某同学进行了如下操作：取电场内某一位置O点为坐标原点建立x轴，选取x轴上到O点距离为r的P点(图中未标出)，以O为圆心、r为半径作圆，如图甲所示；从P点起逆时针沿圆周测量圆上各点的电势φ和转过的角度θ；当半径r分别取r_0、$2r_0$、$3r_0$时，绘制的φ-θ图像对应乙图中③、②、①，它们的电势均在$\theta=\theta_0$时达到最大值，最大值分别为$2\varphi_0$、$3\varphi_0$、$4\varphi_0$。下列说法正确的是



甲



乙

A. O点为电势零点

B. 场强的大小为$\frac{\varphi_0}{r_0}$

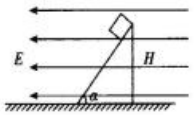
C. 场强方向与x轴正方向的夹角为θ_0

D. 曲线①、②、③的交点M和N在同一等势线上

【答案】BD

15. 质量为m的物块，带电荷量为$+Q$，开始时让它静止在倾角为$\alpha=60°$的固定光滑绝缘斜面顶端，整个装置放在方向水平、大小为$E=$

$\frac{\sqrt{3}mg}{Q}$的匀强电场中，如图所示，斜面高为H，释放物块后，物块落地的速度大小为（　　）



A. $(2+\sqrt{3})gH$　　B. $\sqrt{\frac{5}{2}gH}$

C. $2\sqrt{2gH}$　　D. $2\sqrt{gH}$

【答案】C

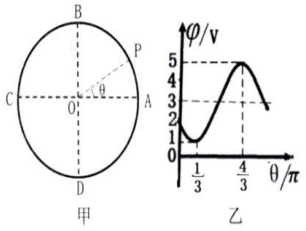
16. 在平行于纸面的匀强电场中，有一个圆形区域ABCD，如图甲，圆心为O，半径为R=0.1m，P为圆弧上的一个点，从A点出发沿逆时针运动，θ为PO连线旋转的角度，即∠POA=θ，P点电势随θ角度的变化如图乙所示，则

A. $\varphi_A<\varphi_B$

B. 匀强电场场强大小为10V/m

C. 电子在B点的电势能大于在C点的电势能

D. 电子从C点沿圆弧逆时针移动到D点，电场力先做负功后做正功



甲　　乙

【答案】C

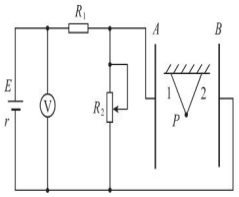
17.如图所示，内阻不可忽略的电源、定值电阻R_1、滑动变阻R_2、平行板电容器AB和电压表构成闭合回路，平行板电容器A、B板间用两根绝缘细线1、2对称地系着一带正电的小球P.把滑动变阻器的滑动触头由下向上滑动，P始终处于静止状态，对此过程的判断正确的是（　　）

A. 电压表示数变小

B. 滑动变阻器的功率一定先增大后减小

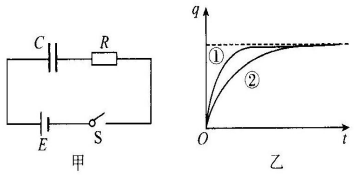
C. 细线1对P的拉力增大

D. 细线1、2对P的拉力的合力不变



【答案】C

18. 电容器作为储能器件，在生产生活中有着广泛的应用，在如图甲所示的充电电路中，R为电阻，E为电源（内阻不计）．通过改变电源和电阻对同一电容器进行两次充电，对应的q-t曲线如图乙中①②所示，则下列说法正确的是（　　）



A. 充电过程中，电容器带电荷量增加，电流增大

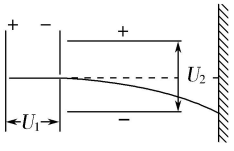
B. 充电过程中，电阻两端的电压在逐渐减小

C. 两次充电，电源的电动势大小不相等

D. 两次充电，电阻R大小相等

【答案】B

19.如图所示，一价氢离子($^1_1$H)和二价氦离子($^4_2$He)的混合体，经同一加速电场加速后，垂直射入同一偏转电场中，偏转后，打在同一荧光屏上，则它们(　　)

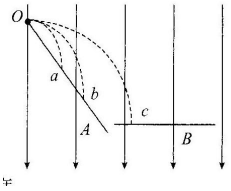


A. 同时到达屏上同一点　　B. 先后到达屏上同一点

C. 同时到达屏上不同点　　D. 先后到达屏上不同点

【答案】B

20.如图所示。从混合放射源射出的正离子a、b、c分别从O点水平射入竖直向下的匀强电场中，a、b打到倾斜的绝缘板A上不同的点，c打在水平绝缘板B上，不计重力，则（　　）



A. c的初速度一定大于a的初速度

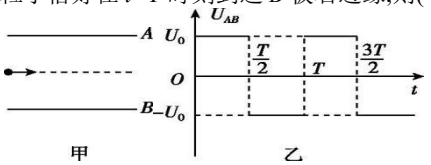
B. c从O到B板的时间一定大于a从O到A板的时间

C. c打在B板时的速度方向一定与b打在A板时的速度方向不平行

D. a、b打在A板上的速度方向可能不平行

【答案】C

21.如图甲所示，平行金属板相距为d，在两金属板间加一如图乙所示的交变电压．有一个粒子源在平行板左边界中点处沿垂直于电场方向连续发射速度相同的带正电粒子(不计重力)，t=0时刻进入电场的粒子恰好在t=T时刻到达B板右边缘，则(　　)



A. 任意时刻进入的粒子到达电场右边界经历的时间都为T

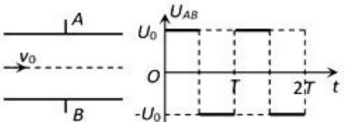
B. $t=\frac{T}{4}$时刻进入的粒子到达电场右边界的速度最大

C. $t=\frac{T}{4}$时刻进入的粒子到达电场右边界时距B板的距离为$\frac{d}{4}$

D. 粒子到达电场右边界时的动能与何时进入电场无关

【答案】AD

22.一对平行金属板长为L，两板间距为d，大量电子从平行板左侧以速度v_0沿两板的中线不断进入平行板之间，两板间所加交变电压U_{AB}如图所示，交变电压的周期T=$\frac{2L}{3v_0}$，已知t=0时刻进入电场的电子刚好从极板的上边缘飞出，不计重力，不计电子间相互作用，则（　　）



A. 电子在两板间运动的加速度保持不变

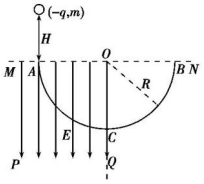
B. t=$\frac{T}{2}$时刻进入电场的电子，将从极板下边缘离开电场

C. 所有电子离开电场时的速度都大于v_0

D. 从两板中线处离开电场的电子，其速度方向与极板平行

【答案】B

23.如图所示，MPQO为有界的竖直向下的匀强电场，电场强度为E，ACB为光滑固定半圆形轨道，轨道半径为R，A、B为水平直径的两个端点，AC为四分之一圆弧，一个质量为m，电荷量为-q的带电小球，从A点正上方H处静止释放，并从A点沿切线进入半圆轨道，不计空气阻力及一切能量损失，关于带电小球的运动情况，下列说法正确的是(　　)



A. 小球一定能从 B 点离开轨道

B. 小球在 AC 部分可能做匀速圆周运动

C. 若小球能从 B 点离开，上升的高度一定小于 H

D. 小球到达 C 点的速度可能为零

【答案】BC

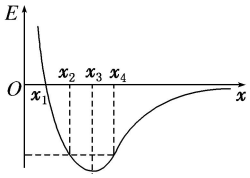
24. 静电场在 x 轴上的电场强度 E 随 x 的变化关系如图所示，在 x 轴上有四点：x_1、x_2、x_3、x_4，相邻两点间的距离相等，x 轴正向为场强正方向，带正电的点电荷沿 x 轴运动，则点电荷(　　)

A．x_2 和 x_4 两点处电势相等

B．由 x_1 运动到 x_4 的过程中加速度先增大后减小

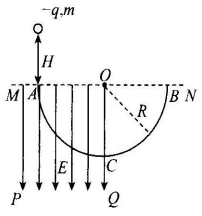
C．由 x_1 运动到 x_4 的过程中电势能先增大再减小

D．设电荷从 x_2 运动到 x_1，电场力做功 W_1，电荷从 x_3 运动到 x_2，电场力做功 W_2，则 $W_1=W_2$



【答案】B

25.如图所示，ACB 为固定的光滑半圆形轨道，轨道半径为 R，A、B 为水平直径的两个端点，AC 为 $\frac{1}{4}$ 圆弧，$MPQO$ 为竖直向下的有界匀强电场(边界上有电场)，电场强度的大小 $E=\frac{2mg}{q}$. 一个质量为 m，电荷量为 $-q$ 的带电小球，从 A 点正上方高为 H 处由静止释放，并从 A 点沿切线进入半圆轨道，小球运动过程中电荷量不变，不计空气阻力，已知重力加速度为 g. 关于带电小球的运动情况，下列说法正确的是　(　　)



A. 若 $H=R$，则小球刚好沿轨道到达 C 点

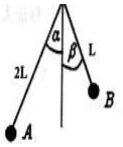
B. 若 $H>R$，则小球一定能到达 B 点

C. 若小球到达 C 点时对轨道压力为 $6mg$，则 $H=\frac{9}{2}R$

D. 若 $H=3R$，则小球到达 C 点时对轨道压力为 $5mg$

【答案】C

26.如图所示，A，B 是质量比为 1：2，都带正电的小球，用两根长分别为2L和L的绝缘轻绳系住后悬挂于天花板上的同一点O，当系统平衡后，两根绳与竖直方向的夹角分别为α和β，则α和β的关系为(　　)

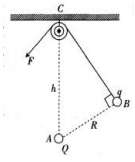


【答案】α=β

27.如图，在光滑定滑轮 C 正下方与 C 相距 h 的 A 处固定一电荷量为 Q 的正点电荷，电荷量为 q 的带正电小球 B(可视为质点)用绝缘细线拴着，另一端用适当大小的力 F 拉住，使 B 处于静止状态，此时 B 与 A 点的距离为 R，B 和 C 之间的细绳与 AB 垂直。若 B 的重力为 G，缓慢拉动细线直到 B 接近定滑轮，则(　)

A.F 先逐渐减小，再逐渐增大　　B.F 逐渐减小

C.B 受到的库仑力逐渐减小　　D.B 受到的库仑力逐渐增大



【答案】A

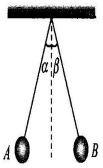
28. 有三个完全相同的金属小球 A、B、C，用两根同样长的细绳把 A、B 两球悬挂在一点，如图所示，已知小球 A 所带的电荷量大于小球 B 所带的电荷量，两小球静止时，悬线与竖直方向的偏角分别记为 α 和 β，再用不带电的小球 C 接触小球 A，然后移走小球 C，A、B 两球再次达到平衡，悬线与竖直方向的偏角分别记为 α' 和 β'. 操作过程小球 C 与人绝缘，下列说法正确的是　(　　)

A. 第一次平衡时，偏角 α 一定小于偏角 β

B. 第二次平衡时，A、B 两球可能不等高

C. 两次平衡比较，$\tan\alpha<2\tan\alpha'$，$\tan\beta<2\tan\beta'$

D. 两次平衡比较，$\tan\alpha>2\tan\alpha'$，$\tan\beta>2\tan\beta'$



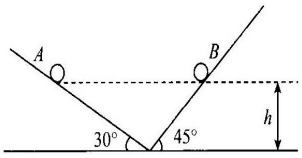
【答案】C

29. 如图所示在两个对接的绝缘光滑斜面上放置了电荷量大小均为 q 的两个小球 A 和 B(均看成质点)，两个斜面的倾角分别是 30°和 45°，小球 A 和 B 的质量分别是 m_1 和 m_2. 若平衡时，两个小球均静止在离斜面底端高度为 h 的同一水平线上，斜面对两个小球的弹力分别是 F_{N1} 和 F_{N2}，静电力常量为 k，下列说法正确的是　(　　)

A. $q=\sqrt{\frac{(4+2\sqrt{3})m_2g}{k}}h$

B. $\frac{m_1}{m_2}=\frac{\sqrt{3}}{3}$

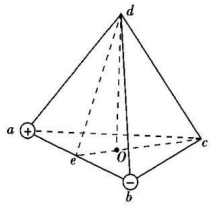
C. $\frac{F_{N1}}{F_{N2}}=\sqrt{3}$



D. 若同时移动两球在斜面上的位置，只要保证两球在同一水平线上，则两球仍能平衡

【答案】A

30.如图所示，a、b、c、d 为正四面体的四个顶点，O 点为 d 点在底面上的投影，e 为 ab 边中点，在 a 点放置一个电荷量为+Q 的点电荷，在 b 点放置一个电荷量为-Q 的点电荷，则以下说法错误的是(　　)



A. c、d 两点的电场强度相等

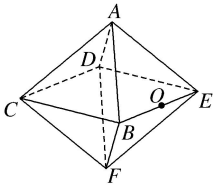
B. 沿 c、e 连线移动一电荷量为+q 的点电荷，电场力始终不做功

C. e 点、O 点场强方向相同

D. 将一电荷量为-q 的点电荷从 d 点移到 c 点，电场力先做负功，后做正功

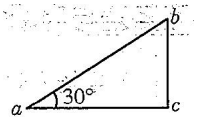
【答案】D

31. 如图所示，匀强电场中的六个点 A、B、C、D、E、F 为正八面体的六个顶点，已知 BE 中点 O 的电势为零，A、B、C 三点的电势分别为 7 V、−1 V、3 V，则 E、F 两点的电势分别为(　　)



【答案】1 V、−3 V

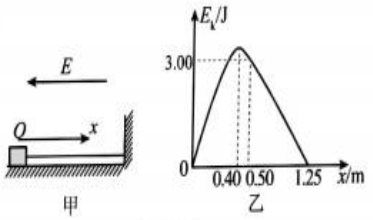
32.如图所示，匀强电场中有 a、b、c 三点，在以它们为顶点的三角形中，$\angle a=30^0$，$\angle c=90^0$，电场方向与三角形所在平面平行，已知 a、b、c 点的电势分别为（$4-\sqrt{3}$）V，（$4+\sqrt{3}$）V 和 4V，则该三角形的外接圆上最高电势为(　　)



【答案】6V

33.

13. 如图甲所示，一带电量为+1×10⁻⁸C 的物块置于绝缘光滑水平面上，其右端通过水平弹性轻绳固定在竖直墙壁上，整个装置处于水平向左的匀强电场中。用力将物块向左拉至 O 处后由静止释放，用传感器测出物块的位移 x 和对应的速度，作出物块的动能 E_k-x 关系图象如图乙所示，其中 0.40 m 处物块的动能最大但未知，0.50 m 处的动能为 3.00J，0.50 m~1.25 m 间的图线为直线，其余部分为曲线。弹性轻绳的弹力与形变量始终符合胡克定律，下列说法正确的是（　）



（第 13 题图）

A. 物块会作往复运动，且全过程是简谐运动

B. 该匀强电场的场强为 4×10^7N/C

C. 弹性绳的劲度系数为 10N/m

D. 弹性绳弹性势能的最大值为 5.00J

【答案】D

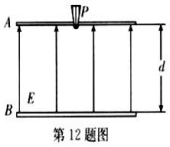
34. 静电喷漆技术具有效率高、质量好等优点，其装置示意图如图所示。A、B 为两块水平放置的平行金属板，间距 $d=1.0$ m，两板间有方向竖直向上，大小为 $E=1.0\times10^3$ N/C 的匀强电场。在 A 板的中央放置一个安全接地的静电油漆喷枪 P，油漆喷枪的半圆形喷嘴可向各个方向均匀地喷出初速度大小均为 $v_0=1.0$ m/s、质量均为 $m=5.0\times10^{-14}$ kg 和带电量均为 $q=-2.0\times10^{-15}$ C 的带电油漆微粒。不计微粒所受空气阻力及微粒间相互作用，油漆微粒最后都落在金属板 B 上。则

A. 沿水平方向喷出的微粒运动到 B 板所需时间为 $\frac{\sqrt{5}}{10}$ s

B. 沿不同方向喷出的微粒，从喷出至到达 B 板，动能变化量为 2.0×10^{-12} J

C. 若其他条件均不变，d 增大为原来的 2 倍，喷涂面积增大为原来的 2 倍

D. 若其他条件均不变，E 增大为原来的 2 倍，喷涂面积减小为原来的 $\frac{1}{2}$



第 12 题图

【答案】C

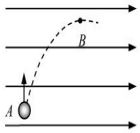
35. 风洞实验的工作原理如图所示，小球从 A 点以某一初速度竖直向上抛出后沿虚线运动，B 为虚线的最高点，运动中小球受到水平向右的恒定风力，其大小小于重力，则小球从 A 点运动到 B 点过程中，

A. 风力先做负功再正功

B. 机械能先减小后增加

C. 动能先增加后减小

D. 风力与重力的合力功率某一时刻为零



【答案】D

第十一章　电路及其应用

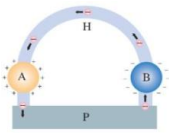
第一部分　基础知识点

第 1 节　电源和电流

一、电源

1.形成持续电流的条件：有自由移动的电荷；有电势差。

2.电源的作用：通过“搬运”电荷，保持正、负极间有一定的电势差，从而保持电路中有持续的电流。（能把电子从 A 搬运到 B）



二、恒定电流

1.恒定电场：由稳定分布的电荷所产生的稳定的电场。

【由于在恒定电场中，任何位置的电荷分布和电场强度都不随时间变化，所以它的基本性质与静电场相同。在静电场中所讲的电势、电势差、电场强度等关系，在恒定电场中同样适用】

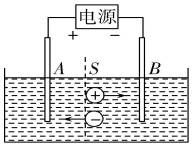
2.恒定电流：大小、方向都不随时间变化的电流。

3.电流：表示电流的强弱程度，用字母 I 表示。

①定义：通过导体横截面的电荷量 q 跟通过这些电荷量所用时间 t 的比值叫做电流.

②定义式：$I=\frac{q}{t}$，q 为在时间 t 内通过导体横截面的电荷量。

$I=\frac{q}{t}=\frac{|q_1|+|q_2|}{t}=\frac{(n_1+n_2)e}{t}$（在电解液中电量为阴阳离子绝对值之和）。【若不同时刻，则需考虑电流的方向及相互抵消问题】



【特别注意】若形成电流的自由电荷同时有正、负电荷时，要注意以下情形：若已知在电解液中 t 时间内到达阳极的负离子和到达阴极的正离子的电荷量均为 q，此时电流强度 $I=\frac{q}{t}$，而非 $I=\frac{2q}{t}$. 因为阳极多了电荷量为 q 的负离子，可理解为有 $\frac{q}{2}$ 的负离子由阴极到达阳极，同时有 $\frac{q}{2}$ 的正离子由阳极到达了阴极，故 t 时间内流过导电液横截面的电荷量为 q.

③微观表达式：I＝nqSv，其中 n 为导体中单位体积内自由电荷的个数，q 为每个自由电荷的电荷量，S 为导体的横截面积，v 为自由电荷定向移动的速率。

【拓展】区分三个速度

a.自由电子无规则热运动的速率约为 $10^5 m/s$；

b.自由电子定向移动的平均速率约为 $10^{-4} m/s$；

c. 电流传导（电场建立）的速率为 $3\times10^8 m/s$。

④方向：规定正电荷定向移动的方向为电流方向. 【在外电路中电流由高电势端流向低电势端，在电源内部电流由负极流向正极】

⑤电流既有大小又有方向，但它的运算遵循代数运算法则，是标量。

⑥单位：安培，符号是 A,1 A＝1 C/s.

⑦对电流本质的认识盲点

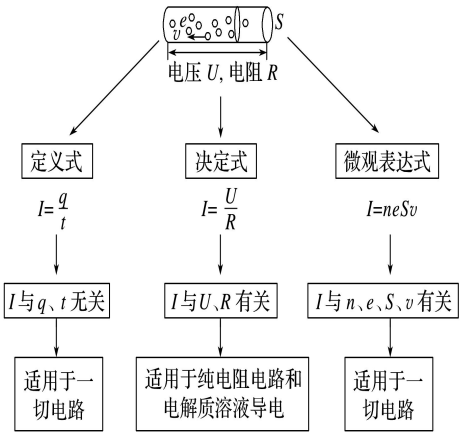
a.误认为电流定向移动的速率等于电流的传导速率。

b.误认为当正、负离子同时定向移动形成电流时，通过横截面的电荷量为正、负离子电荷量之差。

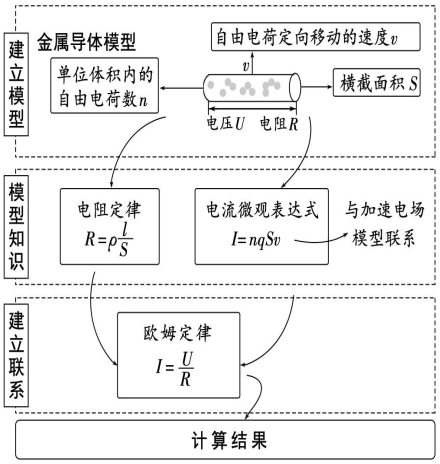
c.误认为电流有大小有方向是矢量。

d.误认为电荷定向移动方向为电流方向。

⑧**三个电流表达式的比较**



⑨**金属导体模型解题思路**



⑩电流微观表达式

(1)导体单位长度电子数为 n 的微观表达式为 $I=nev$.

(2)导体单位体积电子数为 n 的微观表达式为 $I=neSv$.

(3)电子环形电流的微观表达式为

$$I=\frac{e^2}{2\pi r^2}\sqrt{\frac{kmr}{m}}.$$

三、电池的容量

1.定义：电池放电时能输出的总电荷量叫电池的容量。

2.单位：安时（Ah)或毫安时（mAh)

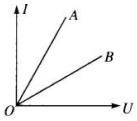
3.电动汽车中的电池工作过程：锂离子电池以碳材料为负极，以含锂的化合物为正极。在充电的过程中，通过化学反应，电池的正极有锂离子生成，锂离子通过电解液运动到电池的负极。负极的碳材料有很多微孔，到达负极的锂离子就嵌在这些微孔中，嵌入的锂离子越多，电池中充入的电荷量也就越多。当汽车开动时，在负极的锂离子又会通过电解液返回正极，回到正极的锂离子越多，则放出的电荷量也就越大。

第 2 节　导体的电阻

一、电阻

（1）定义：导体两端所加电压与通过导体的电流之比叫导体的电阻。

（2）公式：$R=\dfrac{U}{I}$



导体的 I-U 图

⚠ 提醒

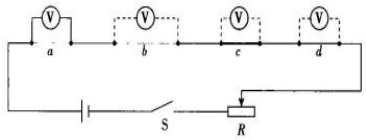
不能认为 R 与 U 成正比、与 I 成反比。导体的电阻是导体本身的一种性质，与 U、I 无关。

(3)物理意义：描述导体对电流的阻碍作用。

(4)单位：欧姆，简称欧，符号是 Ω。常用单位还有千欧(kΩ)和兆欧(MΩ)，1 kΩ=10^3 Ω，1 MΩ=10^6 Ω。

二、影响导体电阻的因素

(1)实验思路：串联电路中电流处处相等，则 $I=\frac{U_a}{R_a}=\frac{U_b}{R_b}=\frac{U_c}{R_c}=\frac{U_d}{R_d}$。这样知道它们的电压之比就能知道它们的电阻之比，然后得出长度、横截面积和材料这三个因素与导体电阻的关系。



在长度、横截面积和材料三个因素中，b、c、d 与 a 相比，分别只有一个因素不同。

(2)实验过程

①导体电阻与长度的关系：b 与 a，长度不同，横截面积、材料相同。比较 a、b 的电阻之比与它们的长度之比。

②导体电阻与横截面积的关系：c 与 a，横截面积不同，长度、材料相同。比较 a、c 的电阻之比与它们的横截面积之比。

③导体电阻与材料的关系：d 与 a，材料不同，长度、横截面积相同。比较 a、d 的电阻是否相等。

④改变滑动变阻器滑片的位置，可以获得多组实验数据，以得到更可靠的结论。

三、导体的电阻率

(1)电阻的大小：同种材料的导体，其电阻 R 与它的长度 l 成正比，与它的横截面积 S 成反比；导体电阻还与构成它的材料有关。

(2)公式：

$R=\rho\frac{l}{S}$：ρ 为材料的电阻率，l 为导体的长度，S 为导体的横截面积

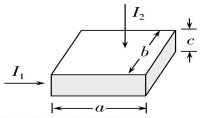
【注意】导体的电阻大小与电流方向有关

通过电流 I_1 时，长度 $l=a$.横截面积 $S=bc$

则 $R=\rho\frac{l}{S}=\frac{\rho a}{bc}$

通过电流 I_2 时，长度 $l=c$.横截面积 $S=ab$

则 $R=\rho\frac{l}{S}=\frac{\rho c}{ab}$.



电阻的两个公式的比较

公式	$R=\rho L/S$	$R=U/I$
意义	电阻的决定式	电阻的定义式
理解	说明了导体的电阻由哪些因素决定，R 由 ρ、L、S 共同决定	提供了一种测电阻的方法——伏安法，R 与 U、I 均无关
适用范围	适用于任何导体	只适用于金属导体或电解质溶液

(3)电阻率 ρ

①电阻率是反映材料导电性能好坏的物理量。单位是欧姆·米，符号是 Ω·m。

②决定因素：电阻率由材料自身的特性和温度决定。

a. 纯金属的电阻率较小，合金的电阻率较大。

b. 金属的电阻率随温度的升高而增大，电阻温度计就是利用这点制成的。

c. 有些半导体材料的电阻率随温度的升高而减小，常用于制作热敏电阻。

d. 有些合金，如锰铜合金和镍铜合金，电阻率几乎不受温度变化的影响，常用来制作标准电阻。

(4)超导现象

①定义：一些金属在温度特别低时电阻可以降到 0，这种现象叫超导现象。

②应用：超导材料在发电、输电等方面有非常广泛的应用前景。

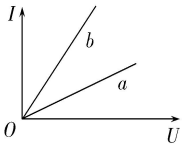
【规律】电阻丝拉伸、对折时，紧扣电阻丝的体积不变。

电阻丝均匀拉伸 n 倍、截成相等的 m 段后并联电阻为：$R=\left(\frac{n}{m}\right)^2R_0$。

四、伏安特性曲线

1. 定义：在实际应用中，常用横坐标表示电压 U，纵坐标表示电流 I，这样画出的 I–U 图像叫导体的伏安特性曲线。

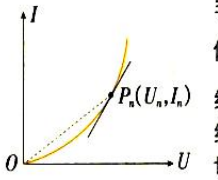
2. 线性元件：导体的伏安特性曲线是一条过原点的直线，即电流 I 与电压 U 成正比，具有这种伏安特性的电学元件叫线性元件（欧姆定律适用的元件）。如金属导体、电解质溶液。



线性元件：线性元件的伏安特性曲线的斜率等于电阻的倒数。

3. 非线性元件

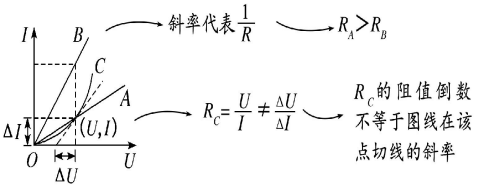
伏安特性曲线不是过原点的直线，即电流与电压不成正比，这类电学元件叫非线性元件（欧姆定律不适用的元件）。如气态导体和半导体元件。



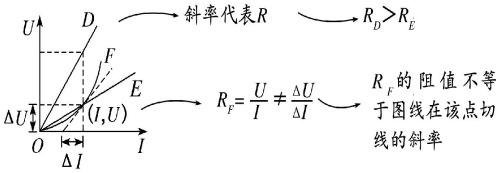
非线性元件：I–U 图线是曲线，导体电阻 $R_n=\frac{U_n}{I_n}$，即电阻等于图线上的点 (U_n,I_n) 与坐标原点连线的斜率的倒数，而不等于该点切线的斜率的倒数。

【注意】纯电阻电路遵守欧姆定律，非纯电阻电路不遵守欧姆定律；无论是线性元件还是非线性元件，只要是纯电阻元件，电阻都可由 $R=\frac{U}{I}$ 计算。

4.I—U 图像与 U—I 图像的比较



I–U 图像（伏安特性曲线）



U–I 图像 → 不能说是“伏安特性曲线”

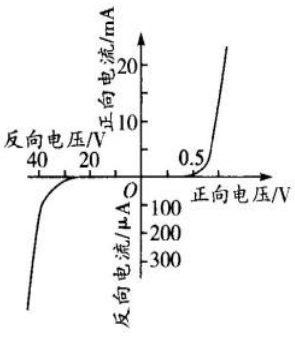
【伏安特性曲线是 I–U 图，不是 U–I 图】

【小结】伏安特性曲线上每一点的电压坐标与电流坐标的比值即 $R=\frac{U}{I}$ 对应这一状态下的电阻。要特别注意 R 不一定等于 $\frac{\Delta U}{\Delta I}$。并且不可用 $K=\tan\alpha$ 来求 R（因纵横坐标单位长度不一定相同）。

5.晶体二极管的伏安特性曲线

①二极管具有单向导电性，加正向电压时，二极管电阻较小，通过二极管的电流较大；加反向电压时，二极管的电阻较大，通过二极管的电流很小.

②由图象可以看出随电压的增大，图线的斜率在增大，表示其电阻随电压升高而减小.



6.气体导电：气体中既有像金属中那样的电子导电，也有像电解质中那样的离子导电。

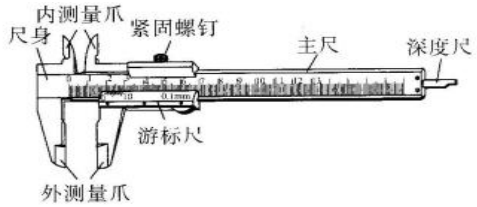
7.人体含水量约为 70%，水中有钠离子、钾离子等离子存在，因此容易导电，脂肪则不容易导电。

第 3 节　实验：导体电阻率的测量

一、实验 1　长度的测量及测量工具的选用

（一）游标卡尺

1.游标卡尺实物图



2.游标卡尺的规格

刻度格数(分度)	刻度总长度	每小格的值	每小格与 1 mm 的差值	精确度(可精确到)
10	9 mm	0.9mm	0.1 mm	0.1 mm
20	19 mm	0.95mm	0.05 mm	0.05 mm
50	49 mm	0.98mm	0.02 mm	0.02 mm

3.游标卡尺的读法

(1)游标卡尺的读数＝主尺读数＋游标尺读数。

(2)游标卡尺的读数方法：“三看”

①第一看→精确度

【游标卡尺的精度取决于游标尺与主尺分度值的差值】

②第二看→游标尺上的 0 刻度线位置，区分零刻度与标尺最前端例如(如图 1 所示)

③第三看→游标尺的哪条(第 N 条)刻度线与主尺上的刻度线对齐

④游标卡尺不需要估读，后面不能随意加零或去零。

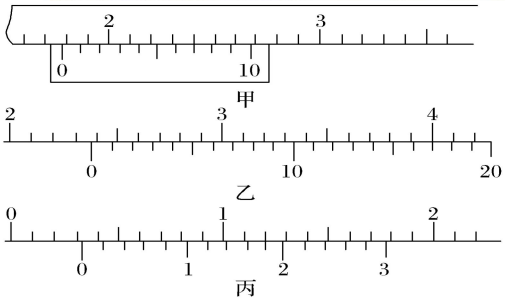
【具体读法】

（一）加法式：主尺上的读数+精确度×游标上对齐的格数

主尺上读的毫米数+0.1n(精度 0.1 mm)(十分度卡尺)

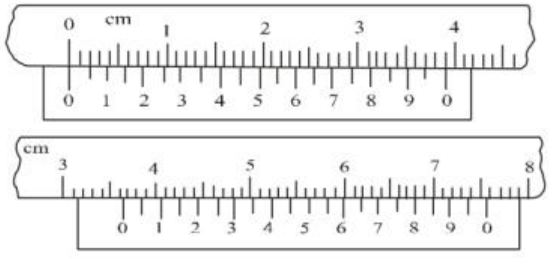
主尺上读的毫米数+0.05n(精度 0.05 mm)(二十分度卡尺)

主尺上读的毫米数+0.02n(精度 0.02 mm)(五十分度卡尺)



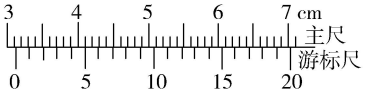
答案 17.7 mm　23.85 mm　3.18 mm

【变式】图 1 为原理，读图 2.



【答案】 36.80mm（或 36.85mm）

【典例 1】新式游标卡尺的刻线看起来很“稀疏”，使读数显得清晰明了，便于使用者正确读取数据．通常游标卡尺的刻度有 10 分度、20 分度和 50 分度三种规格；新式游标卡尺也有相应的三种，但刻度却是 19 mm 等分成 10 份，39 mm 等分成 20 份，99 mm 等分成 50 份，如图就是一个“39 mm 等分成 20 份”的新式游标卡尺．



(1)它的精确度是_____mm．

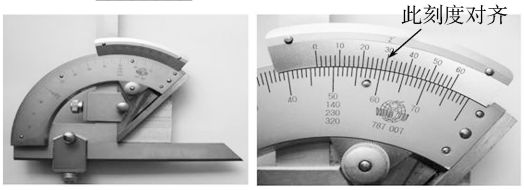
(2)用它测量某物体的厚度，读数是_____cm．

解析 (1)游标上 20 格对应的长度为 39 mm，即每格长为 1.95 mm，游标上每格比主尺上每两格小Δx＝0.05 mm，故精确度为 0.05 mm．

(2)这种游标卡尺的读数方法为主尺读数＋游标对准刻度×Δx＝31 mm＋5×0.05 mm＝31.25 mm＝3.125 cm．

【答案】 (1)0.05 (2)3.125

【典例 2】如图甲所示，万能角度尺是利用游标读数原理来直接测量工件角度或进行划线的一种角度量具，它有一个可转动的圆盘(即主尺)在圆盘的边缘标有表示圆心角的刻度，在圆盘的外侧有一个固定不动的圆弧状游标尺，如图乙所示，主尺上 29°对应的弧长与游标上 30 个格对应的弧长相等，图乙中万能角度尺所测量的角度为_____．

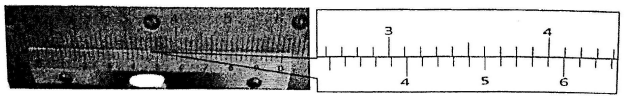


甲　　乙

解析 从主尺上读得 46°，再从游标上恰好第 15 个格与下面对齐为 15×$\frac{1}{30}$×60′＝30′，因此刻度为 46°30′．

【答案】 46°30′

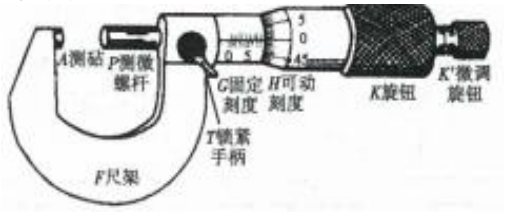
（二）减法式：对齐格子主尺上的读数－每小格的长度×游标上对齐的格数



【答案】38mm-27×0.98mm =11.54mm

（二）螺旋测微器

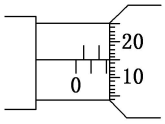
1.实物图



2.精确度：0.01mm.估读到 0.001mm（千分尺）

3.读法：固定刻度+可动刻度

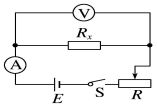
$$l=(0.5n+0.01k)mm$$



【答案】2.150 mm【以 mm 为单位，有且必须有三位小数】

二、实验 2　金属线电阻率的测量

1.**实验原理**：把金属丝接入如图所示的电路中，用电压表测金属丝两端的电压，用电流表测通过金属丝的电流，根据 $R=\frac{U}{I}$计算金属丝的电阻 R，然后用毫米刻度尺测量金属丝的有效长度 l，用游标卡尺测量金属丝的直径 d，计算出金属丝的横截面积 S；根据电阻定律 $R_x=\rho\frac{L}{S}$，得出计算金属丝电阻率的公式$\rho=\frac{RS}{l}=\frac{\pi d^2R}{4l}=\frac{\pi d^2U}{4lI}$



2.**实验器材**

被测金属丝，直流电源(4 V)，电流表(0～0.6 A)，电压表(0～3 V)，滑动变阻器(50 Ω)，开关，导线若干，游标卡尺，毫米刻度尺．

3.**数据处理**

(1)在求 R_x 的平均值时可用两种方法

①第一种是用 $R=\frac{U}{I}$算出各次的数值，再取平均值．

②第二种是用 U－I 图线的斜率求出．

(2)计算电阻率：将记录的数据 U、I、l、d 的值，代入电阻率计算公式$\rho=\frac{RS}{l}=\frac{\pi d^2R}{4l}=\frac{\pi d^2U}{4lI}$．

4.**注意事项**

(1)为了方便，测量直径应在导线连入电路前进行，为了准确测量被测金属丝的长度，应该在连入电路之后并且在拉直的情况下进行．

(2)本实验中被测金属丝的电阻值较小，故采用电流表外接法．

(3)开关 S 闭合前，滑动变阻器的阻值要调至最大．

(4)电流不宜太大(电流表用 0～0.6 A 量程)，通电时间不宜太长，以免被测金属丝温度升高，导致电阻率在实验过程中变大．

5.**误差分析**

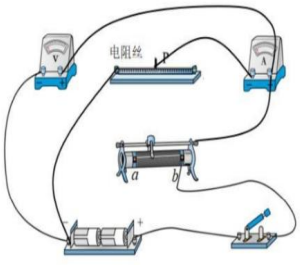
(1)被测金属丝直径、长度的测量带来误差．

(2)测量电路中电流表及电压表对电阻的测量有影响，因为电流表外接，所以 $R_{测}<R_{真}$．

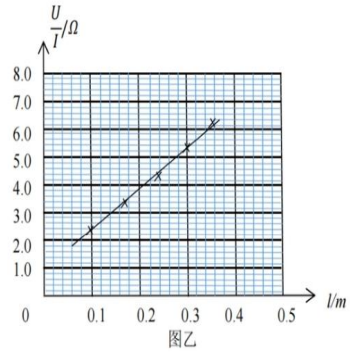
(3)通电电流过大，时间过长，致使被测金属丝发热，电阻率随之变化带来误差．【由于不需要测量多组数据，故用限流式接法】

【典例】

(2) 某同学根据图甲的电路连接器材来“探究导体电阻与其影响因素的定量关系”。实验时多次改变电阻丝接入电路的长度l、调节滑动变阻器的阻值，使电流表的读数I达到某一相同值时记录电压表的示数U，从而得到多个$\frac{U}{I}$的值，作出$\frac{U}{I}$-l图像，如图乙中图线所示。



图甲



图乙

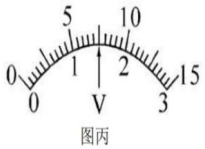
①滑动变阻器应选_____（选填“0~10Ω”或“0~200Ω”）。

②开关闭合前，滑动变阻器的滑片应该移动到_____端（选填“a”或“b”）。

③在某次测量时，量程为3V的电压表的指针位置如图所示，则读数U=_____V。

④已知电阻丝的横截面积为$6.0\times10^{-8}m^2$，则电阻丝的电阻率为_____Ω·m（结果保留2位有效数字）。

⑤本实验中电流表的内阻为_____（结果保留2位有效数字）。



图丙

【答案】

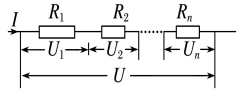
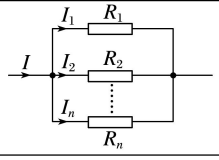
①0-10Ω，　②a，　③1.50V　　④$8.9\times10^{-7}\Omega m$（$8.7\times10^{-7}\Omega m$-$9.1\times10^{-7}\Omega m$）

⑤1.0Ω（0.90-1.1Ω）

第 4 节　串联电路和并联电路

一、串、联电路的特点

1．串联电路和并联电路的规律

	串联	并联
电路		
电流	$I=I_1=I_2=\cdots=I_n$	$I=I_1+I_2+\cdots+I_n$
电压	$U=U_1+U_2+\cdots+U_n$	$U=U_1=U_2=\cdots=U_n$
总电阻	$R=R_1+R_2+\cdots+R_n$	$\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\cdots+\frac{1}{R_n}$
电压、电流分配规律	$\frac{U}{R}=\frac{U_1}{R_1}=\frac{U_2}{R_2}=\cdots=\frac{U_n}{R_n}=I$	$IR=I_1R_1=I_2R_2=\cdots=I_nR_n=U$
功率分配	$\frac{P_1}{R_1}=\frac{P_2}{R_2}=\cdots=\frac{P_n}{R_n}=I^2$ $P_{总}=P_1+P_2+\cdots+P_n$	$P_1R_1=P_2R_2=\cdots=P_nR_n=U^2$ $P_{总}=P_1+P_2+\cdots+P_n$

2. 五个有用的结论

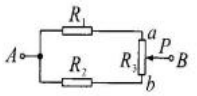
01 串联电路的总电阻大于电路中的任意一个电阻，串联电阻增多时，总电阻增大。

02 并联电路的总电阻小于任意支路的电阻，并联支路增多时，总电阻减小。

03 无论并联电路还是串联电路，只要某个电阻增大，总电阻就增大。

04 无论是并联电路还是串联电路，电路消耗的总功率等于各电阻消耗的电功率之和。

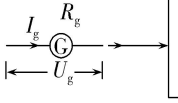
05. 两电阻并联，和为定值，阻值相等时并联电阻最大。



如图所示，如果 $R_1=R_2$，当 P 从 $a\to b$ 时，R_{AB} 先增大后减小，且当 $R_{aP}=R_{Pb}$（即 P 位于 a、b 的中点）时 R_{AB} 最大.

二、电压表和电流表的电路结构

1．小量程电流表Ⓖ(表头)的三个参数

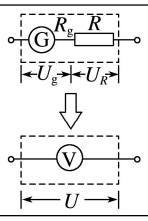
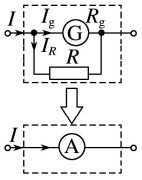
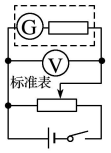
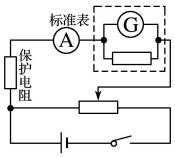


① 内阻 R_g：表头的电阻

② 满偏电流 I_g：指针偏转到最大刻度时，流过表头的电流

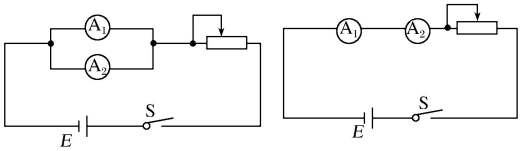
③ 满偏电压 U_g：表头通过满偏电流时，加在表头两端的电压，即 $U_g=I_gR_g$

2.电压表、电流表的改装

	改装为大量程电压表	改装为大量程电流表
原理	串联电阻分压	并联电阻分流
改装原理图		
分压电阻或分流电阻	$U=I_gR+I_gR_g$，所以 $R=\frac{U}{I_g}-R_g$	$I_gR_g=(I-I_g)R$，所以 $R=\frac{I_gR_g}{I-I_g}$
改装后的电表内阻	$R_V=R+R_g>R_g$	$R_A=\frac{RR_g}{R+R_g}<R_g$
需串（并）联的电阻值【n 为量程扩大的倍数】	$R=(n-1)R_g$	$R=\frac{R_g}{n-1}$
校准电路	改装成的电压表 	改装成的电流表 
备注	(1)改装后示数等于表头与分压电阻两端电压之和 (2)改装后量程等于满偏时表头与分压电阻两端电压之和 (3)同一表头改装的多量程电压表，内阻之比等于量程之比 (4)改装后表头满偏电压不变 (5)改装后指针偏角大小取决于通过表头的电流大小	(1)改装后示数等于通过表头与分流电阻的电流之和 (2)改装后量程等于满偏时通过表头与分流电阻的电流之和 (3)同一表头改装的多量程电流表，内阻之比等于量程的反比 (4)改装后表头满偏电流不变

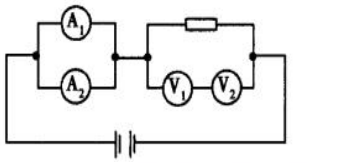
【规律】分压电阻越大，改装成的电压表量程越大；分流电阻越小，改装成的电流表量程越大。

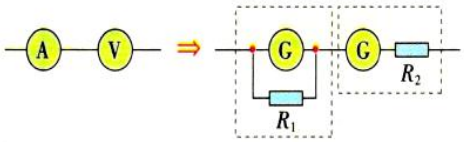
【拓展】由两完全相同的表头改装的电压、电流表接入电路后的示数和偏角关系



(a)　　(b)

(a)中示数不同，偏角相同；（b）中示数相同，偏角不同：





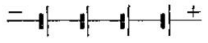
【本质】电表的指针偏转角度由通过表头的电流决定，电表的读数为其实际测量值。

【规律】1.电流表：串联等示数，并联等偏角

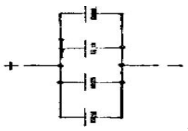
2.电压表：串联等偏角，并联等示数

3.电压表量程越大，内阻越大；电流表量程越大，内阻越小。

【补充 1：电源的串并联】



$E_{总}=E_1+E_2+\ldots$。$R_{总}=R_1+R_2+\ldots$



几个相同电源并联，则有：

$$\mathcal{E}_{并}=\mathcal{E}.\quad r_{并}=\frac{r}{n}.$$

【补充 2：电路的简化】

1.简化原则

(1)理想导线可任意长短。

(2)无电流的支路可去掉。

(3)电势相等的点可以合并。

(4)理想电流表可看作短路，理想电压表可看作断路。

(5)电容器两端电压稳定时，电容器所在的支路看作断路；有充放电时，看作通路。

2.常用方法

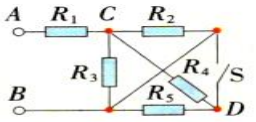
(1)**电流分支法**：先将各节点标上字母，判断各支路元件的电流方向(若无电流，可假设在总电路两端加上电压后判断)，按电流流向，自左向右将各元件、节点、分支逐一画出，加工整理即可。

(2)**等势点排列法**：先将各节点标上字母，判断各节点电势的高低，将各节点按电势高低自左向右排列，再将各节点间的支路画出，加工整理即可。

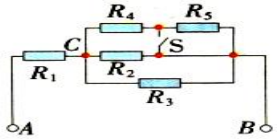
①凡用导线直接连接的各点的电势必相等(包括用理想电流表连接的点)。

②在外电路，沿着电流方向电势降低。

③接在同样两个等势点上的用电器为并联关系。

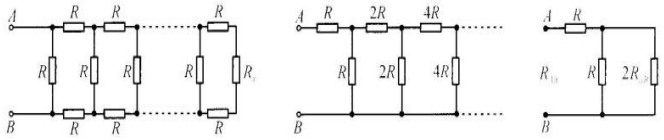


甲



乙

【网络电路】



总结

简化电路的原则：

(1)去除无电流的支路.

(2)电势相等的各点合并.

(3)理想导线可任意改变长短.

(4)理想电流表的电阻为零，理想电压表的电阻为无穷大.

(5)电压稳定时电容器可看作断路.

【专题】电阻的测量

一、实验器材的选择

1.原则：①安全②准确③操作方便。

2.具体要求：

①电源允许的最大电流不小于电路中的实际最大值电流。干电池中电流一般不允许超过 0.6A。

②用电器的额定电流不能小于通过该用电器的实际最大电流。

③电压表或电流表的量程不能小于被测电压或电流的最大值（若电表量程不够，选择小量程电表，然后进行扩程。不可选择过大量程，因为量程太大，测量误差太大）。

④电压表或电流表的指针应偏转到满刻度的$\frac{1}{3}\sim\frac{2}{3}$之间。

⑤从便于操作来考虑，限流式接法要选用于待测电阻相近的滑动变阻器，分压式接法要选用小阻值滑动变阻器。

3.**仪器选择的技巧**

(1)巧用电阻或电表阻值的信息

①电阻的阻值信息(一般在括号里面给出)：

等于： 一般可以用于电表改装或精确计算

约为： 用于估算

②电表的阻值信息

等于：a.用于改装大量程电表(电表无法改装成小量程)

b. 电流表可做电压表或电压表可做电流表使用

c. 除了测量电压(电流)外，电表的阻值可用于准确计算待测电阻、支路的电流或电压

约为：用于估算

(2)电流表、电压表量程的选择

①$U-I(I-U)$ 图象中坐标值或表格中数值范围；

②根据待测电阻的额定值(P、U、I)综合计算，确定电流表或电压表量程.

(3)滑动变阻器的选择

①分压法选小电阻，不超过滑动变阻器额定电流的情况下阻值越小越好；

②限流法中选最大阻值为待测电阻 2～3 倍的滑动变阻器；

③给定额定电流，一般实际流过电流不能超过额定电流

由此可知：若题干提供的滑动变阻器唯一，可由滑动变阻器的总阻值确定分压法或限流法；

若题目通过其他线索确定了分压接法或限流接法，应先确定接法，再确定滑动变阻器(一般有待选滑动变阻器).

二、实物连线问题的基本思路：

1.先画出电路图。

2.画线连接各元件，一般先从电源正极开始，按照电路原理图依次到开关，再到滑动变阻器，按顺序以单线连接方式将主电路中串联的元件依次串联起来，再将要并联的元件并联到电路中去.

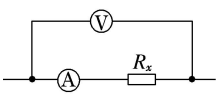
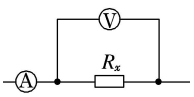
3.连线时要将导线接在接线柱上，两条导线不能交叉.

4.要注意电表的量程和正、负接线柱，要使电流从电表的正接线柱流入，从负接线柱流出.

5.滑动变阻器的接法：限流法，导线分别连接到上、下接线柱上(两个接线柱)；分压法，导线分别连接到上边一个接线柱和下边两个接线柱上(一上两下三个接线柱).

三、测量电路-----电流表的内接和外接

(1)电流表、电压表测电阻两种方法的比较

	电流表内接法	电流表外接法
电路图		
误差原因	电流表分压 $U_{测}=U_x+U_A$	电压表分流 $I_{测}=I_x+I_V$

电阻测量值	$R_{测}=\frac{U_{测}}{I_{测}}=R_x+R_A>R_x$，测量值大于真实值	$R_{测}=\frac{U_{测}}{I_{测}}=\frac{R_xR_V}{R_x+R_V}<R_x$，测量值小于真实值
适用条件	$R_A \ll R_x$	$R_V \gg R_x$
口诀	大内偏大(大电阻用内接法测量，测量值偏大)	小外偏小(小电阻用外接法测量，测量值偏小)

但当电流表内阻和电压表内阻都精准已知时，内接外接都可以，都可以消除电表引起的误差。

（2）大小电阻的判断方法

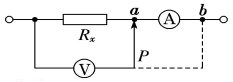
①阻值比较法：先将待测电阻的估计值与电压表、电流表内阻进行比较，若 R_x 较小，宜采用电流表外接法；若 R_x 较大，宜采用电流表内接法。简单概括为“大内偏大，小外偏小”。

②临界值计算法

$R_x<\sqrt{R_VR_A}$ 时，用电流表外接法；

$R_x>\sqrt{R_VR_A}$ 时，用电流表内接法。

③实验试探法：按如图所示接好电路，让电压表一根接线柱 P 先后与 a、b 处接触一下，如果电压表的示数有较大的变化，而电流表的示数变化不大，则可采用电流表外接法；如果电流表的示数有较大的变化，而电压表的示数变化不大，则可采用电流表内接法。



若 $\frac{|U_1-U_2|}{U_1}>\frac{|I_1-I_2|}{I_1}$，即电压表示数变化较显著时，宜采用电流表外接法。

若 $\frac{|U_1-U_2|}{U_1}<\frac{|I_1-I_2|}{I_1}$，即电流表示数变化较显著

记忆口诀：伏（福）大阻小宜外接；

伏（福）小阻大宜内接。

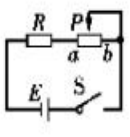
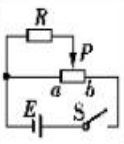
④特殊情况：已知任意电表的内阻

若电压表内阻已知，则此时应采用电流表外接法，用电流表的示数减去通过电压表的电流即可得到通过电阻电流的准确值，此时不存在误差；

若电流表内阻已知，则此时应采用电流表内接法，用电压表的示数减去电流表两端的电压即可得到电阻电压的准确值.

四、控制电路：滑动变阻器的两种接法

滑动变阻器的限流式接法和分压式接法的比较

方式 / 内容	限流式接法	分压式接法	对比说明
两种接法电路图(不计电原内阻)			串、并联关系不同
负载 R 上电压调节范围	$\frac{RE}{R+R_0}\leqslant U\leqslant E$	$0\leqslant U\leqslant E$	分压电路调节范围大
负载 R 上电流调节范围	$\frac{E}{R+R_0}\leqslant I\leqslant\frac{E}{R}$	$0\leqslant I\leqslant\frac{E}{R}$	分压电路调节范围大
闭合 S 前滑片位置	b 端	a 端	都是为了保护负载
额定条件下电路总功率	EI	$E(I+I_{aP})$	分压电路耗能较多

【总原则】：能限不分。

在下列情况下应选用分压式接法：

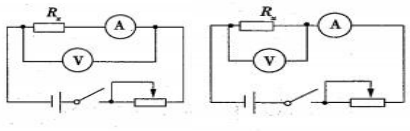
(1)待测电阻的阻值远大于滑动变阻器的最大阻值.

(2)题中要求待测电阻上电压变化范围大，且要求从零开始连续调节.

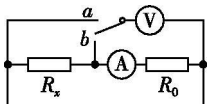
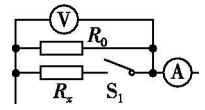
(3)若选用限流式接法，电路中的最小电流仍超过用电器的额定电流.

五、电阻的常用测量方法

（一）伏安法



图甲　　图乙

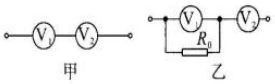
伏安法消除系统误差		$R_x=\frac{U_2}{I_2}-\frac{U_1}{I_1}$
		$R_x=\frac{U_1U_2}{I_2U_1-I_1U_2}$

（二）伏伏法

(1)使用伏伏法测电流表阻值

若电压表内阻已知，则可将其当作电流表、电压表和定值电阻来使用.

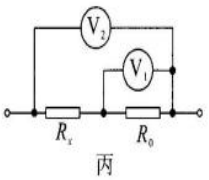
如图甲所示，当两电压表的满偏电流接近时，若已知 V_1 的内阻 R_1，则可测出 V_2 的内阻 $R_2=\frac{U_2}{U_1}R_1$.



如图乙所示，当两电压表的满偏电流 $I_{V1}\ll I_{V2}$ 时，若已知 V_1 的内阻 R_1，则 V_1 并联一定值电阻 R_0 后，同样可得 V_2 的内阻 $R_2=\frac{U_2}{\frac{U_1}{R_1}+\frac{U_1}{R_0}}$.

(2)使用伏伏法测未知电阻 R_x 的阻值

如图丙所示，已知电压表 V_1 的内阻 R_1，将 V_1 与 R_0 并联改装成电流表，另一电压表 V_1 采用内接法，可知 $R_x=\frac{U_2-U_1}{\frac{U_1}{R_0}+\frac{U_1}{R_1}}$.

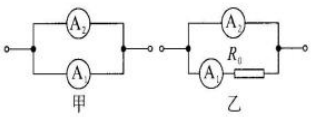


（三）安安法

(1)使用安安法测电流表阻值

若电流表内阻已知，则可将其当作电流表、电压表及定值电阻来使用.

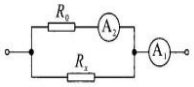
如图甲所示，当两电流表所能测得的最大电压接近时，若已知 A_1 的内阻 R_1，则可测得 A_2 的内阻 $R_2=\frac{I_1R_1}{I_2}$.



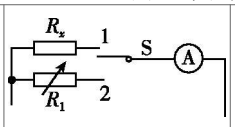
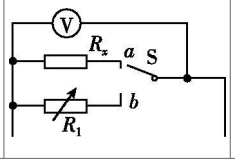
如图乙所示，当两电流表的满偏电压 $U_{A2}\gg U_{A1}$ 时，若已知 A_1 的内阻 R_1，则 A_1 串联一定值电阻 R_0 后，同样可测得 A_2 的电阻 $R_2=\frac{I_1(R_1+R_0)}{I_2}$.

(2)使用安安法测未知电阻 R_x 的阻值

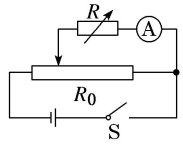
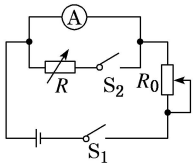
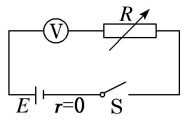
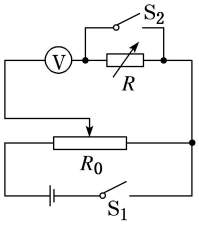
如图所示，已知电流表 A_2 的内阻 R_2，将 A_2 与 R_0 串联改装成电压表，另一电流表 A_1 外接，可知 $R_x=\dfrac{I_2(R_0+R_2)}{I_1-I_2}$.



（四）等效替代法

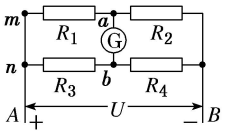
等效替代法		电源输出电压不变，将 S 合到 2，调节 R_1，使电流表的示数与 S 合到 1 时的示数相等，则 $R_x=R_1$
		电源输出电压不变，将 S 合到 b，调节 R_1，使电压表的示数与 S 合到 a 时的示数相等，则 $R_x=R_1$

（五）半偏法测电表内阻

	两种测量电路	操作步骤
半偏法近似测量电流表内阻	 【测量结果偏大】	①将电阻箱 R 的电阻调到零； ②闭合 S，调节 R_0，使电流表Ⓐ达到满偏 I_0； ③保持 R_0 不变，调节 R，使电流表Ⓐ示数为$\dfrac{I_0}{2}$； ④由上得 $R_A=R$。 ⑤实验条件：$R_0 \ll R_A$
	 【测量结果偏小】	①断开 S_2、闭合 S_1，调节 R_0，使Ⓐ表满偏为 I_0； ②保持 R_0 不变，闭合 S_2，调节 R，使Ⓐ表读数为$\dfrac{I_0}{2}$； ③由上得 $R_A=R$。 ④.实验条件：$R_0 \gg R_A$ ⑤测量结果：$R_{A测}=R<R_A$
半偏法近似测量电压表内阻	 【在不计 r 时测量结果无偏差】	①闭合 S，调节电阻箱阻值为 R_1 时，测得Ⓥ表示数为 U_1； ②改变电阻箱阻值为 R_2 时，测得Ⓥ表示数为$\dfrac{U_1}{2}$； ③由 $U_1+\dfrac{U_1}{R_V}R_1=\dfrac{U_1}{2}+\dfrac{U_1}{2R_V}R_2$ 得 $R_V=R_2-2R_1$。
	 【测量结果偏大】	①滑动变阻器的滑片滑至最右端，电阻箱的阻值调到最大； ②闭合 S_1、S_2，调节 R_0，使Ⓥ表示数指到满偏刻度； ③断开 S_2，保持 R_0 不变，调节 R，使Ⓥ表指针指到满刻度的一半； ④由上得 $R_V=R$。 ⑤.实验条件：$R_0 \ll R_V$ ⑥测量结果：$R_{V测}=R>R_V$

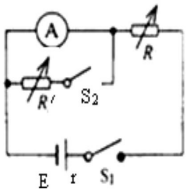
（六）惠斯通电桥法测电阻

在 ab 间接一灵敏电流计，如图所示，当其读数为零时即 $U_{ab}=0$，相当于 ab 间断路，此时 $\varphi_a=\varphi_b$，则有 $IR_1=I'R_3$，$IR_2=I'R_4$，两式相除得$\dfrac{R_1}{R_2}=\dfrac{R_3}{R_4}$，即 $R_1R_4=R_2R_3$，此时交叉电阻的乘积相等，所以知道其中任意三个电阻就可以求出第四个电阻的阻值。



【典例 1】

根据串联电路中电压分配关系可以把电流表改装成电压表.现给出下列实验器材：电流表、滑动变阻器、电键两只、标准电压表、电源、变阻箱等进行实验.该实验的实验步骤是：



(1) 用半偏法测电流表内阻.实验电路如图.

a.先断开S_2，闭合S_1，调节R，使电流表满偏；

b.然后闭合S_2，调节R'，使电流表达到半偏；

c.当R远大于R'时，可以认为$R_g=R'$.但是实际上存在测量误差，即R_g的测量值略_____(填“大于”、“小于”或“等于”)R_g的真实值.

(2) 把电流表改装成电压表

若某电流表满偏电流$I_g=300\mu A$，内阻$R_g=100\Omega$，将该表改装成量程为$3V$的电压表，需_____(填“串联”或“并联”) 阻值为$R_0=$_____Ω的电阻.

(3) 校正改装的电压表把改装的电压表和标准电压表进行校对时要每$0.5V$校对一次，校对电路中的滑动变阻器应选用_____式接法（填“分压”或“限流”）

【答案】（1）小于　（2）串联；9900　（3）分压

【典例 2】某物理兴趣实验小组测量一量程为 0～0.3 V 的电压表的内阻，已知电压表的内阻约为 300 Ω，除了待测量的电压表外，实验室还有以下实验器材：

A. 干电池(电动势约为 1.5 V，内阻可忽略不计)

B. 电阻箱 R_1(最大阻值为 999.9 Ω)

C. 滑动变阻器 R_2(阻值范围为 0～200 Ω)

D. 滑动变阻器 R_3(阻值范围为 0～10 Ω)

E. 定值电阻 R_4(R_4=20 Ω)

F. 定值电阻 R_5(R_5=200 Ω)

G. 导线若干和两个开关 S_1、S_2.

该小组通过讨论设计了如图 22-11 所示的电路，并进行了以下实验操作：

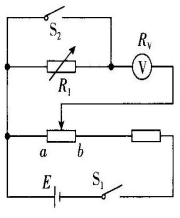


图 22-11

Ⅰ. 选择好合适的实验器材后,按照电路图连接好电路,将滑动变阻器的滑片移至最左端,闭合开关 S_2,将电阻箱的阻值调至最大值;

Ⅱ. 将开关 S_1 闭合,缓慢向右移动滑动变阻器的滑片,直到待测电压表的示数为 0.3 V;

Ⅲ. 将开关 S_2 断开,保持滑动变阻器的滑片不动,调节电阻箱的阻值,直到待测电压表的示数为 0.1 V,此时读出电阻箱的示数为 602.0 Ω.

根据以上操作回答下列问题:

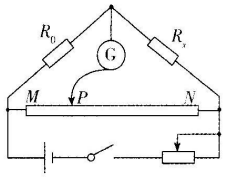
(1)为了减小实验误差,滑动变阻器应选择_____,定值电阻应选择_____.(填器材所对应的物理符号)

(2)待测电压表的内阻 R_V=_____Ω.

(3)根据该实验的测量原理以及操作过程分析,电压表内阻的测量值_____(选填“>”“=”或“<”)真实值. 如果仅将待测电压表换成另一个内阻更大的电压表进行测量,其测量值的误差将_____(选填“变大”“不变”或“变小”).

【答案】(1) R_3 R_4 (2) 301.0 (3) > 变小

【典例 3】用图示电路可以测量电阻的阻值. 图中 R_x 是待测电阻,R_0 是定值电阻,G 是灵敏度很高的电流表,MN 是一段均匀的电阻丝. 闭合开关,改变滑动触头 P 的位置,当通过电流表 G 的电流为零时,测得 $MP=l_1$,$PN=l_2$,则 R_x 的阻值为 ( )



A. $\frac{l_1}{l_2}R_0$　　B. $\frac{l_1}{l_1+l_2}R_0$

C. $\frac{l_2}{l_1}R_0$　　D. $\frac{l_2}{l_1+l_2}R_0$

【答案】C

六、探究型、设计型实验的解题思路

（一）设计原则

1.设计测量电路（考虑电流表内接还是外接法）。

2.设计控制电路（考虑分压式还是限流式）。

（二）电路设计问题的基本思路

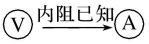
1.找原型：先根据实验目的和给出的条件把教材中的实验原型在头脑中完整地重现出来；

2.做对比：将实验中所给器材与原型中器材进行对比，看一下少了什么器材或什么器材的量程不满足要求；再看一下多给了什么器材，注意多给的器材可能就是解决问题的“金钥匙”；

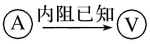
3.定方案：根据对比结果设计电路；

4.常用替代或改装：

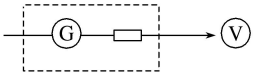
(1)内阻已知的电压表相当于小量程的电流表；



(2)内阻已知的电流表则相当于小量程的电压表；

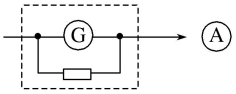


(3)灵敏电流计串大电阻改装成电压表：



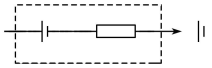
串大电阻

(4)灵敏电流计并小电阻改装成电流表；



并小电阻

(5)内阻较小的电源串定值电阻相当于内阻较大的电源.



【典例 4】小明要测量一量程为3V的电压表V_1的内阻R_{V1}:

(1) 他找来了一只多用电表，对多用电表进行正确操作后，两表笔与电压表的两接线柱接触，红表笔应接电压表的 _____ (填“正”、“负”)接线柱，多用电表的指针位置如图1所示，则 R_{V1} = _____ Ω.

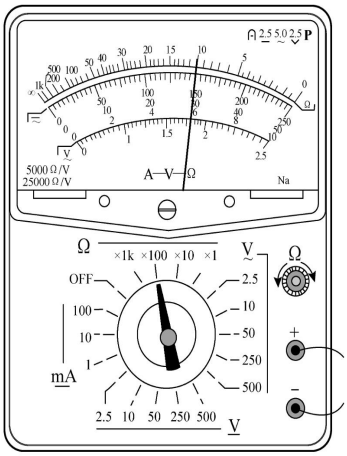


图1

(2) 为了更准确地测量电压表V_1的内阻，他找来了以下的实验室器材:

①待测电压表V_1，量程0～3V，内阻未知;

②电流表A，量程0.6A，内阻约0.2Ω;

③电压表V_2，量程5V，内阻约1.5kΩ;

④定值电阻$R_1=500\Omega$;

⑤定值电阻$R_2=50\Omega$;

⑥滑动变阻器R_3，最大阻值50Ω，额定电流1.0A;

⑦电源E，电动势6V，内阻约0.5Ω;

⑧开关S一个，导线若干.

他选择器材时除了选①⑥⑦⑧器材外，他还应选 _____ (填序号)

(3) 要求测量中尽量减小误差，并测多组数据. 请在虚线框中画出测量R_{V1}的实验电路图(相应器件标明英文字母)

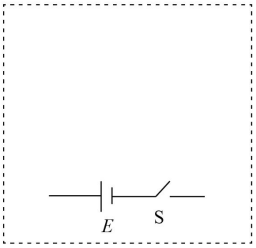
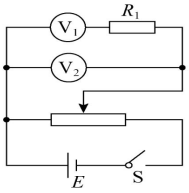


图2

(4) 写出待测电压表V_1的内阻表达式$R_{V1}=$_____(说明表达式中各物理量的含义).

【答案】(1)负　1000　(2)③④　(4) $\dfrac{U_1R_1}{U_2-U_1}$

(3)



【典例5】在一次课外活动中,物理兴趣小组成员小明从废旧的电视机上拆下一个定值电阻,电阻上的铭牌不清楚,大概为200 Ω.

(1)小明到实验室寻找到下列器材,拟采用伏安法尽可能精确测定该电阻阻值,并设计滑动变阻器为分压式连接.

电压表V:0~5 V,内阻约为3 kΩ;

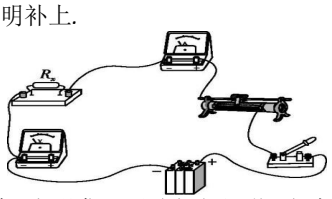
电流表A:0~300 mA,内阻R_A=10 Ω;

滑动变阻器R_1:0~5 Ω,额定电流2 A;

电源E:E=6 V,内阻不计.

若某次测量中电压表读数为U,电流表读数为I,那么小明测得的待测电阻的精确阻值的表达式为R_x=_____(用题中的字母表达).

(2)请不要改动已连接的导线,在如图的实物连接图中把还需要连接的导线帮小明补上.



(3)在上述实验中,小明发现无论如何调节,电流表指针偏转都比较小,为了改正这一缺陷,小明又找到了两个定值电阻,并选用其中一个定值电阻重新设计了电路:

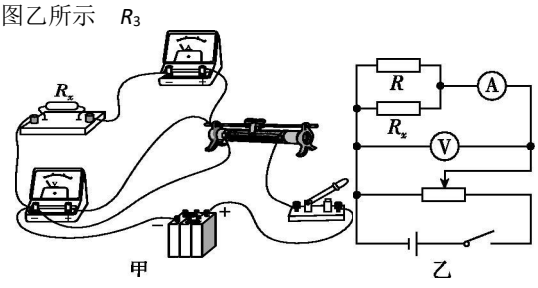
定值电阻R_3:阻值为20 Ω;

定值电阻R_4:阻值为400 Ω.

请在不改变滑动变阻器和电表接法的基础上,在虚线框内帮助小明设计好新的电路并画出电路图,其中定值电阻应该选择(选填"R_3"或"R_4").

【答案】(1) $\dfrac{U}{I}$-R_A　(2)如图甲所示

(3)如图乙所示　R_3



甲　　乙

【典例6】为了测定电压表的内阻,可供选择的器材如下:

A.电源E(3 V,内阻约0.4 Ω,允许通过的最大电流为0.5 A);

B.待测电压表V(3 V,内阻约2 kΩ);

C.电流表G(满偏电流为3 mA,内阻约10 Ω);

D.定值电阻R_1(阻值为10 Ω);

E.定值电阻R_2(阻值为2000 Ω);

F.滑动变阻器R_3(阻值范围为0~5 Ω);

G.滑动变阻器R_4(阻值范围为0~200 Ω);

H.开关及导线若干.

要求多次测量,尽可能减小实验误差.

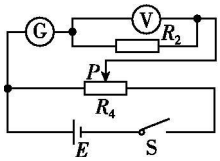
(1)定值电阻应选_____,滑动变阻器应选_____(两空均填写器材前的选项字母),滑动变阻器的接法是_____(选填"限流式"或"分压式").

(2)请在虚线框内画出实验电路图.



【答案】(1)E　G　分压式

(2)如图所示



【典例7】小明探究小灯泡L(3 V,1.5 W)的伏安特性曲线.备用的器材有:

电压表V_1(0~3 V,内阻R_{V1}=3 kΩ);

电压表V_2(0~15 V,内阻R_{V2}很大);

电流表A_1(0~0.6 A,内阻R_{A1}约为0.5 Ω);

电流表A_2(0~3 A,内阻R_{A2}约为0.1 Ω);

滑动变阻器R_1(10 Ω,1 A);

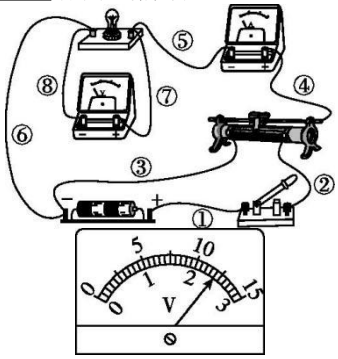
滑动变阻器R_2(100 Ω,0.2 A);

电源(电动势E=3 V,内阻可忽略不计);

开关一个,导线若干.

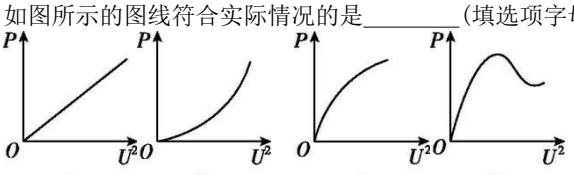
(1)电流表应选择_____(选填"A_1"或"A_2").

(2)按图连接电路后,检查所有元件都完好,电流表和电压表已调零,经检查各部分接触良好;闭合开关后,反复调节滑动变阻器,小灯泡亮度发生变化,但电压表和电流表示数不能调到零,则断路的导线为_____(填导线编号).



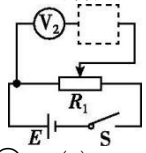
(3)某次实验时电压表的指针如图所示,其读数为_____V.

(4)根据实验数据,小明作出了I-U图线,他还试着作了P-U^2图线,如图所示的图线符合实际情况的是_____(填选项字母).

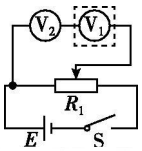


(5) 为了测量电压表V_2的内阻R_{V2},利用上述提供的部分器材,小明设计了一个电路图,如图所示,请你帮助小明选择一个合适的器材,画在虚框里.用测得的物理量表示出

R_{V2}=_____.(写明式中各物理量的含义)



【答案】(1)A_1　(2)③　(3)2.40　(4)C　(5)如图所示 $R_{V2}=\frac{U_2}{U_1}R_{V1}$，其中 U_1 为电压表 V_1 的示数，R_{V1} 为电压表 V_1 的内阻，U_2 为电压表 V_2 的示数



18.(7分)小鲁同学想要描绘标有"3.8 V　0.3 A"字样小灯泡L的伏安特性曲线，现有 $E=6$ V 的电源、$R=10\ \Omega$ 的滑动变阻器、开关、导线，可供选择的仪器还有：

A. 电压表 V_1(量程 0～3 V，内阻等于 3 kΩ)

B. 电压表 V_2(量程 0～15 V，内阻等于 15 kΩ)

C. 电流表 A_1(量程 0～200 mA，内阻等于 10 Ω)

D. 电流表 A_2(量程 0～3 A，内阻等于 0.1 Ω)

E. 定值电阻 R_3(阻值等于 1 Ω)

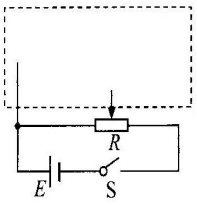
F. 定值电阻 R_4(阻值等于 10 Ω)

G. 定值电阻 R_5(阻值等于 1 kΩ)

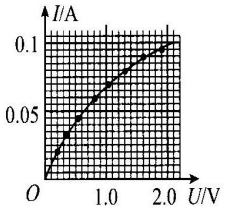
(1)要求测量数据尽量精确，绘制曲线尽量完整，还需选择的仪器有_____.

(2)请在图甲的方框中将电路图补充完整.

(3)小鲁同学绘制的小灯泡的伏安特性曲线如图乙，其中明显不妥的是_____.



甲

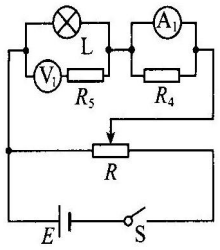


乙

8.(7分)

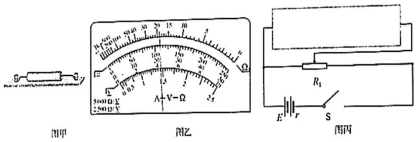
(1)ACFG　(2分)

(2)如图所示　(3分)



(3)电压测量范围未达到额定电压，小灯泡未正常发光　(2分)

【典例9】近些年，桶装饮用水不合格的新闻屡见不鲜，检验饮用水是否合格的一项重要指标是电导率，电导率为电阻率的倒数。小张同学想要探究离子浓度对饮用水电导率的影响，其中某组实验的操作如下：取100mL饮用水加入适量的食盐，搅拌溶解得到未饱和食盐溶液，为了方便测量溶液的电阻，取部分溶液装入绝缘性良好的塑料圆柱形容器内，容器两端用金属圆片电极密封，如图甲所示。



甲　　乙　　丙

(1)在溶液未达到饱和之前，溶解的食盐越多则溶液的电导率会__(填"越大"或"越小")。

(2)小张同学先用多用电表粗测其电阻，将选择开关置于欧姆"×100"挡位置，在欧姆调零后测量其阻值时记录电表指针偏转如图乙所示，该电阻的阻值为__Ω。

(3)小张同学想进一步精确测量其电阻，实验室能提供以下器材：

①干电池两节(每节干电池电动势约为1.5V，内阻可忽略)；

②电流表(量程为0~0.6A，内阻约为0.7Ω)；

③电流表(量程为0~3A，内阻约为0.5Ω)；

④灵敏电流计(量程为$0\sim250\mu A$，内阻等于900Ω)；

⑥电压表(量程为0~3V，内阻约为$4k\Omega$)；

⑦电压表(量程为0~15V，内阻约为$7k\Omega$)；

⑧滑动变阻器R_1(最大阻值为10Ω)；

⑨电阻箱R_2(最大阻值为9999.9Ω)；

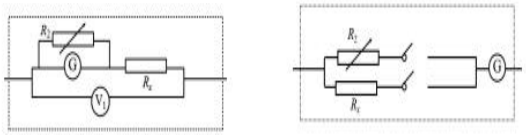
⑩开关、导线若干；

为了完成测量，除干电池、开关、导线和滑动变阻器R_1外，还应选择的恰当的器材是__(填写器材前面的序号)。

小张同学已经完成了部分电路设计，如图丙所示，请完成剩余电路图，要求电表读数均能大于量程的$\frac{1}{3}$(在图中标上必要的电学符号，待测电阻用R_x表示)。

【答案】(1)①越大　②1900

③方案一 DEH　　方案二　DH



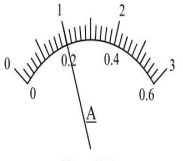
【典例10】(1)为了精确测量一个约为几欧姆的定值电阻的阻值，实验器材如图1所示：

G表(内阻100Ω、满偏电压30mV)，电阻箱(0~9999.9Ω)，电流表(量程0.6A)，滑动变阻器(5Ω、2A)，干电池组(2节干电池)，待测电阻，开关，导线若干。

① 请设计测量方案，要求电表示数能从"0"开始变化，在答题纸相应方框中画出电路图。



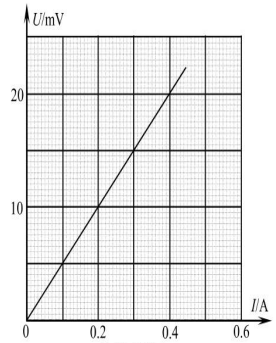
第18题图1



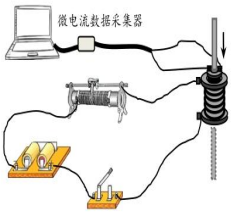
第18题图2

② 实验中，通过调节滑动变阻器，改变两只表的示数大小，读得G表和A表的示数并记录，某次电流表示数如图2所示，其读数为_____A。

③ 设计方案中电阻箱的电阻值调到9900 Ω，测G表示数 U 与电流表示数 I 多组数据，画 U–I 图线如图3所示，则待测电阻的阻值为_____Ω。（保留两位有效数字）

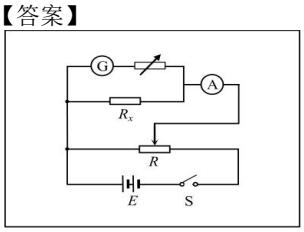


第18题图3



第18题图4

【答案】



（1）① 见右图　　（2分）

② 0.20　　（1分）

③ 5.0　　（2分）

【典例11】兴趣小组为了测量某电阻 R_x 的阻值，

（1）先用多用电表进行粗测，在使用前发现电表指针位置如图甲所示，则该同学应先调节位置▲（选填“①”或“②”）；将选择开关调至欧姆挡“×1挡”，进行正确的操作后，指针位置如图乙所示，则电阻 R_x 的测量值约为▲Ω。



第18题图甲



第18题图乙

（2）实验室可供选择的器材有：

①电流表 A_1（量程0~10mA，内阻10Ω）；

②电流表 A_2（量程0~3A，内阻约为0.1Ω）；

③电压表V（量程0~3V，内阻15kΩ）；

④滑动变阻器 R_1（0~5Ω，额定电流1A）；

⑤滑动变阻器 R_2（0~1kΩ，额定电流0.1A）；

⑥标准电阻 R_3（50Ω）；

⑦标准电阻 R_4（150Ω）；

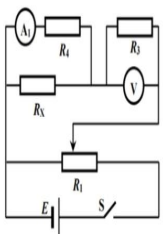
⑧两节新的干电池

以及单刀单掷开关S一个；导线若干。

（i）用以上器材设计电路，要求尽可能减小测量误差，测量时电表的读数大于其量程的一半，而且调节滑动变阻器能使电流表读数有明显变化，则滑动变阻器在电路中应选择▲（选填“分压”或“限流”）接法，滑动变阻器应选▲。（填写上述器材元件前的序号）

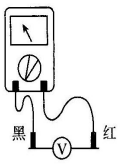
（ii）请在答题纸的方框内画出测量电阻 R_x 的实验电路图，并在电路图中标注所用元件对应的符号。

【答案】（1）① 28 （2）分压 ④

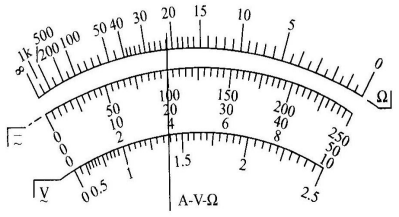


【典例12】（1）某实验小组想测定量程为3V的电压表 V_1 的确切内阻.

①李同学用多用电表的欧姆挡测量.测量电路如图甲所示，红表笔应和电压表的_____（填“+”或“−”）接线柱相连.多用电表的倍率开关拨至“×1 k”位置上，规范操作后，指针稳定在如图乙所示的位置，其阻值为_____kΩ；



甲



乙

②周同学准备用以下实验器材进行测量.请你帮他设计一个合理的电路，将电路图画在图丙方格内，并在电路图上标出相应的仪器符号.

电压表 V_2（0～15 V　100 kΩ）

电流表 A_1（0～5 mA　约10 Ω）

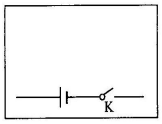
电流表 A_2（0～0.6 A　约1 Ω）

滑动变阻器 R（0～1 kΩ）

电源 E_1（20 V，内阻很小）

电源 E_2（3 V，内阻很小）

开关K（1个），导线（若干）



丙

（2）在“探究电磁感应产生的条件”实验中，正确的连线应选择图1中的_____（填“甲”或“乙”）；选择正确的连线后，开关突然闭合的瞬间，灵敏电流计的指针偏转的最大角度如图2所示.在小螺线管中插入铁芯，待指针稳定后，再将开关突然断开的瞬间，指针偏转的最大角度是图3中的_____（填“A”“B”“C”或“D”）.

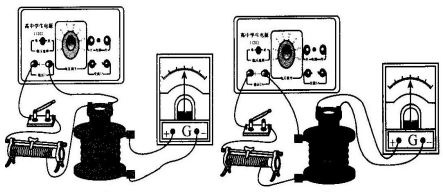


图1



图2

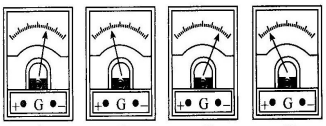
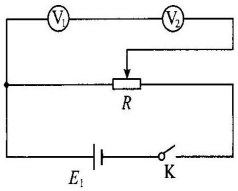


图3

【答案】

（1）①－ （1分） 22 （1分） ②如图所示 （3分）



（2）甲 （1分） D （1分）

【典例13】某同学想要测定一个定值电阻 R_x 的阻值（2kΩ左右），实验室提供的实验器材如下：

电流表 A_1（量程为200mA，内阻 R_{A1}=8Ω）

电流表 A_2（量程为0.6A，内阻 R_{A2}=4Ω）

电压表 V_1（量程3V，内阻 R_{V1}=3kΩ）

电压表 V_2（量程5V，内阻 R_{V2}=5kΩ）

滑动变阻器 R_1（最大允许通过电流1.5A，最大阻值50Ω）

滑动变阻器 R_2（最大允许通过电流0.3 A，最大阻值3kΩ）

待测定值电阻 R_x

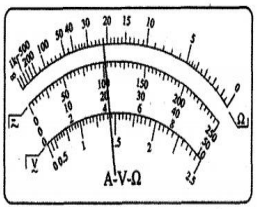
电源 E（电动势约15V，内阻较小但不可忽略），单刀开关S，导线若干；

回答下列问题：

(1) 该同学先用多用电表欧姆档的×100Ω挡位对待测电阻 R_x 的阻值进行粗测，正确操作后，读数如下图所示，则 R_x=_____ kΩ.（保留二位有效数字）

(2) 实验中滑动变阻器应选用_____（填 R_1 或 R_2），并采用_____接法（填“限流”或“分压”）；

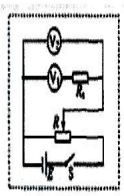
(3) 请选择合适的器材进行电路设计来完成对待测电阻 R_x 的测量，要求尽可能测量多组数据，电表能有较大的偏转，并在虚线框中画出的完整实验电路原理图；



(4) 根据设计的实验电路可求得 R_x=_____。（可用 $U_1, U_2, I_1, I_2, R_{A1}, R_{A2}, R_{V1}, R_{V2}$ 这些符号表示）

【答案】（1）22　（2）R_1　分压

$\frac{U_2-U_1}{U_1}R_{V1}$



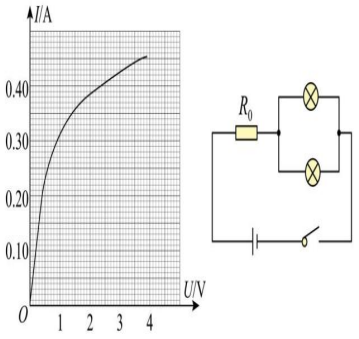
【典例 14】某同学想要研究小灯泡的伏安特性，现有的实验器材如下：

A. 小灯泡 L（额定电压约 3.8V，额定功率约 1.8W）
B. 电压表 V_1（量程 3V，内阻为 3kΩ）
C. 电压表 V_2（量程为 15V，内阻为 15kΩ）
D. 电流表 A（量程为 0.6A，内阻约为 1Ω）
E. 定值电阻 R_1（阻值 100Ω）
F. 定值电阻 R_2（阻值 1000Ω）
G. 滑动变阻器 R（阻值 0~10Ω）
H. 电源 E（电动势 5V，内阻不计），开关 S，导线若干；

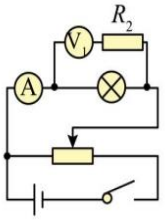
(1) 该同学已选定的器材是小灯泡 L、滑动变阻器 R、电源 E、开关 S、导线若干，要完成该实验，还需要的器材是 ▲ （填写器材前的字母序号）

(2) 实验要求能够较准确的画出灯泡的伏安特性曲线，请在虚线框中帮助该同学画出实验电路原理图。

(3) 正确设计并连接好电路，实验中测得该灯泡的伏安特性曲线如图所示，现将两个相同的小灯泡按如图电路图连接到另一个电路中，图中电源的电动势为 5V，内阻为 1.0Ω，电阻 R_0 的阻值为 4.0Ω，闭合开关 S，每个小灯泡的实际功率为 ▲ W。（结果保留两位有效数字）



【答案】（1）BDF　（3）0.50-0.60



（2）　（全对得 2 分）

【典例 15】

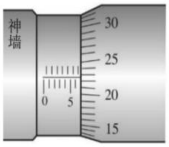
图 1 为陶瓷圆筒，外面镀有一层很薄的合金薄膜。为测定薄膜的厚度，某同学先用刻度尺测出陶瓷圆筒长度为 L，又用螺旋测微器测得筒外径 d，最后用多用电表粗测其电阻 R_x。并在电工手册查得薄膜的电阻率为 ρ。

(1) 该同学用螺旋测微器测得筒外径 d 如图 2 所示，则筒外径 d = ▲ mm，用多用电表欧姆挡的“×100”挡测薄膜电阻值时，表盘上指针如图 3 所示，则电阻 R_x 为 ▲ Ω。

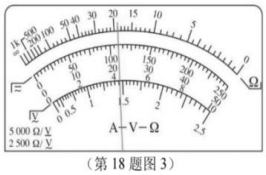
(2) 该同学利用所测得的及查表的数据，求得薄膜厚度表达式 D = ▲ （均用字母表示），就可计算出薄膜的厚度。



（第 18 题图 1）



（第 18 题图 2）



（第 18 题图 3）

(3) 为更精确地测量薄膜的电阻 R_x，该同学从实验室中找到如下实验器材：

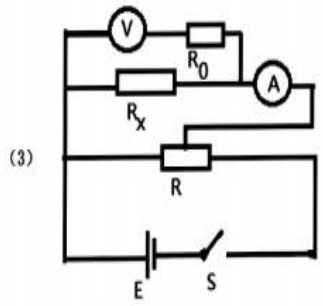
A. 电压表 V（量程 0~3V，电阻 R_V = 3kΩ）
B. 电流表 A（量程 6 mA，电阻 R_A 约为 30Ω）
C. 滑动变阻器 R(0~20 Ω，额定电流 1 A)
D. 电源 (12 V，内阻约为 10 Ω)
E. 定值电阻 R_0 = 9kΩ
F. 开关一只，导线若干

①为更加准确地测量出薄膜电阻，根据上述器材在答题卷方框内画出测电阻的最佳方案的电路图 ▲ 。

②若电压表的示数为 U，电流表的示数为 I，则所测薄膜电阻的表达式 R_x = ▲ （用题中的字母表示）。

【答案】

18.（1）6.722~6.728（1 分）1900（1 分）（2）$\frac{\rho l}{\pi dR}$（1 分）



(3)

（3 分；分压式 1 分，电路表外接 1 分，电压表改装用到 $R_0$1 分）

$\frac{U(R_V+R_0)}{R_V(I-\frac{U}{R_V})}$（1 分）

实验 1：测绘小灯泡的伏安特性曲线

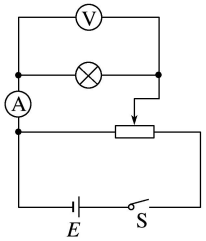
一、测绘小灯泡的伏安特性曲线

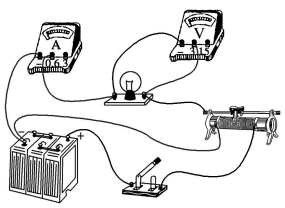
1.实验目的

(1)掌握滑动变阻器的使用方法及连接方式.
(2)掌握伏安特性曲线的描绘方法.
(3)理解小灯泡的伏安特性曲线为什么是曲线.

2.实验原理

(1)实验原理图(如图所示)





(2)用电流表测出流过小灯泡的电流，用电压表测出小灯泡两端的电压，测得多组(U、I)值，在 I—U 坐标系中描出各对应点，用一条平滑的曲线将这些点连起来，分析小灯泡的伏安特性.
(3)电流表外接：因为小灯泡的电阻很小，如果电流表内接，误差较大.
(4)滑动变阻器分压式接法：由于电压要从 0 开始变化，应采用分压式接法.

3.实验器材

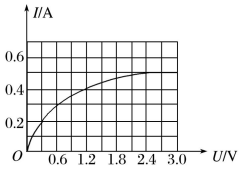
小灯泡“2.5 V,0.3 A”、电压表“0～3 V～15 V”、电流表“0～0.6 A～3 A”、滑动变阻器、学生电源、开关、导线若干、坐标纸、铅笔.

4.数据处理

(1)在坐标纸上以 U 为横轴，I 为纵轴，建立直角坐标系.

(2)在坐标纸上描出各组数据所对应的点.

(3)将描出的点用平滑的曲线连接起来，就得到小灯泡的伏安特性曲线.



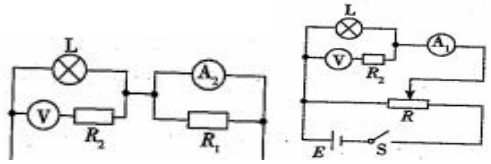
5.误差分析

(1)电流表外接，由于电压表的分流，使电流表示数偏大.

(2)测量时读数带来误差，读数时视线要与刻度盘垂直.

(3)在坐标纸上描点、作图带来误差. 不要画成折线，应用平滑曲线拟合各点，误差较大的点应尽大胆舍去.

【思考】当电压表或电流表量程不够时怎么办？



【典例 1】LED 被公认为 21 世纪“绿色照明”，具有“高节能”“寿命长”“多变幻”“利环保”“高新尖”等特点，LED 通用照明成为最具市场潜力的行业热点。LED 绿色照明技术已经真正走进了我们的生活。某实验小组要精确测定额定电压为 3 V 的 LED 灯正常工作时的电阻，已知该灯正常工作时的电阻大约为 450 Ω。实验室提供的器材有：

A. 电流表 A_1（量程为 15 mA，内阻 r_1 约为 3 Ω，读数记为 I_1）

B. 电流表 A_2（量程为 5 mA，内阻 $r_2=10$ Ω，读数记为 I_2）

C. 电压表 V（量程为 15 V，内阻 $R_V=15$ kΩ，读数记为 U）

D. 定值电阻 $R_1=790$ Ω

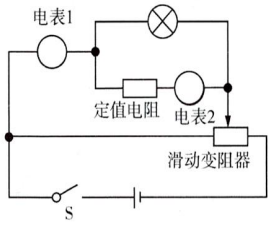
E. 定值电阻 $R_2=1\,790$ Ω

F. 滑动变阻器 R_3（0～20 Ω）

G. 滑动变阻器 R_4（0～2 000 Ω）

H. 蓄电池 E（电动势为 10 V，内阻很小），开关 S 一个

(1)如图所示是某同学设计的实验电路图，请你帮他选择合适的器材，电表 1 应选_____，电表 2 应选_____，定值电阻应选_____，滑动变阻器应选_____。（这四空均填写器材前的字母代号）



(2)测量该 LED 灯电阻的表达式为 $R_x=$_____（用字母表示）。实验时，不断改变滑动变阻器的阻值，当电表 2 的示数达到_____时，其对应的结果为该 LED 灯正常工作时的电阻。

【参考答案】(1)A(1 分) B(1 分) D(1 分) F(1 分) (2)$\frac{I_2(r_2+R_1)}{I_1-I_2}$ (1 分) 3.75 mA(1 分)

【典例 2】某物理兴趣小组要描绘一个标有“4V、2.0W”的小灯泡 L 的伏安特性曲线，要求灯泡两端的电压由零逐渐增大，且尽量减小实验误差。可供选用的器材除导线、开关外，还有以下器材：

A. 直流电源 4.5V（内阻很小可不计）

B. 直流电流表 0~500mA（内阻约为 5Ω）

C. 直流电压表 0~3V（内阻等于 6kΩ）

D. 滑动变阻器甲，0~10Ω，额定电流 2A

E. 滑动变阻器乙，0~100Ω，额定电流 1A

F. 三个定值电阻（R_1=1kΩ，R_2=2kΩ，R_3=5kΩ）

(1)在给定的器材中，滑动变阻器选用__▲__（选填“甲”或“乙”），定值电阻选用__▲__（选填“R_1”、“R_2”或“R_3”）；

(2)小组同学设计好实验电路图后，如图 A 已经连好了部分导线，请用笔代替导线将实物图补充完整；

(3)实验测得小灯泡伏安特性曲线如图 B 所示，若将两个完全相同规格的小灯泡 L 按如图 C 所示电路连接，电源电动势 E=6V，内阻 r=12Ω，此时每个小灯泡消耗的电功率为__▲__W（结果保留两位有效数字）。

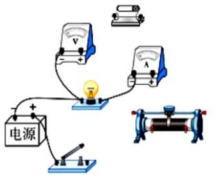


图 A

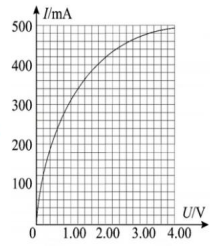


图 B

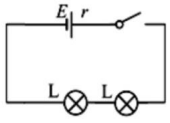
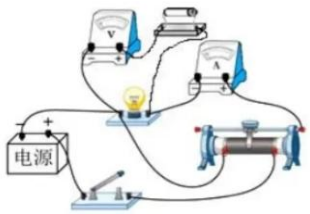


图 C

【答案】（1）甲，R_2 （3）0.34（0.32~0.35）

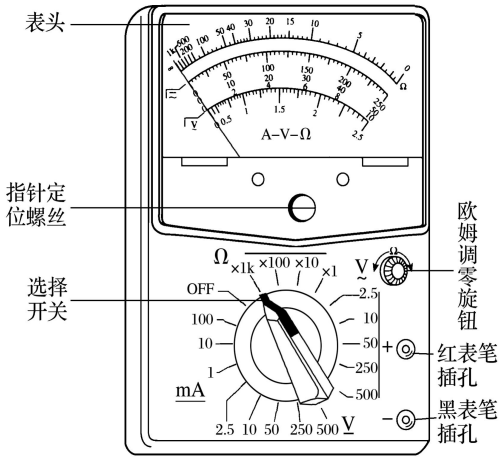


第 5 节 实验：练习使用多用电表

一、多用电表的基础知识

1.认识多用电表

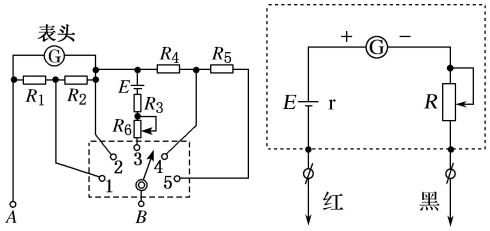
(1)外部构造(如图所示)



①转动选择开关可以使用多用电表测量电流、电压、电阻等.
②表盘的上部为表头，用来表示电流、电压和电阻的多种量程.
(2)刻度特点：直流电压、电流挡的刻度是均匀的，“0”在最左侧；欧姆挡的刻度是不均匀的，“0”在最右侧，最左端为“∞”，且右疏左密.
(3)内部结构：多用电表是由一个小量程的电流表与若干元件组成的，选用欧姆挡时，内部自置电源．每进行一种测量时，只使用其中一部分电路，其他部分不起作用.

2.欧姆表原理

（1）内部电路简化如图所示。



多用电表电路图　　欧姆表电路简化图

【注意】B 接 1、2 时为电流表，并且接 1 时量程较大；B 接 3 时为欧姆表；B 接 4、5 时为电压表，并且接 5 时量程较大。

（2）根据闭合电路欧姆定律

①当红、黑表笔短接时，$I_g=\dfrac{E}{R_g+R+r}$。

②当被测电阻 R_x 接在红、黑表笔之间时，$I=\dfrac{E}{R_g+R+r+R_x}$。

③当 $I_{中}=\dfrac{1}{2}I_g$ 时，中值电阻 $R_{中}=R_g+R+r$。

【注意】中值电阻=表头的内阻（随所选的倍率而变化）

二、练习使用多用电表

1.实验器材

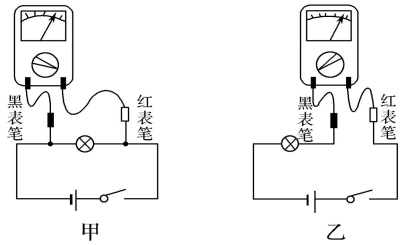
多用电表、直流电源、开关、导线若干、小电珠、定值电阻（大、中、小）三个。

2.实验步骤

①机械调零.
②将红、黑表笔分别插入“＋”“－”插孔.

3.测量小灯泡的电压和电流

①按如图甲所示连好电路，将多用电表选择开关置于直流电压挡，测小灯泡两端的电压。
②按如图乙所示连好电路，将选择开关置于直流电流挡，测量通过小灯泡的电流。



甲　　乙

4.测量定值电阻

（1）调整定位螺丝，使指针指向电流的零刻度【机械调零】。
（2）选择开关置于“Ω”挡的“×1”，短接红、黑表笔，调节欧姆调零旋钮，使指针指在右端零刻度处，然后断开表笔（指针回到左边的零刻度），再使指针指向左边的∞。

【注意】指针偏角小都是指从左端开始偏转的。

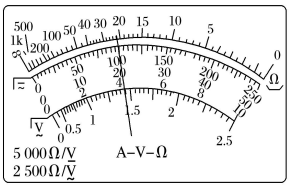
（3）将两表笔分别接触阻值为几十欧的定值电阻两端，读出指示的电阻值，然后断开表笔，与标定值进行比较。
（4）选择开关改置“×100”挡，重新进行欧姆调零（换挡后要调零-------小倍率大示数）。

指针偏转过大，意味着电阻较小，应当换小倍率档位重新测量。
指针偏转过小，意味着电阻较大，应当换大倍率档位重新测量。

（5）再将两表笔分别接触标定值为几千欧的电阻两端，读出指示的电阻值，然后断开表笔，与标定值进行比较。
（6）测量完毕，将选择开关置于交流电压最高挡或“OFF”挡。长期不用应取出电池.

5.多用电表使用的“几大注意”

（1）使用前要机械调零。
（2）两表笔在使用时，电流永远为：从”+”插孔流入电表，从“-”插孔流出电表即“红进黑出”（交换红黑表笔不影响测量）（对电流、电压表满足“正进负出”）。
（3）选择开关的功能区域，要分清是测电压、电流、电阻，还要分清是交流还是直流。
（4）电压、电流挡为量程范围挡（当量程与多用电表的量程不一致时，必须选表头量程为实际量程的整 10 倍整或整 100 倍的刻度进行读数），欧姆挡为倍率挡。
（5）刻度线有三条：上为电阻专用，中间为电压、电流、交流、直流共用，下为交流 2.5 V 专用（此刻度不均匀，有修正值）。



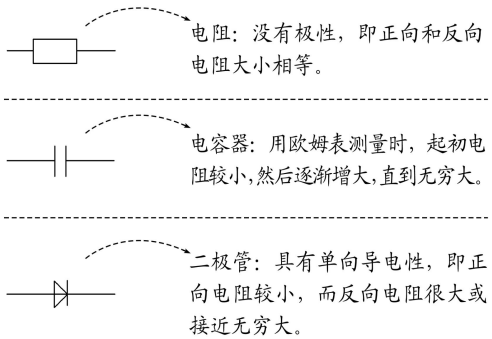
（6）测电阻时：

①待测电阻与电路、电源一定要断开。且测得电阻为常温下的阻值，一般小于额度电压下的阻值。不可按照额定电压来计算估计电阻值，因欧姆表内部电动势只有 1.5V。
②两手一定不要同时接触两笔金属杆。
③指针指中值附近较准，否则换挡。
④每换一挡必须重新欧姆调零。
⑤读出示数要乘以倍率。
⑥当多用电表内的电池用久后，电动势一般会变小，内阻会变大。此时测电压、电流没有偏差；但测电阻时，因电动势变小，故测量值会偏大（假设测量前欧姆表仍能调零），与内阻变大无关。

【当电池电动势变小时，需要重新调零，由于满偏电流 I_g 不变，由公式 $I_g=\dfrac{E}{R_{内}}$，调零后内阻 $R_{内}$ 比之前小，待测电阻的测量值是通过电流表的示数体现出来的，由 $I=\dfrac{E}{R_{内}+R_x}=\dfrac{I_gR_{内}}{R_{内}+R_x}=\dfrac{I_g}{1+\dfrac{R_x}{R_{内}}}$，可知当 $R_{内}$ 变小时，I 变小，指针跟原来的位置相比偏左，欧姆表的示数变大。】

【注意】电容器充电后的电压用-------电位计测量。

6.关于多用电表测电阻、电容器、二极管的区别



7.数字式多用电表



【典例 1】(7分)(1)在"练习使用多用电表"的实验中,小强用欧姆挡去测量"220V、100W"的白炽灯不发光时的灯丝电阻,在拍照的时候未把多用电表的选择挡位旋钮拍进去,如图 1 所示,那么你认为此挡位是__▲__(填"×1"、"×10"、"×100")。

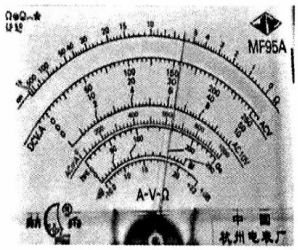


图 1

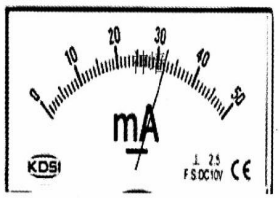


图 2

(2)由于欧姆表自带电源,可将某档位下的欧姆表等效为一直流电源。为了测量该直流电源的电动势和内阻,小芳又从实验室拿到一个毫安表(内阻约 10Ω)、一个滑动变阻器 R_0(0~200Ω)以及电键和导线。利用上述器材,请在答题卷虚线框内设计测量电路。

(3)若某次测量时毫安表示数如图 2 所示,则电流 I=__▲__mA。

(4)某同学调节滑动变阻器得到多组欧姆表与毫安表的示数 R 与 I,并建立 IR 与 I 的坐标系,将测得的数据描点连线,如图 3 所示。由图像可知该档位下欧姆表内部电源的电动势为__▲__V,内阻为__▲__Ω(结果均保留两位小数)。

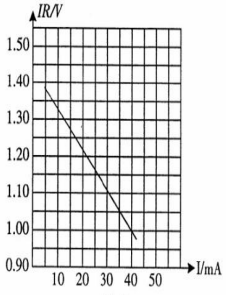


图 3

【答案】

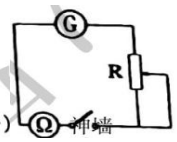
(1)×10 (2 分)

(2)如图 (2 分)

(3) 32.0 (1 分)

(4) 1.44V (1.42−1.45) (1 分)

10.80(10.00−11.30) (1 分)



【典例 2】(7 分) 多用电表是实验室中常用的测量仪器,如图甲所示为多量程多用电表示意图。

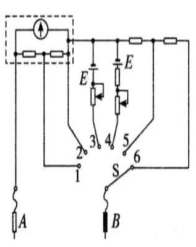
(1) 通过一个单刀多掷开关 S,接线柱 B 可以分别与触点 1、2、3 、4、5、6 接通,从而实现使用多用电表测量不同物理量的功能。关于此多用电表,下列说法中正确的是__▲__;

A. 图中 B 是红表笔

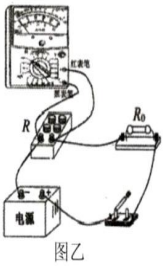
B. 当 S 接触点 1 或 2 时,多用电表处于测量电流的挡位,且接 1 时的量程比接 2 时大

C. 当 S 接触点 3 时,多用电表处于测量电阻的挡位,倍率越大,滑动变阻器接入阻值越大

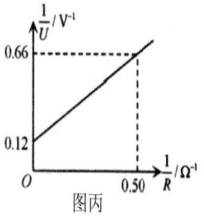
D. 当 S 接触点 5 或 6 时,多用电表处于测量电压的挡位,且接 5 比接 6 时量程大



图甲



图乙



图丙

(2) 实验小组用多用电表测量电源的电动势和内阻。器材有:待测电源(电动势约为 8V),定值电阻 R_0=8.0Ω,多用表一只,电阻箱一只。连接实物如图乙所示,测量时应将多用电表选择开关调到直流电压__▲__(选填"2.5V"或"10V")档;

(3) 测得并记录多组数据后,得到对应的 $\frac{1}{U}-\frac{1}{R}$ 图,如图丙所示,则电源电动势 E=__▲__V,内阻 r=__▲__Ω(结果保留三位有效数字)。

【答案】(1) BC　　(2) 10V　　(3) 8.33　　1.00

【典例 3】(7 分) 在"练习使用多用电表"的实验中:

(1) 测量电阻时,将选择开关旋转到欧姆挡倍率"×100"的位置;将红黑表笔短接,旋转欧姆调零旋钮,使指针对准电阻刻度的__▲__(填"0 刻线"或"∞刻线");

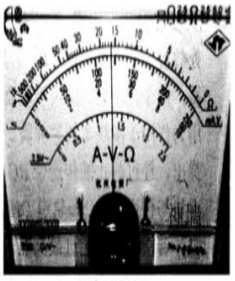
(2) 将两表笔与待测电阻相接,发现指针偏转角度很小.为了得到比较准确的测量结果,请从下列选项中挑出合理的步骤,__▲__.

A. 将选择开关旋转到欧姆挡倍率"×1k"的位置

B. 将选择开关旋转到欧姆挡倍率"×10"的位置

C. 换挡后直接测量读数

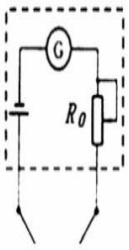
D. 换挡后先进行欧姆调零再测量读数



第 18 题图甲

(3) 若选用 "×1"倍率时电表的读数如图甲所示,则所测电阻的电阻值为__▲__Ω。

(4) 表盘如图甲所示的多用电表欧姆挡内部电路图如图乙所示,其中有灵敏电流表(量程未知,内阻未知)、电池组(电动势 3.0V,内阻 r=0.5Ω)和滑动变阻器 R_0(总阻值未知),有同学在实际使用过程中发现始终无法完成欧姆调零,于是他将错就错,把指针指向均匀刻度的"200/40/8"这个位置时的电流当作满偏电流,并按照规范操作完成剩余步骤。课后实验室老师检测发现,表内的电池组电动势下降了 2%、内阻很大,导致无法完成欧姆调零的步骤。若将错就错的同学选用"×1"倍率测量,其读数也如图甲所示,则该电阻真实值约为__▲__Ω.(计算结果保留一位小数)



第 18 题图乙

【答案】

(1) 0 刻线 (2 分)

(2) AD (2 分,漏选不得分)

(3) 16 (15.9~16.1) (1 分,16.0 也得分)

(4) 12.0 (11.7~12.3) (2 分)

【第 4 问解析:正常时 $R_{内}=15\Omega$,即有 $I_0=\frac{3}{15}$.变化后有 $\frac{0.98\times3}{r_{内}}=\frac{4}{5}I_0$ 得 $r_{内}=18.375\Omega$,又 $\frac{0.98\times3}{r_{内}+R_{外}}=\frac{120}{250}I_0$,联立得 $\frac{4}{5}I_0r_{内}=\frac{120}{250}I_0(r_{内}+R_{外})$,解得 $R_{外}=12.25\Omega$】

【典例 4】

.(8 分)某同学想制作一个简易多用电表。实验室中可供选择的器材有:

电流表 G_1:量程为 200μA、内阻为 500Ω

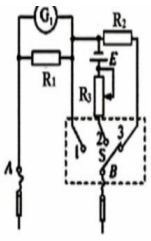
定值电阻 R_1:阻值为 125Ω

定值电阻 R_2:阻值为 2.9kΩ

滑动变阻器 R_3:最大阻值 5kΩ

直流电源:电动势 1.5V,内阻 0.5Ω

红、黑表笔各一支,开关,单刀多向开关,导线若干



该同学打算用电流表 G_1 作表头,利用所给器材,该同学设计了如图所示的多用电表内部电路,请回答下列问题:

(1) 图中 A 端与__▲__(填"红"或"黑")色表笔相连接;

(2) 若测量电压,则其量程为__▲__V;

(3) 欧姆挡刻度盘的倍率设为"×100",中央刻度值应标注数字为__▲__;

(4) 若欧姆表的刻度盘按题 (3) 标度,实际由于电池老化电动势下降为 1.4V,欧姆表仍可调零,正确操作后测得某一电阻阻值为 2kΩ,则待测电阻真实阻值__▲__2kΩ。(填"大于","等于"或"小于")

【答案】(1) 红　　(2) 3V　　(3) 15　　(4) 小于

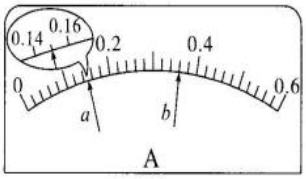
二、关于电压表和电流表的读法

(1)量程为 0～0.6 A 的电流表

量程为 0～0.6 A 的电流表的最小分度值为 0.02 A，此表为二分度表，读数要估读到最小分度值的二分之一，即 0.01，准确位与估读位都读到百分位，即读到小数点后两位.

二分度表：最小分度值为 2、0.2、0.02 或 0.002 的电表均属于二分度表.

二分度表的读法：在脑海中将刻度的最小一格再等分成两格，看指针与哪个刻度更接近，再进行读数，如图甲所示.



甲

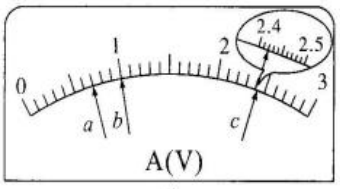
a 指针的读数：将 0.14～0.16 格再等分成两格，如图甲中放大图所示，指针更靠近刻度 0.15，读数为 0.15 A；b 指针的读数：指针与刻度 0.36 重合，读数为 0.36 A.

(2)量程为 0～3 V 的电压表

量程为 0～3 V 的电压表与量程为 0～3 A 的电流表的最小分度值分别为 0.1 V 和 0.1 A，此表为十分度表，读数要估读到最小分度值的十分之一，即 0.01，准确位读到十分位，估读位到百分位，即读到小数点后两位.

十分度表：最小分度值为 1、0.1、0.01 或 0.001 的电表均属于十分度表.

十分度表的读法：在脑海中将刻度的最小一格再等分成十格，看指针与哪个刻度更接近，进行读数，如图乙所示.



乙

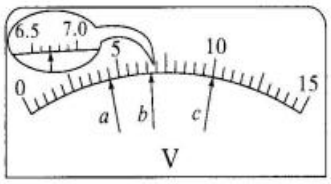
a 指针的读数：指针与刻度 0.7 重合，读数为 0.70 A(V)；b 指针的读数：指针与刻度 1 重合，读数为 1.00 A(V)；c 指针的读数：将 2.4～2.5 格再等分成十格，如图乙中放大图所示，指针更靠近刻度 2.42，读数为 2.42 A(V).

(3)量程为 0～15 V 的电压表

量程为 0～15 V 的电压表的最小分度值为 0.5 V，此表为五分度表，读数要估读到最小分度值的五分之一，即 0.1，准确位与估读位都到十分位，即读到小数点后一位.

五分度表：最小分度值为 5、0.5、0.05 或 0.005 的电表均属于五分度表.

五分度表的读法：在脑海中将刻度的最小一格再等分成五格，看指针与哪个刻度更接近，进行读数，如图丙所示.



丙

a 指针的读数：指针与刻度 4 重合，读数为 4.0 V；b 指针的读数：将 6.5～7.0 格再等分成五格，如图丙中放大图所示，指针更靠近刻度 6.7，读数为 6.7 V；c 指针的读数：指针与刻度 10 重合，读数为 10.0 V.

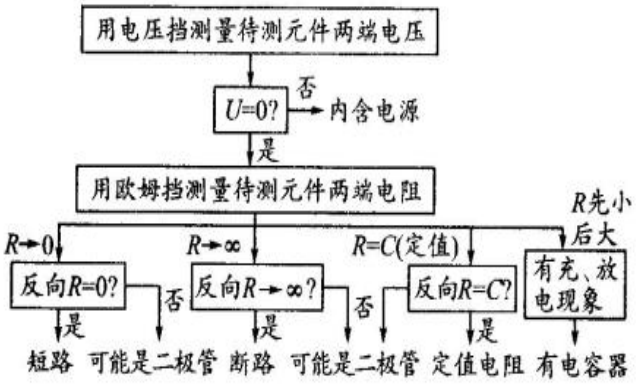
三、关于“黑箱子”问题

(1)首先用多用电表的电压挡探测黑箱中是否存在电源。

(2)如果有电源，则用多用电表的电压挡探测黑箱外任意两接点电压，根据电压关系判断黑箱内电源的位置及各接点间电阻关系，从而分析出黑箱内各元件的连接情况。

(3)如果没有电源，则直接用多用电表的欧姆挡测量任意两接点间的电阻值，根据电阻关系和电学元件特点判断黑箱内部结构。

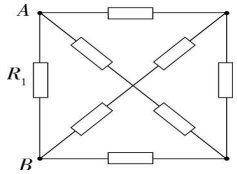
（4）分析流程图



第二部分 物理方法概述

一、等效法

等效替换是把陌生、复杂的物理现象、物理过程在保证某种效果、特性或关系相同的前提下，转化为简单、熟悉的物理现象、物理过程来研究，从而认识研究对象本质和规律的一种思想方法。在直流电路的分析与计算中，我们时常会用到等效法。



二、半偏法

半偏法是一种科学巧妙的测定电阻的方法，操作和具体实施比较简单，常见的有“半偏电流法”和“半偏电压法”。

三、电桥法

电桥法是一种比较法,受电表精度和接入误差影响较小,测量精确度很高。

【记忆口诀】

电荷移动是电流，q 比 t 值来定义。
阴阳离子相向跑，两者相加总电量。
正荷流向定方向，串电流表来计量。
电源外部正流负，从负到正经内部。
电阻定律三因素，温度不变才得出，
欧姆定律线性阻，气体半导不可用。
基本电路串并联，分压分流要分明。
复杂电路找节点，等效电路是关键。

【本章高频考点】

1.电学基本仪器（特别是多用电表）的使用。
2.电阻的测量、多用电表的使用。

第三部分 物理方法概述

一、假设法

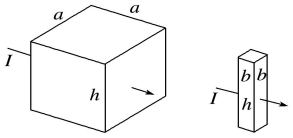
假设法是对于待求解的问题,在与原题所给条件不相违的前提下,人为的加上或减去某些条件,以使原题方便求解。求解物理试题常用的有假设物理情景,假设物理过程,假设物理量等。利用假设法处理某些物理问题,往往能突破思维障碍,找出新的解题途径,化难为易,化繁为简。

二、图像法

物理图像是将抽象的物理问题直观化、形象化的最佳工具,能从整体上反映出两个或两个以上物理量的定性或定量关系。利用图像解题时一定要从图像纵、横坐标的物理意义以及图线中的“点”“线”“斜率”“截距”和“面积”等诸多方面寻找解题的突破口。利用图像解题不但快速、准确,能避免繁杂的运算,还能解决一些用一般计算方法无法解决的问题。

第四部分 易错、疑难问题选

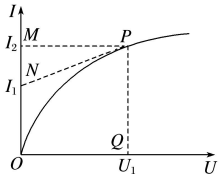
1.如图，有两个同种材料制成的导体，两导体为横截面均为正方形的柱体，柱体高均为 h，大柱体横截面边长为 a，小柱体横截面边长为 b，则(　　)



A．从图示电流方向看大柱体与小柱体的电阻之比为 $a:b$
B．从图示电流方向看大柱体与小柱体的电阻之比为 1∶1
C．若电流方向竖直向下，大柱体与小柱体的电阻之比为 $a:b$
D．若电流方向竖直向下，大柱体与小柱体的电阻之比为 $a^2:b^2$

【答案】B

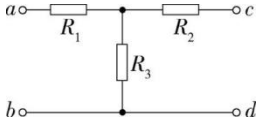
2.小灯泡通电后其电流 I 随所加电压 U 变化的图线如图所示，P 为图线上一点，PN 为图线的切线，PQ 为 U 轴的垂线，PM 为 I 轴的垂线，则下列说法中正确的是(　　)



A．随着所加电压的增大，小灯泡的电阻增大
B．对应 P 点，小灯泡的电阻为 $R=\dfrac{U_1}{I_2}$
C．对应 P 点，小灯泡的电阻为 $R=\dfrac{U_1}{I_2-I_1}$
D．对应 P 点，小灯泡的功率为图中矩形 $PQOM$ 所围的面积

【答案】ABD

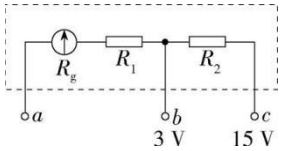
3.(多选)一个 T 形电路如图所示,电路中的电阻 R_1=120 Ω,R_2=10 Ω,R_3=40 Ω。另有一测试电源,电压为 100 V,则　　(　　)



A.当 c、d 端短路时,a、b 之间的等效电阻是 130 Ω
B.当 a、b 端短路时,c、d 之间的等效电阻是 40 Ω
C.当 a、b 两端接通测试电源时,c、d 两端的电压为 25 V
D.当 c、d 两端接通测试电源时,a、b 两端的电压为 80 V

【答案】BCD

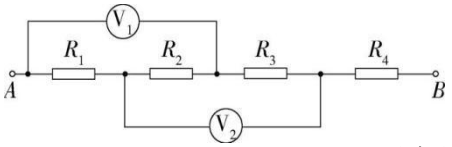
4.如图所示是有两个量程的电压表的内部电路图,当使用 a、b 两个端点时,量程为 0～3 V,当使用 a、c 两个端点时,量程为 0～15 V。已知电流表的内阻 R_g 为 50 Ω,满偏电流为 10 mA,则电阻 R_1、R_2 的值分别为(　　)



A.1 450 Ω　250 Ω　　B.1 200 Ω　250 Ω
C.250 Ω　1 450 Ω　　D.250 Ω　1 200 Ω

【答案】D

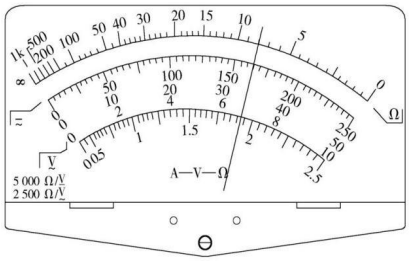
5.如图所示,R_2=R_4,理想电压表 V_1 的示数为 70 V,理想电压表 V_2 的示数为 50 V,则 A、B 间的电压为　　(　　)



A.140 V　　B.120 V　　C.100 V　　D.无法计算

【答案】B

6.如图所示为一正在测量中的多用电表表盘。使用时红表笔插入多用电表的正(+)插孔,则:



(1)测电压时,电流从_____表笔流入多用电表;测电阻时,电流从_____表笔流出多用电表;测电流时,电流从_____表笔流入多用电表。

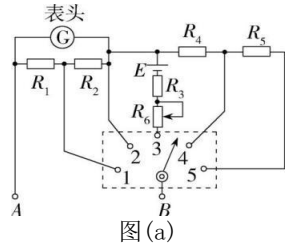
(2)如果是用直流 10 V 挡测量电压,则读数为_____V(保留两位有效数字)。

(3)如果是用“×1”挡测量电阻,则读数为_____Ω(保留两位有效数字)。

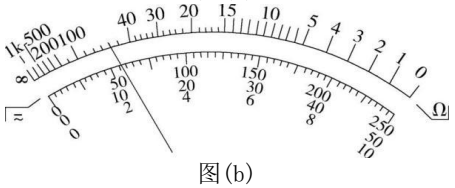
(4)如果是用直流 5 mA 挡测量电流,则读数为_____mA(保留三位有效数字)。

【答案】(1)红　黑　红　(2)6.6　(3)8.0　(4)3.30

7.图(a)是某同学组装完成的简易多用电表的电路图,图中 E 是电池,R_1、R_2、R_3、R_4、R_5 是定值电阻,R_6 是可变电阻,表头 G 的满偏电流为 250 μA,内阻为 480 Ω。表盘如图(b)所示,最上一行刻度的正中央刻度值为“15”。图(a)中虚线框内为换挡开关,A 端和 B 端分别与两表笔相连,该多用电表有 5 个挡位,5 个挡位分别为:直流电压 1 V 挡和 5 V 挡,直流电流 1 mA 挡和 2.5 mA 挡,欧姆“×100”挡。



图(a)



图(b)

(1)若用欧姆“×100”挡测二极管的反向电阻,则应使图(a)中的A端与_____(填“红”或“黑”)色表笔连接后,再将此表笔金属部分与二极管的_____(填“正”或“负”)极相接触。测得的示数如图(b),则读数为_____(保留两位有效数字)。

(2)某次测量时该多用电表指针位置如图(b)所示,若此时B端是与“1”相连的,则多用电表的读数为_____。

(3)根据题中所给的条件可得E=_____V,R_5=_____Ω。

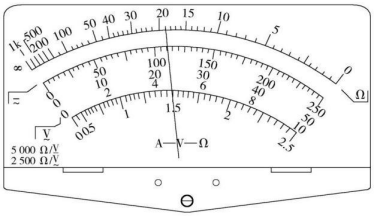
【答案】(1)黑　负　6.0×10^3 Ω　(2)0.57 mA　(3)1.5　4 000

8.现用多用电表测量一个阻值约为20 Ω的电阻和探测电路。

(1)测量步骤如下:

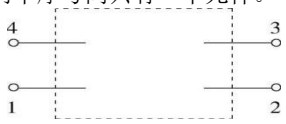
①将选择开关旋转到“Ω”挡的_____(填“×1”“×10”“×100”或“×1 k”)位置,并进行欧姆调零。

②将红、黑表笔分别与待测电阻两端相接触,若多用电表示数如图甲所示,该电阻的阻值为_____Ω。(保留三位有效数字)



甲

(2)探测对象为如图乙所示的黑箱,箱内有一节干电池、一个电阻、一个晶体二极管和一个电容器,箱外有4个接线柱,分别标为1、2、3、4,相邻两个序号间只有一个元件。



乙

①若用多用电表确定元件的位置,应使用多用电表的(填下述挡位的序号)进行试测。

A.直流10 V电压挡　　B.直流1.5 V电压挡

C.欧姆挡　　D.直流电流挡

②试测后,用直流1.5 V电压挡进一步测量,测量结果记录如下:

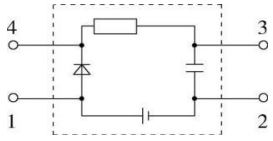
红表笔位置	1	1	1
黑表笔位置	2	3	4
示数	1.5 V	0	0

确定电源位置后,去掉电源,应用多用电表的_____挡进行测量。结果如下:

红表笔位置	1	1	1	2	3	4
黑表笔位置	2	3	4	1	1	1
电阻情况	电阻很大	电阻很大	电阻很大	先有电阻,然后变为很大	电阻很小	电阻很小

③根据以上结果,在图乙虚线框中画出电路图。

【答案】(1)①“×1”　②19.0　(2)①A　②欧姆　③如图所示



第十二章　电能　能量守恒定律

第一部分　基础知识点

第1节　电路中的能量转化

一、电功　电功率

1.电功

(1)定义:电流在一段电路中所做的功等于这段电路两端的电压、电路中的电流、通电时间三者的乘积.

(2)定义式:W=IUt.

(3)单位:焦耳,符号是J。

常用的单位还有kW·h(千瓦时),俗称“度”,1 kW·h=3.6×10^6 J。

(4)物理意义:电流做功的过程是电能转化为其他形式能的过程,电流做了多少功就表示有多少电能转化为其他形式的能,即电功是电能转化为其他形式能的量度。

(5)实质:导体中的恒定电场对自由电荷的静电力在做功。

2.电功率

(1)定义:单位时间内电流所做的功.

(2)定义式:$P=\frac{W}{t}$=IU.

(3)单位:瓦特,符号是W,常用单位有kW,1 kW=1 000 W。

(4)物理意义:电功率表示电流做功的快慢。

(5)额定功率

用电器正常工作时所加的电压叫额定电压,额定电压下消耗的功率是额定功率,即$P_{额}=I_{额}U_{额}$。对于纯电阻用电器,$P_{额}=I_{额}^2R=\frac{U_{额}^2}{R}$。

(6)实际功率

实际功率是指用电器在实际电压下消耗的功率,即$P_{实}=I_{实}U_{实}$,$P_{实}$不一定等于$P_{额}$。若$U_{实}>U_{额}$,则$P_{实}>P_{额}$,用电器可能被烧坏;若$U_{实}<U_{额}$,则$P_{实}<P_{额}$;若$U_{实}=U_{额}$,则$P_{实}=P_{额}$。实际功率不能长时间超过额定功率。

二、焦耳定律

1.焦耳定律

①内容:电流通过导体产生的热量跟电流的二次方成正比,跟导体的电阻及通电时间成正比.

②定义式:$Q=I^2Rt$.

2.热功率

①定义:单位时间内产生的电热.

②定义式:$P_{热}=\frac{Q}{t}=I^2R$.

三、电路中的能量转化

1.纯电阻电路和非纯电阻电路

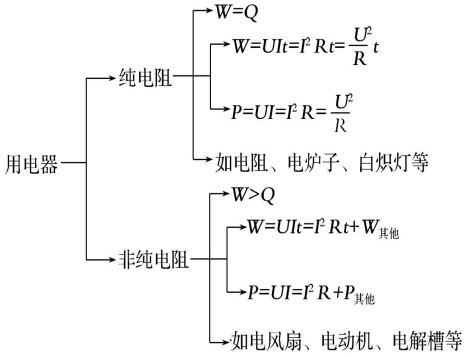
项目	纯电阻电路	非纯电阻电路
元件特点	电路中只有电阻元件,只能把电能转化为内能	电路中除电阻外,还有能把电能转化为其他形式能的用电器
欧姆定律	欧姆定律适用,$I=\frac{U}{R}$	欧姆定律不适用,$I\neq\frac{U}{R}$
能量转化	电流做功将电能全部转化为内能	电流做功除将电能转化为内能外还转化为其他形式的能
元件举例	电阻、电炉丝、白炽灯等	电动机、电解槽等

2.电功(电功率)与热量(热功率)的计算

项目	纯电阻电路	非纯电阻电路
能量转化	电能⇒内能	电能⇒$\begin{matrix}\text{其他形}\\\text{式的能}\end{matrix}$+内能
电功（电功率）	$W=UIt=I^2Rt=\frac{U^2}{R}t$ $(P_{电}=UI=I^2R=\frac{U^2}{R})$	$W=UIt$ $(P_{电}=UI)$
热量（热功率）	$Q=UIt=I^2Rt=\frac{U^2}{R}t$ $(P_{热}=UI=I^2R=\frac{U^2}{R})$	$Q=I^2Rt$ $(P_{热}=I^2R)$
关系	$W=Q$ $(P_{电}=P_{热})$	$W>Q$ $(P_{电}>P_{热})$

【点拨】无论是纯电阻电路还是非纯电阻电路，电功均为 $W=UIt$，电热均为 $Q=I^2Rt$。只不过纯电阻电路中 $W=Q$，即 $UIt=I^2Rt=\frac{U^2}{R}t$；而非纯电阻电路中 $W>Q$，即 $UIt>I^2Rt$。

【小结】电功、电热、电功率和热功率



3.电动机的三个功率及关系

输入功率	电动机的总功率由电动机电路中 t 的电流和电压决定，即 $P_{总}=P_{入}=UI$
输出功率	电动机做有用功的功率，也叫做机械功率
热功率	电动机线圈上有电阻，电流通过线圈时会发热，热功率 $P_{热}=I^2r$
三者关系	$P_{总}=P_{出}+P_{热}$
效率	$\eta=\frac{P_{出}}{P_{入}}\times100\%=\frac{P_{出}}{P_{总}}\times100\%$
特别说明	①正常工作的电动机是非纯电阻元件； ②电动机因故障或其他原因不转动时，相当于一个纯电阻元件

【关于含电动机问题的分析】

①抓住两个关键量：确定电动机的电压 U_M 和电流 I_M 是解决所有问题的关键．若能求出 U_M、I_M，就能确定电动机的电功率 $P=U_MI_M$，根据电流 I_M 和电动机的电阻 r 可求出热功率 $P_r=I_M^2r$，最后求出输出功率 $P_{出}=P-P_r$．

②坚持“躲着”求解 U_M、I_M：首先，对于其他纯电阻电路、电源的内电路等，利用欧姆定律进行分析计算，确定相应的电压或电流．然后利用闭合电路的电压关系、电流关系间接确定电动机的工作电压和电流．

③应用能量守恒定律分析：要善于从能量转化的角度出发，紧紧围绕能量守恒定律，利用“电功＝电热＋其他能量”寻找等量关系求解．

特别注意：电动机正常工作时，电功率大于热功率，电能转化成电机导线上的电热能与电机转动的机械能，即 $P_{电}=UI=P_{热}+P_{机械}=I^2R+P_{机械}$；当电动机通电卡住不转时，它无法将电能转化成机械能，相当于一个发热的纯电阻，电功率与热功率相等．

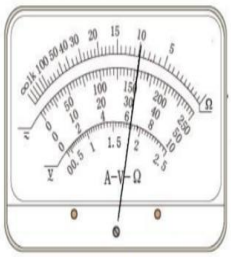
【注意】电动机通电不转动时，电流大，电阻较小；电动机通电转动时，电流变小，电阻变大。

【典例】

(7分)(1)图 1 是一款可以直接接在手机上的电风扇，某同学拆下电风扇，将多用电表选择开关置于欧姆“×1”挡，调零后按正确操作将表笔接在风扇的接线柱上测量，一次叶片转动，另一次设法使叶片不转，两次电表读数如图 2、3 所示，则 ▲ (选填“图 2”或“图 3”)为叶片转动时的读数。根据测量得出电风扇的电阻大约是▲Ω。



第 18 题图 1



第 18 题图 2



第 18 题图 3

【答案】（1）图 3　10Ω

第 2 节　闭合电路的欧姆定律

一、电动势

(1)**电源**：从能量转化的角度看，电源是通过非静电力做功把其他形式的能转化为电势能的装置。在化学电池中，非静电力是化学作用，它使化学能转化为电势能；在发电机中，非静电力是电磁作用，它使机械能转化为电势能。

【注意】电源把电子从正极搬运到负极

（2）**电动势**：在物理学中，我们把非静电力所做的功与所移动的电荷量之比叫电动势，用符号 E 表示。

①**大小**：电动势在数值上等于非静电力把 1 C 的正电荷在电源内从负极移送到正极所做的功．

②**公式**：如果移送电荷 q 时非静电力所做的功为 W，那么电动势 E 表示为：$E=\frac{W_{非}}{q}$．

③**单位**：伏特，符号是 V.

④**决定因素**：由电源中非静电力的特性决定，跟电源的体积无关，跟外电路无关．

⑤**电动势与电压的区别和联系**

项目	电动势 E	电势差 U
物理意义	非静电力做功，把其他形式的能转化为电势能	静电力做功，把电势能转化为其他形式的能
定义式	$E=\frac{W}{q}$，W 为非静电力做的功	$U=\frac{W}{q}$，W 为静电力做的功
单位	伏特(V)	
联系	$E=U_{内}+U_{外}$，电动势在数值上等于电源未接入电路时两极间的电势差	

二、闭合电路的欧姆定律及其能量分析

（一）电源的内阻

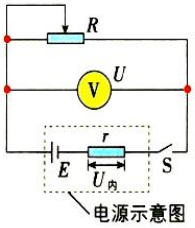
(1)定义：电源内部也是由导体组成的，所以也有电阻，这个电阻叫电源的内电阻，简称内阻。

(2)决定因素：内阻由电源自身的特点决定。

（二）几个概念

1. 闭合电路：用导线把电源、用电器连接起来组成闭合电路。

2. 闭合电路的构成：外电路与内电路，如图所示。



电源示意图

(1)外电路：电源两极之外的电路叫外电路，外电路两端的电压叫外电压，也叫路端电压，用 U 表示。

(2)内电路：电源内部的电路叫内电路，内电路两端的电压叫内电压，用 $U_{内}$ 表示。

（三）闭合电路的欧姆定律

1.内容：闭合电路的电流跟电源的电动势成正比，跟内、外电阻之和成反比.

2.表达式：$I=\frac{E}{R+r}$

3.适用范围：此式适用于外电路为纯电阻电路

4.闭合电路的欧姆定律的几种表示形式：

①电流形式：$I=\frac{E}{R+r}$；

②电压形式：$E=IR+Ir=U_{外}+Ir$；

③能量形式：$Eq=qU_{外}+qU_{内}$；

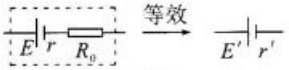
④功率形式：$EI=U_{外}I+I^2r$.

【除①外，其他三种形式适用于任意电路】

【拓展】等效电源

(1)第一种等效电源原理

如图(a)所示，电动势为 E、内阻为 r 的电源串联一定值电阻 R_0，将电源与定值电阻等效成新电源，求新电源的电动势 E' 与内阻 r'.



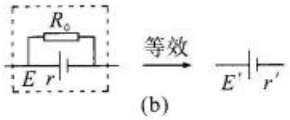
(a)

用理想电压表接在虚线框外部的导线上，由于理想电压表相当于断路，测得电压为等效电源的电动势，即 $E'=E$，由于内阻 r 与 R_0 串联，虚线框部分的等效电阻为 $r+R_0$，即 $r'=r+R_0$.

综上所述，等效电源的电动势为 E，内阻为 $(r+R_0)$.

(2)第二种等效电源原理

如图(b)所示，电动势为 E、内阻为 r 的电源并联一定值电阻 R_0，将电源与定值电阻等效成新电源，求新电源的电动势 E' 与内阻 r'.



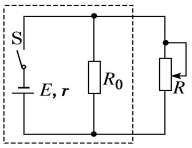
(b)

用理想电压表接在虚线框外部的导线上，由于理想电压表相当于断路，测得电压为等效电源的电动势，电动势 $E'=\frac{R_0}{R_0+r}\cdot E=\frac{R_0E}{R_0+r}$.

由于内阻 r 与 R_0 并联，虚线框部分的等效内阻为 $r'=\frac{R_0r}{R_0+r}$.

综上所述，等效电源的电动势为 $\frac{R_0E}{R_0+r}$，内阻为 $\frac{R_0r}{R_0+r}$.

【典例 1】如图所示，电源电动势 E＝2 V，内阻 r＝1 Ω，电阻 R_0＝2 Ω，可变电阻的阻值范围为 0～10 Ω。求可变电阻为多大时，R 上消耗的功率最大，最大值为多少？



【答案】R＝$\frac{2}{3}$ Ω　P＝$\frac{2}{3}$ W(等效电动势为 $\frac{4}{3}$ V)

（四）路端电压与外电阻的关系

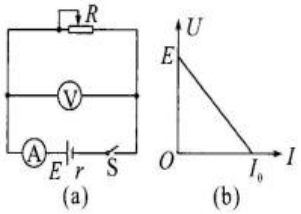
1.当外电阻 R 增大时，I 减小，内电压减小，路端电压 U 增大．当外电路断开时，I＝0，U＝E.

2.当外电阻 R 减小时，I 增大，内电压增大，路端电压 U 减小．当电源两端短路时，外电阻 R＝0，I＝$\frac{E}{r}$，U＝0.

将电压表接在电源两极间测得的电压 U 是指路端电压，不是内电阻两端的电压，也不是电源电动势。

（五）路端电压 U 与电流 I 的关系

在如图(a)所示的电路中，电源电动势为 E、内阻 r，R 为滑动变阻器，电流表 A 与电压表 V 为理想电表，分析路端电压与电流的关系.



(1)关系式:$U=E-Ir$.

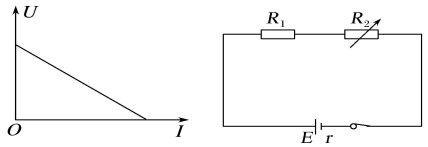
(2)$U-I$ 图像如图(b)所示.

①当电路断路,即 $I=0$ 时,纵截距为电源电动势;

②当外电路短路,即 $U=0$ 时,横截距为短路电流;

③图线的斜率的绝对值为电源的内阻.

【拓展】

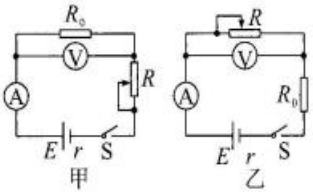


【规律】

①对于定值电阻 $R_1=\frac{U}{I}=\frac{\Delta U}{\Delta I}$=定值

②对于可变电阻 $R_2=\frac{U_2}{I}$,而$\frac{\Delta U}{\Delta I}=R_1$+r（R 之外的等效电阻）=定值

【典例 2】在如图甲、乙所示的电路中。闭合开关 S,当滑动变阻器的滑动触头滑动时,两个理想电表的示数都发生变化,电表示数变化量的绝对值分别用 ΔI、ΔU 表示,求甲、乙两图中$\frac{\Delta U}{\Delta I}$的值.



图甲中电压表测量定值电阻两端的电压,则$\frac{\Delta U}{\Delta I}$等于该定值电阻的阻值;

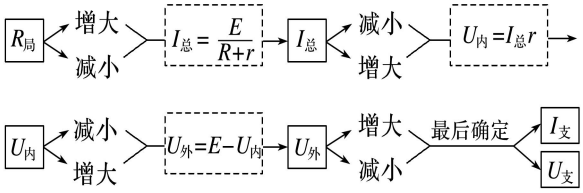
图乙中电压表测量变值电阻两端的电压,则$\left|\frac{\Delta U}{\Delta I}\right|$等于该电阻以外部分的总电阻的阻值.

根据电压表的接法来确定$\frac{\Delta U}{\Delta I}$的物理意义,但两种情况下$\frac{\Delta U}{\Delta I}$均为定值.

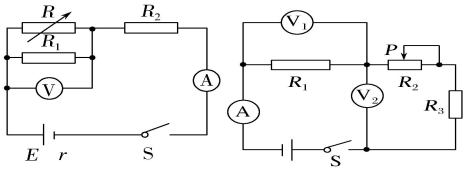
第二部分 方法、规律与技巧

一、电路动态分析的方法

1.程序法:电路结构的变化→R 的变化→$R_{总}$的变化→$I_{总}$的变化→$U_{端}$的变化→固定支路$\begin{cases}\text{并联分流 I}\\\text{串联分压 U}\end{cases}$→支路的变化。



2.极限法:即因滑动变阻器滑片滑动引起的电路变化问题,可将滑动变阻器的滑动端分别滑至两个极端去讨论。



3.口诀法:“串反并同”“压同流反”.

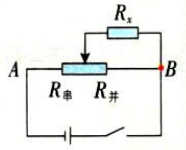
【“串反”】某一电阻发生变化时,则与之串联(直接或间接串联都可以)的电阻上的电压、电流、电功率变化规律与该电阻的变化规律相反;

【“并同”】某一电阻发生变化时,则与之并联(直接或间接并联都可以)的电阻上的电压、电流、电功率变化规律与该电阻的变化规律相同;

【“压同”】某一电阻发生变化时,则该电阻上的电压变化规律与该电阻的变化规律相同;

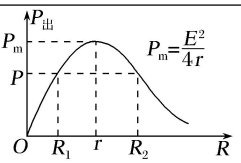
【“流反”】某一电阻发生变化时,则该电阻上的电流变化规律与该电阻的变化规律相反;

【拓展】如图所示的分压电路中,滑动变阻器可视为由两段电阻构成,其中 $R_{并}$与用电器并联,$R_{串}$与并联部分串联。A、B 之间的电阻变化情况与 $R_{串}$的变化情况一致。



二、电源的功率和效率问题

1.电源的功率

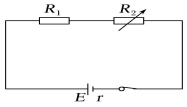
电源总功率	任意电路:$P_{总}=EI=P_{出}+P_{内}$
	纯电阻电路:$P_{总}=I^2(R+r)=\frac{E^2}{R+r}$
电源内部消耗的功率	$P_{内}=I^2r=P_{总}-P_{出}$
电源的输出功率	任意电路:$P_{出}=UI=P_{总}-P_{内}$
	纯电阻电路:$P_{出}=UI=I^2R=\frac{E^2}{(R+r)^2}R=\frac{E^2R}{(R-r)^2+4Rr}=\frac{E^2}{\frac{(R-r)^2}{R}+4r}$
$P_{出}$与外电阻 R 的关系	
电源的效率	任意电路:$\eta=\frac{P_{出}}{P_{总}}\times100\%=\frac{U}{E}\times100\%$

2.解决最大功率问题的几点注意

(1)解决最大功率问题时,要弄清是定值电阻还是可变电阻的最大功率,定值电阻的最大功率用 $P=I^2R=\frac{U^2}{R}$分析,可变电阻的最大功率用等效电源法求解。

(2)电源输出功率最大时,效率不是最大,只有 50%。

(3)当功率为 P（不为最大值）时，对应两电阻 R_1、R_2，则有 $R_1 \times R_2 = r^2$



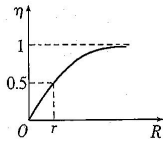
【规律】

①要使电源的输出功率最大，则满足：$r=R_1+R_2$

②要使 R_2 的功率最大，则满足：$R_2=R_1+r$

③要使 R_1 的功率最大，则满足：$R_2=0$

3.电源的效率与外电路电阻的关系

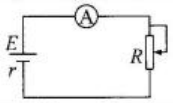
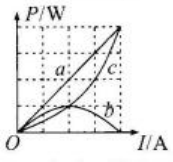


$$\eta=\frac{I^2R}{I^2(R+r)}\times 100\%=\frac{R}{R+r}\times 100\%=\frac{1}{1+\frac{r}{R}}\times 100\%.$$

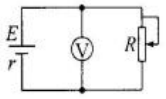
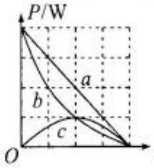
【规律】外电阻越大，电源效率越高。

【拓展】

(1)电功率与电流的关系

电功率与电流的关系（$P-I$ 图像）	
电路图	
总功率	图像 a：$P_{总}=EI$
输出功率	图像 b：$P_{出}=EI-I^2r$
内阻功率	图像 c：$P_r=I^2r$
图像	

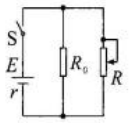
(2)电功率与电压的关系

电功率与电压的关系（$P-U$ 图像）	
电路图	
总功率	图像 a：$P_{总}=EI=E\cdot\frac{E-U}{r}=\frac{E^2}{r}-\frac{E}{r}U$
输出功率	图像 c：$P_{出}=UI=U\cdot\frac{E-U}{r}$
内阻功率	图像 b：$P_r=I^2r=\frac{(E-U)^2}{r}$
图像	

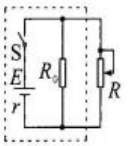
【问题突破口】求出电源的电动势 E 和内阻 r

（3）等效电源问题

如图所示，电源电动势为 E，内阻为 r，电阻 R_0 已知，R 为可变电阻的阻值范围，求可变电阻为多大时，R 上消耗的功率最大？



解：如图所示，采用等效电源法分析，把定值电阻等效到电源的内部，即将电源和定值电阻看作电动势为 $E'=\frac{R_0}{R_0+r}E$、内阻为 $r'=\frac{R_0r}{R_0+r}$ 的电源.



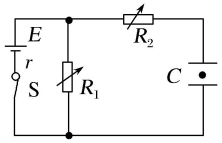
当 $R=r'=\frac{R_0r}{R_0+r}$ 时，电阻 R 上消耗的功率最大.

三、含电容器的直流电路问题

1.含电容器电路的两个规律

(1)电路稳定后，由于电容器所在支路无电流通过，所以在此支路上的电阻无电压降低，因此电容器两极板间的电压就等于该支路两端的电压。在电路稳定后，与电容器串联的电阻中无电流通过，与电容器串联的电阻阻值变化，不影响电路中其他电表示数和灯泡亮度。

(2)电路中的电流、电压变化时，将会引起电容器的充、放电。如果电容器两端电压升高，电容器将充电，电荷量增大；如果电容器两端电压降低，电容器将通过与它连接的电路放电，电荷量减小。



2.含电容器电路的分析方法

1. 电路简化

把电容器所处的支路视为断路，简化电路时可以去掉，求电荷量时再在相应位置补上.

2. 电容器的电压

(1)电容器两端的电压等于与之并联的电阻两端的电压.

(2)电容器所在的支路中没有电流，与之串联的电阻无电压，相当于断路.

3. 电容器的电荷量、场强变化

(1)利用 $Q=UC$ 计算电容器初、末状态所带的电荷量 Q_1 和 Q_2.

(2)若变化前后极板带电的电性相同，则通过所连导线的电荷量为 $|Q_1-Q_2|$.

(3)若变化前后极板带电的电性相反，则通过所连导线的电荷量为 Q_1+Q_2.

(4)板间场强变化时，利用电容器的动态变化来分析.

四、电路故障分析

1. 故障特点

(1)**断路特点**:用电器或电阻发生断路,表现为路端电压不为零而电流为零.

(2)**短路特点**:用电器或电阻发生短路,表现为有电流通过电路但其两端电压为零.

2. 检查方法

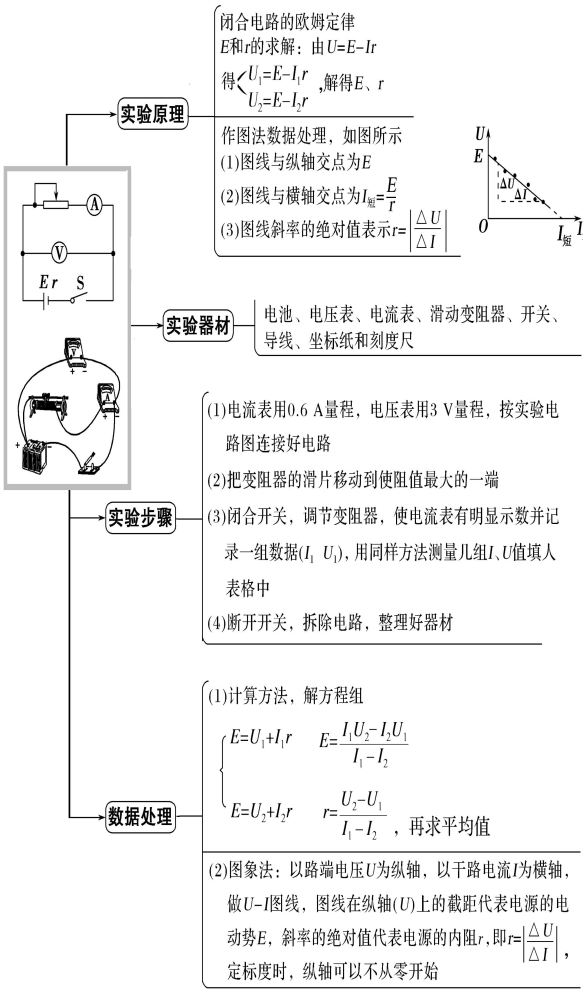
(1)**电压表检测**:若电压表示数为零,则说明可能在检量路段之外有断路,或检量路段被短路.

(2)**电流表检测**:当电路中接有电源时,可用电流表测量各部分电路上的电流,通过对电流值的分析,可以确定故障的位置.在运用电流表检测时,一定要注意电流表的极性和量程.

(3)**欧姆表检测**:当测量值很大时,表示该处断路;当测量值很小或为零时,表示该处短路.在运用欧姆表检测时,一定要切断电源.

(4)**假设法**:将整个电路划分为若干部分,然后逐一假设某部分电路发生某种故障,运用闭合电路或部分电路的欧姆定律进行推理.

第 3 节　实验：测电源的电动势和内阻



一、注意事项

1.**可选用旧电池**：为了使电路的路端电压变化明显，电池的内阻宜大些，可选用已使用过一段时间的 1 号干电池。

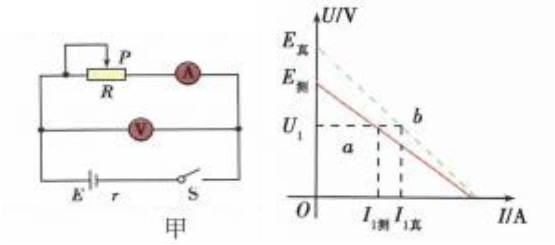
2.**电流不要过大，读数要快**：干电池在大电流放电时，电动势 E 会明显下降，内阻 r 会明显增大，故长时间放电不宜超过 0.3 A，短时间放电不宜超过 0.5 A。因此，实验中不要将 I 调得过大，读数要快，每次读完立即断电。

3.**计算法求 E、r**：要测出不少于 6 组 I、U 数据，且变化范围要大些，用方程组求解时，要将测出的 I、U 数据中，第 1 和第 4 为一组、第 2 和第 5 为一组、第 3 和第 6 为一组，分别解出 E、r 值再求平均值。

4.**合理选择标度**：为使图线分布空间大，如图所示，纵坐标可以不从零开始，则图线和横轴的交点不再是短路电流，电源的内阻不能用 $r=\frac{E}{I_{短}}$ 确定，应根据 $r=\left|\frac{\Delta U}{\Delta I}\right|$ 确定。

二、误差分析

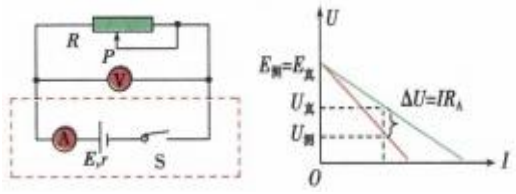
（1）电流表外接法（被测电阻为电源）



甲

【结果】$E_{测}<E_{真}$，$r_{测}<r_{真}$（误差较小）

（2）电流表内接法（若已知电流表内阻，则没有误差）



乙

【结果】$E_{测}=E_{真}$，$r_{测}>r_{真}$（误差较大）

测量一般干电池时（内阻很小）由于乙图内阻测量值误差较大，所以一般用甲图。但测水果电池时，由于其内阻很大，可以使用乙电路。

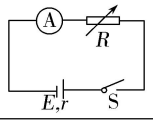
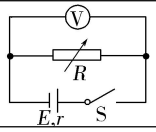
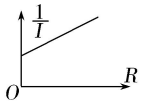
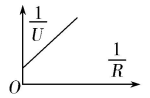
记忆口诀:

A 表 V 表测电源,A 表外接莫记反;测得数据六七组,联立方程求解慢。

U 为纵轴 I 为横,描点连线堪为重;两轴截距和斜率,搞清意义实验毕。

V 表分流存误差,E、r 偏小图可鉴;两个电阻和单表,准确测 E 不算难。

三、**测定电池电动势和内阻的其他方法（变曲为直）**

安阻法	伏阻法
	
$\frac{1}{I}=\frac{1}{E}R+\frac{r}{E}$	$\frac{1}{U}=\frac{r}{E}\cdot\frac{1}{R}+\frac{1}{E}$
	
纵轴截距为$\frac{r}{E}$，斜率为$\frac{1}{E}$	纵轴截距为$\frac{1}{E}$，斜率为$\frac{r}{E}$
$E_{测}=E_{真}$ $r_{测}>r_{真}$	$E_{测}<E_{真}$ $r_{测}<r_{真}$
若已知电流表 A 的阻值可消除测内阻的系统误差	若已知电压表 V 的阻值可消除测内阻的系统误差

【典例】

（2）小明同学利用图 3 和图 4 的电路图连接电路，分别完成了“测量电源电动势和内阻”和“测量某一段长度已知的电阻丝 R_x 的电阻率”两个实验，两个电路使用同一电源。

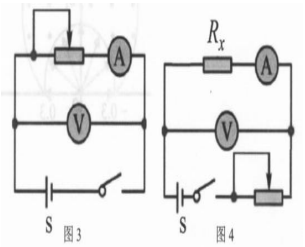
①图 5 是该同学根据实验测得的数据在同一坐标轴上同时作出两个实验的 U-I 图像，下列说法正确的是

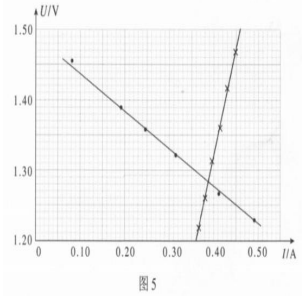
A. 图 3 中电压表的内阻对实验结果无影响；

B. 图 4 中电压表的内阻对实验结果无影响；

C. 图 5 可知，电源的电动势为 1.49V，内阻为 2.5Ω；

D. 在测量 R_x 的电阻时，若将滑动变阻器移到最右端，R_x 消耗的功率约为 0.50W





【答案】BD

【补偿法消除系统误差】

【典例 1】在电学实验中由于电压表、电流表内阻的影响，使得测量结果总存在系统误差.某校课外研究性学习小组进行了消除系统误差的探究实验，下面就举两例：

Ⅰ.某组设计了如图1所示的电路，该电路能够测量电源E的电动势和内电阻r，E'是辅助电源.A、B两点间有一灵敏电流计G.

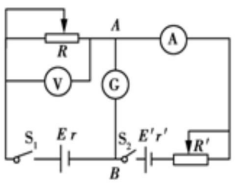


图 1

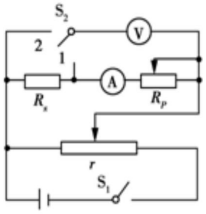


图 2

（1）补充下列实验步骤：①闭合开关S_1、S_2，___使得灵敏电流计的示数为零，这时，A、B两点U_A、U_B的关系是U_A___U_B，即A、B相当于同一点，读出电流表和电压表的示数I_1和U_1，其中I_1就是通过电源E的电流.

②改变滑动变阻器R、R'的阻值，重新使得_____，读出_____.

（2）写出步骤①②对应的方程式及电动势和内电阻的表达式_____.

解Ⅰ.①由题意可知，当G中示数为零时，电压表所示为电源两端的输出电压；

故第一步应为：调整滑动变阻器R、R'，使得灵敏电流计的示数为零，这时，A、B两点U_A、U_B的关系是$U_A=U_B$；②为了使测得的电压值仍为电源两端的输出电压，灵敏电流计的示数为零，同时需读出电流表和电压表的示数I_2和U_2

（2）当灵敏电流表的示数为零时，由闭合电路欧姆定律得

$$E+E'=U+I(R'+r+r')$$

$$E'=I(R'+R_A+r')$$

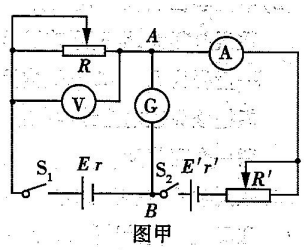
联立以上两式得$E=U+Ir$

代入测量数据得：$E=I_1r+U_1$，

$E=I_2r+U_2$，解得

$$E=U_1+\frac{I_1(U_2-U_1)}{(I_1-I_2)},\ r=\frac{U_2-U_1}{I_1-I_2}$$

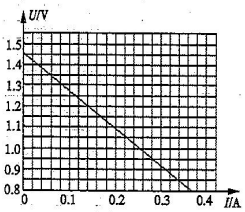
【典例 2】在电学实验中，由于电压表、电流表内阻的影响，测量结果总存在系统误差. 某校课外研究性学习小组进行了消除电表内阻对测量结果的影响的探究，下面是一个实例：某组设计了如图甲所示的电路，该电路能够测量电源 E 的电动势和内电阻. E' 是辅助电源，A、B 两点间有一灵敏电流计 G. 实验步骤如下：



图甲

（1）闭合开关 S_1、S_2，调节滑动变阻器 R、R'，使得灵敏电流计的示数为零，这时 A、B 两点的电势相等，读出电流表和电压表的示数 I_1 和 U_1.

（2）改变滑动变阻器 R、R' 的阻值，重新使得灵敏电流计的示数为零，读出电流表和电压表的示数 I_2 和 U_2.



图乙

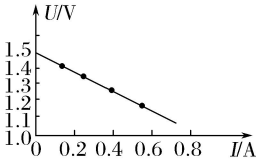
（3）多次重复步骤（2），分别记录下电流表和电压表的示数.

（4）根据电流表和电压表的示数，描点画出 U—I 关系图像，如图乙所示，电源 E 的电动势 E = _____V，内电阻 r = _____Ω.

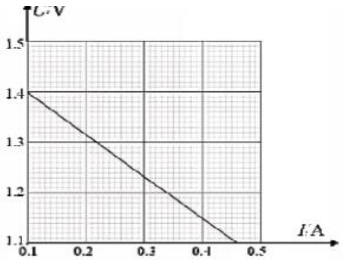
【答案】1.46（1.45—1.47）　　1.79（1.76—1.82）

四、利用图像求解 E 和 r 要注意的几个问题

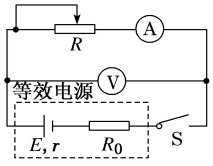
①纵坐标起点不为 0 时，求斜率要减去起点坐标。



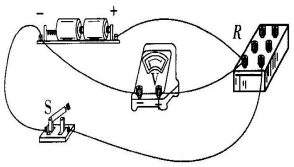
②横坐标起点不为 0 时的情况，当 U-I 图像横坐标起点不为 0 时，要延长到 0 的位置再求 E 和 r（如图所示）。



③若电源端加了保护电阻 R_0，求内阻时，则 r=K-R_0



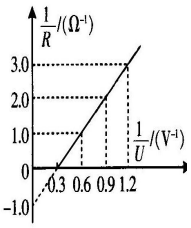
【典例 3】
某同学连接了一个如图所示的电路测量两节干电池串联而成的电池组的电动势 E 和内阻 r，R 为电阻箱，V 为电压表，开关 S。



(1)该同学连接的实验电路中有一处错误，请用笔在该处打上“x”号，并用笔画线作为导线，进行正确的连接。

(2)开关闭合前，电阻箱 R 的阻值应置于_____(填“零”或“较大”)。

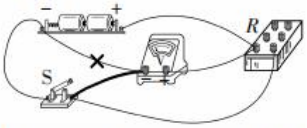
(3)将开关 S 闭合，改变电阻箱的阻值，测出几组 U 及 R 的数据，作出 $\frac{1}{R}-\frac{1}{U}$ 的图线如图所示，则内阻 r=_____Ω，电动势 E=_____V(结果保留两位有效数字)。



(4)如果电压表影响不可忽略，通过分析判断该实验测得的电源电动势将_____(填“偏大”“不变”或“偏小”)。

【答案】

(1)如图所示(2 分)



(2)较大(1 分)　(3)1.0(1 分)　3.3(2 分)
(4)偏小(1 分)

【典例 4】甲乙两位同学欲测定一组干电池的电动势和内阻：

(1) 甲同学连接的实物电路如图 a 所示，经仔细检查，发现电路中有一条导线连接不当，该导线对应的编号为____；正确连接导线后，电压表的示数如图 b 所示，则此时电压大小为_____V；

(2) 甲同学正确连接电路后，测量中发现，在调节滑动变阻器阻值使电流表示数逐渐接近满偏过程中，电压表示数的变化范围比较小，出现该现象的主要原因是_____

A. 电压表分流　　B. 干电池内阻较小

C. 滑动变阻器最大阻值较小　　D. 电流表内阻较小

(3) 为了便于测量，甲同学在图 a 电路的合适位置串联 R_0=3Ω 的定值电阻再次进行实验，而乙同学在甲同学启发下利用如图 c 所示原理图测量电源电动势和内阻，他们利用图像法处理数据时，画在了同一坐标系中如图 d，但忘记标注了，则乙同学获得的实验图像是_____(填“A”或“B”)；由两位同学的图像可求得电池组的真实电动势为_____V，内阻为_____Ω。(结果均保留两位小数)

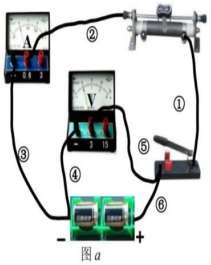


图 a



图 b

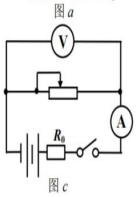


图 c

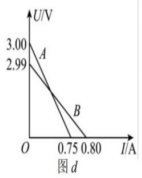
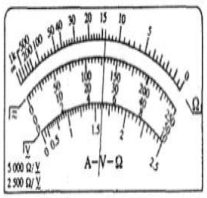


图 d

【答案】（1）⑤　0.30-0.33v　（2）B　（3）A　3.00V　0.75Ω

【典例 5】某学习小组需要测量一节旧的 7 号干电池的电动势和内阻：

(1)小林用多用电表直流电压挡测量干电池的电动势，其中和正极相连的是 ▲ (填“红”或“黑”)表笔。调到合适挡位后，多用电表的指针如图，则该电池的电动势为 ▲ V。



(2)小胡设计了电路测量该电池的电动势和内阻，除开关、导线外，可提供的器材有：

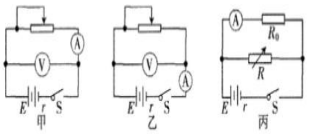
电流表Ⓐ(量程 0～600 mA，内阻约为 0.2 Ω)　电流表Ⓐ(量程 0～3 A，内阻约为 0.5 Ω)

电压表Ⓥ(量程 0～3 V，内阻约为 500 Ω)　电压表Ⓥ(量程 0～15 V，内阻约为 1000 Ω)

滑动变阻器 R (阻值范围 0～5 Ω)

①为测量精度更高，实验中应选电流表 ▲ (选“Ⓐ”或“Ⓐ”)，应选电压表 ▲ (选“Ⓥ”或“Ⓥ”)。

②甲、乙两图为小胡设计的两个实验电路图，其中能更准确测量电池内阻的是 ▲ 图。



(3)小俞又设计了如图丙所示的电路图，其中 R 为电阻箱，R_0 为一已知的定值电阻，电流表的内阻忽略不计，调节电阻箱，测得多组 R 与 I，绘出 $\frac{1}{R}-\frac{1}{I}$ 关系图，得 $\frac{1}{R}=k\frac{1}{I}+b$，则干电池的电动势为 ▲ ，内阻为 ▲ 。(用 k、b、R_0 表示)

【答案】

(每空 1 分)(1)红　1.29～1.31

(2)①　Ⓐ$_1$　Ⓥ$_1$　②　甲

(3)$\frac{-kR_0^2}{bR_0+1}$　$\frac{-R_0}{bR_0+1}$

【典例 5】

(7 分) 如图 18-1 所示，将一根铜棒和一根锌棒插入一只苹果内，就制成了一个最简单的“水果电池”。小明同学做了两个这样的水果电池，并依次进行以下实验：

(1) 用多用电表的直流电压 (0～2.5V) 挡粗测其中一个水果电池的电动势，多用电表的红表笔应与水果电池的____▲____ (填“正极”或“负极”) 相连，若多用电表的指针位置如图 18-2 所示，其水果电池的电动势约为_____▲_____V。

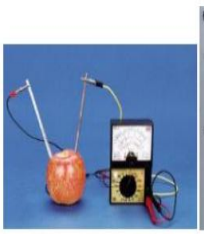


图 18-1



图 18-2

(2) 将两个水果电池串联起来组成电池组给“1.5V、0.3A”的小灯泡供电，小灯泡不能发光。再将多用电表串联在电路中测量电流，发现读数不足 3mA。小灯泡不发光的原因是此电池组的____▲____ (填字母)。

A. 电动势太小　　B. 内阻太大

(3) 用如图 18-3 所示的电路测量该电池组的电动势和内阻，已知定值电阻 R_0=990Ω，两只电流表 规格相同，内阻均为 10Ω。若身边有两种规格的滑动变阻器：A (0～30Ω)、B (0～3kΩ)，实验中应该选用的滑动变阻器是_____▲_____ (填“A”或“B”)。

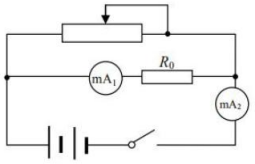


图 18-3

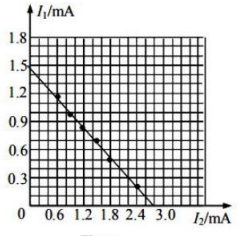


图 18-4

(4) 改变变阻器阻值，得到多组电表读数，描点并作出图 18-4 所示的 I_1—I_2 图象，根据图像求得该电池组的电动势与内电阻为 E = ▲ V；r = ▲ Ω。

【答案】

(1) 正极 (1 分) 0.70±0.01 (1 分) (2) B (1 分)

(3) B (1 分) (4) 1.45V～1.50V (1 分) $5.2\times10^{2}\Omega$～$5.8\times10^{2}\Omega$ (2 分)

【典例 6】

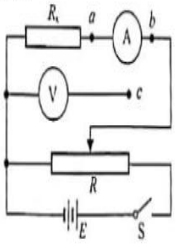
(5 分) 某个同学得知芋艿也有电阻，想探究其阻值为多大，向老师借来多用电表进行粗测，如图 1.

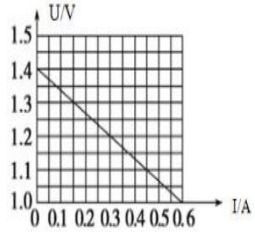


第 18 题图 1　　第 18 题图 2　　第 18 题图 3

(1) 选择档位后 (图 2) 指针偏转如图 3 所示，则该同学接下去的操作应为 ▲，测量读数.

(2) 为精确测量芋艿的阻值，设计如图 4 所示的电路图，则测量时应将 c 点接 ▲ (选填"a 点"或"b 点")，按此连接测量，测量结果 ▲ (选填"小于"、"等于"或"大于") 芋艿内阻的真实值.





第 18 题图 4　　第 18 题图 5

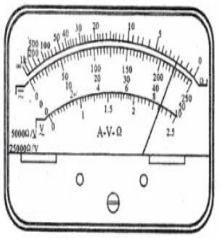
(3) 另一同学测量了两节干电池的电动势和内阻，将测量结果画图 (如图 5)，根据图 5 可知一节干电池的内阻约为 ▲ Ω (保留两位有效数字).

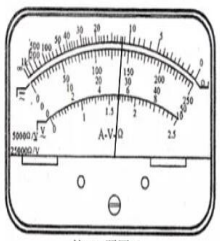
【答案】（1）选择×1K 档位后欧姆调零

（2）b；大于　　（3）0.33

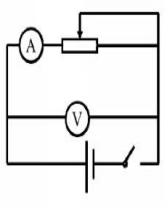
【典例 7】

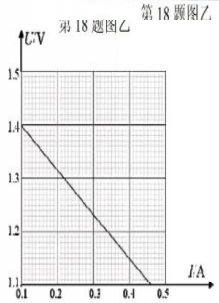
(8 分) (1) 小明同学用多用电表测量电阻的阻值。经过规范操作后，所选欧姆挡倍率为 "×10"，指针位置如图甲所示，则此电阻的阻值读数为 ▲ Ω。





第 18 题图甲　　第 18 题图乙





第 18 题图丙　　第 18 题图丁

(2) 为了测量电源的电动势大小，小明将多用电表调至直流电压 "2.5V" 挡位，正确连接电源后，指针位置如图乙所示。则此电源的电动势大小读数为 ▲ V。

(3) 为了进一步准确测量该电源的电动势，小明设计了如图丙的测量电路。按照电路图接好电路后，调节滑动变阻器，测出多组 I、U 值，作出 U-I 图象如图丁所示。根据图象可以得出该电源的电动势为 ▲ V，内阻为 ▲ Ω。(结果均保留 2 位小数)

【答案】

(1) 20 (2 分) (2) 1.40 (2 分) (3) 1.48±0.03 (2 分) (4) 0.83±0.03 (2 分)

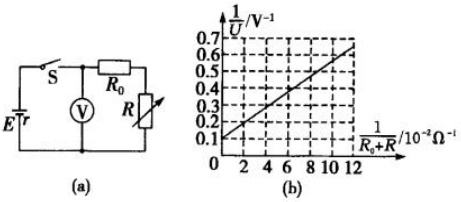
【典例 8】现有一种特殊的电池，它的电动势 E 约为 9 V，内阻 r 约为 50 Ω. 已知该电池允许输出的最大电流为 50 mA，为了测定这个电池的电动势和内阻，某同学利用如图 8－31－22 (a) 所示的电路进行实验，图中电压表的内阻很大，对电路的影响可不考虑，R 为电阻箱，取值范围 0～9 999 Ω，R_0 是定值电阻，起保护电路的作用.

(1) 实验室备有的定值电阻 R_0 有以下几种规格：

A. 10 Ω　2.5 W　　B. 100 Ω　1.0 W

C. 200 Ω　1.0 W　　D. 2 000 Ω　5.0 W

本实验应选_____.



(a)　　(b)

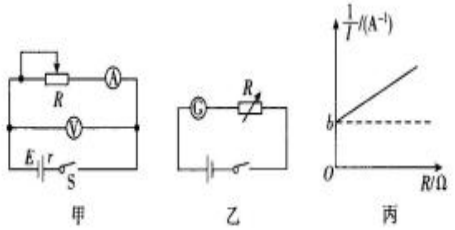
图 8－31－22

(2) 该同学接入符合要求的 R_0 后，闭合开关 S，调整电阻箱的阻值，读取电压表的示数，改变电阻箱阻值，取得多组数据，作出了如图 8－31－22(b) 所示的图线 (已知该直线在 y 轴的截距为 0.1 V^{-1})．则根据该同学所作出的图线可求得电池的电动势 E 为_____V，内阻 r 为_____Ω.

【答案】（1）C　　（2）10　44-48

【典例 9】

某探究小组采用如图 Z21-5 甲所示的电路测定一节干电池的电动势和内阻时，发现量程为 0～3 V 的电压表出现故障不能正常使用，实验台上有一个量程为 500 μA，内阻 R_g = 200 Ω 的灵敏电流表 G 和一个电阻箱 R(0～9999 Ω).



甲　　乙　　丙

(1) 为了把灵敏电流表改装成量程为 2 V 的电压表继续完成实验，电阻箱 R 应调整至_____Ω.

(2) 探究小组中一个同学用灵敏电流表和电阻箱设计了如图乙所示的实验电路，同样测出了干电池的电动势和内阻.

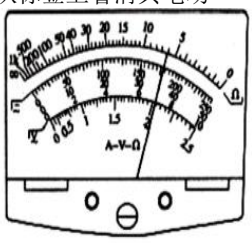
①多次调节电阻箱，记录灵敏电流表 G 的示数 I 和电阻箱的阻值 R，电源的电动势和内阻分别用 E 和 r 表示，则 $\frac{1}{I}$ 和 R 的关系式为_____.

②然后以 $\frac{1}{I}$ 为纵坐标，以 R 为横坐标，作出 $\frac{1}{I}$-R 图线为一直线，如图丙所示，测得直线在纵轴上的截距 b =

134 A^{-1}，直线的斜率 $k=\frac{2}{3}$ V^{-1}，则该电源的电动势 $E=$_____V，内阻 $r=$_____Ω.

【答案】（1）3800　　（2）①$\frac{1}{I}=\frac{R_g+r}{E}+\frac{1}{E}R$　②1.5　1

【典例 10】现有一摄像机电池，无法从标签上看清其电动势等数据，现进行如下实验操作。



(1) 选取多用电表的直流电压 10V 挡，将两表笔直接接到摄像机电池的两极，其中黑表笔接的是电池的__▲__（填"正极"或"负极"），指针偏转情况如图，电池的电动势大约为__▲__V。

(2) 现要更加准确地测量其电动势和内阻，除量程 0.6A 的电流表、滑动变阻器、开关、导线外，可供使用的实验器材还有：

A. 电压表（量程 3V，R_{V1}=3kΩ）

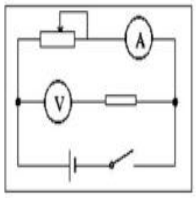
B. 电压表（量程 30V，R_{V2}=30kΩ）

C. 定值电阻 R_1=500Ω

D. 定值电阻 R_2=5000Ω

为使实验结果更加准确，电压表应选__▲__，定值电阻应选__▲__（选填选项前的字母序号），在答题卷的方框内画出实验电路图。

【答案】



(1) 负极 （1 分）、7.1v 或 7.2v（2 分）；

(2) ①A（1 分）、D（1 分）、如图（2 分）；

【典例 11】

在测定一节干电池的电动势和内阻的实验中，备有下列器材：

干电池 E（电动势约为 1.5 V，内阻小于 1.0 Ω）

电流表 A_1（满偏电流 3 mA，内阻 r_1=10 Ω）

电流表 A_2（0～0.6 A，内阻 0.1 Ω）

滑动变阻器 R_1（0～20 Ω，10 A）

滑动变阻器 R_2（0～100 Ω，10 A）

定值电阻 R_3（990 Ω）

开关一个和导线若干

(1)实验器材中未提供电压表，可以利用_____将 A_1 改装成电压表.

(2)为方便且能较准确地进行测量，其中应选用的滑动变阻器是_____（填字母代号）.

(3)请在虚线框内画出利用本题提供的器材设计的测量干电池电动势和内阻的实验电路图.



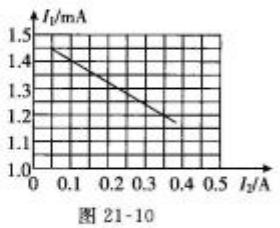
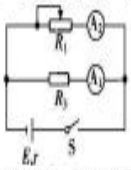


图 21-10

(4)图 21-10 为某一同学根据他所设计的实验给出的 I_1-I_2 图线（I_1 为 A_1 的示数，I_2 为 A_2 的示数），由图线可求得被测干电池的电动势 E=_____ V，内阻 r=_____ Ω.

【答案】

(1)R_1　(2)R_2　(3)如图所示　(4)1.48　0.8



【典例 12】 某同学欲测量一节干电池的电动势（约 1.5V）和内阻（约 2Ω），现有实验仪器为

电流表Ⓐ（量程 0—0.6A，0—3A 均可正常使用）

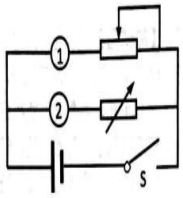
微安表μA（量程 0—200μA，内阻 500Ω）

滑动变阻器一个（0-20Ω，2A）

电阻箱（0-9999）

待测电池

开关导线若干



根据已有器材，某同学设计了如图实验原理图

(1)在 1 中接入仪器是__▲__，在 2 中接入仪器是__▲__（填"电流表Ⓐ或微安表μA"）

(2) 实验过程中，电阻箱的阻值应调整在某一个固定值，以下四个阻值中你认为最合理的是__▲__

A. 1000Ω　　B. 3000Ω　　C. 5000Ω　　D. 7000Ω

(3)已知 1 中电表的示数为 I_1 内阻为 R_1，2 中电表的示数为 I_2 内阻为 R_2，电阻箱的阻值为 R_0，电源电动势为 E，电源内阻为 r，若不做任何近似处理，则 I_2=__▲__（用题中给出的字母表示）

【答案】

(1) 电流表Ⓐ --- 1 分 微安表μA -- 1 分　(2)D --- 1 分　(3)　$I_2=(E-I_1r)/(r+R_2+R_0)$　---2 分

【典例 13】

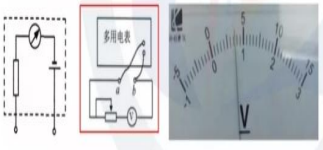
(8 分)实验室中有如下器材：多用电表，电压表（3 V，3 kΩ），两节 1.5 V 干电池（内阻未知），滑动变阻器（最大阻值 2 kΩ）电键一个、导线若干。

(1)①用多用电表测其中一节干电池的电动势，将选择开关置于合适的位置，下列符合要求的是_____。

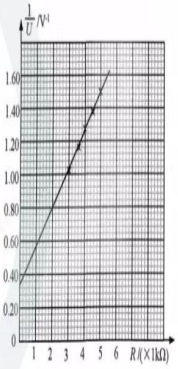


A　　B　　C　　D

②欧姆表的内部可以等效为一个电池、一个理想电流表和一个电阻串联而成的电路，如图 1 所示。利用图 2 所示的电路测量多用电表欧姆档内部电池的电动势和内阻。记电池的电动势为 E，欧姆表"×100"档内部电路的总电阻为 r，调节滑动变阻器。测得欧姆表的读数 R 和电压表的读数 U，某次测量电压表的示数如图 3 所示，读数为_____V，根据实验数据画出的 $\frac{1}{U}$-R 图线如图 4 所示，求得电动势 E=_____V，内部电路的总电阻 r=_____kΩ(所有结果保留两位小数)。



第 18 题图 1　第 18 题图 2　第 18 题图 3



第 18 题图 4

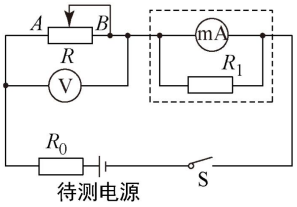
【答案】

(1) ①B （1 分）　②0.72—0.75　（1 分）

1.50（1.42—1.58）（2 分）　1.57（1.45—1.69）（2 分）

【典例 14】

图(a)为某同学测量一节干电池的电动势和内电阻的电路图。



甲

(1) 虚线框内是用毫安表改装成电流表的电路，已知

Ⓥ

是理想电压表，毫安表表头的内阻为3.0Ω，满偏电流为$100mA$，电阻$R_1=0.6\Omega$，由此可知，改装后电流表的量程为_____A。

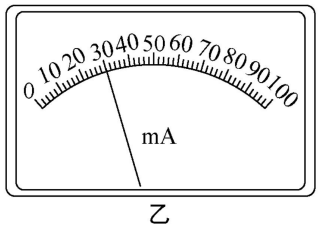
(2) 实验步骤如下，请完成相应的填空：

①将滑动变阻器R的滑片移到___端（选填“A”或B”），闭合开关S；

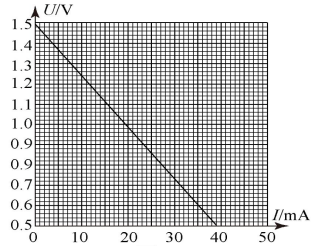
②多次调节滑动变阻器的滑片，记下电压表的示数U和毫安表的示数I，某次测量时毫安表的示数如图(b)所示，其读数为_____mA。

③以U为纵坐标，I为横坐标，作$U-I$图线，如图(c)所示；

④已知定值电阻$R_0=2.0\Omega$，根据图线求得电源的电动势$E=$___V,内阻$r=$___Ω.(结果均保留到小数点后两位)



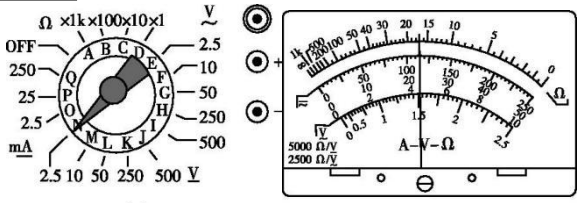
乙



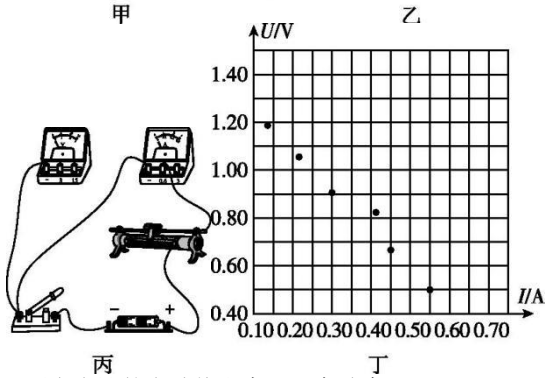
丙

【答案】（1）0.6　　（2）①B　　（2）30　　（3）1.48　1.58.

【典例 15】(1)小明同学用多用电表测量一物理量的值.经过规范操作后，所选挡位及指针位置分别如图甲、乙所示，则读数为_____.



甲　　乙



丙　　丁

(2)在“测定电池的电动势和内阻”实验中：

①如图丙所示，已经连接了一部分电路，请在图中对应位置将电路连接完整.

②合上开关后，测出 6 组 I、U 值，在 U-I 坐标系中描出各对应点，如图丁所示.请在图中作出 U-I 图像.

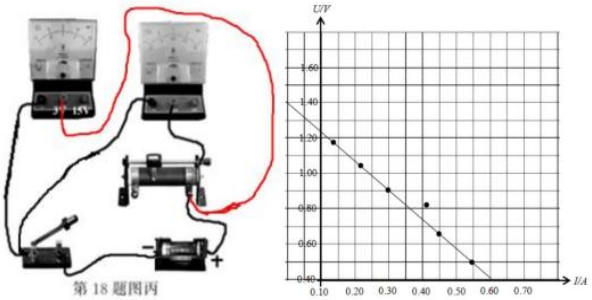
③由作出的 U-I 图像可知，电池的电动势为_____V，内阻为_____Ω.

【答案】

（1）1.15V　（2 分）备注：单位不写扣 1 分

（2）①连线 1 分 ②作图 1 分

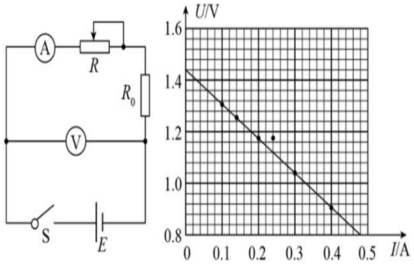
（3）1.40±0.05V（1 分）　1.70±0.20Ω（2 分）



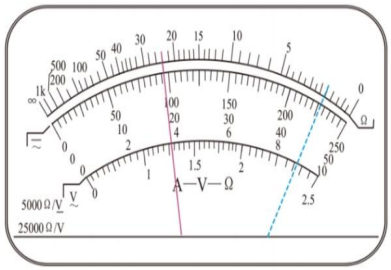
第 18 题图丙

【典例 16】

(1) 某研究性学习小组用如图所示的电路，测定一节干电池的电动势和内阻。按正确的器材连接好实验电路后，接通开关，改变滑动变阻器的阻值 R，读出对应的电流表的示数 I 和电压表的示数 U，并作记录，根据这些数据在图中画出了 $U-I$ 图线。内电阻 r 为___▲___Ω

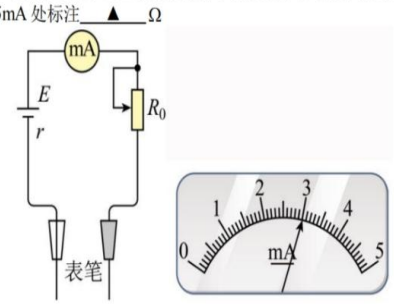


(2) 某同学用多用电表欧姆挡粗测常温下该热敏电阻的阻值时，将选择开关拨到“×10”挡，按正确步骤操作，示数如图甲中的实线所示，则热敏电阻的阻值为___▲___Ω；



甲

(3) 某同学用内阻 $R_g=20\Omega$、满偏电流 $I_g=5mA$ 的毫安表及相关元件制作了一个简易欧姆表，电阻刻度值尚未标定，电路如图甲所示。该同学将两表笔短接，调节滑动变阻器 R 使毫安表指针满偏，再将阻值为 400Ω 的电阻接在两表笔之间，此时毫安表指针位置如图乙所示。则在刻度 2.5mA 处标注___▲___Ω



甲　　乙

【答案】（1）1.32-1.34　（2）240　　（3）600

【典例 17】（7 分）一探究实验小组要测量某电源的电动势和内阻，实验室可供选择的器材有：

电流表 A_1（量程 0~200mA，内阻 $r_1=1\Omega$）

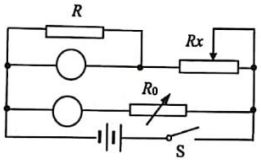
电流表 A_2（量程 0~10mA，内阻 $r_2=19\Omega$）

滑动变阻器 R_x（$0\sim5\Omega$，额定电流 1A）

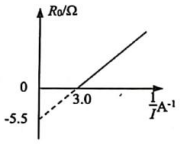
电阻箱 R_0（$0\sim9999.9\Omega$）

二只定值电阻 R（$R_1=0.5\Omega$；$R_2=5\Omega$）

电键 S 一个；导线若干。



第 18 题图 1



第 18 题图 2

（1）①由于电流表量程太小，实验中对两只电表均进行了改装，并连接成如图 1 所示的电路，其中与定值电阻并联的电表改装成量程为 0~600mA 的电流表。则该电流表应选_____（选填“A_1”或“A_2”），定值电阻应选_____（选填“R_1”或“R_2”）。

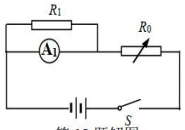
②实验中通过调节_____（选填“R_x”或“R_0”），以测得两只电表的数据。

（2）①按（1）中电路进行实验，发现电流表 A_2 已损坏，若仍要完成实验，请设计电路图并画在答题卷的方框内。

②按电路图正确连线后进行规范操作，记录电阻箱的阻值为 R_0 和电流表 A_1 的示数为 I，作出 $R_0-\frac{1}{I}$ 的图像如图 2 所示，则该电源的电动势_____V，内阻_____Ω。（结果保留二位有效数字）

【答案】（1）① A_1（1 分） R_1（1 分）② R_x（1 分）

（2）①（2 分）

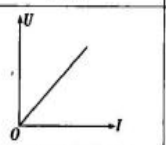
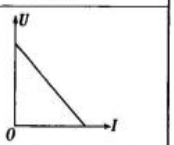


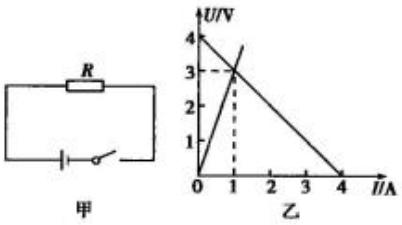
第 18 题解图

②5.5（1 分）；5.2（1 分）

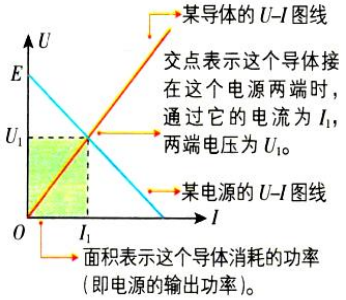
五、利用 U-I 图像求小灯泡的功率问题

电阻的 U-I 图像与电源的 U-I 图像的区别

	电阻	电源
U-I 图象		



甲　　乙



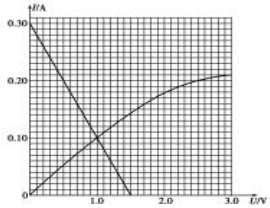
①单个小灯泡与电源形成回路

分别画出 U-I 图，其交点 UI 的乘积即为小灯泡的功率。

②两个相同的小灯泡串联后接到电路中，设电流为 I,每个小灯泡的电压为 U,则有 E=2U+Ir,画出电源的 U-I 图，其交点 UI 的乘积即为每个小灯泡的功率。

③两个相同的小灯泡并联后接到电路中，设每个小灯泡的电流为 I,电压为 U,则有 E=U+2Ir,画出电源的 U-I 图，其交点 UI 的乘积即为每个小灯泡的功率。

④两个不同的小灯泡串（并）联后接到电路中，把两灯泡等效为一个电阻，重新画出等效电阻的 U-I，再画出电源的 U-I 图，其交点 UI 的乘积即为等效电阻的功率。



【典例 18】

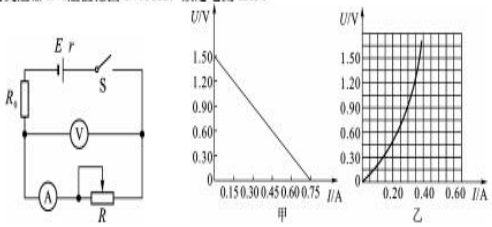
(8 分)为了测量一节干电池的内阻，某实验小组准备设计了如图所示的电路，在实际连接过程中，发现定值电阻和滑动变阻器各有两种型号可供选择，分别是：

定值电阻 a（阻值 1Ω、额定功率 5W）；

定值电阻 b（阻值 10Ω、额定功率 20W）；

滑动变阻器 c（阻值范围 0~10Ω、额定电流 2A）；

滑动变阻器 d（阻值范围 0~100Ω、额定电流 1A）。



请解答以下问题：

(1)定值电阻应选择___（填“a”或“b”），滑动变阻器应选择___（填“c”或“d”）；

(2)记录数据后，得实验结果如图中甲所示。根据图线测得干电池的电动势为___V（结果保留两位小数），干电池的内阻为___Ω（结果保留两位小数）；

(3)现有一小灯泡，其 U–I 特性曲线如图中乙所示，若将此小灯泡和定值电阻 R_0 串联接在上述干电池两端，小灯泡的实际功率是___W（结果保留两位小数）。

【答案】（1）a　c　(2)1.50　1.00　(3)0.27

【典例 19】某研究性学习小组的同学欲做“描绘小电珠的伏安特性曲线”实验.已知所用小电珠的额定电压和额定功率分别为 2.5 V、1.2 W,实验使用的直流电源的电动势为 3.0 V,内阻忽略不计,实验可供选择的器材如下.

A.电流表 A_1(量程 0~0.6 A,内阻约 5 Ω);

B.电流表 A_2(量程 0~3 A,内阻约 0.1 Ω);

C.电压表 V_1(量程 0~3 V,内阻约 3 kΩ);

D.电压表 V_2(量程 0~15 V,内阻约 15 kΩ);

E.滑动变阻器 R_1(阻值 0~10 Ω,额定电流 1 A);

F.滑动变阻器 R_2(阻值 0~5000 Ω,额定电流 500 mA).

请回答下列问题:

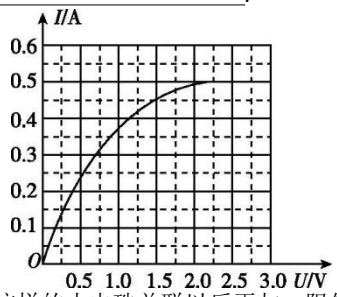
(1)为了完成实验且尽可能减小实验误差,电流表应选择_____,电压表应选择_____,滑动变阻器应选择_____.(均填器材前的选项字母)

(2)根据所选的实验器材,请在虚线框中设计合理的电路原理图来完成该实验.

(3)该研究性学习小组的同学用设计好的电路测得该小电珠两端的电压 U 和通过该小电珠的电流 I,由欧姆定律计算得到的小电珠的电阻值_____(选填“大于”“等于”或“小于”)真实值.

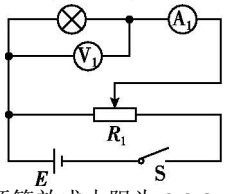
(4)该研究性学习小组的同学通过设计好的电路得到了多组实验数据,并根据得到的多组数据在坐标系中描点画图,如图所示,该

图线越来越平缓，其原因是_____.

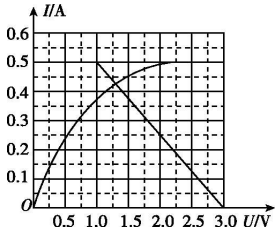


(5)如果取两个这样的小电珠并联以后再与一阻值为 2.0 Ω的定值电阻串联，并接在电动势为 3.0 V、内阻忽略不计的直流电源两端，则每个小电珠消耗的实际功率应为_____(结果保留两位小数)W.

【答案】(1)A　C　E　(2)如图所示　(3)小于　(4)小电珠的电阻随温度的升高而增大　(5)0.55(0.50~0.60 均可)



(5)将定值电阻与电源等效成内阻为 2.0 Ω、电动势为 3.0 V 的电源，由闭合电路欧姆定律得 U=3.0-2.0×2I，变形得 $I=\frac{3}{4}-\frac{1}{4}U$，作出等效电源的 I-U 图线，如图所示，由图可知，U=1.28 V，I=0.43 A，所以小电珠的实际功率为 P=UI=0.55 W.



【典例 20】

(7分)某同学在"描绘小灯泡的伏安特性曲线"实验中用多用电表的直流电压挡测量小灯泡("2.5 V、1.2W")两端的电压。

(1)图1中多用电表的红表笔应与_____(填"a"或"b")连接。

(2)该同学将多用电表正确连入电路，但在实验前进行电路检查时发现仍有导线连接错误。请你写出有连接错误的导线的序号_____

(3)该同学将导线正确连接后进行实验，如图2，滑片移在某一位置时，电流表读数为_____A

(4)小灯泡的伏安特性曲线如图3所示，若取两个这样的小灯泡串联，再与一阻值为 14.0 Ω的定值电阻串联，然后接在电动势为 6.0 V、内阻为 1.0Ω的直流电源两端，则每个小灯泡消耗的实际功率应为_____W(计算结果保留两位有效数字)

(5)多用电表用久以后，表内干电池的电动势会减小而内阻会增大。那么，用久以后的多用电表测得的电压与真实值相比_____(填"偏大"、"偏小"或"相同")。

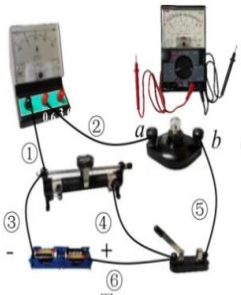


图1

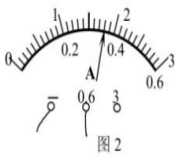


图2

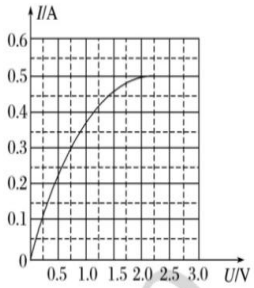


图3

第18题图

【答案】(1)b　(2)③④　(3)0.36　(4)0.23-0.28　(5)相同

第 4 节　能源与可持续发展

1. 能量守恒定律：能量既不会凭空产生，也不会凭空消失，它只能从一种形式转化为其他形式，或者从一个物体转移到别的物体，在转化或转移的过程中，能量的总量保持不变。

2，能量转移或转化的方向性

(1)一切与热现象有关的宏观自然过程都是不可逆的，即一切与热现象有关的宏观过程都有方向性。

①能量的转移具有方向性：如热量可以自发地从高温物体传给低温物体，但不能自发地从低温物体传给高温物体。

②能量的转化具有方向性：如机械能可以自发地完全转化为内能，但内能不能自发地且不能完全转化为机械能。

(2)能量的耗散

①定义：在能量转化过程中，散失到环境中的内能很难收集起来重新利用，这种现象叫能量的耗散。

②为什么要节约能源：能量的耗散表明，在能源的利用过程中，能量的总量守恒，但在可利用的品质上降低了，从便于利用的能源变成不便于利用的能源。这是自然界的能量虽然守恒，但需要节约能源的根本原因。

3.能源的分类与应用

(1)能源的分类

分类标准	类别	定义	举例
能否从自然界直接获取	一次能源	可以从自然界中直接获取的能源	风能、石油、天然气、煤、太阳能、潮汐能、地热能等
	二次能源	无法从自然界中直接获取的能源	电能、汽油、柴油、煤油等
能源是否可以再生	可再生能源	在自然界可以再生的能源	太阳能、风能、地热能、水能、生物质能等
	不可再生能源	短时间无法再生的能源	煤、石油、天然气等
对环境的影响	清洁能源	不排放污染物的能源	太阳能、电能、水能、地热能等
	污染能源	利用过程中会污染环境的能源	煤、石油、天然气等
人类开发早晚和使用情况	常规能源	已大规模开发和使用的能源	煤、石油、天然气、水能等
	新能源	现在刚开始开发或正在积极研究、有待推广的能源	核能、太阳能、潮汐能、风能、地热能等

(2)能源的利用:太阳能发电、水力发电、风能发电、核能发电。

4.能源与社会发展

(1)人类对能源的利用过程:柴薪时期→煤炭时期→石油时期→多能源结构时期。

(2)能源问题

①能源危机:能源是人类社会活动的物质基础,随着人口迅速增长、经济快速发展、工业化程度提高,造成能源短缺。

②能源消耗对环境的影响:化石能源的大量消耗,一方面造成了环境污染,另一方面改变了大气的成分,甚至加剧了气候变化。

(3)可持续发展的核心是追求发展与资源、环境的平衡:既满足当代人的需求,又不损害子孙后代的需求。主要体现在两个方面:一方面要大力提倡节能,另一方面要发展可再生能源和清洁能源。

(4)关于汽车和能源:汽车的总效率约为13%左右。新能源汽车包括:混合动力车(汽柴油发动机、电动机)、氢燃料电池电动车、电池电动车。

【记忆口诀】

电流做功U I t ,电热I平方R t 。
电功率用W比t,电压电流相乘积。
闭合电路内外阻,欧姆定律纯电阻。
电阻分为纯和非,公式不可随意用。
电表改装串和并,电压电流表不同。
动态分析有口诀,串反并同最简洁。
功率效率不并头,内外阻值等一半。

【本章高频考点】

1.电路的动态分析(特别注意$\frac{\Delta U}{\Delta I}$的值)及功率计算问题。

2.测电源的电动势和内阻的实验及变式考查。

第三部分 物理方法概述

一、图像法

物理图像是将抽象的物理问题直观化、形象化的最佳工具,能从整体上反映出两个或两个以上物理量的定性或定量关系。利用图像解题时一定要从图像纵、横坐标的物理意义以及图线中的“点”“线”“斜率”“截距”和“面积”等诸多方面寻找解题的突破口。利用图像解题不但快速、准确,能避免繁杂的运算,还能解决一些用一般计算方法无法解决的问题。

二、等效电源法

等效电源原理:任一含有电源的复杂电路可用一等效电源来代替,等效电源的电动势等于该电路两端的开路电压,内阻等于该电路两端在电源短路情况下的等效电阻。

第四部分 易错、疑难问题选

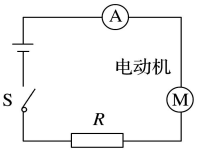
1.电动机是把电能转化成机械能的一种设备,在工农业、交通运输、国防及家电、医疗领域广泛应用。图示表格是某品牌电动机铭牌的部分参数,据此信息,下列说法中不正确的是(　　)

型号	YE3-132S2-2	编号	521780
额定功率	1100W	额定电压	220V
额定电流	5.0A	额定转速	2900r/min
效率	90.0%	频率	50Hz

A. 该电动机的发热功率为110W
B. 该电动机转化为机械能的功率为1100W
C. 该电动机的线圈电阻R为4.4Ω
D. 该电动机正常工作时每分钟对外做的功为5.94×10^4J

【答案】B

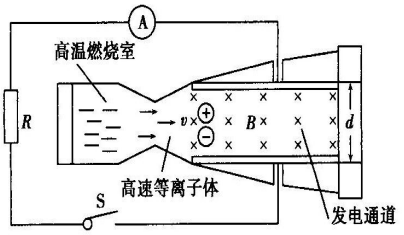
2.如图所示,电源电动势为12 V,电源内阻为1.0 Ω,电路中的电阻R为1.5 Ω,小型直流电动机M的内阻为0.5 Ω,闭合开关S后,电动机正常转动时,电流表的示数为2.0 A.则以下判断中正确的是(　　)



A. 电动机的输出功率为14.0 W　B. 电源输出的电功率为20.0 W
C. 电动机产生的热功率4.0 W　D. 电动机两端的电压为5.0 V

【答案】B

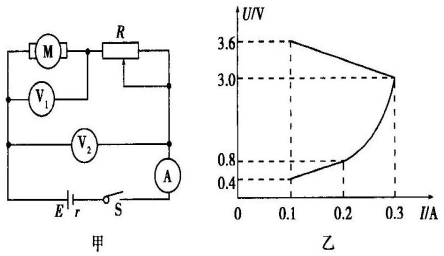
3.磁流体发电机又叫等离子体发电机,图中的燃烧室在3 000 K的高温下将气体全部电离为电子和正离子,即高温等离子体。高温等离子体经喷管提速后以1 000 m/s进入矩形发电通道。发电通道有垂直于喷射速度方向的匀强磁场,磁感应强度$B=6$ T。等离子体发生偏转,在两极间形成电势差。已知发电通道长$a=50$ cm,宽$b=20$ cm,高$d=20$ cm,等离子体的电阻率$\rho=2\ \Omega\cdot$m。则以下判断中正确的是(　　)



A.发电机的电动势为120 V
B.因正离子带电荷量未知,故发电机的电动势不能确定
C.当外接电阻为8 Ω时,发电机的效率最高
D.当外接电阻为4 Ω时,发电机输出功率最大

【答案】D

4.如图所示,图甲有一电动机,当滑动变阻器的触头从一端滑到另一端的过程中,两电压表的读数随电流表读数的变化情况如图乙所示,已知电流表读数在0.2 A以下时,电动机没有发生转动,不考虑电表对电路的影响,以下结论不正确的是(　　)

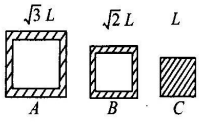


甲　　乙

A.电路中的电源电动势为3.9 V
B.电动机的线圈电阻为4 Ω
C.此电路中电动机的最大输出功率为0.90 W
D.滑动变阻器的最大阻值为32 Ω

【答案】C

5.如图所示,横截面都是正方形的三段导体,它们的材料和长度都相同,导体B刚好能嵌入导体A,导体C刚好能嵌入导体B,现将三段导体串联接入到同一电路中,则(　　)



A. 导体C的电阻最大

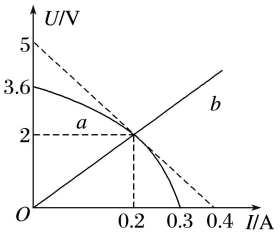
B. 导体 A 两端的电压最大

C. 导体 B 消耗的电功率最大

D. 三段导体在相等时间内产生的热量相等

【答案】D

6.硅光电池是一种太阳能电池，具有低碳环保的优点．如图所示，图线 a 是该电池在某光照强度下路端电压 U 和电流 I 的关系图象(电池电动势不变，内阻不是常量)，图线 b 是某电阻 R 的 $U-I$ 图象，倾斜虚线是过 a、b 交点的图线 a 的切线．在某光照强度下将它们组成闭合回路时，下列相关叙述说法正确的是(　　)



A．此时硅光电池的内阻为 12.5 Ω

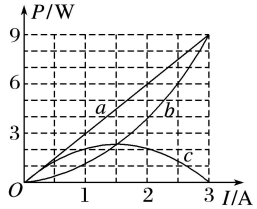
B．此时硅光电池的输出功率为 0.2 W

C．此时硅光电池的总功率为 0.72 W

D．此时硅光电池的输出效率为 40%

【答案】C

7.某同学将一直流电源的总功率 P_E、输出功率 P_R 和电源内部的发热功率 P_r 随电流 I 变化的图线画在了同一坐标系中，如图 7 中的 a、b、c 所示．以下判断正确的是(　　)



A．在 a、b、c 三条图线上分别取横坐标相同的 A、B、C 三点，这三点的纵坐标一定满足关系 $P_A=P_B+P_C$

B．b、c 图线的交点与 a、b 图线的交点的横坐标之比一定为 1∶2，纵坐标之比一定为 1∶4

C．电源的最大输出功率 $P_m=9$ W

D．电源的电动势 $E=3$ V，内电阻 $r=1$ Ω

【答案】ABD

8. 2021 年 7 月 1 日晚，S 市湿地公园内举行建党 100 周年纪念活动。如图所示为 400 架大疆无人机的飞行表演。表格中是该款无人机铭牌上的参数，下列说法正确的是

充电器输出电压	16V	充电器输出电流	5A
无人机电池额定电压	15V	无人机电池额定电流	4A
无人机电池能量	60Wh	无人机电池容量	4000mAh



第 8 题图

A. 无人机充电时，从无电状态到满电状态所需时间约为 8 小时

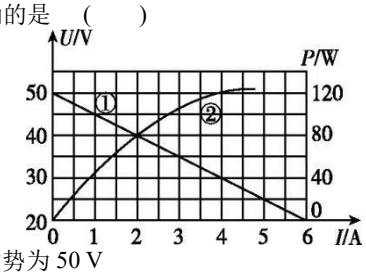
B. 无人机充满电后，总电荷量为 1.44×10^4C

C. 无人机正常飞行时的机械功率为 80W

D. 电池可供无人机持续飞行约 2 小时

【答案】B

9.如图所示,图中直线①表示某电源的路端电压与电流的关系图像,图中曲线②表示该电源的输出功率与电流的关系图像,则下列说法正确的是　(　　)



A.电源的电动势为 50 V

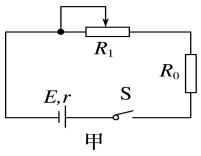
B.电源的内阻为 $\frac{25}{3}$ Ω

C.电流为 2.5 A 时,外电路的电阻为 15 Ω

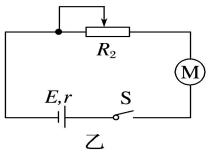
D.输出功率为 120 W 时,输出电压是 30 V

【答案】ACD

10.如图所示，电源电动势 $E=12$ V，内阻 $r=3$ Ω，$R_0=1$ Ω，直流电动机内阻 $R_0'=1$ Ω，当滑动变阻器阻值为 R_1 时可使甲电路输出功率最大,滑动变阻器阻值为 R_2 时可使乙电路输出功率最大，且此时电动机刚好正常工作(额定输出功率为 $P_0=2$ W)，则 R_1 和 R_2 的值分别为(　　)



甲

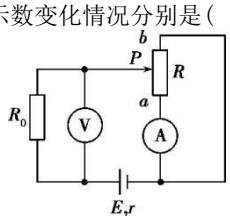


乙

A．2 Ω，2 Ω　B．2 Ω，1.5 Ω　C．1.5 Ω，1.5 Ω　D．1.5 Ω，2 Ω

【答案】B

11.如图所示电路中,滑动变阻器 R 的滑片 P 从 a 端滑到 b 端的过程中,两电表的示数变化情况分别是(　)



A. Ⓥ示数增大, Ⓐ示数减小

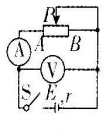
B. Ⓥ示数先减小后增大, Ⓐ示数减小

C. Ⓥ示数增大, Ⓐ示数先增大后减小

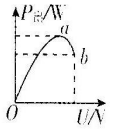
D. Ⓥ示数先减小后增大, Ⓐ示数先增大后减小

【答案】B

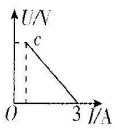
12.（多选）如图甲所示,电源电动势 $E=6$ V,闭合开关,将滑动变阻器的滑片 P 从 A 端滑至 B 端的过程中,得到电路中的一些物理量的变化如图乙、丙、丁所示.其中图乙为输出功率与路端电压的关系曲线,图丙为路端电压与总电流的关系曲线,图丁为电源效率与外电路电阻的关系曲线,不考虑电表、导线电阻对电路的影响.则下列关于图中 a、b、c、d 点的坐标值正确的是　　(　　)



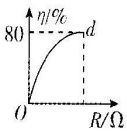
甲



乙



丙



丁

A. a(4 V,4.5 W)　　B. b(4.8 V,2.88 W)

C. c(0.6 A,4.5 V)　　D. d(8 Ω,80%)

【答案】BD

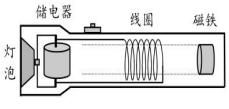
13. 如图所示为振动手电筒的示意图，通过摇晃手电筒使磁铁与线圈发生相对运动来给储电器充电，储电器再给 LED 灯泡供电。一般来回摇晃手电筒的平均作用力约为 2.0N，平均速度约为 0.85m/s，机械能的四分之三可以转化成 LED 灯泡正常发光时的电能。已知 LED 灯泡正常发光的电压为 3.1V，电流为 32mA。下列说法正确的是

A. 摇晃过程线圈磁通量保持不变

B. LED 灯泡的电阻约为 1000Ω

C. 摇晃手电筒的机械功率约 0.1W

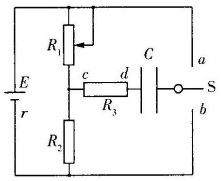
D. 手电筒摇晃 1min，灯泡约可正常发光 12min



【答案】D

14.如图所示，电源电动势 E=

1.5 V，内电阻 $r=0.5\ \Omega$，滑动变阻器 R_1 的最大阻值 $R_{max}=5.0\ \Omega$，$R_2=2.0\ \Omega$，$R_3=1\,000\ \Omega$，平行板电容器 C 的电容为3 μF。则下列说法正确的是



A. 开关接 a 电路稳定时，R_3 上 c 点电势高于 d 点

B. 开关接 b 电路稳定时，若 R_1 接入电路的阻值等于 2.5 Ω，则 R_2 上消耗的功率最大

C. 开关接 b 电路稳定时，R_1 的滑片下滑，R_3 上有从 c 到 d 的电流

D. 开关接 a 电路稳定时，调节 R_1，电容器所带电荷量可以等于 4.5×10^{-6} C

【答案】C

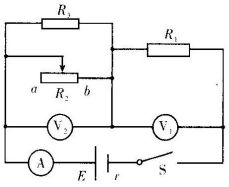
15.在如图所示的电路中，电源电动势 E、内阻为 r，R_1 和 R_3 均为定值电阻，R_2 为滑动变阻器。闭合开关 S，在 R_2 的滑动触头从 a 端向 b 端移动的过程中，电流表示数为 I，电压表 V_1 和 V_2 的示数分别为 U_1 和 U_2。ΔI、ΔU_1 和 ΔU_2 分别表示此过程中电流表示数、两电压表示数的变化量的绝对值。下列说法正确的是

A. 电阻 R_1、R_3 功率都变大

B. $\frac{U_1}{I}$、$\frac{U_2}{I}$的大小均不变

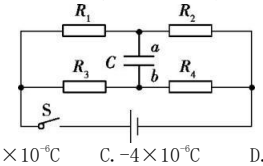
C. $\Delta U_2<\Delta U_1$

D. $\frac{\Delta U_1}{\Delta I}<\frac{\Delta U_2}{\Delta I}$



【答案】D

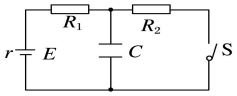
16.如图所示电路中，电容器的电容 C=2 μF，电源电压 E=12V 恒定不变，内阻不计，$R_1:R_2:R_3:R_4=1:2:6:3$，则电容器极板 a 所带电荷量为(　　)



A. -8×10^{-6}C　　B. 4×10^{-6}C　　C. -4×10^{-6}C　　D. 8×10^{-6}C

【答案】D

17.如图所示，电源电动势 $E=10$ V，内阻 $r=1\ \Omega$，$R_1=3\ \Omega$，$R_2=6\ \Omega$，$C=30$ μF.



(1)闭合开关 S，求稳定后通过 R_1 的电流.

(2)然后将开关 S 断开，求电容器两端的电压变化量和流过 R_1 的总电荷量.

(3)如果把 R_2 换成一个可变电阻，其阻值可以在 0～10 Ω范围变化，求开关闭合并且电路稳定时，R_2 消耗的最大电功率.

【答案】　(1)1 A　(2)4 V　1.2×10^{-4} C　(3)6.25 W

18.

为上学方便，某同学新买了一辆电动自行车，如图所示。该车的使用说明书上记载有如下数据：根据此表中的相关数据，下列说法正确的是



第 8 题图

车型	电池规格
20 寸（车轮直径：508mm）	36V　12A·h（蓄电池）
整车质量：30kg	额定转速：210r/min（转/分）
外形尺寸：L1 800mm×W650mm×H 1100mm	充电时间：2h～8h
电机：后轮驱动、直流永磁式电机	额定工作电压/电流：36V/5A

A. 该车的额定电功率约为 432W

B. 该车的额定时速约为 30km/h

C. 该车电池充满电后所储存的电能约为 432J

D. 若保持额定功率行驶且不计能量损失，充满电后，该车约能行驶 2.4h

【答案】D

19. 很多城市推出微公交小型租赁电动车，这为个性化绿色出行又提供了一种方案。某种型号微型电动车为零排放的纯电动汽车，其相关的性能参见表格，已知一次完全充电约需 8 小时，使用电能的价格约为每度电 0.8 元。在计算过程中不考虑各种能量转化的效率，下列说法正确的是

电池输出最大电压	220V
电池输出最大机械功率	22kw
电池容量	150A·h
充电电压	220V
最大时速	72km/h
充满电后最多行驶路程	100km

A. 充电电流为 150A

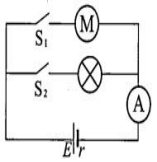
B. 充满电后储存的电能为 33000J

C. 折合每公里的电能成本约为 0.26 元

D. 最大速度行驶时的受到阻力约为 306N

【答案】C

20. 小明坐在汽车的副驾驶位上看到一个现象：当汽车的电动机启动时，汽车的车灯会瞬时变暗。汽车的电源、电流表、车灯、电动机连接的简化电路如图所示，已知汽车电源电动势为 12.5V，内阻为 0.05Ω。仅 S_2 接通时电流表示数为 10A；保持 S_2 接通、S_1 闭合瞬间，电流表示数达到 60A。下列说法正确的是



A. 当电动机未启动时，电源每秒有 125J 的电能转化为化学能

B. 在电动机启动瞬间，流过电动机的电流为 50A

C. 在电动机启动瞬间，车灯的功率减少了 44.8W

D. 当电动机正常工作时，电流表示数将比 60A 更大

【答案】C

21. 目前地球上消耗的能量绝大部分来自太阳内部核聚变时释放的核能。如图所示，太阳能路灯的额定功率为 P，光电池系统的光电转换效率为 η。用 P_0 表示太阳辐射的总功率，太阳与地球的间距为 r，地球半径为 R，光在真空中传播的速度为 c。太阳光传播到达地面的过程中大约有 30%的能量损耗，电池板接收太阳垂直照射的等效面积为 S。在时间 t 内



第 11 题图

A. 到达地球表面的太阳辐射总能量约为 $\frac{7P_0tR^2}{40r^2}$

B. 路灯正常工作所需日照时间约为 $\frac{40\pi R^2Pt}{7P_0S\eta}$

C. 路灯正常工作消耗的太阳能约为 ηPt

D. 因释放核能而带来的太阳质量变化约为 $\frac{10P_0t}{7c^2}$

【答案】A

22. 新冠肺炎患者中有 13%的重症患者和 6%的危重患者需要给予及时的呼吸机治疗，呼吸机成为生死攸关的战略资源。呼吸机的核心部件之一是呼吸机马达。下图是国内某制造商生产的呼吸机的马达主要参数，其中空载状态是指电机运转但没有带动负载。下列说明正确的是

A．额定电流状态下，马达内阻消耗功率为 13.6W

B．利用空载状态的参数，计算出马达的内阻是 120Ω

C．利用额定状态的参数，计算出马达的内阻约为 9Ω

D．空载状态下，马达的输出功率为 4.8W



呼吸机马达	
额定电压	24V
空载电流	0.2A
额定转速	30000rpm
额定负载扭矩	100mN·m
额定电流	1.9A
额定输出功率	32W

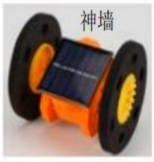
【答案】A

23. 学校为创建绿色校园改装了一批太阳能路灯，太阳能路灯技术参数如下：太阳能电池组件(太阳能单晶硅光电转换效率为 18%，得到的电池功率为 100W)；免维护蓄电池(60～250Ah/12V，充电效率为 80%)；照明时间(4～12h 可根据需要任意调节，阴雨天可连续工作 5～7d)；光控时 LED 照明恒流输出功率(15～60W)；其他辅助系统组成部分．结合上述数据，下列说法不正确的是

A. 利用免维护蓄电池给 60W 的 LED 供电，最长时间约为 50 小时
B. 利用太阳能电池给蓄电池充电，充满需要的最长时间为 30 小时
C. 太阳照射 2 小时，光电系统可吸收太阳能为 4.0×10^6J
D. LED 照明 5 小时，照明时恒流最多输出电能为 1.08×10^6J

【答案】B

24. 能源危机是人类社会面临的重大问题，开发“绿色能源”是解决“能源危机”的重要途径。某科技小组设计了一款“太阳能”电动小车，该小车太阳能电板面积为 100cm²，当太阳光垂直照射电板时，有 20%的光能转化为电能，已知太阳光垂直到达地面每平方米的辐射功率约为 P_0=800W；车上安装有一电动机，其额定电压为 5V，额定电流为 0.2A，机械效率为 80%，太阳能电板对电动机供电。某次小车以额定功率启动，运动的过程中最大速度为 0.2m/s，所受阻力大小恒定不变，以下说法正确的是（　　）



第 13 题图

A. 小车克服阻力做功的功率为 1W
B. 小车以额定功率匀速运动时其牵引力为 5N
C. 若太阳光垂直电板光照，该太阳能电板一天的发电量约为 0.04kWh
D. 若太阳光垂直电板光照 2h，该太阳能电板为该小车供电最多可正常工作的时间约为 3h

【答案】D

第十三章　电磁感应与电磁波初步

第一部分　基础知识点

第 1 节　磁场　磁感线

一、电和磁的联系

1.磁性和磁体

物质具有吸引铁、钴、镍等物质的性质叫磁性，具有磁性的物体叫磁体。

2. 磁体的磁极

(1)磁极：磁体的各部分磁性强弱不同，磁性最强的部分叫磁极。任何磁体都有两个磁极，一个叫南极，又称 S 极；另一个叫北极，又称 N 极。

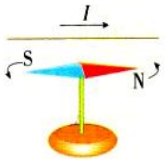
(2)磁极间的相互作用：同名磁极相互排斥，异名磁极相互吸引。

3. 电和磁的联系

(1)电流周围存在磁场——电流的磁效应：1820年，由丹麦物理学家奥斯特首先发现。

(2)奥斯特实验：在实验过程中，直导线要沿南北方向水平放置，磁针要水平地放在导线下方或上方。

(3)实验解释：地磁场使磁针指向南北方向，通电导线能改变磁针的指向说明通电导线周围产生了磁场。



【注意】奥斯特实验通电导线只能南北放置。

二、磁场

(1)定义：磁体或通电导体周围存在一种特殊物质，能够传递磁体与磁体之间、磁体与通电导体之间、通电导体与通电导体之间的相互作用，这种特殊的物质叫磁场。

(2)基本性质：磁场对处于其中的磁体、电流和运动电荷有磁场力的作用。

(3)方向：物理学中把小磁针静止时 N 极所指的方向规定为该点磁场的方向。

(4)物质性：磁场看不见，摸不着，是不依赖于我们的感觉而客观存在的物质，通过跟别的物体发生相互作用时表现出自己的特性。

（5）磁场和电场一样都是以场的形式存在的客观物质。

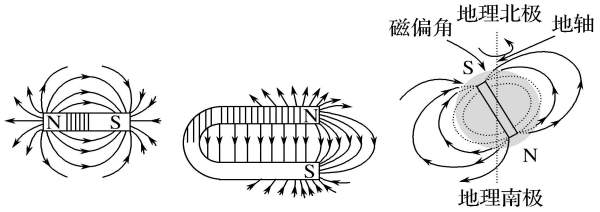
三、磁感线

(1)定义：在磁场中画出一些曲线，使曲线上每一点的切线方向都跟这点磁场的方向一致，这样的曲线就叫磁感线。

（2）电场线与磁感线的比较

电场线	磁感线
电场线的疏密程度表示该区域电场强弱(密→强；疏→弱)	磁感线的疏密程度表示该区域磁场强弱(密→强；疏→弱)
电场线由正电荷指向负电荷或无穷远；或由无穷远指向负电荷，是不闭合曲线	磁感线在磁体外部是从 N 极指向 S 极，内部从 S 极指向 N 极。磁感线是闭合曲线
电场线互不相交、不相切	磁感线互不相交、不相切
电场线是假想的曲线，客观上不存在。	磁感线是假想的曲线，客观上不存在。

（3）几种常见的磁场分布图



甲 条形磁铁　　乙 蹄形磁铁　　丙 地磁场

【总结】对于地磁场，可以认为：赤道的磁感线从南到北并且与地面平行；南半球磁感线向上，北半球磁感线向下。

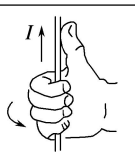
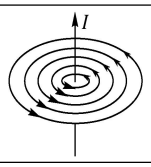
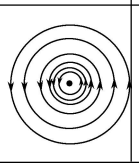
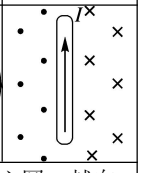
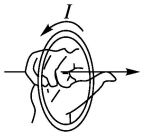
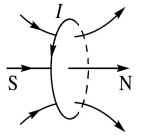
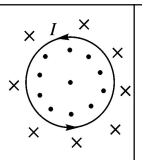
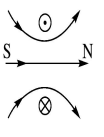
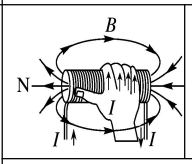
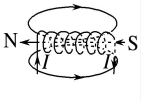
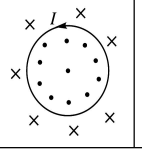
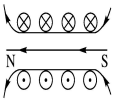
四、安培定则（右手螺旋定则）

(1)电流周围的磁感线方向可根据安培定则判断.

①直线电流的磁场：右手握住通电导线，伸直的大拇指指向电流方向，那么弯曲的四指的方向就是导线周围的磁感线环绕的方向。

②环形电流的磁场：用右手握住通电的环形导线(或通电螺线管)，弯曲的四指与环形电流的方向一致，那么大拇指的指向就是环形导线轴心上(或通电螺线管内部)的磁感线的方向。

(2)三种常用的电流的磁场的分布图

	安培定则	立体图	横截面图	纵截面图
直线电流				
	以导线上任意点为圆心垂直于导线的多组同心圆，越向外越稀疏，磁场越弱			
环形电流				
	内部磁场比环外强，磁感线越向外越稀疏			
螺线管				
	内部为匀强磁场且比外部强，方向由 S 极指向 N 极，外部由 N 极指向 S 极			

（3）安培定则的应用

	原因(电流方向)	结果(磁场方向)	说明
直线电流的磁场	大拇指	四指	在运用安培定则时应分清“因”和“果”，电流是“因”，磁场是“果”，既可以由“因”判断“果”，也可以由“果”追溯“因”
环形电流的磁场	四指	大拇指	

四、安培分子电流假说【磁现象的电本质】

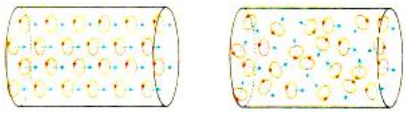
1. 内容

安培认为，在原子、分子等物质微粒的内部，存在着一种环形电流——分子电流，分子电流使每个物质微粒都成为微小的磁体，它的两侧相当于两个磁极。

2. 对磁现象的解释

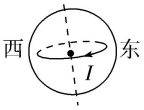
(1)磁化：一根铁棒未被磁化的时候，内部分子电流的取向是杂乱无章的，它们的磁场互相抵消，对外不显磁性。当铁棒受到外界磁场的作用时，各分子电流的取向变得大致相同，铁棒被磁化，两端对外界显示出较强的磁性，形成磁极，铁棒就被磁化了，如图甲所示。

(2)消磁：磁体受到高温或猛烈撞击时会失去磁性，这是因为激烈的热运动或震动使分子电流的取向又变得杂乱无章了，磁体磁性消失，如图乙所示。



甲 磁化　　乙 消磁

3. 安培假设认为：地球的磁场是由绕过地心的轴的环形电流 I 引起的。



第 2 节　磁感应强度　磁通量

一、磁感应强度

1.**物理意义：**描述磁场的强弱和方向.

2.**大小：**$B=\frac{F}{IL}$(通电导线垂直于磁场放置).

3.**方向：**自由小磁针静止时 N 极的指向（或受力方向）.

4.**单位：**特斯拉(T).

5.**对 B 的理解**

(1)$B=\frac{F}{IL}$是磁感应强度的定义式，是比值法定义的物理量．B 由磁场本身决定，与 F、I、L 无关.

（2）磁感应强度是矢量，磁场的叠加遵循平行四边形定则．磁场叠加时合磁感应强度等于各个磁感应强度的矢量和，计算时与力的计算方法相同，利用平行四边形定则或根据正交分解法进行合成与分解。

6.磁感应强度 B 与电场强度 E 的比较

项目	磁感应强度 B	电场强度 E
物理意义	描述磁场的力的性质的物理量	描述电场的力的性质的物理量
定义式	$B=\frac{F}{IL}$，通电导线与 B 垂直	$E=\frac{F}{q}$
方向	矢量，磁感线的切线方向，小磁针 N 极受力方向	矢量，电场线的切线方向，放入该点的正电荷的受力方向
场的叠加	合磁感应强度等于各磁场的磁感应强度的矢量和	合场强等于各电场的场强的矢量和
单位	1 T=1 N/(A·m)	1 V/m=1 N/C
大小	由磁场决定，与检验电流元无关	由电场决定，与检验电荷无关

【拓展】

（1)通电直导线周围的磁场公式：$B=k\frac{I}{r}$（其中 $k=2\times10^{-7}\ N/A^2$，I 为电流大小、r 为研究点到导线的距离）

（2）通电螺线管(轴线上）的磁场公式：$B=\mu_0 nI$（其中 $\mu_0=4\pi\times10^{-7}\ N/A^2$ 为常数，n 为线圈匝数，I 为电流强度）

二、匀强磁场

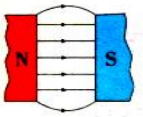
1 定义：磁感应强度处处大小相等、方向相同的磁场叫匀强磁场。

2 特点：匀强磁场中的磁感线是平行且等间距的。

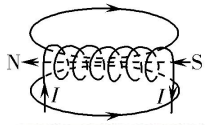
3. 匀强磁场的产生

(1)距离很近的两个平行的异名磁极之间的磁场，除边缘部分外，可以认为是匀强磁场。

(2)两个平行放置的距离较近的线圈通电时，其中间区域的磁场也可认为是匀强磁场。



两个平行放置的异名永磁体磁极间是匀强磁场。



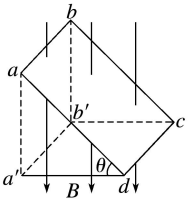
两个平行放置的通电线圈之间是匀强磁场。

【注意】当通电螺线管越长时，其内部的磁场越接近匀强磁场。

三、磁通量

1.定义：磁感应强度 B 与垂直磁场方向的面积 S 的乘积。

2.公式：Φ＝BS(B⊥S)；S 与 B 平行时，Φ＝0；S 与 B 夹角为θ时，$\Phi=BS_{\perp}=BS\sin\theta$.

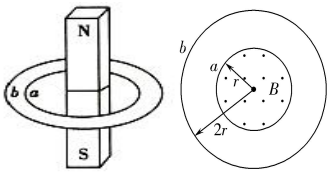


3.适用条件：①匀强磁场．②S 为垂直磁场的有效面积.

4.磁通量的单位：韦伯，符号是 Wb.1 Wb＝1 T·m².

5.穿过某个面有方向相反的磁场，则不能直接用Φ＝BS 求解，应考虑相反方向的磁通量抵消后所剩余的磁通量。

【注意】①求磁通量时要按代数和的方法求总的磁通量（穿过该面的磁感线的净条数）。如下图甲有：$\phi_a>\phi_b$



图甲　　图乙

②求磁通量时要注意有效面积，如上图乙，有：$\phi_a=\phi_b$

6.对磁通量的理解

①磁通量虽然是标量，却有正、负之分，计算时取正负号代数运算，计算结果取绝对值．它的正负号仅表示磁感线的贯穿方向。

②磁通量与线圈的匝数无关.

【拓展】1.磁通量的变化量：$\Delta\Phi=\Phi_2-\Phi_1$。【假设 B⊥S】

(1)磁通量的变化是由面积变化引起时，

$\Delta\Phi=B\cdot\Delta S=B(S_2-S_1)$

(2)磁通量的变化是由磁场变化引起时，

$\Delta\Phi=\Delta B\cdot S=(B_2-B_1)S$

(3)磁通量的变化是由面积和磁场共同变化引起时，则根据定义求，$\Delta\Phi=\Phi_{末}-\Phi_{初}=B_2S_2-B_1S_1\neq\Delta B\Delta S$ 。

（4）当线圈翻转 180^0 时，磁通量的变化量$\Delta\Phi=2BS$。

【拓展】2.磁通量的变化率(磁通量变化的快慢)：磁通量的变化量与所用时间的比值，即$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$，与线圈的匝数无关。

【拓展】3.磁通密度

$B=\Phi/S$，即磁感应强度在数值上等于单位面积上的磁通量，故磁感应强度又称为磁通密度，单位也可以写作 Wb/m^2。

第 3 节　电磁感应现象及应用

一、划时代的发现

1.电磁感应

(1)定义：法拉第把发现的“磁生电”现象定名为电磁感应，产生的电流叫感应电流。

(2)发现电磁感应的意义

①电磁感应的发现使人们找到了“磁生电”的方法。

②电磁感应的发现使人们对电与磁内在联系的认识更加深入，宣告了电磁学作为一门统一学科的诞生。

(3)电流的磁效应与电磁感应的区别与联系

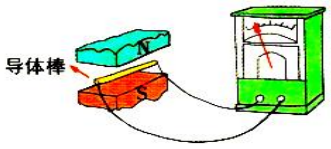
①电流的磁效应是指电流周围存在磁场，即“电生磁”；而电磁感应是指利用磁场产生电流，即“磁生电”。

②电流的磁效应和电磁感应都揭示了电和磁的内在联系。

二、产生感应电流的条件

(1)演示实验：导体在磁场中运动能否产生感应电流。

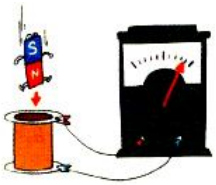
实验操作	表针是否偏转	结论
导体棒静止	不偏转	闭合电路的部分导体做切割磁感线运动时，电路中会产生感应电流
导体棒沿着磁感线运动	不偏转	
导体棒切割磁感线运动	偏转	



实验装置

(2)演示实验：磁铁在线圈中运动能否产生感应电流。

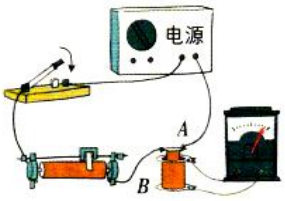
磁铁的动作	表针是否偏转	磁铁的动作	表针是否偏转	结论
N 极插入	偏转	S 极插入	偏转	当磁铁和线圈发生相对运动时，回路中有感应电流；当磁铁和线圈相对静止时，回路中无感应电流
N 极插入后不动	不偏转	S 极插入后不动	不偏转	
N 极拔出	偏转	S 极拔出	偏转	



实验装置

(3)演示实验：导体和磁场间不发生相对运动能否产生感应电流。

开关和滑动变阻器的状态	线圈 B 中是否有电流	结论
开关闭合瞬间	有	当线圈 A 中的电流变化时，线圈 B 中会产生感应电流
开关断开瞬间	有	
开关闭合时，滑动变阻器的滑片不动	无	
开关闭合时，迅速移动滑动变阻器的滑片	有	

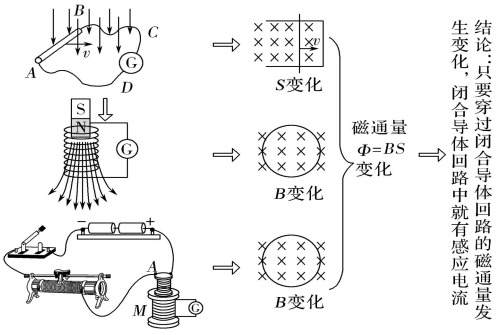


通过开关或滑动变阻器控制线圈 A 中的电流，观察线圈 B 中是否有感应电流。

(4)感应电流的产生条件：当穿过闭合导体回路的磁通量发生变化时，闭合导体回路中就产生感应电流。

【注意】电路闭合、磁通量发生变化，两个条件缺一不可。

①常见的产生感应电流的三种情况



②电磁感应现象能否发生的判断流程

(1)确定研究的闭合回路。

(2)弄清楚回路内的磁场分布，并确定其磁通量Φ。

(3)
- Φ不变→无感应电流
- Φ变化→
  - 回路闭合，有感应电流
  - 不闭合，无感应电流，但有感应电动势

三、电磁感应现象的应用

(1)发电机是根据电磁感应现象制造的，它开辟了人类社会的电气化时代。

(2)变压器、电磁炉等也是根据电磁感应制造的。

第 4 节　电磁波的发现及应用

1. 麦克斯韦电磁场理论

(1)变化的磁场产生电场

①均匀变化的磁场产生恒定的电场；

②非均匀变化的磁场产生变化的电场；

③周期性变化的磁场产生同周期的周期性变化的电场。

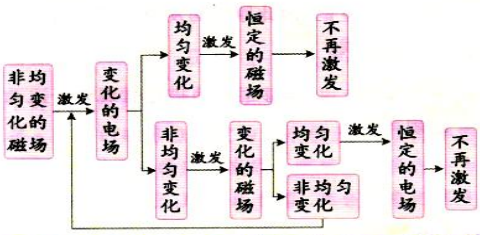
(2)变化的电场产生磁场

①均匀变化的电场产生恒定的磁场；

②非均匀变化的电场产生变化的磁场；

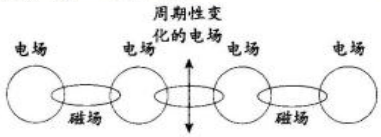
③周期性变化的电场产生同周期的周期性变化的磁场。

(3)理解



【点拨】变化的电场一定能产生磁场，但不一定能产生变化的磁场，如均匀变化的电场产生恒定的磁场；同理，变化的磁场也不一定能产生变化的电场。

(4)变化的电场和磁场总是相互联系的，形成一个不可分割的统一的电磁场。



电磁波的产生与传播示意图

2. 电磁波

(1)麦克斯韦的预言：空间可能存在电磁波。周期性变化的电场和周期性变化的磁场交替产生，由近及远地向周围传播形成电磁波。

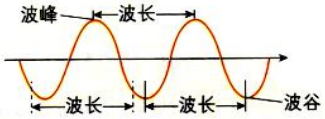
(2)电磁波可以在真空中传播，这是因为电磁波的传播靠的是电场和磁场的相互“激发”。

(3)电磁波的传播速度等于光速。光是以波动形式传播的一种电磁振动。

(4)1886 年，赫兹通过实验捕捉到了电磁波，证实了麦克斯韦的电磁场理论。

3. 电磁波谱

(1)波长：邻近的两个波峰(或波谷)的距离叫波长，用 λ 表示。



(2)波的频率：在 1 s 内通过的波峰(或波谷)的次数，用 f 表示，单位是 Hz。

(3)波速：用来描述波传播快慢的物理量。

(4)电磁波的波速 c 与波长 λ、频率 f 的关系是 $c=\lambda f$，其中 $c=3\times10^8$ m/s(真空中)。

(5)电磁波谱：按电磁波的波长或频率大小的顺序把它们排列起来，就是电磁波谱。按电磁波的波长由长到短进行排列：无线电波(长波、中波、短波、微波)、红外线、可见光、紫外线、X 射线、γ 射线。

(6)电磁波的应用

电磁波谱	产生机理	特征	主要应用	真空中波长	频率
无线电波	振荡电路中自由电子周期性运动产生的	波动性强，易发生衍射等	通信、广播、信号传输	波长逐渐减小	频率逐渐增大
红外线	原子外层电子受激发而产生的	热效应强	红外遥感、红外探测		
可见光		引起视觉	照明、摄影		
紫外线		化学、荧光效应强，能杀菌	灭菌消毒、防伪		
X 射线	原子内层电子受激发而产生的	穿透性强	检查、探测、医用透视		
γ 射线	原子核受激发而产生的	穿透本领最强	工业探伤、医用治疗		

电磁波和机械波的区别

	电磁波	机械波
产生	由变化的电场、磁场产生	由质点(波源)的振动产生
纵、横波	横波	纵波或横波
波速	在真空中等于光速(很大)	在空气中很小(如声波为 340 m/s)
介质需要	不需要介质(在真空中仍可传播)	必须有介质(在真空中不能传播)
能量传播	电磁能	机械能

4.电磁波的能量

（1）实物粒子是物质存在的一种形式，场是物质存在的另一种形式，它们都是客观存在的。场具有能量。光也是一种电磁波-----传播着的电磁场，光具有能量。电磁波是一种物质。

（2）实例：微波炉、光等。

5.电磁波通信

(1)电磁波可以传递信息。

(2)电磁波携带的信息,既可以有线传播,也可以无线传播。

第 5 节　能量量子化

1 热辐射

(1)定义:我们周围一切物体都在辐射电磁波,这种辐射与物体的温度有关,所以叫热辐射。

(2)特点:辐射强度按波长的分布情况随物体的温度而有所不同。

(3)黑体:如果某种物体能够完全吸收入射的各种波长的电磁波而不发生反射,这种物体就叫黑体。黑体辐射电磁波的强度按波长的分布只与它的温度有关。

2 能量子

(1)定义:振动着的带电微粒的能量只能是某一最小能量值 ε 的整数倍。这个不可再分的最小能量值 ε 叫能量子。

(2)计算式:$\varepsilon=h\nu$。其中,h 是普朗克常量,其值为 $h=6.63\times10^{-34}\ \mathrm{J\cdot s}$,$\nu$ 是电磁波的频率。

(3)被接受的原因:借助能量子的假说,普朗克得出了黑体辐射的强度按波长分布的公式,与实验符合得非常好。

(4)推广:光本身就是由一个个不可分割的能量子组成的,这些能量子叫光子。

3 能级　频率为 ν 的光子的能量为 $h\nu$。

(1)定义:原子的能量是量子化的,这些量子化的能量值叫能级。

(2)解释原子光谱:原子从高能态向低能态跃迁时放出的光子的能量,等于前后两个能级之差。由于原子的能级是分立的,所以放出的光子的能量也是分立的,因此原子的发射光谱只有一些分立的亮线。

(3)量子力学作用:能够很好地描述微观粒子运动的规律。

(4)我国于 2016 年 9 月 25 日在贵州落成启用了世界最大的 500m 口径球面射电望远镜“中国天眼”。

4.光源的功率、光强及光子数相关计算

1.能量子与能量的量子化

(1)普朗克能量子假设

带电微粒的能量是某一最小能量值 ε 的整数倍,ε 称为能量子,其大小为 $\varepsilon=h\nu$(ν 为频率,h 为普朗克常量)。

(2)能量的量子化

在微观世界中能量是量子化的,即 $E=n\varepsilon$(ε 为能量子,n 为量子数)。

2.光源的功率与光强

根据爱因斯坦的光子说,光源的功率和光的强度是两个不同的概念。

(1)光源的功率(P)——光源每单位时间内辐射光子的总能量,即 $P=Nh\nu$。

式中 N 表示光源单位时间内辐射的光子数。

(2)光的强度(I)——在单位时间内垂直通过单位面积的光子的总能量,即 $I=N_0h\nu$。

式中 N_0 表示单位时间内垂直通过单位面积的光子数。

【记忆口诀】

磁体周围有磁场,N 极受力指方向;
电流周围也有场,安培定则定方向。
F 比 I L 是场强,Φ等 B S 磁通量,
磁通密度Φ比 S,注意两者要垂直。

选择性必修 1

第一章　动量守恒定律

第一部分　基础知识点

第一节　动量

一、动量

1.定义:运动物体的质量和速度的乘积叫做物体的动量,通常用 p 来表示。

2.表达式:p=mv。

3.单位:kg·m/s。

4.动量的特性

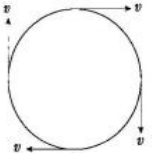
矢量性	动量是矢量,方向与物体的瞬时速度的方向相同,两个动量相等必定大小相等、方向相同
瞬时性	物体的动量是指物体在某一时刻(或某一位置)的动量,即动量是状态量。计算物体某一时刻(或某一位置)的动量时,速度应取这一时刻(或位置)的瞬时速度
相对性	因为物体的速度与参考系的选择有关,所以动量也与参考系的选择有关。通常在不说明参考系的情况下,物体的动量是指物体相对地面的动量

5. 动量与动能

(1)动量是矢量,动能是标量,所以质量一定的物体的动量变化,动能不一定变化,但动能变化,动量一定变化。

(2)动量 $p=mv$,动能 $E_k=\frac{1}{2}mv^2$,其大小关系是 $p=\sqrt{2mE_k}$,$E_k=\frac{p^2}{2m}$。

【举例】做匀速圆周运动的物体,速度大小不变,方向时刻改变,则其动能不变,动量时刻改变。



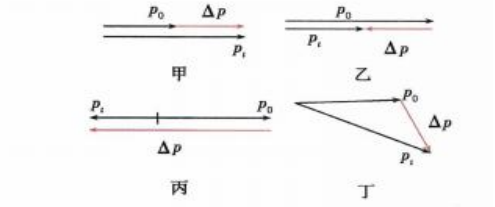
二、动量的变化量

(1)动量变化 Δp 的表达式:$\Delta p=p_t-p_0$(此式为矢量式)。

(2)Δp 的求法:①若 p_t 与 p_0 在同一直线上,则先规定正方向,再用正负表示 p_0、p_t,然后进行代数运算求解。

②若 p_t 与 p_0 不在同一直线上,则用平行四边形定则(或三角形定则)求矢量差。

(3)Δp 的方向:Δp 的方向与速度的变化量 Δv 的方向相同。



【小结】矢量减法的三角形定则口诀：共始端、连末端、指向被减。

三、动量、动能、动量变化量的比较

名称 / 项目	动量	动能	动量变化量
定义	物体的质量和速度的乘积	物体由于运动而具有的能量	物体末动量与初动量的矢量差
定义式	$p=mv$	$E_k=\frac{1}{2}mv^2$	$\Delta p=p'-p$
矢标性	矢量	标量	矢量
特点	状态量	状态量	过程量
关联方程	$E_k=\frac{p^2}{2m}$，$E_k=\frac{1}{2}pv$，$p=\sqrt{2mE_k}$，$p=\frac{2E_k}{v}$		

第二节　动量定理

一、表达式推导

(1)创设情景：质量为 m 的物体受到恒定的合力 F 的作用，做匀变速直线运动。

(2)分析过程：加速度 $a=\frac{\Delta v}{\Delta t}=\frac{v'-v}{\Delta t}$，由牛顿第二定律有 $F=ma=m\frac{v'-v}{\Delta t}=\frac{mv'-mv}{\Delta t}=\frac{p'-p}{\Delta t}$，即 $F\Delta t=p'-p$。

(3)此式表明动量的变化量反映了力的作用对时间的累积效应。



力改变物体的动量

二、冲量

1.定义：力 F 与力的作用时间 t 的乘积。

2.定义式：I＝Ft

3.单位：N·s。

4.标矢量：冲量是矢量，冲量的方向由力的方向决定，但不一定跟力的方向相同。对于方向恒定的力来说，冲量的方向跟力的方向相同。

5. 绝对性：由于力和时间都跟参考系的选取无关，所以冲量也跟参考系的选取无关。

6. 冲量是过程量：冲量反映了力对时间的积累效果。研究冲量时，必须明确是哪个力在哪段时间内对哪个物体的冲量。

【点拨】(1)某个力的冲量只取决于这个力及作用时间，与物体的运动状态、是否受其他力无关。

(2)判断两个力的冲量是否相同，依据是二力冲量的大小和方向是否均相同，缺一不可。

7.冲量的四种计算方法

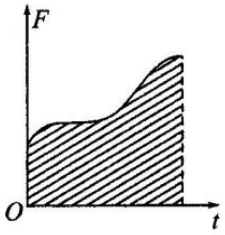
公式法	利用定义式 I＝Ft 计算冲量，此方法仅适用于恒力的冲量，无需考虑物体的运动状态
图像法	利用 F-t 图像计算，F-t 图像围成的面积表示冲量，此法既可以计算恒力的冲量，也可以计算变力的冲量
平均值法	若方向不变的变力大小随时间均匀变化，即力为时间的一次函数，则力 F 在某段时间 t 内的冲量 $I=\frac{F_1+F_2}{2}t$，F_1、F_2 为该段时间内初，末两时刻力的大小
动量定理法	如果物体受到大小或方向变化的力的作用，则不能直接用 I＝Ft 求变力的冲量，可以求出该力作用下物体动量的变化量，由 I＝Δp 求变力的冲量

8. 合力冲量的计算方法

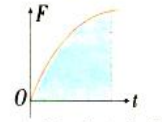
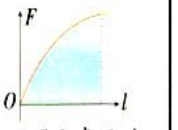
①如果物体受到的各个力作用的时间相同，且都为恒力，可用 $I_{合}=F_{合}\cdot\Delta t$ 计算合力的冲量。

②如果物体在运动的不同阶段受力不同，则合力的冲量为各个力的冲量的矢量和。

【点拨】我们把时间分成很多小段，在短暂的过程中 F 可视为恒力，这样就可以应用 $I=F\Delta t$，即对应图中小矩形面积，把每个短暂过程相加，即可得“面积”表示变力的冲量。



9. 冲量与功的比较

项目	冲量	功
定义	作用在物体上的力和力作用时间的乘积	作用在物体上的力和在力的方向上位移的乘积
公式	$I=F\Delta t$	$W=Fl\cos\alpha$（α 为 F 与 l 间的夹角）
单位	牛秒(N·s)	焦耳(J)
标矢性	矢量	标量
意义	①冲量表示力在时间上的累积效果；②冲量是动量变化大小的量度	①功表示力在空间上的累积效果；②功是能量变化多少的量度
作用效果	改变物体的动量 $I=mv'-mv$	改变物体的动能 $W=E_{k2}-E_{k1}$
运算法则	平行四边形定则	代数运算
“面积”含义	 F-t 面积表示冲量	 F-l 面积表示功

三、动量定理

1.内容：物体在一个过程中所受合力的冲量等于它在这个过程中始末的动量变化量。

2.表达式：$I=\Delta p$ 或 $Ft=\Delta p$ 或 $Ft=p_1-p_2$，

3. 说明

(1)表达式是矢量式，I 与 Δp 不仅大小相等而且方向相同。在一维直线情况下应用动量定理时，要先选定正方向。

(2)式中 F 指物体所受的合力。

(3)动量定理的研究对象可以是单个物体，也可以是多个物体组成的系统。

【拓展】对多个物体组成的系统，内力不改变系统的总动量（由一对相互作用力大小相等、方向相反和等时性可知，内力的总冲量为 0），则外力的总冲量等于系统的动量变化量。

(4)动量定理既适用于恒力，也适用于变力。既适用于直线运动，

也适用于曲线运动。不仅适用于宏观物体的低速运动，也适用于微观物体和高速运动的物体。

4. 动量定理与牛顿第二定律的比较

(1)动量定理与牛顿第二定律是完全等效的，都反映了外力作用与物体运动状态变化的因果关系，即力是速度变化的原因，冲量是动量变化的原因。

(2)牛顿第二定律只适用于宏观物体的低速运动情况，对高速运动的物体及微观粒子不再适用，而动量定理却是普遍适用的。

(3)动量定理的优越性

①动量定理只涉及初、末状态的动量 mv、mv' 及过程量 I，对于中间过程如何、轨迹是怎样的、加速度和位移是怎样变化的等全都不必考虑，解答更简便，因此应优先选用。

②应用动量定理处理多过程问题时，直接对全过程分析，可以不必关心中间量，简化解题过程。牛顿第二定律只能分过程使用。

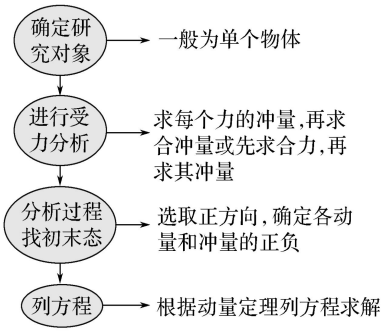
③动量定理除用来解决在恒力持续作用下的问题外，尤其适合用来解决作用时间短，而力的变化又十分复杂的问题，如冲击、碰撞、反冲运动等。这类问题是牛顿第二定律难以解决的。应用动量定理解题比用牛顿第二定律更为直接，更加简单。

5. 动量定理与动能定理的比较

项目		动量定理	动能定理
公式		$I_{合}=mv'-mv=\Delta p$ 涉及力与时间	$W_{合}=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2=\Delta E_k$ 涉及力与位移
标矢性		矢量式	标量式
因果关系	因	合力的冲量	合力的功(总功)
	果	动量的变化	动能的变化
相同点		①公式中的力都是指物体所受的合力； ②动量定理和动能定理都注重初、末状态，而不注重过程，因此都可以用来求变力作用的结果(变力的冲量或变力做功)； ③研究对象可以是一个物体，也可以是一个系统；研究过程可以是整个过程，也可以是某一段过程	

【点拨】动量定理是矢量式，可以在某方向上列其分量式；动能定理是标量式，注意不要列某方向上的动能定理方程，这是错误的。

6.用动量定理解题的基本思路



7.用动量定理解释现象

①物体的动量变化一定，此时力的作用时间越短，力就越大；时间越长，力就越小。

②作用力一定，此时力的作用时间越长，动量变化越大；力的作用时间越短，动量变化越小。

【拓展】缓冲原理



重物拉绳的过程，Δp 一定，使用细线时，作用时间较短，由 $F\Delta t=\Delta p$ 知 F 较大；而使用橡皮筋时，作用时间较长，F 较小。根据这个原理，各种机械上装有缓冲弹簧。

8.两类“柱状模型”

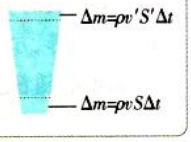
①流体类“柱状模型”

流体及其特点		通常液体流、气体流等被广义地视为“流体”，质量具有连续性，通常已知密度ρ
分析步骤	1	建立“柱状模型”，沿流速 v 的方向选取一段柱形流体，其横截面积为 S
	2	微元研究，作用时间Δt 内的一段柱形流体的长度为Δl，对应的质量为Δm＝ρSvΔt
	3	建立方程，应用动量定理研究这段柱状流体

②微粒类“柱状模型”

微粒及其特点		通常电子流、光子流、尘埃等被广义地视为“微粒”，质量具有独立性，通常给出单位体积内粒子数 n
分析步骤	1	建立“柱状模型”，沿运动的方向选取一段微元，柱体的横截面积为 S
	2	微元研究，作用时间Δt 内一段柱形流体的长度为Δl，对应的体积为ΔV＝Sv₀Δt，则微元内的粒子数 N＝nv₀SΔt
	3	先应用动量定理研究单个粒子，建立方程，再乘以 N 计算

【拓展】为什么要选极短时间内的一小段流体为研究对象？以向上喷出的水流为例，在水柱上升过程中遵循机械能守恒定律，则速度 v 会减小，根据流量 Q 不变，且流量 $Q=Sv$ 可知，水柱会渐渐变粗。



9. 利用动量定理解决系统动量问题

(1)通过绳杆连接的多物体,可看成系统.

(2)多物体不连接,亦可看成系统.

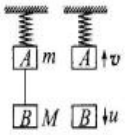
【典例1】质量为M的金属球和质量为m的木块用细线相连,浸入水中,细线竖直绷紧,木块在上、金属球在下;两物体从静止开始以加速度a在深水中匀加速下沉,经时间t_1,细线断开,两物体分开,再经时间t_2,木块恰好停止下沉.假设金属球与木块一直在水中运动,求此时金属球下沉的速度.

以金属球与木块组成的系统为研究对象,细线断开前后,由于系统总重力、总浮力不变,因此系统所受的合外力不变,有$F=(M+m)a$.

经时间(t_1+t_2)后木块的速度恰为零,设木块恰好停止时,金属球的速度为v,以竖直向下为正方向,对系统全程应用动量定理得

$(M+m)a(t_1+t_2)=0+Mv$,解得$v=\dfrac{(M+m)a(t_1+t_2)}{M}$,方向竖直向下.

【典例2】如图所示,物体A、B经细绳相连挂在弹簧下静止不动,A的质量为m,B的质量为M,当A、B间绳突然断开,物体A上升到某位置时速度为v,这时B下落的速度为u,重力加速度为g,求在这段时间内弹簧弹力对物体A的冲量为多少?



将A、B看成系统,以向上为正方向,对系统全程应用动量定理得

$I-mgt-Mgt=mv-Mu$,

又$t=\dfrac{u}{g}$,

联立解得$I=m(v+u)$.

故这段时间内弹簧弹力对物体A的冲量为$m(v+u)$,方向竖直向上.

第三节　动量守恒定律

一、动量守恒定律

三个概念	系统	相互作用的若干个物体看成一个系统,系统至少由两个物体组成
	内力	系统内部各物体之间的相互作用力叫做内力
	外力	系统外部物体对系统内部物体的作用力叫做外力

动量守恒定律	内容	如果一个系统不受外力,或者所受外力的矢量和为零,则这个系统的总动量保持不变。这就是动量守恒定律
	表达式	(1)$p=p'$ (2)一维两物体时: $m_1v_1+m_2v_2=m_1v_1'+m_2v_2'$ $m_1v_1'-m_1v_1=-(m_2v_2'-m_2v_2)$
	对象	两个及两个以上物体组成的系统
	条件	(1)不受外力,动量守恒 (2)外力之和为零,动量守恒 (3)外力远小于内力,动量近似守恒 (4)某方向上外力之和为零,该方向上动量守恒
	温馨提示	(1)动量守恒指的是总动量在相互作用的过程中时刻守恒,而不是只有始末状态才守恒。实际列方程时,可在这守恒的无数个状态中选两个涉及已知量与待求量的状态来列方程。 (2)系统的动量守恒,个体的动量通常不守恒,因为相互作用前、后物体的速度发生了变化,动量在系统内物体间发生了转移

【点拨】系统只在某一方向上动量守恒时,不能认为系统的动量守恒。如图所示,小车和小球组成的系统总动量不守恒;但系统在水平方向上不受外力,则系统在水平方向上动量守恒。



二、动量守恒定律的适用条件

(1)前提条件:存在相互作用的物体系.

(2)理想条件:系统不受外力.

(3)实际条件:系统所受合外力为0.

(4)近似条件:系统内各物体间相互作用的内力远大于系统所受外力.

(5)方向条件:系统在某一方向上满足上面的条件,则此方向上动量守恒.

三、动量守恒定律与机械能守恒定律的比较

项目	动量守恒定律	机械能守恒定律
研究对象	研究对象都是相互作用的物体组成的系统,且研究的都是某一运动过程	
守恒条件	系统所受合力为0	只有重力或系统内弹力做功
	系统动量守恒时,机械能不一定守恒;系统的机械能守恒时,动量不一定守恒	
表达式	矢量式,可列某方向的分量式	标量式,不能列分量式
内力的影响	内力不影响系统的动量	内力做功一般会改变系统的机械能

四、动量守恒定律的理解

系统性	研究的对象是相互作用的两个或多个物体组成的系统
同时性	动量是一个瞬时量，表达式中的 p_1、p_2、…必须是系统中各物体在相互作用前同一时刻的动量，p_1'、p_2'、…必须是系统中各物体在相互作用后同一时刻的动量
相对性	各物体的速度必须是相对同一参考系的速度(一般是相对于地面)
矢量性	动量守恒定律的表达式为矢量方程，解题时应选取统一的正方向
普适性	动量守恒定律不仅适用于低速宏观物体组成的系统，还适用于接近光速运动的微观粒子组成的系统

五、动量守恒定律的解题步骤

明确研究对象 — 系统包括哪几个物体及研究的过程

↓

进行受力分析 — 判断系统动量是否守恒(或某一方向上是否守恒)

↓

规定正方向 — 一般规定初速度方向为正方向

↓

列出方程 — 找出初末态动量,列动量守恒定律方程

↓

分析讨论 — 代入数据,求出结果,必要时讨论

第四节　实验：验证动量守恒定律

一、实验思路

在一维碰撞中，测出物体的质量 m 和碰撞前后物体的速度 v、v′，找出碰撞前的动量 $p=m_1v_1+m_2v_2$ 及碰撞后的动量 $p'=m_1v_1'+m_2v_2'$，看碰撞前后动量是否守恒。

二、实验方案

方案一：利用气垫导轨完成一维碰撞实验（如图所示）



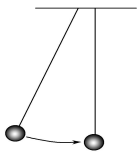
1.测质量：用天平测出滑块质量。

2.安装：正确安装好气垫导轨。

3.实验：接通电源，利用配套的光电计时装置测出两滑块各种情况下碰撞前后的速度（①改变滑块的质量。②改变滑块的初速度大小和方向）。

4.验证：一维碰撞中的动量守恒。

方案二：利用等长悬线悬挂等大小球完成一维碰撞实验（如图所示）



1.测质量：用天平测出两小球的质量 m_1、m_2。

2.安装：把两个等大小球用等长悬线悬挂起来。

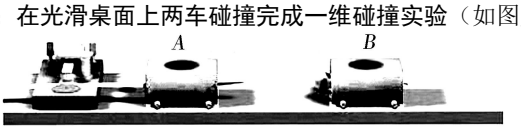
3.实验：一个小球静止，拉起另一个小球，放下后它们相碰。

4.测速度：可以测量小球被拉起的角度，从而算出碰撞前对应小球的速度，测量碰撞后小球摆起的角度，算出碰撞后对应小球的速度。

5.改变条件：改变碰撞条件，重复实验。

6.验证：一维碰撞中的动量守恒。

方案三：在光滑桌面上两车碰撞完成一维碰撞实验（如图所示）



1.测质量：用天平测出两小车的质量。

2.安装：将打点计时器固定在光滑长木板的一端，把纸带穿过打点计时器，连在小车的后面，在两小车的碰撞端分别装上撞针和橡皮泥。

3.实验：接通电源，让小车 A 运动，小车 B 静止，两车碰撞时撞针插入橡皮泥中，把两小车连接成一体运动。

4.测速度：通过纸带上两计数点间的距离及时间由 $v=\frac{\Delta x}{\Delta t}$ 算出速度。

5.改变条件：改变碰撞条件，重复实验。

6.验证：一维碰撞中的动量守恒。

三、数据处理

1.速度的测量

方案一：滑块速度的测量：$v=\frac{\Delta x}{\Delta t}$，式中Δx 为滑块挡光片的宽度（仪器说明书上给出，也可直接测量），Δt 为数字计时器显示的滑块（挡光片）经过光电门的时间。

方案二：摆球速度的测量：$v=\sqrt{2gh}$，式中 h 为小球释放时（或碰撞后摆起的）高度，h 可用刻度尺测量（也可由量角器和摆长计算出）。

方案三：小车速度的测量：$v=\frac{\Delta x}{\Delta t}$，式中Δx 是纸带上两计数点间的距离，可用刻度尺测量，Δt 为小车经过Δx 的时间，可由打点间隔算出。

2.验证的表达式:$m_1v_1+m_2v_2=m_1v_1'+m_2v_2'$

方案一： $m_1\frac{1}{t_1}=m_1\frac{1}{t_1'}+m_2\frac{1}{t_2}$

方案二： $m_1\sqrt{h_1}=m_1\sqrt{h_1'}+m_2\sqrt{h_2}$

方案三： $m_1v_1=(m_1+m_2)v_2$

四、注意事项

1.前提条件

碰撞的两物体应保证“水平”和“正碰”。

2.方案提醒

（1）若利用气垫导轨进行实验，调整气垫导轨时，注意利用水平仪确保导轨水平。

（2）若利用摆球进行实验，两小球静止时球心应在同一水平线上，且刚好接触，摆线竖直，将小球拉起后，两条摆线应在同一竖直面内。

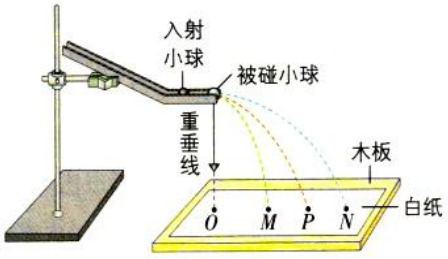
（3）若利用长木板进行实验，可在长木板下垫一小木片用以平衡摩擦力。

方案四：研究斜槽末端小球碰撞时的动量守恒

（一）实验器材

斜槽、大小相等而质量不同的金属球两个、重垂线、白纸、复写纸、天平、刻度尺、圆规、三角板。

（二）实验步骤



1. 用天平测出两个小球的质量 m_1、m_2，选质量较大的小球为入射小球。

2. 将斜槽固定在铁架台上，使槽的末端水平。

3. 在地上铺一张白纸，白纸上铺放复写纸。

4. 在白纸上记下重垂线所指的位置 O，它表示入射小球 m_1 做平抛运动的出发点的水平位置。

5. 先不放被碰小球，让入射小球从斜槽上同一高度处滚下，重复 10 次，用圆规画尽可能小的圆把所有的小球落点圈在里面，圆心就是入射球未发生碰撞时的落地点 P。



6. 把被碰小球放在斜槽末端，让入射小球从同一高度处自由滚下，使它们发生正碰，重复 10 次，按步骤 5 求出入射小球落点的平均位置 M 和被碰小球落点的平均位置 N。

7. 连接 ON，用刻度尺量出线段 OP、OM、ON 的长度，把两小球的质量和相应的数值代入 $m_1\overline{OP}=m_1\overline{OM}+m_2\overline{ON}$ 看是否成立。

8. 改变入射小球下滑的高度，多次实验进行验证。

（三）若利用斜槽小球碰撞应注意：

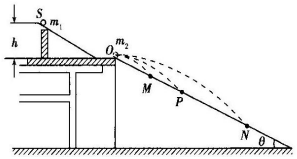
①斜槽末端的切线必须水平；

②入射小球每次都必须从斜槽同一高度由静止释放；

③选质量较大的小球作为入射小球；

④实验过程中实验桌、斜槽、记录的白纸的位置要始终保持不变。

（四）实验变式.



【规律】1. 当满足 $m_1\times\sqrt{L_{op}}=m_1\times\sqrt{L_{oQ}}+m_2\times\sqrt{L_{oN}}$ 时动量守恒。

2. 当满足 $m_1\times L_{op}=m_1\times L_{oQ}+m_2\times L_{oN}$ 时，动量和能量都守恒。

【典例 1】在验证动量守恒定律实验中，a、b 是两个半径相等的小球，按照以下步骤进行操作：

Ⅰ. 在平木板表面钉上白纸和复写纸，并将该木板竖直立于紧靠槽口处，将小球 a 从斜槽轨道上固定点处由静止释放，撞到木板并在白纸上留下痕迹 O；

Ⅱ. 将木板水平向右移动一定距离并固定，再将小球 a 从固定点处由静止释放，撞到木板上得到痕迹 B；

Ⅲ. 把小球 b 静止放在斜槽轨道水平段的最右端，让小球 a 仍从固定点处由静止释放，和小球 b 相碰后，两球撞在木板上得到痕迹 A 和 C。

①若碰撞过程中没有机械能损失，为了保证在碰撞过程中 a 球不反弹，a、b 两球的质量 m_1、m_2 间的关系是 m_1 ▲ m_2。（选填">""="或"<"）

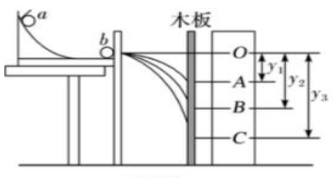
②为完成本实验，必须测量的物理量有_____。

A. 小球 a 开始释放的高度 h　　B. 木板水平向右移动的距离 l

C. a 球和 b 球的质量 m_1、m_2　　D. O 点到 A、B、C 三点的距离 y_1、y_2、y_3

③在实验误差允许范围内，若满足关系式 ▲，则动量守恒（用②所选的物理量表示，要求化简）

④在实验误差允许范围内，若满足关系式 ▲，则机械能守恒（用②所选的物理量表示，要求化简）



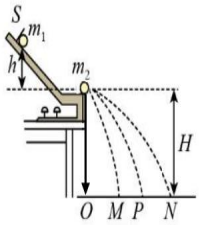
图丙

【答案】

① > ② CD ③

$\frac{m_1}{\sqrt{y_2}}=\frac{m_1}{\sqrt{y_3}}+\frac{m_2}{\sqrt{y_1}}$　　$\frac{m_1}{y_2}=\frac{m_1}{y_3}+\frac{m_2}{y_1}$

【典例 2】某同学用如图所示的实验装置“验证动量守恒定律”，



（1）图中 O 点是小球抛出点在地面上的垂直投影。实验时，先让入射球 m_1 多次从斜轨上 S 位置静止释放，找到其平均落地点的位置 P，测量平抛射程 OP，然后把被碰小球 m_2 静置于水平轨道的末端，再将入射球 m_1 从斜轨上 S 位置静止释放，与小球 m_2 相碰，并重复多次。本实验还需要完成的必要步骤 ▲（填选项前的符号）。

A. 测量两个小球的质量 m_1、m_2

B. 测量抛出点距地面的高度 H

C. 测量 S 离水平轨道的高度 h

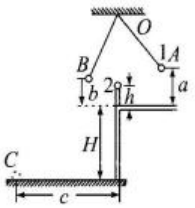
D. 测量平抛射程 OM、ON

（2）若两球发生弹性碰撞，则 OM、ON、OP 之间一定满足的关系是 ▲（填选项前的符号）

A. $OP+OM=ON$　　B. $2OP=ON+OM$　　C. $OP-ON=2OM$

【答案】（1）AD　　（2）A

【典例 3】如图所示的是用来验证动量守恒的实验装置，弹性球 1 用细线悬挂于 O 点，O 点下方桌子的边缘有一竖直立柱. 实验时，调节悬点，使弹性球 1 静止时恰与立柱上的球 2 右端接触且两球等高. 将球 1 拉到 A 点，并使之静止，同时把球 2 放在立柱上. 释放球 1，当它摆到悬点正下方时与球 2 发生对心碰撞，碰后球 1 向左最远可摆到 B 点，球 2 落到水平地面上的 C 点. 测出有关数据即可验证 1、2 两球碰撞时动量守恒. 现已测出 A 点离水平桌面的距离为 a、B 点离水平桌面的距离为 b、C 点与桌子边缘间的水平距离为 c.



(1)还需要测量的是_____、_____和_____.

(2)根据测量的数据，该实验中动量守恒的表达式为_____.

(忽略小球的大小)

(1)弹性球 1、2 的质量 m_1、m_2　立柱高 h　桌面离水平地面的高度 H

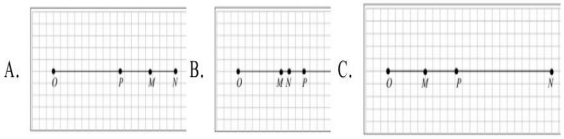
(2)$2m_1\sqrt{a-h}=2m_1\sqrt{b-h}+m_2\frac{c}{\sqrt{H+h}}$

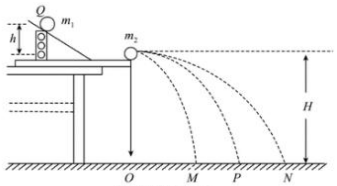
【典例 4】

（2）如图丙所示，用碰撞实验器可以研究两个刚性小球在水平轨道碰撞前后的动量关系。实验时先让质量为 m_1 的小球 1 从斜槽上某一固定位置 Q 由静止开始释放，从轨道末端水平抛出，落到位于水平地面的 P 点。再把质量为 m_2 的小球 2 放在水平轨道末端，让小球 1 仍从位置 Q 由静止释放，两小球碰撞后从轨道末端水平抛出，小球 2 落到位于水平地面的 N 点，小球 1 落到位于水平地面的 M 点。则碰撞前的动量可表示为 $m_1\cdot\overline{OP}$，碰后的动量可表示为 $m_1\cdot\overline{OM}+m_2\cdot\overline{ON}$。

①本实验中刚性小球 1 的质量 m_1 与刚性小球 2 的质量 m_2 大小应满足的关系 ▲；

②若实验中换用不同材质的小球，其他条件不变，可以改变小球的落点位置。下面三幅图中，可能正确的落点分布是__▲__。

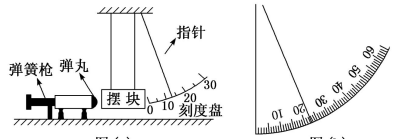
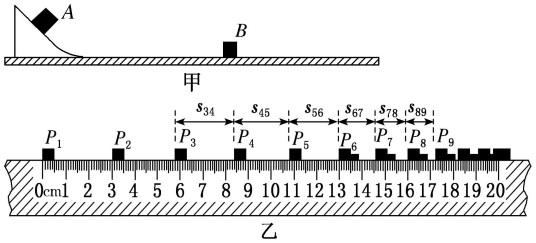
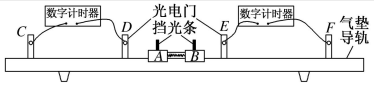




第 17 题图丙

【答案】（2）① $m_1 \rangle m_2$ ②B（A 图动量不守恒，C 图总动能增加了）

【实验创新】

实验目的的创新	 图 (a) 图 (b) 1.利用动量守恒、机械能守恒计算弹丸的发射速度。 2.减小实验误差的措施，体现了物理知识和物理实验的实用性、创新性和综合性。
实验器材的创新	 1.利用铝质导轨研究完全非弹性碰撞。 2.利用闪光照相机记录立方体滑块碰撞前后的运动规律，从而确定滑块碰撞前后的速度。
实验过程的创新	 1.用压缩弹簧的方式使两滑块获得速度，可使两滑块的合动量为零。 2.利用 $v=\frac{L}{t}$ 的方式获得滑块弹离时的速度。 3.根据能量守恒定律测定弹簧的弹性势能。

第五节　弹性碰撞和非弹性碰撞

一、碰撞

1.定义：碰撞是指物体间的相互作用持续时间很短，而物体间的相互作用力很大的现象。

2.特点：在碰撞现象中，一般都满足内力远大于外力，可认为相互碰撞的系统动量守恒。

3. 碰撞的种类及特点

碰撞前后动量是否共线	对心碰撞	碰撞前后速度共线，也称一维碰撞或正碰
	非对心碰撞	碰撞前后速度不共线
微观粒子的碰撞	散射	粒子相互接近时并不发生直接接触

二、碰撞的种类分析

(1)弹性碰撞

$$\begin{cases}\text{动量守恒：}m_1v_1+m_2v_2=m_1v_1'+m_2v_2'\\ \text{动能不变：}\frac{1}{2}m_1v_1^2+\frac{1}{2}m_2v_2^2=\frac{1}{2}m_1v_1'^2+\frac{1}{2}m_2v_2'^2\end{cases}$$

联立解得

$$v_A'=\frac{m_A-m_B}{m_A+m_B}v_A+\frac{2m_B}{m_A+m_B}v_B,$$

$$v_B'=\frac{m_B-m_A}{m_A+m_B}v_B+\frac{2m_A}{m_A+m_B}v_A.$$

【点拨】推导技巧：

①式变形可得 $m_1(v_1-v_1')=m_2(v_2'-v_2)$ ③

②式变形可得 $m_1(v_1^2-v_1'^2)=m_2(v_2'^2-v_2^2)\Rightarrow m_1(v_1-v_1')(v_1+v_1')=m_2(v_2'-v_2)(v_2'+v_2)$ ④

由③④式可得 $v_1+v_1'=v_2+v_2'$ ⑤

将⑤式与①式联立即可求得结果。

【讨论】

①当 $m_1=m_2$ 时，由（Ⅰ）式可得 $v_1'=v_2, v_2'=v_1$，即两物体质量相等时，发生弹性碰撞后，会发生“速度交换”。牛顿摆就属于此种情形。

②当 $v_2=0$ 时，即运动物体与静止物体的弹性碰撞（“一动一静”模型），有

$$\begin{cases}v_1'=\frac{m_1-m_2}{m_1+m_2}v_1\\ v_2'=\frac{2m_1}{m_1+m_2}v_1\end{cases}\quad(\text{Ⅱ})$$

a. 当 $m_1 \gg m_2$ 时，$m_1-m_2\approx m_1$，$m_1+m_2\approx m_1$，则有 $v_1'=v_1, v_2'=2v_1$，即碰后第一个物体的速度几乎未变，原来静止的物体以 $2v_1$ 的速度被撞出去。

b. 当 $m_1 \ll m_2$ 时，$m_1-m_2\approx -m_2$，$\frac{2m_1}{m_1+m_2}\approx 0$，则有 $v_1'=-v_1, v_2'=0$，即碰后第一个物体被以原来的速率反方向弹了回去，而原来静止的物体仍静止。

C. 当 $m_1=m_2$ 时，$v_1'=0$，$v_2'=v_1$，即两者交换速度。

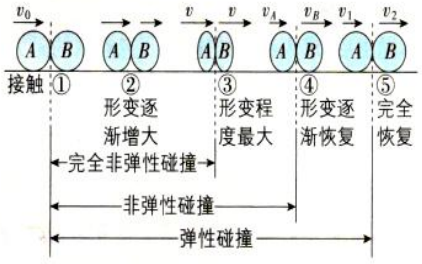
(2)非弹性碰撞

$$\begin{cases}\text{动量守恒：}m_1v_1+m_2v_2=m_1v_1'+m_2v_2'\\ \text{动能损失：}\\ \Delta E_k=\left(\frac{1}{2}m_1v_1^2+\frac{1}{2}m_2v_2^2\right)-\left(\frac{1}{2}m_1v_1'^2+\frac{1}{2}m_2v_2'^2\right)\end{cases}$$

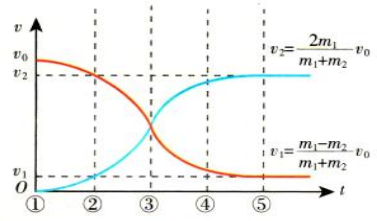
(3)完全非弹性碰撞

$$\begin{cases}\text{动量守恒：}m_1v_1+m_2v_2=(m_1+m_2)v\\ \text{动能损失最大：}\\ \Delta E_k=\left(\frac{1}{2}m_1v_1^2+\frac{1}{2}m_2v_2^2\right)-\frac{1}{2}(m_1+m_2)v^2\end{cases}$$

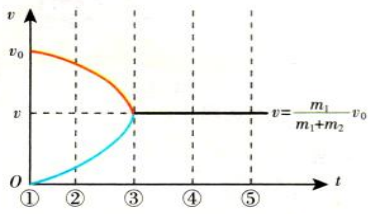
(4)为了进一步理解和应用一维情况下的弹性碰撞和非弹性碰撞，我们把“一动碰一静”模型这个短暂的作用过程中微小的形变放大处理，得到如图甲所示的5个状态，结合图乙、丙、丁所示的 v-t 图像理解碰撞的特点。(其中 A 的质量为 m_1，B 的质量为 m_2)



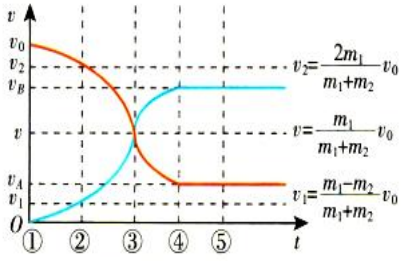
甲



乙　弹性碰撞(①→⑤)



丙　完全非弹性碰撞(①→③)



丁　非弹性碰撞(①→④)

三、碰撞问题的“三个原则”

(1)动量守恒：即 $p_1+p_2=p_1'+p_2'$。

(2)动能不增加：即 $E_{k1}+E_{k2}\geqslant E_{k1}'+E_{k2}'$ 或 $\frac{p_1^2}{2m_1}+\frac{p_2^2}{2m_2}\geqslant \frac{p_1'^2}{2m_1}+\frac{p_2'^2}{2m_2}$。

(3)速度要合理

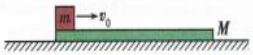
①若碰前两物体同向运动，则应有 $v_{后}>v_{前}$(否则无法实现碰撞)，碰后原来在前的物体速度一定增大。若碰后两物体同向运动，则应有 $v_{前}'\geqslant v_{后}'$。

②若碰前两物体相向运动，则碰后两物体的运动方向不可能都不改变。

四、动量守恒中的临界和极值问题

1.板块模型中的临界问题

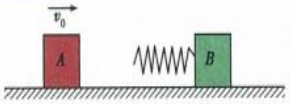
如图，滑块以一定的初速度在板面上滑动，滑块在摩擦力作用下减速、板在摩擦力作用下加速，滑块恰好不滑离板的临界条件是滑块滑至板末端时二者速度相同。



此模型中包括子弹打木块的情景，主要特征是内力是摩擦恒力，系统损失的机械能也可由 $fs_{相对}$ 表达。

2.涉及弹簧的临界问题

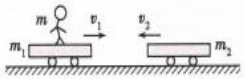
对于如图所示的包含弹簧的系统，当物体 A 与弹簧作用后，物体 A 做减速运动，物体 B 做加速运动，两者间的距离逐渐减小，弹簧的压缩量逐渐增大，在发生相互作用过程中，当弹簧被压缩到最短时，两个物体的速度必相等。



此模型的特征是内力是变力，系统包括弹簧在内时机械能守恒。

3.相向运动的两物体不相撞的临界问题

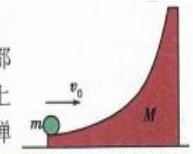
如图，两小车相向运动，其中一车上的人跳到另一车上，人跳离时使该车减速(或反向)，落至另一车上时使另一车反向(或减速)。两车避免相撞的临界条件是三者最终速度相同。



此模型也包括“推木箱”模型、“并行船抛货物”模型等。主要特征是其中一物体中的一部分转移到另外一物体上，从而避免碰撞。即“三个物体，两次作用。”

4.涉及最大高度的临界问题

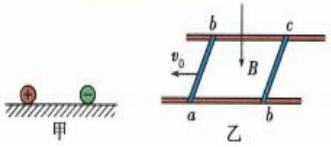
如图，小球滑上所有接触面都光滑的斜劈上，小球在水平方向上由于受弹力而减速，斜劈由于受弹力而加速，小球达到最高点的临界状态时，小球与斜劈具有相同的水平速度，小球的竖直速度恰好为零。



此模型包括斜面、曲面、半球面等。主要特征是水平方向动量守恒，机械能守恒。

5.电、磁作用系统临界问题

系统间的相互作用可以是弹力、摩擦力，也可以是静电力、磁力，甚至是无相互作用力。如图甲中，内力是静电力，临界状态下两球速度相等，电势能最大；图乙中两杆间忽略电流间相互作用时无相互作用力，ab 杆是在磁场对其安培力作用下减速，cd 杆是在磁场对其安培力作用下加速，当二者速度相等时，系统动能损失最大，产生焦耳热最多。



甲　　乙

第六节　反冲现象　　火箭

一、反冲运动

1.反冲：根据动量守恒定律，如果一个静止的物体在内力的作用下分裂为两个部分，一部分向某个方向运动，另一部分必然向相反的方向运动。

2.反冲现象的应用及防止

①应用：农田、园林的喷灌装置是利用反冲使水从喷口喷出时，一边喷水一边旋转，可以自动改变喷水的方向。

②防止：用枪射击时，由于枪身的反冲会影响射击的准确性，所以用步枪射击时要把枪身抵在肩部，以减少反冲的影响。

3.对反冲运动的三点说明

作用原理	反冲运动是系统内物体之间的作用力和反作用力产生的效果
动量守恒	反冲运动中系统不受外力或内力远大于外力，所以反冲运动遵循动量守恒定律
机械能增加	反冲运动中，由于有其他形式的能转化为机械能，所以系统的总机械能增加

【典例】

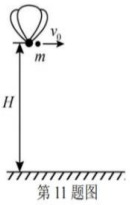
1. 如图所示，载有物资的热气球静止于距水平地面 H=125m 的高处，现将质量为 m=50kg 的物资以相对地面的速度 v_0=5m/s 水平投出，已知投出物资前热气球的总质量为 M=300kg，所受浮力不变，重力加速度 10m/s²，不计阻力，以下判断不正确的是（　　）

A. 投出物资后，物资下落过程中热气球和物资组成的系统动量守恒

B. 投出物资后热气球与物资在水平方向上的速度大小之比始终是 1:5

C. 物资落地时物资与热气球的距离为 $5\sqrt{661}$m

D. 投出物资后，物资下落过程中热气球和物资组成的系统机械能增加



第 11 题图

【答案】C

二、爆炸

动量守恒	由于爆炸是在极短的时间内完成的，爆炸物体间的相互作用力远远大于受到的外力，所以在爆炸过程中，系统的总动量守恒
动能增加	在爆炸过程中，由于有其他形式的能量(如化学能)转化为动能，所以爆炸后系统的总动能增加
位置不变	爆炸的时间极短，因而作用过程中，物体产生的位移很小，一般可忽略不计，可以认为爆炸后仍然从爆炸前的位置以新的动量开始运动

【注意】反冲运动和爆炸问题中，系统的机械能可以增大，这与碰撞问题是不同的。

三、火箭

1.火箭的原理

火箭的工作原理是反冲运动，其反冲过程动量守恒，它靠向后喷出的气流的反冲作用而获得向前的速度。

2.影响火箭获得速度大小的因素

①喷气速度：现代液体燃料火箭的喷气速度约为 2000～4000 m/s。

②火箭的质量比：指火箭起飞时的质量与火箭除燃料外的箭体质量之比，决定于火箭的结构和材料。现代火箭的质量比一般小于 10。

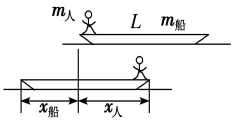
喷气速度越大，质量比越大，火箭获得的速度越大。

第二部分　方法、规律与技巧

一、人船模型--------平均动量守恒

1.模型探究：

如图所示，长为 L、质量为 $m_{船}$ 的小船停在静水中，质量为 $m_{人}$ 的人由静止开始从船的一端走到船的另一端，不计水的阻力。



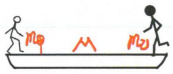
以人和船组成的系统为研究对象，在人由船的一端走到船的另一端的过程中，系统水平方向不受外力作用，所以整个系统水平方向动量守恒，可得 $m_{船}v_{船}=m_{人}v_{人}$，因人和船组成的系统动量始终守恒，故有 $m_{船}x_{船}=m_{人}x_{人}$，由图可看出 $x_{船}+x_{人}=L$，可解得 $x_{人}=\frac{m_{船}}{m_{人}+m_{船}}L$，$x_{船}=\frac{m_{人}}{m_{人}+m_{船}}L$。

2.模型特点
- (1)两个物体
- (2)动量守恒
- (3)总动量为零

3.结论：$m_1x_1=m_2x_2$(m_1、m_2 为相互作用的物体质量，x_1、x_2 为其位移大小)。

重要思想：人船模型中，认为人先加速后减速，到达船头的速度恰好为 0，以船为参考系，人走的距离即为人与船相对地面运动的距离之和.

【模型拓展】1. 两人一船模型



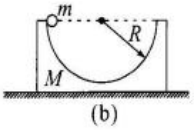
①甲先到乙：船向左的位移 $x_{船1}=\frac{m_{甲}L}{m_{甲}+m_{乙}+M}$

②乙再到甲：船向右的位移 $x_{船2}=\frac{m_{乙}L}{m_{甲}+m_{乙}+M}$

③若 $m_{甲}>m_{乙}$，向左位移 $x=\frac{(m_{甲}-m_{乙})L}{m_{甲}+m_{乙}+M}$

【模型拓展】2. 单方向动量守恒

如图(b)所示，小球的质量为 m，质量为 M 的半圆形凹槽静止在水平面上，半径为 R，将 m 由静止释放，不计阻力，分析并得出结论.



(b)

(1)运动到最低点，在水平方向动量守恒.

由单方向动量守恒得 $mv_m=Mv_M$，

由能量守恒得 $\frac{1}{2}mv_m^2+\frac{1}{2}Mv_M^2-0=mgR$，

设小球和凹槽移动的距离分别为 x_m、x_M，有

$mv_mt=Mv_Mt$，即 $mx_m=Mx_M$，

位移之和为 $x_m+x_M=R$，

联立解得 x_m、x_M 与 v_m、v_M 的值.

(2)运动到右端最高点时，在水平方向动量守恒.

由系统机械能守恒知，当小球运动到另外一端的圆心等高处时，系统的速度为 0.

在运动的过程中：

由单方向动量守恒得 $mv_m=Mv_M$，

设小球和凹槽移动的距离分别为 x_m、x_M，有

$mv_m t = Mv_M t$，即 $mx_m = Mx_M$，

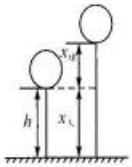
位移之和为 $x_m + x_M = 2R$，

联立解得 $x_m = \dfrac{M}{m+M} \cdot 2R$，

$x_M = \dfrac{m}{m+M} \cdot 2R$.

【模型拓展】3.**推广：**

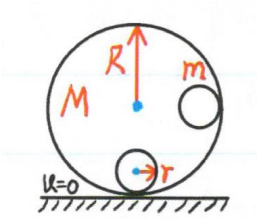
【变式 1】载人气球静止于高 h 的空中，气球的质量为 M，人的质量为 m,若人沿绳梯滑至地面，则绳梯至少为多长？



由动量守恒定律有 $0 = M\dfrac{x_{球}}{t} - m\dfrac{x_{人}}{t}$，

又有 $x_{球} + x_{人} = L$，$x_{人} = h$，故 $L = \dfrac{M+m}{M}h$.

【变式 2】半径为 r 质量为 m 的小球从质量为 M，半径为 R 的光滑圆环的 $\dfrac{1}{4}$ 圆环处静止释放（地面光滑），当小球到达圆环底部时，求小球和圆环的位移（对地）。

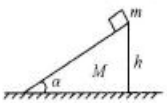


$mx_{球} - Mx_{环} = 0$ ①　　$x_{球} + x_{环} = \mathrm{R} - r$ ②

联立得：

$x_{球} = \dfrac{\mathrm{M}}{\mathrm{M}+m}(R-r)$　　$x_{环} = \dfrac{m}{M+m}(R-r)$

【变式 3】一倾角为α的直角斜面体静置于光滑水平面上，斜面体质量为 M，顶端高度为 h,一质量为 m 的物体，沿光滑斜面下滑，当小物体下滑到低端时，求斜面体和小物体的位移。



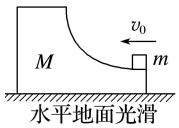
由 $mx_1 - Mx_2 = 0$ ①　　$x_1 + x_2 = \dfrac{h}{\tan\alpha}$ ②

联立得：

$x_1 = \dfrac{Mh}{(M+m)\tan\alpha}$　　$x_2 = \dfrac{mh}{(M+m)\tan\alpha}$

二、圆弧槽模型

1.模型图示（未冲出圆弧槽）



2.模型特点

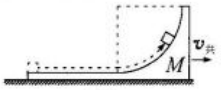
(1)最高点：m 与 M 具有共同水平速度 $v_{共}$，m 不会从此处或提前偏离轨道．系统水平方向动量守恒，$mv_0 = (M+m)v_{共}$；系统机械能守恒，$\dfrac{1}{2}mv_0^2 = \dfrac{1}{2}(M+m)v_{共}^2 + mgh$，其中 h 为滑块上升的最大高度，不一定等于圆弧轨道的高度(完全非弹性碰撞拓展模型)

(2)最低点：m 与 M 分离点．水平方向动量守恒，$mv_0 = mv_1 + Mv_2$；系统机械能守恒，$\dfrac{1}{2}mv_0^2 = \dfrac{1}{2}mv_1^2 + \dfrac{1}{2}Mv_2^2$(完全弹性碰撞拓展模型)

总结

1. 物块运动到最高点

如图(a)所示，物块运动到最高点时，系统水平方向的速度相同，竖直方向的速度为0，即系统共速．系统共速相当于物块与圆弧劈发生一次完全非弹性碰撞，完全非弹性碰撞损失的能量，在本系统中转化成物块的重力势能，设物块上升的高度为 $h(h<R)$.



(a)

由水平方向上动量守恒得

$mv_0 = (m+M)v_{共}$，

重力势能为

$E_p = mgh = \dfrac{1}{2}mv_0^2 - \dfrac{1}{2}(m+M)v_{共}^2$.

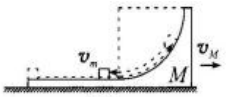
变式：若圆弧劈也有初速度，初速度为 v_1，方向水平向右，且 $v_1 < v_0$，则

由动量守恒得 $mv_0 + Mv_1 = (m+M)v_{共}$，

重力势能 $E_p = mgh = \dfrac{1}{2}mv_0^2 + \dfrac{1}{2}Mv_1^2 - \dfrac{1}{2}(m+M)v_{共}^2$.

2. 物块回到水平面

如图(b)所示，物块回到水平面，系统没有能量损失，相当于物块与圆弧劈发生一次弹性碰撞.



(b)

由动量守恒得 $mv_0 = mv_m + Mv_M$，

由能量守恒得 $\dfrac{1}{2}mv_0^2 = \dfrac{1}{2}mv_m^2 + \dfrac{1}{2}Mv_M^2$，

联立解得 $v_m = \dfrac{m-M}{m+M}v_0$，$v_M = \dfrac{2m}{m+M}v_0$.

变式：若圆弧劈也有初速度，初速度为 v_1，方向水平向右且 $v_1 < v_0$，则

由动量守恒得 $mv_0 + Mv_1 = mv_m + Mv_M$，

由能量守恒得 $\dfrac{1}{2}mv_0^2 + \dfrac{1}{2}Mv_1^2 = \dfrac{1}{2}mv_m^2 + \dfrac{1}{2}Mv_M^2$，

联立解得

$$v_m=\frac{m-M}{m+M}v_0+\frac{2M}{m+M}v_1,$$

$$v_M=\frac{M-m}{m+M}v_1+\frac{2m}{m+M}v_0.$$

3. 临界情况分析

(1)物块不从圆弧劈体上端滑出，分析 v_0 的最大值.

临界情况：物块恰好上升到圆心等高处，此时物块的初速度为 $v_{临}$.

由动量守恒得 $mv_{临}=(m+M)v_{共}$，

重力势能为 $E_p=mgR=\frac{1}{2}mv_{临}^2-\frac{1}{2}(m+M)v_{共}^2$，

联立解得初速度 $v_{临}$ 的值.

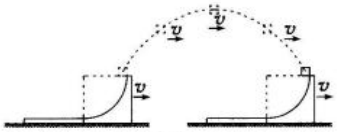
①若 $v_0\leqslant v_{临}$，则物块不会从圆弧劈体上端滑出；

②若 $v_0>v_{临}$，则物块可从圆弧劈体上端滑出.

4. 物块从圆弧劈上端滑出后的运动状态分析

滑出后，物块在水平方向不受力的作用，故物块在水平方向做匀速运动；在竖直方向受重力作用，做竖直上抛运动，合运动为斜抛运动.

圆弧劈在水平方向不受力的作用，也做匀速运动，又脱离点的切线方向为竖直方向，故圆弧劈与物块的水平分速度相同，因此小球始终在圆弧劈体脱离点的正上方，小球可再次从脱离点切入圆弧劈，运动的动态图如图(c)所示.



(c)

三、含弹簧的碰撞问题

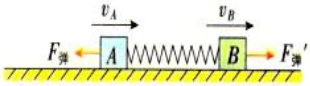
1.情景

如图所示，光滑水平面上的物体 A 以速度 v_0 向静止的 B 运动并压缩弹簧。



2.过程分析

物体 A 接触弹簧后受到弹簧的弹力做减速运动，B 受到弹力做加速运动，开始时 $v_A>v_B$，则 $x_A>x_B$，两物体间距离减小，弹簧被压缩，当 $v_A=v_B$ 时，两物体相距最近，弹簧被压缩至最短，弹性势能最大，系统损失的动能等于弹簧获得的弹性势能。



之后，$v_A<v_B$，则 $x_A<x_B$，两物体间距离增大。

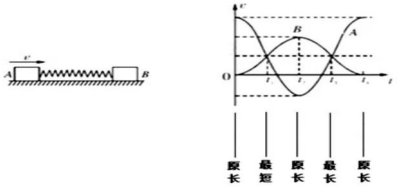
3.列方程（从物体 A 接触弹簧瞬间到两物体相距最近的过程）

(1)动量守恒方程：$m_1v_0=(m_1+m_2)v_{共}$。

(2)机械能守恒方程：$\frac{1}{2}m_1v_0^2=\frac{1}{2}(m_1+m_2)v_{共}^2+E_{pmax}$。

【点拨】上述“物块—弹簧”模型类似于时间放慢了的完全非弹性碰撞，应用规律是一致的。

4.V-t 图过程分析



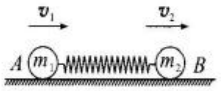
5.规律总结

特殊模型：A、B 的质量相等，按初始时 A 的速度为 v_0、B 静止的模型进行讲解，其他一般模型的物理分析思维与上述过程相似，以下结论具有一般性.

1. 弹簧压缩至最短或拉伸至最长，弹簧的弹性势能最大

弹性势能最大时，系统共速，系统共速时与完全非弹性碰撞等效. 完全非弹性碰撞时损失的机械能，在本系统中转化成弹簧的弹性势能.

如图所示，球 A 的质量为 m_1，速度为 v_1，球 B 的质量为 m_2，速度为 v_2，当弹簧压缩至最短或拉伸至最长时，利用完全非弹性碰撞解题.



动量守恒：$m_1v_1+m_2v_2=(m_1+m_2)v_{共}$，

弹性势能：$E_p=\frac{1}{2}m_1v_1^2+\frac{1}{2}m_2v_2^2-\frac{1}{2}(m_1+m_2)v_{共}^2$.

2. 弹簧第一次恢复原长，弹簧的弹性势能为 0

弹簧恢复原长时与弹性碰撞等效，利用弹性碰撞解题.

由动量守恒定律得 $m_1v_1+m_2v_2=m_1v_1'+m_2v_2'$，

由能量守恒定律得 $\frac{1}{2}m_1v_1^2+\frac{1}{2}m_2v_2^2=\frac{1}{2}m_1v_1'^2+\frac{1}{2}m_2v_2'^2$，

联立解得

$$v_1'=\frac{m_1-m_2}{m_1+m_2}v_1+\frac{2m_2}{m_1+m_2}v_2,$$

$$v_2'=\frac{m_2-m_1}{m_1+m_2}v_2+\frac{2m_1}{m_1+m_2}v_1.$$

6.解题思路

含弹簧的碰撞问题，一般情况下均满足动量守恒定律和机械能守恒定律，此类试题的一般解法是：

(1)首先判断弹簧的初始状态是处于原长、伸长还是压缩状态；

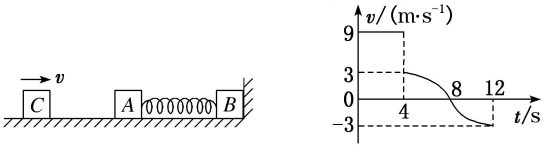
(2)分析碰撞前、后弹簧和物体的运动状态，依据动量守恒定律和机械能守恒定律列出方程；

(3)判断解出的结果是否满足“物理情境可行性原则”，如果不满足，则要舍掉该结果；

(4)由于弹簧的弹力是变力，所以弹簧的弹性势能通常利用机械能守恒定律或能量守恒定律求解；

(5)要特别注意弹簧的三个状态：原长(此时弹簧的弹性势能为零)、压缩到最短或伸长到最长的状态(此时弹簧连接的物体具有共同的速度，弹簧具有最大的弹性势能)，这往往是解决此类问题的突破点。

【典例 1】如图甲所示，物块 A、B 的质量分别是 m_A=4.0 kg 和 m_B=3.0 kg，用轻弹簧拴接，放在光滑的水平地面上，物块 B 右侧与竖直墙壁相接触，另有一物块 C 从 t=0 时以一定速度向右运动，在 t=4 s 时与物块 A 相碰，并立即与 A 粘在一起不再分开，物块 C 的 v-t 图像如图乙所示，墙壁对物块 B 的弹力在 4 s 到 12 s 的时间内对 B 的冲量 I 的大小(　　)

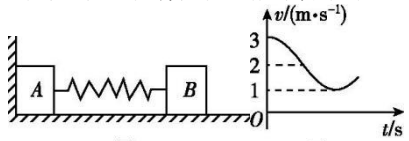


图甲

图乙

【答案】36 N·s

【典例 2】 如图甲所示，物块 *A*、*B* 间拴接一个压缩后被锁定的轻弹簧，整个系统静止放在光滑水平地面上，其中 *A* 物块最初与左侧固定的挡板相接触，*B* 物块质量为 4 kg.现解除对弹簧的锁定，在 *A* 离开挡板后，*B* 物块的 *v*-*t* 图像如图乙所示，则（　　）



甲　　乙

A.物块 *A* 的质量为 4 kg

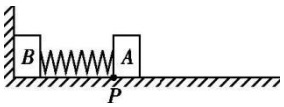
B.运动过程中物块 *A* 的最大速度为 v_m=4 m/s

C.在物块 *A* 离开挡板前，系统动量守恒、机械能守恒

D.在物块 *A* 离开挡板后，弹簧的最大弹性势能为 8 J

【答案】B

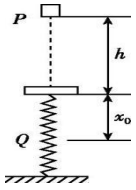
【典例 3】如图所示，质量相同的 *A*、*B* 两物体用轻弹簧连接，静止在光滑水平面上，其中 *B* 物体靠在墙壁上.现用力推动物体 *A* 压缩弹簧至 *P* 点后再释放物体 *A*，当弹簧的长度最大时，弹性势能为 E_1.现将物体 *A* 的质量增大到原来的 3 倍，仍使物体 *A* 压缩弹簧至 *P* 点后释放，当弹簧的长度最大时，弹性势能为 E_2，则 E_1∶E_2 等于(　　)



A.1　　B.2　　C.3　　D.4

【答案】B

【典例 4】 如图所示，竖直放置的轻弹簧下端固定在地上，上端与质量为 *m* 的钢板连接，钢板处于静止状态.一个质量也为 *m* 的物块从钢板正上方 *h* 处的 *P* 点自由落下，打在钢板上并与钢板一起向下运动 x_0 后到达最低点 *Q*.重力加速度为 *g*.下列说法正确的是(　　)



A.物块与钢板碰后的速度为 $\sqrt{2gh}$

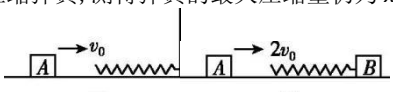
B.物块与钢板碰后的速度为 $\sqrt{gh}$

C.从 *P* 到 *Q* 的过程中，弹性势能的增加量为 $mg\left(2x_0+\frac{h}{2}\right)$

D.从 *P* 到 *Q* 的过程中，弹性势能的增加量为 $mg(2x_0+h)$

【答案】C

【典例 5】如图甲所示，在光滑水平面上，轻质弹簧一端固定，物体 *A* 以速度 v_0 向右运动压缩弹簧，测得弹簧的最大压缩量为 *x*.现让弹簧一端连接另一质量为 *m* 的物体 *B*，如图乙所示，物体 *A* 以 $2v_0$ 的速度向右压缩弹簧，测得弹簧的最大压缩量仍为 *x*，则（　　）



甲　　乙

A.*A* 物体的质量为 2*m*

B.*A* 物体的质量为 4*m*

C.弹簧压缩量最大时的弹性势能为 mv_0^2

D.弹簧压缩量最大时的弹性势能为 $\frac{3}{2}mv_0^2$

【答案】D

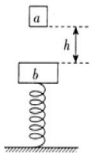
【典例 6】如图所示，一轻弹簧的一端固定在水平面上，另一端与质量为 M 的物块 b 固定连接，质量为 m 的小物块 a 位于 b 的正上方，两者之间的距离为 h，静止释放小物块 a，a、b 碰后一起向下运动但不粘连，压缩弹簧到最低点后两物块向上运动，且上升至最高点时恰不分离，重力加速度为 g，则（　　）

A.弹簧压缩到最低点时，弹簧弹性势能的增加量为 a、b 重力势能的减少量。

B.b 对 a 的支持力最大值为 2Mg

C.若仅增大 h,碰后 a、b 一起达到最大动能时的位置将降低

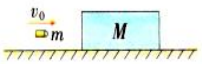
D.a、b 碰撞损失的机械能为 $\frac{Mgh}{M+m}$



【答案】D

四、子弹打木块模型

1. 如图所示，一质量为 m 的子弹以速度 v_0 打入静止在光滑水平面上质量为 M 的木块中。若子弹进入木块深度为 d 时相对于木块静止，此时木块位移为 s，则



由动量守恒定律有 $mv_0=(m+M)v$　　①

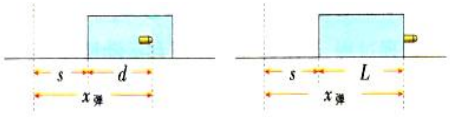
对子弹由动能定理有 $-F_f(s+d)=\frac{1}{2}mv^2-\frac{1}{2}mv_0^2$　　②

对木块由动能定理有 $F_fs=\frac{1}{2}Mv^2$　　③

②③式联立得 $F_fd=\frac{1}{2}mv_0^2-\frac{1}{2}(m+M)v^2$　　④

由④式得到的结论：系统损失的机械能等于阻力乘子弹和木块的相对路程，即 $\Delta E=F_fd$。





子弹留在木块中　　子弹穿过木块

2. 若子弹没有留在木块中，则对打穿木块过程由

动量守恒定律得 $mv_0=mv_1+Mv_2$

对子弹由动能定理有 $-F_f(s+L)=\frac{1}{2}mv_1^2-\frac{1}{2}mv_0^2$

对木块由动能定理有 $F_fs=\frac{1}{2}Mv_2^2$

联立得 $F_fL=\frac{1}{2}mv_0^2-\left(\frac{1}{2}mv_1^2+\frac{1}{2}Mv_2^2\right)$

即系统损失的机械能等于阻力乘子弹和木块的相对路程，即 $\Delta E=F_fL$。

【拓展】



“滑块—滑板”模型的处理方法与“子弹打木块”模型一致。

【点拨】此类问题如果涉及位移借助 V-t 图求解非常方便。

【记忆口诀】

力积时间是冲量，力累位移为做功。
质量速度来相乘，动量动能要区分。
确定状态找动量，分析过程找冲量。
同一直线定方向，计算结果只是“量”，
某量方向若未定，计算结果给指明。
碰撞爆炸和反冲，动量守恒能或变。
人船模型平均算，打击碰撞最典型。
动量能量两利剑，解决力电核武器。

【本章高频考点】

1.应用动量、冲量、动量定理对日常生活中的现象解释和计算（汽车安全气囊、易碎品的运输、高空落体等）。
2.碰撞、爆炸、反冲运动。
3.动量守恒定律的应用（以碰撞为主）。
4.验证动量守恒定律实验（注意实验创新）。

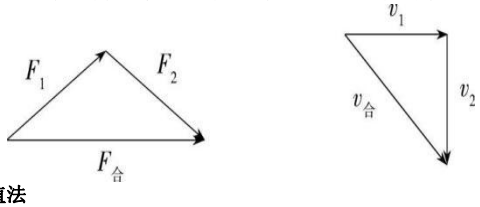
第三部分　物理方法概述

一、整体法—隔离法

①整体法：把几个物体视为一个整体，受力分析时只分析这一整体之外的物体对整体的作用力，不考虑整体内部物体之间的相互作用力。②隔离法：把要分析的物体从相关的物体系中假想地隔离出来，只分析该物体以外的物体对它的作用力，不考虑该物体对其他物体的作用力。

二、矢量三角形法

将第二个力（或其他任何矢量）的尾与第一个力的头相连，它们的合力就是第一个力的尾指向第二个力的头的一个矢量，三者构成一个三角形。



三、临界值法

以原理、定理或定律为依据，直接从临界状态和相应的临界量入手，求出所研究问题的特殊规律和特殊解，然后以此对一般情况进行分析、讨论和推理，即采用从特殊到一般的推理方法。

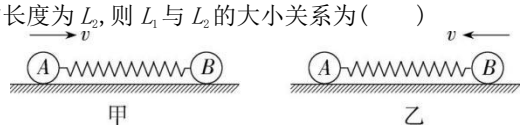
四、建立“柱体”模型法

对“连续”质点系发生持续作用的情况，选取很短时间内动量（或其他量）发生变化的那部分作为研究对象，建立“柱体”模型，使问题变得直观、容易理解。

第四部分　易错、疑难问题选

一　弹簧模型

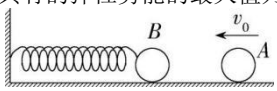
1. 用轻弹簧连接的 A、B 两小球质量分别为 m 和 $M(m<M)$，静止在光滑水平面上。若使 A 球获得瞬时速度 v（如图甲），弹簧压缩到最短时的长度为 L_1；若使 B 球获得瞬时速度 v（如图乙），弹簧压缩到最短时的长度为 L_2，则 L_1 与 L_2 的大小关系为（　　）



A. $L_1>L_2$　　B. $L_1<L_2$　　C. $L_1=L_2$　　D. 不能确定

【答案】C

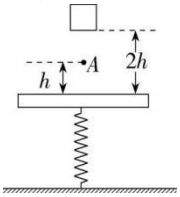
2. 如图所示，质量为 $3m$ 的弹性小球 B 与轻质弹簧右端拴接静止在光滑水平面上，弹簧左端固定在竖直墙壁上。质量为 $2m$ 的弹性小球 A 以速度 v_0 向左运动，小球 A、B 发生对心弹性碰撞。则小球 B 压缩弹簧使得弹簧具有的弹性势能的最大值为（　　）



A. $\frac{1}{2}mv_0^2$　　B. $\frac{2}{5}mv_0^2$　　C. $\frac{24}{25}mv_0^2$　　D. $\frac{64}{75}mv_0^2$

【答案】C

3. （多选）质量为 m 的木板与直立的轻质弹簧的上端相连，弹簧下端固定在水平地面上，静止时弹簧的压缩量为 h，如图所示。现将一质量为 $2m$ 的物块从木板正上方 $2h$ 处由静止释放，物块与木板碰撞后粘在一起向下运动，到达最低点后又向上运动，它们恰能回到 A 点，物块可视为质点，空气阻力、木板厚度忽略不计，重力加速度大小为 g，则　（　　）



A. 物块和木板一起向下运动过程中的速度先增大后减小

B. 整个运动过程，物块、木板和弹簧组成的系统机械能守恒

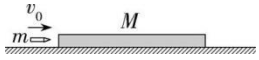
C. 物块和木板碰撞后瞬间的共同速度为 $\frac{2}{3}\sqrt{gh}$

D. 初始状态弹簧的弹性势能为 $\frac{mgh}{3}$

【答案】AD

二　子弹打木块模型

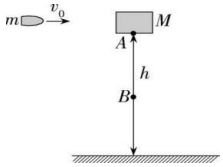
4. 如图所示，子弹以水平速度 v_0 射入放在光滑水平桌面上的木块，子弹没有射出。子弹质量为 m，木块质量为 M，此过程中木块的位移为 s，子弹进入木块的深度为 Δs，若将子弹在射入木块的过程中受到的阻力视为恒力，则 s 和 Δs 的大小关系满足　（　　）



A. $s>\Delta s$　　B. $s=\Delta s$　　C. $s<\Delta s$　　D. 不能确定

【答案】C

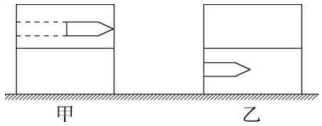
5. 如图所示，A 点距水平地面高度为 h，木块 M 在 A 点处于静止状态，某时刻释放 M，木块做自由落体运动，在空中运动的总时间为 t_1。有一子弹 m 以水平速度 v 射向木块并嵌在木块中，若在 A 点释放木块的同时子弹射入，木块在空中运动的总时间为 t_2；若在木块落至 h 一半的 B 点时子弹射入，木块在空中运动的总时间为 t_3。已知木块与子弹作用时间极短，空气阻力不计，则（　　）



A. $t_1=t_2=t_3$　　B. $t_1=t_2<t_3$　　C. $t_1<t_2=t_3$　　D. $t_1>t_2>t_3$

【答案】B

6.(多选)长方体滑块由不同材料的上、下两层粘在一起组成,将其放在光滑的水平面上,如图所示。质量为 m 的子弹以速度 v 水平射向滑块,若射击上层,则子弹刚好不穿出,如图甲所示;若射击下层,整个子弹刚好嵌入,如图乙所示。比较上述两种情况,以下说法正确的是(　　)



A.两次子弹对滑块做功一样多

B.两次滑块所受冲量一样大

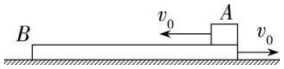
C.子弹击中上层过程中产生的热量多

D.子弹嵌入下层过程中对滑块做功多

【答案】AB

三　板块模型

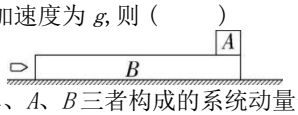
7.(多选)如图所示,一质量为 M=3.0 kg 的长木板 B 放在光滑水平地面上,在其右端放一质量为 m=1.0 kg 的小物块 A。现以地面为参考系,给 A 和 B 大小均为 4.0 m/s、方向相反的初速度,使 A 开始向左运动,B 开始向右运动,但最后 A 并没有滑离 B 板,站在地面上的观察者看到在一段时间内物块 A 做加速运动,则在这段时间内的某时刻,木板 B 相对地面的速度大小可能是 (　　)



A.3.0 m/s　　B.2.5 m/s　　C.2.4 m/s　　D.1.8 m/s

【答案】BC

8.(多选)如图所示,长为 L、质量为 $2m$ 的长木板 B 放在光滑的水平面上,质量为 m 的铁块 A 放在长木板右端。一质量为 m 的子弹以速度 v_0 射入木板并留在其中,铁块恰好不滑离木板。子弹射入木板中的时间极短,子弹、铁块均视为质点,铁块与木板间的动摩擦因数恒定,重力加速度为 g,则 (　　)



A.整个过程中子弹、A、B 三者构成的系统动量守恒

B.木板获得的最大速度为 $\frac{1}{4}v_0$

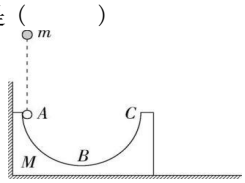
C.铁块获得的最大速度为 $\frac{1}{3}v_0$

D.铁块与木板之间的动摩擦因数为 $\frac{v_0^2}{24gL}$

【答案】AD

四　滑块+光滑弧面(斜面)模型

9.如图所示,水平光滑地面上质量为 M、半径为 R 且内壁光滑的半圆槽左侧靠竖直墙壁静止。质量为 m 的小球可视为质点,从槽口 A 的正上方某高度处由静止释放,并从 A 点沿切线进入槽内,最后从 C 点离开凹槽,B 为凹槽的最低点。关于小球与槽相互作用的过程,下列说法中正确的是 (　　)



A.小球在槽内从 A 运动到 B 的过程中,小球与槽在水平方向动量不守恒

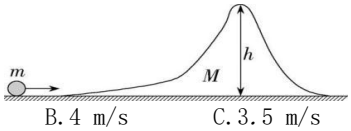
B.小球在槽内从 A 运动到 B 的过程中,小球机械能不守恒

C.小球在槽内从 B 运动到 C 的过程中,小球与槽在水平方向动量不守恒

D.小球离开 C 点以后,将做竖直上抛运动

【答案】A

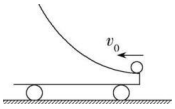
10.如图所示,光滑的水平面上有一个质量为 M=3m 的凸形滑块,它的左侧面与水平面相切,并且光滑,滑块的高度为 h=0.6 m。质量为 m 的小球,以某一初速度在水平面上迎着光滑曲面冲向滑块,要使小球越过滑块,小球初速度至少是(g=10 m/s^2) (　　)



A.4.5 m/s　　B.4 m/s　　C.3.5 m/s　　D.3 m/s

【答案】B

11.(多选)如图所示,在光滑水平面上停放质量为 m、带有弧形槽的小车。现有一质量也为 m 的小球以水平速度 v_0 沿切线水平的槽口向小车滑去(不计摩擦),到达某一高度后,小球又返回小车右端,则(　　)



A.小球在小车上到达最高点时的速度大小为 $\frac{v_0}{2}$

B.小球离开车后,对地将向右做平抛运动

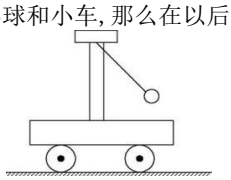
C.小球离开车后,对地将做自由落体运动

D.此过程中小球对车做的功为 $\frac{1}{2}mv_0^2$

【答案】ACD

五　悬绳模型

12.如图所示,小车放在光滑的水平面上,将系绳小球拉开到一定角度,然后同时放开小球和小车,那么在以后的过程中 (　　)



A.小球向左摆动时,小车也向左运动,且系统动量守恒

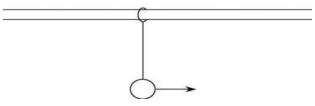
B.小球向左摆动时,小车向右运动,且系统动量守恒

C.小球向左摆到最高点,小球的速度为零而小车的速度不为零

D.在任意时刻,小球和小车在水平方向的动量一定大小相等、方向相反

【答案】D

13.如图所示,质量为 m 的滑环套在足够长的光滑水平滑杆上,质量为 M=3m 的小球(可视为质点)通过长为 L 的轻质细绳与滑环连接。将滑环固定时,给小球一个水平冲量,小球摆起后刚好碰到水平杆;若滑环不固定,仍给小球同样的水平冲量,则小球摆起的最大高度为 (　　)



A.$\frac{1}{6}L$　　B.$\frac{1}{4}L$　　C.$\frac{1}{2}L$　　D.$\frac{3}{4}L$

【答案】B

六　人船模型

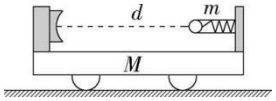
14.如图所示,一个质量为 m_1=50 kg 的人抓在一只大气球下方,气球下面有一根长绳。气球和长绳的总质量为 m_2=20 kg,长绳的下端刚好和水平面接触。初始静止时人离地面的高度为 h=5 m。如果这个人开始沿长绳向下滑动,当他滑到长绳下端时,他离地面的高度大约是(可以把人看作质点)(　　)



A.2.6 m　　B.3.6 m　　C.1.5 m　　D.4.5 m

【答案】B

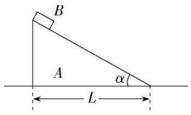
15.如图所示,质量为 M 的车静止在光滑水平面上,车右侧内壁固定有发射装置,车左侧内壁固定有沙袋。把质量为 m 的弹丸最终射入沙袋中,这一过程中车移动的距离是 s,则弹丸初位置到沙袋的距离 d 为(　　)



A. $\frac{(M+m)s}{m}$　B. $\frac{(M+m)s}{M}$　C. $\frac{ms}{M+m}$　D. $\frac{Ms}{M+m}$

【答案】A

16. 光滑水平面上放有一上表面光滑、倾角为 α 的斜面体 A，斜面体质量为 M，底边长为 L，如图所示。将一质量为 m、可视为质点的滑块 B 从斜面的顶端由静止释放，滑块 B 经过时间 t 刚好滑到斜面底端。此过程中斜面对滑块的支持力大小为 F_N，则下列说法中正确的是(　　)



A. $F_N=mg\cos\alpha$

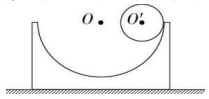
B. 滑块下滑过程中支持力对 B 的冲量大小为 $F_N t\cos\alpha$

C. 滑块 B 下滑的过程中 A、B 组成的系统动量守恒

D. 此过程中斜面体向左滑动的距离为 $\frac{mL}{M+m}$

【答案】D

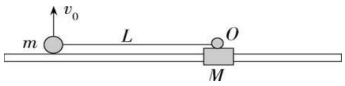
17. 一半径为 R、质量为 M 的光滑半圆形底座，放置在光滑水平面上，将一半径为 $\frac{1}{3}R$、质量为 m 的小球紧靠底座右侧由静止释放，释放时小球圆心 O' 和底座圆心 O 在同一水平高度上，且 $M=3m$，当小球到达底座最低点时，底座运动的位移大小是 (　　)



A. $\frac{1}{6}R$　B. $\frac{1}{4}R$　C. $\frac{1}{3}R$　D. $\frac{1}{2}R$

【答案】A

18. (多选)如图所示，质量 $M=2$ kg 的滑块在光滑的水平轨道上，质量 $m=1$ kg 的小球通过长 $L=0.5$ m 的轻质细杆与滑块上的光滑轴 O 连接，小球和轻杆可在竖直平面内绕 O 轴自由转动，滑块可以在光滑的水平轨道上自由运动，开始轻杆处于水平状态。现给小球一个竖直向上的初速度，大小为 $v_0=4$ m/s，则下列说法正确的是(　　)



A. 当小球通过最高点时滑块的位移大小是 $\frac{1}{3}$ m

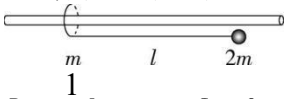
B. 当小球通过最高点时滑块的位移大小是 $\frac{1}{6}$ m

C. 当小球击中滑块右侧轨道位置时，与小球起始位置间的距离为 $\frac{1}{3}$ m

D. 当小球击中滑块右侧轨道位置时，与小球起始位置间的距离为 $\frac{2}{3}$ m

【答案】BD

19. 长为 L 的轻绳，一端与质量为 m、套在水平光滑横杆上的圆环相连，另一端连接一质量为 $2m$ 的小球，开始时，将小球移至横杆处(轻绳处于水平伸直状态，见图)，然后轻轻放手，当轻绳与横杆成直角时，圆环的位移是 x，则　　(　　)



A. $x=\frac{2}{3}$L　B. $x=\frac{1}{2}$L　C. $x=0$　D. $x=\frac{1}{3}$L

【答案】A

第二章　机械振动

第一部分　基础知识点

第 1 节　简谐运动

一、弹簧振子

1.机械振动

(1)定义：我们把物体或物体的一部分在一个位置附近的往复运动称为机械振动，简称振动。

(2)特征

①有一个“中心位置”，即平衡位置，也是振动物体原来静止时的位置。

②运动具有往复性，即周期性。

(3)振动条件：每当物体离开平衡位置后，它就受到一个指向平衡位置的力，该力产生使物体回到平衡位置的效果。

【注意】（1）做机械振动的物体的轨迹可以是直线，也可以是曲线。

（2）物体所受合力不是恒定的，而是变化的。

2. 弹簧振子

(1)构造：弹簧振子是由小球和弹簧所组成的系统，是一种理想化模型。弹簧质量与小球相比可忽略，小球可视为质点。



弹簧振子不一定水平放置

(2)平衡位置：水平的弹簧振子，弹簧未形变时，小球所受合力为 0，处于平衡位置。

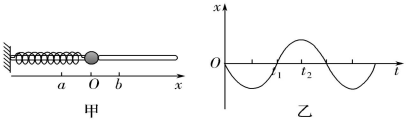
①平衡位置的判断方法：振动系统不振动时，振子静止时所处的位置为平衡位置。

②弹簧振子的平衡位置不一定在弹簧的原长位置。如竖直的弹簧振子，其平衡位置在弹力和重力的合力为 0 的位置，此时弹簧的伸长量 $x=\frac{mg}{k}$。



二、简谐运动

(1)定义：如果物体的位移与时间的关系遵从正弦函数的规律，即它的振动图像(x-t 图像)是一条正弦曲线，这样的振动叫简谐运动。



(2)特点

①简谐运动是最基本、最简单的振动。弹簧振子的运动就是简谐运动。

②简谐运动的位移随时间按正弦规律变化，所以它不是匀变速运动，应为变力作用下的变加速运动。

⚠ 提醒

(1)振动位移是从平衡位置指向振子所在位置的有向线段，方向为平衡位置指向振子所在位置，大小为平衡位置到该位置的距离。

(2)振动位移是矢量，规定振动质点在平衡位置右侧时位移为正，在平衡位置左侧时为负。

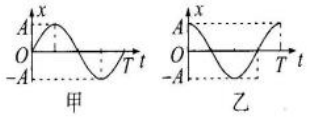
第 2 节　简谐运动的描述

一、简谐运动的概念和特点

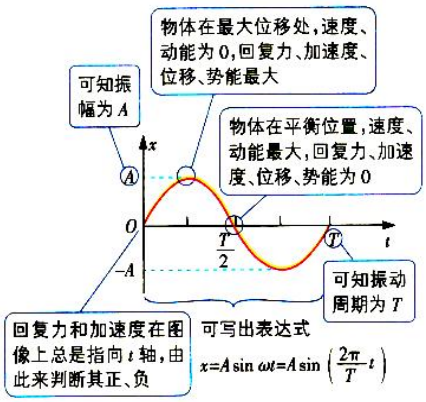
定义	质点的位移与时间遵从正弦函数的规律，即振动图像（$x-t$ 图像）是一条正弦曲线，这样的振动叫作简谐振动
位移表达式	$x=A\sin(\omega t+\varphi_0)$ A 代表振幅，$\omega=2\pi f$ 代表运动快慢，$\omega t+\varphi_0$ 代表相位，φ_0 叫作初相

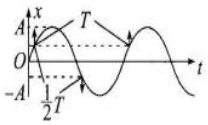
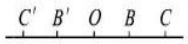
动力学特征	$F=-kx$，其中“$-$”表示回复力与位移的方向相反
运动学特征	$a=-\dfrac{k}{m}x$
能量特征	①振幅越大，系统能量越大 ②在运动过程中，动能和势能相互转化，系统的机械能守恒
周期性特征	①相隔 T 或 nT 的两个时刻的振动物体处于同一位置且振动状态相同； ②物体在一个周期内运动的路程一定为 $4A$ ③半个周期内运动的路程一定为 $2A$

④振动物体在 $\dfrac{T}{4}$ 内的路程可能等于 A、大于 A 或小于 A

振动图像	①从平衡位置开始计时，位移函数表达式为 $x=A\sin\omega t$，图像如图甲所示  甲　乙 ②从最大位移处开始计时，函数表达式为 $x=A\cos\omega t$，图像如图乙所示
图像意义	描述质点的位移与时间的规律 （不是质点的运动轨迹）
图像信息	①振幅 A、周期 T、各时刻质点的位置 ②各时刻回复力、加速度、速度、位移的方向 a)曲线切线的斜率为正，速度方向为正；斜率为负，速度方向为负 b)曲线切线的斜率的绝对值表示该时刻的速度大小 ③某段时间内位移、回复力、加速度、速度、动能、势能的变化情况

(4)任意时刻物体的速度、加速度、位移、回复力、能量的变化情况。

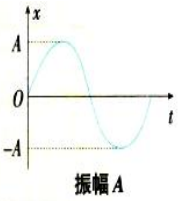


对称规律	①相隔 $\Delta t=\left(n+\dfrac{1}{2}\right)T(n=0,1,2,\cdots)$ 的两个时刻，弹簧振子的位置关于平衡位置对称，位移等大反向，速度也等大反向  ②相隔 $\Delta t=nT(n=1,2,3,\cdots)$ 的两个时刻，弹簧振子在同一位置，位移和速度都相同 ③振动物体来回通过相同两点间的时间相等，如 $t_{BC}=t_{CB}$；振动物体经过关于平衡位置对称的等长的两线段的时间相等，如 $t_{BC}=t_{B'C'}$，如图所示 

二、描述简谐运动的物理量

1.振幅

(1)**定义**：振动物体离开平衡位置的最大距离叫振幅，用 A 表示。振动物体运动的范围是振幅的 2 倍。



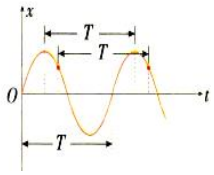
(2)**单位**：在国际单位制中，振幅的单位是米(m)。

(3)**物理意义**：振幅是表示振动强弱的物理量。同一振动系统，振幅越大，振动越强。

2. 周期和频率

(1)**全振动**：振动物体完成一个完整的振动过程称为一次全振动。一个完整的振动过程指终点和起点的位移和速度的大小和方向都相同。

(2)**周期**：做简谐运动的物体完成一次全振动所需要的时间，用 T 表示。



不论以哪个位置作为研究起点，做简谐运动的物体完成一次全振动的时间都是 T。

(3)频率：单位时间内完成全振动的次数，叫振动的频率，用 f 表示。

(4)周期与频率的关系：$f=\frac{1}{T}$。

(5)单位：在国际单位制中，周期的单位是秒(s)；频率的单位是赫兹，简称赫，符号是 Hz。1 Hz=1 s^{-1}。

(6)物理意义：周期和频率都是表示物体振动快慢的物理量，周期越小，频率越大，表示振动越快。

(7)圆频率：$\omega=\frac{2\pi}{T}=2\pi f$。

【点拨】简谐运动的周期和频率由振动系统决定，与其振幅无关，因此称为固有周期和固有频率。

3. 相位和相位差

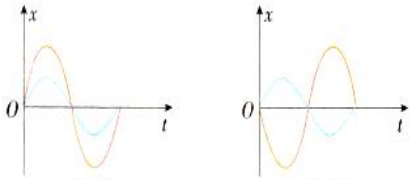
(1)相位：$(\omega t+\varphi)$代表了做简谐运动的物体此时正处于一个运动周期中的哪个状态。物理学中把$(\omega t+\varphi)$叫相位。

(2)初相位：φ 是 $t=0$ 时的相位，称为初相位或初相。

(3)特点：相位是一个随时间变化的量，它的值相当于角度，单位是弧度。

(4)相位差：两个简谐运动的相位之差。设两个频率相同的简谐运动的表达式分别为 $x_1=A_1\sin(\omega t+\varphi_1)$，$x_2=A_2\sin(\omega t+\varphi_2)$，则相位差 $\Delta\varphi=(\omega t+\varphi_1)-(\omega t+\varphi_2)=\varphi_1-\varphi_2$。

(5)同频率的两简谐运动作比较时，相位差的取值范围 $-\pi\leqslant\Delta\varphi\leqslant\pi$。当 $\Delta\varphi=0$ 时，两运动步调完全相同，称为同相；当 $\Delta\varphi=\pi$(或$-\pi$)时，两运动步调相反，称为反相。



同相　　反相

【点拨】(1)频率相同的两简谐运动有确定的相位差，即初相位之差。

(2)计算相位差时，要用同种函数(同为正弦或同为余弦)表示振动方程。

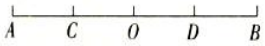
三、简谐运动的周期性和对称性

1.周期性

做简谐运动的物体经过一个周期或几个周期后，能回到原来的状态，因此在处理实际问题时，要注意到多解的可能性。

2. 对称性

如图所示，物体在 A 与 B 间做简谐运动，O 点为平衡位置，C 和 D 两点关于 O 点对称。



(1)时间的对称性

①物体来回通过相同的两点所用的时间相等，如 $t_{OC}=t_{CO}$，$t_{DC}=t_{CD}$。

②物体经过关于平衡位置对称的等长的两段距离的时间相等，如 $t_{OC}=t_{DO}$，$t_{OA}=t_{BO}$。

(2)速度的对称性

①物体连续两次经过同一点的速度大小相等、方向相反。

②物体经过关于 O 点对称的两点(如图中 C 点与 D 点)的速度大小相等，方向可能相同，也可能相反。

(3)位移和加速度的对称性

①物体经过同一点时，位移和加速度均相同。

②物体经过关于 O 点对称的两点(如图中 C 点与 D 点)时，位移与加速度均大小相等、方向相反。

第 3 节　简谐运动的回复力和能量

一、简谐运动的回复力

1.回复力

(1)定义：振动物体偏离平衡位置后使它回到平衡位置的力叫回复力。

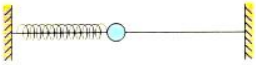
(2)表达式：$F=-kx$。

①负号表示回复力的方向与位移方向始终相反。

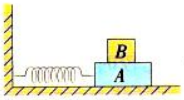
②回复力的大小与位移的大小成正比。

(3)理解

①回复力是根据力的效果命名的，它可以是一个力，也可以是几个力的合力，还可以由某个力的分力提供。对振动物体进行受力分析时，切忌添加回复力。


水平方向的弹簧振子，弹簧弹力充当回复力。


竖直方向的弹簧振子，弹簧弹力和重力的合力充当回复力。



B 随 A 一起振动，B 所受的静摩擦力充当 B 的回复力。

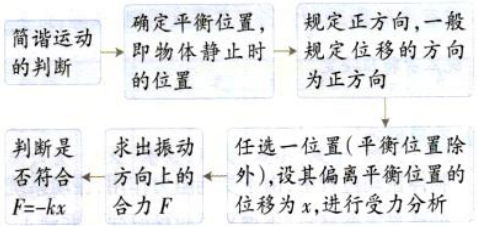
②$F=-kx$ 中的 k 是个比例系数，是由振动系统本身决定的，不一定是弹簧的劲度系数。

2. 简谐运动的判断方法

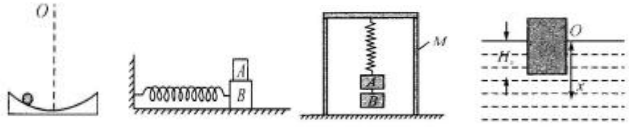
(1)运动学方法：若物体的位移与时间的关系遵从正弦函数的规律，即它的振动图像($x-t$ 图像)是正弦曲线，则物体的运动是简谐运动。

(2)动力学方法：找出回复力 F 和位移 x 的关系，若满足 $F=-kx$ 或 $a=-\frac{k}{m}x$，就可判定物体的运动是简谐运动。

（3）判断物体是否做简谐运动的思路：



【典例】



（4）简谐运动中各物理量的变化规律

项目	x	F	a	v	E_k	E_p	E
远离平衡位置运动	增大	增大	增大	减小	减小	增大	不变
最大位移处	最大	最大	最大	0	0	最大	不变
靠近平衡位置运动	减小	减小	减小	增大	增大	减小	不变
平衡位置	0	0	0	最大	最大	0	不变

二、简谐运动的能量

在简谐运动中，振动系统的机械能守恒，而在实际运动中都有一定的能量损耗，因此简谐运动是一种理想化的模型。

【拓展】(1)做简谐运动的物体的能量跟振幅有关，同一振动系统振幅越大，振动的能量越大。

(2)做简谐运动的物体，在振动过程中只有动能和势能的相互转化，机械能守恒。

(3)在一个周期内，动能和势能完成两次周期性变化。

第 4 节　单摆

一、单摆的回复力

1.单摆

(1)**定义**：将一小球用细线悬挂起来，如果细线的长度不可改变，细线的质量与小球相比可以忽略，小球的大小可以忽略，受到的空气阻力可以忽略，这样的装置叫单摆。



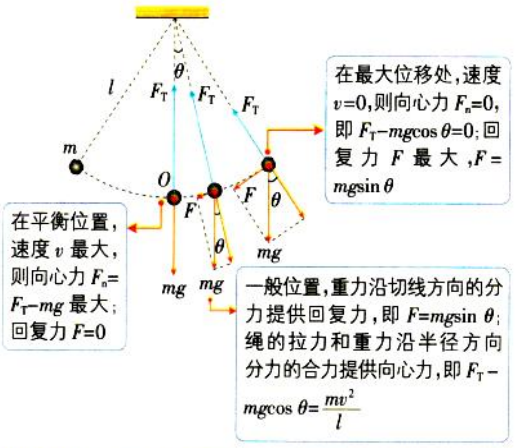
(2)单摆是实际摆的理想化模型。

2. 单摆的回复力

(1)**摆球的受力情况**：摆球受重力 G 和摆线的拉力 F_T 的作用。

(2)**单摆的回复力**：摆球重力 G 沿圆弧切线方向的分力 $F=mg\sin\theta$ 充当回复力（或者说摆球所受合力沿圆弧切线方向的分力充当回复力），使摆球回到平衡位置 O。

(3)摆球摆动过程中的动力学分析

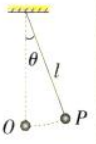


【点拨】结合单摆在平衡位置的受力情况，可以看出，平衡位置并不是运动过程中的受力平衡位置，而是系统不振动时物体能够静止的位置，也是系统振动时物体速度最大的位置。

3. 单摆做简谐运动的条件

当摆角 θ 很小时（$\theta<5°$），摆球运动的圆弧可看成直线；可认为 F 指向平衡位置 O，与位移 x 反向；圆弧 $\overset{\frown}{OP}$ 的长度可认为与摆球的位移 x 大小相等，则 $\sin\theta\approx\theta=\frac{\overset{\frown}{OP}}{l}\approx\frac{x}{l}$，因此单摆振动的回复力为 $F=-\frac{mg}{l}x=-kx$。可见，单摆在摆角很小的情况下做简谐运动。

【拓展】角 θ 用弧度表示时，$\theta=\frac{\text{弧长}}{\text{半径}}$，即 $\theta=\frac{\overset{\frown}{OP}}{l}$。当摆角 θ 很小时，$\sin\theta\approx\theta$（用弧度表示）。



二、单摆的周期

(1)公式：$T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$。

①荷兰物理学家惠更斯首先发现，单摆做简谐运动的周期 T 与摆长 l 的二次方根成正比，与重力加速度 g 的二次方根成反比。

②单摆的周期与振幅、摆球质量无关。

(2)应用

①利用单摆的等时性制造摆钟：周期 $T=2$ s 的单摆为秒摆，由 $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$，得 $l=\frac{gT^2}{4\pi^2}$，若 g 取 9.8 m/s²，则秒摆的摆长 l 约为 1 m。

②利用单摆测量重力加速度：$T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 变形可得 $g=\frac{4\pi^2l}{T^2}$。

（3）周期公式 $T=2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ 的几点说明

①单摆的周期公式在单摆偏角很小(θ≤5°)时成立。

②公式中 L 是摆长，即悬点到摆球球心的距离 $L=L_{线}+r_{球}$。

③公式中 g 是单摆所在地的重力加速度，由单摆所在的空间位置

决定。

④周期 T 只与 L 和 g 有关，与摆球质量 m、振幅无关。所以单摆的周期也叫固有周期。

（4）变形单摆（类单摆）的周期

1.等效摆长“L”

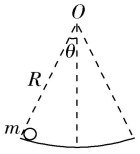
①无线摆：如图甲所示，小球在光滑的圆弧上做类单摆运动($\theta \leqslant 5°$)，其周期公式 $T=2\pi\sqrt{\frac{R}{g}}$。

②组合摆（如图乙所示）：$T=\pi\left(\sqrt{\frac{L}{g}}+\sqrt{\frac{L}{2g}}\right)$；

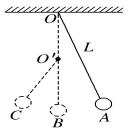
③双线摆 $T=2\pi\sqrt{\frac{l\sin\alpha}{g}}$（如图丙所示）

④三线摆（如图丁所示）：前后摆动时 $T=2\pi\sqrt{\frac{l(\sin\alpha+1)}{g}}$

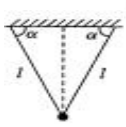
左右摆动时 $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$



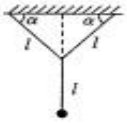
图甲



图乙



图丙



图丁

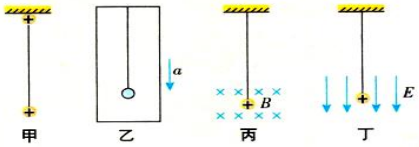
2. 等效重力加速度 g'

g'不一定等于 9.8 m/s²，g'由单摆所在的空间位置以及系统的运动状态决定。如单摆处在有加速度的升降机中时，重力加速度的等效值 g'等于摆球相对系统静止在平衡位置时，摆线所受的拉力与摆球质量的比值，即 $g'=\frac{F}{m}$。

⚠ 提醒

如果摆球除受重力和拉力外还受到其他力，但其他力只沿半径方向，而沿振动方向无分力，在这种情况下，单摆振动周期并不受影响。如摆球带电，再在悬点处固定一带电小球，两球之间的静电力始终沿半径方向，不引起回复力的变化，单摆的等效重力加速度仍然等于当地的重力加速度。

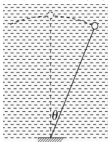
【典例】如图所示，单摆甲放在空气中，悬点处固定一带正电小球，摆球亦带正电，周期为 $T_{甲}$；单摆乙放在以加速度 a 向下加速运动的电梯中，周期为 $T_{乙}$；单摆丙带正电，放在匀强磁场 B 中，周期为 $T_{丙}$；单摆丁带正电，放在匀强电场 E 中，周期为 $T_{丁}$。若四个单摆摆长均相等，那么(　　)。



【答案】$T_{乙}>T_{甲}=T_{丙}>T_{丁}$

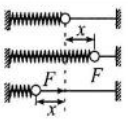
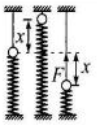
【点拨】首先判断除了重力之外的力是否影响回复力，然后再根据等效重力加速度的计算方法，求出 g'的值。

【变式】 如图所示，将密度为 ρ（小于水的密度 $\rho_{水}$）的小球用长为 L 的细线拴住并固定在装满水的容器底部，忽略阻力，将小球拉至与竖直方向成一小角度后释放，小球做简谐运动，重力加速度取 g，小球做简谐运动的周期可能为(　　)

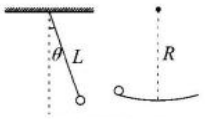


【答案】$2\pi\sqrt{\frac{\rho L}{(\rho_{水}-\rho)g}}$

【总结】两个简谐振动的比较

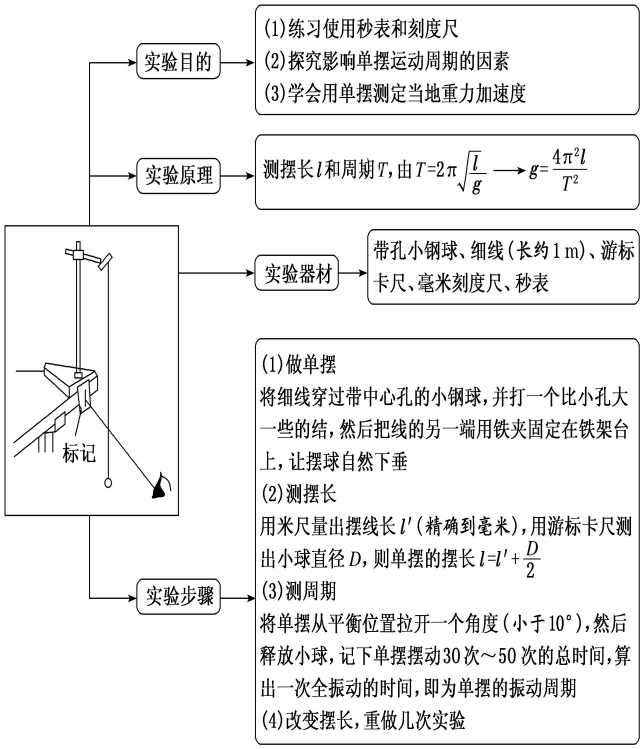
模型	弹簧振子	
示意图		
简谐运动条件	①弹簧质量忽略不计 ②无摩擦等阻力 ③在弹簧弹性限度内	
回复力	弹簧弹力提供	弹力与重力的合力提供
平衡位置	弹簧原长处	$kx=mg$ 处
周期	$T=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$（与振幅无关） ①m 为振子的质量 ②k 为弹簧的劲度系数	
能量转化	弹性势能与动能的相互转化，系统机械能守恒	弹性势能、重力势能与动能的相互转化，系统机械能守恒

【备注：弹簧振子的周期公式与弹簧振子的平放、竖放无关】

模型	单摆
示意图	
简谐运动条件	①摆线为不可伸缩的轻细线 ②无空气阻力等 ③最大摆角小于等于 5°
回复力	摆球重力沿与摆线垂直方向（即切向）的分力 回复力： $F_{回}=-mg\sin\theta=-\frac{mg}{L}x=-kx$ 负号表示回复力 $F_{回}$ 与位移 x 的方向相反
平衡位置	最低点
振幅	$A=L\theta$（当 $\theta\leqslant 5°$ 时，$\sin\theta\approx\theta$）
周期	$T=2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$（惠更斯发现） ①L 为等效摆长，表示从悬点到摆球重心的距离 ②g 为当地重力加速度
能量转化	重力势能与动能相互转化，单摆球机械能守恒

第 5 节 实验：探究单摆周期与摆长的关系

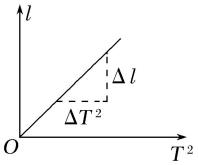
1.实验原理及操作



2.数据处理与分析

①公式法：改变摆长，测出各次 T 的值，代入公式 $g=\frac{4\pi^2 l}{T^2}$ 求出重力加速度 g_1、g_2、g_3，最后求 g 的平均值。

②图像法：测出一系列摆长 L 及对应的周期 T，画出 T^2-L 图像，$T^2=kL$，斜率为 k，$g=\frac{4\pi^2}{k}$。



3.误差分析

	产生原因	减小方法
偶然误差	测量时间(单摆周期)及摆长时产生误差	①多次测量再求平均值 ②计时从单摆经过平衡位置时开始
系统误差	主要来源于单摆模型本身	①摆球要选体积小、密度大的 ②最大摆角要小于 10^0

4.注意事项

(1)选用 1 m 左右的细线。

(2)悬线顶端不能晃动，需用夹子夹住，保证顶点固定。

(3)小球在同一竖直面内摆动，且摆角小于 5^0。

(4)选择在摆球摆到平衡位置处开始计时，并数准全振动的次数。

(5)小球自然下垂时，用毫米刻度尺量出悬线长 l′，用游标卡尺测量小球的直径，然后算出摆球的半径 r，则摆长 $L=l'+r$。

5.测周期的方法

(1)要从摆球过平衡位置时开始计时。因为此处速度大、计时误差小，而最高点速度小、计时误差大。

(2)要测多次全振动的时间来计算周期。如在摆球平衡位置时开始计时，且在数“零”的同时按下秒表，以后每当摆球从同一方向通过平衡位置时计数 1 次。

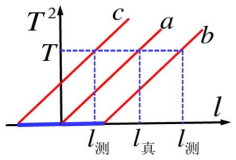


【秒表的精确度为 0.1s，不估读】读法：大盘读数+小盘读数

6.误差分析--------同周期下画线法。

(1)T^2-l

$T^2=\frac{4\pi^2}{g}l$



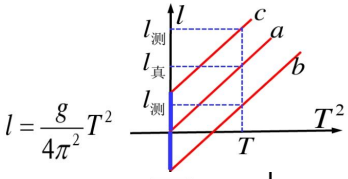
a 图为正常情况下的图像。

***b*多测半径：**$T=2\pi\sqrt{\frac{l-r}{g}}\Rightarrow T^2=\frac{4\pi^2}{g}l-\frac{4\pi^2}{g}r\quad T=0,r=l$

***c*少测半径：**$T=2\pi\sqrt{\frac{l+r}{g}}\Rightarrow T^2=\frac{4\pi^2}{g}l+\frac{4\pi^2}{g}r\quad T=0,r=-l$

【规律】多测半径或少测半径，利用斜率来计算 g,不影响结果。

（2）$l-T^2$ 图

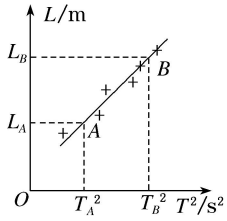


***c*多测半径：**$T=2\pi\sqrt{\frac{l-r}{g}}\Rightarrow l=\frac{g}{4\pi^2}T^2+r\quad T=0,r=l$

***b*少测半径：**$T=2\pi\sqrt{\frac{l+r}{g}}\Rightarrow l=\frac{g}{4\pi^2}T^2-r\quad T=0,r=-l$

【规律】多测半径或少测半径，利用斜率来计算 g,不影响结果。

（3）若小球半径未知（或漏测），利用斜率计算不影响结果。



【结果】$g=\frac{4\pi^2(L_B-L_A)}{T_B^2-T_A^2}$。

第 6 节 受迫振动 共振

一、振动中的能量损失

1. 固有周期和固有频率

(1)定义：系统在没有外力干预的情况下做简谐运动，周期或频率与振幅无关，仅由系统自身的性质决定，我们把这种振动称为固有振动，其振动频率称为固有频率。

(2)固有周期和频率由系统本身的特征决定，与振幅大小无关。

【拓展】单摆的固有周期 $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$，弹簧振子的固有周期 $T=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$，可见固有周期(频率)由系统本身特征决定。

2. 阻尼振动

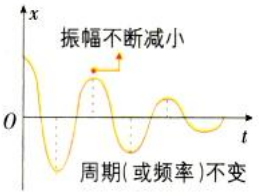
物体振动过程中，由于受到阻力作用，振动系统的能量逐渐减小，表现为振幅随时间逐渐减小，这样的振动称为阻尼振动。

注意：阻尼运动不是简谐运动，振幅与周期都是发生变化的. 由于阻尼的作用，振动系统的能量逐渐转变为内能.

【拓展】振动系统能量衰减的两种方式

(1)一种是由于振动系统受到摩擦阻力的作用，使振动系统的机械能逐渐转化为内能。例如，单摆运动时受到空气的阻力。

(2)另一种是由于振动系统引起邻近介质中各质点的振动，使能量向四周辐射出去，从而自身机械能减少。例如，音叉发声时，一部分机械能随声波辐射到周围空间，导致音叉振幅减小。



阻尼振动图像

二、受迫振动及共振

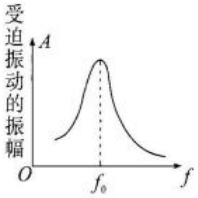
受迫振动：系统在外界周期性变化的驱动力作用下做的振动叫受迫振动.

系统做受迫振动时，振动稳定后的频率等于驱动力的频率，跟系统的固有频率无关.

受迫振动的周期或频率：$T=T_{驱}$、$f=f_{驱}$.

共振：驱动力的频率跟系统的固有频率相等时，受迫振动的振幅最大的现象叫共振.

受迫振动的振幅的影响因素：如图所示的为共振曲线，图中 f_0 表示固有频率，通过共振曲线直观地反映系统做受迫振动的振幅 A 与驱动力频率 f 的关系.



当驱动力的频率 f 偏离固有频率 f_0 较大时，受迫振动的振幅 A 较小；

当驱动力的频率 f 等于固有频率 f_0 时，受迫振动的振幅 A 最大.

受迫振动中系统能量的转化：做受迫振动的系统的机械能不守恒，系统与外界时刻进行能量交换.

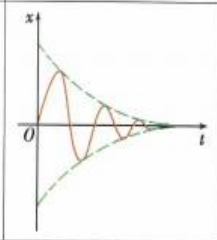
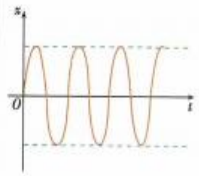
(3)共振的利用与防止

①在需要利用共振时，应使驱动力的频率尽可能接近物体的固有频率。

②在需要防止共振时，驱动力的频率与物体的固有频率相差越大越好。

【小结】

（1）阻尼振动与无阻尼振动

	阻尼振动	无阻尼振动
概念	阻尼振动亦称减幅振动，是指振动物体克服摩擦和其他阻力做了功，它自己的能量逐渐减小，振幅也随着变小。振幅逐渐减小的振动叫阻尼振动	无阻尼振动亦称等幅振动，一般是指振动物体从外界取得能量，恰好补偿了它的能量损耗，这时它的振幅将保持不变，这种振幅不变的振动叫无阻尼振动
振动图像		
受力及能量	受到阻力作用，即有阻尼。振动物体的能量逐渐减小	不一定是不受阻力，一般情况是物体从外界获得的能量恰好补充了能量的损失

（2)自由振动、受迫振动和共振的关系比较

	自由振动	受迫振动	共振
受力情况	仅受回复力	受驱动力作用	受驱动力作用
振动周期或频率	由系统本身性质决定，即固有周期 T_0 或固有频率 f_0	由驱动力的周期或频率决定，即 $T=T_{驱}$ 或 $f=f_{驱}$	$T_{驱}=T_0$ 或 $f_{驱}=f_0$
振动能量	振动物体的机械能不变	由产生驱动力的物体提供	振动物体获得的能量最大
常见例子	弹簧振子或单摆($\theta\leqslant5°$)	机械工作时底座发生的振动	共振筛、声音的共鸣等

【记忆口诀】

简谐振动要牢记，0 为起点算位移。
回复力为效果力，方向始终指向 0。
大小正比于位移，平衡位置 v 最大。
0 点对称别忘记，振动强弱是振幅，
振动快慢用周期，全振一次四振幅。
单摆回复重力分，摆角不能大 5 度。
周期公式要牢记，等效摆长加速度。
秒摆周期为 2 秒，摆长约等长 1 米。
振动图像描位移，单调函数表方向。
顶点底点大位移，正负符号方向指。

第二部分 物理方法概述

一、对称法

应用对称性求解某些具体的物理问题，这种思维方法称为对称法。利用对称法分析解决问题，可以避免复杂的数学演算和推导，直接抓住问题的本质，出奇制胜，快速简便地求解问题。

二、图像法

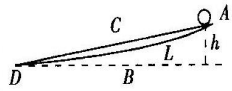
图像法是根据题意把抽象复杂的物理过程有针对性地表示成物理图像，将物理量间的代数关系转换为几何关系，运用图像直观、形象、简明的特点，来分析解决物理问题的方法。由此达到化难为易、化繁为简的目的。

三、整体法-隔离法

①整体法：把几个物体视为一个整体，受力分析时只分析这一整体之外的物体对整体的作用力，不考虑整体内部物体之间的相互作用力。②隔离法：把要分

析的物体从相关的物体系中隔离出来，只分析该物体以外的物体对该物体的作用力，不考虑该物体对其他物体的作用力。

1. 一光滑圆弧面 ABD，两端水平距离为 L，高为 h(L>>h)，D 点与水平面



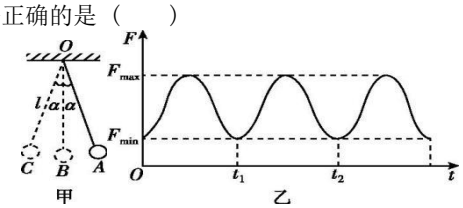
相切，小球从顶端 A 处静止释放，滑到底端 D 的时间为 t_1，若在圆弧面上放一块光滑斜面 ACD，则小球从 A 点静止释放，滑到 D 的时间为 t_2，则 （ ）

A. $t_2=t_1$　　B. $t_2=\sqrt{2}t_1$

C. $t_2=\frac{4}{\pi}t_1$　　D. $t_2=\frac{\sqrt{3}}{\pi}t_1$

【答案】C

2.(多选)某实验小组在研究单摆时改进了实验方案，将一力传感器连接到计算机上.图甲中 O 点为单摆的固定悬点，现将摆球(可视为质点)拉至 A 点，此时细线处于张紧状态.由静止释放摆球，则摆球将在竖直平面内的 A、C 之间来回摆动，其中 B 点为最低位置，$\angle AOB=\angle COB=\alpha$，$\alpha$ 小于 5°且大小未知，同时由计算机得到了摆线对摆球的拉力大小 F 随时间 t 变化的曲线，如图乙所示(图中所标字母均为已知量)，且图中 $t=0$ 时刻为摆球从 A 点开始运动的时刻.已知摆长为 l，重力加速度为 g.根据题中(包括图中)所给的信息，下列说法正确的是 （ ）



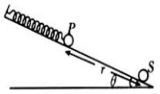
A. 该单摆的周期为 t_2　　B. 可求出摆球的质量

C. 不能求出摆球在最低点 B 时的速度大小

D. 若在地球的两极做该实验，则测得单摆的周期最大

【答案】AB

3. 如图所示，倾角为 θ 的光滑绝缘斜面顶端固定一劲度系数为 k_1 的绝缘轻质弹簧，弹簧另外一端连接一质量为 m，带电量为 $+Q$ 的小球 P(视为质点)，斜面底端固定一带电小球 S，带电量为 $-q$，当小球 P 静止时，两者相距 r。现突然将小球 S 移走，小球 P 做简谐运动，已知静电力常量为 k，弹簧的原长为 x_0，则



第 13 题图

A. 小球 P 回复力满足 $F_{回}=-kx$，式中 k 为静电力常量

B. 小球 P 做简谐运动的振幅为 $\frac{kQq}{k_1r^2}$

C. 简谐运动平衡位置距离斜面顶端 $\frac{mg\sin\theta}{k_1}+\frac{kQq}{k_1r^2}+x_0$

D. 若不撤去小球 S，给小球 P 沿斜面向下的初速度，小球 P 仍做简谐运动

【答案】B

第三章　机械波

第一部分　基础知识点

第一节　波的形成

一、波的形成

1. 波的形成

（1）波动：振动的传播称为波动，简称波。

（2）介质：绳、弹簧、水、空气等是节以传播的物质。

2. 机械波

机械振动在介质中传播，就形成了机械波。



【拓展】组成介质的质点之间有相互作用，一个质点的振动会引起相邻质点的振动。各质点做受迫振动，振动的周期(或频率)与波源的周期(或频率)相同。

3. 机械波的形成条件

(1)波源和介质，即机械波不能在真空中传播。

(2)有波源和有介质是形成机械波的必要条件，二者缺一不可，有振动不一定有机械波，有机械波一定有振动。

二、横波和纵波

分类	横波	纵波
定义	质点的振动方向与波的传播方向相互垂直的波	质点的振动方向与波的传播方向在同一直线上的波
特征	波峰：凸起的最高处 波谷：凹下的最低处	密部：分布最密的位置 疏部：分布最疏的位置
波形	绳上形成横波 波峰 波谷	弹簧上形成纵波 疏部　密部　疏部
介质	只能在固体介质中传播	在固体、液体和气体介质中传播
典型波样	水波与绳波	声波
	地震波(建筑物上下、左右摆动)	

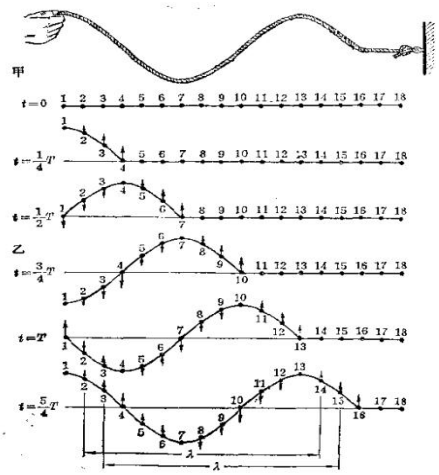
【特别说明】

固体有切变弹性，所以在固体中能传播横波，纵波在固体、液体和气体中都可以传播。纵波和横波的传播速度，都随着所通过物质的性质而变化。液体表面形成的水波是由于重力和表面张力作用而形成的。表面每个质点振动的方向又不和波的传播方向保持垂直，严格说，在水表面的水波并不属于横波的范畴，因为水波与地震波都是既有横波又有纵波的复杂类型的机械波。

【点拨】横波的传播方向不一定在水平方向，振动方向也不一定在竖直方向，只是传播方向和振动方向垂直；纵波的传播方向和振动方向不一定都在竖直方向，只是两者共线。

三、机械波(以横波为例)

波源带动相邻质点振动，前面的质点(离波源较近的质点)带动后面的质点振动，后面的质点重复前面质点的振动，并滞后于前面质点的振动，由此形成凹凸(或疏密)相间的机械波。机械波的产生过程如图所示：



1. 机械波的特点

(1)各质点的振动周期都与波源的振动周期相同。

(2)各质点的起振方向与波源起振方向相同。离波源越远，质点的振动越滞后。

(3)机械波传播的是振动的形式，介质中的每个质点只在自己的平衡位置附近振动，质点并不随波迁移。

(4)波是传递能量的一种方式。波在传播“振动”这种运动形式的同时，也将波源的能量传递出去。

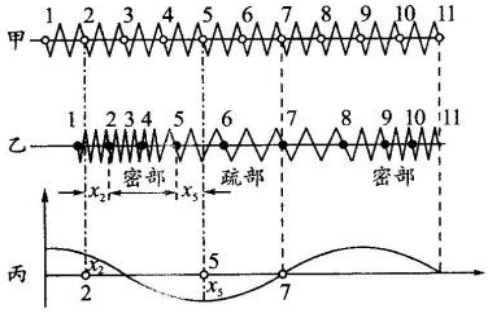
(5)波还可以传递信息。我们用语言交流，就是利用声波传递信息。

⚠ 提醒

(1)波的传播可以脱离波源的振动而独立存在，也就是说，机械波一旦形成，运动形式和能量就会向外传播，即使波源的振动停止，波也不会停止传播。

(2)在同一种均匀介质中，机械波的传播是匀速的。

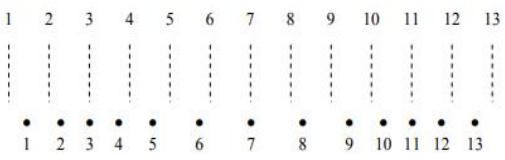
2.横波和纵波的对应关系



【规律】密部和疏部都对应横波的平衡位置

3.判断纵波中各质点的运动方向的方法：

沿波的传播方向密部和疏部向前推进，且密部和疏部对应横波中的平衡位置。例：



【由于波向右传播，波形平移，8 在靠近平衡位置，向左运动，10 在远离平衡位置，向右运动】

第二节　波的描述

一、波的图像

1. 定义

用横坐标 x 表示在波的传播方向上各质点的平衡位置，纵坐标 y 表示某一时刻各质点偏离平衡位置的位移，规定质点振动的某一个方向为 y 轴正方向，由此得到的图像就是这一时刻波的图像。波的图像有时也称为波形图。

2. 物理意义

波的图像描述某一时刻，沿波的传播方向的各个质点离开平衡位置的位移。

3. 简谐波

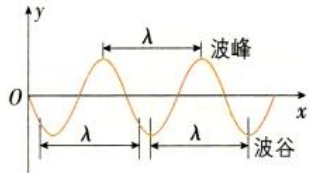
如果波的图像是正弦曲线，这样的波叫正弦波，也叫简谐波。

二、波速、波长和频率

1.波长

(1)**定义**：在波的传播方向上，振动相位总是相同的两个相邻质点间的距离叫波长，通常用 λ 表示。“振动相位总是相同”“相邻”两者缺一不可。

(2)在横波中，两个相邻波峰或两个相邻波谷之间的距离等于波长。



(3)在纵波中，两个相邻密部或两个相邻疏部之间的距离等于波长。

2. 周期和频率

(1)在波动中，各个质点的振动周期或频率是相同的，它们都等于波源的振动周期或频率，这个周期或频率也叫波的周期或频率。

(2)同一列波从一种介质进入另一种介质时，波的频率不变。

(3)波的周期和频率由波源决定，与介质无关。

3. 时空关系

经过一个周期 T，波在介质中传播的距离等于一个波长 λ。

4. 波速

(1)**定义**：波在介质中传播的速度叫波速。

(2)波长 λ、波速 v 和频率 f（周期 T）的关系是 $v=\frac{\lambda}{T}=\lambda f$。

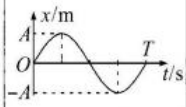
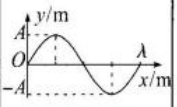
(3)机械波在介质中的传播速度由介质本身的性质决定，与波的频率、质点振动的振幅无关。不同频率的同一类机械波在相同介质中的传播速度相等。在不同的介质中，波速是不同的。另外，波速还与温度有关。

【点拨】波速与质点振动速度是两个不同的物理量：波速是振动形式由近及远的传播速度，在同种均匀介质中不变；振动速度是质点在平衡位置附近振动时的速度，是周期性变化的。

【说明】同种介质中，纵波波速大于横波波速。

5. 振动图像与波动图像

振动图像与波动图像的比较

图像类型	振动图像	波动图像
图像		
研究对象	一振动质点	沿传播方向上的所有质点
研究内容	一质点的位移随时间的变化规律	某时刻所有质点的空间分布规律
物理意义	表示同一质点在各时刻的位移	表示某时刻各质点的位移
图像信息	①质点振动周期 ②质点振幅 ③质点各时刻的位移 ④各时刻速度、加速度的方向	①波长、振幅 ②任意一质点在该时刻的位移 ③任意一质点在该时刻的加速度方向 ④传播方向、振动方向的互判
联系	①质点完成一次全振动，机械波传播一个波长 ②$T_{振动}=T_{波}$，$f_{振动}=f_{波}$ ③振动速度与波动速度是两个不同的物理量	
图像变化	随时间推移，图像延续，但已有形状不变	随时间推移，已有波形沿传播方向平移
一完整曲线占横坐标的距离	表示一个周期	表示一个波长

第二部分 方法、规律与技巧

一、波传播过程中的特点

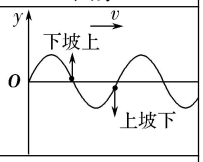
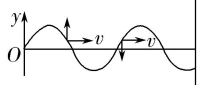
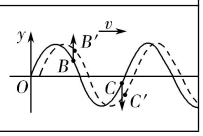
1.振源经过一个周期 T 完成一次全振动，波恰好向前传播一个波长的距离，所以有 $v=\frac{\lambda}{T}=\lambda f$。

2.质点振动 nT(波传播 nλ)时，波形不变。

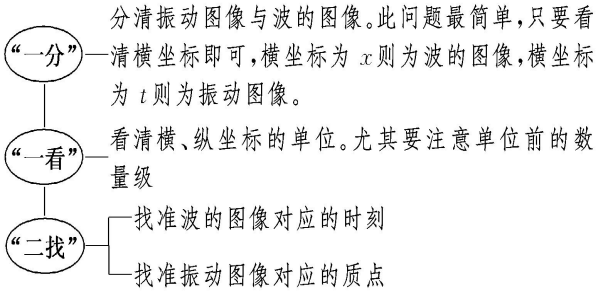
3.在波的传播方向上，当两质点平衡位置间的距离为 nλ(n=1，2，3…)时，它们的振动步调总相同；当两质点平衡位置间的距离为 $(2n+1)\frac{\lambda}{2}$(n=0，1，2，3…)时，它们的振动步调总相反。

4.波源质点的起振方向决定了它后面的质点的起振方向，各质点的起振方向与波源的起振方向相同。

二、波的传播方向与质点振动方向的互判方法

方法	内容	图象
“上下坡”法	逆着波的传播方向，“上坡”时质点向上振动，“下坡”时质点向下振动	
“同侧”法	波形图上某点表示传播方向和振动方向的箭头在图线同侧	
“微平移”法	将波形沿传播方向进行微小的平移，再由对应同一 x 坐标的两波形曲线上的点来判断振动方向	

三、波动图象与振动图象综合问题采用“一分、一看、二找”的方法



【特别注意】在求解质点路程时，只有处于波峰、波谷、平衡位置的特殊点的运动路程才满足：四分之一（三）的周期，对应一（三）个振幅。但经历半（整数）个周期，对应 2（4）个振幅对所有点都成立。

四、解决非特殊点的振动问题的方法：

方法 1 平移法：$\Delta x=vt$

方法 2 跟踪法：跟踪特殊质点的运动。

方法 3 函数法（距离或时间与三角函数中的角度相对应）

五、波的多解问题

1.造成波动问题多解的主要因素

(1)周期性

①时间周期性：时间间隔Δt 与周期 T 的关系不明确。

②空间周期性：波传播的距离Δx 与波长λ的关系不明确。

(2)双向性

①传播方向双向性：波的传播方向不确定。

②振动方向双向性：质点振动方向不确定。

2.解决波的多解问题的思路

一般采用从特殊到一般的思维方法，即找出一个周期内满足条件的关系Δt 或Δx，若此关系为时间，则 t=nT+Δt(n=0，1，2，…)；若此关系为距离，则 x=nλ+Δx(n=0，1，2，…)。

第 3 节 波的反射、折射和衍射

一、波的反射和折射

1.波的反射

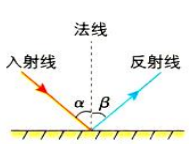
(1)定义：波在传播过程中遇到障碍物会返回来继续传播的现象，叫波的反射。

(2)入射线和反射线

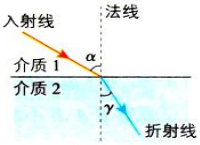
①入射线：代表波的入射方向的射线。

②反射线：代表波的反射方向的射线。

(3)波的反射规律：反射线、法线和入射线在同一平面内，反射线和入射线分居法线两侧，反射角等于入射角。



波的反射



波的折射

2. 波的折射

(1)**定义**:波在传播过程中,从一种介质进入另一种介质时,传播方向会发生偏折的现象叫波的折射。

(2)一切波都会发生折射现象。

【点拨】波反射和折射时的物理量变化

项目	波的反射	波的折射
传播方向	改变	改变
频率 f	不变	不变
波速 v	不变	改变
波长 λ	不变	改变

频率由波源决定。波速由介质本身的性质决定。$\lambda=vT$ 或 $\lambda=\frac{v}{f}$,λ 随 v、f (T)的变化而变化。

二、波的衍射

1.定义

波可以绕过障碍物继续传播,这种现象叫波的衍射。

2. 发生明显衍射现象的条件

(1)产生明显衍射现象,必须具备一定的条件:只有缝、孔的宽度或障碍物的尺寸跟波长相差不多,或者比波长更小时,才能观察到明显的衍射现象。

(2)波长较长的波容易发生明显的衍射现象。一切波都能发生衍射,只是有的现象明显,有的不明显。

3. 一切波都能发生衍射,衍射是波特有的现象。

4. 当孔、缝或障碍物的尺寸远小于波长时,尽管衍射十分突出,但由于衍射波的能量很弱,也很难观察到衍射现象。

【拓展】波传到小孔(障碍物)时,小孔(障碍物)仿佛是一个新的波源,由它发出的与原来同频率的波在小孔(障碍物)后传播,就偏离了直线方向。波的直线传播只是衍射不明显时的近似情况。

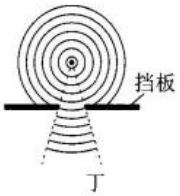
【注意】

障碍物或孔的尺寸大小,并不是决定衍射能否发生的条件,仅是衍射现象是否明显的条件。一般情况下,波长较大的波容易产生显著的衍射现象。

下图为不同缝宽对应的衍射图:图丙衍射明显.



丙



丁

第 4 节　波的干涉

一、波的叠加

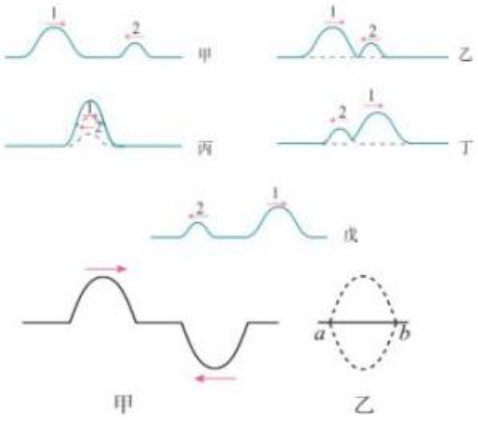
(1)波的叠加原理

几列波相遇时能够保持各自的运动特征,继续传播,在它们重叠的区域里,介质的质点同时参与这几列波引起的振动,质点的位移等于这几列波单独传播时引起的位移的矢量和。

(2)说明

①波的叠加原理说明了两方面内容:一是波的独立传播;二是波相遇时的叠加。

②两列同相波叠加,振动加强,振幅增大;两列反相波叠加,振动减弱,振幅减小。



同相波叠加,振动加强　　**反相波叠加,振动减弱**

【点拨】波的独立传播原理

几列波在同一介质中相遇时,每列波都能保持各自的特征(波长、频率等不变)继续沿着原来的方向向前传播,彼此之间互不影响,好像没有遇到另一列波一样,这就是波的独立性。

【注意】波的叠加与波的频率无关,频率不同的波也可以发生叠加。

二、波的干涉

1.定义:频率相同的两列波叠加,使某些区域的振动加强,某些区域的振动减弱。这种现象叫做波的干涉。

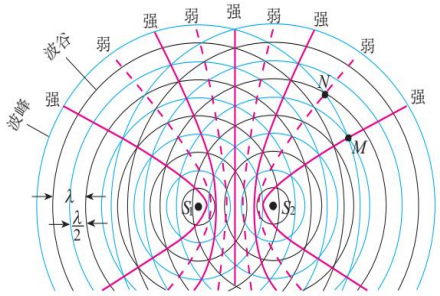
2.产生稳定干涉图样的条件

①产生稳定干涉图样的条件:两列波的频率必须相同;两个波源的相位差必须保持不变;两列波在相遇区域各质点引起的振动方向总是相同。

②明显的干涉图样和稳定的干涉图样意义是不同的。明显的干涉图样除了满足产生稳定的干涉图样的条件外,还必须满足两列波振幅差别不大。振幅越是接近,干涉图样越明显。

3.干涉图样及其特点

(1)干涉图样:如图所示



(2)特点

①加强区和减弱区的位置固定不变。

②加强区始终加强，减弱区始终减弱(加强区与减弱区不随时间变化)

③加强区与减弱区互相间隔

(3)关于**加强点和减弱点的深入理解**

①加强点：振动的振幅等于两列波振幅之和，$A=A_1+A_2$。

②减弱点：振动的振幅等于两列波振幅之差，$A=|A_1-A_2|$。

③若两列波在某处引起的位移方向相同，合位移变大，则此点为加强点（并非永远处于波峰或波谷的位置），相反，若两列波在某处引起的位移方向相反，合位移变小（可以永远处于平衡位置），则此点为减弱点。

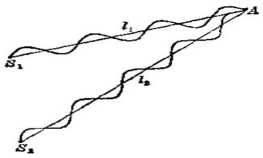
④波峰与波峰(或波谷与波谷)的交点，一定是加强点，而波峰与波谷的交点一定是减弱点。

⑤当两个相干波源的振动步调一致时，到两个波源的距离之差$\Delta s=n\lambda$(n 为整数)处是加强区，$\Delta s=(2n+1)\frac{\lambda}{2}$(n 为整数)处是减弱区。

⑥若振幅变大，则振动加强，若振幅变小，则振动减弱。

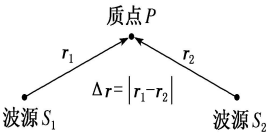
（4）波的干涉现象中振动加强点、减弱点的两种判断方法

①示意图：



②判断方法：

01 **公式法**



当两波源步调一致时，

若$\Delta r=n\lambda$ $(n=0,1,2,\cdots)$，振动加强；

若$\Delta r=\left(n+\frac{1}{2}\right)\lambda$ $(n=0,1,2,\cdots)$，振动减弱。

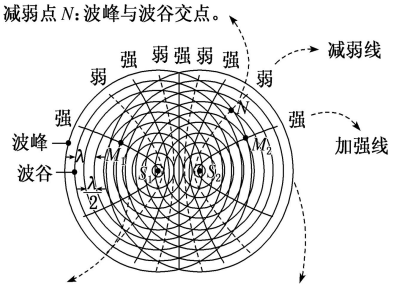
当两波源步调相反时，

若$\Delta r=n\lambda$ $(n=0,1,2,\cdots)$，振动减弱；

若$\Delta r=\left(n+\frac{1}{2}\right)\lambda$ $(n=0,1,2,\cdots)$，振动加强。

02 **波形图法**

减弱点N：波峰与波谷交点。



加强点M_1：波谷与波谷交点。加强点M_2：波峰与波峰交点。

三、波的干涉和衍射的比较

	波的干涉	波的衍射
条件	两列波的频率必须相同	明显条件：障碍物或孔的尺寸比波长小或相差不多
现象	形成加强区和减弱区相互隔开的稳定的干涉图样	波能够绕过障碍物或孔继续向前传播

第 5 节　多普勒效应

一、多普勒效应

1.条件：声源和观察者之间有相对运动。

2.现象：观察者感到频率发生变化。

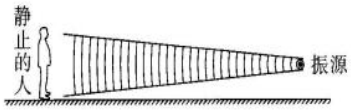
3.实质：声源频率不变，观察者接收到的频率变化。

二、多普勒效应的特点

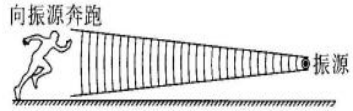
当波源和观察者之间的距离减小时，观察者接收到的频率升高，当波源和观察者之间的距离增大时，观察者接收到的频率降低。

三、对多普勒效应的理解

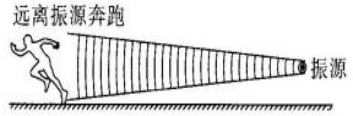
结合图形理解多普勒效应，如图所示.



①假设静止的人 1 s 内接收到 n 个完整的波长，此时测得波的周期 $T=\frac{1}{n}$，频率 $f_{观察}=\frac{1}{T}=n$，由于人与振源相对静止不动，因此 $f_{观察}=f_{振源}$.



②由于人向振源奔跑，1 s 内接收到完整的波长一定大于 n 个，此时测得波的周期 $T<\frac{1}{n}$，频率 $f_{观察}>\frac{1}{T}=n$，因此 $f_{观察}>f_{振源}$，频率变高.



③由于人远离振源奔跑，1 s 内接收到完整的波长一定小于 n 个，此时测得波的周期 $T>\frac{1}{n}$，频率 $f_{观察}<\frac{1}{T}=n$，因此 $f_{观察}<f_{振源}$，频率变低.

[点拨] (1)发生多普勒效应时，波源本身的频率并没有发生改变，只是由于波源和观察者间有相对运动，使观察者接收到的频率发生了变化。

(2)多普勒效应的产生取决于波源相对观察者运动速度的大小和方向，观察者在垂直于波的传播方向移动时，不产生多普勒效应。

四、多普勒效应的计算公式【了解】

(1)波源的频率为 f_0，波速为 v，波源相对于介质静止，观察者以 v_0 相对于介质运动，则多普勒效

应中观察者接收到的频率f'的计算公式为$f'=f_0\left(\frac{v\pm v_0}{v}\right)$。“+”表示观察者靠近波源,“-”表示观察者远离波源。

(2)波源以速度v_S相对于介质运动,观察者相对于介质静止,则有$f'=f_0\left(\frac{v}{v\pm v_S}\right)$。“+”表示波源远离观察者,“-”表示波源向观察者运动。

(3)波源与观察者同时相对于介质运动,相向运动时$f'=f_0\left(\frac{v+v_0}{v-v_S}\right)$;反向运动时$f'=f_0\left(\frac{v-v_0}{v+v_S}\right)$。

五、多普勒效应的应用

(1)超声波测速

交通警察向行进中的车辆发射频率已知的超声波,同时测量反射波的频率,根据反射波频率变化的多少就能知道车辆的速度。

【拓展】频率高于20 000 Hz的声波称为超声波;与能听到的声音相比,超声波有两个特点:一是可以比较容易地产生大功率的声波;二是它几乎沿直线传播。

(2)医用“彩超”

医生向人体内发射频率已知的超声波,超声波被血管中的血流反射后又被仪器接收,测出反射波的频率变化,就能知道血流的速度。

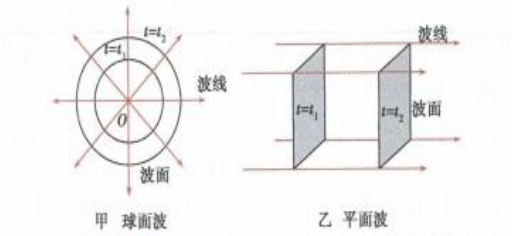
(3)测量星球速度

测量星球上某些元素发出的光波的频率,然后与地球上这些元素静止时发光的频率对照,就可以算出星球靠近或远离我们的速度。

六、惠更斯原理【了解】

1.波面:波源引起的振动在介质中向各个方向传播,如果把某一时刻振动状态相同的点连接起来组成一个面,这个面就叫波面或波阵面。

2.波线:用来表示波的传播方向,在各向同性介质中波线与波面垂直。

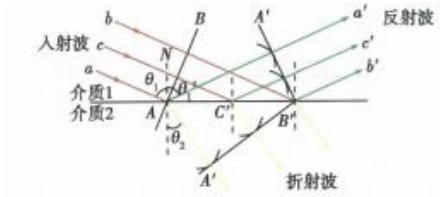


3.惠更斯原理:介质中任一波面上的各点,都可以看成发射子波的波源,其后任意时刻,这些子波在波前进方向的包络面就是新的波面。

4.**惠更斯原理的内容**:介质中任一波面上的各点,都可以看作发射子波的波源,其后任意时刻,这些子波在波前进方向的包络面就是新的波面。

5.**应用**:如果知道某时刻一列波的某个波面的位置,还知道波速,利用惠更斯原理可以得到下一时刻这个波面的位置,从而确定波的传播方向。

七、波的反射【了解】



【特点】

①反射波的波长、频率、波速都跟入射波相同。

②入射波线、法线、反射波线在同一平面内,反射角等于入射角

①折射波的频率仍与入射波相同,波速改变,波长也改变。

②波发生折射时,入射角的正弦与折射角的正弦之比等于波在第一种介质中的速度与波在第二种介质中的速度之比。

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}=\frac{v_1}{v_2}=n_{12}$$

【记忆口诀】

逆向行上上下下,波峰谷点无方向。
上下振动不迁移,质点跟着振源走。
不同时刻的图像,波形变化平移法。
四分之一和三T,特殊位置可适应。
干涉衍射多普勒,波特现象皆可现。

【本章高频考点】

1.机械振动和机械波的图像综合应用。

2.波的干涉及其图样。

第三部分 物理方法概述

一、图像法

图像法是根据题意把抽象复杂的物理过程有针对性地用物理图像表示,将物理量间的代数关系转换为几何关系。

二、递推法

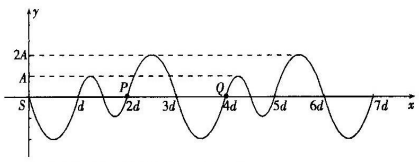
递推法指的是从特殊情况找出一般规律然后进行求解的方法。

三、对称法

应用对称性求解某些具体的物理问题的思维方法称为对称法。利用对称法分析解决问题,可以避免复杂的数学演算和推导,直接抓住问题的实质,出奇制胜,快速简便地求解问题。

第四部分 易错、疑难问题选

1.如图所示,因波源S周期性振动产生向右传播的机械波,振幅呈现A、$2A$交替变化,当$t=0$时刻恰好传到$x=7d$位置处,P、Q分别是平衡位置位于$x=2d$和$x=4d$位置处的两个质点,下列说法正确的是 ( )



A.波源S的振动频率始终保持不变

B.机械波的波速在不断变化

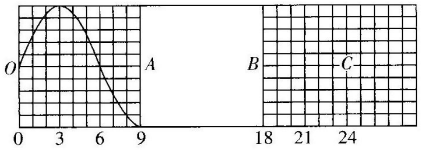
C.当机械波刚好传到$x=11d$位置处时,P质点和Q质点经过的路程相等

D.任一时刻,质点P和质点Q的速度方向相同

【答案】C

2.如图所示为一横波发生

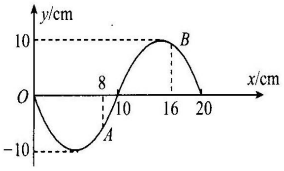
器的显示屏，可以显示出波由 O 点从左向右传播的图像，屏上每一小格长度为 1 cm. 在 $t=0$ 时刻横波发生器上能显示的波形如图所示，由于显示屏的局部故障，从位置 A 到 B 之间的波形无法被观察到（故障不影响波在发生器内传播）. 此后的时间内，观察者看到波形相继传经 B、C 处（O、A、B、C 在显示屏中央的同一水平线上），在 $t=3$ s 时，观察者看到 C 处恰好第二次出现在波峰位置，则该波的波速可能是 （　　）



A. 7 cm/s　　B. 9 cm/s　　C. 11 cm/s　　D. 15 cm/s

【答案】AC

3. 一列简谐横波沿 x 轴方向传播，$t=0$ 时刻的波形如图所示. 介质中质点 A 的平衡位置坐标 $x_A=8$ cm，质点 B 的平衡位置坐标 $x_B=16$ cm. 从 $t=0$ 时刻开始，质点 A 与质点 B 的速度第一次相同，所需的最短时间为 0.02 s. 则下列说法中正确的是 （　　）



A. 该简谐横波的频率可能为 10 Hz

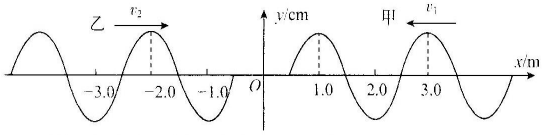
B. 该列波在介质中传播的波速可能为 4 m/s

C. 从图示时刻起，质点 A 比质点 B 先回到平衡位置

D. 介质中平衡位置 $x=10$ cm 处质点的振动方程为 $y=10\sin(10\pi t+\pi)$ cm

【答案】B

4. 如图所示，两列简谐横波在同一绳上传播，已知甲波向左传播，乙波向右传播，$t=0$ 时刻甲波恰好传播到 $x=0.5$ m 处，此时乙波传播到 $x=-0.5$ m 处，经过 0.5 s 甲波传播到 $x=0$ 处，两列波的振幅均为 2 cm，则 （　　）



A. 甲波和乙波的波速均为 1.0 m/s

B. 两列波相遇后，$x=0$ 处的质点振幅为 4 cm

C. $x=1.5$ m 处的质点在 0～3 s 内通过的路程为 16 cm

D. $t=1$ s 时，$x=1.25$ m 处的质点的振动方向沿 $+y$ 方向

【答案】ACD

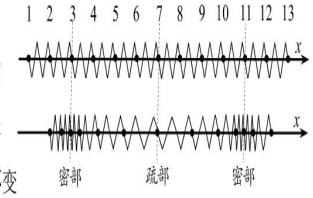
5. 如图所示，将一根长而软的轻质弹簧放置在光滑水平面上，沿着弹簧轴线的方向不断推拉弹簧，形成疏密相间的波沿 x 轴正方向传播。上图为静止时弹簧各圈的位置，下图为波传播过程中某一时刻弹簧各圈的位置。下列说法正确的是

A. 此时刻圈 7 位于波形图中的波谷

B. 此时刻圈 8 正在向平衡位置方向运动

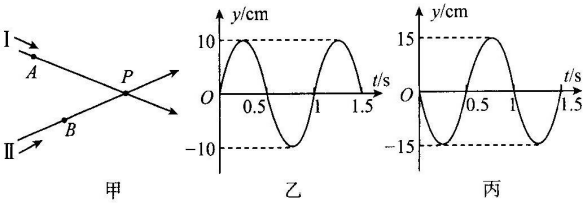
C. 此时刻圈 5 和 9 之间距离为半个波长

D. 增大推拉弹簧频率，波的传播速度不变



【答案】BD

6. 如图甲所示，A、B、P 是同一水平面内的三个点，有两列性质相同且振动均沿竖直方向的横波 Ⅰ、Ⅱ 在同一介质中分别沿着 AP 和 BP 方向传播，已知 A 与 P 相距 40 cm，B 与 P 相距 30 cm，在 $t=0$ 时刻，两列波同时分别传到 A、B 两点，A、B 两点的振动图像如图乙、丙所示，在 $t=2$ s 时刻，横波 Ⅰ 传播到 P 点，则以下说法正确的是 （　　）



甲　　乙　　丙

A. 两列波的波长均为 0.2 m

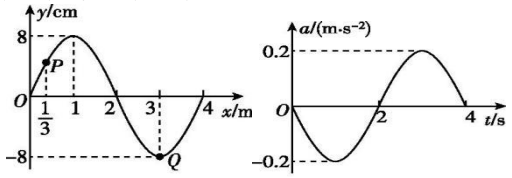
B. P 点为振动减弱点且振幅为 5 cm

C. $t=3.5$ s 时 P 点在平衡位置且向下振动

D. $t=3.5$ s 内 P 点通过的路程为 180 cm

【答案】ACD

7.(多选)如图甲所示为一列沿 x 轴传播的简谐横波在 t=0 时刻的波形图，图乙为 x=2 m 处质点的加速度 a 随时间 t 变化关系图像. 以下判断中正确的是 （　　）



甲　　乙

A. 该波沿 x 轴负方向传播

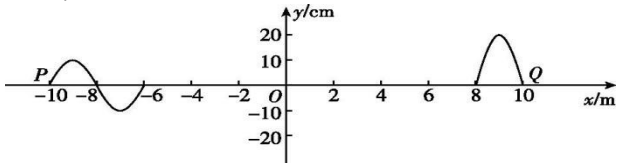
B. 质点 P 经过 1 s 将到达 $y=-4\sqrt{2}$ cm 处

C. 在 2 s 内质点 P 通过的路程为 16 cm

D. 质点 Q 比 P 迟 $\frac{2}{3}$ s 到达平衡位置

【答案】CD

8.(多选)一根长 20 m 的软绳拉直后放置在光滑水平地板上，以绳中点为坐标原点，以绳上各质点的平衡位置为 x 轴建立如图所示的坐标系. 两人在绳端 P、Q 沿 y 轴方向有节奏地抖动，形成两列振幅分别为 10 cm、20 cm 的相向传播的机械波. 已知左侧波的波速为 v=2 m/s，t=0 时刻的波形如图所示. 以下判断正确的是 （　　）



A. 两波源的起振方向相反

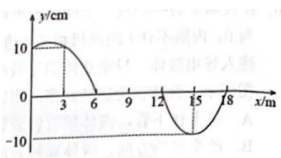
B. 两列波的频率均为 2 Hz，叠加区域有稳定干涉图样

C. 叠加稳定时两波源间（不含波源）有 10 个质点的振幅为 30 cm

D. 在 t=6 s 时两波源间（不含波源）有 2 个质点的位移为-10 cm

【答案】AD

9. 在同种均匀介质中，x=0 处的波源完成半个周期振动产生沿 x 轴正方向传播的简谐横波，间隔△t 时间后又产生一列简谐横波。以波源第一次从平衡位置开始振动为计时零点，t=3s 时首次出现如图所示波



形。则

A.波源两次振动的间隔时间△t=1s

B.波源前后两次振动的周期相同

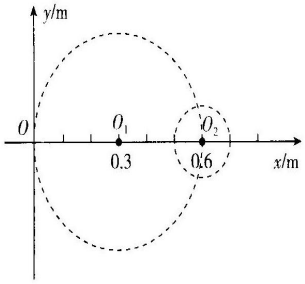
C.t=4s 时，x=6m 和 x=21m 两质点的位移大小相等

D.从 t=2s 至 t=4.5s 的时间内，x=12m 处的质点经过的路程为 30cm

【答案】ACD

10.如图所示，在一平静水面上建立 x0y 坐标系。甲、乙两波源分别在 O_1（x=0.3m）、O_2（x=0.6m)处先后以 5Hz 的频率上下振动，在水面上产生简谐横波。图中虚线为某一时刻两列波到达的位置，此时

$x=0.4$ m 处的质点沿振动方向的位移为零且速度向下. 已知该水波的波速为 0.5 m/s,振幅为 2 cm,两波源起振方向相同,传播过程中能量损耗不计. 下列说法正确的是(　　)



A. 波源 O_1 比 O_2 提前振动 0.4 s

B. 再经过 0.5 s 两波都能到达 $x=0.9$ m 处

C. 图示时刻 $x=0.55$ m 处的质点振动加强

D. 图示时刻 $x=0.46$ m 处的质点向上振动

【答案】ACD

11.一列简谐横波在 t=2/3 秒时的

波形如图 18-10 甲所示，P、Q 是介质中的两个质点，图乙是质点 Q 的振动图像. 下列表述正确的是　　(　　)

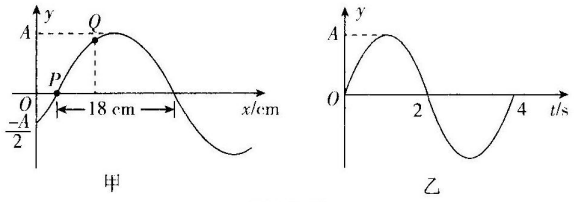


图 18-10

A. 这列波的传播方向为 x 轴正方向

B. $t=2$ s 时质点 P 的加速度方向沿着 y 轴负方向

C. 这列波的传播速度大小为 9 cm/s

D. 质点 Q 的平衡位置坐标为 $x=9$ cm

【答案】BCD

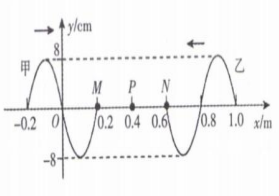
12. 在 x 轴上有两个持续振动的波源，分别位于 $x=-0.2$m 和 $x=1.0$m 处，振幅均为 $A=8$cm，由它们产生的两列简谐横波甲、乙分别沿 x 轴正方向和 x 轴负方向传播，两列波传播速度大小相同。如图所示为 $t=0$ 时刻的波形图，此刻平衡位置处于 $x=0.2$m 和 $x=0.6$m 处的 M、N 两质点刚开始振动。在 0~0.25s 内，平衡位置处于 $x=0.4$m 处的质点 P 运动的路程为 $s=48$cm。则

A. 波速为 2m/s

B. 波速为 3.2m/s

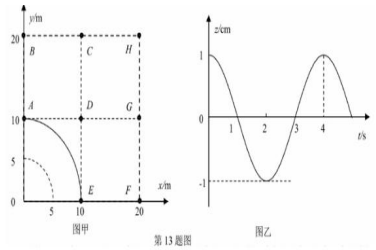
C. $t=0.25$s 时，质点 N 在平衡位置

D. $t=0.25$s 时，质点 N 位移为 8cm



【答案】A

13. 如图甲所示，均匀介质中，波源位于 O 点的简谐横波在 xOy 水平面内传播，波源起振方向垂直水平面向上，其中实线表示波峰，虚线表示与波峰相邻的波谷。$T=0$ 时刻，波峰恰好第一次传到了 A 点。A 处质点的振动图像如图乙所示，z 轴正方向竖直向上。下列判断正确的是



第 13 题图

A. $t=2$s 时，B、F 两处质点位于波谷　　B. $(4\sqrt{5}-4)$ s 时，C、G 两处质点位于波峰

C. $t=8$s 时，D 处质点位移方向竖直向上　　D. $t=8$s 时，H 处质点振动速度方向竖直向上

【答案】B

14. 如图 16 所示，Ox 轴上有 P、M、N 三点，已知 $OP=10$m，$PM=MN=8$m，$t=0$ 时刻起 O 处波源从平衡位置开始做简谐运动，形成沿 x 轴正方向传播的简谐波。已知第 2s 内 P 处质点比 M 处质点恰好多 2 次全振动，M 处质点比 N 处质点恰好多 4 次全振动，并且第 2s 末波已传过 N 处质点。则



第 16 题图

A. 该波的波长为 2m

B. 该波的波速为 14m/s

C. 第 2s 末 M 处质点在平衡位置

D. 若波源的起振方向向上，第 3s 末时 N 处质点位于波峰

【答案】ABC

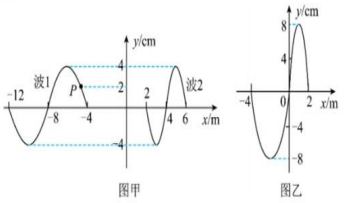
15. 在 x 轴正半轴和负半轴存在两种不同的介质，两波源分别在 $x=-12$m 和 $x=6$m 处，分别向右、向左传播形成振幅均为 4cm 的简谐横波，若两波源均只完成一次全振动后停止振动，$t=0$ 时刻的波形图如右图甲所示，已知两波源振动频率相同，$t=0$s 到 $t=0.2$s 时间内 P 点经过的路程为 2cm，（若不考虑半波损失）则下列说法正确的是

A. 两波源的起振方向相同

B. $t=1.2$s 时的波形图如图乙所示

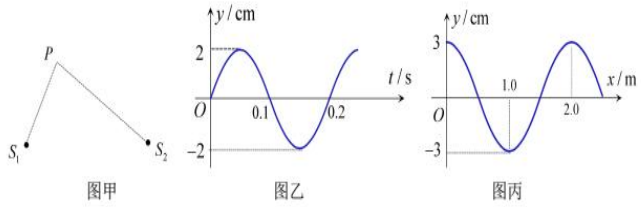
C. t=1.2s 时 P 点离开平衡位置的位移大小为 2cm

D. 波 2 在 x 轴负半轴的传播速度为 $\frac{20}{3}m/s$



【答案】BD

16. 如图甲所示，在同一介质中，波源为 S_1 与 S_2 频率相同的两列机械波在 $t=0$ 时刻同时起振，波源 S_1 的振动图象如图乙所示；波源为 S_2 的机械波在 $t=0.25$s 时波的图象如图丙所示。P 为介质中的一点，P 点距离波源 S_1 与 S_2 的距离分别是 $PS_1=7$m，$PS_2=9$m，则



A. 质点 P 的位移不可能为 0

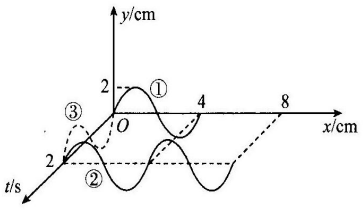
B. $t=1.25$s 时，质点 P 处于波谷

C. 质点 P 的起振方向沿 y 轴正方向

D. 波源为 S_2 的起振方向沿 y 轴负方向

【答案】BC

17. 一列沿 x 轴正方向传播的简谐横波的 x-y-t 图像如图所示，图中曲线①②③均为正弦曲线，其中曲线①在 xOy 平面内，曲线②所在的平面平行于 xOy 平面，曲线③在 yOt 平面内，则　　(　　)



A. 曲线①的振幅为 2 cm

B. 波的传播速度为 4 cm/s

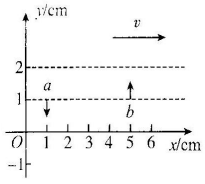
C. 曲线③为 0 处质点的振动图像

D. $t=1$ s 时 6 m 处质点沿 y 轴负方向运动

【答案】ACD

18.一列沿 X 轴正方向传播的简谐横

波，每个质点振动的振幅都为 2 cm，已知在 $t=0$ 时刻相距 4 cm 的两个质点 a，b 的位移都是 1 cm，但速度方向相反，其中 a 质点的速度沿 y 轴负方向，如图所示，则（　　）



A. $t=0$ 时刻，a，b 两质点的加速度相同

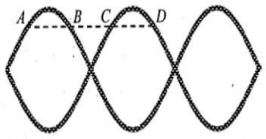
B. a、b 两质点平衡位置间的距离为半个波长的奇数倍

C. 当 a 质点的速度最大时，b 质点的速度为零

D. 当 b 质点的位移为 $+2$ cm 时，a 质点的位移为 -1 cm

【答案】AD

19. 一列绳波在水平方向上传播，现对其频闪照相，拍摄频率为 5Hz。在同一底片上多次曝光后形成照片如图所示，照片与实物比例为 1:100。照片中 A、B、C、D 四点为同一水平线上的四点，且 $AB=BC=CD=2$cm。以下说法正确的是



A. 该绳波波长为 4m

B. 该绳波波速可能为 60m/s

C. 该波可能与周期为 0.1s 的另一列绳波发生干涉

D. 同一次曝光时 A、C 两处质点振动方向相反

【答案】BD

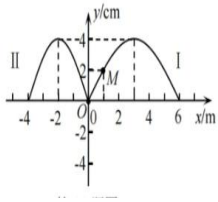
20. 如图所示，波源 O 沿 y 轴作简谐运动，形成两列简谐横波，一列波在介质 I 中沿 x 轴正方向传播，另一列波在介质 II 中沿 x 轴负方向传播。$t=0$ 时波形如图，此时两列波分别传到 $x_1=6$m 和 $x_2=-4$m 处。$t=1$s 时质点 M 位移不变，振动方向相反，已知波源振动周期大于 0.4s。则

A. 波源的起振方向沿 y 轴正方向

B. 两列波传播的周期之比为 3∶2

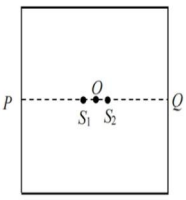
C. 波在介质 II 中的传播速度可能为 $\frac{32}{3}$m/s

D. $x=-\frac{14}{3}$m 的质点与 M 质点的振动方向始终相反



【答案】AD

21. 如图所示，均匀介质中有两个振源 S_1 和 S_2，它们的频率、振幅、振动方向均相同且振动的步调完全一致，产生的两列波的波长均为 λ，S_1 与 S_2 之间距离为 1.5λ，O 点为 S_1、S_2 连线中点。现以 O 点为中心画一个正方形，正方形的两边与 S_1、S_2 的连线平行，且正方形边长远大于 λ，虚线过 S_1、S_2 与正方形的交点分别为 P、Q，下列说法正确的是



第 16 题图

A. O 点处质点的位移始终最大

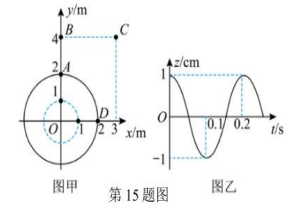
B. P、Q 两点处质点的位移始终为零

C. 正方形四边上振动减弱点的数目为 6 个

D. 正方形四边上振动加强点的数目为 4 个

【答案】BC

22. 如图甲所示，在均匀介质中，坐标系 xOy 位于水平面内，O 处的波源由平衡位置开始垂直 xOy 平面振动，产生的简谐横波在 xOy 平面内传播，选定图甲状态为 $t=0$ 时刻，实线圆、虚线圆分别表示相邻的波峰和波谷，且此时刻平面内只有一圈波谷，图乙为图甲中质点 A 的振动图像，z 轴垂直于 xOy 水平面，且正方向为垂直纸面向外。则下列说法正确的是



图甲　　第 15 题图　　图乙

A. 此机械波的波长是 2m

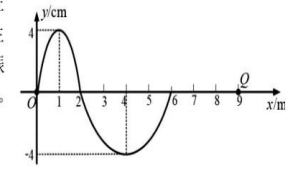
B. 此机械波的传播速度为 0.4m/s

C. $t=0.2$s 时，机械波恰好传至 B 处

D. 在 $t=0$ 至 $t=0.85$s 这段时间内，C 质点运动的路程为 12cm

【答案】AD

23. 在 $t=0$ 时刻，位于原点处的波源 O 以某一频率开始振动，产生的机械波在均匀介质中沿 x 轴正方向传播。一段时间后，波源 O 的振动频率发生变化。$t=3$s 时刻，$x=6$m 处的质点恰好开始振动，此时的波形图如图所示。质点 Q 位于 $x=9$m。下列说法正确的是



A. 该波在介质中传播的波速为 2 m/s

B. 波源 O 开始振动 1 s 后，振动频率变为原来两倍

C. $t=3$s 时刻起，再经过 4 s，质点 Q 通过的路程为 20cm

D. $t=6$s 时刻，质点 Q 偏离平衡位置的位移为 $-2\sqrt{2}$ cm

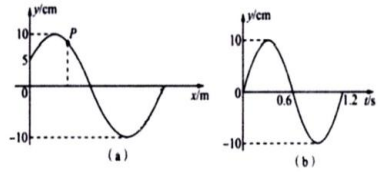
【答案】AD

24. 一列简谐横波在 t=0.4 s 时的波形图如图（a）所示，P 是介质中的质点，图（b）是质点 P 的振动图像。已知该波在该介质中的传播速度为 20m/s 则

A. 该波的波长为24 m

B. 该波沿x轴正方向传播

C. t=0.4s时质点P离开平衡位置的位移为 $5\sqrt{3}$ m



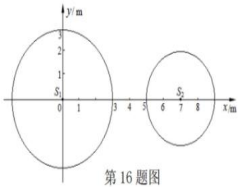
D. 质点P的平衡位置坐标为x=6m

【答案】AD

25. 在纸面上有两个波源 S_1 和 S_2，振动方向相同，振幅均为 2cm，S_1 的频率为 2 Hz，S_2 的频率为 4Hz，以 S_1 为原点建立如图所示的坐标，$t=0$ 时波源 S_1 从平衡位置开始垂直纸面向外做简谐运动，所激发的横波在均匀介质中向四周传播，$t=0.25$s 时，波源 S_2 也从平衡位置开始垂直纸面向外做简谐运动，t 时刻两列简谐波的最远波峰传到了图示中的两个圆的位置。下列说法中正确的是

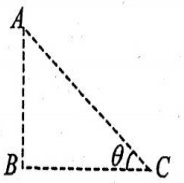
A. 两列波相遇后，坐标（4，0）的质点振动加强　　B. 波的传播速度为 $\frac{16}{3}$m/s

C. 图示波形对应的 t 时刻 $t=\frac{11}{16}$ s　　D. $t=1.25$s 时，坐标（4，0）的质点位移为 2 cm


第 16 题图

【答案】BC

26. 如图，在均匀介质中有一个处于同一水平面上的直角三角形 ABC，$\theta=37°$，$AB=9m$。其中波源位于 A 点作上下振动，振幅为 8cm，其产生的波在此水平面上传播；某一此刻（记为 $t_0=0$）时 B 处质点正处在波峰，而 C 处质点此刻位移为+4cm 且向下振动；经 $\Delta t=0.01s$，B 处质点位移第一次到达+4cm。$\cos37°=0.8$，$\sin37°=0.6$。则（　　）



A. 波的周期为 0.12s

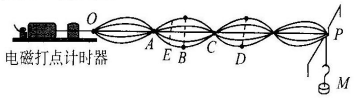
B. 质点 B 的振动方程为 $y_B=8\cos\frac{100}{3}\pi(\text{cm})$

C. 该机械波在介质中的波速可能为 120m/s

D. 该机械波在介质中的波速可能为 $\frac{600}{599}$m/s

【答案】BCD

27. 一根细线左端连接电磁打点计时器的振片上的 O 点，右端在 P 处跨过一定滑轮后挂一重物 M，打点计时器振片上下振动，频率为 50 Hz，振片的振动能在细线中产生向右传播的机械波，机械波经 P 处反射后能产生向左传播的机械波，两列机械波的频率、振幅均相等，此时在线中形成驻波，如图所示，图中 A、C 等处始终不振动，而 B、D 等处振幅最大，其余各处的振幅依次渐变，各点平衡位置间的距离 $AB=BC=CD=1.2$ m，E 点的平衡位置在 A、B 平衡位置连线之间. 已知 $t=0$ 时刻，D 点正处于波峰，下列说法正确的是　　（　　）



A. 两列波的波长均为 2.4 m

B. 两列波的波速均为 240 m/s

C. $t=0.005$ s 时，B 点正位于平衡位置向上运动

D. $t=0.005$ s 时，E 点正位于平衡位置向上运动

【答案】BCD

28. （多选）一列简谐横波在 $t=0.6$ s 时刻的图像如图 18-11 甲所示，此时 P、Q 两质点的位移均为 -1 cm，波上质点 A 的振动图像如图乙所示，则以下说法正确的是　　（　　）

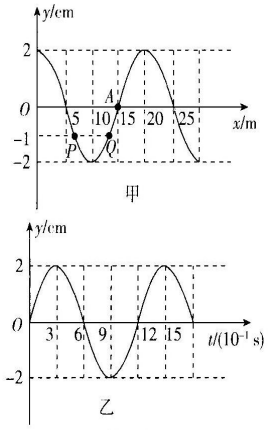


图 18-11

A. 这列波沿 x 轴正方向传播

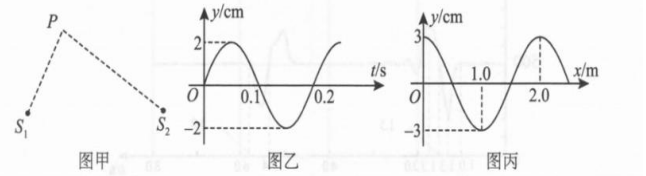
B. 这列波的波速是 $\frac{50}{3}$ m/s

C. 从 $t=0.6$ s 开始，紧接着的 $\Delta t=0.6$ s 时间内，质点 A 通过的路程是 10 m

D. 从 $t=0.6$ s 开始，质点 P 比质点 Q 早 0.4 s 回到平衡位置

【答案】ABD

29. 如图甲所示，在同一介质中，波源为 S_1 与 S_2 频率相同的两列机械波在 $t=0$ 时刻同时起振，波源 S_1 的振动图象如图乙所示；波源为 S_2 的机械波在 $t=0.25$s 时波的图象如图丙所示。P 为介质中的一点，P 点距离波源 S_1 与 S_2 的距离分别是 $PS_1=7m$，$PS_2=9m$，则



A. 质点 P 的振幅为 1cm

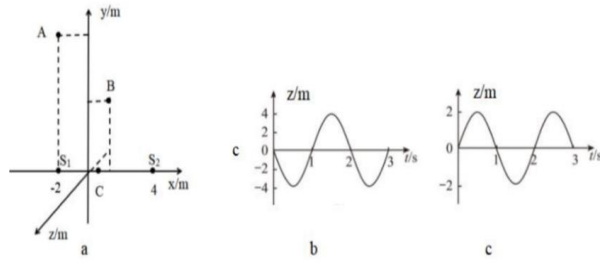
B. 质点 P 的起振方向沿 y 轴正方向

C. 波源为 S_2 的起振方向沿 y 轴负方向

D. $t=1.20$s 时，质点 P 处于平衡位置

【答案】BD

30. 如图（a）所示，在 xOy 平面内有两个沿 z 方向做简谐振动的点波源 S_1（-2m，0）和 S_2（4m，0）。两波源的振动图线分别如图（b）和图（c）所示，两列波的波速均为 1m/s。



A. 点 C（0.5m，0）的起振方向是沿 z 轴正方向

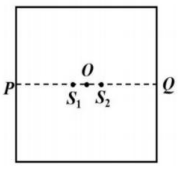
B. 从 t=0 到 t=12s 点 A（-2m，8m）的路程为 24m

C. 点 B（1m，4m）是振动减弱点，位移始终为零

D. 在 x 轴上 S_1、S_2 之间有 6 个振动加强点

【答案】BD

31. 如图所示，均匀介质中有两个振源 S_1 和 S_2，它们的频率、振幅、振动方向均相同且振动的步调完全一致，产生的两列波的波长均为 λ，S_1 与 S_2 之间距离为 1.5λ，O 点为 S_1、S_2 连线中点。现以 O 点为中心画一个正方形，正方形的两边与 S_1、S_2 的连线平行，且正方形边长远大于 λ，虚线过 S_1、S_2 与正方形的交点分别为 P、Q，下列说法正确的是



（第 16 题）

A. O 点处质点的位移始终最大

B. P、Q 两点处质点的位移始终为零

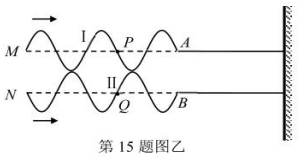
C. 正方形内振动减弱点的数目为无数个

D. P、Q 连线上振动加强点的数目为 3 个

【答案】BCD

32. “甩绳”运动可以提升健身者的爆发力、心肺耐力等，如图甲所示，两根相同的绳子一端固定，健身者双手分别握住绳子的另一端，两臂上下交替抖动，绳子在竖直面内分别形成波形。如图乙开始时，健身者抖动 M 端和 N 端，产生的波Ⅰ、Ⅱ恰好分别传到 A 点和 B 点，已知 M、N 到固定点距离为 10m，A 点到固定点距离为 4m，每秒抖动 3 次，波Ⅰ、Ⅱ可视为简谐波，则（　　）


第 15 题图甲



第 15 题图乙

A. 波Ⅰ的传播速度为 0.8m/s

B. 波Ⅰ比波Ⅱ先到达固定端

C. 波Ⅰ的起振方向竖直向上，且与波Ⅱ的起振方向相反

D. 从开始振动到如图时刻，质点 P 与 Q 的振动方向始终相反

【答案】CD

第四章 光

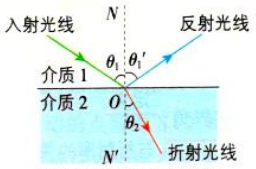
第一部分 基础知识点

第 1 节 光的折射

一、光的反射和折射

1.光的反射和折射

一般来说，光从第 1 种介质射到该介质与第 2 种介质的分界面时，一部分光会返回到第 1 种介质，这个现象叫光的反射；另一部分光会进入第 2 种介质，这个现象叫光的折射。



光的反射和折射同时发生

2. 反射定律

反射光线与入射光线、法线在同一平面内，反射光线和入射光线分别位于法线的两侧；反射角等于入射角。

3. 折射定律

(1)内容：折射光线与入射光线、法线处在同一平面内，折射光线与入射光线分别位于法线的两侧；入射角的正弦与折射角的正弦成正比。这是荷兰数学家斯涅耳在 1621 年总结出来的。

(2)公式：$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}=n_{12}$。

(3)说明：n_{12} 是比例常数，与入射角、折射角的大小无关，只与两种介质的性质有关。

4. 光路的可逆性

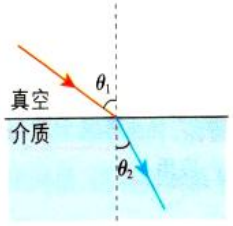
如果让光线逆着原来的反射或折射光线射到界面上，光线就会逆着原来的入射光线发生反射或折射。也就是说，在光的反射和折射现象中，光路都是可逆的。

⚠ 提醒

(1)光从一种介质进入另一种介质时，传播方向一般会发生变化，但并非一定会变化，当光垂直界面入射时光的传播方向就不变。

(2)空气对光的传播的影响很小，可以作为真空处理。

二、折射率



介质折射率：$n=\frac{\text{真空中角的正弦}}{\text{介质中角的正弦}}$。

1. 定义：光从真空射入某种介质发生折射时，入射角的正弦与折射角的正弦之比叫作这种介质的绝对折射率，简称折射率，用符号 n 表示，

即 $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}=n$，式中 n 为(介质相对真空的)折射率.

【拓展】相对折射率：当光从介质 1 进入介质 2 时，$n_{21}=\frac{\sin i}{\sin r}$ 叫介质 2 相对介质 1 的折射率。

【注意】在实际应用中，遇到最多的情形是光从空气射入某种介质，或从某种介质射入空气，而空气对光的传播的影响很小，可以作为真空处理。

2. 折射率的理解

①光一定是从真空射入其他介质中。

②折射率是一个反映介质的光学性质的物理量，由介质本身性质决定，与入射角的大小无关。

3. 折射率与光速的关系（决定式）

折射率与光速的关系：$n=\frac{c}{v}$，其中 c 表示真空中的光速，v 表示介质中的光速，因为 $v<c$，所以任何介质的折射率都大于 1.

【注意】针对某些电磁波设计制作的人工材料，其折射率可以为负值（n<0），称为负折射率材料。

折射率越小，光在介质中传播的速度越接近光速；折射率越大，光在介质中传播的速度越小.

4. 同一种介质中，频率越大的色光折射率越大，传播速度越小。

5. 光从一种介质进入另一种介质时，频率不变，波长、光速改变。

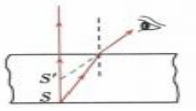
可根据 $n=\frac{c}{v}$、$v=\lambda f$ 判断。

三、常见问题讨论

（一）视深、视宽问题

【规律】1.当光垂直射入界面时，光也会发生折射现象。

2.视深与实深的关系：$h_{视}=\frac{H_{实}}{n}$

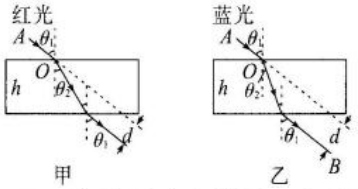


3.介质中的波长 $\lambda=\frac{\lambda_{真}}{n}$

水池底部装有不同颜色的彩灯，实际深度为 H，视觉深度为 h，由折射定律知视深 $h=\frac{H}{n}$，折射越大，看起来越浅，故红光看起来最深，紫光看起来最浅.

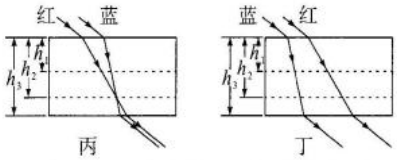
（二）平行玻璃砖

(1)通过平行玻璃砖的光线不改变传播方向，但要发生侧移，如图甲、乙所示，不同频率的单色光通过相同的玻璃砖，频率越高，侧移量越大，反之越小.



甲　　乙

(2)两束不同频率的单色光以相同的入射角射入玻璃砖，分两种情况加以记忆：



丙　　丁

①如图丙所示，低频率的单色光（红光）在左侧，高频率的单色光（蓝光）在右侧，若玻璃砖足够厚，由于高频率的单色光（蓝光）的折射率大，玻璃砖中的光路会发生交叉，可得到规律：

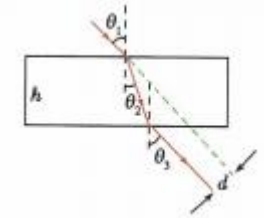
玻璃砖的厚度从 h_1 增大到 h_3，射出光线间的间距先减小后增大；

②如图丁所示，高频率的单色光（蓝光）在左侧，低频率的单色光（红光）在右侧，若玻璃砖足够厚，由于高频率的单色光（蓝光）的折射率大，玻璃砖中的光路不会发生交叉，可得到规律：

随玻璃砖的厚度的增大，射出光线间的间距逐渐增大.

特别提醒：光线通过平行玻璃砖时不可能出现全反射.

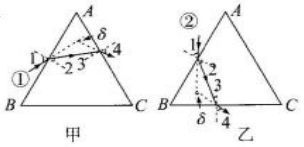
（3）关于平行玻璃砖对光的偏折量



侧移量 d 的大小取决于平行玻璃砖的厚度 h、折射率 n 和光线的入射角 θ_1，$d=h\sin\theta_1\cdot\left(1-\dfrac{\cos\theta_1}{\sqrt{n^2-\sin^2\theta_1}}\right)$

（三）三棱镜对光路的控制

（1）由于三棱镜的空间对称性，从下图两个角度射入的光线最终射出三棱镜时，光线的偏转角是相同的.

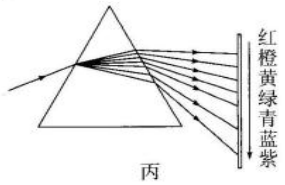


甲　　乙

偏转角 δ 的计算方法：以图甲为例，任意设某个偏转方向为正，如此处设顺时针偏转记为正，逆时针偏转记为负，按照图中标示的角度分析，第一次折射时，光线顺时针偏转的角度为（$\angle1-\angle2$），第二次折射时，光线顺时针偏转的角度为（$\angle4-\angle3$）.

偏转角 $\delta=(\angle1-\angle2)+(\angle4-\angle3)$.

折射率越大，（$\angle1-\angle2$）与（$\angle4-\angle3$）越大，即偏转角越大. 当自然光通过三棱镜时出现色散，色散的光谱如图丙所示，需要加以记忆.



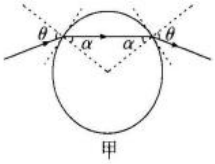
丙

（2）当减小入射角时，第二次折射的入射角将增大，又因发生全反射的临界条件为 $\sin C=\dfrac{1}{n}$，折射率越大，临界角度越小，所以紫光最先发生全发射.

（四）圆柱体（球）对光路的控制

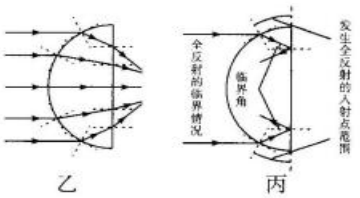
圆柱体（球）或半圆柱体（球）对光线都有会聚作用，使光线向圆心偏折，分四个种类进行讨论.

情况一：如图甲所示的为光线经过圆柱体（球）偏转的光路图，圆柱体（球）具有高度的对称性，故光路图也是对称的，入射角等于出射角且光线向圆心偏折.



甲

情况二：如图乙、丙所示的为平行光线从外部射向半圆柱（球）弧面的光路图，分两种情况加以记忆.



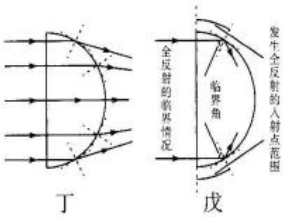
乙　　丙

①如图乙所示，光线经过左侧弧（球）面折射与右侧平面折射后射出半圆柱（球），但不是所有光线都能通过两次折射从半圆柱（球）射出，靠中央部分的平行光线可以通过两次折射后从右侧平面射出；

②上下两侧的平行光线经过一次折射后，到达右侧平面边界时，由于入射角大于等于全反射的临界角度，因此发生全反射，无法直接从半圆柱（球）右平面射出，临界情况的光路图如图丙所示.

情况三：如图丁、戊所示的为平行光线从外部射向半圆柱（球）平面的光路图，分两种情况加以记忆.

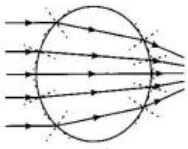
①如图丁所示，光线与平面垂直，不发生折射，光线方向与入射光线共线，经右侧弧（球）面折射后射出，但不是所有光线都能通过右侧弧（球）面折射后射出，靠中央部分的平行光线可以通过折射从右侧弧（球）面射出；



丁　　戊

②上下两侧的平行光线到达弧(球)面时,由于入射角大于等于全反射的临界角度,因此发生全反射,无法直接从半圆柱(球)右侧的弧(球)面射出,临界情况如图戊所示.

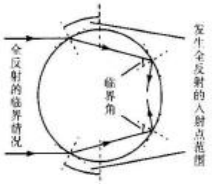
情况四:如图己、庚所示的为平行光线从外部射向圆柱(球)弧面的光路图,分两种情况加以记忆.



己

①如图己所示,光线经过左侧弧(球)面折射与右侧弧(球)面折射后射出圆柱(球),但不是所有光线都能通过两次折射后从圆柱(球)射出,靠中央部分的平行光线可以通过两次折射从圆柱(球)射出,并出现明显的汇聚现象;

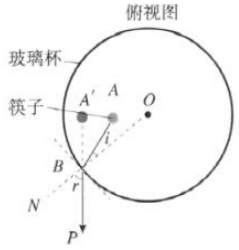
②上下两侧的平行光线经过一次折射后,到达右侧弧(球)面边界时,由于入射角大于等于全反射的临界角度,因此发生全反射,无法直接从圆柱(球)右侧射出,临界情况的光路图如图庚所示.



庚

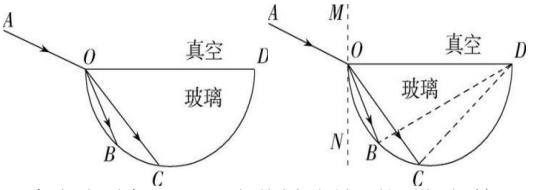
【思考】将一根筷子竖直插入装有水的玻璃杯中，从水平方向拍摄的照片如图所示。看上去，浸在水中的这段筷子产生了侧移，而且变粗了。如何解释观察到的现象？





（五）“等时圆”模型

不论什么颜色的光，从半圆形玻璃砖上表面的左边缘以相同入射角θ射入，穿过玻璃砖自下表面射出，穿过玻璃砖所用的时间一定相等。



两束光分别在 OB、OC 段传播时所用的时间相等

【若在平行玻璃砖中，则始终是红光运动时间最短】

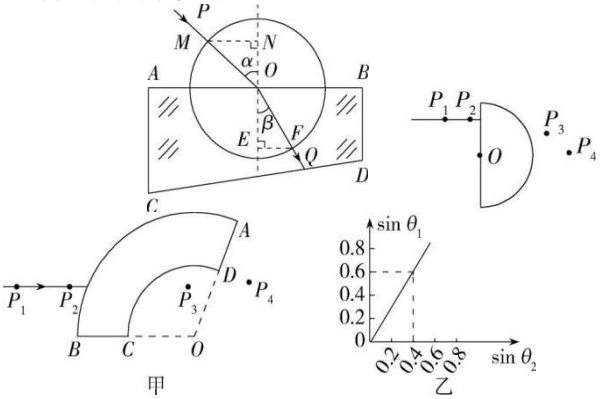
四、实验：测量玻璃的折射率

（一）实验操作



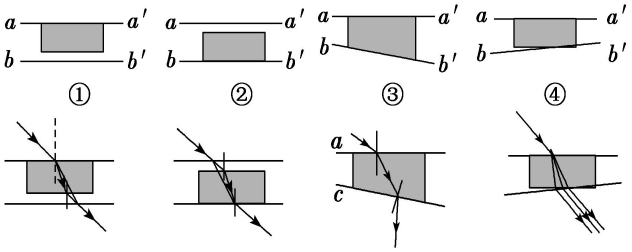
（二）注意事项

1.玻璃砖应选用厚度、宽度较大的。
2.大头针要插得竖直，且间隔要大些。
3.入射角不宜过大或过小，一般在 15°～75°之间。
4.玻璃砖的折射面要画准，不能用玻璃砖界面代替直尺画界线。
5.实验过程中，玻璃砖和白纸的相对位置不能改变。
6. 与玻璃砖的形状无关



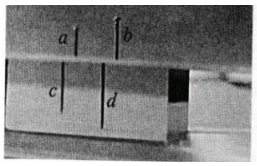
甲　　乙

（三）误差分析

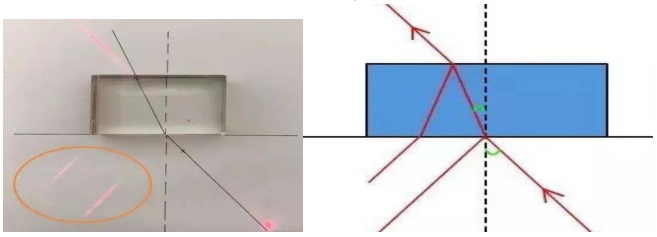


用图①测定折射率时，折射率偏小；
用图②测定折射率时，折射率偏小；
用图③测折射率时，只要操作正确，与玻璃砖形状无关；
用图④测折射率时，若出射点恰好为 bb′ 与界面的交点，则测得的折射率不变。若出射点在 bb′ 与界面交点的左边(右边)，则测得的折射率偏小(偏大)。

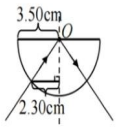
【易错题】（1）某同学在插第三枚大头针 P_3 时，在视线中看到 P_1、P_2 两枚大头针“断”成了 a、b、c、d 四截，如图所示。正确的做法是让 P_3 同时挡住（C、d）-----因为要挡住 P_1、P_2 的像。



【实验改进】如果改用激光则不需插针。



（2）小周在“测定玻璃折射率”的实验中，使用了以下器材：直径为 7.00 厘米的半圆形玻璃砖、红色激光、平木板、图钉（若干）、白纸、铅笔、三角尺，当激光沿某一半径方向照射到圆心 O 点时恰好发生全反射，他作出的光路图如图丁所示，则玻璃砖的折射率为__▲__（保留三位有效数字）。将入射光线向右平移一小段距离，__▲__（填“有”或“没有”）光线从玻璃砖底面射出。



第 17 题图丁

【答案】1.52　　有

第 2 节　全反射

一、全反射

1.光密介质和光疏介质

(1)定义：两种介质相比较，折射率较大的介质叫光密介质，折射率较小的介质叫光疏介质。

(2)折射特点：光由光疏介质射入光密介质时，折射角小于入射角；光由光密介质射入光疏介质时，折射角大于入射角。

(3)传播速度：光在光疏介质中的传播速度大于在光密介质中的传播速度。

【点拨】光疏介质与光密介质是相对而言的，只有对确定的两种介质才能谈光疏介质与光密介质；光疏介质与光密介质的界定是以折射率为依据的，与介质的其他属性(如密度等)无关。

2. 全反射

(1)定义：光从光密介质射入光疏介质时，当入射角增大到某一角度，折射光线消失，只剩下反射光线的现象。

(2)条件：①光从光密介质射向光疏介质。

②入射角大于等于临界角。

(3)临界角：折射角等于 90°时的入射角。若光从光密介质(折射率为 n)射向真空或空气时，发生全反射的临界角为 C，则 $\sin C=\frac{1}{n}$。介质的折射率越大，发生全反射的临界角越小。

（4）对全反射的理解

①光路可逆：光的反射和全反射现象均遵循光的反射定律，光路是可逆的。

②从传播角度理解：光线射向两种介质的界面时，往往同时发生反射和折射现象。当入射角等于临界角时，折射角等于 90°，实际上折射光线已经消失了。

③从能量角度理解：当光从光密介质射入光疏介质时，在入射角逐渐增大的过程中，反射光线的能量逐渐增强，折射光线的能量逐渐减弱，当入射角等于临界角时，折射光线的能量减小到零，恰好发生全反射。

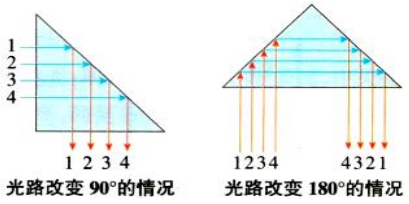
3.全反射的应用

(一)解释生活中的现象：炎热的夏天，远处柏油马路上特别明亮；**水中或玻璃中的气泡，看起来特别明亮，就是因为光从水或玻璃射向气泡时，一部分光在界面上发生了全反射的缘故。**海市蜃楼、沙漠蜃景、光缆通信等。

(二)全反射棱镜

(1)定义：横截面是等腰直角三角形的棱镜叫全反射棱镜。

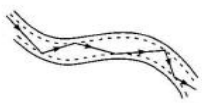
(2)全反射棱镜对光路的控制



【拓展】各种玻璃的临界角为 32°~42°，上图中两种情况入射角均为 45°，45°>C，故而发生全反射。

(3)优点：全反射棱镜的反射率比平面镜高，几乎可达到 100%。光学仪器中常用全反射棱镜代替平面镜。

(三)光导纤维：由内芯和外套两层组成，内芯的折射率大于外套的折射率。【课本用全反射的知识解释了光在有机玻璃棒中的传播，并且由此粗浅地说明了光纤导光的原理。实际上两者并不完全一样。】

构造		由内芯和外套组成，内芯的折射率大于外套的折射率，光传播时在内芯与外套的界面上发生全发射
传播路径		
光纤通信	原理	光的全反射
	通信方法	光也是电磁波，也可以像无线电波一样，作为载体来传递信息，载有声音、图像及各种数字信号的激光从光纤的一端输入，就可以传到千里以外的另一端，实现通信的目的
	优点	容量大、衰减小、抗干扰强

（四）内窥镜

如果把光导纤维聚集成束，使纤维在两端排列的相对位置一样，图像就可以从一端传到另一端（图 4.2-8）。 医学上用这种光纤制成内窥镜②（图 4.2-9），用来检查人体胃、肠、气管等脏器的内部。 实际的内窥镜装有两组光纤，一组把光传送到人体内部进行照明，另一组把体内的图像传出供医生观察。

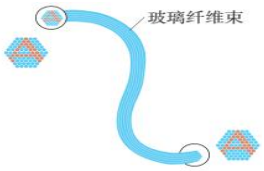


图 4.2-8

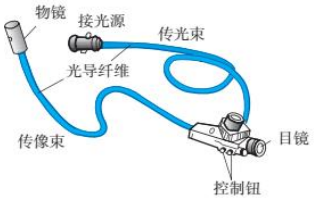
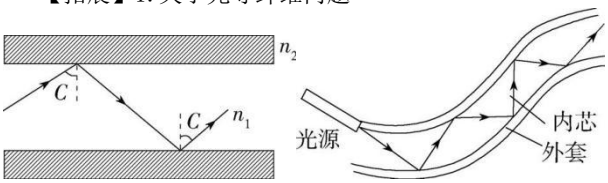


图 4.2-9　内窥镜

【注意】这里介绍的是纤维式内窥镜。现在医院用的大多是电子式内窥镜：把微型摄像头送入人体，图像信号经过电缆传出，用计算机屏幕显示。电子式内窥镜的探头体积小、分辨率高，可供多人观察，所得图像能以电子文件的形式存储。

【拓展】1. 关于光导纤维问题



（1）内芯和外套的折射率关系：(1) $n_{内} > n_{外}$

（2）光通过长为 L 的光导纤维（与形状无关）所用的时间为 $\dfrac{Ln_{内}^2}{n_{外}C}$

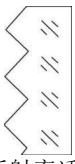
【拓展】2.水流导光



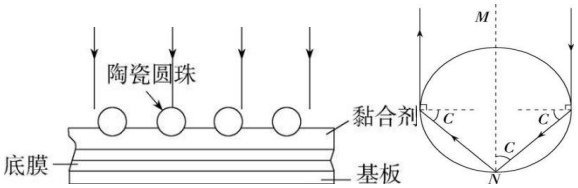
图 4.2-10　水流导光

二、实际应用问题

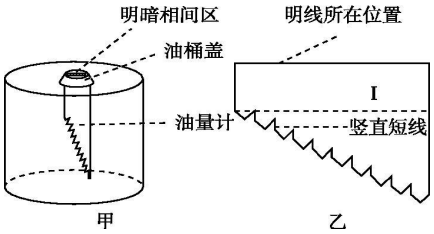
（1）自行车尾灯采用了全反射棱镜的原理，它虽然本身不发光，但在夜间行驶时，从后面开来的汽车发出的强光照在尾灯上，会有较强的光被反射回去，使汽车司机注意到前面有自行车。尾灯由透明介质制成，其外形如图所示。汽车灯光应从右面射过来，在尾灯的左表面发生全反射。



（2）回归反光膜是由高折射率透明陶瓷圆珠、高强度黏合剂等组成的复合型薄膜材料。在夜间，它能使各种角度车灯射出的光线逆向返回，使标志牌上的字特别醒目。一束平行光（宽度远大于陶瓷圆珠直径和圆珠间距）沿垂直基板方向照射到圆珠上，为使折射入陶瓷圆珠的光能发生全反射，则制作陶瓷圆珠材料的折射率 n 至少为　（　$\sqrt{2}$　）



（3）油量计固定在油桶盖上并将油量计竖直插入油桶，通过油桶盖的矩形窗口可看见油量计的上端面明暗相间的区域.图乙是油量计的正视图，它是一块锯齿形的透明塑料，锯齿形的底部是一个等腰直角三角形，腰长为 $\dfrac{\sqrt{2}}{2}d$，相邻两个锯齿连接的竖直短线长度为 $\dfrac{d}{2}$，最右边的锯齿刚接触到油桶的底部，塑料的折射率小于油的折射率.若油面不会超过图乙中的虚线 I，不计油量计对油面变化的影响，则　（　　）



A. 窗口竖直向下射入的光线在塑料和油的界面处发生折射进入油中，折射光线与反射光线垂直，形成暗区

B. 窗口竖直向下射入的光线在塑料和空气的界面处发生全反射，返回油量计的上端面并射出，形成亮区

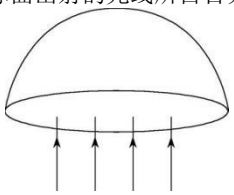
C. 透明塑料的折射率至少要大于 2

D. 油的深度 h 与明线长度 L 满足的关系式为 $h=5d-\dfrac{L}{2}$

[解析] BD　根据油量计测量原理可知，在有油处，窗口竖直向下射入的光线通过塑料进入油中，不会发生全反射返回射出窗口，形成暗区，而在无油处，窗口竖直向下射入的光线从塑料射向空气时发生全反射返回窗口射出，形成亮区，选项 A 错误，B 正确；光线在塑料和空气的分界面发生全反射，所以临界角要小于 45°，则折射率应该大于 $\sqrt{2}$，选项 C 错误；根据几何关系可知，虚线 I 下方部分横向长度是竖向长度的 2 倍，则暗线长度是油的深度的 2 倍，所以油的深度 h 和明线长度 L 的关系式为 $h=5d-\dfrac{L}{2}$，选项 D 正确.

三、立体光路问题

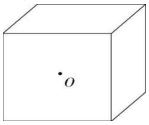
【例 1】如图，一半径为 R 的玻璃半球，折射率为 1.5，现有一束均匀的平行光垂直入射到整个半球的底面上，进入玻璃半球的光线中，不可能直接从半球面出射的光线所占百分比为　（　　）



A. 66.7%　　B. 55.6%　　C. 44.4%　　D. 33.3%

【答案】 B

【例 2】如图，边长为 L 的正方体玻璃砖，折射率 n=1.5，玻璃砖的中心有一个小气泡。自正方体外向内观察气泡，正方体表面能看到气泡范围的面积为（　　）



A. $\dfrac{1}{5}\pi L^2$　　B. $\dfrac{2}{5}\pi L^2$　　C. $\dfrac{4}{5}\pi L^2$　　D. $\dfrac{6}{5}\pi L^2$

【答案】D

第 3 节　光的干涉

一、光的双缝干涉

1.光的干涉现象

频率、相位、振动方向都相同的两列光波相叠加，使某些区域的光相互加强，出现亮条纹，某些区域的光相互削弱，出现暗条纹，由此屏上得到明暗相间的条纹，这种现象称为光的干涉现象。

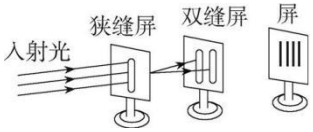
2. 光产生干涉现象的条件

两列光波的频率相同，相位差恒定，振动方向相同。

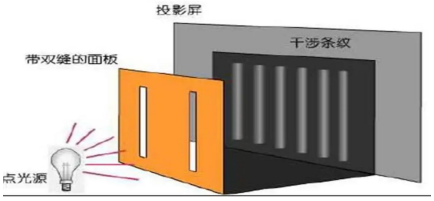
3. 双缝干涉实验

(1)相干光源的获得：在杨氏双缝干涉实验中，是将单缝射出的光波通过双缝分为两列光波而得到相干光源。如今用激光直接照射双缝，亮度大，便于观察。

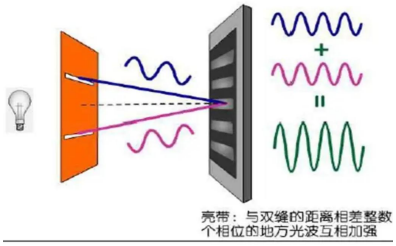
①原理图

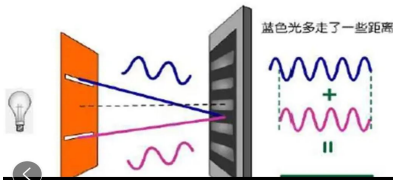


②实物图

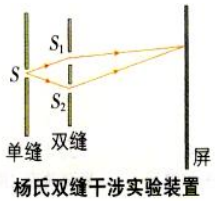


③俯视亮(暗）纹图





④示意图



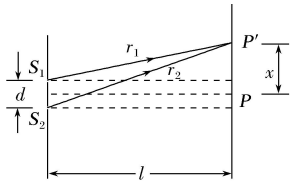
杨氏双缝干涉实验装置

【拓展】如果两个光源发出的光能够产生干涉，这样的两个光源叫相干光源。

(2)明（亮）暗条纹的产生

【前提】当两光源的频率、相位、起振方向都相同时。

①若光源 S_1、S_2 发出的光到屏上某点的路程差 $\Delta r=\left|s_1p'-s_2p'\right|=\left|r_2-r_1\right|=2n\times\frac{\lambda}{2}=n\lambda$(n=0，1，2…)时，两列光波相互加强，光屏上出现亮（明）条纹。【n=0 时叫中央亮纹，n=1 时叫第一亮纹，如此类推】



②若光的路程差 $\Delta r=\left|s_1p'-s_2p'\right|=\left|r_2-r_1\right|=(2k+1)\frac{\lambda}{2}$(k=0，1，2…)时，光屏上出现暗条纹。

③对于两个振动步调反相的光源，产生亮、暗条纹的条件与上面的正好相反。

(3)相邻两个亮条纹或暗条纹的中心间距：$\Delta x=\frac{l}{d}\lambda$，其中 d 为两缝间的距离，l 为缝到屏的距离，λ 为光的波长。

【由 $r_2-r_1=d\sin\theta$ 及 $x=l\tan\theta\approx l\sin\theta$ 得出】

【拓展】若经过不同介质时

例如，S_1 和 S_2 为两相干光源，初相位相同，它们发出的光分别在折射率为 n_1 和 n_2 的两种介质中传播，经过路程 r_1 和 r_2 在 P 点相遇，如图 61-4 所示，则两束光在 P 点的相位差为 $\Delta\varphi=\frac{2\pi}{\lambda}\delta=\frac{2\pi}{\lambda}(n_1r_1-n_2r_2)$，产生干涉的条件为：当 $\delta=\pm k\lambda(k=0,1,2,\cdots)$ 时，$\Delta\varphi=\pm2k\pi$，干涉加强；当 $\delta=\pm(2k+1)\frac{\lambda}{2}(k=0,1,2,\cdots)$ 时，$\Delta\varphi=\pm(2k+1)\pi$，干涉减弱。

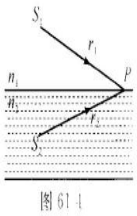


图 61-4

(4)双缝干涉图样的特点

①若用单色光作光源，中央为亮条纹，两边是明暗相间的条纹，亮条纹与亮条纹间、暗条纹与暗条纹间的距离相等。

②不同颜色的光波长不同，则干涉条纹间距不同，波长越长，条纹间距越大。

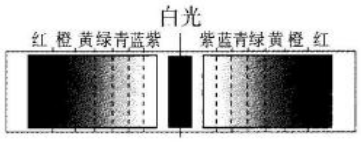
③若用白光作光源，干涉条纹是彩色条纹（同一级条纹内紫外红），且中央亮条纹是白色的。

双缝间距与光波频率对干涉图样的影响：①双缝间距相同，波长越短（频率越高）的光波，干涉条纹间距越小，反之间距越大；②频率相同的光波，双缝间距越大，干涉条纹间距越小，反之间距越大，如下图所示.



（5）干涉时的色散

白光是由多种色光组成的，利用白光做双缝干涉实验时，由于不同频率（波长）的单色光干涉产生的条纹间距不同，且波长越长、间距越大，因此各色光按照其波长有序排列，形成红、橙、黄、绿、青、蓝、紫颜色渐变的光谱，如下图所示.



中央条纹为白色的原因：

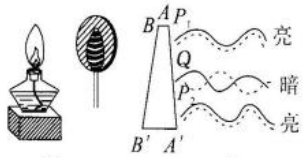
中央位置即为原理图中 P 点，P 点距两缝隙的距离相等，故所有单色光通过两缝隙到达 P 点时的相位相同，两列光在 P 点叠加后加强，故产生该单色光的明条纹. 所有单色光的明条纹叠加后形成白色光.

4. 干涉是波特有的现象，所以杨氏双缝干涉实验有力地证明了光是一种波。

三、光的干涉的应用

1. 薄膜干涉

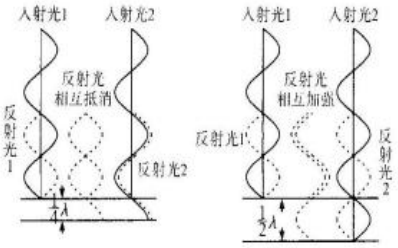
如图甲所示的为灯焰在竖直放置的肥皂薄膜上形成的干涉图样.



甲　　乙

形成原因：如图乙所示，竖直的肥皂薄膜由于重力的作用，形成上薄下厚的楔形. 光照射到薄膜上时，在膜的前表面 AA' 和后表面 BB' 分别反射回来，形成两列频率相同的相干波；由于前后两个反射光的路程差不同，在某些位置两列波叠加后互相加强，于是出现亮条纹；在另一些位置，两列波相遇后互相削弱，于是出现暗条纹.

原理分析：如下图所示，讨论薄膜厚度分别为 $\frac{1}{4}\lambda$、$\frac{1}{2}\lambda$ 时的干涉现象，由图可知两个表面反射回来的两列光波的路程差 Δr 等于薄膜厚度的 2 倍.



结论：

当 $\Delta r=n\lambda\ (n=1,2,3,\cdots)$ 时，薄膜上出现明条纹；

当 $\Delta r=\dfrac{(2n+1)\lambda}{2}\ (n=0,1,2,3,\cdots)$ 时，薄膜上出现暗条纹.

特别提醒：①实际上肥皂薄膜前后表面的夹角没有那么大，入射光线从两表面反射后的传播方向几乎一致，所以能够叠加在一起，出现干涉现象；②薄膜前后两表面并不是平面，所以条纹并不是等距的.

(3)薄膜干涉中应注意的三个问题

①相干光是从膜前、后两个表面反射回来的光，不是透过膜的光。

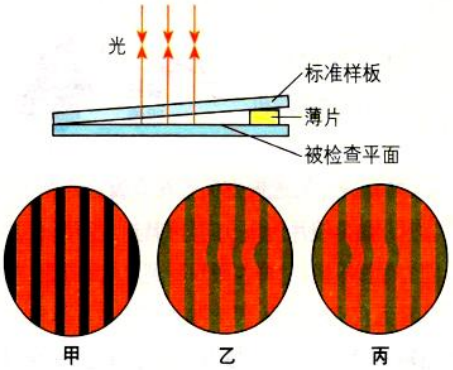
②观察干涉条纹时，眼睛与光源在膜的同一侧。

③用单色光和白光分别照射同一膜，观察到的现象是不同的。用白光照射膜时，某一位置红光得到加强，其他颜色的光被削弱，则在此位置看到的是红色，而另一位置则会看到黄色等其他颜色，因此，用白光做这个实验看到的将是彩色条纹。而在单色光照射下，只会出现明、暗相间的条纹。

(4)应用

①用干涉法检查平面的平整度

a. 如图所示，在被检查平面上放一个透明的标准样板，在其中一端垫一个薄片，使样板的标准平面和被检查平面之间形成一个楔形空气薄层。用单色光从上面照射，空气层的上下两个表面反射的两列光波发生干涉，形成干涉条纹。

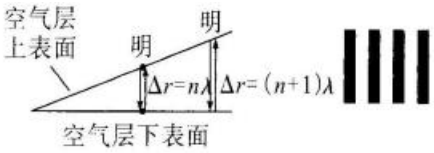


b. 空气层厚度相同的地方，两列波的路程差相同，两列波叠加时相互加强或削弱的情况也相同，所以，如果被检查平面是平的，干涉条纹就会平行无弯曲（如图甲）；若干涉条纹向楔形空气薄膜的尖端方向弯曲（如图乙），说明被检查平面有凹陷；若干涉条纹向楔形空气薄膜的厚端弯曲（如图丙），说明被检查平面有凸起。

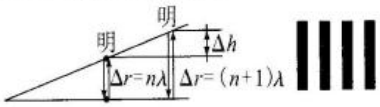
【拓展】任意一条亮条纹或暗条纹所在位置下面的空气层厚度相等，这些条纹是空气层等厚纹，由此可判断被检查平面的凹陷或凸起情况。

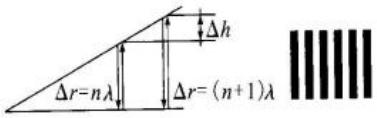
【注意】薄片一般为一（两）张纸的厚度，不可用身份证等比较厚的卡片代替。

原理分析：如下图所示，空气层上、下表面对应点的距离为 d，则两个表面反射回来的两列光波的路程差 $\Delta r=2d$，当 $\Delta r=n\lambda\ (n=1,2,3,\cdots)$ 时，图像上出现明条纹；当 $\Delta r=\dfrac{(2n+1)\lambda}{2}\ (n=0,1,2,3,\cdots)$ 时，薄膜上出现暗条纹.

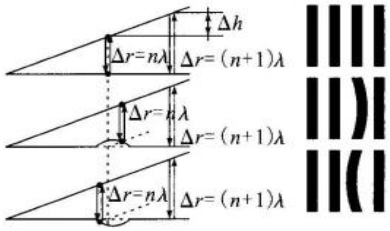


问题一：如下图所示，当楔形角的角度增大时，为保证相邻明条纹对应的空气层上表面的高度差 Δh 不变，明条纹间距 Δx 减小；反之明条纹间距增大.

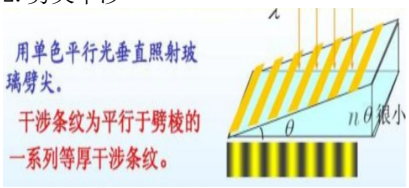




问题二：如下图所示，当零件表面出现凸起时，为保证两列光波的路程差 Δr 不变，则明条纹向楔形角外侧移动；反之明条纹向楔形角内侧移动.

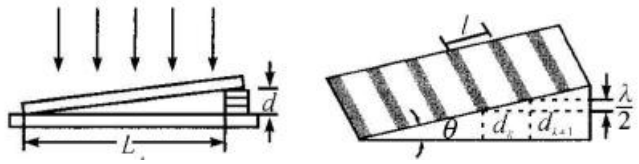


2. 劈尖干涉



$\delta=2d+\frac{\lambda}{2}=k\lambda(k=1,2,3,\cdots)$明条纹，

$\delta=2d+\frac{\lambda}{2}=\frac{2k+1}{2}\lambda(k=0,1,2,\cdots)$暗条纹.



①记忆口诀：右凸又拉稀（向右弯曲表示向上凸起，降低垫片的高度，条纹变得稀疏），或者记成：从尖端向宽部看过去，向尖端凸为凹陷，向宽部凸为突起（如图）。

但是要注意变化：如果放置方向改变，则结论相反（如图 3）

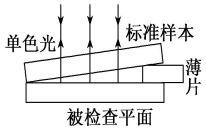


图 1



图 2

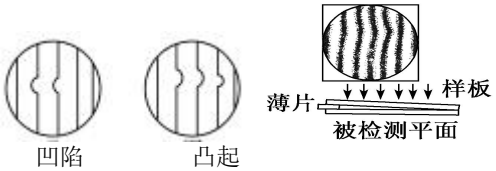


图 3

②**检查工件的平整程度**;这种测量的精度可达 $10^{-6}m$

3. 增透膜

a. 原理：光学镜头表面常常涂一层增透膜（氟化镁），使膜的厚度为绿光在膜中波长的 $\frac{1}{4}$，从增透膜前、后两个表面反射的绿光的路程差为 $\frac{\lambda}{2}$。由于人眼对绿光最敏感，各种色光射到镜头上时，从膜的前、后两个表面反射回来的绿光相抵消，即增强了绿光的透射强度，成像效果好。

b. 增透膜的颜色：通常镜头上的增透膜的厚度是以感光作用最好的绿光为标准的，被反射回的紫光等不能完全相消，故镜头一般呈淡紫色或蓝紫色。

【人眼对黄绿色光最敏感】

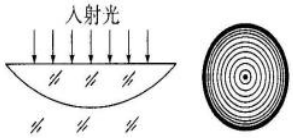
4. 增反膜

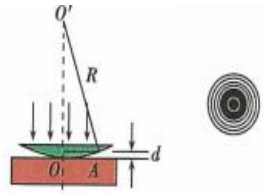
厚度：为减少紫外线的透射，眼镜片上的增反膜厚度为紫外线在膜中波长的 $\frac{1}{2}$。

原理：膜前后表面引起的反射波相遇时干涉加强。

5. 牛顿环（牛顿首次发现）

凸透镜的弯曲表面是一个球面，把一个凸透镜压在一块平面玻璃上，让单色光从上方射入，可看到圆环环状的干涉条纹，且远离中心点处亮环的分布较密.





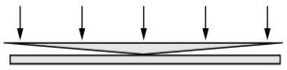
牛顿环所产生的干涉条纹的规律是越靠近中心，条纹的宽度越宽。这一点可用劈尖干涉的结论来理解。如图，靠近中心处劈尖顶角减小，$\Delta l=\frac{\lambda}{2\theta}$增大。



利用牛顿环可以精确检测光学元件表面的精确度，可精密地测定压力或长度的微小变化。

【变式】

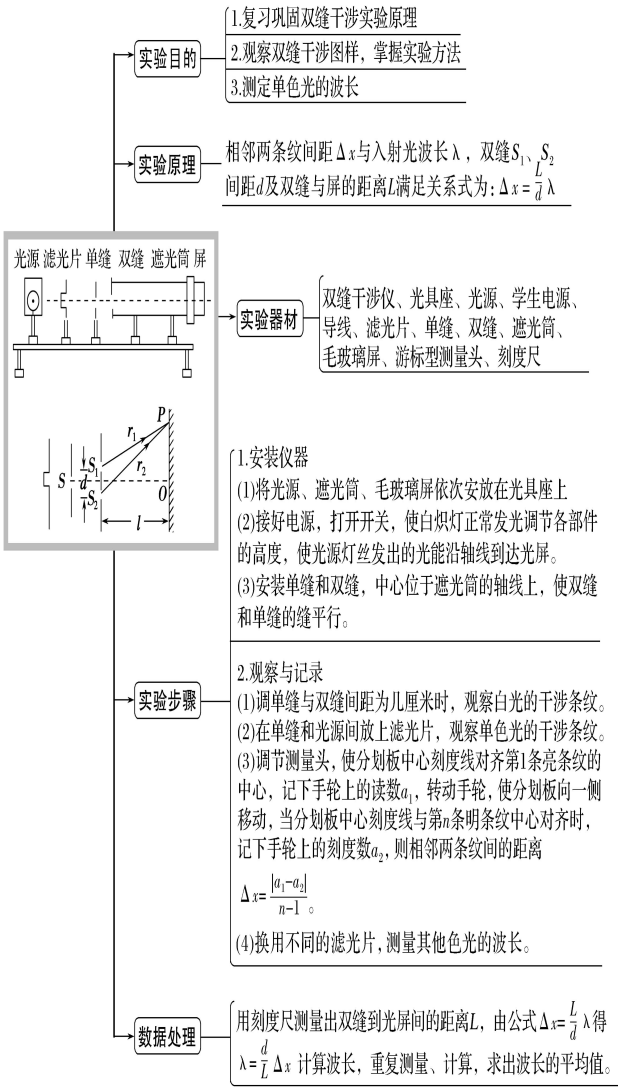
如图所示，把一个底角很小的圆锥玻璃体倒置(上表面为圆形平面，纵截面为等腰三角形)，紧挨玻璃体下放有一平整矩形玻璃砖，它和圆锥玻璃体间有一层薄空气膜. 现用红色光垂直于上表面照射，从装置的正上方向下观察，可以看到



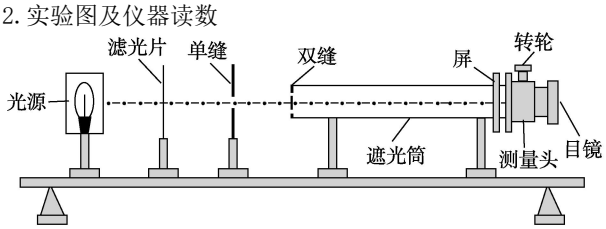
一系列明暗相间的等间距圆形条纹

第 4 节　实验：用双缝干涉测量光的波长

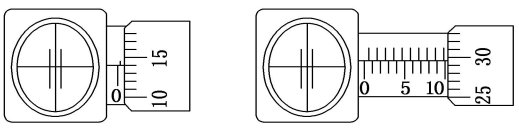
1.实验原理与操作



2. 实验图及仪器读数



【数据处理】数量级：10^{-7} m



甲　　乙

甲图：0.640mm 或 0.641mm　乙图：10.293～10.295mm

3.注意事项

(1)保证灯丝、单缝、双缝、测量头与遮光筒共轴。

(2)保持单缝和双缝平行（单缝与双缝之间的距离保持 5-10cm）。

(3)测双缝到屏的距离 L 可用米尺测量多次，取平均值。

(4)测条纹间距Δx 时，理论上用测量头测出 n 条亮(暗)条纹间的距离 a，求出相邻的两条亮(暗)条纹间的距离Δx＝$\frac{a}{n-1}$。

【但为便于观察，分划板应对准亮条纹中心，因为暗条纹的中心位置不利于确定】

（5）由白光的干涉观察到的是彩色条纹，其中白色在中央，红色在最外层（紫内红外）。

4.仪器的作用

①凸透镜：聚光作用。

②滤光片：过滤色光。如红色滤光片，只有红光可以通过。

③单缝：形成线光源。

④双缝：形成两相干光。

⑤遮光筒：使光从双缝到达光屏，进行观察。

⑥毛玻璃：条纹成像。

⑦测量头：测量条纹位置。

⑧手轮：转动手轮可使分划板移动。

⑨目镜：观察条纹。

5.仪器的调节

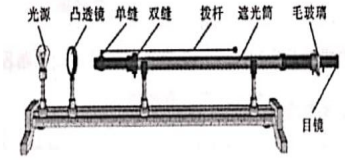
①调节测量头：若分划板竖线与亮条纹有夹角（亮条纹竖直，分划板十字线倾斜）旋转测量头，使条纹与分划板平行。

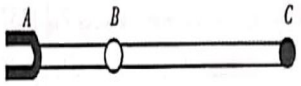
②调节的基本依据：照在屏上的光很弱，主要是由灯丝与单缝，双缝，测量头和遮光筒的轴线不共线所致。干涉条纹不清晰主要是由单缝与双缝不平行所致。

③若改用激光做该实验，则可以不经过单缝，直接过双缝就可以完成实验。

④若条纹偏离竖直方向（此时双缝方向不完全是竖直状态），可旋转整个遮光筒使其竖直。

⑤拨杆：只能左右调节单缝，使单缝与双缝平行，形成清晰条纹。





⑥关于拨杆的安装和操作：

拨杆 B 处小孔套在双缝所在处的支柱，手持拨杆的 C 端，通过手的左右拨动来调节 A 丫字叉套住的单缝



【单缝实物图】

6. 误差分析

(1)双缝到光屏的距离 l 的测量存在误差.

(2)测条纹间距 Δx 带来的误差：

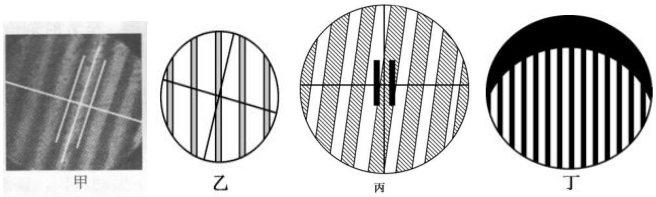
①干涉条纹没有调整到最清晰的程度；

②误认为 Δx 为亮条纹的宽度；

③分划板中心刻线与干涉条纹不平行，中心刻线没有恰好位于亮条纹中心；

④测量多条亮条纹间的距离时读数不准确，此间距中的条纹数未数清.

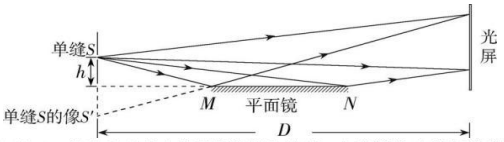
（3）误差分析图例：



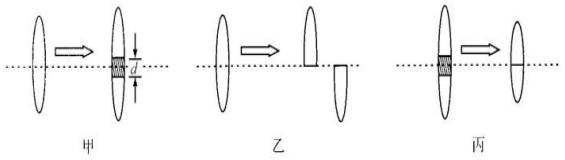
甲图测的的波长准确，乙图、丙图测得的波长都偏大，【规律：只要分划板中心线与条纹不平行，则测量值偏大，因为是分划板在移动，实际值$\Delta x_{实}=\Delta x\cos\theta$，$\theta$为条纹与分划板中心刻线间的夹角，故$\Delta x_{实}<\Delta x$.】。

丁图可能是安装设备时，没有调节光源的高度，使光线把整个光屏都照亮。

7.一分为二法产生“两”光源：（洛埃德镜）



如图 61-9 甲所示，过光心将凸透镜对切，拉开一小段距离，中间加挡光板或错开一段距离（如图 61-9 乙），或两片切口各磨去一些再胶合（如图 61-9 丙），置于透镜原主轴上的点光源或平行于原主轴的平行光线，经过对切透镜折射后，在叠加区也可以发生干涉。

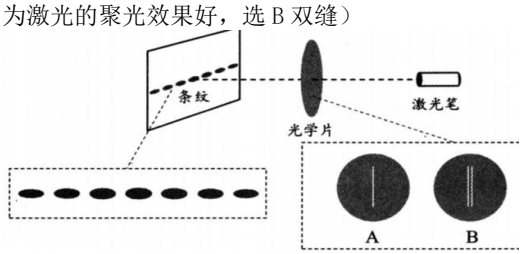


【记忆口诀】

亮光源、滤光片，单缝双缝成一线；　分划线，亮条纹，对齐平行测得准；
遮光筒、测量头，中间有屏把像留；　n 条亮纹读尺数，相除可得邻间距；
单缝双缝平行放，共轴调整不能忘；　缝距筒长记分明，波长公式要记清。

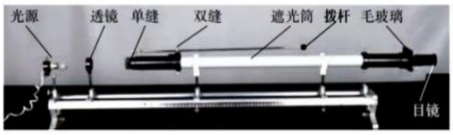
【拓展】

①若把光源换成激光，则无需单缝，并且条纹将变为如图所示（因为激光的聚光效果好，选 B 双缝）



②若把光源换成 LED 灯（发光二极管）的话，则由于发光二极管内带有抛物面反光镜，其准直性非常好、单色性好，完全可以省去凸透镜、滤光片、学生电源（使用 220 伏交流电压只需将发光二极管放在单缝前 2cm 左右处即可，故使用发光二极管做双缝干涉实验比钠光源和小灯泡效果更好。

【典例 1】如图所示装置做“用双缝干涉测量光的波长”实验。



第 17 题 图 3

①该装置采用的光源是__▲__。

A.单色激光　B.颜色可调的激光　C.LED 灯　D.低压钨丝小灯泡

②实验过程中，金属拨杆的作用是__▲__。

【答案】

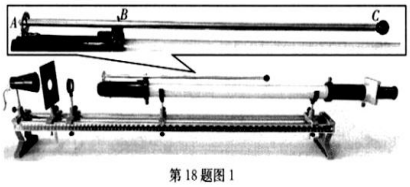
①D(1 分)

②调节单缝与双缝平行，使不够清晰的干涉图样变清晰(2 分)

【典例 2】

(2)在“用双缝干涉测量光的波长”的实验中，实验装置如图 1 所示，A、B、C 分别为拨杆上的三个位置。

①下列关于拨杆的功能、安装及操作的说法中，正确的是__▲__。



第 18 题图 1

A. 用手拨动拨杆可使单缝与双缝平行，从而使干涉图样更清晰

B. 拨杆 A 端插入单缝上的卡口中，用手左右拨动拨杆的 C 端使 B 处左右移动，并带动 B 处小孔中套入的支柱

C. 拨杆 B 处小孔套入双缝所在处的支柱，用手左右拨动拨杆的 C 端使 A 端左右移动，并带动单缝上的卡口

D. 拨杆 B 处小孔套入双缝所在处的支柱，用手上下拨动拨杆的 C 端使 A 端上下移动，并带动单缝上的卡口

【答案】AC

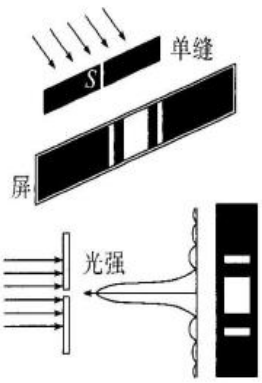
第 5 节　光的衍射

一、光的衍射

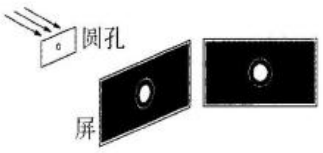
(1)**定义**：当光照射到缝或障碍物时，光没有沿直线传播，它绕过了缝或障碍物的边缘，传播到了相当宽的地方，这就是光的衍射现象。

（2）发生明显衍射的条件：只有当障碍物的尺寸与光的波长相差不多，甚至比光的波长还小的时候，衍射现象才会明显.

a. **单缝衍射**

示意图	
单色光	中央为亮且宽的条纹，两侧为明暗相间的条纹，且越靠外，亮条纹的亮度越弱，宽度越小
白光（衍射色散）	中央为亮且宽的白色条纹，两侧为亮度逐渐变暗、宽度逐渐变窄的彩色条纹，其中最靠近中央的色光是紫光，离中央最远的是红光

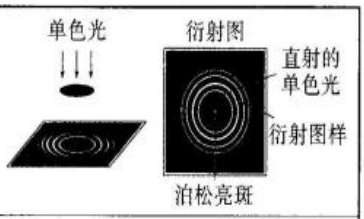
b. **圆孔衍射**

示意图	
单色光	①中央是大且亮的圆形亮斑，周围分布着明暗相间的同心圆环条纹，且越靠外，圆环亮条纹的亮度越弱，宽度越窄 ②亮环或暗环间的距离随圆孔半径的增大而减小
白光（衍射色散）	中央是大且亮的白色亮斑，周围是不等间距的彩色同心圆环条纹

思考：用太阳光照射圆孔，同时圆孔的直径由大（几厘米）逐渐减小，分析屏上图像的变化规律.

当孔足够大时，由于光沿直线传播，所以屏上首先出现圆形光斑；之后随着孔继续减小，出现小孔成像，成的是太阳的像，故屏上出现小光斑；随着孔的进一步缩小，当孔的尺寸与光波波长相当时，出现中央大且亮的圆形亮斑，周围是不等间距的彩色同心圆环条纹，最后随孔的闭合而全部消失.

c. 圆盘衍射(泊松亮斑)

示意图	
单色光	①在圆盘的阴影中心出现明亮的亮斑(泊松亮斑)，在阴影外分布着明暗相间的同心圆环条纹，且越靠外，圆环亮条纹的亮度越弱，宽度越小 ②亮环或暗环间的距离随圆孔半径的增大而减小
白光(衍射色散)	在圆盘的阴影中心出现明亮的白色亮斑(泊松亮斑)，在阴影外分布着不等间距的彩色同心圆环条纹

二、单缝衍射与双缝干涉的比较

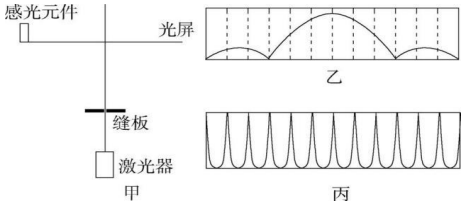
1.异同点

两种现象 / 比较项目		单缝衍射	双缝干涉
不同点	条纹宽度	条纹宽度不等，中央最宽	条纹宽度相等
	条纹间距	各相邻条纹间距不等	各相邻条纹等间距
	亮度情况	中央条纹最亮，两边变暗	条纹清晰，亮度基本相同
相同点		干涉、衍射都是波特有的现象，属于波的叠加；干涉、衍射都有明暗相间的条纹	

2.光的干涉和衍射的本质

光的干涉和衍射都属于光的叠加，从本质上看，干涉条纹和衍射条纹的形成有相似的原理，都可认为是从单缝通过两列或多列频率相同的光波，在屏上叠加形成的。

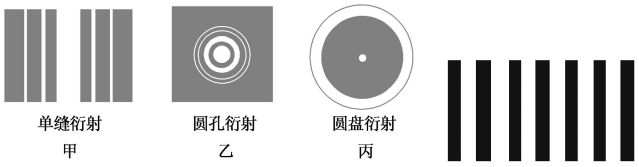
【注意】做单缝衍射实验和双缝干涉实验时，用激光比用普通光源效果更好，图像更清晰。



三、泊松亮斑(圆盘衍射)

①当光照射到不透明的半径很小的小圆盘上时，在圆盘的阴影中心出现亮斑 ，在阴影外还有不等间距【越往外条纹越窄】的明暗相间的圆环。(如图丙所示)

②几种条纹图样对比



【说明】丙图为圆盘衍射，其中央亮斑为“泊松亮斑”。（由阿拉果通过实验发现）

四、衍射光栅

实验表明，如果增加狭缝的个数，衍射条纹的宽度将变窄，亮度将增加。光学仪器中用的衍射光栅就是据此制成的。它是由许多等宽的狭缝等距离地排列起来形成的光学元件。在一块很平的玻璃上刻出一系列等距的平行刻痕，刻痕产生漫反射而不太透光，未刻的部分相当于透光的狭缝，这样就做成了透射光栅（图 4.5-5）。如果在高反射率的金属上刻痕，就可以做成反射光栅。



五、X 射线衍射与双螺旋

利用 X 射线衍射探测晶体的结构，劳厄的观测，同时证实了 X 射线的波动性和晶体内部的原子点阵结构，被爱因斯坦誉为物理学中最美的实验。

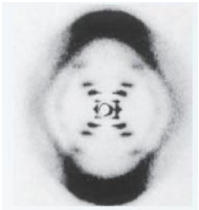
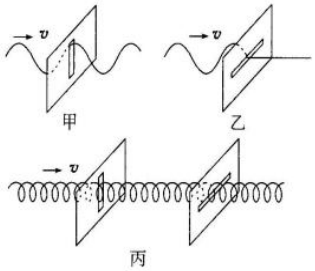


图 4.5-8　富兰克林使用X射线拍摄的 DNA 晶体

第 6 节 光的偏振　激光

一、偏振

横波的振动方向与传播方向垂直，当横波通过缝隙时，若振动方向与缝隙共平面，如图甲所示，则该横波可通过缝隙；若横波的振动方向与缝隙垂直，如图乙所示，则该横波不能通过缝隙传播. 纵波的振动方向与传播方向共线，无论缝隙如何摆放，纵波都可以穿过缝隙传播，如图丙所示.



偏振现象：光波只沿某个特定方向的振动的现象.

偏振现象的物理意义：光的偏振证明光是横波.

光的波动性的总结：①光的干涉现象、衍射现象证明光具有波的性质，即波动性；②偏振现象证明光是横波.

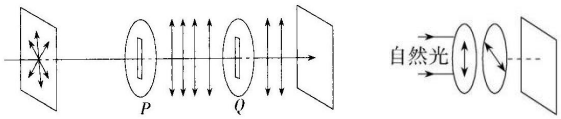
二、光的偏振

1.自然光与偏振光的比较

	自然光(非偏振光)	偏振光
光的来源	直接从光源（如太阳、电灯等普通光源）发出的光	①自然光通过偏振片后的光 ②自然光被界面反射或折射后的反射光或折射光可以成为部分偏振光或完全偏振光。
光的振动方向	在垂直于光的传播方向的平面内，光沿一切方向振动，且沿各个方向振动的光波的强度相同	在垂直于光的传播方向的平面内，光沿一个特定方向振动
联系	自然光通过偏振片后或被界面反射、折射后就转变为偏振光	

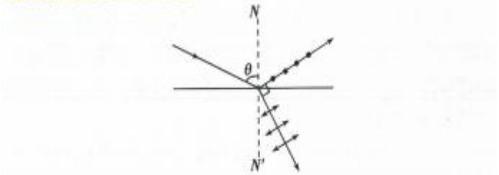
【注意】1.光是传播中的电磁场，即电磁波。“电磁波的振动方向”指的是其中电场的方向。

【拓展】只要光的偏振方向不与偏振片的透振方向垂直，都可以不同程度地通过偏振片。即光的偏振方向与偏振片的透振方向成一定夹角θ时$(0<\theta<90^\circ)$，光可以部分通过偏振片，θ越小透过的光越多。



【注意】2. 偏振片上没有狭缝，图中狭缝只是为了形象地表示偏振片的透振方向。

2. 规律：自然光射到两种介质的交界面，如果入射的方向合适，使反射光线和折射光线之间的夹角恰好是90°时，反射光和折射光都是完全偏振光，且偏振方向相互垂直，反射光的振动方向垂直于入射光线与法线决定的平面，折射光的振动方向平行于入射光线与法线所决定的平面。



【注意】3.若自然光只通过一块偏振片无法说明光的偏振。

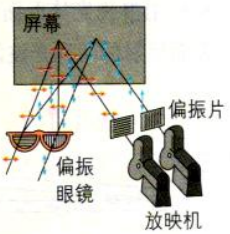
3.光的偏振的应用

水下景物的拍摄、拍摄日落时的景物、玻璃橱柜里的陈列品的拍摄、观看 3D 电影、汽车的前灯玻璃和前挡风玻璃都为偏振片、液晶显示（加偏振滤光片的照相机镜头、液晶显示器、立体电影、消除车灯眩光等）。

(1)立体电影

①拍摄时，用两个镜头如人眼看物一样从两个不同方向同步拍摄，制成胶片。

②放映时，通过两台放映机同步放映两组胶片，每台放映机前安装一块偏振片，两偏振片的透振方向互相垂直。



③观众戴两镜片透振方向分别与上述两偏振片相同的偏振眼镜。这样左眼只看到左机的画面，右眼只看到右机的画面，经大脑加工产生立体感。

(2)摄影技术中的应用：摄影师在拍摄池中的游鱼、玻璃橱窗里的陈列物时，由于水面和玻璃表面的反射光的干扰，景象会不清楚。如果在照相机镜头前装一片偏振滤光片，转动滤光片，让它的透振方向与水面和玻璃表面的反射光的偏振方向垂直，就可以减弱反射光而使水下和玻璃后的景象清晰。

(3)偏振片在汽车挡风玻璃上的应用

在夜间行车时，迎面开来的汽车的车灯眩光常常使司机看不清路面，容易发生事故。如果在每辆车灯玻璃上和司机前面的挡风玻璃上安装一块偏振片，并使它们的透振方向跟水平方向成45°角，就可以解决这个问题。

三、激光的特点及其应用

1 激光：频率、传播方向、偏振、相位等性质完全相同的光波。

2.激光的产生：原子激发产生的光，是人工产生的光（自然界中不存在）（1960 年由美国物理学家梅曼率先在实验室里制造出来的），目前有气体激光器、半导体激光器、染料激光器、宝石激光器等，其特点如下：

特点	性质	应用
相干性	只有频率相同、相位差恒定、偏振方向一致的光才是相干光。激光是一种人工产生的相干光，具有高度的相干性	激光能被调制，用来传递信息，光纤通信就是激光和光导纤维相结合的产物。
平行度	激光的平行度非常好，在传播很远的距离后仍能保持一定的强度	精确的测距；读取光盘上记录的信息等
高亮度	它可以在很小的空间和很短的时间内集中很大的能量	用激光束切割、焊接；医学上可以用激光做“光刀”；激发核反应等

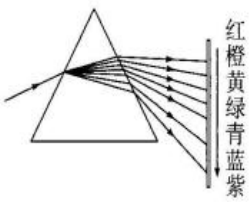
3 普通光源发出的自然光是许多频率、相位、偏振.以及传播方向各不相同的光的杂乱无章（随机）的混合。这导致两个独立的普遍光源发出的光不会发生干涉。

四、光的颜色、色散【补充】

定义：含有多种颜色的光被分解为单色光的现象称为光的色散.

产生色散的原因：含有多种颜色的光从一种介质进入另一种介质，由于介质对不同色光的折射率不同，各种色光的偏折程度不同，所以产生光的色散.

光谱：含有多种颜色的光被分解以后，各色光按照波长的长短有序排列，这种颜色连续变化的光带就是光谱，如图所示.



色散规律：

①波长越小，偏转角越大，折射率越大；

②不同颜色的光，频率不同，在同种介质中传播时波长不同，波速不同；

③光的颜色与频率有关，当光由一种介质进入另一种介质时频率不变，故颜色不变.

各种色光的比较

颜色	红橙黄绿青蓝紫
频率 f	低→高
同一介质中的折射率	小→大
同一介质中速度	大→小
波长	大→小
临界角	大→小
通过棱镜的偏折角	小→大

【记忆口诀】

自行发光是光源，同种均匀直线传。
若是遇见障碍物，传播路径要改变。
反射折射两定律，折射定律是重点。
斜入介质折射率，两角正弦值来比，
还可运用速度比，波长比值也使然。
全反射，要牢记，入射光线在光密。
夹角大于临界角，折射光线无处觅。
干涉衍射和偏振，各种现象要对应。
红橙黄绿青蓝紫，速度波长红光大。

【常见光现象小结】

1. 光的干涉现象：增反膜、增透膜、检查工件平整度、彩色油膜、彩色肥皂泡、全息照相。
2. 光的衍射现象：泊松亮斑、大雾天气用红光灯。
3. 光的色散现象：大自然中的虹、霓、晕、华现象。钻石看起来五光十色。洒水车喷出的水珠在阳光照耀下出现的彩色现象。

【本章高频考点】

1.光的折射和全反射的相关计算。

2.光的本性的应用。

第二部分 物理方法概述

一、比值定义法

所谓比值定义法，就是用两个物理量的“比”来定义一个新的物理量的方法。例如密度、速度、加速度、电阻、电场强度、电容、电流等均为用比值定义法定义的物理量。

二、对称法

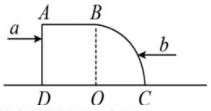
应用对称性求解某些具体的物理问题的方法称为对称法。利用对称法分析光路问题，可以快速得出光的入射角或折射角，确定光路中的几何关系，避免复杂的数学演算和推导，大大提升解题效率。

三、临界分析法

通过前面的学习，我们已经了解到临界分析法就是直接从临界状态和相应的临界值入手，求出所研究问题的特殊规律和特殊解，然后以此对一般情况进行分析、讨论和推理的方法。在光学问题中，一般需要找出特殊光线，如“恰好发生全反射的光线”“恰好能射入介质（能从介质射出）的光线”“沿半径方向入射的光线”。

第三部分 易错、疑难问题选

1. 一玻璃砖横截面如图，ABOD 是正方形，BC 是四分之一圆弧，OB、OC 为其半径，现将 CD 面置于水平桌面上，单色光 a、b 分别从 AD 平面和 BC 曲面水平入射，只考虑 a、b 第一次到达 BC 面和 AD 面的情况，下列说法正确的是



A. a 光线的位置向上平移（光线仍能射出 BC），在穿过玻璃砖后到达桌面位置距 C 变近

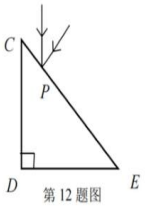
B. 从 BC 曲面进入玻璃砖的 b 光线会在 BC 面发生全反射

C. 从相同高度入射的 a、b 光线，穿过 BC 曲面后折射角大的，玻璃砖对其折射率也大

D. 若玻璃砖对 a 光线折射率为 $\sqrt{2}$，从 AD 中点入射的 a 光线照射到 BC 面上会发生全反射

【答案】A

2. 截面为等腰直角三角形的棱镜叫全反射棱镜，这种棱镜在光学仪器中广泛用于改变光的传播方向。如图所示，一激光笔发射出一束光线从 CE 边上的 P 点射入棱镜，P 点离 C 点距离为 CE 边长的 $\frac{1}{4}$，入射光方向可调，强度不变。现使入射光从垂直于 DE 方向顺时针逐渐旋转到垂直于 CE 方向，已知此棱镜的折射率为 $\sqrt{2}$，CD 边长为 L，不考虑光在 CE 边的反射光线，在此过程中以下说法正确的是（　）



第 12 题图

A. 入射光射入棱镜后可能从 CD 边射出

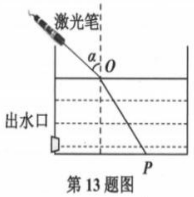
B. 垂直于 DE 方向入射的光线在 P 点的折射光线和反射光线的夹角为 120°

C. 垂直于 CE 方向入射的光线在棱镜中的时间为 $\frac{\sqrt{2}L}{C}$

D. 随着入射光线的旋转，从 DE 边反射光线的强度越来越强

【答案】D

3. 如图所示，激光笔发出一束激光射向水面 O 点，经折射后在水槽底部形成一光斑 P。已知入射角 $\alpha=53°$，水的折射率 $n=\frac{4}{3}$，真空中光速 $c=3.0\times10^8$m/s，打开出水口放水，则光斑在底面移动时



第 13 题图

A. 激光在水中传播的速度 $v=4.0\times10^8$m/s

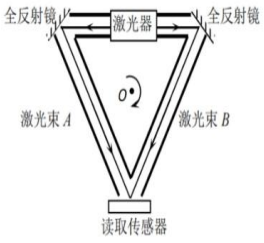
B. 仅增大入射角 α，激光能在水面发生全反射

C. 光斑 P 移动的速度大小保持不变

D. 光斑 P 移动距离 x 与水面下降距离 h 间关系满足 $x=\frac{7}{12}h$

【答案】D

4. 激光陀螺能精确确定运动物体的方位，其工作原理如图所示，激光器位于正三角形一边正中央，其发出一束激光并能被分成沿相反方向传播的两束激光，两束激光相遇时会产生干涉，利用检测相位差或干涉条纹的变化，可以测出闭合光路旋转的角速度，进而确定物体的方位。若整个装置绕垂直纸面过中心点 O 的转轴顺时针转动，则



第 14 题图

A. 激光束 A、B 的频率可能不同

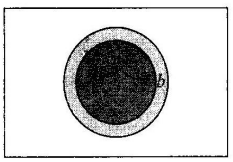
B. 激光束 A 比 B 传播的路程小

C. 随着角速度增大，读取传感器接收到明暗交替的条纹

D. 无论转动的角速度多大，读取传感器始终接收到明条纹

【答案】BC

5. 方形透明容器充满某种透明液体，液体的深度 $h=20$ cm，在容器底部中心有一个点状复色（两种颜色）激光光源，光源的大小可忽略不计，液面上形成的光斑俯视图如图所示，测得液面内部光斑 a 的直径 $d=30$ cm，外部光环 b 的宽度 $\Delta d=6$ cm，下列说法正确的是　（　）



A. 光斑 a 和光环 b 都是由单色光形成的

B. 若仅将液体的深度 h 变大，则光斑的面积变大

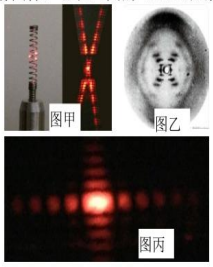
C. 液体对两种色光的折射率之比为 35∶29

D. 光环 b 为单色光，这种色光在液体中的传播速度比另一种色光的传播速度小

【答案】BC

6. 甲图是用激光水平照射竖直圆珠笔中的小弹簧得到的衍射图样，它和乙图的 DNA 双螺旋结构的 X 射线衍射图样非常相似，我们常用衍射图样来分析事物的形状结构。请根据单缝衍射的实验规律，分析激光通过下列哪个小孔可得到丙图衍射图样

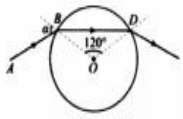

A.　B.　C.　D.



第 6 题

【答案】A

7. 如图所示，真空中一半径为 R、质量分布均匀的玻璃球，频率一定的细激光束在真空中沿直线 AB 传播，于玻璃球表面的 B 点经折射进入小球，并在玻璃球表面的 D 点又经折射进入真空中，已知 $\angle BOD=120°$，玻璃球对该激光的折射率为 $\sqrt{3}$，c 为光在真空中的传播速度，则下列说法中正确的是（　）



（第 7 题图）

A. 激光束在 B 点的入射角 $\alpha=30°$

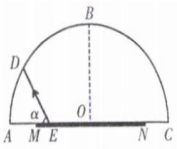
B. 此激光束在玻璃中穿越的时间为 $\frac{\sqrt{3}R}{c}$

C. 光在玻璃球中频率比在真空中要小

D. 改变入射角 α 的大小，细激光束不可能在球表面处发生全反射

【答案】D

8. 一种发光装置是由半径为 R 的半球体透明介质和发光管芯组成的，管芯发光部分 MN 是一个圆心与半球体介质球心 O 重合的圆面。其纵截面如图所示，$OB\perp AC$，MN 上的 E 点发出的一条光线经 D 点的折射光线平行 OB，已知 $\alpha=60°$，圆弧 AD 长 $\frac{\pi R}{6}$，则



A. 该透明介质折射率为 $\sqrt{2}$

B. 沿 EB 方向的光线从半球面射出时的折射角是 45°

C. 为使从管芯射向半球面上的所有光线都不会发生全反射，MN 的半径要小于 $\frac{\sqrt{3}}{3}R$

D. 不论发光管芯的半径多大，总会有部分光线到达球面时发生全反射现象

【答案】C

9. 用平行单色光垂直照射一层透明薄膜，观察到如图所示明暗相间的干涉条纹。下列关于该区域薄膜厚度 d 随坐标 x 的变化关系，可能正确的是



A. 薄膜层的厚度随坐标 x 增大而减小

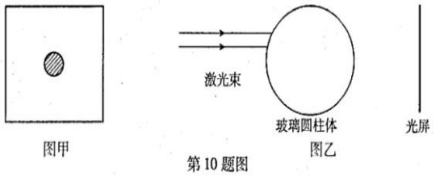
B. 薄膜层的厚度随坐标 x 增大而均匀增大

C. 薄膜层厚度的变化率不随坐标 x 变化而变化

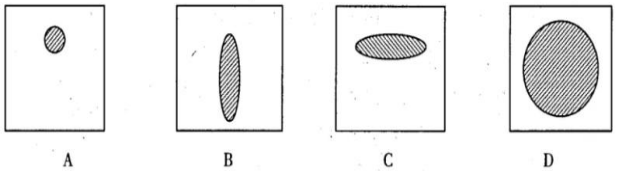
D. 薄膜层厚度的变化率随坐标 x 增大而逐渐增大

【答案】A

10. 一束激光垂直照射在光屏上，形成一圆形光斑如图甲所示。现在光屏前放置一透明的玻璃圆柱体，让激光垂直圆柱体轴线入射，光束经过圆柱体后照射在光屏上，如图乙所示。则在光屏上观察到的光斑形状可能为

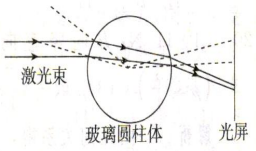


第 10 题图

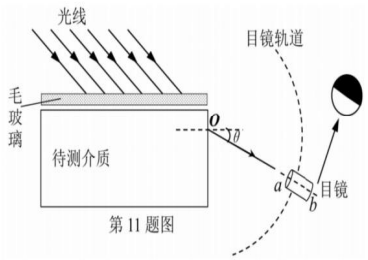


【答案】B

B　**解析**：激光束照在圆柱体上，沿圆柱体轴上的光线即水平方向上的光线，经相同的入射角折射，两次折射后，同一水平方向上的光线折射偏转角度相同，光线平行，故在光屏上水平方向上的光斑宽度不变。如图所示，竖直方向上光线通过圆柱体之后有会聚现象，根据光屏与玻璃圆柱体的位置关系，光斑的长度可能变大，可能变小，也可能不变。由于图中的入射光束在圆心上方，故光路往下偏，光斑的中心不可能呈现在光屏的上方。综上所述，B 有可能，A、C、D 均不可能。故选 B。



11. 如图 11 所示是一种测量介质折射率的方法。在矩形介质的上表面，覆盖一块毛玻璃，两者之间有很薄的空气层。光照射到毛玻璃，经毛玻璃透射后可以以任意角度射到待测介质的上表面。在介质的另一个侧面外有一个目镜，目镜可以在以 O 为圆心的轨道上转动，移动目镜时光轴 ab 始终指向 O 点。测量过程中，从目镜的视场中出现半明半暗的视野（如图所示），此时对应的 $\theta=60°$，目镜再逆时针往上转，视场中就是全暗的视野了。则该介质折射率为



第 11 题图

A. $\frac{2\sqrt{3}}{3}$　　B. $\frac{\sqrt{7}}{2}$

C. $\sqrt{2}$　　D. $\sqrt{3}$

【答案】B

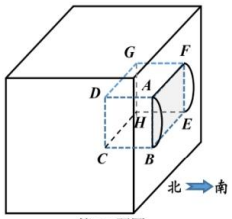
12. 如图所示，为了给一座特殊的密闭仓库采光，在正南朝向的竖直壁上切开一个正方形孔，并在孔内镶嵌一块折射率为 $\sqrt{2}$ 的玻璃砖。这块玻璃砖的室内部分是边长为 $2R$ 的正方体，室外部分是半圆柱。正午时阳光恰好与竖直面成 45° 角斜向下方射向半圆柱面，则

A. 没有光从 $ADGF$ 面射出

B. 光经半圆柱面折射后的光线与水平面的夹角均增大

C. 半圆柱面的折射光线能全部到达 $BCHE$ 面

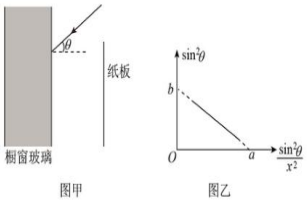
D. 半圆柱面的折射光线到达 $CDGH$ 面的区域面积为 $(2-\sqrt{2})R^2$



第 12 题图

【答案】D

13. 竖立的橱窗玻璃比一般的玻璃厚，嵌在墙体内部。如图甲所示，某同学的测量过程如下：激光笔发出细激光束以入射角 θ 照射玻璃，反射后在竖直的纸板上出现几个亮度不同但间隔均匀的亮斑，测出相邻亮斑间的距离 x，改变入射角度，测得多组数据，以 $\sin^2\theta$ 为纵坐标、$\frac{\sin^2\theta}{x^2}$ 为横坐标，描点后拟合出直线，如图乙所示，测出图线在横轴的截距为 $a=6.25\times10^2\text{m}^{-2}$，纵轴的截距 $b=2.25$，下列说法正确的是



图甲　　图乙

A. 该橱窗玻璃的厚度为 6cm

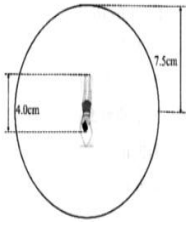
B. 该玻璃对该激光的折射率为 $n=1.5$

C. 减小 θ 角，纸板上相邻亮斑间的距离增大

D. 仅换用频率较小的激光，纸板上相邻亮斑间的距离减小

【答案】B

14. 夏天，游泳是孩子们最喜欢的运动项目之一。如图所示是某市水上运动中心安置在游泳池中底部的照相机拍摄的一张小红游泳的照片，相机的镜头竖直向上，照片中运动馆的景象呈现在半径 $r=7.5\text{cm}$ 的圆形范围内，水面上的小红头到脚的长度 $l=4.0\text{cm}$。若已知水的折射率 $n=\frac{4}{3}$，小红实际身高 $h=160\text{cm}$，则下列说法正确的是



A. 游泳池的水深约为 2.6m

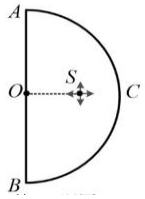
B. 游泳池的水深约为 3.6m

C. 该题涉及的物理知识是干涉和衍射

D. 该题涉及的物理知识是折射和全反射

【答案】AD

15. 如图所示，均匀透明材料制作成的半圆柱的截面为半圆形 ABC，O 为圆心、半径为 R、AB 为直径边界，ACB 为半圆弧边界，该材料对绿光的折射率 $n=2$。有一点光源嵌于 S 点，在纸面内各个方向发射绿光。已知 SO⊥ AB，且 SO=$\frac{\sqrt{3}}{3}R$.若不考虑光在材料内部的反射，则



A. 直径边界与圆弧边界有光线射出的总长度为$\frac{\pi+2}{6}R$

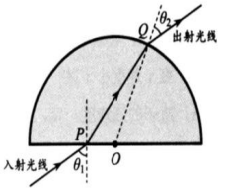
B. 直径边界与圆弧边界有光线射出的总长度为$\frac{\pi+2}{3}R$

C. 若改用红光光源，有光射出的边界总长度将变长

D. 若改用红光光源，有光射出的边界总长度将变短

【答案】BC

16. 如图所示，截面为半圆形的透明介质的圆心为 O、半径为 R。一束单色光从直径上的 P 点平行截面射入，入射角 $\theta_1=60°$，在圆弧上 Q 点射出的出射角 $\theta_2=30°$，已知 P 点到圆心 O 的距离为 $R/3$。下列说法正确的是



A. 透明介质对单色光的折射率为 1.5

B. 单色光在透明介质中传播速度为$\sqrt{3}\times10^8$ m/s

C. 当 $\sin\theta_1=\frac{\sqrt{30}}{10}$时，出射光线与入射光线互相平行

D. 若改变入射角度 θ_1，光线可能在圆弧面发生全反射

【答案】BC

17. 如图所示是指纹识别原理图，其原理是利用光学棱镜的全反射特性，在指纹谷线（凹部）入射光在棱镜界面发生全反射，在指纹脊线（凸部），入射光的某些部分被吸收或者漫反射到别的地方，这样，在指纹模块上形成明暗相间的指纹图像。已知水的折射率约为1.33，透明玻璃的折射率约为1.5，下列说法正确的是



A. 指纹模块接收光线较暗的部位是指纹谷线

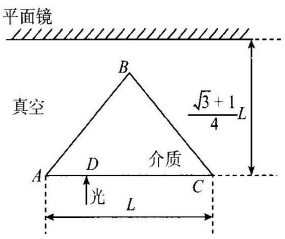
B. 指纹模块接收光线较亮的部位是指纹谷线

C. 没有手指放入时，若光源正常发光，指纹模块会接收到全暗图像

D. 手指湿润时，指纹识别率低，是因为光在棱镜和手指界面不能发生全反射

【答案】B

18.如图所示，有一截面为等腰直角三角形 ABC 的光学介质，其上方放置了一块平面镜，该平面镜所在平面与三角形的底面 AC（长为 L）平行且相距为$\frac{\sqrt{3}+1}{4}L$. 现一束光从底面上的 D 点（与 A 点距离为$\frac{1}{4}L$）垂直底面入射，该束光在界面 AB 上的 E 点（图中未画出）发生反射和折射；若把反射光到达界面 BC 的位置记为 F 点（图中未画出），发现折射光经过平面镜发生一次反射后也恰能到达 F 点. 下列说法正确的是（设三角形介质和平面镜均处于真空中）（　　）



A. 介质内的反射光有可能在 F 点发生全反射

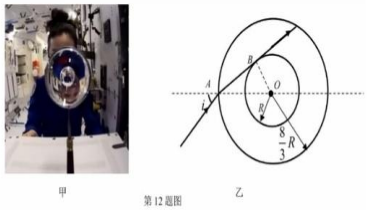
B. 该介质对该光束的全反射临界角的正弦值为$\frac{\sqrt{3}-1}{2}$

C. 在 E 点的反射光的光速是折射光的光速的$\frac{\sqrt{3}+1}{2}$倍

D. 反射光从 E 点到达 F 点的时间是折射光从 E 点经平面镜反射到达 F 点的$\frac{\sqrt{3}+1}{4}$倍

【答案】D

19. 2021 年 12 月 9 日，我国神舟十三号乘组航天员翟志刚、王亚平、叶光富在空间站进行了太空授课。如图甲所示，王亚平在水球里注入一个气泡，观察水球产生的物理现象。课后小明同学画了过球心的截面图，如图乙所示，内径是 R，外径是$\frac{8}{3}R$。假设一束单色光（纸面内）从外球面上 A 点射入，光线与 AO 直线所成夹角 $i=30°$，经折射后恰好与内球面相切。已知光速为 c。则



A. 单色光在材料中的折射率为$\sqrt{2}$

B. 单色光在该材料中的传播时间为$\frac{4\sqrt{55}R}{9c}$

C. 只要调整好 A 点射入的单色光与 AO 直线的夹角，就能够在内球面发生全反射

D. 只要调整好 A 点射入的单色光与 AO 直线的夹角，就能够在外球面发生全反射

【答案】C

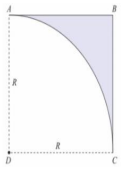
20. 如图所示，图中阴影部分 ABC 为一透明材料做成的柱形光学元件的横截面，该材料折射率 $n=\sqrt{2}$，AC 为一半径为 R 的$\frac{1}{4}$圆弧，D 为圆弧面圆心，$ABCD$ 构成正方形，在 B 处有一点光源，只考虑首次从圆弧 AC 全反射与折射的光线。则下列说法中正确的是

A. 从 D 点观察，圆弧 AC 被照亮的弧长有$\frac{\pi R}{6}$

B. AD 边和 CD 边有一部分接收不到点光源经圆弧 AC 折射的光线

C. 点光源经圆弧 AC 全反射射到 AB 边，这部分长度为 $R/2$

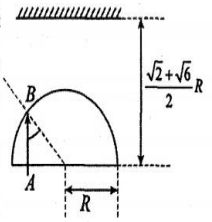
D. 从 D 点观察，看到 B 处点光源的像比实际位置更远离 AC 面



【答案】A

21.

如图所示，一个横截面为半圆的透明光学介质，其横截面半径为 R，在该介质上方平行于其底面且与底面距离为$\frac{\sqrt{2}+\sqrt{6}}{2}R$处放置了一块平面镜．一束光从底面 A 点垂直于底面入射进入介质后在圆弧上 B 点同时发生反射和折射．已知 AB 直线与过 B 点半径夹角为45°．若把反射光到达圆弧上的点标记为 C 点（图中未画出），且折射光经平面镜一次反射之后恰好也能到达 C 点．则下列说法正确的是（取$\sin75°=\frac{\sqrt{2}+\sqrt{6}}{4}$）（　　）



A. 该介质的折射率为$\frac{\sqrt{3}-1}{2}$

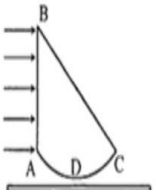
B. 反射光从 B 点到 C 点经历的时间是折射光从 B 点经平面镜反射到 C 点的$\frac{\sqrt{3}+1}{4}$倍

C. 将入射点 A 向右移动靠近圆心的过程中，反射光有可能在 C 点发生全反射

D. 将入射点 A 向右移动靠近圆心的过程中，反射光不可能从底面出射

【答案】B

22. 一玻璃砖横截面如图所示，其中 ABC 为直角三角形(AC 边未画出)，AB 为直角边，∠ABC=45°；ADC 为一圆弧，其圆心在 BC 边的中点。此玻璃的折射率为 1.5，P 为一贴近玻璃砖放置的、与 AB 垂直的光屏。若一束宽度与 AB 边长度相等的平行光从 AB 边垂直射入玻璃砖，则



A. 从 BC 边折射出一束宽度与 BC 边长度相等的平行光

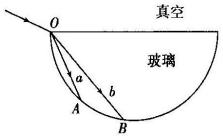
B. 平行光在 BC 边上不会发生全发射

C. 屏上有一亮区，其宽度等于 AC 边的长度

D. 当屏向远离玻璃砖的方向平行移动时，屏上亮区先逐渐变小然后逐渐变大

【答案】D

23.如图所示，不同波长的两单色光 a、b 沿同一方向从空气射向半圆形玻璃砖，入射点 O 在直径的边缘，折射光线分别为 OA、OB，则（　　）



A.a 单色光的频率比 b 单色光的频率小

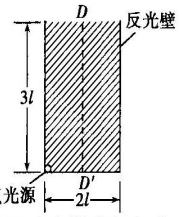
B.当 a、b 两束光由玻璃射向空气中，a 光临界角比 b 光临界角大

C.在玻璃砖中 a 单色光从 O 到 A 的传播时间不等于 b 单色光从 O 到 B 的传播时间

D.用 a、b 两束光在相同条件下做双缝干涉实验，a 光产生的干涉条纹间距比 b 光小

【答案】D

24.一柱状容器的高为 $3l$，底面是边长为 $2l$ 的正方形，容器内装满某种透明液体。过容器中心轴 DD'、垂直于左右两侧面的剖面图如图所示。容器右侧内壁涂有反光材料，其他内壁涂有吸光材料。在剖面图的左下角处有一点光源，其发出的红光经过容器内部相应光路后有两束相互垂直的光从液体上表面的 D 点射出，则 （　）



A.该透明液体对红光的折射率为 $\sqrt{\frac{5}{3}}$

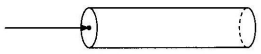
B.红光在透明液体中的传播速度为 $0.6c$

C.红光从透明液体到空气的临界角为 37°

D.将红光改为紫光后从 D 点射出的两束光夹角为锐角

【答案】A

25. 如图所示，真空中有一透明材料制成的圆柱形棒，其直径为 $\sqrt{39}$ cm，长为 50 cm. 一细束光线从圆柱棒的一个底面中心垂直于底面射入圆柱棒，光线进入圆柱棒后经 $\frac{2\sqrt{3}}{9}\times10^{-8}$ s，再由棒的另一底面射出. 则下列说法不正确的是 （　）



A. 这种材料的折射率为 $\frac{4}{3}\sqrt{3}$

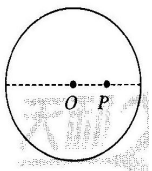
B. 光在材料里的传播速度为 $\frac{3\sqrt{3}}{4}\times10^{8}$ m/s

C. 若保持入射点不变，调整光线的入射方向，光在材料中传播的最长时间为 $\frac{8}{9}\times10^{-8}$ s

D. 若保持入射点不变，调整光线的入射方向，光在材料中经历的全反射次数可达 20 次

【答案】D

26. 在圆心为 O、半径为 R 的光学介质圆环内有一点光源 P，可以向纸面内各方向发光，已知 $OP=\frac{3}{4}R$，介质折射率 $n=\frac{5}{3}$，则从圆周上有光线射出的范围是（$\sin37°=0.6$，$\cos37°=0.8$） （　）

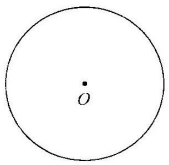


A. πR　　B. $\frac{53}{45}\pi R$

C. $\frac{3}{2}\pi R$　　D. $2\pi R$

【答案】B

27. 如图所示，圆心为 O、半径为 R 的圆形介质中有一点光源（图中未画出），介质的折射率为 $n(n>1)$，当点光源从 O 点沿着某一半径方向移动到边界的过程中，下列说法正确的是 （　）



A. 圆形边界各处始终都有光射出

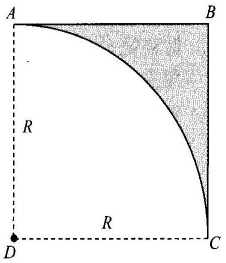
B. 点光源远离 O 点的距离只要不超过 $\frac{R}{n}$，圆形边界各处都有光射出

C. 点光源远离 O 点的距离只要不超过 $\frac{R}{\sqrt{n^2-1}}$，圆形边界各处都有光射出

D. 点光源远离 O 点一定距离后，圆形边界上不能射出光的区域逐渐变大

【答案】BD

28. 如图所示，图中阴影部分 ABC 为一透明材料做成的柱形光学元件的横截面，该种材料折射率 $n=\frac{5}{3}$，AC 为一半径为 R 的四分之一圆弧，D 为圆弧面圆心，$ABCD$ 构成正方形. 在 D 处有一红色点光源，在纸面内照射弧面 AC，若只考虑首次从圆弧 AC 直接射向 AB、BC 的光线，则以下说法正确的是 （　）



A. 光从该材料到空气的临界角为 53°

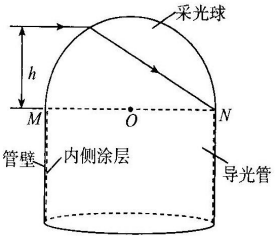
B. 该光学元件的 BC 边上有光射出的长度为 $\frac{1}{4}R$

C. 照射在 AC 边上的入射光，有弧长为 $\frac{4}{45}\pi R$ 区域的光不能从 AB、BC 边直接射出

D. 将点光源换成紫光，则 AB 边上有光射出的长度增大

【答案】C

29. 导光管采光系统是一套采集天然光，并经管道传输到室内的采光系统，如图为过装置中心轴线的截面. 上面部分是收集阳光的、半径为 R 的某种均匀透明材料的半球形采光球，O 为球心，下面部分是内侧涂有反光涂层的导光管，MN 为两部分的分界面，M、N 为球面两点. 若一束平行 MN 且与 MN 相距 $h=\frac{\sqrt{3}}{2}R$ 的细光束从空气入射到采光球表面时，经折射绿光恰好照射到 N 点. 则 （　）



A. 绿光在采光球中的传播速度为 $\frac{\sqrt{3}}{2}c$

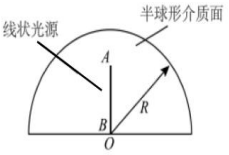
B. 红光一定能从 N 点上方射出

C. 紫光有可能直接折射经过 O 点

D. 要使光束在导光管中发生全反射，涂层折射率应小于管壁折射率

【答案】B

30. 如图所示，有一个长为 20cm 的竖直线状光源 AB，其表面可以向各个方向发射光线，将光源封装在一个半球形的透明介质中，整个装置放在水平地面上。线状光源的 B 端与半球的球心 O 重合，封装用的透明介质的折射率为 1.5，为使光源发出的所有光均能射出介质球，不考虑二次反射，试分析介质球的半径 R 至少为

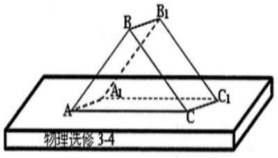


第 13 题图

A．30cm　　B．$10\sqrt{5}$ cm　　C．20cm　　D．40cm

【答案】A

31. 如图所示，物理课本选修 3-4 放在水平桌面上。一横截面为等腰直角三角形的玻璃棱镜放在书本上，书本与棱镜间有很薄的空气层。整个侧面 BCC_1B_1 上有一面光源，现只考虑面光源直接投射到棱镜底面上的光线，发现书本被此光线照亮部分面积与底面 ACC_1A_1 的面积之比为 k=5/6。则玻璃的折射率最接近



A．1.5　　B．1.6

C．1.7　　D．1.8

【答案】D

选择性必修 2

第一章　安培力与洛伦兹力

第一部分　基础知识点

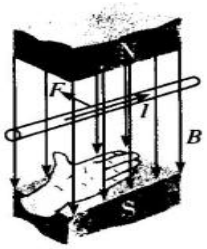
第 1 节　磁场对通电导线在磁场中受到的力

一、安培力

1.定义：通电导线在磁场中受到的力.

2.安培力方向

可用左手定则判定：伸开左手，使拇指与其余四个手指垂直，并且都与手掌在同一个平面内，让磁感线从掌心进入，并使四指指向电流的方向，这时拇指所指的方向就是通电导线在磁场中所受安培力的方向.



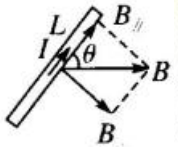
【注意】安培力方向一定垂直电流与磁场方向所构成的平面，即同时满足 $F_A \perp I$，$F_A \perp B$。但磁场与电流的方向可以不垂直。

3.安培力的大小

(1)I 与 B 垂直时：$F=IlB$。

(2)I 与 B 平行时：$F=0$。

(3)I 与 B 成夹角 θ 时：$F=IlB\sin\theta$。

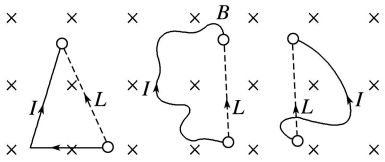


根据矢量的运算法则，B 可以分解为与电流方向垂直的分量 $B_\perp$ 和与电流方向平行的分量 $B_\parallel$。$B_\parallel$ 对导线没有作用力，导线受的安培力只是 $B_\perp$ 产生的，即 $F=Il\cdot B\sin\theta$。

4. 公式的适用范围

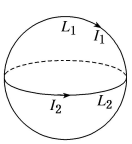
公式适用于导线 l 处在匀强磁场中；若要用在非匀强磁场中，公式 $F=IlB\sin\theta$ 仅适用于很短的通电导线。

【拓展】公式中的 l 指的是有效长度，弯曲导线的有效长度等于两端点的直线长度。如图，有效长度均为 l。

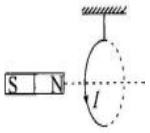


5.安培力作用下导体运动方向的判断方法

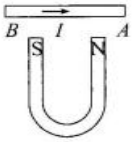
电流元法	分割为电流元 $\xrightarrow{\text{左手定则}}$ 安培力方向→整段导体所受合力方向→运动方向
特殊位置法（转过 90° 再看）	在特殊位置→安培力方向→运动方向
等效法	环形电流≒小磁针 条形磁铁≒通电螺线管≒多个环形电流
结论法	同向电流互相吸引，反向电流互相排斥；两不平行的直线电流相互作用时，有转到平行且电流方向相同的趋势
转换研究对象法	定性分析磁体在电流磁场作用下如何运动或运动趋势的问题，可先分析电流在磁体磁场中所受的安培力，然后由牛顿第三定律，确定磁体所受电流磁场的作用力，从而确定磁体所受合力及运动方向



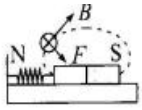
电流元法



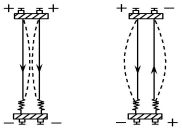
等效法



特殊位置法



转换研究对象法



结论法

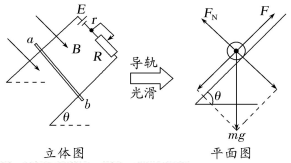
6.将三维图转换为二维平面图，即通过画俯视图、剖面图、侧视图等，将立体图转换为平面受力图。

分析受力情况 → 顺序：重力、安培力、弹力、摩擦力

↓

将立体图转换为平面图：

画受力示意图 →



↓

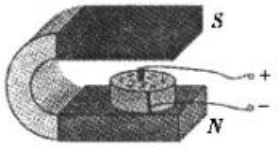
分析运动情况 → 首先确定运动状态和运动性质：平衡、匀变速运动、变加速运动；分析可能出现的临界状态、满足的临界或极值条件

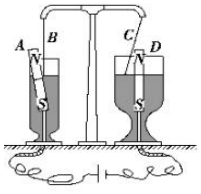
↓

选择恰当方法 → ①平衡条件：适用于平衡问题
②牛顿运动定律与运动学方程：适用于匀变速运动
③能量方法：适用于不涉及时间的问题
④动量方法：适用于不涉及距离的问题

↓

列方程求解 → 选择涉及已知量与待求量的过程列式计算





7.安培力做功的特点和实质

(1)安培力做功与路径有关，这一点与电场力不同。

(2)安培力做功的实质是能量转化。

①安培力做正功时，将电能转化为导体的机械能或其他形式的能。

②安培力做负功时，将机械能转化为电能或其他形式的能。

二、磁电式电流表

1.用途

电流表是用来测定电流大小和方向的仪器。

2.基本组成部分

磁铁和放在磁铁两极之间的线圈。

3.构造

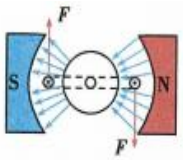
磁电式电流表的构造如图所示。在很强的蹄形磁铁的两极间装有极靴，极靴中间又有一个铁质圆柱，铁质圆柱的外面套着一个可以绕轴转动的线圈，转轴上装有两个螺旋弹簧和一个指针。



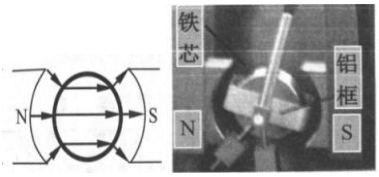
4.工作原理

常用的磁电式电流表是根据磁场对通电导线的作用原理制成的。如上图所示。由细导线制成的线圈绕在一个可以绕轴转动的铝框上，铝框的绕轴上装有两个扁平的螺旋弹簧和一个指针。线圈的两端分别接在这两个螺旋弹簧上，被测电流就是经过弹簧进入线圈的。马蹄形磁铁的两极上各有一个内壁为圆柱面的极靴，在铝框内有一个固定的圆柱形铁芯，极靴和铁芯的作用就是使它们之间的磁感线都沿半径方向，并且沿圆周均匀分布。这样，当线圈在磁场中运动时，无论转到什么位置，它的平面都跟磁感线平行。

在距轴线等距离处的磁感应强度的大小总是相等的，保证 B 的大小不发生变化，且安培力的方向与线圈垂直。若线圈的匝数为 N，面积为 S，通过的电流为 I，则线圈所受的磁场力矩 $M_1 = NBIS$，由于 NBS 为定值，所以 M_1 与电流 I 成正比。平衡时，$\theta = KI$，所以，测量时指针偏转的角度与电流的大小成正比，可以用指针的偏转角度来指示电流的大小，这种电流计的刻度是均匀的。



【说明】【在极靴的磁场作用下，铁质圆柱体被磁化，其内部的磁场分布图如下图所示（可以认为是匀强磁场【但线圈左右两边所在处的磁感应强度大小相等、方向不同】），而铁质圆柱体、线圈（绕在铝框上）、指针是一个整体，在安培力作用下一起转动，从而使得不管线圈转到什么角度，线圈平面都跟磁感线平行】



【用铝框做骨架的优点：1.质轻灵敏。2.不导磁。3.摆动过程产生涡流，使指针停止摆动。】

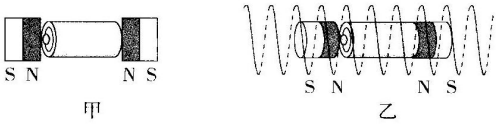
5.优缺点：

优点：磁电式仪表灵敏度高，可以测很弱的电流。

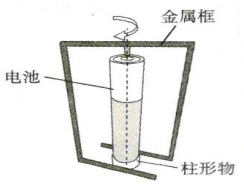
缺点：由于绕制线圈的导线很细，允许通过的电流很弱，容易被烧坏。

【运输电表时应把其正负极用导线相连，以减弱其振动的幅度】

【应用举例】1.电磁驱动“小火车”



2.简易电动机

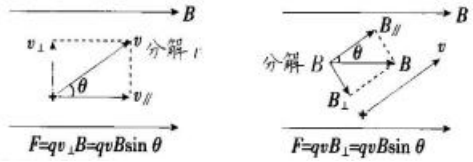


第 2 节　磁场对运动电荷的作用力

一、洛伦兹力

1.**洛伦兹力的定义**：磁场对运动电荷的作用力。

2.**洛伦兹力的大小（分解 V 或 B）**



(1)$v \parallel B$ 时，$F=0$；

(2)$v \perp B$ 时，$F=qvB$；

(3)v 与 B 的夹角为θ时，$F=qvB\sin\theta$.

3.**洛伦兹力的方向**

(1)判定方法：方向判断用左手定则：伸开左手，使拇指与其余四个手指垂直，并且都与手掌在同一个平面内；让磁感线从掌心进入，并使四指指向正电荷运动的方向，这时拇指所指的方向就是运动的正电荷在磁场中所受洛伦兹力的方向.

(2)方向特点：$F \perp B$，$F \perp v$，即 F 垂直于 B、v 决定的平面.（注意 B 和 v 可以有任意夹角）

二、运动电荷在磁场中受到的力

1.**洛伦兹力的特点**

(1)洛伦兹力的方向总是垂直于运动电荷的速度方向和磁场方向共同确定的平面，所以洛伦兹力只改变速度的方向，不改变速度的大小，即洛伦兹力永不做功。

(2)当电荷运动方向发生变化时，洛伦兹力的方向也随之变化。

(3)用左手定则判断负电荷在磁场中运动所受的洛伦兹力时，要注意将四指指向电荷运动的反方向。

2.**洛伦兹力与安培力的联系及区别**

(1)区别

①洛伦兹力是指运动的单个带电粒子所受的磁场力，而安培力是指通电导线所受的磁场力。

②洛伦兹力永不做功，而安培力可以做功。

(2)联系

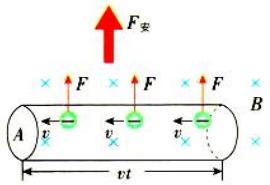
①安培力是洛伦兹力的宏观表现，洛伦兹力是安培力的微观解释。

②大小关系：$F_{安}=nF_{洛}$（n 是导体中定向移动的电荷数）。

③方向关系：洛伦兹力与安培力的方向一致，均可用左手定则进行判断。

（3）洛伦兹力大小的推导

设导线单位长度内自由电荷数为 n，自由电荷的电荷量为 q，定向移动的速度为 v，设长度为 l 的导线中的自由电荷在 t 秒内全部通过截面 A，如图所示。



设通过的电荷量为 Q，有

$Q=nql=nqvt$，$I=\frac{Q}{t}$，$F_{安}=IlB$

故 $F_{安}=\frac{Q}{t}Bl=\frac{nqvt}{t}Bl=qvB\cdot nl$

洛伦兹力 $F=\frac{F_{安}}{nl}$，故 $F=qvB$。

3.洛伦兹力与电场力的比较

	洛伦兹力	电场力
产生条件	$v\neq0$ 且 v 不与 B 平行(说明：运动电荷在磁场中不一定受洛伦兹力作用)	电荷处在电场中
大小	$F=qvB(v\perp B)$	$F=qE$
力方向与场方向的关系	$F\perp B$，$F\perp v$	$F/\!/E$
做功情况	任何情况下都不做功	可能做功，也可能不做功

⚠ 提醒

(1)运动电荷不受洛伦兹力的位置，磁感应强度不一定为0；但电荷不受电场力的位置，电场强度一定为0。

(2)匀强磁场中的洛伦兹力一般为变力，而匀强电场中的电场力是恒力。

三、电子束的磁偏转

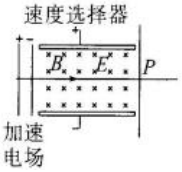
(1)洛伦兹力的方向与粒子的运动速度方向垂直，当粒子在磁场中运动时，因受到洛伦兹力的作用，会发生偏转。

(2)显像管电视机应用了电子束磁偏转的原理。电子枪发射电子，电子经过偏转线圈时受到洛伦兹力发生偏转，之后打到荧光屏上，使荧光屏发光。

四、几个应用模型

（一）速度选择器

1. 构造：如图所示，速度选择器由粒子源、加速电场、偏转电场、偏转磁场构成. 偏转电场的电场强度为 E，偏转磁场的磁感应强度为 B.

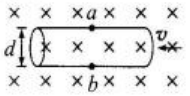


2. 原理：带电粒子能够沿直线匀速通过速度选择器的条件是 $qE=qvB$，即 $v=\frac{E}{B}$，速度 v 与粒子的电荷量、电性、质量无关. 这种装置能把具有一定速度的粒子选择出来，称为速度选择器.

【粒子只能单向入射】

（二）电磁流量计

原理：如图所示，直径为 d、横截面积为 S 的圆形导管由非磁性材料制成，其中有可以导电的液体向左流动，导电液体中的正、负粒子在磁感应强度为 B 的磁场作用下纵向偏转，a、b 间出现电势差 U. 当自由电荷所受电场力和洛伦兹力平衡时，a、b 间的电势差就保持稳定.



由平衡条件知 $qvB=qE=\frac{qU}{d}$，

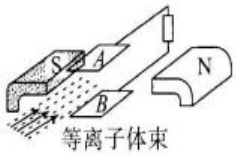
解得 $v=\frac{U}{Bd}$.

流量 $Q=Sv=\frac{\pi Ud}{4B}$.

（三）磁流体发电机

原理：如图所示，高速等离子体射入匀强磁场，在洛伦兹力的作用下发生偏转而打在 A、B 极板上，使两极板产生电势差，极板上电荷越多，电势差越大，当离子受到的电场力与洛伦兹力平衡时，离子做匀速运动，两极板间的电势差达到最大.

两极板间的距离为 d，等离子体的速度为 v，磁感应强度为 B，由平衡条件知 $\frac{qU}{d}=qvB$，两极板间能达到的最大电势差为 $U=Bdv$.



【注意】这里 U 为发电机的电动势，而不是路端电压，此时电流为 $I=\frac{Bdv}{R+r}=\frac{Bdv}{R+\rho\frac{d}{S}}$

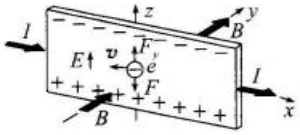
（四）霍尔效应

1.原理

如图所示，在匀强磁场中放置一个矩形截面的载流体，当磁场方向与电流方向垂直时，形成电流的载流子受洛伦兹力的作用发生偏转，导致导体在与磁场、电流方向都垂直的方向上出现了电势差. 这个现象称为霍

尔效应，所产生的电势差称为霍尔电势差或霍尔电压. 当载流子不偏转，即所受洛伦兹力与电场力平衡时，霍尔电压达到稳定值.

通过载流体的电流为 I，厚度为 d，高为 h，单位体积的带电粒子数为 n，带电粒子的电荷量为 q，磁感应强度为 B，推导霍尔电压的表达式.



由平衡条件知 $qvB=qE=q\dfrac{U}{h}$，

由电流微观表达式得 $I=neSv$，

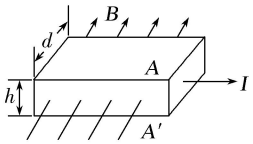
又 $S=hd$，

联立解得 $U=\dfrac{BI}{nqd}=k\dfrac{BI}{d}$，

霍尔系数 $k=\dfrac{1}{nq}$.

【此模型由于一般都是电流 I 一定，故求 U 时应把 v 消去】

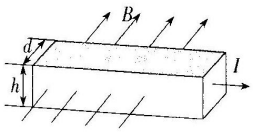
2.电势高低的判断：如图，金属导体中的电流 I 向右时，根据左手定则可得，下表面 A′的电势高（电子打到上极板）。



【特别注意】在霍尔效应中，如果导电体为电解液，则正负离子都打到同一侧极板，不会出现电势差。但离子数目（浓度）将发生变化。若正负离子向同一方向运动，则正负离子将打到两侧不同的极板上，两极板会产生电势差。

【典例】霍尔元件是一种基于霍尔效应的磁传感器，用它可以检测磁场及其变化，广泛应用于测量和自动控制等领域。在电动自行车中有多处用了霍尔传感器，最典型的是测速、调速转把、断电刹把以及电动车无刷电机和霍尔助力传感器等。实验表明，当磁场不太强时，霍尔电压 U、电流 I 和磁感应强度 B 的关系满足 $U=K\dfrac{IB}{d}$，式中的比例系数 K 称为霍尔系数。已知金属板电流是由电子的定向移动形成的，电子的平均定向移动速度为 v，电荷量为 e，金属板单位体积中电子的个数为 n，磁感应强度为 B，金属板厚度为 h，宽度为 d。则：





(1)达到稳定状态时，金属板上侧面的电势_____下侧面的电势(填“高于”“低于”或“等于”)。

(2)电子所受的洛伦兹力的大小为_____。

(3)金属板上下两面之间的电势差(霍尔电压)U 的大小为_____。

(4)霍尔系数 K=_____。

答案 (1)低于(2分) (2)evB(2分) (3)Bhv(2分) (4)$\dfrac{1}{ne}$(2分)

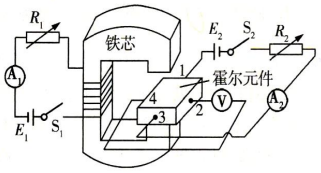
【典例 2】如图所示，导电物质为电子(电荷量大小为 e)的霍尔元件长方体样品置于磁场中，其上下表面均与磁场方向垂直。其中的 1、2、3、4 是霍尔元件上的四个接线端。1、3 间距为 a，2、4 间距为 b，厚度为 c。若开关 S_1 处于断开状态、开关 S_2 处于闭合状态，电压表示数为零；当开关 S_1、S_2 闭合后，三个电表都有明显示数。已知霍尔元件单位体积自由电子数为 n，霍尔元件所在空间磁场可看成匀强磁场，磁感应强度为 B，由于温度非均匀性等因素引起的其他效应可忽略，当开关 S_1、S_2 闭合且电路稳定后，右边电流表 A_2 的示数为 I，下列结论正确的是

A. 接线端 2 的电势比接线端 4 的电势高

B. 增大 R_1，电压表示数将变大

C. 霍尔元件中电子的定向移动速率为 $v=\dfrac{I}{neac}$

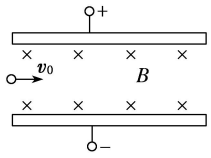
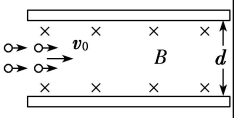
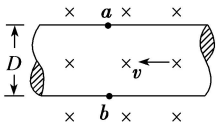
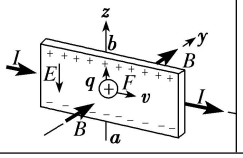
D. 电路稳定时，电压表示数为 $\dfrac{BI}{nec}$



【答案】D

【模型小结】

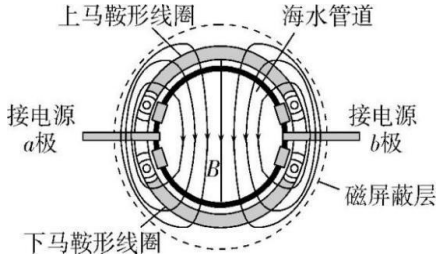
速度选择器、磁流体发电机、电磁流量计、霍尔元件

装置	原理图	规律
速度选择器		若 $qv_0B=Eq$，即 $v_0=\dfrac{E}{B}$，粒子做匀速直线运动
磁流体发电机		等离子体射入，受洛伦兹力偏转，使两极板带正、负电，两极电压为 U 时稳定，$q\dfrac{U}{d}=qv_0B$，$U=v_0Bd$【U 为电动势】
电磁流量计		$\dfrac{U}{D}q=qvB$，所以 $v=\dfrac{U}{DB}$ 所以流量 $Q=vS=\dfrac{\pi DU}{4B}$
霍尔元件		当磁场方向与电流方向垂直时，导体在与磁场、电流方向都垂直的方向上出现电势差

【规律总结】以上模型，电路稳定时都满足：$q\dfrac{U}{d}=qv_0B$，只是各自的作用不同而已。

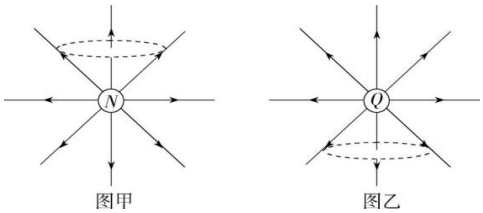
五、磁流体推进器

在轮船上安装电磁铁，通电后，海水中就会有磁感线通过。同时产生方向与磁场方向垂直的电流，在磁场和电流相互作用下，轮船与海水之间产生大小相等方向相反的反作用力，从而轮船获得了前进的推力，推力的大小与磁感应强度和电流大小的乘积成正比。



六、磁单极子

科学家预言,自然界中存在只有一个磁极的磁单极子,磁单极子 N 的磁场分布如图甲所示,它与如图乙所示正点电荷 Q 的电场分布相似。



第 3 节　带电粒子在匀强磁场中的运动

一、带电粒子在匀强磁场中的运动

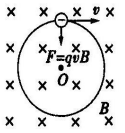
(1)$v/\!/B$ 时,带电粒子所受洛伦兹力为 0,粒子做匀速直线运动.

(2)$v\perp B$ 时,带电粒子在垂直于磁感线的平面内以入射速度做匀速圆周运动,向心力由洛伦兹力提供($Bqv=m\dfrac{v^2}{r}$):

①轨道半径:$r=\dfrac{mv}{Bq}=\dfrac{\sqrt{2mE_k}}{Bq}$.

②周期:$T=\dfrac{2\pi m}{Bq}$(与 v、r 无关).

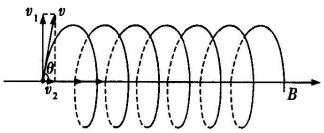
③时间:$t=\dfrac{\theta}{2\pi}T$.



【注意】应用带电粒子在磁场中做匀速圆周运动时的半径和周期公式时,一定要进行推导,不能直接应用;由周期公式可以看出,周期与粒子的速率及轨道半径无关,只由粒子的比荷决定。

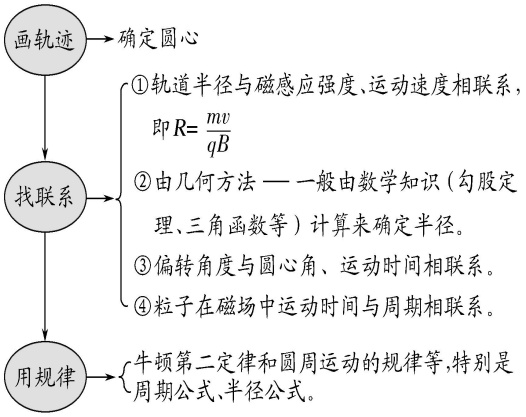
(3)当带电粒子的初速度方向与磁场方向成θ角时,粒子做等螺距螺旋运动。

如下图,带电粒子以某一角度θ斜射入匀强磁场中,将速度 v 沿垂直磁场方向和磁场方向分解为 v_1 和 v_2,则 $v_1=v\sin\theta$,$v_2=v\cos\theta$,带电粒子的两个分运动为在垂直磁场方向以分速度 v_1 做匀速圆周运动,洛伦兹力提供向心力,在平行于磁场方向以分速度 v_2 做匀速直线运动,带电粒子的运动为螺旋形运动.



三、带电粒子在匀强磁场中做圆周运动的分析方法

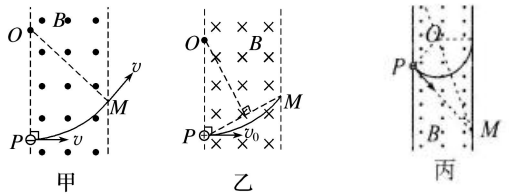
1.基本思路 ：一画轨迹、二定圆心、、三求半径、四找圆心角。具体流程图如下：



2.圆心的确定方法

解法一：若已知粒子轨迹上的两点的速度方向，分别确定两点处洛伦兹力 F 的方向，其交点即为圆心，如图甲.

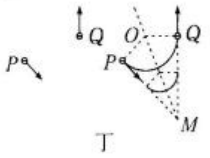
解法二：若已知粒子运动轨迹上的两点和其中某一点的速度方向，弦的中垂线与速度垂线的交点即为圆心，如图乙.



解法三：已知粒子运动轨迹上的两条弦，作出两弦的垂直平分线，交点即为圆心。

解法四:如图丙所示,已知轨迹上 P 点速度的方向(大小未知),且知轨迹与边界相切于 Q(Q 点位置未知),P 点速度方向的延长线与边界交于 M 点,作出∠PMQ 的角平分线,角平分线上存在 O 点,OP 等于 O 点到边界的距离,O 点即为圆心.

解法五:如图丁所示,磁场边界未知,已知 P、Q 点速度的方向(大小未知),则作出 P、Q 点速度方向的延长线交于 M 点,作出∠PMQ 的角平分线 OM,角平分线上的点到两边的距离相等,故角平分线上任意一点均可能是圆心.



3.半径的确定

①连接圆心和轨迹圆与边界的交点，确定半径，然后用几何知识求半径，常用解三角形法，如图 1

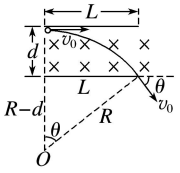


图 1

$R=\dfrac{L}{\sin\theta}$或由 $R^2=L^2+(R-d)^2$ 求得 $R=\dfrac{L^2+d^2}{2d}$

②在分析几何关系时，特别要掌握以下两点

a.粒子速度的偏向角φ等于圆心角α，且等于 AB 弦与切线的夹角(弦切角θ)的 2 倍(如图 2 所示)，即$\varphi=\alpha=2\theta=\omega t$.

b.相对的弦切角θ相等，与相邻的弦切角θ' 互补，即$\theta+\theta'=\pi$.

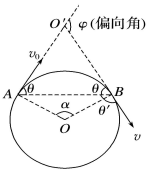


图 2

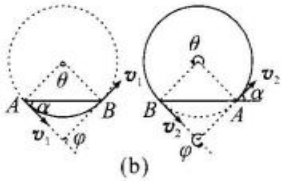
4.运动时间的确定

基本方法：利用轨迹对应圆心角 θ 或轨迹长度 L 求时间：①$t=\frac{\theta}{2\pi}T$；②$t=\frac{L}{v}$.

利用结论求解：

①速度的偏转角 φ 等于 $\overset{\frown}{AB}$ 所对的圆心角 θ；

②圆心角 θ 与弦切角 α 的关系：当 $\theta<180°$ 时，$\theta=2\alpha$；当 $\theta>180°$ 时，$\theta=360°-2\alpha$，如图(b)所示.

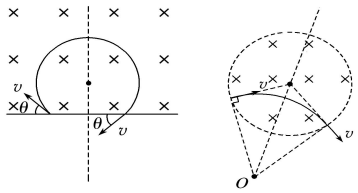


(b)

5.数学原理

①几何模型：圆与直线相交、圆与圆相交.

②对称性：圆与直线相交，轨迹(圆弧)关于圆心到边界的垂线轴对称；轨迹圆和磁场圆相交，轨迹(圆弧)关于两圆心的连线轴对称.(如图)



③构造三角形

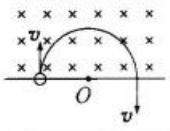
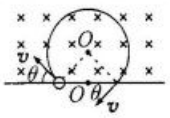
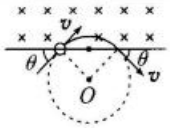
④确定角度

a.有已知角度：利用互余、互补、偏向角与圆心角的关系、弦切角与圆心角的关系确定；

b. 没有已知角度：利用边长关系确定.

四、带电粒子在各种有界磁场中的运动

（一）单直线边界

类型	轨迹半径（L 为弦长）	运动时间
	$L=2R$	$t=\frac{\pi m}{qB}$
	$L=2R\sin\theta$	$t=\frac{2m(\pi-\theta)}{qB}$
		$t=\frac{2\theta m}{qB}$

【画图方法】①作入射速度的垂线

②假设圆心的位置

③作弦的垂线

④根据对称性找出射点

⑤补全运动轨迹

【规律】

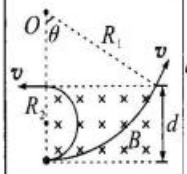
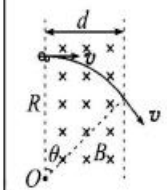
(1)带电粒子进出磁场边界的速度方向与直线边界的夹角相同，且轨迹具有对称性.

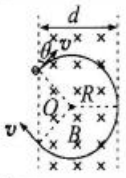
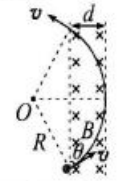
(2)在每种情况下，无论粒子的速率多大，粒子在磁场中的运动时间都相同.

(3)速度的偏转角等于圆心角.

(4)当圆心角 $\alpha<180°$ 时，圆心角 α 等于弦切角 θ 的两倍；当圆心角 $\alpha>180°$ 时，圆心角 α 等于 $(360°-2\theta)$.

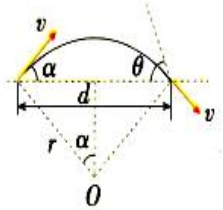
（二）双直线平行边界

类型	轨迹半径	运动时间
	$d=R_1(1-\cos\theta)$ $d=2R_2$	$t_1=\frac{\theta m}{qB}$ $t_2=\frac{\pi m}{qB}$
	$d=R\sin\theta$	$t=\frac{\theta m}{qB}$

类型	轨迹半径	运动时间
	$d=R(1+\cos\theta)$	$t=\frac{2m(\pi-\theta)}{qB}$
	$d=R(1-\cos\theta)$	$t=\frac{2\theta m}{Bq}$

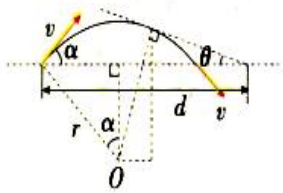
【规律】垂直+相切

（三）相交边界（存在临界条件）



$\alpha\leqslant\theta$ 时，过交点，$d=2r\sin\alpha$

甲



$\alpha>\theta$ 时，与边界相切，$d=r(\sin\alpha+\sin\theta)+r(\cos\theta-\cos\alpha)\cot\theta$

乙

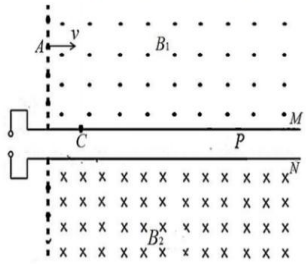
【典例】

（10分）如图所示，一对足够长平行栅极板 M、N 水平放置，极板与可调电源相连。极板外上方和下方分别存在方向垂直纸面向外和向内的匀强磁场 B_1 和 B_2，B_1 和 B_2 的大小未知，但满足 $B_2=\frac{5}{3}B_1$。磁场左边界上距 M 板距离为 $2l$ 的 A 点处的粒子源平行极板向右发射速度为 v 带正电的粒子束，单个粒子的质量为 m、电荷量为 q，粒子第 1 次离开 M 板的位置为 C 点，已知 C 点距离磁场左边界距离为 l。忽略栅极的电场边缘效应、粒子间的相互作用及粒子所受重力。

（1）求磁感应强度 B_1 的大小；

（2）当两板间电势差 $U_{MN}=0$ 时，粒子经过下方磁场一次偏转后恰能从 C 点再次返回极板上方的磁场，求两板间距 d 的大小；

（3）当两板间所加的电势差 $U_{MN}=-\frac{6mv^2}{5q}$ 时，在 M 板上 C 点右侧 P 点处放置一粒子靶（忽略靶的大小），用于接收从 M 板上方打入的粒子。问当 P 点离磁场左边界多远的地方能接收到粒子？

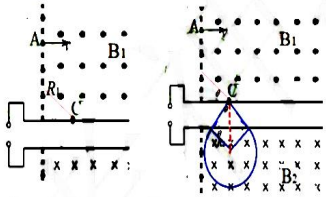


第 22 题图

（1）$R_1^2=(2l-R_1)^2+l^2$ （1分）

又因为 $R_1=\frac{mv}{qB_1}$ （1分）

得：$B_1=\frac{4mv}{5ql}$ （1分）



（2）$cos\theta=\frac{l}{R_1}=0.8$ （1分）

$R_2=\frac{mv}{qB_2}=\frac{3}{5}R_1=\frac{3}{4}l$ （1分）

又因为 $dtan\theta=R_2cos\theta$ （1分）

得：$d=0.8l$ （1分）

由 $R_2=\frac{3}{4}l$ 得，粒子在 B_2 磁场中最远点离 C 点距离为 $\frac{3}{4}l$，不会从左边飞出。

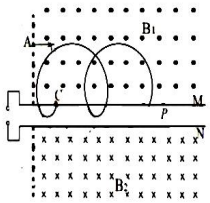
（3）粒子第一次在电场中向左运动距离

$\Delta x=vsin\theta\cdot\frac{2vcos\theta}{\frac{Uq}{dm}}=0.64l$ （1分）

粒子在 B_1 磁场中运动到最左边时，

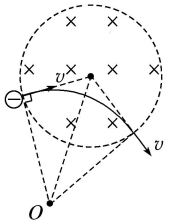
距 C 点距离 $x_C=\Delta x+R_1-l=0.89l<R_1$，不会从左边界飞出（1分）

$\therefore x_p=l+n(2l-0.64l)=(1+1.36n)l$ n=0、1、2、3…（1分）



（四）圆形边界(进出磁场具有对称性)

(1)粒子沿径向射入圆形磁场时，如图所示.



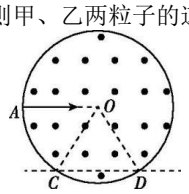
【规律总结】1.当粒子射向圆心时，出射方向反向延长线必过圆心。

2.速度偏向角=轨迹圆弧所对圆心角。

3.等角进出，沿径向射入必沿径向射出。

4. 半径关系：$\tan\frac{\theta}{2}=\frac{R}{r}$

【典例 1】如图所示，半径为 R 的圆形区域内存在垂直于纸面向外的匀强磁场，C、D 是水平线与圆周的交点，且 $CD=R$，AO 是水平半径.甲、乙两粒子从 A 点以不同速度沿 AO 方向同时垂直射入匀强磁场中，甲、乙两粒子恰好同时分别击中 C、D 点，不计粒子重力和粒子间的相互作用，则甲、乙两粒子的速度的比值为（　　）

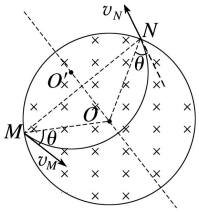


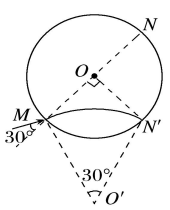
A $\frac{\sqrt{3}}{3}$　　B $\frac{\sqrt{3}}{2}$　　C. $\frac{1}{2}$　　D $\frac{2}{3}$

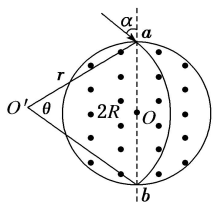
【答案】D

(2)粒子不沿径向射入时，如图所示.

【规律】当射入时粒子速度方向与半径的夹角为θ，射出磁场时速度方向与出射点与圆心连线的夹角也为θ.【如下图】





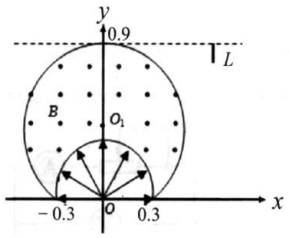


2.（10分）如图所示，在空间建立坐标系 xoy，大圆半径 R_1=0.5m，圆心在 y 轴上的 O_1 点，小圆是半径 R_2=0.3m 的半圆，圆心在 O 点，两圆所围成的区域存在一有界匀强磁场（磁场边界对带电粒子的运动无影响），方向垂直纸面向外。小圆内存在径向电场，圆心与边界间的电压恒为 U=800V，在磁场右侧垂直 x 轴放置一长 L=0.1m 的金属板，板上边缘对应 y 轴坐标为 0.9m。圆心 O 处的粒子源可以在纸面内沿电场方向均匀发射质量 $m=8\times10^{-27}$kg、$q=+8\times10^{-19}$C 的粒子（粒子初速度可以忽略），粒子数量为 $n=1\times10^{21}$ 个/秒，经电场加速后进入磁场的粒子轨迹圆的圆心都在以 O 为圆心，R=0.5m 的圆上。从 y 轴右侧磁场射出的粒子速度方向均水平向右，垂直击中板后被完全吸收，不计粒子的重力及粒子间的相互作用。sin37°=0.6，cos37°=0.8，求

（1）带电粒子进入磁场时的速度大小 v_0；

（2）带电粒子在磁场中运动的轨迹半径 r 和匀强磁场的磁感应强度大小 B；

（3）带电粒子对金属板的平均作用力 F 的大小。（保留两位有效数字）



解：（1）由动能定理 $Uq=\frac{1}{2}mv_0^2$　1分

代入数据解得 $v_0=4\times10^5m/s$　1分

（2）粒子以水平向右的速度出磁场，由几何关系得 $r^2+R_2^2=(0.9-r)^2$　1分

得 $r=0.4m$　1分

由 $qv_0B=m\frac{v_0^2}{r}$ 得 B=0.01T　1分

（3）图中粒子速度方向与竖直方向夹角为 α，

$\tan\alpha=\frac{r}{R_2}$ 得 α=53°粒子打到板的上边缘。　1分

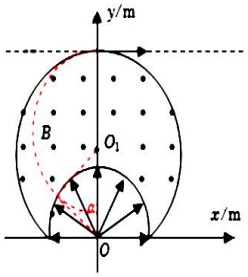
设射出电场时，速度方向与竖直方向夹角为 β 的粒子打到板的下边缘，

β=53°+53°−90°=16°　1分

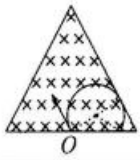
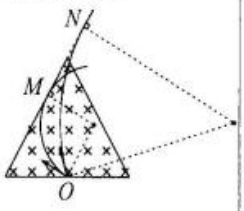
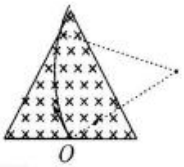
则打到板的粒子数为 $N_0=\frac{\alpha-\beta}{180^0}n=\frac{37}{180}n$　1分

粒子垂直击中板后被完全吸收，则对板的平均作用力 $Ft=N_0mv_0$，　t=1s　1分

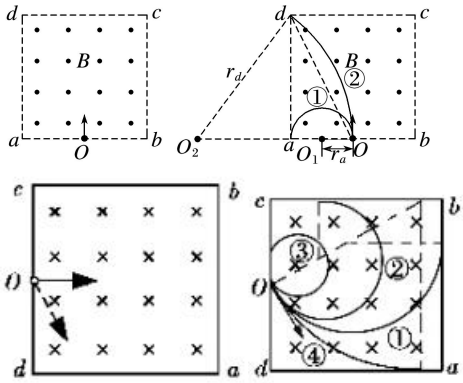
$F=\frac{37}{180}nmv_0\approx0.66N$　1分



（五）三角形（四边形）边界

类型	考法解析
粒子从底边射出的临界轨迹图：	**临界情况**：半径为 R_1 的轨迹圆与右侧边相切，当 $R<R_1$ 时，粒子从底边射出
粒子从右侧边射出的临界轨迹图：	**临界情况一**：半径为 R_2 的轨迹圆与左侧边相切于 M 点，当 $R_1\leqslant R<R_2$ 时，粒子从右侧边射出 **临界情况二**：若轨迹圆与左侧边相切于延长线的 N 点，则半径为 R_2' 的轨迹圆通过上顶点时为临界情况，当 $R_1<R\leqslant R_2'$ 时，粒子从右侧边射出
粒子从左侧边射出的临界轨迹图：	当 $R\geqslant R_2$ 或 $R\geqslant R_2'$ 时，粒子从左侧边射出

模型解读：临界条件为：垂直和相切



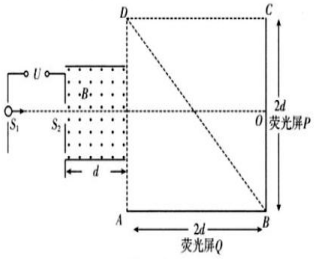
【典例】

.(10分)如图所示为一实验装置的剖面图，左侧为电压可以控制的加速电场。在加速电场右侧有相距为 d、长也为 d 的两平行金属板构成的区域，区域内存在方向垂直纸面向外的匀强磁场，磁感应强度的大小为 B，磁场的右边界与荧光屏 P 之间的距离为 $2d$。荧光屏中点 O 与加速电极上两小孔 S_1、S_2 位于两板的中轴线上。在中轴线正下方 d 位置有另一块荧光屏 Q，两块荧光屏的宽度均为 $2d$。现从 S_1 连续注入质量为 m、电荷量为 $+q$ 且初速度可视为零的粒子，经 $U=\frac{25qB^2d^2}{32m}$ 的加速电场后从小孔 S_2 射出，再经磁场偏转后，打到荧光屏 Q 上。不计带电粒子的重力与各粒子间的相互作用。

(1)求带电粒子打到荧光屏 Q 的具体位置；

(2)若撤去两平行金属板间的磁场，加上平行纸面且垂直两金属板、电场强度为 E_0 的匀强电场，判断能否使粒子打到荧光屏 Q 的同一点；

(3)若撤去两平行金属板间的磁场，在 ABD 区域加上磁感应强度大小和方向与两平行金属板间磁场皆相同的磁场，加速电压的数值可在 $\left[\frac{qB^2d^2}{2m},\frac{25qB^2d^2}{2m}\right]$ 区间调节，求粒子打在荧光屏 Q 上的距 A 的最远距离和在荧光屏 P 上的分布区间。



(1)带电粒子在磁场中偏转，洛伦兹力提供向心力

$qvB=m\frac{v^2}{R}$　$R=\frac{5}{4}d$　1分

通过计算判别该粒子恰好从下极板边缘射出，速度与水平方向夹角 α 满足 $\tan\alpha=\frac{4}{3}$　1分

通过几何关系知打在荧光屏 Q 距离 A 点 $\frac{3}{8}d$　1分

(2)要打在相同位置，根据平抛运动的规律 $\frac{\frac{1}{2}d}{\frac{1}{2}d+\frac{3}{8}d}=\frac{y}{d}$　1分

$y=\frac{4}{7}d>\frac{1}{2}d$　1分

即已经打到下极板，所以不存在这样的电压值。　1分

(3)加速电压的数值可以位于区间 $\left[\frac{qB^2d^2}{2m},\frac{25qB^2d^2}{2m}\right]$

对应粒子的速度范围为 $\left[\frac{qBd}{m},\frac{5qBd}{m}\right]$

粒子对应的半径区间为 $[d,5d]$

所以，速度最小时打在荧光屏 Q 距离 A 点 d 的位置，

荧光屏 Q 打得最远时，轨迹与 BD 相切，满足数学关系 $\sqrt{2}R=R+d$

$R=(\sqrt{2}+1)d$　1分

对应的最远距离为

$x_m=\sqrt{R^2-(R-d)^2}=\sqrt{2\sqrt{2}+1}d$　1分

粒子最大半径为 $5d$，

以 AB 为 x 轴，A 为原点建立坐标系

圆方程的圆心坐标为 $(0,-4d)$

圆方程为 $x^2+(y+4d)^2=(5d)^2$

直线方程为 $y=-x+2d$

解出圆与直线的交点：

$(3d-\frac{\sqrt{14}}{2}d,-d+\frac{\sqrt{14}}{2}d)$　1分

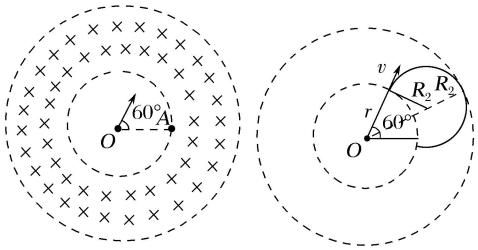
过交点的切线方程为

$y-(-d+\frac{\sqrt{14}}{2}d)=\frac{\sqrt{14}-6}{\sqrt{14}+6}\left[x-(3d-\frac{\sqrt{14}}{2}d)\right]$

$x=2d$ 时求出，荧光屏 P 上粒子击中区域为距离 B 点 $\frac{56-13\sqrt{14}}{11}d$ 以内　1分

（六）环形边界

模型解读：临界条件为：圆内切或外切

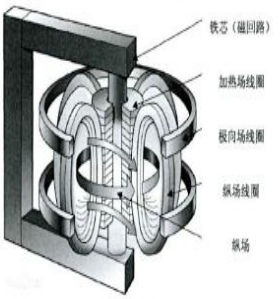


1.（10分）托卡马克(Tokamak)是依据等离子体约束位形而建立的磁约束聚变装置，由加热场线圈，极向线圈和纵场线圈组成。极向线圈可提供如图1装置中竖直方向的匀强磁场，纵场线圈起加速离子作用。图2为装置简化后俯视图，内径 R_1=2m，外径 R_2=5m，S为一截面，S_1为其同一直径另一端截面。已知元电荷为 $e=1.6\times10^{-19}$ C，质子中子质量均为 1.6×10^{-27} kg。

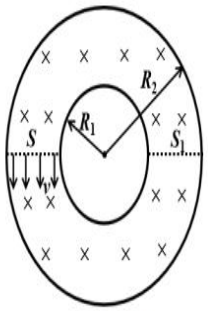
(1) 写出氘核和氚核结合成氦核 $^4_2$He 的核反应式。已知氘核的质量为 2.0136u，氚核的质量 3.0161u，中子的质量为 1.0087u，He 核的质量为 4.0026 u，计算释放出多少核能。(质量亏损为 1u 时，释放的能量为 931.5MeV。)

(2) 若从S垂直截面方向射入氘核 $^2_1$H，求到达 S_1 的最大速度与垂直磁感应强度B的关系式。

(3) 关闭加热场线圈和纵场线圈电流，保留极向线圈的电流，已知极向线圈产生的总磁感应强度 $B=kI$，k 为比例系数，I 为线圈中的电流大小，所有粒子均被约束在纵场区内，粒子一旦接触环形真空壁即被吸收导走。若垂直于截面 S，速度均为 $v=2\times10^7$m/s 的氘核和氚核在截面 S_1 处有重叠，求极向线圈中电流大小范围。



第 21 题图 1



第 21 题图 2

解：(1) ${}_1^2H+{}_1^3H\rightarrow{}_2^4He+{}_0^1n$ 1 分

$\Delta m=2.0136+3.0161-1.0087-4.0026u=\mathbf{0.0184u}$ 1 分

$\Delta E=\mathbf{0.0184}\times931.5MeV=17.14MeV$ 1 分

(2) $Bqv=m\dfrac{v^2}{r}$ 1 分 $\Rightarrow r=R_2=\dfrac{mv}{Bq}$ $\Rightarrow v=2.5B\times10^8$ 1 分

(3) 记氘核半径为 r_1，氚核半径为 r_2

$$r_2=\frac{3}{2}r_1 \quad 1\text{ 分}$$

$$2(r_2-r_1)<R_2-R_1$$
$$2r_2<2R_2 \qquad \Rightarrow 2m<r_1<3m \quad 2\text{ 分}$$
$$2r_1>2R_1$$

$$\Rightarrow B\in\left[\frac{2}{15},\frac{1}{5}\right]T \quad 1\text{ 分}$$

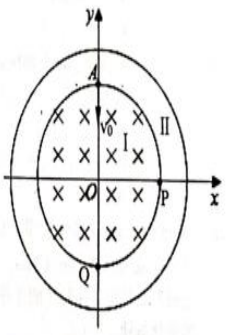
$$B=kI \quad \Rightarrow I\in\left[\frac{2}{15k},\frac{1}{5k}\right]A \quad 1\text{ 分}$$

2. (10 分) 如图为一磁约束装置原理图。原点 O 为两个大小不同的同心圆的圆心，半径为 r 的小圆区域 I 内有方向垂直 xoy 平面向里的匀强磁场 B_1（B_1 未知），两圆之间的环形区域 II 内有方向未知但垂直于 xoy 平面的另一匀强磁场 B_2，且 $B_2=\sqrt{3}B_1$。一质量为 m、电量为 q、初速度为 v_0 的带正电粒子从坐标为(0，r)的 A 点沿-y 方向射入区域 I，然后从 x 轴上的 P 点沿+x 方向射出，粒子经过区域 II 后再次射入区域 I，Q 点是区域 I 边界与-y 轴的交点，不计粒子的重力．求

(1) 区域 I 中磁感应强度 B_1；

(2) 大圆的最小半径 R；

(3) 粒子从 A 点沿 y 轴负方向射入圆形区域I，经过多少时间第二次到达 Q 点．



2．解：

(1) 设在区域I内轨迹圆半径为 r_1，则 $r_1=r$；

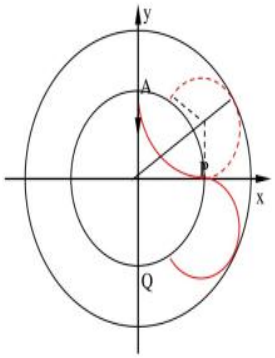
由牛顿第二定律得：$qv_0B_1=m\dfrac{v_0^2}{r_1}$， (1 分)

解得：$B_1=\dfrac{mv_0}{qr}$； (1 分)

(2) 设粒子在区域II中的轨迹圆半径为 r_2，部分轨迹如图所示：区域II中磁场向外时轨迹为实线，磁场向里时轨迹为虚线

根据 $B_2=\sqrt{3}B_1$

由牛顿第二定律得：$qv_0B_2=m\dfrac{v_0^2}{r_2}$ (1 分)



所以：$r_2=\dfrac{\sqrt{3}}{3}r$， (1 分)

由几何关系得：$R=\sqrt{r_1^2+r_2^2}+r_2=3r_2$ (1 分)

即：$R=\sqrt{3}r$； (1 分)

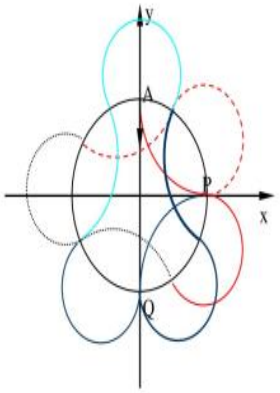
(3) 第一种情形：区域 II 磁场方向向外，轨迹如图

粒子从 A 射入，在两磁场各偏一次，对应圆心角 $\theta=90°+60°=150°$，要第二次到达 Q 点，需满足：

$150n=180m$，

m、n 属于自然数，即取最小整数 m=5，n=6，

(1 分)



第二种情形：区域 II 磁场方向向里，轨迹如图

粒子从 A 射入，在两磁场各偏一次，对应圆心角 $\theta=90°-60°=30°$，要第二次到达 Q 点，需满足：$30n=180m$，

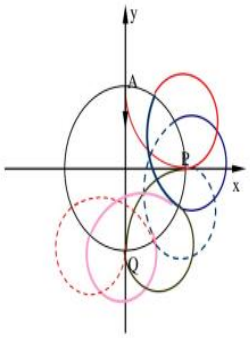
m、n 属于自然数，即取最小整数 m=1，n=6， (1 分)

粒子在区域I中的周期 $T_1=\dfrac{2\pi r_1}{v_0}$，粒子在区域 II 中的周期 $T_2=\dfrac{2\pi r_2}{v_0}$

粒子在I、II区各偏转一次的时间为

$t_1=\dfrac{1}{4}T_1+\dfrac{2}{3}T_2=(\dfrac{1}{2}+\dfrac{4\sqrt{3}}{9})\dfrac{\pi r}{v_0}$ (1 分)

所以经过 6 次如此偏转后第二次通过 Q 点，则总时间为 $t=6t_1=(3+\dfrac{8\sqrt{3}}{3})\dfrac{\pi r}{v_0}$ (1 分)



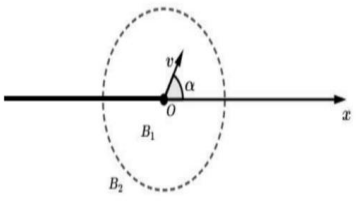
3. 如图所示，在纸面内存在一半径为 R 的圆形区域，区域内、外分别存在大小不同，方向均垂直纸面向里的匀强磁场，磁感应强度的大小关系为 $B_2=0.5B_1$。圆心 O 处有一粒子源，可以在平面内向各个方向发射速度大小均为 v 的 β 粒子(即电子)，其电量为 $-e$，质量为 m。现以 O 点为原点，建立 x 坐标轴，其中沿与 x 轴正方向成 $\alpha=60°$ 角发射的粒子 A，恰好可以经过 x 轴上的 P 点（图中未标出）。已知圆形区域内磁场的磁感应强度 $B_1=\dfrac{mv}{eR}$，不考虑粒子之间的作用力。求：

(1) β 粒子在圆形磁场区域内运动的轨迹半径 r；

(2) 有粒子可能出现的区域的面积；

(3) 粒子 A 从原点 O 点发射至返回原点 O 且速度方向与出发时方向相同所经历的时间 t；

(4) P 点的坐标 x_P。



22. (1) 由 $B_1ve=m\dfrac{v^2}{r}$ (1 分)

得 $r=\dfrac{mv}{B_1e}=R$ (1 分)

(2) 由 $B_2=0.5B_1$ 得 $r_2=2r=2R$ (1 分)

粒子的部分运动轨迹如图 1 所示：

$OM=R$，$OO_1=R$，$MO_1=R$，

所以$\angle OMO_1=60°$

$O_2M=2R$，ΔOMO_2中由余弦定理得$OO_2=\sqrt{3}R$

粒子运动到离O点最远的点N（连心线与圆O_2的交点），

$ON=(\sqrt{3}+2)R$

所以粒子可能出现的区域的面积

$S=\pi[(\sqrt{3}+2)R]^2=(7+4\sqrt{3})\pi R^2$ (1分)

（3）粒子第一次回到O点的运动轨迹如图1所示：

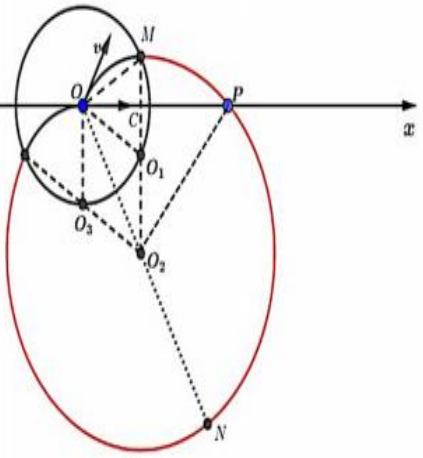


图1

$t_1=\frac{1}{6}\times\frac{2\pi R}{v}$

$t_2=\frac{5}{6}\times\frac{2\pi(2R)}{v}$，

$t_3=t_1$

运动总时间$T=t_1+t_2+t_3=\frac{12}{6}\times\frac{2\pi R}{v}=\frac{4\pi R}{v}$ (1分)

第一次回到O点，速度方向绕O点顺时针转过60°，所以回到O点且第一次速度方向与发射时方向相同经历时间$T'=6T=\frac{24\pi R}{v}$ (1分)

考虑到运动的周期性，$t=nT'=\frac{24n\pi R}{v}$ 其中n取正整数 (1分)

（4）如图1：$OC=\sqrt{3}R/2$，$CO_2=3R/2$，$O_2P=2R$，ΔCPO_2中，由勾股定理得：$CP=\sqrt{7}R/2$

得$x_P=\frac{\sqrt{3}+\sqrt{7}}{2}R$ (1分)

粒子在B_2磁场中做圆周运动的轨迹的圆心的轨迹为以O为圆心OO_2（$\sqrt{3}R$）为半径的圆，粒子A在B_2磁场中做圆周运动的轨迹的圆心只能是上述圆的六个等分点（O_2为其中一点），分别以这六个等分点为圆心以$2R$为半径作圆，与x轴会有4个交点，如图2所示。

其中$x_{P2}=O_{12}P_2+OO_{12}=(2+\sqrt{3})R$ (1分)

由对称性可知$x_{P3}=-\frac{\sqrt{3}+\sqrt{7}}{2}R$，$x_{P4}=-(2+\sqrt{3})R$ (1分)

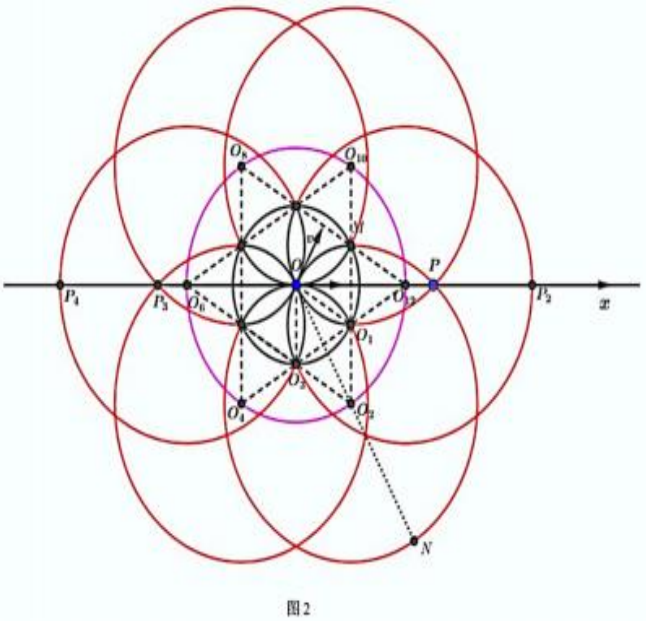


图2

五、带电粒子在有界磁场中运动的常见临界条件

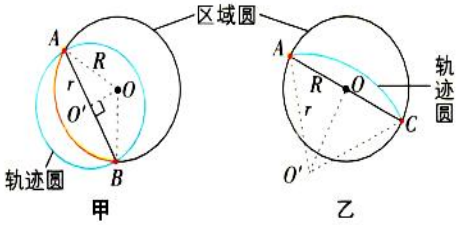
1. 刚好穿出磁场边界的条件是带电粒子在磁场中运动的轨迹与边界相切，据此可以确定速度、磁感应强度、轨迹半径、磁场区域面积等方面的极值。

2. 当入射速率v一定时，弧长（或弦长）越长，带电粒子在有界磁场中运动的时间越长。（对弦长成立的前提条件是弧是劣弧。）

3. 当入射速率变化时，圆心角越大，运动时间越长。

4. 情景：比荷相同的带电粒子，以相同的速率从圆形匀强磁场边界上的同一点A沿不同方向射入磁场。

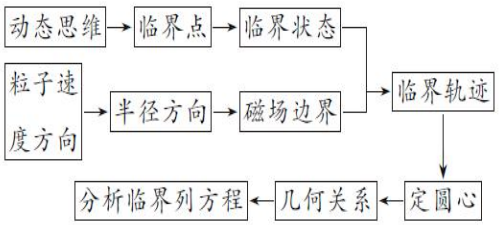
(1)若r（粒子轨迹半径）$<R$（磁场区域半径），粒子的出射点分布在以入射点为端点的一段圆弧上，如图甲中$\overset{\frown}{AB}$，AB为轨迹圆的直径。



(2)若$r>R$，则粒子从C点射出时在磁场中运动的时间最长，AC为区域圆的直径，如图乙所示。

5.解决带电粒子在磁场中运动的临界问题的关键，通常以题目中的“恰好”“最大”“至少”等为突破口，寻找临界点，确定临界状态，根据磁场边界和题设条件画好轨迹，建立几何关系求解.

6. 临界问题的一般解题流程



【典例】

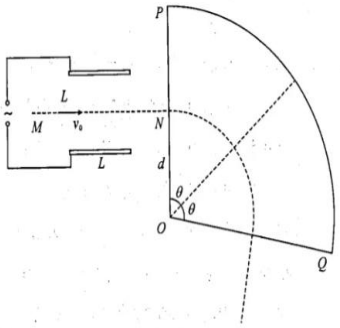
(10分)某种质谱仪由偏转电场和偏转磁场组成，其示意图如图所示，整个装置处于真空中。偏转电场的极板水平放置，极板长度和间距均为L。在偏转电场右侧适当位置有一夹角为2θ的足够大扇形区域OPQ，区域内分布着方向垂直于纸面的匀强磁场，区域的OP边与偏转极板中心轴线MN垂直，扇形圆心O点与轴线MN的距离为d。现有大量正离子（单个离子质量为m、电荷量为q）连续不断地以速度v_0沿轴线MN射入偏转电场。当偏转电压为0时，离子均能垂直扇形区域的OQ边射出磁场；若在两极板间加峰值为$U_m=\frac{\sqrt{3}mv_0^2}{3q}$的正弦式电压，则所有离子经过磁场偏转后都能经过磁场外同一点（图中未画出）。若仅考虑极板间的电场，离子在电场中运动的时间远小于两极板间所加交变电压的周期，不计离子的重力和离子间的相互作用，求：（可能用到的数学公式：$\sin(\alpha+\beta)=\sin\alpha\cos\beta+\cos\alpha\sin\beta$）

(1)偏转磁场的磁感应强度；

(2)离子在通过偏转电场的过程中动量变化量的最大值；

(3)离子在偏转磁场中运动的最长时间与最短时间的差值；

(4)扇形区域的OP边与极板右端的距离。



第22题图

22.（10 分）

（1）不加偏转电压时，离子束能垂直磁场的边界OQ出磁场，所以磁场中离子做圆周运动的半径为：$R=d$

又：$qv_0B=\frac{mv_0^2}{R}$ ……1 分

所以：$B=\frac{mv_0}{qd}$，且方向垂直纸面向外……1 分

（2）当偏转电压最大时，动量变化量最大为：

$\Delta p_{max}=mv_y$

离子在电场中的偏转过程有：

$v_y=at$

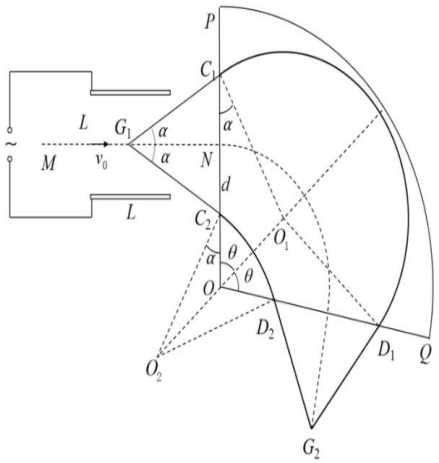
$a=\frac{Eq}{m}=\frac{qU_m}{mL}$（其中$U_m=\frac{\sqrt{3}mv_0^2}{3q}$）

$L=v_0t$

解得：$v_y=\frac{\sqrt{3}v_0}{3}$ ……1 分

解得：$\Delta p_{max}=\frac{\sqrt{3}mv_0}{3}$ ……1 分

（3）如图，进入磁场的离子速度方向反向延长都汇于G_1，最后该束粒子都能汇聚于一点G_2，故离子在磁场中的圆周运动圆心均在2θ的角平分线上。



离子在磁场中的运动周期与离子的速度无关，所以：$T=\frac{2\pi m}{qB}=\frac{2\pi d}{v_0}$

当偏转电压正向最大时，圆周运动轨迹为C_1D_1，所对应圆心角最大，大小为：$2(\theta+\alpha)$，运动的时间为：$t_{max}=\frac{2(\theta+\alpha)}{2\pi}T$ ……1 分

当偏转电压负向最大时，圆周运动轨迹为C_2D_2，所对应圆心角最小，大小为：$2(\theta-\alpha)$，运动时间为：

$t_{min}=\frac{2(\theta-\alpha)}{2\pi}T$ ……1 分

由（1）解可知：$\tan(\alpha)=\frac{v_y}{v_0}=\frac{\sqrt{3}}{3}$，得$\alpha=\frac{\pi}{6}$

以上式子联立可得：$\Delta t=t_{max}-t_{min}=\frac{2\pi d}{3v_0}$ ……1 分

（4）由离子在电场中偏转可求得：$\overline{NC_1}=(\frac{L}{2}+x)\cdot\tan\alpha$ ……1 分

在磁场中做圆周运动时有：$qvB=\frac{mv^2}{R_{max}}$；

其中：$v=\sqrt{v_0^2+v_y^2}$

解得：$R_{max}=\frac{2\sqrt{3}d}{3}$ ……1 分

在ΔOO_1C_1中，根据正弦定理知：$\frac{d+\overline{NC_1}}{\sin(\theta+\alpha)}=\frac{\overline{O_1C_1}}{\sin\theta}=\frac{R_{max}}{\sin\theta}$

联立方程组解得：$d\cot\theta-\frac{L}{2}$ ……1 分

六、带电粒子在组合场中运动的分析思路

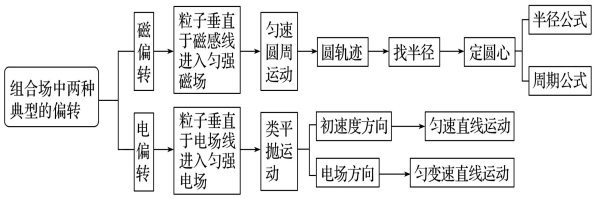
1.**组合场**：电场与磁场各位于一定的区域内，并不重叠，或在同一区域，电场、磁场交替出现.

2.**解题步骤**：

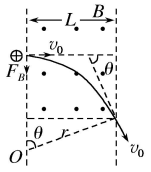
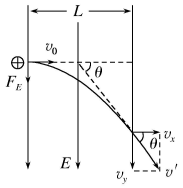
①粒子按照时间顺序进入不同的区域可分成几个不同的阶段.

②受力分析和运动分析，主要涉及两种典型运动，如图所示.

③用规律



3.**“电偏转”和“磁偏转”的比较**

	垂直进入磁场(磁偏转)	垂直进入电场(电偏转)
情景图		
受力	$F_B=qv_0B$，F_B大小不变，方向总指向圆心，方向变化，为变力	$F_E=qE$，F_E大小、方向不变，为恒力
运动规律	匀速圆周运动，$r=\frac{mv_0}{qB}$，$T=\frac{2\pi m}{qB}$	类平抛运动，$v_x=v_0$，$v_y=\frac{qE}{m}t$，$x=v_0t$，$y=\frac{qE}{2m}t^2$
运动时间	$t=\frac{\theta}{2\pi}T=\frac{\theta m}{qB}$	$t=\frac{L}{v_0}$
动能	不变	变化

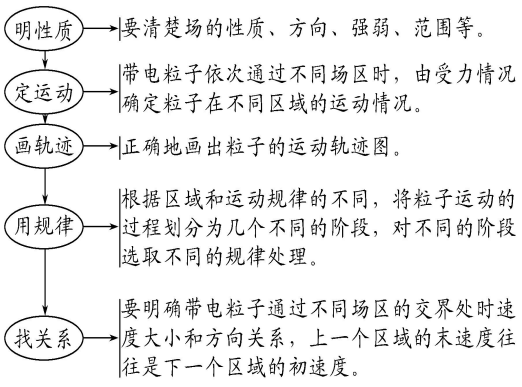
【小结】

带电粒子在组合场中的运动，实际上是几个典型运动过程的组合(如：电场中的加速直线运动、类平抛运动；磁场中的匀速圆周运动)，因此解决此类问题要分段处理，解题关键如下：

(1)找关键点：确定带电粒子在场区边界的速度(包括大小和方向)是解决该类问题的关键。

(2)画运动轨迹：根据受力情况和运动情况，大致画出粒子的运动轨迹图，有利于形象、直观地解决问题。

4.**“5 步”突破带电粒子在组合场中的运动问题**

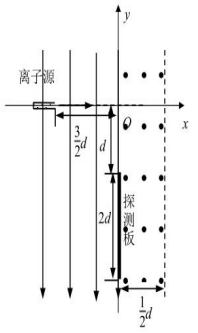


【典例】(10分) 如图所示，通过分析离子打在探测板上的位置可以获取电场强度信息。以y轴为界，左侧的有界匀强电场方向竖直向下，电场强度大小可调，右侧宽为$\frac{1}{2}d$的有界匀强磁场方向垂直纸面向外，磁感应强度大小为$B=\frac{mv_0}{qd}$，长为$2d$的探测板位于y轴上，其上端距原点O为d。电场中与O点水平距离为$\frac{3}{2}d$的离子源，沿x轴正方向持续均匀地发射质量为m、电荷量为q（$q>0$）、速度大小为v_0的一系列离子。假设只有打在探测板右侧的离子才能被探测到，探测板上的离子被吸收且失去所带电荷，不计离子的重力和离子间的相互作用。

(1)若离子从探测板上方进入磁场，则电场强度的最大值E_m；

(2)若离子经磁场偏转后打在距探测板上端$\frac{3}{2}d$处，则电场强度E的大小；

(3)若某段时间内，电场强度在$\frac{mv_0^2}{4qd}\le E\le\frac{2mv_0^2}{qd}$范围内连续均匀调节，则该段时间内，打在探测板上的离子数比例η。



(1) $3d/2=v_0t$ ……1分

$d=at^2/2$ 1分 $E_m=\frac{8mv_0^2}{9qd}$ ……1分

(2)射出电场时的侧移$y_1=\frac{9qEd^2}{8mv_0^2}$……1分，

进磁场与打在探测板上的间距$y_2=\frac{2mv_0}{qB}=2d$……1分 ∴$y_1=d/2$ ∴ $E=\frac{4mv_0^2}{9qd}$……1分

(3)当离子正好与磁场右边界相切时：$(r-d/2)^2+d^2=r^2$ $r=5d/4$ 1分

此时$E_1=\frac{mv_0^2}{2qd}$ …1分

离子恰好打在离板上端2d的位置上，此时$d=at^2/2$ ∴$E_2=\frac{8mv_0^2}{9qd}$…1分

$\eta=\frac{\frac{8mv_0^2}{9qd}-\frac{mv_0^2}{2qd}}{\frac{2mv_0^2}{qd}-\frac{mv_0^2}{4qd}}\frac{2}{9}\approx22\%$ ……1分

【规律】粒子以v_0进偏转电场后再进入磁场，则$r=\frac{mv_0}{qB}$

七、带电粒子在叠加场中的运动

1.**叠加场**

电场、磁场、重力场共存，或其中某两场共存.

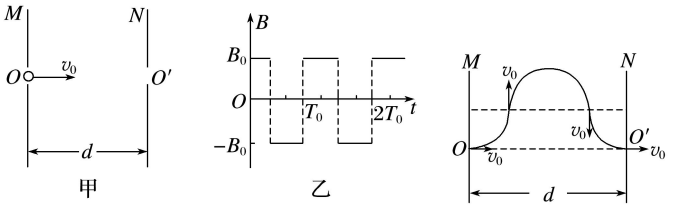
2.**带电粒子在叠加场中常见的几种运动形式**

运动性质	受力特点	方法规律
匀速直线运动	其他力的合力与洛伦兹力等大反向	平衡条件
匀速圆周运动	除洛伦兹力外，其他力的合力为零	牛顿第二定律、圆周运动的规律
较复杂的曲线运动	除洛伦兹力外，其他力的合力既不为零，也不与洛伦兹力等大反向	动能定理、能量守恒定律

八、带电粒子在交变电磁场中的运动

解决带电粒子在交变电、磁场中的运动问题的基本思路

先读图	看清并且明白场的变化情况
受力分析	分析粒子在不同的变化场区的受力情况
过程分析	分析粒子在不同时间段内的运动情况
找衔接点	找出衔接相邻两过程的物理量
选规律	联立不同阶段的方程求解



带电粒子在周期性变化的电、磁场中的运动是高中物理的难点之一.题目中的运动情景复杂、综合性强，将场的性质、运动学规律、牛顿运动定律、功能关系及交变电场等知识有机地结合起来，对空间想象能力、物理过程和运动规律的综合分析能力，以及利用数学知识解决物理问题的能力要求较高.

九、带电体在复合场中的运动

带电体仅受重力、电场力、洛伦兹力

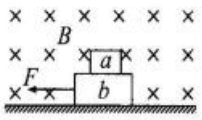
(1)若三力平衡，则一定做匀速直线运动.

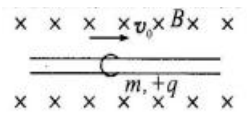
(2)若重力与静电力平衡，则一定做匀速圆周运动.

(3)若合力不为零且与速度方向不垂直，将做复杂的曲线运动，因洛伦兹力不做功，故可用能量守恒定律或动能定理求解问题.

①带电体做直线运动

带电体在磁场中无约束地做直线运动，最终的运动状态一定是做匀速直线运动.带电体做匀速运动时，带电体受力平衡，这是解题的关键切入点.





【典例】

如图所示，空间存在正交的匀强电场和匀强磁场，电场方向水平向右，磁场垂直于纸面向里，一个带电小球进入此空间后做直线运动初速度为$v=\frac{\sqrt{2}mg}{qB}$，速度方向垂直磁场斜向右上方，与电场方向夹角为θ。已知小球质量为m，电量为q，匀强磁场的磁感应强度为B，重力加速度为g，则

A. 小球带负电

B. 小球做直线运动过程中机械能增加

C. 匀强电场的电场强度大小为$\frac{\sqrt{2}mg}{q}$

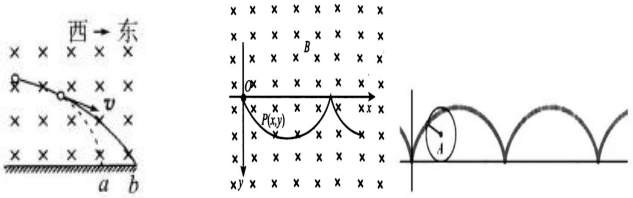
D. 小球运动到图中P点时，撤去磁场，小球运动到与P点等高位置所用时间为$\frac{2m}{qB}$



【答案】BD

②带电体做曲线运动

带电体在磁场中做复杂的曲线运动时，由于洛伦兹力总不做功，若无磁场时，带电体的机械能守恒；若有磁场时，带电体的机械能仍守恒. 这是解题的关键切入点.



③带电体做摆线运动即配速（分解速度）问题

带电体在磁场中做摆线运动的解题思路有以下几种，本题的电场力相当于带电体的重力.

(1)将物体的初速度分解成两个等大反向的分速度.

(2)要求其中一分速度所对应的洛伦兹力恰好平衡重力或电场力，故该分运动为匀速运动.

(3)带电体的另一分速度则在磁场中做匀速圆周运动.

(4)带电体有两个分运动：匀速直线运动与匀速圆周运动，这种曲线运动称为摆线运动.

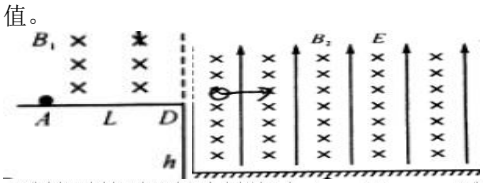
【题型说明】当粒子运动方向与磁场存在一夹角（不垂直）时，往往需要把速度分解成沿磁场方向和垂直于磁场方向，则粒子沿磁场方向作匀速直线运动，垂直于磁场方向作匀速圆周运动，即作螺旋运动。

【典例 1】如图所示，高 h 的粗糙水平桌面固定在地面上。CD 左侧有垂直纸面向里的磁场Ⅰ，磁感应强度 B1=0.5T；CD 右侧有竖直向上的电场与垂直纸面向里的磁场Ⅱ，磁感应强度 B2=$5/29$ T. 质量 m=0.5kg，带正电且电荷量 q=1C 的小球从桌面左侧 A 点以初速度 v0=2m/s 向右运动，经过 t=0.2s 后从 D 点水平飞出。已知小球与桌面之间的动摩擦因数 u=0.5，AD 的长度 L=0.32m，重力加速度 g=10m/s2，求：

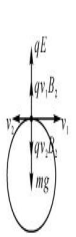
（1）小球从 D 点水平飞出时的速度大小，

（2）若小球从 D 点水平飞出后做匀速直线运动，E 的大小，

（3）若 E=4.75V/m，为使小球运动过程中不碰到地面，h 的最小值。



(12 分)解析(1)小球在 A 到 D 运动过程中，由动量定理，有 $-\mu(mg-qvB_1)t=mv_D-mv_0$，(2 分) 又 $v\cdot t=L$，即 $-\mu mgt+\mu qB_1L=mv_D-mv_0$，代入数据，有 $v_D=\frac{29}{25}$m/s。(1 分) (2)小球从 D 点水平飞出后做匀速直线运动，受力平衡，有 $mg=qv_DB_2+qE$，(2 分) 代入数据，有 $E=\frac{24}{5}$V/m。(1 分) (3)若 E=4.75V/m<4.8V/m，小球的运动轨迹是摆线，令 $v_D=v_1-v_2$，受力分析如图所示，有 $qE+qv_1B_2=mg$，(2 分) 得 $v_1=\frac{29}{20}$m/s，$v_2=\frac{29}{100}$m/s，(2 分) 又 $r=\frac{mv_2}{qB_2}$，$h\geqslant 2r$，(1 分) 得 $h\geqslant 1.682$m，(1 分)



第 19 题解图

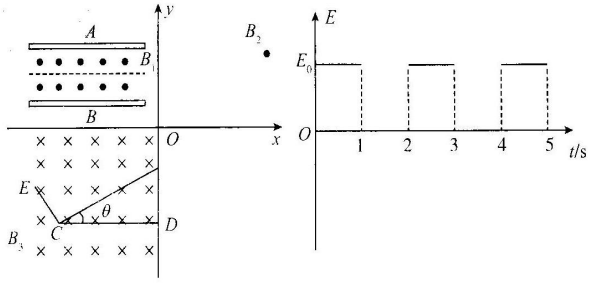
【典例 2】(10 分)如图甲所示，直角坐标系 xOy 位于竖直平面内且 x 轴沿水平方向，其第二象限内有一对平行金属板 A、B，两板相距为 d，两板之间有方向平行于板面并垂直于纸面向外的匀强磁场，磁感应强度大小为 B_1. 第一象限某一矩形区域内存在垂直纸面向外的匀强磁场，磁感应强度大小为 B_2. 第四象限存在一未知电场. 第三象限存在垂直纸面向里的匀强磁场，磁感应强度大小为 B_3，在竖直方向存在交变电场. 将一个倾角为 θ 的光滑绝缘斜面放置在此空间中. 已知大量带电荷量均为 $-q$ 的带电粒子从平行金属板左侧沿 x 轴正方向以相同的速度 v_0 飞入平行金属板 A、B 之间. 稳定后，某一质量为 m 的带电粒子能沿平行金属板中心线射出，经过第一象限的磁场偏转后进入第四象限未知电场做匀减速直线运动，恰好沿斜面进入第三象限，此时粒子速度为 0，且此后一直在第三象限内运动. 取带电粒子刚进入斜面时为 $t=0$ 时刻，电场变化如图乙所示，电场方向竖直向上为正，场强大小为 E_0. 已知 B_3 的大小数值上等于 $\frac{2\pi m}{q}$，且题中 d、B_1、B_2、q、m、v_0、E_0 为已知量，不计带电粒子的重力及粒子间的相互作用，则：

(1)求稳定后两金属板之间的电势差 U_{AB}；

(2)求带电粒子在第一象限磁场中做圆周运动的半径 r_2；

(3)求第一象限内磁场的最小面积与斜面倾角 θ 的函数关系式；

(4)若带电粒子在第 19 s 内恰好没有离开斜面，19 s 后电场变为垂直斜面向上的匀强电场，场强大小变为 $\frac{3}{4}E_0\cos\theta$，并在斜面末端安装一垂直斜面的荧光屏 CE. 已知粒子在电场变化后的 $\frac{1}{4}$ s 内打在荧光屏上，且与 C 点的距离为 $\frac{qE_0\cos\theta}{32\pi^2m}$，求 19 s 末带电粒子与斜面底端 C 点的距离 L. (计算结果用角度关系表示)



甲　　乙

解：(1)稳定时，受力平衡 $qv_0B_1=qE$

且 $U=Ed$　(1 分)

又由左手定则可知，一开始负电荷在 A 板聚集

则 $U_{AB}=-v_0B_1d$　(1 分)

(2)设带电粒子在 B_2 磁场中做圆周运动的半径为 r_2

$qv_0B_2=m\frac{v_0^2}{r_2}$　(1 分)

则 $r_2=\frac{mv_0}{qB_2}$　(1 分)

(3)由几何关系易得,矩形磁场的长为 $2r_2$,宽为 $r_2+r_2\sin\frac{\theta}{2}$,则磁场最小面积为

$S=2r_2(r_2+r_2\sin\frac{\theta}{2})=\frac{2m^2v_0^2}{q^2B_2^2}(1+\sin\frac{\theta}{2})$ (2分)

(4)在第三象限时有 $T=\frac{2\pi m}{qB_3}=1$ s

分析易得带电粒子在斜面上运动时奇数秒内做匀加速直线运动,加速度大小为 $a=\frac{qE_0\sin\theta}{m}$,偶数秒内做匀速圆周运动.

又因为粒子在第 19 s 内恰好没有离开斜面

易得 19 s 末时带电粒子与斜面之间的弹力为 0

设此时的速度大小为 v'

则 $qv'B_3=qE_0\cos\theta$

且 $v'=10a=\frac{10qE_0\sin\theta}{m}$ (1分)

则 $\tan\theta=\frac{1}{20\pi}$ (1分)

由配速法有 $v'=\frac{3}{4}v'+\frac{1}{4}v'$

其中 $\frac{3}{4}v'B_3=\frac{3}{4}E_0\cos\theta$

所以 19 s 以后粒子将做沿着斜面的匀速直线运动和匀速圆周运动

圆周运动半径为 $r_3=\frac{\frac{1}{4}mv'}{qB_3}=\frac{qE_0\cos\theta}{16\pi^2m}$

则 $\frac{qE_0\cos\theta}{32\pi^2m}=\frac{1}{2}r_3$

可知圆周运动对应的圆心角为 60°

到 C 点运动时间为 $t=\frac{1}{6}$ s (1分)

所以 19 s 末时带电粒子与斜面底端 C 的距离

$L=\frac{3}{4}v't+\frac{\sqrt{3}}{2}r_3=\frac{qE_0\cos\theta}{16\pi m}+\frac{\sqrt{3}qE_0\cos\theta}{32\pi^2m}$,其中 $\theta=\arctan\frac{1}{20\pi}$

或写 $\tan\theta=\frac{1}{20\pi}$ (1分)

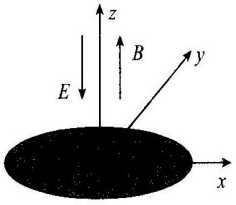
($\frac{qE_0\cos\theta}{16\pi m}$可用$\frac{5qE_0\sin\theta}{4m}$表示,$\frac{\sqrt{3}qE_0\cos\theta}{32\pi^2m}$可用$\frac{5\sqrt{3}qE_0\sin\theta}{8\pi m}$表示)

【典例 3】(10分)如图,某圆形薄片置于 xOy 水平面上,圆心位于坐标原点 O,xOy 平面上方存在大小为 E、沿 z 轴负方向的匀强电场,以该圆形绝缘材料为底的圆柱体区域内存在大小为 B、沿 z 轴正方向的匀强磁场,圆柱体区域外无磁场.现可从原点 O 向 xOy 平面上方的各方向发射电荷量为 q、质量为 m、速度大小为 v 的带正电荷的粒子.粒子重力忽略不计,不考虑粒子间的相互作用,不计碰撞时间.

(1)若粒子每次与材料表面的碰撞为弹性碰撞,且从原点 O 发出的所有粒子都被该电场和磁场束缚在上述圆柱体内,则此圆形薄片的半径至少为多大?

(2)若某粒子每次与材料表面的碰撞点都在坐标原点 O,则此粒子的发射方向与 z 轴正方向夹角的三角函数值需满足什么条件?

(3)若在粒子每次与材料表面碰撞后的瞬间,速度竖直分量反向,水平分量方向不变;竖直方向的速度大小和水平方向的速度大小均按同比例减小,以至于动能减小 75%.求发射方向与 z 轴正方向成 45°角的粒子从发射直至最终动能耗尽而沉积于材料表面所经历的时间.



解:(1)速度与 z 轴正方向夹角为 90°,即贴着 xOy 平面方向发射的粒子最易脱离磁场束缚,此粒子运动半径设为 R,有

$qvB=m\frac{v^2}{R}$

解得 $R=\frac{mv}{Bq}$ (1分)

圆形薄片的半径 r 至少为 $r=2R=\frac{2mv}{Bq}$ (1分)

(2)设速度 v 与 z 轴正方向的夹角为 α,则其在 z 轴正方向的速度分量为 $v_z=v\cos\alpha$

z 轴分运动的加速度为 $a=\frac{qE}{m}$,回到原点经过时间

$t=\frac{2v_z}{a}=\frac{2mv\cos\alpha}{qE}$ (1分)

粒子在平行 xOy 平面内的分运动为匀速圆周运动,周期

$T=\frac{2\pi m}{Bq}$ (1分)

若要碰撞点都在坐标原点 O,必须有 $t=nT(n=1,2,3,\cdots)$ (1分)

联立解得 $\cos\alpha=\frac{n\pi E}{Bv}(n=1,2,3,\cdots$且$n\leqslant\frac{Bv}{\pi E})$ (1分)

(3)与 z 轴正方向成 45°角的粒子沿 z 轴方向的分速度大小为 $v_z=v\cos45°=\frac{\sqrt{2}}{2}v$

每次碰撞,动能减小 75%,即碰完动能是碰前的$\frac{1}{4}$,速率为碰前的$\frac{1}{2}$

第 n 次碰撞后沿 z 轴方向的分速度大小为

$v_{zn}=(\frac{1}{2})^n\frac{\sqrt{2}}{2}v$ (1分)

从发射至第 1 次碰撞的时间

$t_1=\frac{2\times\frac{\sqrt{2}}{2}v}{a_z}=\frac{\sqrt{2}mv}{qE}$ (1分)

从第 $n-1$ 次至第 n 次碰撞的时间 $t_n=(\frac{1}{2})^{n-1}t_1$

从发射至第 n 次碰撞的时间

$t=t_1+t_2+\cdots+t_n=\frac{t_1[1-(\frac{1}{2})^n]}{1-\frac{1}{2}}$ (1分)

当 $n\to\infty$ 时有

$t=2t_1=\frac{2\sqrt{2}mv}{qE}$ (1分)

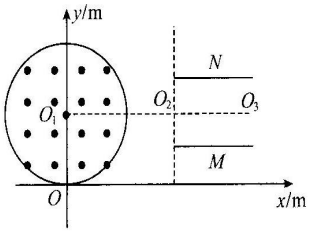
【典例 4】(10分)如图所示,真空中有一个半径 $r=0.5$ m 的圆形磁场区域,与 x 轴相切于坐标原点 O,磁感应强度 $B=2\times10^{-4}$ T,方向垂直于纸面向外,在圆形磁场区域的右侧有一水平放置的正对平行金属板 M、N,板间距离为 $d=0.5$ m,板长 $L=0.6$ m,板间中线 O_2O_3 的反向延长线恰好过磁场圆的圆心 O_1.若在 O 点处有一粒子源,能均匀

的向磁场中各个方向源源不断地发射速率相同、比荷为$\frac{q}{m}=1\times10^{8}$ C/kg且带正电的粒子，粒子的运动轨迹在纸面内.已知一个沿y轴正方向射入磁场的粒子，恰能沿直线O_2O_3方向射入平行金属板间.不计重力、阻力及粒子间的相互作用力，求：

(1)粒子入射的速度v_0的大小；

(2)若已知两平行金属板间电场强度$E=\frac{25}{18}$ V/m，则从M、N板右端射出平行金属板间的粒子数与从O点射入磁场的总粒子的比值η；

(3)若平行板足够长，且在平行金属板的左端装上一挡板(图中未画出)，挡板正中间O_2处有一小孔，恰能让单个粒子通过，且在两板间加上沿y轴负方向的匀强电场E和垂直xOy平面向里的匀强磁场$B=2\times10^{-4}$ T，要使粒子能从两极板间射出.求电场强度E的大小范围.(提示：带电粒子在复合场中的运动可以看成匀速直线运动和匀速圆周运动的合运动)



解：(1)由题意可知，沿y轴正方向射入的粒子运动轨迹如图1所示，有

$R=r=\frac{mv_0}{qB}$ (1分)

解得$v_0=\frac{rBq}{m}=1.0\times10^{4}$ m/s (1分)

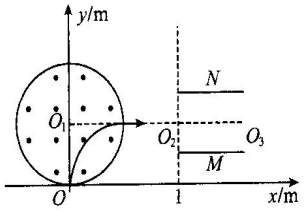


图1

(2)沿任一方向射入磁场的粒子，其运动轨迹半径均为r，所有粒子出磁场后都沿x正方向运动.恰能从N板左端射入平行金属板间的粒子的运动轨迹如图2中曲线Ⅰ所示，则

$\sin\angle O_4OA=\frac{O_4A}{r}=\frac{1}{2}$

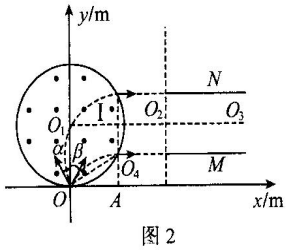


图2

解得$\angle O_4OA=30^{\circ}$ (1分)

所以从N板左端射入的粒子从O点射出时与y轴的夹角为$\alpha=30^{\circ}$

同理，从M板左端射入的粒子从O点射出时与y轴的夹角为$\beta=30^{\circ}$

所以射入板间的粒子占射入磁场粒子的比例为

$\eta_1=\frac{60^{\circ}}{180^{\circ}}=\frac{1}{3}$ (1分)

能射出电场的粒子其偏移量

$s_y=\frac{1}{2}\frac{Eq}{m}\left(\frac{L}{v_0}\right)^2=0.25\ \text{m}=\frac{d}{2}$ (1分)

所以恰好有一半粒子射出，即$\eta=\frac{1}{2}\eta_1=\frac{1}{6}$ (1分)

(3)令$v_0=v_1+v_2$

$Eq=Bqv_1$

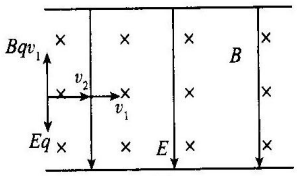


图3

①当$v_0=v_1$时$E=2$ V/m (1分)

②当$v_0>v_1$时

$v_2=v_0-v_1=v_0-\frac{E}{B}$，则粒子以$v_2$做匀速圆周运动

$Bqv_2=m\frac{v_2^2}{R}$

$R=\frac{mv_2}{Bq}=\frac{m(v_0-\frac{E}{B})}{Bq}$

若要粒子能射出，则$R<\frac{d}{4}$

解得$E>\frac{3}{2}$ V/m (1分)

③当$v_0<v_1$时

$v_2=v_1-v_0=\frac{E}{B}-v_0$，粒子以$v_2$做匀速圆周运动

$Bqv_2=m\frac{v_2^2}{R}$

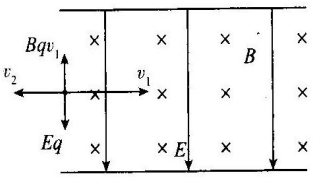


图4

$R=\frac{mv_2}{Bq}=\frac{m(\frac{E}{B}-v_0)}{Bq}$

若要粒子能射出，则$R<\frac{d}{4}$

解得$E<\frac{5}{2}$ V/m (1分)

所以$\frac{3}{2}$ V/m$<E<\frac{5}{2}$ V/m (1分)

【典例5】(10分)如图所示，在一竖直平面内有水平匀强磁场，磁感应强度B的方向垂直该竖直平面向里.让质量为m，电荷量为$q(q>0)$的粒子从坐标原点O沿竖直平面以不同的初速度和方向入射到该磁场中，在竖直平面内还有一竖直向上匀强电场，场强大小$E=\frac{mg}{q}$，a点坐标为$(L,0)$，L未知.

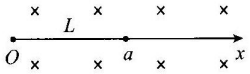
(1)若$L=\frac{mv_0}{qB}$，发现初速度大小为v_0的粒子恰好能够打中a点，求粒子初速度与x轴正方向的可能夹角值；

(2)撤去电场E，只考虑从坐标原点水平向右射入磁场的

粒子，小珂同学发现，无论 L 取什么值，均可使粒子经直线运动通过 a 点，试问 v 应取什么值；

(3)撤去电场 E，只考虑从坐标原点水平向右射入磁场的粒子，若 v 为第(2)问可取值之外的任意值，则 L 取哪些值，可使 q 必定会经曲线运动通过 a 点；(v 已知)

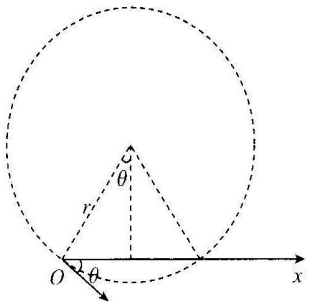
(4)接第(3)问，求 O 到 a 运动过程中的最大速度.(v 已知)



解：由几何关系得 $\sin\theta=\frac{\frac{L}{2}}{r}$

由牛顿第二定律得 $qvB=\frac{mv^2}{r}$ （1 分）

解得 $\theta=30^\circ$



甲

还有一种情况 θ 为钝角，所以 θ 可能为 30° 或 150° （1 分）

(2)由题意知 $mg=qvB$ （1 分）

解得 $v=\frac{mg}{qB}$ （1 分）

(3)把速度 v 分解为 v_1 和 v_0

其中 $v_0=\frac{mg}{qB}$ $v_1=\left|v-\frac{mg}{qB}\right|$

粒子以速度 v_1 做匀速圆周运动，同时以 v_0 水平向右做匀速直线运动，有

$L=v_0t$ （1 分）

$t=nT$

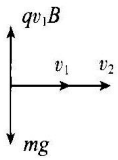
$T=\frac{2\pi m}{qB}$ （1 分）

解得 $L=\frac{2\pi nm^2g}{q^2B^2}(n=1,2,3,\cdots)$ （1 分）

(4)最大速度 $v_m=v_1+v_2=\frac{mg}{qB}+\left|v-\frac{mg}{qB}\right|$ （1 分）

当 $v\geqslant\frac{mg}{qB}$ 时 $v_m=v$ （1 分）

当 $v<\frac{mg}{qB}$ 时 $v_m=\frac{2mg}{qB}-v$ （1 分）



【规律】利用速度的分解，把已知速度配成 V= v_1 + v_2 或 V= v_1 - v_2，让其中一个洛伦兹力增加或减小，以平衡其他力。

十、最小面积问题

【模型解读】最小面积问题也即磁场范围的确定问题。

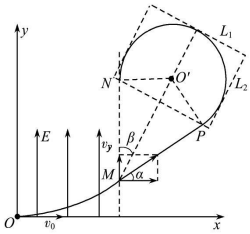
【解决方法】1.作入射方向或出射方向的垂线。

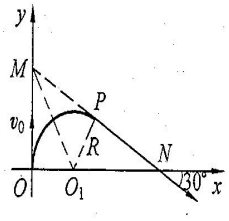
2.延长（或方向延长）速度方向交于 M 点。

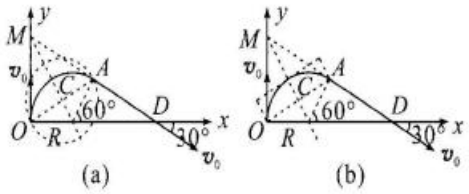
3.作角∠OMP 的角平分线 MO_1，交 ON 于 O_1，O_1 即为轨迹圆的圆心。

4.过 O_1 作 O1P 垂直 MN 于 P 点，P 点即为出　射点。

5.以 OP 为直径所作的圆即为所求最小圆。







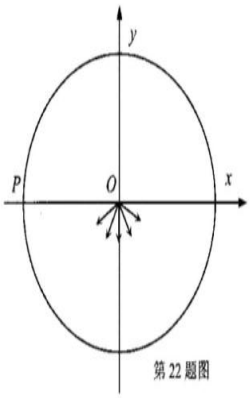
【典例 1】

(10 分) 如图所示，以 α 粒子源为原点建立直角坐标系 xOy，在以 O 点为圆心、半径为 R_0 的圆形区域内存在一个有界匀强磁场，磁场方向垂直纸面向里，磁感应强度为 B_0。α 粒子源在坐标平面内向第三、四象限的各个方向发射速率相同的 α 粒子。已知 α 粒子的电荷量为 $2e$、质量为 m，不计粒子重力及粒子间的相互作用，则

(1) 若磁场分布在整个圆形区域内，则 α 粒子恰能达到而不会飞出磁场的边界，求 α 粒子的速率 v_0；

(2) 若调整磁场边界，可使得所有速率 v_0 的 α 粒子都能在离开圆形区域前以相同的速度通过 y 轴，请画出可以实现这一要求的磁场边界，并将有磁场区域用阴影表示。

(3) 接 (2) 问，若要让所有速率 v_0 的 α 粒子通过 y 轴后全部汇聚到坐标为 $(-R_0,0)$ 的 P 点，则可在圆形区域内再增加一个有界磁场，求该磁场区域的面积及磁感应强度 B_2。



第 22 题图

(1) $qv_0B_0=m\frac{v_0^2}{r}$；（1 分）

$q=2e$；$2r=R_0$（1 分）

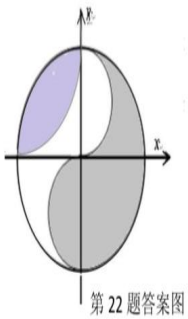
$v_0=\frac{eB_0R_0}{m}$（1 分）

(2) 如图所示第一、三、四象限内有填充区域

圆形区域内第二象限无磁场、第四象限充满磁场（1 分）

第三象限圆形区域内半圆边界，正确作出边界得（1 分）

第一象限圆形区域内半圆边界，正确作出边界得（1 分）



第 22 题答案图

（注意：如果第一、第三象限内边界表示都正确，则区域内没有阴影表示不用扣分）

(3) 如图中第二象限表示区域 $B_2=B_0/2$，（2 分）

面积 $S=\frac{(\pi-2)}{2}R_0$（2 分）

【典例 2】

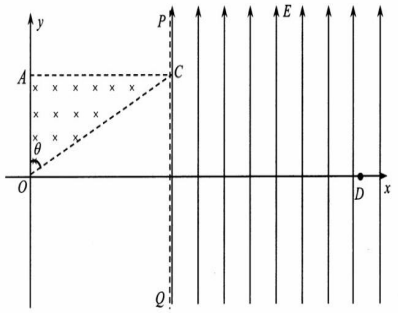
(10 分) 如图所示，平行于直角坐标系 y 轴的 PQ 是用特殊材料制成的，只能让垂直打到 PQ 界面上的电子通过，且通过时并不影响电子的速度。其左侧有一直角三角形区域，分布着方向垂直纸面向里、磁感应强度为 B 的匀强磁场，其右侧有竖直向上场强为 E 的匀强电场。现有速率不同的电子在纸面上从坐标原点 O 沿不同方向射到三角形区域，不考虑电子间的相互作用。已知电子的电量为 e，质量为 m，在 ΔOAC 中，$OA=a$，$\theta=60^\circ$，D 为 x 轴上的一个点，且 $OD=4a$。求：

(1) 当速度方向沿 y 轴正方向时，能从 OC 边出磁场的电子所具有的最大速度是多少；

(2) 能通过 PQ 界面的电子所具有的最大速度是多少；

(3) 在 PQ 右侧 x 轴上什么范围内能接收到电子；

(4) 现把 PQ 右侧电场撤去，增加一垂直纸面向里、磁感应强度为 $2B$ 的矩形匀强磁场，使通过 PQ 界面的电子汇聚于 D 点，求该矩形磁场的最小面积。



22. (10 分) 解：(1) 洛仑兹力提供向心力，有 $evB = m\frac{v^2}{R}$ [1 分]

能从 OC 边出磁场的电子，当运动轨迹和 AC 相切时半径最大，神墙故半径最大值 $R_m=a$，

所以，能从 OC 边出磁场的电子所具有的最大速度 $v_m = \frac{eBa}{m}$ [1 分]

(2) 要使电子能通过 PQ 界面，电子飞出磁场的速度方向必须水平向右，由 (1) 可知：$v = \frac{eBa}{m}$

故 R 越大 v 越大，所以，从 C 点水平飞出的电子，运动半径最大，对应的速度最大故有

$$(R-a)^2 + \left(\sqrt{3}a\right)^2 = R^2$$ [1 分]

所以，$R=2a$。故能通过 PQ 界面的电子所具有的最大速度 $v'_m = \frac{2eBa}{m}$ 。 [1 分]

(3) 只有垂直打到 PQ 界面上的电子通过，故电子进入电场的范围为 PQ 上 C 到 x 轴间的范围；当粒子在 PQ 上的纵坐标为 y ($0<y\leqslant a$) 时，粒子在磁场中运动的半径由几何关系可得：$(r-y)^2 + \left(\sqrt{3}y\right)^2 = r^2$，所以，$r=2y$；那么由洛伦兹力做向心力可得：运动速度 $v' = \frac{2eBy}{m}$；粒子在电场中只受电场力作用，做类平抛运动，故有：

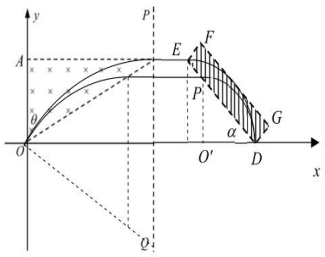
$$y = \frac{1}{2} \times \frac{eE}{m} \times t^2$$ [1 分]

那么，电子打在 x 轴上的位置为 $x = \sqrt{3}a + v't = \sqrt{3}a + 2By\sqrt{\frac{2ey}{mE}}$ [1 分]

所以，$\sqrt{3}a < x \leq \sqrt{3}a + 2Ba\sqrt{\frac{2ea}{mE}}$ [1 分]

(说明：直接用从 C 点射出的临界粒子经电场偏转也可，即算沿电场和垂直电场两个方向的分运动处理同样给分)

(4) 增加磁场的磁感应强度为 $2B$ 则粒子在增加磁场中的运动半径为原磁场中的一半，若粒子从任一点 P 进入磁场，则其圆心在其正下方向的 x 轴上 O'，要会聚于 D 点，则三角形 $PO'D$ 为等腰直角三角形，即 α 为 45°。 [1 分]



对应的磁场区域为如图所示的矩形 $DEFG$ 。[1 分]

该区域长 $ED=\sqrt{2}a$，宽 $EF=a-\frac{\sqrt{2}}{2}a$

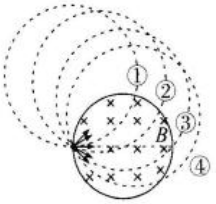
故最小面积为 $S = \left(\sqrt{2}-1\right)a^2$ [1 分]

(说明：第 4 小题没有给出 α 为 45°，画图正确、面积计算正确，也可以给 3 分)

十一、圆形边界磁场的三类动态问题

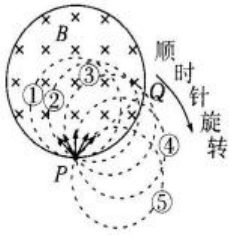
1. 类型一：轨迹半径大于磁场半径

如图所示，在圆形边界上任意一点 P 向磁场内各个方向发射速率相同的带正电的粒子，若粒子的轨迹半径 r 大于磁场半径 R，利用“旋转圆法”分析速度方向不同的粒子的轨迹圆，当轨迹圆与磁场圆交点的连线为磁场直径时，粒子在磁场中运动的时间最长，如图中轨迹③所示.



2. 类型二：轨迹半径小于磁场半径

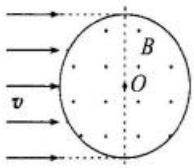
如图所示，在圆形边界上任意一点 P 向磁场内各个方向发射速率相同的带负电的粒子，若粒子的轨迹半径 r 小于磁场半径 R，利用“旋转圆法”分析速度方向不同的粒子的轨迹圆，当轨迹圆与磁场圆交点的连线为轨迹圆直径时，轨迹圆与磁场圆的交点 Q 离入射点 P 最远，粒子射出磁场的区域范围为 $\overset{\frown}{PQ}$，此时弦 PQ 的长度为轨迹圆的直径.



3. 类型三：轨迹半径等于磁场半径

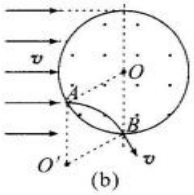
1. 带电粒子的磁聚焦

如图(a)所示，大量同种带正电的粒子，以相同的速度大小平行入射到圆形磁场区域，若轨迹圆半径与磁场圆半径相等，即 $R=r$，则所有带电粒子将从磁场圆边界的某点射出，汇聚于一点.



(a)

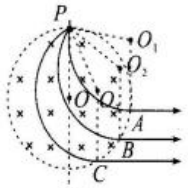
证明：如图(b)所示，以任意粒子的轨迹进行分析，由几何关系知，平行四边形 $OAO'B$ 为菱形，可知 BO' 为轨迹圆半径，故从 A 点射入的粒子必然经过 B 点，以此类推所有粒子均经过 B 点.



(b)

2. 带电粒子的发散

如图(c)所示，在圆形边界上任意一点 P 向磁场内各个方向发射速率相等的相同带负电的粒子，若轨迹圆半径等于磁场圆半径，即 $R=r$，则所有带电粒子将平行的射出磁场.



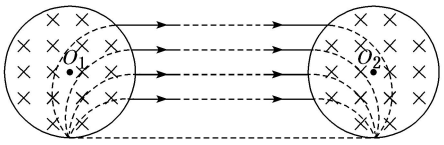
(c)

磁聚焦与磁发散的条件：轨迹半径等于磁场圆半径.

磁聚焦的聚焦点：以入射方向为横轴，以过圆心且与入射方向垂直的直径方向为纵轴，纵轴与磁场圆的两交点均可能为聚焦点，根据带电粒子的电性与磁场方向，确定最终的聚焦点.

磁发散可看成磁聚焦的逆运动.

【小结】

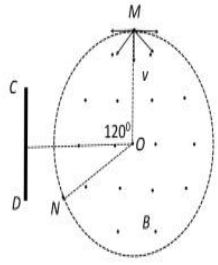
磁发散	磁聚焦
带电粒子从圆形有界匀强磁场边界上同一点射入，如果轨迹半径与磁场半径相等，则粒子出射方向与入射点的切线方向平行	带电粒子平行射入圆形有界匀强磁场，如果轨迹半径与磁场半径相等，则粒子从磁场边界上同一点射出，该点切线与入射方向平行
	

【典例 1】如图所示，半径为 R 的圆形磁场区域内有垂直于平面向外的，磁感应强度为 B 的匀强磁场，M、N 为磁场边界上的两个点，且两点与圆心 O 的连线夹角为 120°，圆形磁场区域的左侧有一长度为 R 的 CD 收集板，CD 板的中心正对圆心 O，当带电粒子打到 CD 板上时即被吸收。在 M 处有一个离子源，该离子源能够在圆形区域平面内向各个方向均匀发射大量的质量为 m、电量为 q 的带电粒子，若带电粒子的速度大小都相同，忽略带电粒子在运动中相互作用的影响，不计重力。

(1) 若沿 MO 方向射入磁场的带电粒子恰好从磁场边界上的 N 点射出磁场，带电粒子的速度大小是多少？

(2) 若只有 M、N 两点之间的左侧圆弧区域有带电粒子射出，求恰好从 N 点射出的粒子在磁场中运动的时间？

(3) 若粒子源同一时刻发射 n 个粒子，且速度为 $v=qBR/m$，粒子源发射一次后立即停止发射粒子，求 CD 板受到粒子撞击的平均作用力？



(1) 由轨迹可知，轨迹半径 $R_1=\sqrt{3}R$ (1 分)

$Bqv_1=\frac{mv_1^2}{R_1}$，解得：$v_1=\frac{BqR_1}{m}=\frac{\sqrt{3}BqR}{m}$ (2 分)

(2) 要使只有 M、N 两点之间的左侧圆弧区域有带电粒子射出，则 MN 间距离是粒子的轨迹直径，所以运动时间恰好等于半周期 (1 分)

$t_2=\frac{T}{2}=\frac{\pi m}{Bq}$ (2 分)

(3) 由 $v=qBR/m$ 可计算粒子的轨迹半径 $R_2=\frac{mv}{Bq}=R$，所有粒子将水平向左离开磁场区。

最先到达收集板的粒子打到 C 点，最后到达收集板的粒子打到 D 点，

这两个粒子在磁场中的轨迹弧的圆心角之差 $\Delta\theta=\frac{\pi}{3}$ (1 分)

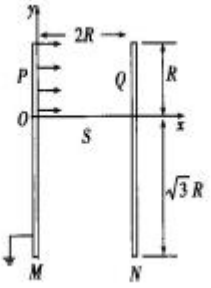
时间差 $\Delta t=\frac{\Delta\theta m}{Bq}$ (1 分)

由动量定理：$\bar{F}\Delta t=\frac{1}{3}nmv$ (1 分)　　解得：$\bar{F}=\frac{nB^2q^2R}{\pi m}$ (1 分)

十二、与光电效应、核反应相结合问题

【题型说明】当带电粒子是由于核反应而生成时，先要写出核反应方程式，求出核反应释放的核能，再求出相应粒子的能量（速度），最后才是带电粒子进入电磁场运动的过程分析和求解。

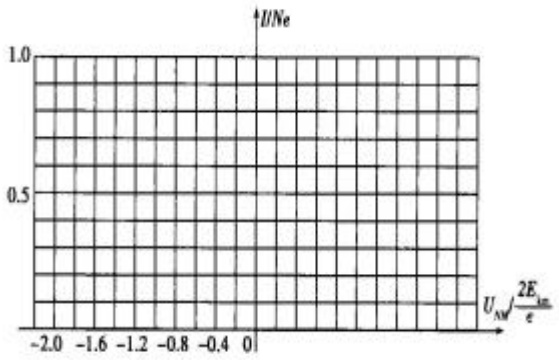
【典例 1】真空中一组间距为 2R，长度为 R 的平行金属板 P、Q，可以用作光电转换装置，放置在 x 轴的正上方，如图所示，在 x 轴的正下方放置同样间距、长度为 $\sqrt{3}R$ 的平行金属板 M、N，两组金属板间绝缘，M 板接地，且在两板间加有电压 U_{MN}，大小、方向均连续可调。P、Q 间有垂直纸面的匀强磁场，光照前 P 不带电。当以频率为 ν 的光照射 P 板时，板中的电子吸收光的能量而逸出。假设所有逸出的电子都垂直于 P 板飞出，在磁场力作用下电子会聚于坐标为 $(R,0)$ 的 S 点，且 P 板最上端的电子从 S 点飞出的方向垂直 x 轴竖直向下，进入 M、N 极板间的电场区域。忽略电子之间的相互作用，保持光照条件不变时，单位时间内从 P 板持续地飞出的电子数为 N，且沿 P 板均匀分布，电子逸出时的初动能均为 E_{k0}，元电荷量为 e，电子的质量为 m。



(1) 求金属板 P 的逸出功；

(2) 求磁感应强度 B 的大小和所需磁场区域的最小面积；

(3) 到达 N 板的电子全部被收集，导出形成电流 I。计算一些关键参数，在图上画出 I-U_{NM} 的关系曲线。



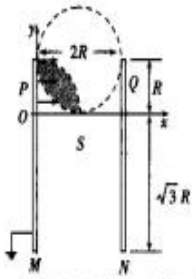
解析 (1)根据光电效应方程可得:$E_{km}=h\nu-W_{逸出}$

解得 $W_{逸出}=h\nu-E_{km}$

(2)从 P 板水平飞出的电子均能过 S 点,则磁场区域是半径为 R 的圆,可知运动半径 $r=R$;由 $evB=m\frac{v^2}{r}$,$E_{km}=\frac{1}{2}mv^2$

解得 $B=\frac{\sqrt{2mE_{km}}}{eR}$

所需磁场区域的最小面积 $S_{min}=\frac{1}{4}\pi R^2-(R^2-\frac{1}{4}\pi R^2)=(\frac{\pi}{2}-1)R^2$



(3)①遏止电压:OS 方向电子刚好不能到达 N 板,

$\frac{1}{2}U_{MN_1}(-e)=0-E_{km}$;

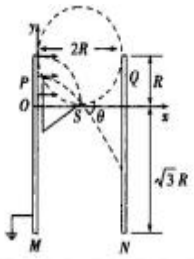
$U_{NM_1}=-\frac{2E_{km}}{e}$;

②饱和电压:垂直 OS 方向电子刚好到达 N 板;竖直方向匀速,水平方向加速;

$R=\frac{1}{2}\cdot\frac{U_{NM_2}e}{2mR}(\frac{\sqrt{3}R}{v})^2$;

$v=\sqrt{\frac{2E_{km}}{m}}$;

$U_{NM_2}=\frac{8E_{km}}{3e}$;

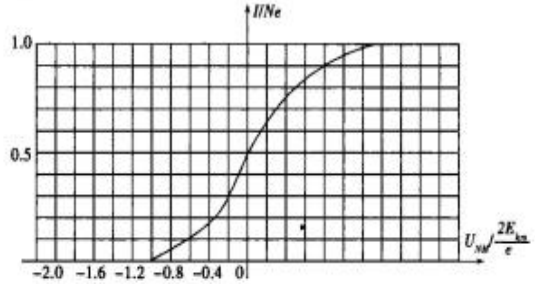


③不加电压时:出射方向与水平方向成 θ 角的电子恰好打到 N 板:

$R=v\cos\theta\times\frac{\sqrt{3}R}{v}$,$v=\sqrt{\frac{2E_{km}}{m}}$;

由几何关系得 $\theta=\frac{\pi}{3}$,$H=\frac{R}{2}$;

电流 $I=0.5Ne$



十三、“洛伦兹力做功”问题

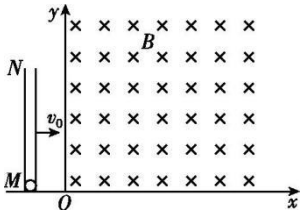
【题型说明】当带电粒子同时参与两个方向上的运动,则洛伦兹力在一个方向做正功,另一个方向做负功,总功为零。此时分两方向对粒子进行分析,可简化问题。

【典例 1】如图所示,有一个无重力空间,y 方向为竖直方向,在 $x\geqslant 0$ 的区域内存在匀强磁场,磁感应强度大小为 B=1 T,方向垂直于纸面向里,绝缘光滑空心细管 MN 的长度为 h=3 m,管内 M 端有一质量为 m=0.1 kg、电荷量 q=0.1 C 的带正电的小球,开始时小球相对管静止.管带着小球沿垂直于管长度的方向以恒定速度 v_0=5 m/s 向右方运动.

(1)已知进入磁场后小球将匀加速上升,求小球上升的加速度;

(2)在小球从管的 M 端到 N 端的过程中,求管壁对小球做的功;

(3)当细管以 v_0=5 m/s 进入磁场时,若给管一定的外力,使其以 a=2.0 m/s² 的恒定加速度向右做匀加速运动,小球将不能以恒定加速度上升.为保证小球仍能在管中匀加速上升,需让细管与小球间具有一特定的摩擦因数 μ.试求该 μ 值及小球相对管上升的加速度 a_y.(要求 $\mu<1$)



3.(1)5 m/s²　(2)1.5 J　(3)$\frac{1}{2}$　4.0 m/s²

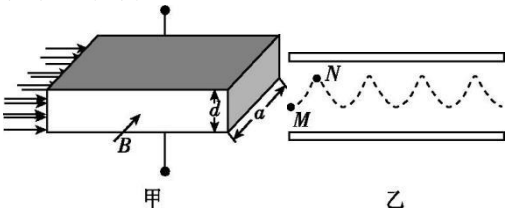
【典例 2】磁流体发电机是对环境污染很少的发电装置,目前,许多国家都积极致力于这方面的研究.磁流体发电机的简化模型如图甲所示:磁流体(气体状态的正、负离子)在喷射装置的作用下,以相同的水平速度 v_0 源源不断地射入左侧发电通道,发电通道上下两面为金属极板,内有垂直于纸面向里的匀强磁场,磁感应强度为 B.已知正、负离子的质量均为 m,带电荷量为 $+q$ 和 $-q$,单位体积内正、负离子数各为 n,离子充满整个发电通道,发电通道的长度足够长,高为 d,宽为 a,离子间的相互作用不计,重力不计.

(1)当发电机的两极板与外界断路时,试判断上、下极板的电势高低,并求出两极板间的最终电压 U_0;

(2)求喷射装置对磁流体做功的功率 P_0;

(3)当两极板与外电路相连时,两极板间电压为 U,且 $U<U_0$,正、负离子在通道内做复杂的曲线运动,假设正离子在通道中的运动轨迹如图乙中虚线所示(负离子与之类似),已知其在 y 轴方向上的分运动是简谐运动,求图中最低点 M 到最高点 N 的高度差 h;(提示:利用简谐运动的对称性)

(4)当此发电机的两极板与电阻值为 R_0 的电阻相连组成闭合回路,利用(3)中所得结论,在 $h<d$ 的情形下,求通过此电阻的电流 I(用题干中的已知量表示).



甲　　乙

【答案】(1)上极板电势高,$U_0=Bdv_0$ (2)$nmad\,v_0^3$ (3)$h=\frac{2m}{qB}(v_0-\frac{U}{dB})$ (4)$I=\frac{Bdv_0}{\frac{B^2d}{2nmav_0}+R_0}$

【解析】(1)用左手定则判断正电荷受洛伦兹力向上,故比下极板高。(1分)

解法一:由动生电动势公式知,$U_0=Bdv_0$(3分)

解法二:$Eq=qv_0B$(1分)

$E=\frac{U}{d}$(1分)　　得　(1分)

(2) 在Δt时间内，射入发电通道的流体长度为

$\Delta x=v_0\Delta t$，

体积$\Delta V=\Delta x a d$，

质量$\Delta m=2nm\Delta V=2nmv_0ad\Delta t$ （1分）

功率 $P=\dfrac{\frac{1}{2}\Delta mv_0^2}{\Delta t}=nmad\,v_0^3$ （2分）

(3) 当$U<U_0$时，由题中条件知，对于最高点与最低点，加速度大小相等，有

$qv_0B-qE=qE-qv_NB$ （1分）

其中 $E=\dfrac{U}{d}$ （1分）

从最低点到最高点，有 $-qEh=\dfrac{1}{2}mv_N^2-\dfrac{1}{2}mv_0^2$（1分）

联立可解得 $h=\dfrac{2m}{qB}\left(v_0-\dfrac{U}{dB}\right)$ （1分）

(4) 设两极板间电压为U，则可认为只有离极板h范围内的离子才能打在极板上，电流可表示为$I=nqhav_0$ （1分）

由欧姆定律，$I=\dfrac{U}{R_0}$（1分）

代入 (3) 中的h，得 $I=\dfrac{Bdv_0}{\frac{B^2d}{2nmav_0}+R_0}$ （1分）

十四、粒子收集问题

【题型说明】当多个粒子通过磁场（或电场）汇聚于一点或某一收集板时，往往需要分析边界粒子和特殊粒子的运动轨迹。

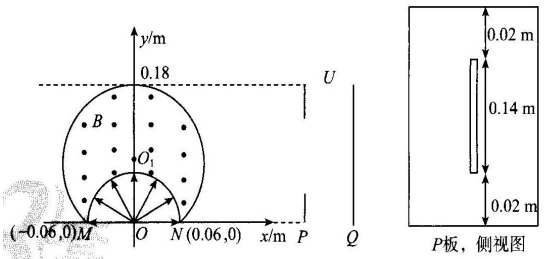
【典例1】

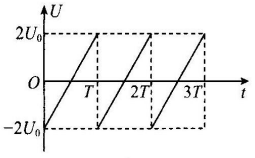
.(10分)如图甲所示，在坐标系xOy的第一、二象限内存在一有界匀强磁场区域(带电粒子能无阻碍通过磁场边界)，两边界都为圆形，其中大圆半径$R_1=0.1$ m，圆心在y轴上的O_1；小圆是半径为$R_2=0.06$ m的半圆，圆心在坐标原点；M、N为两圆形边界的交点. 小圆内存在一辐向电场，圆心与边界间的电压恒为$U_0=450$ V；在磁场右侧与x轴垂直放置一平行板电容器，其左极板P中间开有一狭缝(如图乙所示)，电容器两极板连接交流电源，极板间电压U变化如图丙所示. 在O点，存在一粒子源(图中未画出)，可以在纸面内沿电场向各方向均匀发射质量为$m=8\times10^{-27}$ kg、带电荷量为$q=+8\times10^{-19}$ C的粒子(粒子初速度较小，计算过程中可以忽略)，经辐向电场加速后进入磁场，大部分粒子能以水平向右的速度从大圆边界的右侧离开磁场，已知粒子源每秒钟发射的粒子数量为$N_0=1\times10^{20}$个. 不计粒子的重力及粒子间的相互作用力，$\sin37°=0.6$，$\cos37°=0.8$，求：

(1)带电粒子进入磁场时的速度大小v_0；

(2)带电粒子在磁场中的运动半径r以及匀强磁场的磁感应强度B；

(3)极板P上的狭缝刚好处在纸面位置，水平向右离开磁场的粒子，一部分会打在P极板(狭缝上方、下方)；另一部分会通过狭缝进入电容器，粒子在电容器中运动的时间，远远小于电压变化周期T；粒子一旦接触极板，立刻被吸收，但不会影响电容器的电压；试求在较长的一段时间内，带电粒子对电容器的平均作用力F的大小.





解：(1)由动能定理得$\dfrac{1}{2}mv_0^2=qU_0$ （1分）

解得 $v_0=3\times10^5$ m/s （1分）

(2)由题分析知 $r=\dfrac{R_2}{\tan37°}=0.08$ m （1分）

$r=\dfrac{mv}{qB}$ （1分）

解得 $B=\dfrac{3}{8}$ T$=0.037\,5$ T （1分）

(3)水平向右的粒子 $N_1=\dfrac{143}{180}N_0$ （1分）

进入电容器集板间的粒子 $N_2=\dfrac{1}{2}N_0$ （1分）

进入电容器，向左返回的粒子 $N_3=\dfrac{1}{4}N_2=\dfrac{1}{8}N_0$ （1分）

平均作用力 $F=(N_1+N_3)mv=\dfrac{331}{360}N_0mv_0=\dfrac{331}{1\,500}$ N （2分）

【典例2】

.(10分)医用电子直线加速器结构主要包括电子枪、加速系统、束流传输系统等部件，原理简化如图所示. 其中束流传输系统由导向磁场、偏转磁场和聚焦磁场组成，可以使电子束转向270°后打到靶. 由于电子经过加速后有一定能量宽度，经过导向磁场后会使电子束发散，从而造成成像色差，因此需要通过偏转磁场和聚焦磁场来消除色差.

束流传输系统由三个半径为d的90°扇形磁场组成，圆心为O，方向垂直纸面向外，其中导向磁场和聚焦磁场为匀强磁场，磁感应强度为$B_1=B_3=B$. 偏转磁场为非匀强磁场，磁感应强度B_2呈一定规律分布，可使电子在其间做匀速圆周运动.

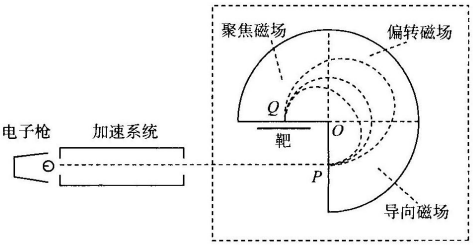
现电子束经加速系统后，以能量宽度$[E-\Delta E,E+\Delta E]$垂直导向磁场边界从P进入束流传输系统，最终粒子能在Q点聚集并竖直向下打到靶上. 已知$PO=QO=\dfrac{d}{2}$，$\Delta E=4\%E\ll E$，能量为E的电子刚好做半径为$\dfrac{d}{2}$的匀速圆周运动到达Q.

(1)若电子电荷量为e，求电子质量m；

(2)求发散电子束进入偏转磁场时的宽度；[计算半径时可使用小量近似公式：当$x\ll1$时，$(1+x)^{\frac{1}{2}}\approx1+\dfrac{1}{2}x$]

(3)对于能量为$E+\Delta E$的电子，求在偏转磁场中运动轨迹处的磁感应强度B_2.

束流传输系统



解:(1)对于能量为 E 的电子,在磁场中做匀速圆周运动的半径为$\frac{d}{2}$

由 $Bev=m\frac{v^2}{r}$得 (1 分)

$r=\frac{mv}{Be}=\frac{\sqrt{2mE}}{Be}=\frac{d}{2}$ (1 分)

求得 $m=\frac{B^2e^2d^2}{8E}$ (1 分)

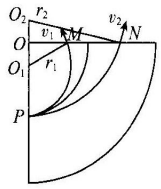
(2)对于能量为 $E-\Delta E$ 的电子有

$r_1=\frac{\sqrt{2m(E-\Delta E)}}{Be}=\frac{\sqrt{2mE}}{Be}\sqrt{1-\frac{\Delta E}{E}}\approx\frac{\sqrt{2mE}}{Be}(1-\frac{\Delta E}{2E})=0.49d$

对于能量为 $E+\Delta E$ 的电子有

$r_2=\frac{\sqrt{2m(E+\Delta E)}}{Be}=\frac{\sqrt{2mE}}{Be}\sqrt{1+\frac{\Delta E}{E}}\approx\frac{\sqrt{2mE}}{Be}(1+\frac{\Delta E}{2E})=0.51d$ (1 分)

轨迹如图所示,由勾股定理得



$OM=\sqrt{(0.49d)^2-(0.01d)^2}=\frac{\sqrt{6}}{5}d$

$ON=\sqrt{(0.51d)^2-(0.01d)^2}=\frac{\sqrt{26}}{10}d$ (1 分)

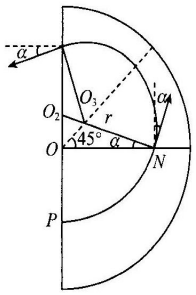
($OM=0.489\,9d$,$ON=0.509\,9d$ 也给 1 分)

发散电子束进入偏转磁场时的宽度为

$MN=\frac{\sqrt{26}}{10}d-\frac{\sqrt{6}}{5}d$ (1 分)

($MN=0.02d$ 也给 1 分)

(3)对于能量为 $E+\Delta E$ 的电子,$ON=\frac{\sqrt{26}}{10}d$,进入偏转磁场的发散角为 α,由于轨迹关于偏转磁场的角平分线对称,因此圆心在平分线上的 O_3 点,半径设为 r,如图所示



其中 $\sin\alpha=\frac{0.01d}{0.51d}=\frac{1}{51}$,$\cos\alpha=\frac{\frac{\sqrt{26}}{10}d}{0.51d}=\frac{\sqrt{26}}{5.1}$

由正弦定理得$\frac{ON}{\sin(45°+\alpha)}=\frac{r}{\sin45°}$ (1 分)

解得 $r=\sin45°\frac{ON}{\sin(45°+\alpha)}=\sin45°\frac{ON}{\sin45°\cos\alpha+\cos45°\sin\alpha}$

$=\frac{ON}{\cos\alpha+\sin\alpha}=\frac{51\sqrt{26}}{100\sqrt{26}+10}d$ (1 分)

解得$\frac{r}{r_2}=\frac{B}{B_2}=\frac{100\sqrt{26}}{100\sqrt{26}+10}$ (1 分)

即 $B_2=(1+\frac{\sqrt{26}}{260})B$ (1 分)

十五、与动量相结合问题-----求撞击力

【题型说明】当粒子打到某一极板求撞击问题,则利用动量定理求解,同时要注意:

1.打到极板的粒子数目与总粒子的个数的关系(或所占比例)。

2.入射速度的方向(垂直还是斜进入【斜进入时往往需要分解速度】)。

3.速度的变化(特别是方向的改变)。

十六、单粒子与多粒子的运动问题

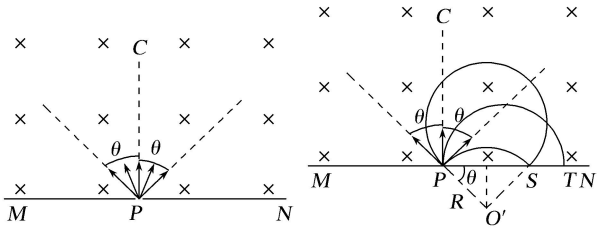
【模型解读】多粒子的运动--三跟踪

(注意三对应:圆心角---弧长—弦长)

①跟踪边界粒子的运动【确定粒子的运动范围】

②跟踪特殊粒子的运动【确定粒子的运动范围】

③跟踪一般粒子的运动【确定一般粒子的运动】



十七、带电粒子在立体空间中的运动

【基本思路】把立体空间运动转化为平面内的运动,画出平面图(俯视、侧视、截面图),找出临界状态及满足的临界条件。

【典例 1】

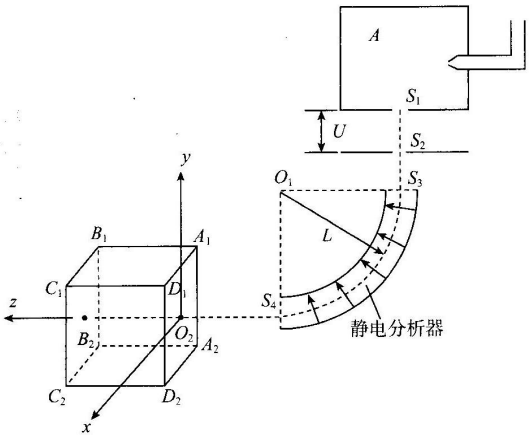
(10 分)如图所示,两种同位素的原子核 M、N 从容器 A 下方的小孔 S_1 不断飘入 S_1 与 S_2 间的加速电场中,其初速度几乎为零.然后经过小孔 S_3 恰好沿$\frac{1}{4}$圆弧通过静电分析器,从小孔 S_4 离开后,由正方体右侧面中心位置处小孔 O_2(即图中坐标系原点)水平向左沿 z 轴正方向垂直右侧面进入正方体空腔内.已知静电分析器内有均匀辐向分布的电场,粒子运动轨迹处电场强度大小为 E,圆弧半径和正方体边长均为 L;M、N 的质量分别为 m、$3m$,带电荷量均为 q,重力不计;不考虑粒子之间的相互作用,打在正方体腔壁上的粒子被全部吸收,且不影响腔内场强的分布.

(1)求加速电场两极板之间的电压 U;

(2)若在空腔内加沿 x 轴正方向、大小为 E 的匀强电场,求粒子 M、N 打在正方体平面上的位置坐标;

(3)若在空腔内加沿 y 轴正方向、大小为$\sqrt{\frac{mE}{qL}}$的匀强磁场,求粒子 N 打在正方体平面上的位置坐标;

(4)若(2)、(3)中的电场和磁场同时存在,单位时间内有 k 个粒子 M 进入腔内,求平面 $B_1C_1C_2B_2$ 受到粒子 M 的冲击力大小?



.(10分)

解:(1)设粒子经加速获得的速度为 v,则

$$qU=\frac{1}{2}mv^2$$

$$qE=\frac{mv^2}{L}\quad(1分)$$

解得 $U=\frac{EL}{2}\quad(1分)$

(2)设粒子打在平面 $C_1D_1D_2C_2$ 上,则

$\frac{L}{2}=\frac{1}{2}at^2$, $z=vt$ (1分)

$ma=qE$, $qE=\frac{mv^2}{L}$ (1分)

联立解得 $z=L$

粒子 M、N 打在正方体平面上的位置坐标均为 $(\frac{L}{2},0,L)$ (1分)

(3)在磁场中运动有 $qE=\frac{3mv^2}{L}$, $qvB=3m\frac{v^2}{r}$ (1分)

联立解得粒子在磁场中做圆周运动的轨迹半径 $r=\sqrt{3}L$ (1分)

若粒子恰好打在 B_1B_2 上,则半径 $r=\frac{5}{4}L$,所以粒子打在平面 $B_1C_1C_2B_2$ 上.

粒子 N 打在正方体平面上的位置坐标均为 $[(\sqrt{2}-\sqrt{3})L, 0, L]$ (1分)

(4)粒子 M 沿直线匀速运动并垂直撞击平面 $B_1C_1C_2B_2$,设粒子受到平面的作用力为 F,则在 Δt 时间内有

$-F\Delta t=0-kmv\Delta t$ (1分)

平面 $B_1C_1C_2B_2$ 受到粒子 M 的冲击力大小为 $F'=F=k\sqrt{qmEL}$ (1分)

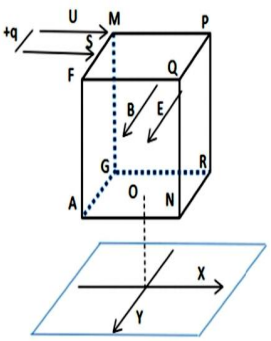
【典例2】

(10分)如图所示,一些质量为 m、电荷量为 $+q$ 的带电粒子从一线状粒子源射出(初速度可视为 0)经过电场 U 加速后,粒子以一定的水平初速度从 MS 段垂直射出(S 为 MF 中点),进入边长 L 的正方体电磁修正区内(内部有垂直面 $MPRG$ 的匀强磁场 B 与匀强电场 E)。距离正方体底部 L 处有一与 $RNAG$ 平行的足够大平板,能吸收所有出射粒子。现以正方体底面中心 O 在平板的垂直投影点为原点,在平板内建立直角坐标系(其中 x 轴与 GR 平行)。所有带电粒子都从正方体底面离开,且从 M 点进来的粒子在正方体中运动的时间为 $\frac{\pi m}{2qB}$。

(1)粒子射出正方体电磁修正区后的速度;

(2)若满足关系式 $E=\sqrt{\frac{8qUB^2}{\pi^2 m}}$,求从 S 点入射的粒子最后打到平板上的位置坐标;

(3)接(2)问,若粒子源单位时间内射出 n 个粒子,则单位时间内平板受到粒子的作用力为多大?



23.【答案】(1) $\sqrt{\frac{E^2\pi^2m+8B^2qU}{4B^2m}}$; (2) $(\frac{L}{2}, \sqrt{\frac{\pi^2mU}{8B^2q}}+L)$; (3) $2n\sqrt{qum}$

(1)由动能定理得 $qU=\frac{1}{2}mv_水^2$

得 $v_水=\sqrt{\frac{2qU}{m}}$ $a=\frac{Eq}{m}$ $t=\frac{\pi m}{2qB}$ 1'

所以 $v_y=at=\frac{E\pi}{2B}$

故可得 $v_{max}=\sqrt{v_y^2+v_水^2}=\sqrt{\frac{E^2\pi^2m+8B^2qU}{4B^2m}}$ 2'

(2)由 $x_y=\frac{1}{2}at^2$

解得 $x_y=\sqrt{\frac{\pi^2mU}{8B^2q}}$ 1' 由(1)得 $v_水=v_y$

故 $t_2=\frac{L}{v_水}=\sqrt{\frac{mL^2}{2qU}}$ 1' $x_{y总}=\sqrt{\frac{\pi^2mU}{8B^2q}}+t_2\times v_y=\sqrt{\frac{\pi^2mU}{8B^2q}}+L$ 1'

又因为 x 轴对应直线为 $x=\frac{L}{2}$ 坐标为 $(\frac{L}{2}, \sqrt{\frac{\pi^2mU}{8B^2q}}+L)$ 1'

(3)对粒子 $F\Delta t=nm\Delta tV_合=nm\Delta t\sqrt{2}v_y$ 2' $F=2n\sqrt{qum}$

由牛三定律可知对地板作用力 $F=2n\sqrt{qum}$ 1'

【典例3】

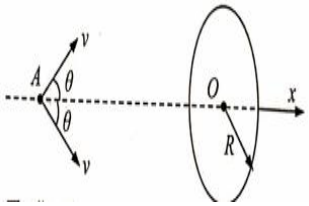
.(10分)运动的合成与分解告诉我们一个复杂合运动可看成几个简单分运动同时进行,比如平抛运动:如果我们想直接得到它的轨迹方程就比较困难,为方便处理,我们将合运动分解成一个匀速直线运动和一个匀变速直线运动同时进行。这种思想方法得到了广泛的应用。如图所示,一人工转变核反应的反应区 A,会发射大量 α 粒子(即 ^4_2He),轰击静止的铍核(^9_4Be),生成碳核(碳12)和另一个核子,发现碳核仅在如图所示的竖直平面(即纸面)内,θ 最大为 $60°$ 范围内(θ 为碳核速度与水平 x 轴正方向的夹角)沿各个方向按角度均匀分布地射出,对应速率为 $v=\frac{3deB}{4\pi m\cos\theta}$。整个空间处于一个向右的场强为 B 的匀强磁场中,θ 反应区右侧有一个竖直圆屏,与 A 相距为 d,圆屏圆心 O 与 A 的连线垂直于圆屏。不考虑粒子重力作用及生成物间的相互作用,已知电子电量大小为 e,中子和质子质量(即核子质量)均为 m,求:

(1)若某 α 粒子以水平速率 v_0 轰击铍核,生成碳核速度与 α 粒子入射速度同向(即 $\theta=0°$),

与出此核反应方程式,书写时请推断出核反应生成的另一核子;并计算另一核子的速率 v_1;

(2)求 $\theta=45°$ 的碳核打到圆屏的位置与圆心的距离 L;

(3)若已知圆屏的半径为 R,求打到圆屏上碳核的数目占总生成碳核的百分比(可以用反三角函数表示)。



解答:

(1) $^4_2H_e+^9_4B_e\rightarrow^{12}_6C+^1_0n$ (1分)

反应前后动量守恒:

$$4mv_0+0=12m\frac{3deB}{4\pi m\cos\theta}+mv_1$$

$$v_1=4v_0-\frac{9deB}{\pi m\cos\theta}=4v_0-\frac{9deB}{\pi m}\quad(1分)$$

(2)生成碳核速度 v 分解成水平与竖直:水平分速度为 $v\cos\vartheta$,水平方向匀速运动;竖直面内,竖直分速度 $v\sin\vartheta$,做匀速圆周运动。

圆周运动周期: $T=\frac{2\pi\bullet12m}{6eB}=\frac{4\pi m}{eB}$ (1分)

从反应区到圆屏的时间: $t=\frac{d}{v\cos\theta}=\frac{4\pi m}{3eB}$

得：$t=\frac{1}{3}T$，即圆正好转过$\frac{1}{3}$，对应圆心角 θ=120°　（1 分）

半径：$r=\frac{12mv\sin\theta}{6eB}=\frac{3d}{2\pi}\tan\theta$

由几何关系得：$L=2r\sin\frac{\beta}{2}=2r\sin 60^\circ$，

即：$L=\sqrt{3}r$　（1 分）

得：$L=\frac{3\sqrt{3}d}{2\pi}\tan\theta$

对于ϑ=45°的碳核：　$L=\frac{3\sqrt{3}d}{2\pi}$　（1 分）

（3）如上分析，当粒子打到圆屏上，粒子还是转过$\frac{1}{3}$圈。

由$r=\frac{3d}{2\pi}\tan\theta$可知：　θ越大，r越大

故最大半径为：　$r_m=\frac{3d}{2\pi}\tan 60^\circ=\frac{3\sqrt{3}d}{2\pi}$　（1 分）

L的最大值为：　$L_m=\sqrt{3}\frac{3d}{2\pi}\tan 60^\circ=\frac{9d}{2\pi}$

① 若$R\geq\frac{9d}{2\pi}$

则单位时间内打到圆屏上碳核的数目占总生成碳核的百分比η=100%　（1 分）

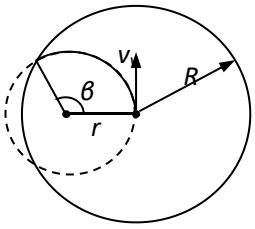
② 若$R<\frac{9d}{2\pi}$

设刚好打到圆屏边缘的粒子圆周运动半径为r'，碳核从反应区打出时与水平方向夹角为ϑ'

$\sqrt{3}r'=R\sqrt{3}\frac{3d\tan\theta'}{2\pi}=R$　　$\theta'=\arctan\frac{2\sqrt{3}\pi R}{9d}$　（1 分）

单位时间内打到圆屏上碳核的数目占总生成碳核的百分

$$\eta=\frac{\arctan\frac{2\sqrt{3}\pi R}{9d}}{\frac{\pi}{3}}$$



解得：

$$\eta=\frac{3\arctan\frac{2\sqrt{3}\pi R}{9d}}{\pi}$$　（1 分）

【典例 4】

（10 分）如图所示，静止于 P 处的带正电粒子，经加速电场加速后沿图中 1/4 圆弧虚线通过静电分析器，从 O 点垂直竖直 xOy 平面向上进入边长为 L 的立方体有界匀强磁场区域，立方体底面 $ABCD$ 位于 xOy 平面内，初始磁场 B_0（未知）方向沿 y 轴负方向（图中未画出），$EFGH$ 平面是一个荧光显示屏，当粒子打到荧光屏上某一点时，该点能够发光，静电分析器通道内有均匀辐向分布的电场，方向如图 1 所示．已知加速电场的电压为 U，圆弧虚线的半径为 R，粒子质量为 m，电荷量为 q，粒子重力不计．

（1）求粒子在辐向电场中运动时其所在处的电场强度 E 的大小；

（2）若粒子恰好能打在棱 EH 的中点 M 点，求初始匀强磁场的磁感应强度 B_0 的大小；

（3）若分别在 x 方向与 y 方向施加如图 2 所示随时间周期性变化的正交磁场，沿坐标轴正方向的磁感应强度取正，不计粒子间的相互作用，粒子在磁场中运动时间远小于磁场变化的周期，不考虑磁场变化产生的电场对粒子的影响。

①试确定$\frac{T}{8}$时刻射入的粒子打在荧光屏上的亮斑 N 点坐标位置（结果用 x，y 二维坐标加以表示）．

②试确定一个周期内粒子在荧光屏上留下的光斑轨迹形状，并写出在轨迹方程（用 x，y 坐标表示）．

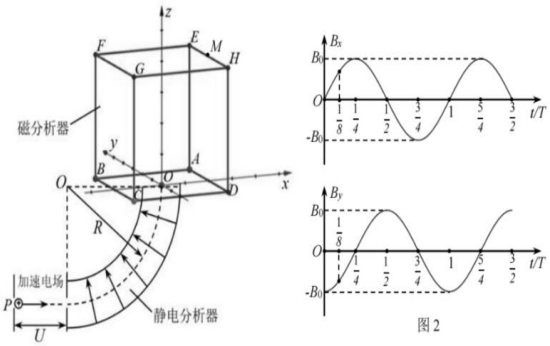


图 2

【解答】

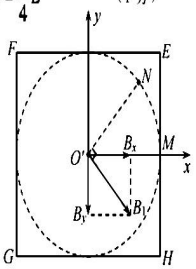
(1)粒子在加速电场中加速，根据动能定理有：$qU=\frac{1}{2}mv^2$　（1 分）

在辐向电场中，电场力提供向心力，有：$Eq=m\frac{v^2}{R}$　解得：$E=\frac{2U}{R}$　（2 分）

(2)粒子在匀强电场中做匀速圆周运动，根据牛顿第二定律可知$qvB_0=m\frac{v^2}{r}$即$r=\frac{mv}{qB_0}$　（1 分）

粒子恰好能打在 M 点，由几何关系，$\left(r-\frac{L}{2}\right)^2+L^2=r^2$，得，$r=\frac{5}{4}L$　（1 分）

解得：$B_0=\frac{4}{5L}\sqrt{\frac{2mU}{q}}$　（1 分）



(3)$\frac{T}{8}$时刻$B_x=\frac{\sqrt{2}}{2}B_0$，$B_y=-\frac{\sqrt{2}}{2}B_0$，

合磁感应强度$B_1=\sqrt{B_x^2+B_y^2}=B_0$，方向 $O\to D$　（1 分）

由左手定则，粒子将在 AOE 平面内运动，打到荧光屏上 N 点时到 O' 的距离与 $O'M$ 相同，

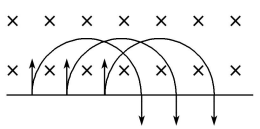
$O'N$ 与 x 轴的夹角成 45°，所以 N 点的坐标为$\left(\frac{\sqrt{2}}{4}L,\frac{\sqrt{2}}{4}L\right)$。　（1 分）

任意时刻，$B_x=B_0\sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right)$，$B_y=-B_0\cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right)$，合磁场$B_2=\sqrt{B_x^2+B_y^2}=B_0$，（1 分）

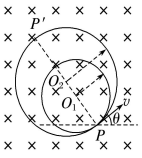
一个周期内粒子在荧光屏上留下的光斑轨迹是圆，轨迹方程为$x^2+y^2=\frac{L^2}{4}$　（1 分）

十八、“数学圆”模型在电磁学中的应用

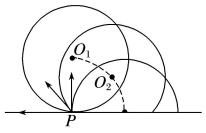
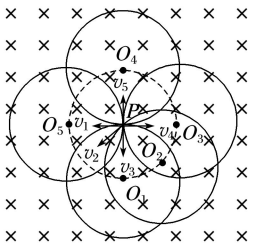
（一）“平移圆”模型【当入射粒子位置可变时】

适用条件	速度大小一定，方向一定，但入射点在同一直线上	粒子源发射速度大小、方向一定，入射点不同但在同一直线上的带电粒子进入匀强磁场时，它们做匀速圆周运动的半径相同，若入射速度大小为 v_0，则半径 $R=\frac{mv_0}{qB}$，如图所示 
	轨迹圆圆心共线	带电粒子在磁场中做匀速圆周运动的圆心在同一直线上，该直线与入射点的连线平行
界定方法	将半径为 $R=\frac{mv_0}{qB}$的圆进行平移，从而探索粒子的临界条件，这种方法叫“平移圆”法	

（二）“放缩圆”模型【当入射粒子速度大小可变时】

适用条件	速度方向一定，大小不同	粒子源发射速度方向一定，大小不同的带电粒子进入匀强磁场时，这些带电粒子在磁场中做匀速圆周运动的轨迹半径随速度的变化而变化
	轨迹圆圆心共线	如图所示(图中只画出粒子带正电的情景)，速度 v 越大，运动半径也越大．可以发现这些带电粒子射入磁场后，它们运动轨迹的圆心在垂直初速度方向的直线 PP' 上 
界定方法	以入射点 P 为定点，圆心位于 PP' 直线上，将半径放缩作轨迹圆，从而探索出临界条件，这种方法称为“放缩圆”法	

（三）“旋转圆”模型【当入射粒子速度方向可调时】

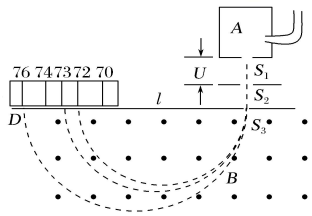
适用条件	速度大小一定，方向不同	粒子源发射速度大小一定、方向不同的带电粒子进入匀强磁场时，它们在磁场中做匀速圆周运动的半径相同，若入射初速度大小为 v_0，则圆周运动轨迹半径为 $R=\frac{mv_0}{qB}$，如图所示 
	轨迹圆圆心共圆	如图，带电粒子在磁场中做匀速圆周运动的圆心在以入射点 P 为圆心、半径 $R=\frac{mv_0}{qB}$ 的圆上 
界定方法	将一半径为 $R=\frac{mv_0}{qB}$ 的圆以入射点为圆心进行旋转，从而探索出临界条件，这种方法称为“旋转圆”法	

第 4 节　质谱仪与回旋加速器

一、质谱仪

1. 用途：质谱仪可以测量带电粒子的质量或比荷 $\frac{q}{m}$，是分析同位素的重要工具。

2. 构造：如图所示，A 为电离室，U 为加速电场，B 为匀强磁场，D 为照相底片。



3.原理：

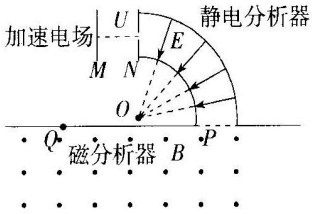
（1）粒子被加速电场加速，有 $qU=\frac{1}{2}mv^2$.

（2）粒子在磁场中做匀速圆周运动，

洛伦兹力提供向心力，有 $qvB=\frac{mv^2}{r}$，$l=2r$.

由以上两式可得 $r=\frac{1}{B}\sqrt{\frac{2mU}{q}}$，$m=\frac{qr^2B^2}{2U}$，$\frac{q}{m}=\frac{2U}{B^2r^2}$.

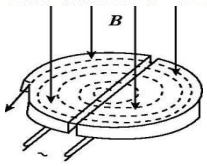
【变式】



二、回旋加速器

1. 用途：回旋加速器利用带电粒子在电场中可加速，在磁场中做匀速圆周运动的特点，使带电粒子能在较小的空间范围内多次受到电场的加速。

2. 回旋加速器的结构：核心部分是两个 D 形金属盒，两盒之间留有一道窄缝，在中心附近 A 处放有粒子源，D 形盒装在真空容器中，整个装置放在巨大电磁铁产生的匀强磁场中，并把两个 D 形盒分别接在高频电源的两极上。



3. 工作原理

(1)电场加速：$qU=\Delta E_k$。

(2)磁场约束偏转：$qvB=m\frac{v^2}{r}$，$r=\frac{mv}{qB}\propto v$。

(3)加速条件：高频电源的周期与带电粒子在 D 形盒中运动的周期相同，即 $T_{电}=T_{回}=\frac{2\pi m}{qB}$。

【一个加速器只能加速一种粒子，要加速其他粒子必须要改变 T 或 B】；

4. 回旋加速器不能无限地对粒子加速。

【拓展】(1)粒子做匀速圆周运动的最大半径等于 D 形盒半径 R。

(2)在粒子质量、电荷量确定的情况下，粒子所能达到的最大动能只与加速器的半径 R 和磁感应强度 B 有关，与加速电压 U 无关。即 $E_{km}=\frac{1}{2}mv_m^2=\frac{1}{2}m\left(\frac{qBR}{m}\right)^2=\frac{q^2B^2R^2}{2m}$。

加速电压只影响带电粒子在 D 形盒内加速的次数。

（3）用金属盒可以起到静电屏蔽的作用。

（4）带电粒子在 D 形盒内运动时，越靠近 D 形金属盒的边缘，相邻两轨道的间距越小。即

$$\frac{r_k}{r_{k+1}}=\frac{v_k}{v_{k+1}}=\sqrt{\frac{2k-1}{2k+1}}$$

5.回旋加速器的解题思路

（1）带电粒子在盒间缝隙的电场中被加速、在磁场中偏转，每经过一次电场，粒子被加速一次.

（2）带电粒子在磁场中偏转、半径不断增大，但周期不变，最大动能与 D 形盒的半径有关.

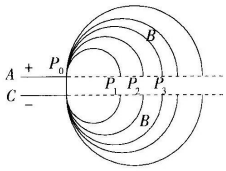
6.加速时间的计算

通常不考虑带电粒子在盒间的加速时间. 若考虑加速时间，如何计算粒子从初速度为 0 加速到最大速度，粒子在盒间的运动时间呢?

思考方式：不考虑粒子在磁场中运动的情况，仅考虑粒子在盒间加速的运动情况，相当于粒子一直在盒间做匀加速直线运动，

则加速时间 $t=\frac{v_{\max}}{a}=\frac{dmv_{\max}}{qU}$.

【变式】



【记忆口诀】

洛仑兹力安培力，左手定则找关系。

磁场应用模型多，稳定平衡来解决。

带电粒子场中跑，变幻莫测把力找。

定其运动画其痕，几何关系最重要。

【本章高频考点】

1.带电粒子在电磁场的实际应用模型（速度选择器，电磁流量计，霍尔效应，磁流体发动机）

2.带电粒子在电磁场中运动（往往以压轴题的方式出现）

第三部分 物理方法概述

一、对称法

运用对称性的思维方法称为对称法。

二、临界极值法

通过对过程及状态进行分析，找出临界或极值状态下满足的条件或规律的方法。

三、递推法

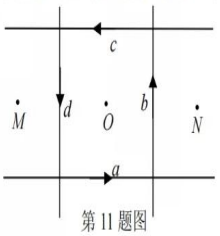
递推法是一种研究和解答问题的基本方法，它的着力点就是利用某个特殊的事物推理出一般原理与普遍事物。

第四部分 易错、疑难问题选

1. 如图所示，a、b、c、d是四条无限长的通电直导线，电流大小相同，彼此相互绝缘，围成一个正方形，O为正方形的中心，M、N分别为O关于导线d、b的对称点。已知O点磁感应强度为B_1，M点的磁感应强度为B_2。当撤去b时，M、N点的磁感应强度分别为

A. $\frac{B_1}{4}$; $B_2-\frac{B_1}{4}$　　B. $\frac{B_1}{4}$; $B_2+\frac{B_1}{4}$

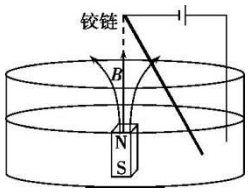
C. $\frac{B_2}{4}$; $B_2+\frac{B_1}{4}$　　D. $\frac{B_2}{4}$; $\frac{3B_1}{4}$



第 11 题图

【答案】B

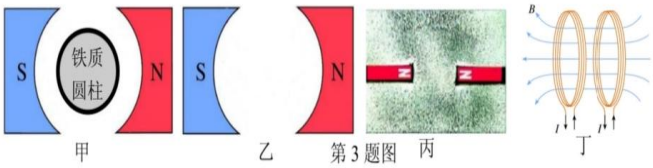
2.法拉第电动机原理如图所示。条形磁铁竖直固定在圆形水银槽中心，N 极向上。一根金属杆斜插在水银中，杆的上端与固定在水银槽圆心正上方的铰链相连。电源负极与金属杆上端相连，与电源正极连接的导线插入水银中。从上往下看，金属杆　（　D　）



A.　向左摆动　　B. 向右摆动　　C. 顺时针转动　　D. 逆时针转动

【答案】D

3. 如图 3 所示，甲、乙、丙、丁所示是四种常见的磁场，下列分析正确的是



A. 矩形线圈在甲图两异名磁极间匀速转动，可产生正弦式交流电

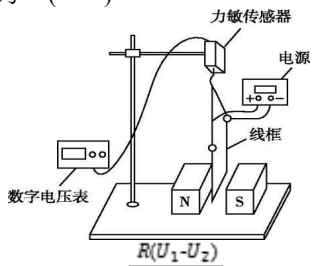
B. 矩形线框放置在乙图中异名磁极间所制成的磁电式电表，表盘刻度均匀

C. 图丙中相距很近的两个同名磁极之间的磁场，除边缘外，可认为是匀强磁场

D. 图丁中相距一定距离的两个平行放置的线圈通电时，其中间区域的磁场可认为是匀强磁场

【答案】D

4.利用如图所示的实验装置可以测量磁感应强度 B.用绝缘轻质丝线把底部长为 L、电阻为 R、质量为 m 的 U 形线框固定在力敏传感器的挂钩上，并用轻质导线连接线框与电源，导线的电阻忽略不计. 当外界拉力 F 作用于力敏传感器的挂钩上时，数字电压表会有示数 U，且数字电压表上的示数 U 与所加拉力 F 成正比，即 $U=kF$，式中 k 为比例系数. 当线框接入恒定电压为 E_1 时，电压表的示数为 U_1；接入恒定电压为 E_2 时(电流方向不变)，电压表示数为 U_2，则磁感应强度 B 的大小为　（　　）

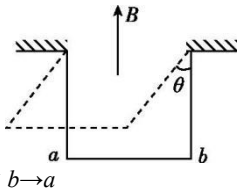


A. $B=\frac{R(U_1-U_2)}{k(E_1-E_2)L}$　　B. $B=\frac{R(U_1-U_2)}{k(E_1+E_2)L}$

B. $B=\frac{R(U_1+U_2)}{k(E_2-E_1)L}$　　D. $B=\frac{R(U_1+U_2)}{k(E_2+E_1)L}$

【答案】A

5.如图所示，质量为 m、长为 l 的钢棒 ab 用长度也为 l 的两根轻导线水平悬吊在竖直向上的匀强磁场中. 未通电时，轻导线静止在竖直方向，通入大小为 I 的恒定电流后，棒向外偏转的最大角度为 θ，则　（　　）



A.棒中电流的方向为 $b\to a$

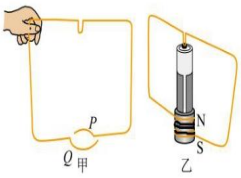
B.磁感应强度大小为 $\frac{mg\tan\theta}{Il}$

C.磁感应强度大小为 $\frac{mg(1-\cos\theta)}{Il\sin\theta}$

D.若增大轻导线的长度，则 θ 角增大

【答案】C

6. 小明同学制作了一个有趣的“简易电动机”，将一节5号干电池的正极向上，几块圆柱形强磁铁片（能导电）吸附在电池的负极上，把一段裸铜导线弯折成一个线框，如图甲所示，线框上端的中点折出一个突出部分与电池的正极良好接触，下面弯曲的两端与磁铁表面保持良好接触，如图乙所示，放手后线框就会转动起来。关于该“简易电动机”，下列说法正确的是



A. 若磁铁N极朝上，从上往下看，该线框逆时针旋转

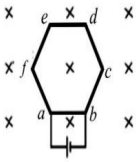
B. 若将磁铁上下对调，“电动机”转动方向可能不变

C. 若在磁铁下面再吸附一块同样的磁铁片，转动稳定后转速更大

D. “简易电动机”由静止到转动起来的过程中，电源的功率不断增大

【答案】C

7. 如图所示，正六边形线框 *abcdef* 由六根相同的导体棒连接而成，固定于匀强磁场中，线框平面与磁感应强度方向垂直，顶点 *a*、*b* 与直流电源两端相接。已知导体棒 *ab* 受到的安培力大小为 *F*，则线框受到的安培力的大小为



第7题图

A. 2*F*

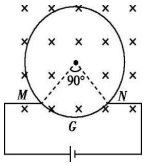
B. 1.2*F*

C. 0.8*F*

D. 0

【答案】B

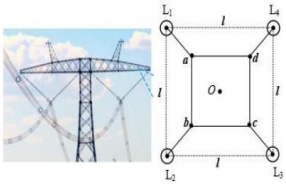
8.如图所示，电阻均匀的圆环固定于匀强磁场中，环平面与磁场方向垂直，*M*、*N* 与直流电源相连，圆环的劣弧 *MGN* 对应的圆心角为90°，它所受的安培力大小为 *F*，则整个圆环所受的安培力大小为（　　）



A.2*F*　　B.$(\sqrt{2}+1)F$　　C.$\dfrac{3+\sqrt{2}}{3}$F　　D.$\dfrac{4}{3}$F

【答案】D

9. 如左图所示，高压输电线上使用“*abcd* 正方形间隔棒”支撑导线 L_1、L_2、L_3、L_4，目的是将导线间距固定为 *l*，防止导线相碰，右图为其截面图。*abcd* 的几何中心为O，当四根导线通有等大同向电流时



A. 几何中心O点的磁感应强度不为零

B. L_1 对 L_2 的安培力小于 L_1 对 L_3 的安培力

C. L_1 所受的安培力与 L_2 所受的安培力方向相反

D. L_1 所受安培力的方向沿正方形的对角线 *ac* 方向

【答案】D

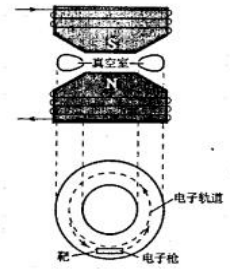
10. 如图，是电子感应加速器的示意图，上图是侧视图，下图是真空室的俯视图，如果从上向下看，要实现电子沿逆时针方向在环中加速运动。那么电磁铁线圈中的电流应满足

A. 与图示线圈中电流方向一致，电流在减小

B. 与图示线圈中电流方向一致，电流在增大

C. 与图示线圈中电流方向相反，电流在减小

D. 与图示线圈中电流方向相反，电流在增大



【答案】B

11. 如图甲所示，高压输电线上使用“⌹”形刚性绝缘支架支撑电线，防止电线相碰造成短路。示意图如图乙所示，L_1、L_2、L_3、L_4 为四根导线，*abcd* 为正方形，几何中心为 *O*，当四根导线通有等大同向电流时

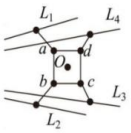
A. L_1 所受安培力的方向沿正方形的对角线 *ac* 方向

B. L_1 对 L_2 的安培力小于 L_1 对 L_3 的安培力

C. 几何中心 *O* 点的磁感应强度不为零

D. 夜间高压输电线周围有时会出现一层绿色光晕，这是一种强烈的尖端放电现象


图甲



第11题图　　图乙

【答案】A

12

. 磁铁在弹簧的作用下置于粗糙的斜面上，极性如图所示，在磁铁的中垂线某一位置放置一根通电导线，电流方向垂直于纸面向外，目前弹簧处于压缩状态，磁铁保持静止，则下列说法正确的是



A. 磁铁受到的导线的力垂直于斜面向下

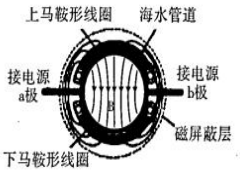
B. 若增大通电导线的电流，则磁铁与斜面的摩擦力就会增加

C. 若撤去通电导线磁铁会沿斜面向下运动

D. 若通电导线沿磁铁的中垂线远离磁铁，磁铁受到的摩擦力不变

【答案】D

13. 为了降低潜艇噪音，科学家设想用电磁推进器替代螺旋桨。装置的截面图如图所示，电磁推进器用绝缘材料制成海水管道，马鞍形超导线圈形成如图所示的磁场，现潜艇在前进过程中海水正源源不断地被推向纸外。则下列说法正确的是



A. 图中所接电源为直流电源，*a* 极为电源正极

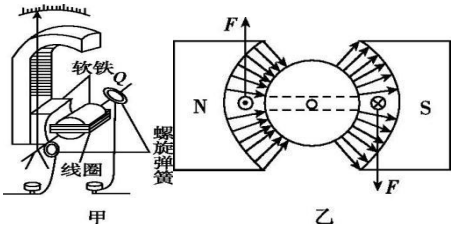
B. 同时改变磁场方向和电源正负极可实现潜艇倒退

C. 加速阶段，海水对潜艇的力与潜艇对海水的力的大小相等

D. 电源输出的能量完全转化为海水的动能和潜艇的动能

【答案】C

14.如图甲所示是磁电式电流表的结构示意图，图乙是里面的线圈在通电后的正视图.关于磁电式电流表，以下说法错误的是（　　）



A.通电线圈所在的磁场是匀强磁场

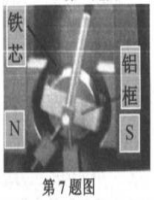
B.磁电式电流表的刻度是均匀的

C.线圈绕在铁芯上，起到电磁阻尼的作用

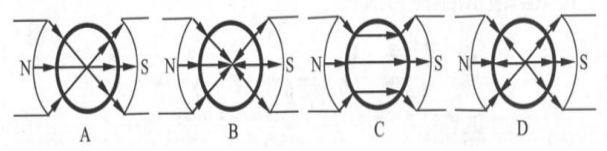
D.磁电式电流表能够测量电流的大小和方向

【答案】A

15. 如图所示为实验室所用电流表的主要部件。绕在铝框上的线圈通电以后，在磁极与软铁芯构成的磁场中受力而转动。某同学据此现象思考软铁芯内部的磁感线分布，并提出了如下猜想，可能正确的是

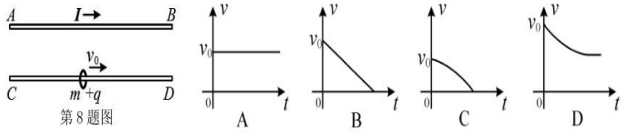


第7题图



【答案】C

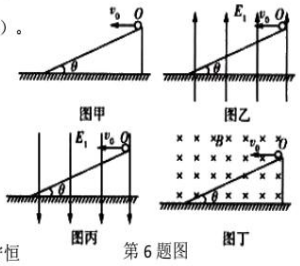
16. 如图所示，足够长的导体棒 AB 水平放置，通有向右的恒定电流 I。足够长的粗糙细杆 CD 处在导体棒 AB 的正下方不远处，与 AB 平行。一质量为 m、电量为 $+q$ 的小圆环套在细杆 CD 上。现给圆环向右的初速度 v_0，圆环运动的 v-t 图象不可能是



第 8 题图

【答案】B

17. 如图所示，已知甲图中没有电场和磁场，乙图中有竖直向上的匀强电场，丙图中有竖直向下的匀强电场，丁图中有垂直纸面向里的匀强磁场。四幅图中的斜面相同且绝缘，相同的带负电塑料小球从斜面上的同一点 O 以相同初速度 v_0 同时沿水平方向抛出，分别落在甲、乙、丙、丁图中斜面上 A、B、C、D 点（图中未画出）。若小球受到的电场力、洛伦兹力始终小于重力，不计空气阻力。则下列说法正确的是



第 6 题图

A. O、B 之间距离等于 O、C 之间距离

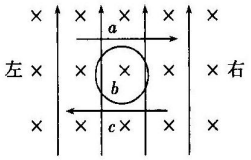
B. 小球从抛出到落在斜面上用时相等

C. 小球落到 A 点的速度小于落到 C 点的速度

D. 小球从 O 到 A 和从 O 到 D 的过程中机械能守恒

【答案】D

18. 如图，空间某区域存在匀强电场和匀强磁场，电场方向竖直向上（与纸面平行），磁场方向垂直于纸面向里。三个质量相等的小球，分别带上不等量的正电荷，电荷量分别为 q_a、q_b、q_c。已知在该区域内，a 在纸面内向右做匀速直线运动，b 在纸面内做匀速圆周运动，c 在纸面内向左做匀速直线运动，三球速度大小相等，下列选项正确的是 （　　）

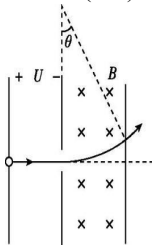


A. $q_c>q_b>q_a$　　B. $q_a>q_b>q_c$

C. $q_c>q_a>q_b$　　D. $q_b>q_a>q_c$

【答案】A

19. 在半导体离子注入工艺中，初速度可忽略的磷离子 P^+ 和 P^{3+} 经电压为 U 的电场加速后垂直进入磁感应强度大小为 B、方向垂直于纸面向里、有一定宽度的匀强磁场区域，如图 Z12-10 所示，已知离子 P^+ 在磁场中转过 $\theta=30°$ 后从磁场右边界射出。在电场和磁场中运动时，离子 P^+ 和 P^{3+} （　　）



A. 在电场中的加速度之比为 1∶1

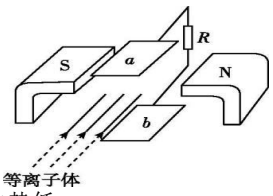
B. 在磁场中运动的半径之比为 $\sqrt{3}$∶1

C. 在磁场中转过的角度之比为 1∶3

D. 离开电场区域时的动能之比为 1∶3

【答案】BD

20. 如图所示是磁流体发电机的装置，a、b 组成一对平行电极，两板间距为 d，板平面的面积为 S，两板间有磁感应强度为 B 的匀强磁场。现持续将一束等离子体（即高温下电离的气体，含有大量带正电和负电的微粒，而整体呈中性）垂直喷入磁场，每个离子的速度为 v，负载电阻阻值为 R，当发电机稳定发电时，负载中电流为 I，则 （　　）



A. a 板电势比 b 板电势低

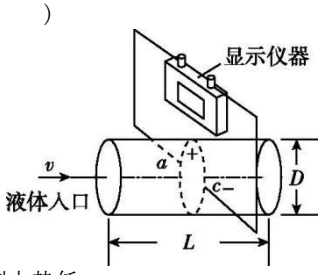
B. 磁流体发电机极板两端的电压 $U=Bdv$

C. 负载电阻两端的电压为 Bdv

D. 两板间等离子体的电阻率 $\rho=\dfrac{(Bdv-IR)S}{Id}$

【答案】D

21. 某化工厂的排污管末端安装了如图所示的流量计，测量管由绝缘材料制成，水平放置，其长为 L，直径为 D，左、右两端开口，匀强磁场方向竖直向下，在前、后两个内侧面 c、a 固定有金属板作为电极。污水充满管口从左向右流经测量管时，a、c 两端电压为 U，显示仪器显示污水流量为 Q（单位时间内排出的污水体积）。下列说法正确的是 （　　）



A. a 侧电势比 c 侧电势低

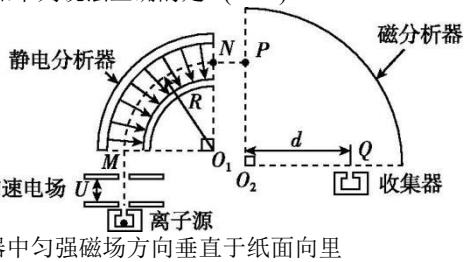
B. 若污水中正离子较多，则 a 侧电势比 c 侧电势高；若污水中负离子较多，则 a 侧电势比 c 侧电势低

C. 污水中离子浓度越高，则显示仪器的示数将越大

D. 污水流量 Q 与 U 成正比，与 L 无关

【答案】D

22. 如图所示为一种质谱仪的工作原理示意图，此质谱仪由以下几部分构成：离子源、加速电场、静电分析器、磁分析器、收集器。静电分析器通道中心线半径为 R，通道内有均匀辐向电场，在中心线处的电场强度大小为 E；磁分析器中分布着方向垂直于纸面、磁感应强度大小为 B 的匀强磁场，其左边界与静电分析器的右边界平行。由离子源发出一个质量为 m、电荷量为 q 的正离子（初速度为零，重力不计），经加速电场加速后进入静电分析器，沿中心线 MN 做匀速圆周运动，而后由 P 点进入磁分析器中，最终经过 Q 点垂直进入收集器。下列说法正确的是 （　　）



A. 磁分析器中匀强磁场方向垂直于纸面向里

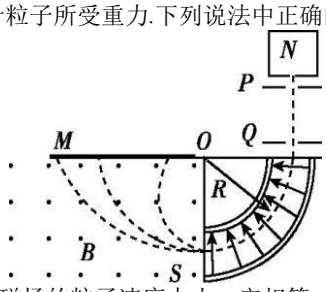
B. 加速电场中的加速电压 $U=\dfrac{1}{2}ER$

C. 磁分析器中圆心 O_2 到 Q 点的距离 $d=\dfrac{1}{B}\sqrt{\dfrac{mER}{q}}$

D.任何离子若能到达 P 点,则一定能进入收集器

【答案】BC

【变式】.如图所示为某种质谱仪的工作原理示意图.此质谱仪由以下几部分构成:粒子源 N; P、Q 间的加速电场;静电分析器,即中心线半径为 R 的四分之一圆弧形通道,通道内有均匀辐向电场,方向沿径向指向圆心 O,且与圆心 O 等距的各点电场强度大小相等;磁感应强度为 B 的有界匀强磁场,方向垂直于纸面向外;胶片 MO.由粒子源发出的不同带电粒子经加速电场加速后进入静电分析器,某些粒子能沿中心线通过静电分析器并经小孔 S 垂直于磁场边界进入磁场,最终打到胶片上的某点.粒子从粒子源发出时的初速度不计,不计粒子所受重力.下列说法中正确的是 (　　)



A.从小孔 S 进入磁场的粒子速度大小一定相等

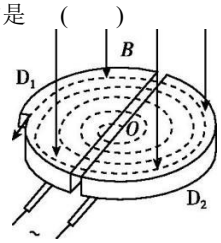
B.从小孔 S 进入磁场的粒子动能一定相等

C.打到胶片上同一点的粒子速度大小一定相等

D.打到胶片上位置距离 O 点越远的粒子,比荷越大

【答案】C

23.在高能物理研究中,回旋加速器起着重要作用,其工作原理如图所示,D_1 和 D_2 是两个中空、半径固定的半圆金属盒,它们之间有一定的电势差,两个半圆盒处于与盒面垂直的匀强磁场中;中央 O 处的粒子源产生的α粒子在两盒之间被电场加速,α粒子进入磁场后做匀速圆周运动.忽略α粒子在电场中的加速时间,不考虑相对论效应,下列说法正确的是 (　　)



A.α粒子在磁场中运动的周期越来越大

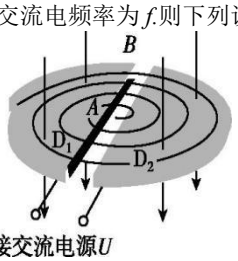
B.α粒子运动半个圆周之后,电场的方向不需改变

C.磁感应强度越大,α粒子离开加速器时的动能就越大

D.两盒间的电势差越大,α粒子离开加速器时的动能就越大

【答案】C

【变式】 回旋加速器是用于加速带电粒子的重要装置,其核心部分是分别与高频交流电源两极相连接的两个 D 形金属盒,两盒间的狭缝中形成周期性变化的电场,使粒子在通过狭缝时都能得到加速,两 D 形金属盒处于垂直于盒底的匀强磁场中,如图所示,设 D 形盒半径为 R.若用回旋加速器加速质子 $_1^1\mathrm{H}$ 时,匀强磁场的磁感应强度为 B,高频交流电频率为 f.则下列说法正确的是(　　)



A.加速电场的电压越大,质子加速后的速度越大

B.质子被加速后的最大速度为 $2\pi fR$

C.只要 R 足够大,质子的速度可以被加速到任意值

D.不改变任何条件,该回旋加速器也能用于加速α粒子（$_2^4\mathrm{He}$）

【答案】B

24. 如图 13-15 所示,导电物质为电子的霍尔元件位于两串联线圈之间,线圈中电流为 I,线圈间产生匀强磁场,磁感应强度大小 B 与 I 成正比,方向垂直于霍尔元件的两侧面,此时通过霍尔元件的电流为 I_H,与其前、后表面相连的电压表测出的霍尔电压 U_H 满足:$U_H=k\dfrac{I_HB}{d}$,式中 k 为霍尔系数,d 为霍尔元件前后两表面间的距离,电阻 R 远大于 R_L,霍尔元件的电阻可以忽略,则 (　　)

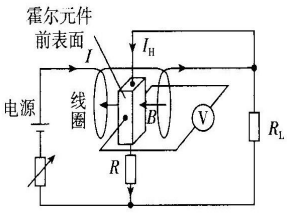


图 13-15

A. 霍尔元件前表面的电势低于后表面的电势

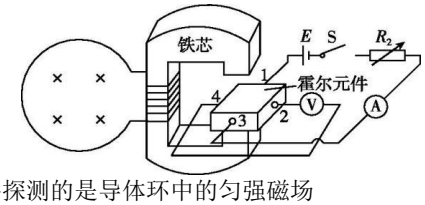
B. 若电源的正、负极对调,则电压表指针反偏

C. I_H 与 I 成反比

D. 电压表的示数与 R_L 消耗的电功率成正比

【答案】D

25.如图所示,缠绕在铁芯上的线圈与处于竖直平面内的导体环连接,导体环内分布有垂直于纸面向里的磁场.自由电荷为电子的霍尔元件水平置于铁芯的间隙中,1、2、3、4 分别是霍尔元件上的四个接线端.当开关 S 闭合后,下列说法正确的是 (　　)



A.霍尔元件探测的是导体环中的匀强磁场

B.电压表和电流表的示数之比表示霍尔元件的电阻值

C.导体环中的磁场发生变化的过程中,电压表、电流表的示数也会发生变化

D.导体环中的磁场均匀增强的过程中,接线端 2 的电势低于接线端 4 的电势

【答案】D

26.

磁流体发电的原理如图所示,将一束速度为 v 的等离子体垂直于磁场方向喷入磁感应强度为 B 的匀强磁场中,在面积为 $a\times b$、间距为 d 的两平行金属板间便产生电压。将上下极板与阻值为 R 的定值电阻和电容为 C 的电容器相连,间距为 L 的电容器极板间有一带电微粒处于静止状态,不计其它电阻,重力加速度为 g。

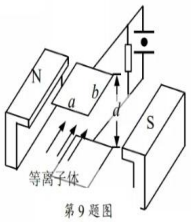
下列说法正确的是

A. 磁流体发电机的电动势为 BLv

B. 电容器所带电荷量为 $CBav$

C. 通过电阻的电流为 $\dfrac{Bdv}{R}$

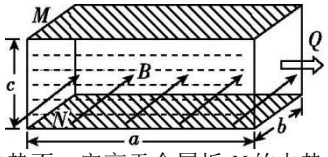
D. 微粒的比荷为 $\dfrac{Bdv}{g}$



第 9 题图

【答案】C

27.为了测量某化工厂的污水排放量,技术人员在该厂的排污管末端安装了如图所示的流量计, 该装置由绝缘材料制成,长、宽、高分别为 a=1 m、b=0.2 m、c=0.2 m,左、右两端开口,在垂直于前、后面的方向加磁感应强度为 B=1.25 T 的匀强磁场,在上、下两个面的内侧分别固定有金属板 M、N 作为电极.污水充满装置以某一速度从左向右匀速流经该装置时,用电压表测得两个电极间的电压 U=1 V,且污水流过该装置时受到阻力作用,阻力 $f=kLv$,其中比例系数 k=15 N·s/m^2,L 为污水沿流速方向的长度,v 为污水的流速.下列说法中正确的是(　　)



A.金属板 M 的电势不一定高于金属板 N 的电势,因为污水中负离子较多

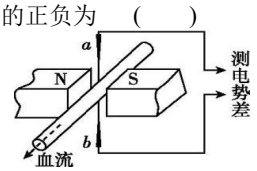
B.污水中离子浓度的高低对电压表的示数也有一定影响

C.污水的流量(单位时间内流出的污水体积)$Q=0.16\ m^3/s$

D.为使污水匀速通过该装置,左、右两侧管口应施加的压强差为 $\Delta p=1500\ Pa$

【答案】CD

【变式】医生做某些特殊手术时,利用电磁血流计来监测通过动脉的血流速度.电磁血流计由一对电极 a 和 b 以及一对磁极 N 和 S 构成,磁极间的磁场是均匀的.使用时,两电极 a、b 均与血管壁接触,两触点的连线、磁场方向和血流速度方向两两垂直,如图所示.由于血液中的正、负离子随血流一起在磁场中运动,电极 a、b 之间会有微小电势差.在达到平衡时,血管内部的电场可看作是匀强电场,血液中的离子所受的电场力和磁场力的合力为零.在某次监测中,两触点间的距离为 3.0 mm,血管壁的厚度可忽略,两触点间的电势差为 160 μV,磁感应强度的大小为 0.040 T.则血流速度的近似值和电极 a、b 的正负为 (　　)

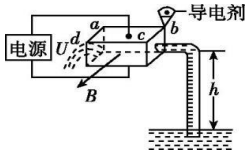


A.1.3 m/s,a 正、b 负　　B.2.7 m/s,a 正、b 负

C.1.3 m/s,a 负、b 正　　D.2.7 m/s,a 负、b 正

【答案】A

28.电磁泵在目前的生产、科技中得到了广泛应用.如图所示,泵体是一个长方体,ab 边长为 L_1, 两侧端面是边长为 L_2 的正方形;流经泵体内的液体密度为 ρ,在泵头通入导电剂后液体的电导率为 σ(电阻率的倒数),泵体所在处有方向垂直泵体向外的磁感应强度为 B 的磁场,把泵体的上、下两表面接在电压为 U(内阻不计)的电源上,则 (　　)



A.泵体上表面应接电源正极

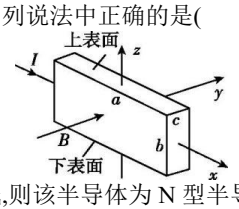
B.通过泵体的电流 $I=\frac{UL_1}{\sigma}$

C.增大磁感应强度可获得更大的抽液高度

D.增大液体的电阻率可获得更大的抽液高度

【答案】AC

29.半导体内导电的粒子——“载流子”有两种:自由电子和空穴(空穴可视为能自由移动的带正电粒子).以空穴导电为主的半导体叫 P 型半导体,以自由电子导电为主的半导体叫 N 型半导体.图为检验半导体材料的类型和对材料性能进行测试的原理图,图中一块长为 a、宽为 b、厚为 c 的半导体样品板放在沿 y 轴正方向的匀强磁场中,磁感应强度大小为 B.当有大小为 I、沿 x 轴正方向的恒定电流通过样品板时,会产生霍尔电势差 U_H.已知每个载流子所带电荷量的绝对值为 e,下列说法中正确的是(　　)



A.如果上表面电势低,则该半导体为 N 型半导体

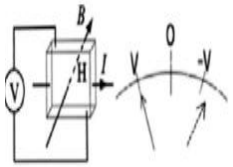
B.如果上表面电势低,则该半导体为 P 型半导体

C.其他条件不变,增大 c 时,U_H 增大

D.样品板在单位体积内参与导电的载流子数目为 $n=\frac{IB}{ceU_H}$

【答案】AD

30.如图，H 为一块长方体金属薄片，外加磁场的磁感应强度 B 和外加电流 I 的方向如箭头所示（B 与长方体的前后两个表面及电流 I 均垂直），电压表按图中方式与 H 的上下表面相连，示数为 V，考虑到导体沿电流方向上电势差的存在，下列操作中能实现电压表的指针在虚线位置的是（　　）



A. 交换电压表接线柱的接入方式

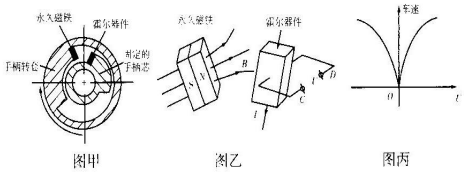
B. 保持磁场方向不变，改变电流方向（I→-I）

C. 保持电流方向不变，改变磁场方向（B→-B）

D. 同时改变电流方向和磁场方向（I→-I，B→-B）

【答案】C

31. 霍尔元件广泛应用于生产生活中,有的电动自行车上控制速度的转动把手就应用了霍尔元件,这种转动把手称为“霍尔转把”。“霍尔转把”内部有永久磁铁和霍尔器件等,截面如图甲。开启电动自行车的电源时,在霍尔器件的上下面之间就有一个恒定电流 I,如图乙。将“霍尔转把”旋转,永久磁铁也跟着转动,施加在霍尔器件上的磁场就发生变化,霍尔器件就能输出变化的电势差 U。这个电势差是控制车速的,电势差与车速的关系如图丙。以下叙述正确的是



A. 若霍尔元件的自由电荷是自由电子,则 C 端的电势高于 D 端的电势

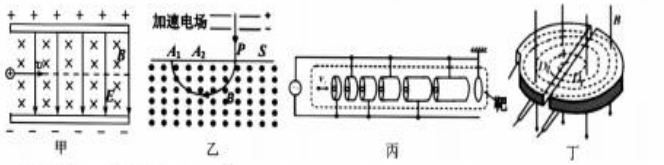
B. 若改变霍尔器件上下面之间的恒定电流 I 的方向,将影响车速控制

C. 其他条件不变,仅增大恒定电流 I,可使电动自行车更容易获得最大速度

D. 按图甲顺时针均匀转动把手,车速增加得越来越快

【答案】C

32. 如图所示，图甲为速度选择器原理示意图，图乙为质谱仪原理示意图，图丙和图丁分别为多级直线加速器和回旋加速器的原理示意图，忽略粒子在图丁的 D 形盒狭缝中的加速时间。下列说法不正确的是



A. 图甲中，只有具有速度 $v=\frac{E}{B}$ 的带电粒子才能沿图中虚线路径经过速度选择器

B. 图乙中，^1_1H、^2_1H、^3_1H 三种粒子经加速电场射入磁场，^3_1H 在磁场中偏转半径最大

C. 图丙中，由于技术上产生过高的电压是很困难的，为了使粒子获得更高的能量，所以采用多级直线加速装置

D. 图丁中，随着粒子速度的增大，交流电源的频率也应该增大

【答案】D

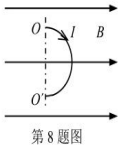
33. 如图所示，磁感应强度大小为 B，方向水平向右的匀强磁场中，有一长为 L 的轻质半圆金属导线，通有从 O 到 O' 的恒定电流 I。现金属导线绕水平轴 OO' 由水平第一次转到竖直位置的过程中，下列说法正确的是

A. 转动过程中，安培力的方向不断变化

B. 转动过程中，安培力大小始终不变

C. 转动过程中，安培力大小一直减小

D. 转过 60°时，安培力大小为 $\frac{BIL}{\pi}$



第 8 题图

【答案】B

第二章 电磁感应

第一部分 基础知识点

第 1 节 楞次定律

一、实验：探究影响感应电流方向的因素

【实验原理】

楞次定律：感应电流具有这样的方向，即感应电流的磁场总要阻碍引起感应电流的磁通量的变化。

【实验器材】

条形磁铁、灵敏电流计、线圈、导线、一节干电池（用来判明线圈中电流的流向与电流表指针偏转方向的关系）。

【实验过程】

1.实验探究

（1）选旧干电池用试触的方法明确电流方向与电流表指针偏转方向之间的关系。

（2）实验装置

将螺线管与电流计组成闭合电路，如图 1 所示。

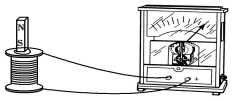


图 1

（3）实验记录

分别将条形磁铁的 N 极、S 极插入、抽出线圈，如图 2 所示，记录感应电流的方向如下。

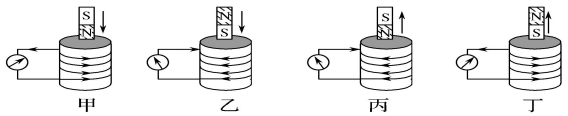


图 2

【注意电流方向的判断】

（4）实验分析

①线圈内磁通量增加时的情况

图号	磁场方向	感应电流的方向（俯视）	感应电流的磁场方向	归纳总结
甲	向下	逆时针	向上	感应电流的磁场阻碍磁通量的增加
乙	向上	顺时针	向下	

②线圈内磁通量减少时的情况

图号	磁场方向	感应电流的方向（俯视）	感应电流的磁场方向	归纳总结
丙	向下	顺时针	向下	感应电流的磁场阻碍磁通量的减少
丁	向上	逆时针	向上	

（5）归纳结论

当线圈内磁通量增加时，感应电流的磁场阻碍磁通量的增加；当线圈内磁通量减少时，感应电流的磁场阻碍磁通量的减少。

【注意事项】

1.实验前应先查明线圈中电流的流向与电流表指针偏转方向之间的关系，电路如图 3 所示。

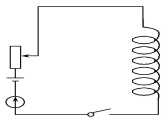
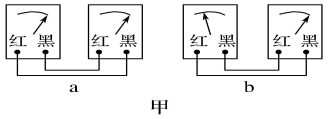


图 3

2.电路中要保护灵敏电流计，接入变阻器，开关 S 采用瞬间接触，记录指针偏转情况。

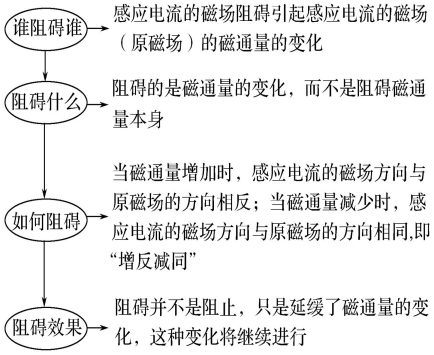


甲

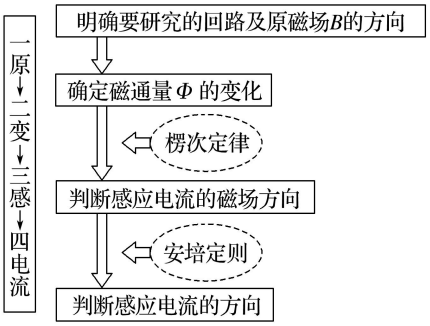
二、 楞次定定律

1.楞次定律：感应电流的磁场总要阻碍引起感应电流的磁通量的变化。适用于一切电磁感应现象。

2.楞次定律中“阻碍”的含义

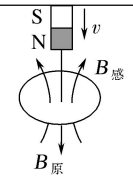
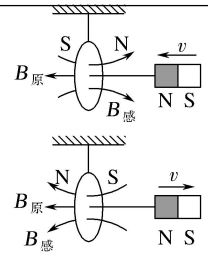
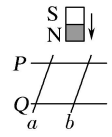


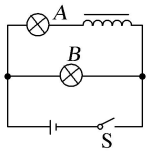
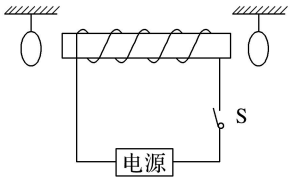
3.应用楞次定律的思路：



4.楞次定律推论的应用

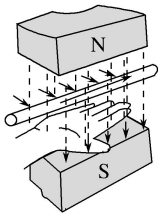
楞次定律中“阻碍”的含义可以推广为：感应电流的效果总是阻碍引起感应电流的原因，列表说明如下

内容	例证
阻碍原磁通量变化—“增反减同”	 磁铁靠近线圈，$B_{感}$与 $B_{原}$反向
阻碍相对运动——“来拒去留”“敌进我退，敌退我追”	 磁铁靠近是斥力，磁铁远离是引力。
使回路面积有扩大或缩小的趋势——“增缩减扩”	 P、Q 是光滑固定导轨，a、b 是可动金属棒，磁铁下移，面积应减小，a、b 靠近
	 B 减小，线圈扩张

阻碍原电流的变化——“增反减同”	 合上 S，B 先亮
使闭合线圈远离或靠近磁体——“增离减靠”	 当开关 S 闭合时，左环向左摆动、右环向右摆动，远离通电线圈

三、右手定则

1. **右手定则**：伸开右手，使拇指与其余四个手指垂直，并且都与手掌在同一个平面内；让磁感线穿入掌心，右手拇指指向导线运动方向，这时其余四指指向就是感应电流的方向。适用于导线切割磁感线产生感应电流。



【说明】右手定则是楞次定律的一个推论，适用于导体棒切割磁感线产生感应电流的方向判断。注意三个要点：

①掌心——磁感线穿入；

②拇指——指向导体运动的方向；

③四指——指向感应电流的方向.

【口诀】磁入掌心拇指动四指流

2. **“三个定则”一个定律的综合应用**

（1）**“三个定则”“一个定律”的比较**

基本现象		应用的定则或定律
运动电荷、电流产生磁场		安培定则
磁场对运动电荷、电流有力的作用		左手定则
电磁感应	部分导体做切割磁感线运动	右手定则
	闭合回路磁通量变化	楞次定律

【规律】“左力右电（线）”

（2）**三定则一定律的应用技巧**

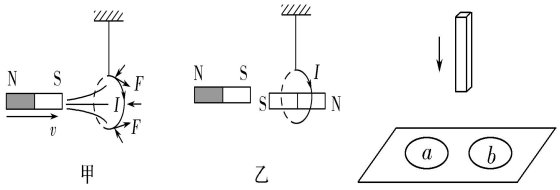
①**规律比较**

名称	基本现象	因果关系	应用的定则或定律
电流的磁效应	电流、运动电荷产生磁场	因电生磁	安培定则
安培力、洛伦兹力	磁场对电流、运动电荷有作用力	因电受力	左手定则
电磁感应	部分导体做切割磁感线运动	因动生电	右手定则
	闭合回路磁通量变化	因磁生电	楞次定律

②**相互联系**

(1)应用楞次定律时，一般要用到安培定则。

(2)研究感应电流受到的安培力，一般先用右手定则确定电流的方向，再用左手定则确定安培力的方向，有时也可以直接应用楞次定律的推论确定。



第 2 节　法拉第电磁感应定律

一、感应电动势

1.定义：在电磁感应现象中产生的电动势叫感应电动势。

2. 产生条件：不论电路是否闭合，只要穿过电路的磁通量发生变化，电路中就会产生感应电动势。

【点拨】电磁感应现象的实质是产生感应电动势，而不是产生感应电流。

穿过电路的磁通量发生变化 → 产生感应电动势；电路闭合 → 产生感应电流

3. 分类：感生电动势和动生电动势。

4. 方向：产生感应电动势的那部分导体相当于电源，导体的电阻相当于电源的内阻，其内的电流方向由电源负极流向正极。

【拓展】产生感应电动势的那部分导体（相当于电源）和外电路构成闭合回路，遵循闭合电路的欧姆定律，感应电流 $I=\frac{E}{R+r}$。

二、电磁感应定律【纽曼、韦伯提出】

1.内容：闭合电路中感应电动势的大小，跟穿过这一电路的磁通量的变化率成正比，与线圈的匝数成正比。

2.公式：$E=n\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$，其中 n 为线圈匝数。

(1)感生：S 不变，B 改变，$\Delta\Phi=\Delta B\cdot S$.

(2)动生：B 不变，S 改变，$\Delta\Phi=B\cdot\Delta S$.

(3)感生、动生同时存在：$\Delta\Phi=|B_2S_2-B_1S_1|$.

3.知识回顾（关于磁通量）

(1)磁通量是一个双向标量，考虑通过某个面内的磁通量时，应取磁通量的代数和.

(2)利用 $\Phi=BS$ 求磁通量变化时，S 应为平面在垂直于磁感线方向上的投影面积.

(3)计算通过 n 匝线圈的磁通量的大小时，只相当于一匝线圈中磁通量的多少，不能乘以 n.

磁通量、磁通量的变化量及磁通量的变化率的比较

项目	磁通量 Φ	磁通量的变化量 $\Delta\Phi$	磁通量的变化率 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$
物理意义	磁通量越大，某时刻穿过磁场中某个面的磁感线条数越多	某段时间穿过某个面的末、初磁通量的差值	表征磁场中穿过某个面的磁通量变化快慢的物理量
大小计算	$\Phi = BS_{\perp}$，$S_{\perp}$为与 B 垂直的面积	$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$，$\Delta\Phi = B\Delta S$ 或 $\Delta\Phi = S\Delta B$	$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = B\frac{\Delta S}{\Delta t}$ 或 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = S\frac{\Delta B}{\Delta t}$
注意	若穿过某个面有方向相反的磁场，则应考虑相反方向的磁通量相互抵消以后所剩余的磁通量	开始和转过180°时平面都与磁场垂直，穿过平面的磁通量是不同的，一正一负，$\Delta\Phi = 2BS$，而不是零	既不表示磁通量的大小，也不表示磁通量变化的多少．在 $\Phi - t$ 图像中用图线的斜率表示磁通量的变化率

4.感生电动势

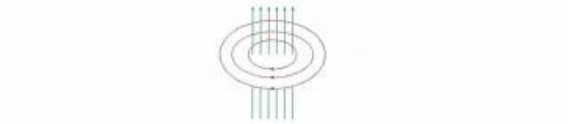
（一）感生电场

（1）基本性质：与静电场相同，能够对处于其中的电荷产生力的作用。

（2）场源：变化的磁场激发感生电场。

（3）电场线：与变化的磁场正交的闭合曲线。

（4）方向及判定：与判定感应电流方向的方法相同，可根据磁场的变化情况由楞次定律来判定。如图所示是磁场增强时产生的感生电场示意图。



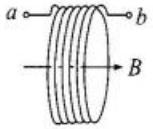
（二）感生电动势

①概念：由感生电场产生的电动势叫做感生电动势。

②非静电力：感生电场对自由电荷的作用力。

③存在位置：整个包围磁场区域的回路。

如图所示，线圈匝数为 n，横截面积为 S，磁感应强度为 B 的磁场垂直线圈平面向右且满足 $B=kt$，求线圈中产生的电动势大小.



公式：$E = n\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = n\frac{\Delta B \cdot S}{\Delta t} = nkS$，式中 $k = \frac{\Delta B}{\Delta t}$.

特别注意：

（1）电动势的大小与 n、k、S 有关，其中 S 指有效面积，k 表示磁感应强度变化率的大小.

（2）将每一匝线圈看成一个电池，相当于有 n 节电池串联.

（3）回路闭合时才产生感应电流，回路断开时仅产生感应电动势.

（4）线圈相当于电源.

【典例】（10分）半径R的圆柱形大区域内存在匀强磁场，方向垂直于纸面向外，磁感应强度随时间均匀增加，其变化率为k(k>0)，其圆截面如图1所示，圆心为O。已知磁场随时间均匀增加时，在垂直于磁场的平面内会产生同心圆形状的感生电场，平面内距圆心相同距离的地方，感生电场场强大小相同。

(1) 若将一半径为R/2的金属圆环垂直磁场方向放置，金属环的中心与O点重合，求金属环中产生的感生电动势；

(2) 求图1中距圆心R/2处的感生电场的大小并判断其方向；

(3) 若在一半径为R/2且与大圆区域边界相切的小圆柱形区域内，再叠加一个方向垂直于纸面向里的变化率也为k的同步变化的匀强磁场，叠加后小圆区域内的合磁场为零如图2所示。一个质量为m、电量q、重力不计的带正电粒子，从边界上的A点以某一初速度平行OO_1连线进入小圆区域，刚好可以打中两圆相切处，已知A距两圆心连线2R/5，求此粒子初速度大小。（提示：利用电场叠加原理可以先研究小圆区域内某点的合感生电场的场强。）

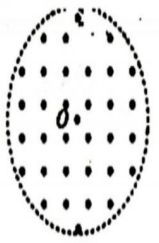


图1

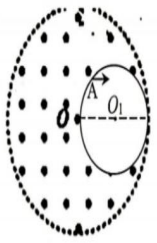


图2

21.(1) $\varepsilon = k\pi R^2/4$ -------2 分

(2) $E = \varepsilon/(\pi R) = kR/4$ -------2 分 顺时针 -------2 分

(3) $E_{1x} = 0.5kr_1\sin\theta_1 = E_{2x}0.5kr_2\sin\theta_2$ -------1 分

$E_{合} = 0.5kr_1\cos\theta_1 + 0.5kr_2\cos\theta_2 = 0.25kR$ -------1 分

$0.4R = \frac{qE_{合}}{2m}\frac{(0.8R)^2}{v_0^2}$ -------1 分

$v_0 = R(kq/5m)^{1/2}$ -------1 分

5.导体切割磁感线时产生的感应电动势

（一）动生电动势

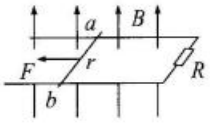
（1）概念：因导体的运动而产生的感应电动势叫做动生电动势。

（2）非静电力

动生电动势的本质是自由电子在磁场中受到洛伦兹力而运动的结果。

（二）平动切割产生的电动势

如图所示，导轨固定，磁感应强度为 B 的磁场垂直导轨平面向上，导轨宽度为 L，金属杆 ab 向左以速度为 v 做匀速运动.



公式：$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = BLv$（动生电动势）.

特别注意：

(1)使用条件：B、L、v 三者相互垂直.

(2)"瞬时性"的理解

①若 v 为瞬时速度，则 E 为瞬时感应电动势；

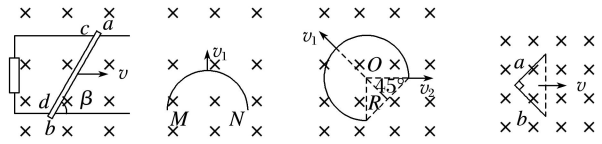
②若 v 为平均速度，则 E 为平均感应电动势.

(3)"相对性"的理解

$E=Blv$ 中的速度 v 是杆相对于磁场的速度，若磁场也运动，应注意速度间的相对关系.

(4)L 为有效长度

有效长度：导线的首尾两端连线在沿垂直速度方向上的投影长度.



图甲：$l=\overline{cd}\sin\beta$.

图乙：沿 v_1 方向运动时，$l=\overline{MN}$.

图丙：沿 v_1 方向运动时，$l=\sqrt{2}R$；沿 v_2 方向运动时，$l=R$.

图丁：$l=\sqrt{a^2+b^2}$.

(5)切割杆相当于电源

电源中的电流由负极流向正极，金属杆相当于电源，棒中的电流由负极流向正极，根据电流方向判断金属杆两端的极性与电势高低.

6.转动切割产生的电动势

①当导体在垂直于磁场的平面内，绕一端以角速度ω匀速转动时，产生的感应电动势为 $E=Blv=\frac{1}{2}Bl^2\omega$(平均速度等于中点位置的线速度$\frac{1}{2}l\omega$)，如图 1 所示。

2.当导体 AB 在垂直于环形磁场的平面内，以角速度ω匀速转动时，产生的感应电动势为 $E=\frac{1}{2}B\omega(L_B^2-L_A^2)$，如图 2 所示。

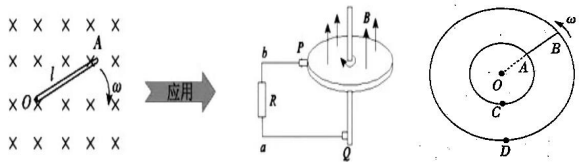
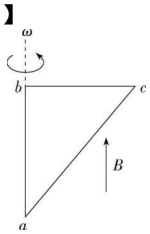


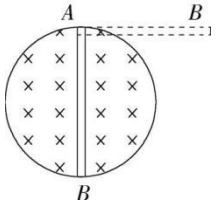
图 1　　图 2

【变式 1】



$U_{bc}=-\frac{1}{2}Bl^2\omega$，金属框中无电流

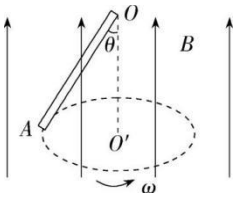
【变式 2】



【典例】如图所示，将一根总电阻为 R 的直导线弯成一半径为 a 的金属环，放在竖直平面内，磁感应强度为 B 的匀强磁场垂直穿过环平面，在环的最高点 A 用铰链连接长度为 $2a$、电阻为 $\frac{R}{2}$ 的导体棒 AB，AB 由水平位置紧贴环面摆下，当摆到竖直位置时，B 点的线速度为 v，则这时 A、B 两端的电压大小为（　）

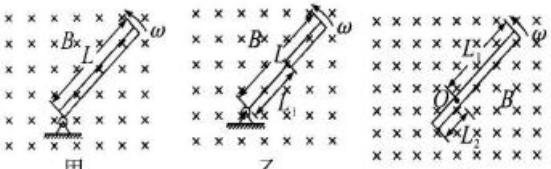
【答案】$\frac{Bav}{3}$

【变式 3】



导线 OA 产生的感应电动势大小和 O、A 两点电势高低情况分别是（$\frac{1}{2}Bl^2\omega$　$\sin^2\theta$，A 点电势高）

【变式 4】如图所示，磁感应强度为 B 的磁场垂直纸面向里，金属杆一端可绕轴以角速度 ω 匀速旋转，图甲中金属杆的长度为 L；图乙中金属杆下端为塑料杆，塑料杆的长度为 L_1，杆总长为 L；图丙中转轴位于金属杆中部，杆两端的长度分别为 L_1、L_2，求三种情况下金属杆切割产生的电动势大小.



解题思路：利用金属杆旋转运动的平均速度，将旋转切割转化成平动切割来求解电动势.

图甲：$\bar{v}=\frac{1}{2}L\omega$，$E=BL\bar{v}=\frac{1}{2}BL^2\omega$.

图乙：$\bar{v}=\frac{L+L_1}{2}\omega$，$E=B(L-L_1)\bar{v}=\frac{1}{2}B(L^2-L_1^2)\omega$.

图丙：$\bar{v}=\frac{L_1-L_2}{2}\omega$，$E=B(L_1+L_2)\cdot\bar{v}=\frac{1}{2}B(L_1^2-L_2^2)\omega$.

【规律总结 1】

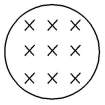
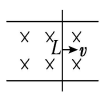
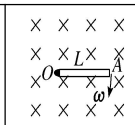
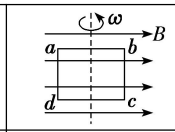
$E=n\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$和 $E=Blv$ 的区别与联系

		$E=n\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$	$E=Blv$
区别	研究对象	一个回路	回路中做切割磁感线运动的那部分导体
	研究内容	求的是 Δt 时间内的平均感应电动势，E 与某段时间或某个过程对应	(1)若 v 为瞬时速度，公式求的是瞬时感应电动势；(2)若 v 为平均速度，公式求的是平均感应电动势
适用范围		对任何电路普遍适用	只适用于导体切割磁感线运动的情况
联系		(1) $E=Blv$ 可由 $E=n\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 在一定条件下推导出来；(2) $E=n\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 也可求瞬时感应电动势，当 $\Delta t\to 0$ 时的 E 即为瞬时感应电动势；(3)在 B、l、v 三者均不变时，两公式均可求 Δt 时间内的平均感应电动势	

【规律总结 2】导体切割磁感线产生感应电动势公式

切割方式	电动势表达式	说明
垂直切割	$E=Blv$	①导体棒与磁场方向垂直；②磁场为匀强磁场
倾斜切割	$E=Blv\sin\theta$ 其中θ为 v 与 B 的夹角	
旋转切割	(1)以中点为轴时，$E=0$(不同两段的代数和)。 (2)以端点为轴时 $E=\frac{1}{2}B\omega L^2$(平均速度取中点位置的线速度$\frac{1}{2}\omega L$)。 (3)以任意点为轴时 $E=\frac{1}{2}B\omega(L_1^2-L_2^2)$($L_1>L_2$，不同两段的代数和)。	

【规律总结 3】应用法拉第电磁感应定律的四种情况

情景图				
研究对象	回路(不一定闭合)	一段直导线(或等效成直导线)	绕一端转动的一段导体棒	绕与B垂直的轴转动的导线框
表达式	$E=n\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$	$E=BLv$	$E=\frac{1}{2}BL^2\omega$	$E=NBS\omega\cos\omega t$【正弦交流电】

三、感生与动生电动势同时存在

分类：有两导体切割形成的双动生电动势，有一导体切割磁感线同时磁场变化形成的动生电动势和感生电动势的双感应电动势。

(1)解法一的解题步骤

①计算出某时刻的感生电动势 E_1，并判断出电流方向或电动势的正负；

②计算出同一时刻的动生电动势 E_2，并判断出电流方向或电动势的正负；

③根据电流方向或电动势的正负，判断两种电动势是叠加还是抵消，从而算出总电动势.

(2)解法二的解题步骤

先计算出回路中的磁通量与时间的关系，由 $E=n\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 知 $\Phi-t$ 图像斜率的绝对值表示电动势大小，再对磁通量与时间的函数进行求导，即可求出瞬时电动势的表达式.

四、通过回路截面的电荷量问题

1. 电荷量的推导式

$q=It$，$E=n\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$，$I=\frac{E}{R_{总}}$，

联立解得 $q=n\frac{\Delta\Phi}{R_{总}}$.

线圈类问题：$q=n\frac{\Delta\Phi}{R_{总}}$；

切割类问题：$q=\frac{\Delta\Phi}{R_{总}}$.

【说明】通过回路截面的电荷量 q 仅与 n、ΔΦ和回路电阻 R 有关，与时间长短无关，与Φ是否均匀变化无关。【线圈旋转一周，通过回路的电荷量为 0。在 i-t 图像中，上下面积相抵消】

2. 电荷量的四种求解方法

定义式法：利用定义式 $q=It$ 求解；

推导式法：利用推导式 $q=n\frac{\Delta\Phi}{R_{总}}$求解；

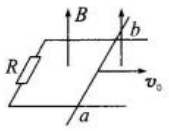
图像法：利用 $I-t$ 图像与横轴围成的面积求解；

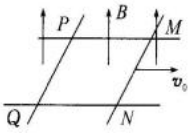
冲量法：利用动量定理求解.

安培力产生的冲量的两种表达形式：

形式一：$I=F_{安}t=BILt=BLq$，式中 q 为 t 时间内回路中通过的电荷量；

形式二：$I=F_{安}t=\frac{B^2L^2v_{相对}}{R_{总}}t=\frac{B^2L^2}{R_{总}}x_{相对}$，式中 $x_{相对}$ 为 t 时间内金属杆相对磁场或另一金属杆运动的距离.





【拓展】

在电磁感应单杆与单框专题中，利用动量定理不仅可以求解电荷量，还可以求解金属杆运动的距离或相对运动的距离，以及金属杆运动的时间.

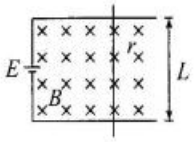
单杆切割：$F_{安}\ t=\dfrac{B^2L^2v}{R_{总}}t=\dfrac{B^2L^2}{R_{总}}x$，式中 x 为 t 时间内金属杆相对磁场运动的距离.

双杆切割：$F_{安}\ t=\dfrac{B^2L^2(v_1-v_2)}{R_{总}}t=\dfrac{B^2L^2(x_1-x_2)}{R_{总}}=\dfrac{B^2L^2\Delta x}{R+r}$，式中 Δx 为 t 时间内两金属杆相对运动的距离.

五、电动机与发电机中的功能关系问题

1.电动机中的功能关系

如图所示，光滑的通电金属杆在水平放置的平行金属导轨上受安培力作用做的运动与电动机等效. 电动机通电后，转子受安培力的作用转动，同时转子也会产生电流热效应；通电金属杆在磁场中因受安培力的作用而运动，同时回路中也会产生电流热效应.



电源电动势为 E，磁感应强度为 B，导轨宽度为 L，在金属杆通电以后，金属杆在安培力的作用下做加速运动，由功能关系知电源的电能转化成金属杆的动能与回路中的电热(电源内阻不计).

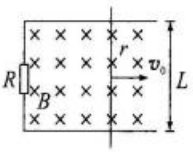
能量的转化：$P_E=P_r+P_{机械}$.

结论：安培力做正功，将电能转化成机械能.

反电动势：光滑金属杆在安培力的作用下做加速运动，同时金属杆也切割磁感线，产生动生电动势 E_1，该电动势称为反电动势. 根据动生电动势公式 $E_1=BLv$，当反电动势与电源电动势相等时，回路中无电流，此时金属杆的速度达到最大值，即 $E_1=BLv_m=E$，金属杆速度的最大值为 $v_m=\dfrac{E}{BL}$.

2.发电机中的功能关系

如图所示，两光滑水平导轨的间距为 L，磁感应强度为 B，导轨间接一定值电阻 R，现给质量为 m 的金属杆向右的初速度 v_0，金属杆的电阻为 r，金属杆在安培力的作用下做减速运动，其余电阻不计，分析杆运动过程中的功能关系.



金属杆运动的过程中，受到向左的安培力而做减速运动，最终金属杆静止在轨道上.

金属杆切割磁感线产生电动势，金属杆相当于电源，电动势 $E=BLv$，内阻为 r.

安培力做负功，将金属杆的动能转化成电能，又回路闭合，则切割磁感线产生的电能全部转化成 R 与 r 的电热，电热的表达式为 $Q=I^2Rt$.

R 与 r 串联：$\dfrac{Q_R}{Q_r}=\dfrac{R}{r}$.

能量的转化：$E_k=Q_R+Q_r$.

结论：安培力做负功，将机械能转化成电能.

第二部分 方法、规律与技巧

一、电磁感应中的电路问题

1.电源和电阻

- 电源
  - 做切割磁感线运动的导体或磁通量发生变化的回路相当于电源
  - 电动势的计算：$E=Blv$或$E=n\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$
- 电阻
  - 产生感应电动势的导体或回路的电阻相当于电源的内阻，其余部分的电阻是外电阻
  - 路端电压的计算：$U=IR=E-Ir$

2.解决电磁感应中的电路问题的基本步骤

(1)“源”的分析：用法拉第电磁感应定律算出 E 的大小，用楞次定律或右手定则确定感应电流的方向(感应电流方向是电源内部电流的方向)，从而确定电源正负极，明确内阻 r.

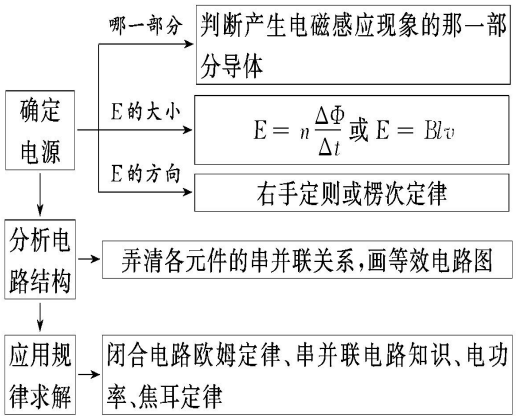
(2)“路”的分析：根据“等效电源”和电路中其他各元件的连接方式画出等效电路.

(3)根据 $E=Blv$ 或 $E=n\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$，结合闭合电路欧姆定律、串并联电路知识、电功率、焦耳定律等相关关系式联立求解.

3.电磁感应中电路知识的关系图

闭合电路		电磁感应
$I=\dfrac{E}{R+r}$		$E=n\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$
$U=\dfrac{R}{R+r}E$	联系 1：电动势 E	$E=Blv$
$P=IU$		$E=\dfrac{1}{2}Bl^2\omega$
$Q=I^2Rt$	联系 2：功和能	
$q=It$ $q=CU$		$q=\dfrac{n\Delta\Phi}{R+r}$

4.“三步走”分析电路为主的电磁感应问题

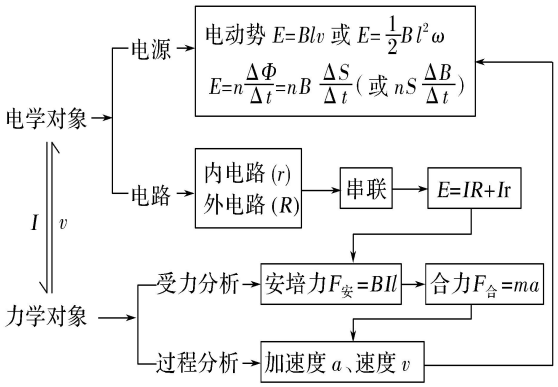


二、电磁感应中的动力学问题

1.两种状态及处理方法

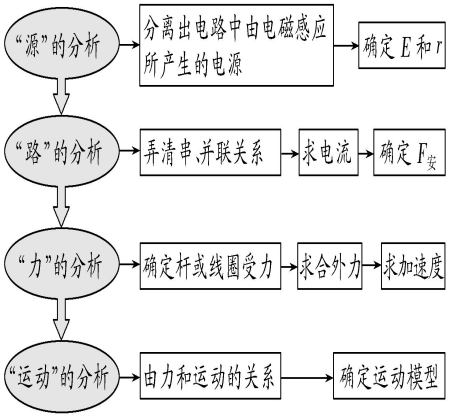
状态	特征	处理方法
平衡态	加速度为零	根据平衡条件列式分析
非平衡态	加速度不为零	根据牛顿第二定律进行动态分析或结合功能关系进行分析

2.电学对象与力学对象的转换及关系



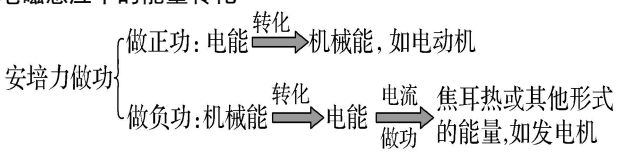
3.用“四步法”分析电磁感应中的动力学问题

解决电磁感应中的动力学问题的一般思路是“先电后力”，具体思路如下：



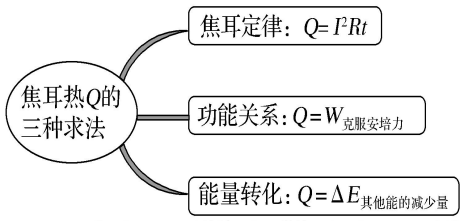
三、电磁感应中的能量问题

1.电磁感应中的能量转化



2.求解焦耳热 Q 的几种方法

方法一：常规方法



方法二：图像法，利用 $F_{安}-x$ 图像或 $P_{安}-t$ 图像与横轴围成的面积求解焦耳热，其中 $F_{安}-x$ 图像或 $P_{安}-t$ 图像一定是直线.

方法三：有效值法，若金属杆切割磁感线产生的电动势为交变电压，则利用交变电压的有效值求解焦耳热.

四、电磁感应中的动量和能量观点的综合应用

1.应用动量定理可以由动量变化来求解变力的冲量。如在导体棒做非匀变速运动的问题中，应用动量定理可以解决牛顿运动定律不易解答的问题。

2.在相互平行的水平轨道间的双棒做切割磁感线运动时，由于这两根导体棒所受的安培力等大反向，合外力为零，若不受其他外力，两导体棒的总动量守恒，解决此类问题往往要应用动量守恒定律。

3.电磁感应中处理变加速运动问题的两种方法：

① 动量定理：$mv=BIL\cdot\Delta t=BLq=BL\cdot\frac{BLx}{R_{总}}$

② 动能定理：$\frac{1}{2}mv^2-\frac{1}{2}mv_0^2=W_{合}=F_{合}\cdot x$

【注】对于力随时间或力随位移线性变化的情况，可以画出 F-x 或 F-t 图象，则图象围成的面积代表该力的功或者冲量。

五、电磁感应中的图像问题

1.解题关键

弄清初始条件、正负方向的对应变化范围、所研究物理量的函数表达式、进出磁场的转折点等是解决此类问题的关键.

2.解题步骤

(1)明确图像的种类，即是 $B-t$ 图还是 $\Phi-t$ 图，或者 $E-t$ 图、$I-t$ 图等；对切割磁感线产生感应电动势和感应电流的情况，还常涉及 $E-x$ 图像和 $i-x$ 图像；

(2)分析电磁感应的具体过程；

(3)用右手定则或楞次定律确定方向的对应关系；

(4)结合法拉第电磁感应定律、闭合电路欧姆定律、牛顿运动定律等知识写出相应的函数关系式；

(5)根据函数关系式，进行数学分析，如分析斜率的变化、截距等；

(6)画图像或判断图像.

3.常用方法

(1)排除法：定性地分析电磁感应过程中物理量的变化趋势(增大还是减小)、变化快慢(均匀变化还是非均匀变化)，特别是分析物理量的正负，以排除错误的选项.

(2)函数法：根据题目所给条件定量地写出两个物理量之间的函数关系，然后由函数关系对图像进行分析和判断.

4.图像类型

主要涉及的图像有 $B-t$ 图像、$\Phi-t$ 图像、$E-t$ 图像、$I-t$ 图像、$q-t$ 图像、$U-t$ 图像和 $F_{安}-t$ 图像，明确图像间的转化关系：

$B-t$ 图像纵坐标乘有效面积可得到

$\Phi-t$ 图像；

$\Phi-t$ 图像求导可得到 $E-t$ 图像；

$E-t$ 图像结合闭合电路欧姆定律可得到 $U-t$ 图像；

$E-t$ 图像纵坐标除以总电阻可得到 $I-t$ 图像；

$q-t$ 图像求导可得到 $I-t$ 图像；

$I-t$ 图像纵坐标与 BL 的乘积可得到 $F_{安}-t$ 图像；

所有图像均可由 $E-t$ 图像、$I-t$ 图像推导出来.

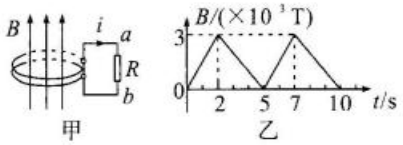
解题思路：

(1)分析电磁感应的具体过程，推导出 $E-t$ 的函数方程和图像.

(2)利用 $E-t$ 的函数方程或图像，根据图像间的转化关系推导出其他图像.

5.解题技巧

如图所示，磁场方向垂直线圈竖直向上，磁感应强度为 B，已知 $B-t$ 图像，以俯视图顺时针的方向为电流正方向，定性分析 $E-t$ 图像、$\Phi-t$ 图像、$I-t$ 图像和 $q-t$ 图像.



甲　　乙

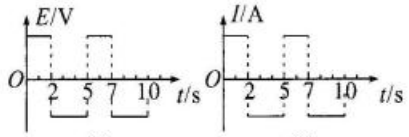
解题思路：分析电磁感应的具体过程，推导出 $E-t$ 图像.

1. 分析 $E-t$ 图像

由电磁感应定律可得 $E=n\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}=n\dfrac{\Delta B\cdot S}{\Delta t}=nkS$，其中 nS 为定值，$k=\dfrac{\Delta B}{\Delta t}$ 为 $B-t$ 图像的斜率，因此 $E-t$ 图像与斜率 k 的变化规律相同，如图(a)所示.

2. 分析 $I-t$ 图像

由闭合电路欧姆定律可得 $I=\dfrac{E}{R+r}$，$I-t$ 图像与 $E-t$ 图像的变化规律完全相同，如图(b)所示.

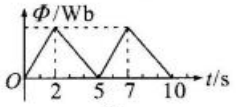


(a)　　(b)

3. 分析 $\Phi-t$ 图像

解法一：由 $\Phi=BS$，且 S 为定值可知 $\Phi-t$ 图像与 $B-t$ 图像的变化规律完全相同，图像如图(c)所示.

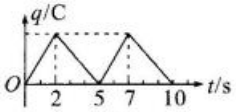
解法二：由 $E=n\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 可知，$\Phi-t$ 图像斜率的绝对值表示电动势大小，可以根据 $E-t$ 图像反推 $\Phi-t$ 图像，图像如图(c)所示.



(c)

4. 分析 $q-t$ 图像

由 $q=It$ 知，$q-t$ 图像的斜率大小表示电流的大小，可以根据 $I-t$ 图像反推 $q-t$ 图像，图像如图(d)所示.



(d)

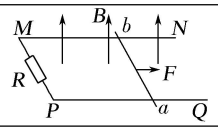
六、电磁感应综合问题常见题型

题型一　电磁感应中的“杆＋导轨”模型

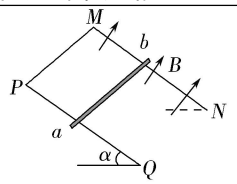
【题型解读】杆切割磁感线对电路供电，运动的导体棒充当电源，对其他导体棒或电阻供电。

模型一　“单杆＋导轨”模型

1.单杆水平式（导轨光滑）

物理模型		
动态分析		设运动过程中某时刻棒的速度为 v，加速度为 $a=\dfrac{F}{m}-\dfrac{B^2L^2v}{mR}$，a、v 同向，随 v 的增加，a 减小，当 a＝0 时，v 最大，$I=\dfrac{BLv}{R}$ 恒定
收尾状态	运动形式	匀速直线运动
	力学特征	a＝0，v 最大，$v_m=\dfrac{FR}{B^2L^2}$
	电学特征	I 恒定

2.单杆倾斜式（导轨光滑）

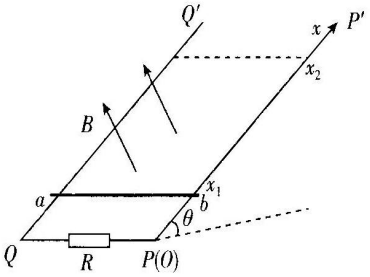
物理模型		
动态分析		棒释放后下滑，此时 a＝gsin α，速度 v↑⟹E＝BLv↑⟹$I=\dfrac{E}{R}$↑⟹F＝BIL↑⟹a↓，当安培力 F＝mgsin α时，a＝0，v 最大
收尾状态	运动形式	匀速直线运动
	力学特征	a＝0，v 最大，$v_m=\dfrac{mgR\sin\alpha}{B^2L^2}$
	电学特征	I 恒定

1. 如图 16-2 所示，有一倾角 $\theta=30°$、间距 $l=0.1$ m 的足够长平行金属导轨 PP'、QQ' 底端接有阻值 $R=0.1\ \Omega$ 的电阻，质量 $m=0.1$ kg 的金属棒 ab 垂直导轨放置. 建立原点位于底端、方向沿导轨向上的坐标轴 Ox. 在导轨间区域，有垂直于导轨平面向上的磁场，磁感应强度大小沿 x 轴方向的变化满足 $B=k_1x(k_1=2\ \text{T/m})$ 关系. 从 $t=0$ 时刻起，棒 ab 在外力 F 作用下从 $x_1=0.1$ m 处沿导轨向上运动至 $x_2=0.5$ m 处，其速度 v 与位移 x 的关系满足 $v=\frac{k_2}{x}(k_2=0.5\ \text{m}^2/\text{s})$. 棒 ab 始终保持与导轨垂直，不计其他电阻，不计所有摩擦. 重力加速度 g 取 10 m/s^2. (提示：可用 F-x 图像下的“面积”来代表力 F 做的功)

(1)棒 ab 运动至 x_2 处时，求 a、b 两端电势差 U_{ab} 及电阻 R 消耗的电功率 P；

(2)求外力 F 在此运动过程中所做的功；

(3)求在此运动过程中克服外力 F 做功的平均功率.



[解析] (1)a、b 两端的电势差 $U_{ab}=-E_2=-B_2lv_2=-2x_2l\frac{0.5}{x_2}=-0.1$ V

电阻 R 消耗的电功率 $P=\frac{E_2^2}{R}=0.1$ W

(2)由动能定理得 $W_F-W_G-W_A=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2$

$W_G=mg(x_2-x_1)\sin\theta=0.2$ J.

$F_A=\frac{(Bl)^2v}{R}=0.2x$(可用面积法求做功)

$W_A=\frac{1}{2}\times0.2(x_2^2-x_1^2)=0.024$ J

$\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2=-1.2$ J

$W_F=W_G+W_A+\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2=-0.976$ J

(3)回路中电流 $I=\frac{Blv}{R}=1$ A(电流恒定)，又 $I^2R\Delta t=W_A$

$\Delta t=\frac{W_A}{I^2R}=0.24$ s

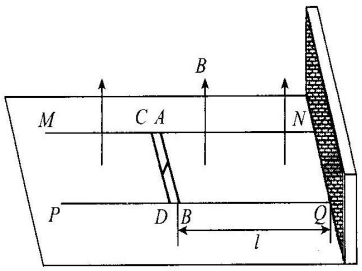
$\overline{P_克}=\frac{W_{克F}}{\Delta t}=\frac{0.976}{0.24}$ W$=4.07$ W

2. (10 分)如图所示，有相距 $L=1$ m 的足够长光滑平行金属导轨 MN、PQ 置于绝缘水平面上，导轨电阻不计，导轨右端紧靠一绝缘弹性墙，整个装置处于竖直向上的匀强磁场中，磁感应强度 $B=1$ T. 质量 $m_1=0.1$ kg、电阻 $R_1=4\ \Omega$ 的导体棒 AB 与质量 $m_2=0.4$ kg、电阻 $R_2=6\ \Omega$ 的导体棒 CD 垂直导轨放置，在外力作用下使两导体棒间夹有被压缩的一轻质短弹簧(可认为两棒是挨着的)，弹簧的弹性势能 $E_p=1$ J，AB 棒与墙的距离 $l=2$ m. 某时刻撤去外力，弹簧瞬间恢复原长，使两棒分离，弹簧恢复原长后立即撤去，棒在运动过程中始终与导轨垂直且与导轨保持良好接触. 求：

(1)弹簧释放后瞬间 AB、CD 棒的速度大小；

(2)两棒最后的距离 x；

(3)整个过程中 AB 棒产生的焦耳热.



解：(1)将压缩的弹簧释放，设两棒分离后 AB、CD 的速度大小分别为 v_1、v_2

$m_1v_1=m_2v_2$ (1 分)

$\frac{1}{2}m_1v_1^2+\frac{1}{2}m_2v_2^2=E_p$ (1 分)

解得 $v_1=4$ m/s，$v_2=1$ m/s (1 分)

(2)两棒弹开后，有 $m_1v_1'=m_2v_2'$(v_1'方向向右，v_2'方向向左)

$\sum m_1v_1'\Delta t=\sum m_2v_2'\Delta t$

$m_1x_1=m_2x_2$

当 $x_1=l=2$ m 时，$x_2=0.5$ m (1 分)

设 AB 棒运动到弹性墙时速度为 v_1''，对 AB 棒由动量定理得

$-BiL\Delta t=m_1v_1''-m_1v_1$

$-BL\frac{BL(l+x_2)}{R_1+R_2}=m_1v_1''-m_1v_1$

解得 $v_1''=1.5$ m/s (1 分)

此时设 CD 棒的速度大小为 v_2''，有

$m_1v_1''=m_2v_2''$

解得 $v_2''=0.375$ m/s (CD 棒速度方向向左，大小为 0.375 m/s)

即 CD 还在向左运动. (1 分)

AB 棒被墙反弹后，AB、CD 棒动量守恒，最后达到共同速度 v_3，有

$m_2v_2''+m_1v_1''=(m_1+m_2)v_3$

解得 $v_3=0.6$ m/s

对 AB 棒由动量定理得 $-BiL\Delta t=m_1v_3-m_1v_1''$

$-BL\dfrac{BL\Delta x}{R_1+R_2}=m_1v_3-m_1v_1''$

解得 $\Delta x=0.9$ m （1分）

AB、CD 棒间的距离为 $x=l+x_2-\Delta x=1.6$ m （1分）

(3)$Q_{总}=E_p-\dfrac{1}{2}(m_1+m_2)v_3^2=0.91$ J （1分）

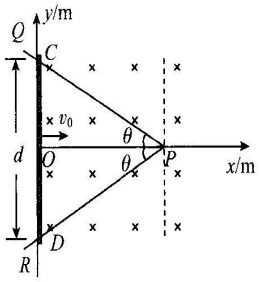
$Q_{AB}=\dfrac{R_1}{R_1+R_2}Q_{总}=0.364$ J （1分）

3 (10分)如图所示，水平面上固定两条光滑金属轨道，两导轨 PQ、PR 关于 x 轴对称放置，且与 x 轴夹角均为 $\theta=37°$，在 x 轴上 P 点接触良好；长为 $d=0.8$ m 的金属杆 CD 置于 y 轴上时，杆两端点 CD 恰好与导轨和 y 轴的两交点重合. 整个装置处于竖直向下的匀强磁场中，磁感应强度大小为 $B=0.5$ T. 现给杆的中点施加外力，使杆以速度 $v_0=4$ m/s 沿 x 轴正方向匀速运动，运动过程中杆始终与 y 轴平行. 已知导轨和杆单位长度电阻均为 $\lambda=0.5$ Ω/m，杆与导轨始终接触良好，接触电阻不计，$\sin37°=0.6$.(提示：可以用 F-x 图像下的“面积”代表力 F 所做的功)求：

(1)杆在 O 位置时，杆上通过的电流大小；

(2)杆从 O 位置运动到 P 位置过程中，杆两端点 CD 间的电势差 U_{CD} 与杆所在处的横坐标 x 的关系式；

(3)杆从 O 位置运动到 P 位置，杆产生的焦耳热 Q.

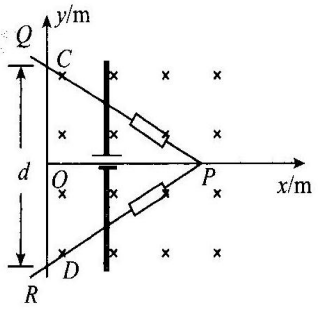


解：(1)由闭合电路欧姆定律知 $I=\dfrac{Bdv_0}{R}$ （1分）

$R=d(1+\dfrac{1}{\sin\theta})\lambda=\dfrac{8}{3}d\lambda$ （1分）

得 $I=\dfrac{3Bv_0}{8\lambda}=1.5$ A （1分）

(2)杆移动至 x 位置时，等效电路如图所示



导轨电阻 $R=2\left(\dfrac{2}{3}d-x\right)\left(\dfrac{1}{\cos\theta}\right)\lambda=\dfrac{5}{2}\left(\dfrac{2}{3}d-x\right)\lambda$ （2分）

杆接入回路部分电阻

$r=2\left(\dfrac{2}{3}d-x\right)(\tan\theta)\lambda=\dfrac{3}{2}\left(\dfrac{2}{3}d-x\right)\lambda$

杆接入回路的电势差为

$U_1=Bdv_0-Ir=\dfrac{5}{8}B\left(d-\dfrac{3}{2}x\right)v_0$ （1分）

杆未接入回路的电势差为

$U_2=Bdv_0-B\left(d-\dfrac{3}{2}x\right)v_0=\dfrac{3}{2}Bxv_0$

CD 间的电势差 $U_{CD}=U_1+U_2=\dfrac{5}{8}Bdv_0+\dfrac{9}{16}Bxv_0=(1+1.125x)$ V （1分）

(3)由题意得，杆在滑动时，电流 I 始终保持不变，由于杆匀速运动，得

$F=F_{安}=BI(d-\dfrac{3}{2}x)$ （1分）

F-x 图线与 x 轴所围面积表示力 F 做的功

$W_F=\dfrac{B^2d^2v_0}{8\lambda}$ （1分）

因此，杆产生的焦耳热 $Q=\dfrac{3}{8}W_F=\dfrac{3B^2d^2v_0}{64\lambda}=0.06$ J （1分）

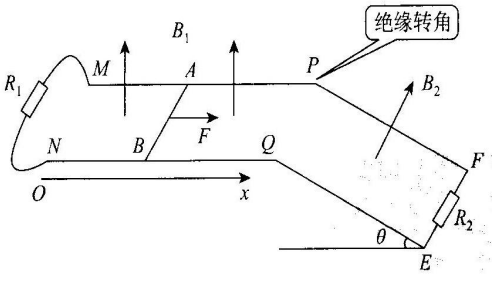
4.(10分)如图所示，MP、NQ 为水平放置的平行光滑导轨，水平导轨长为 $s_1=4$ m，导轨间距 $L=2$ m，轨道左端处于 x 轴的原点 O，M、N 间连接一个定值阻值 $R_1=2$ Ω，将一根金属棒 AB 垂直地放置在导轨上，并与导轨接触良好，金属棒 AB 及导轨 MP、NQ 单位长度的电阻均为 $r=1$ Ω/m，其余导轨电阻不计，水平轨道上有竖直向上的磁场，磁场在垂直于 x 轴方向上的强度相等，沿 x 轴的强度按 $B_1^2=B_0^2(1+kx)$ 规律分布，(其中 $B_0=2$ T，k 的单位为 T^2/m). 用恒力 F 沿水平方向作用在金属杆 AB 上，使其从原点 O 处以 $v=1$ m/s 沿 x 轴正方向做匀速运动，运动至 PQ 处撤去恒力 F，使金属棒 AB 通过光滑绝缘转角滑入 $\theta=30°$ 的倾斜光滑导轨，倾斜导轨长 $s_2=3.5$ m，末端 EF 间连接一个定值阻值 $R_2=2$ Ω，倾斜轨道间存在垂直导轨向上，但大小随时间变化的磁感应强度 B_2，g 取 10 m/s². 求：

(1)刚开始运动时($x=0$)，AB 两点之间的电势差 U_{AB}；

(2)k 值的大小，恒力 F 的大小；

(3)AB 棒在水平导轨上运动时电路中产生的总热量 Q；

(4)若将金属棒滑行至 PQ 处的时刻记作 $t=0$，此时 $B_{20}=1$ T，为使金属棒在斜面上运动到 EF 前不产生感应电流，写出磁感应强度 B_2 的大小与时间 t 的关系.



解：(1)当 $x=0$ 时，$E=B_0Lv=4$ V （1分）

由电路特点知 $U_{AB}=-2$ V （1分）

(2)因为金属棒在恒力作用下做匀速直线运动，则 $F=\dfrac{B_1^2L^2v}{R}$ （1分）

其中 $B^2=B_0^2(1+kx)$，$R=R_1+L\cdot r+2x\cdot r=(4+2x)$ Ω

代入解得 $F=\dfrac{8(2+2kx)}{2(2+x)}$，因为 F 为恒力，所以 F 与 x 无关，

则有 $2kx=x$

即 $k=0.5\ \mathrm{T^2/m}$ （1 分）

$F=4\ \mathrm{N}$ （1 分）

(3)由功能关系可知 $Q=F\cdot s_1=16\ \mathrm{J}$ （2 分）

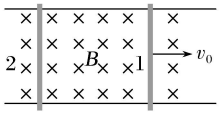
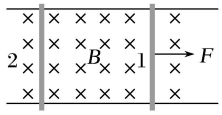
(4)因为不产生电流，所以在倾斜轨道上运动时磁通量不变（1 分）

所以 $B_{20}\cdot L\cdot s_2=B_2\cdot L\cdot s_t$，其中

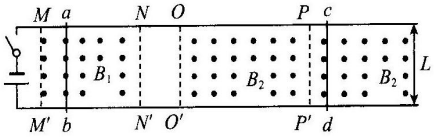
$s_t=s_2-\left(vt+\frac{1}{2}g\sin\theta t^2\right)=3.5-t-2.5t^2$ （1 分）

解得 $B_2=\left(\frac{7}{7-2t-5t^2}\right)\mathrm{T}$ （$t<1\ \mathrm{s}$） （1 分）

模型二 “双杆＋导轨”模型

示意图		
力学观点	导体棒 1 受安培力的作用做加速度减小的减速运动，导体棒 2 受安培力的作用做加速度减小的加速运动，最后两棒以相同的速度做匀速直线运动	两棒以相同的加速度做匀加速直线运动
动量观点	系统动量守恒	系统动量不守恒
能量观点	棒 1 动能的减少量＝棒 2 动能的增加量＋焦耳热	外力做的功＝棒 1 增加的动能＋棒 2 增加的动能＋焦耳热

1.（10 分）某同学设计了一款电动玩具，其简化模型如图所示，间距为 L 的平行长直轨道固定于水平桌面上，轨道的 NO、$N'O'$ 段用绝缘材料制成，其余部分均为导电材料，连接处平滑. 轨道左端接有电动势为 E、内阻不计的直流电源，左侧矩形区域 $MNN'M'$ 内有垂直桌面向上、磁感应强度为 B_1（大小可调节）的匀强磁场，轨道的右侧区域有垂直于桌面向上、磁感应强度为 B_2（大小已知）的匀强磁场. 初始时金属棒 ab 静置于 MM' 右侧某处，金属棒 cd 静置于 PP' 右侧某处（PP' 右侧轨道足够长）. 两棒的质量均为 m，接入电路中的电阻均为 R，金属棒与轨道接触良好，其余电阻均不计. 金属棒 ab 在 $MNN'M'$ 区域运动时受到恒定阻力 f_0，金属棒 cd 在 PP' 右侧区域运动时会受到大小与速率成正比的摩擦阻力 $f=kv$（其中 $k=\frac{B_2^2L^2}{2R}$），两金属棒在区域 $NPP'N'$ 运动时无摩擦阻力. 调节磁场 B_1，将开关闭合，金属棒 ab 将从静止开始加速，并在进入绝缘段前达到匀速.



(1)若金属棒 ab 刚越过 OO' 时的速度为 v_0（为已知量），求此刻两金属棒的加速度大小；

(2)接小题(1)，当金属棒 ab 从 OO' 向右运动 x_0 时（x_0 为已知量，未越过 PP'），两棒速度恰好相等，求此时两金属棒的速度大小；

(3)磁感应强度 B_1 调到多大时，金属棒 ab 在进入绝缘段前速度会有最大值？求出相应的最大速度.

解：(1)ab 棒刚越过 OO' 时，两棒构成回路的总电动势为 B_2Lv_0，两棒加速度大小相等，即

$a_{ab}=a_{cd}=\frac{B_2^2L^2}{2Rm}v_0$ （2 分）

(2)两棒均向右运动时，设 ab 棒速度为 v_1，cd 棒速度为 v_2，回路中的电流为 $i=\frac{B_2L(v_1-v_2)}{2R}$ （1 分）

两棒动量不守恒，设两棒速度相等时为 v，棒 cd 向右运动 x，

对棒 ab 列动量定理

$-B_2Lq=m(v-v_0)$

对棒 cd 列动量定理

$B_2Lq-k\bar{v}_2t=B_2Lq-kx=mv$ （1 分，两式有一个对就得分）

另有 $q=\frac{B_2^2L^2}{2R}(x_0-x)$ （1 分）

联立解得 $x=\frac{2}{3}\left(x_0-\frac{Rmv_0}{B_2^2L^2}\right)$

$v=\frac{1}{6}\left(4v_0-\frac{B_2^2L^2}{Rm}x_0\right)$ （1 分）

(3)匀速时，电源与棒 ab 构成的回路有

$I=\frac{E-B_1Lv}{R}$ （1 分）

棒 ab 受安培力 $F_A=B_1L\frac{E-B_1Lv}{R}$

由受力平衡得 $f_0=F_A$ （1 分）

解得 $v=\frac{E}{L}\cdot\frac{1}{B_1}-\frac{f_0R}{L^2}\cdot\frac{1}{B_1^2}$ （1 分）

由数学知识可知，当 $B_1=\frac{2Rf_0}{EL}$ 时，有最大速度 $v_m=\frac{E^2}{4f_0R}$ （1 分）

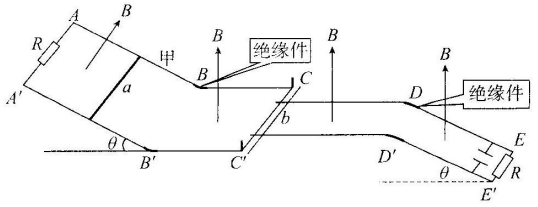
2.（10 分）如图所示，有一间距 L=1m 的足够长光滑平行倾斜金属导轨 $ABA'B'$、倾角 $\theta=30°$，AA' 处接有阻值 $R=0.3\ \Omega$ 的电阻，在底端 BB' 处通过光滑圆弧绝缘件连接平行光滑金属导轨 $BDB'D'$，其中轨道 $BCB'C'$ 部分间距为 L、轨道 $CDC'D'$ 部分（左端略伸出外面，如图）间距为 $\frac{L}{2}$，在右端 DD' 处通过光滑圆弧绝缘件连接足够长的光滑平行倾斜金属导轨 $DED'E'$，倾角 $\theta=30°$，在 EE' 端接有阻值为 $R=0.3\ \Omega$ 的电阻和电容为 C 的电容器. 金属棒 a、b 质量均为 $m=0.1\ \mathrm{kg}$、阻值均为 $r=0.2\ \Omega$，长度均为 L，垂直导轨放置，金属棒 b 初始被锁定在 CC' 处，金属棒 a 从某一高度上方任意位置静止释放，都能以恒定速度经过 BB' 处且经过 BB' 处时 b 的锁定装置解除，之后棒 a、b 在各自轨道上运动足够长时间，当棒 a 运动到 CC' 处与两固定在 CC' 处的金属立柱相撞并粘在一起，最终棒 b 恰能通过 DD' 处光滑圆弧绝缘件进入倾斜轨道 $DED'E'$. 在 $ABA'B'$ 导轨间区域存在垂直导轨向上的匀强磁场，其他导轨间区域存在竖直向上的匀强磁场，磁感应强度均为 $B=\frac{1}{2}\ \mathrm{T}$. 两棒始终保持与导轨垂直且接触

良好，不计其他电阻，不计所有摩擦，忽略连接处的能量损失．重力加速度 g 取 10 m/s^2．求：

(1)棒 a 运动至 BB' 处时的速度大小及两端电势差大小 U；

(2)棒 a 进入水平轨道后棒 a 上产生的焦耳热；

(3)试分析棒 b 进入倾斜轨道 $DED'E'$ 的运动情况及最终速度．



解：(1)由电磁感应定律及欧姆定律得 $E=BLv_0$，$I=\dfrac{BLv_0}{R+r}$ (1分)

由平衡条件得 $mg\sin\theta=BIL$ (1分)

解得 $v_0=1$ m/s (1分)

电势差 $U=\dfrac{3E}{5}=\dfrac{3}{10}$ V (1分，正负都给分)

(2)稳定时，有 $BLv_1=B\dfrac{L}{2}v_2$

$-BIL\Delta t=mv_1-mv_0$

$BI\dfrac{L}{2}\Delta t=mv_2$ (1分)

解得 $v_1=0.2$ m/s，$v_2=0.4$ m/s (1分)

从棒 a 进入水平轨道到稳定时，有

$Q_{1总}=\dfrac{1}{2}mv_0^2-\dfrac{1}{2}mv_1^2-\dfrac{1}{2}mv_2^2=\dfrac{1}{25}$ J

$Q_{1a}=\dfrac{2}{3}Q_{1总}=\dfrac{2}{75}$ J (1分)

棒 a 碰撞 CC' 后，b 恰能进入倾斜轨道，$v_D=0$

$Q_{2总}=\dfrac{1}{2}mv_2^2=\dfrac{1}{125}$ J

$Q_{2a}=\dfrac{1}{2}Q_{2总}=\dfrac{1}{250}$ J

得 $Q_a=Q_{1a}+Q_{2a}=\dfrac{23}{750}$ J (1分)

(3)稳定后，电容器不再充放电，由平衡条件及欧姆定律得

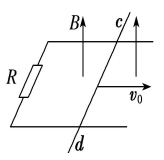
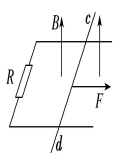
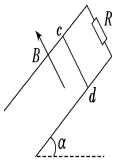
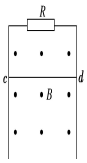
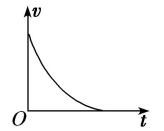
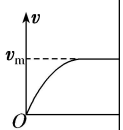
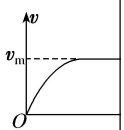
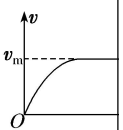
$mg\sin\theta=BI\cdot\dfrac{L}{2}\cos\theta$

$I=\dfrac{B\cdot\dfrac{L}{2}v\cos\theta}{(R+\dfrac{r}{2})}$

解得 $v=\dfrac{64}{15}$ m/s (1分)

运动情况为先做变加速运动，后做匀速下滑运动．(1分)

模型三“杆＋导轨＋电阻”四种模型

	模型一($v_0\neq0$)	模型二($v_0=0$)	模型三($v_0=0$)	模型四($v_0=0$)
说明	质量为 m，电阻不计的单杆 cd 以一定初速度 v_0 在光滑水平轨道上滑动，两平行导轨间距为 L	轨道水平光滑，杆 cd 质量为 m，电阻不计，两平行导轨间距为 L，拉力 F 恒定	倾斜轨道光滑，倾角为α，杆 cd 质量为 m，电阻不计，两平行导轨间距为 L	竖直轨道光滑，杆 cd 质量为 m，电阻不计，两平行导轨间距为 L
示意图				
力学观点	杆以速度 v 切割磁感线产生感应电动势 E＝BLv，电流 $I=\dfrac{BLv}{R}$，安培力 $F=BIL=\dfrac{B^2L^2v}{R}$。杆做减速运动：v↓⇒F↓⇒a↓，当 v＝0 时，a＝0，杆保持静止	开始时 $a=\dfrac{F}{m}$，杆 cd 速度 v↑⇒感应电动势 E＝BLv↑⇒I↑⇒安培力 $F_{安}$＝BIL↑，由 F－$F_{安}$＝ma 知 a↓，当 a＝0 时，v 最大，$v_m=\dfrac{FR}{B^2L^2}$	开始时 a＝gsinα，杆 cd 速度 v↑⇒感应电动势 E＝BLv↑⇒I↑⇒安培力 $F_{安}$＝BIL↑，由 mgsinα－$F_{安}$＝ma 知 a↓，当 a＝0 时，v 最大，$v_m=\dfrac{mgR\sin\alpha}{B^2L^2}$	开始时 a＝g，杆 cd 速度 v↑⇒感应电动势 E＝BLv↑⇒I↑⇒安培力 $F_{安}$＝BIL↑，由 mg－$F_{安}$＝ma 知 a↓，当 a＝0 时，v 最大，$v_m=\dfrac{mgR}{B^2L^2}$
图像观点				
能量观点	动能全部转化为内能：$Q=\dfrac{1}{2}mv_0^2$	F 做的功一部分转化为杆的动能，一部分转化为内能：$W_F=Q+\dfrac{1}{2}mv_m^2$	重力做的功(或减少的重力势能)一部分转化为杆的动能，一部分转化为内能：$W_G=Q+\dfrac{1}{2}mv_m^2$	重力做的功(或减少的重力势能)一部分转化为杆的动能，一部分转化为内能：$W_G=Q+\dfrac{1}{2}mv_m^2$

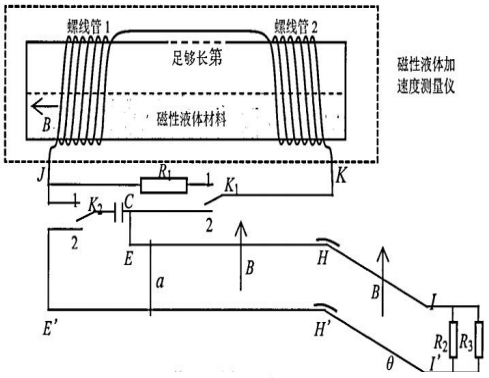
1.(10分)如图所示，虚线框内是“磁性液体加速度测量仪”的示意图，两螺线管固定在距离足够长的柱形容器两端，容器内装有磁性液体材料，其产生的磁场方向向左，装置加速度变化时液体发生流动，螺线管内的磁性液体越多，磁通量越大．螺线管 1、2 均为 50 匝，同一螺线管内的磁场可视为匀强磁场，两螺线管绕线方式如图所示，并从 J、K 两端接入

电路。K_1、K_2为单刀双掷开关，初始时K_1、K_2均接1，电阻R_1=2Ω，电容器电容C=0.16F。金属导轨EH、$E'H'$平行放置在水平面内，HH'处有一小段绝缘材料连接水平导轨与倾斜导轨HI、$H'I'$，II'间连接电阻R_2、R_3，R_2=R_3=8Ω，质量m=0.01kg、电阻R_a=4Ω的导体棒a静止在水平轨道上距HH'足够长的距离处，运动过程中始终与导轨垂直，倾斜导轨与水平面的夹角θ=37°，两导轨间均存在竖直向上的匀强磁场B=1T，且间距均为d=0.5m，两螺线管电阻不计，金属导轨的摩擦与电阻均不计。(取sin37°=0.6，g=10m/s²)

(1) 加速度测量仪由静止向右加速过程中，左右两螺线管磁通量均变化$|\Delta\phi|=2\times10^{-2}$Wb，求此过程中通过$R_1$中的电荷量，并判断$R_1$中电流的方向向左还是向右；

(2) 调节开关，让电容器充电1C后，将K_2与2连接，a导体棒由静止开始向右运动，求a导体棒运动到HH'时的速度大小；

(3) 某次a导体棒以速度v_H= 4m/s从HH'处沿倾斜导轨滑入，沿轨道下滑高度h=4.45m时速度已经恒定，求此下滑h的过程中电阻R_3产生的焦耳热。



1. (1) $q=I\Delta t$ .....①

$I=\dfrac{E}{R}$.....②

$E_1=\dfrac{n_1\Delta\phi_1}{\Delta t}$，$E_2=\dfrac{n_2\Delta\phi_2}{\Delta t}$.....③

①、②、③中任意一公式对即给一分，不累加.....1分

$q=\dfrac{n_1\Delta\phi_1+n_2\Delta\phi_2}{R_1}=1\text{C}$ 1分

电流方向向右.....1分

(2)电容器放电时对a棒从静止到H处的过程用动量定理列式

$\sum BId\Delta t=\sum m\Delta v$

$Bd\Delta q=mv_H$.....1分

$Bdv_H=\dfrac{q_0-\Delta q}{C}$.....1分

解得$v_H=\dfrac{Bdq_0}{m+B^2d^2C}=10\text{m/s}$.....1分

(3)设匀速时速度为v

$E=Bdv\cos\theta$.....④

$BId\cos\theta=mg\sin\theta$.....⑤

$I=\dfrac{E}{R_{总}}$.....⑥

$\dfrac{B^2d^2v\cos^2\theta}{R_{总}}=mg\sin\theta$.....⑦

④⑤⑥⑦中任意一公式对即给1分，不累加.....1分

$v=3\text{m/s}$.....1分

由能量守恒得$Q_{总}=\dfrac{1}{2}mv_H^2+mgh-\dfrac{1}{2}mv^2$

$Q_{总}=0.48\text{J}$.....1分

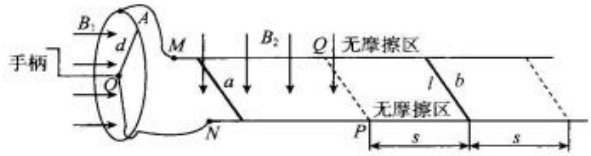
$Q_3=\dfrac{\dfrac{R_2R_3}{R_2+R_3}}{R_a+\dfrac{R_2R_3}{R_2+R_3}}\times Q_{总}\times\dfrac{R_2}{R_2+R_3}=0.12\text{J}$.....1分

2. 如图所示，半径为d的金属圆环固定在竖直平面上，金属棒OA的一端与金属圆环良好接触，另一端固定在圆心O的转轴上，金属棒能随手柄一起转动，磁感应强度为B_1的匀强磁场水平向右垂直圆环平面。平行导轨M与N处于同一水平面，间距为l，M与金属圆环相连，N通过电刷与O端相连。边界PQ左侧存在竖直向下的匀强磁场，磁感应强度为B_2。质量为m的金属杆a垂直导轨置于磁场中，质量为$3m$的金属杆b垂直导轨置于边界PQ右侧相距s处，已知金属杆a与b的电阻均为R，与导轨之间的动摩擦因数均为μ，但边界PQ与金属杆b之间导轨涂有润滑物质，当金属杆经过该区域时阻力为零，不计金属棒OA、圆环、导轨及其他接触的电阻，假设最大静摩擦力等于滑动摩擦力。现通过转动手柄使金属棒OA转速不断增大，经过一段时间后，金属杆a开始向右加速运动，当金属杆a越过边界PQ后金属棒OA立即停止转动。此后金属杆a与b发生碰撞，金属杆a以碰前一半速率反弹，金属杆b向前运动s距离后，恰好与金属杆a同时停下。

(1)求金属杆a刚开始运动时手柄转动的角速度；

(2)求金属杆a与金属杆b碰撞前的速率；

(3)求金属杆a停下位置与边界PQ的距离。



解：(1)设金属杆a刚开始运动时手柄转动的角速度ω，安培力等于最大静摩擦力，则

$E=B_1dv=B_1d\times\dfrac{\omega d}{2}=\dfrac{1}{2}B_1\omega d^2$ (1分)

$I=\dfrac{E}{R_{总}}=\dfrac{B_1\omega d^2}{2R}$

$F_{安}=B_2Il=\mu mg$ (1分)

联立得$\omega=\dfrac{2\mu mgR}{B_1B_2ld^2}$ (1分)

(2)设金属杆a碰撞前速率为v_1，则碰后速率为$v_1/2$，金属杆b碰后的速率为v_2，则

$v_1=\sqrt{2as}=\sqrt{2\mu gs}$ (1分)

碰撞过程由动量守恒有$mv_1=-m\dfrac{v_1}{2}+3mv_2$ (1分)

金属杆a碰撞前的速率$v_1=2v_2=2\sqrt{2\mu gs}$ (1分)

(3)设杆b碰后运动时间t_1，杆a在无摩擦区域运动时间t_2，B_2磁场区域运动时间t_3，则

$t_1=\dfrac{v_2}{a}=\sqrt{\dfrac{2s}{\mu g}}$

$t_2=\dfrac{s}{v_1/2}=\sqrt{\dfrac{s}{2\mu g}}$

$t_3=t_1-t_2=\sqrt{\dfrac{s}{2\mu g}}$ (1分)

由动量定理有$-F_{安}t_3-\mu mgt_3=0-m\dfrac{v_1}{2}$ (1分)

$B_2l\dfrac{B_2lx}{R}+m\sqrt{\dfrac{\mu gs}{2}}=m\sqrt{2\mu gs}$ (1分)

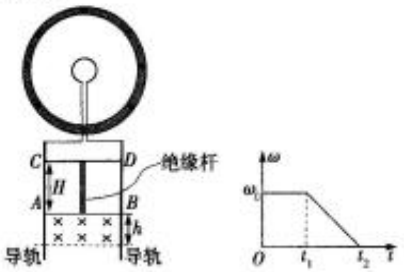
停下位置与边界PQ距离$x=\dfrac{mR}{B_2^2l^2}\sqrt{\dfrac{\mu gs}{2}}$ (1分)

3. (10 分)如图甲所示,竖直面内有一圆形小线圈,与绝缘均匀带正电圆环同心放置。带电圆环的带电荷量为 Q,绕圆心做圆周运动,其角速度 ω 随时间 t 的变化关系如图乙所示(图中 ω_0、t_1、t_2 为已知量)。线圈通过绝缘导线连接两根竖直的间距为 l 的光滑平行金属长导轨,两导轨间的矩形区域内存在垂直纸面向里的水平匀强磁场,磁场的上下边界间距为 h,磁感应强度大小恒为 B。"工"字形构架由绝缘杆固连间距为 $H(H>h)$ 的水平金属棒 AB、CD 组成,并与导轨紧密接触。初始时锁定"工"字形构架,使 AB 棒位于磁场的上边沿,t_1 时刻解除锁定,t_2 时刻开始运动。已知"工"字形构架的质量为 m,AB 棒和 CD 棒离开磁场下边沿时的速度大小均为 v,金属棒 AB、CD 和圆形线圈的电阻均为 R,其余电阻不计,不考虑线圈的自感,重力加速度为 g。求:

(1)$0\sim t_1$ 时间内,带电圆环的等效电流;

(2)$t_1\sim t_2$ 时间内,圆形线圈磁通量变化率的大小,并判断带电圆环做圆周运动的方向(顺时针还是逆时针方向);

(3)从 0 时刻到 CD 棒离开磁场的全过程中 AB 棒上产生的焦耳热。



图甲　　图乙

解:(1)带电圆环的周期 $T=\frac{2\pi}{\omega_0}$　(1 分)

带电圆环的等效电流 $I=\frac{\Delta q}{\Delta t}$　(1 分)

取 Δt 为 T,则 Δq 为 Q

解得 $I=\frac{Q\omega_0}{2\pi}$　(1 分)

(2)设 $t_1\sim t_2$ 时间内 AB 棒的电流为 I_1

由题意得在 $t_1\sim t_2$ 时间内"工"字形构架仍然静止

则 $mg=BI_1l$,得 $I_1=\frac{mg}{Bl}$　(1 分)

AB 和 CD 棒在电路中并联

则圆形线圈的电流 $I=2I_1=\frac{2mg}{Bl}$

回路总电阻 $R_{总}=R+\frac{R^2}{R+R}=\frac{3R}{2}$

圆形线圈的磁通量变化率 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}=E=IR_{总}$

由以上各式得 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}=\frac{3mgR}{Bl}$　(1 分)

由物体平衡得 AB 棒电流方向向右,线圈电流为逆时针,再由楞次定律得

带电圆环圆周运动的方向为逆时针　(1 分)

(3)在 $t_1\sim t_2$ 的时间内

AB 棒焦耳热 $Q_1=I_1^2R(t_2-t_1)$

解得 $Q_1=\frac{m^2g^2R}{B^2l^2}(t_2-t_1)$　(1 分)

在 AB 棒经过磁场的过程中回路总焦耳热

$Q_{2总}=mgh-\frac{1}{2}mv^2$

AB 棒的电流即为总电流,电阻为总电阻的 $\frac{2}{3}$,由 $Q=I^2Rt$

得 AB 棒的焦耳热 $Q_2=\frac{2}{3}Q_{2总}=\frac{2}{3}mgh-\frac{1}{3}mv^2$　(1 分)

在 CD 棒经过磁场的过程中回路总焦耳热 $Q_{3总}=mgH$

AB 棒的电流为总电流的 $\frac{1}{2}$,电阻为总电阻的 $\frac{2}{3}$,由 $Q=I^2Rt$

得 AB 棒的焦耳热 $Q_3=\frac{1}{6}Q_{3总}=\frac{1}{6}mgH$　(1 分)

全过程 AB 棒的焦耳热

$Q=Q_1+Q_2+Q_3=\frac{m^2g^2R}{B^2l^2}(t_2-t_1)+\frac{2}{3}mgh-\frac{1}{3}mv^2+\frac{1}{6}mgH$　(1 分)

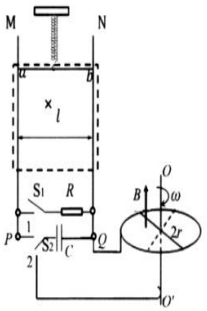
4. (10 分)如图所示,水平固定一半径 r=0.2m 的金属圆环,长为 2r、电阻值为 R=0.1Ω 的一金属棒沿直径放置,两端与圆环接触良好,金属棒的中心固定在过圆心的竖直导电转轴 OO'上,棒随轴以角速度 ω=200rad/s 匀速转动,转动方向如图。圆环内左半圆存在竖直向上、磁感应强度大小 B=2T 的匀强磁场。MP 和 NQ 是竖直平面内间距 l=0.1m 的两平行金属导轨,P 端通过开关 S_1、S_2 分别与阻值为 R 的电阻和 C=0.1F 的电容器相连,虚线框内存在方向垂直导轨平面向内、大小为 B 的匀强磁场。圆环边缘与 Q 端相连,转轴与电刷良好接触并通过 S_2 与电容器左端相连。阻值为 R、质量为 m=0.1kg、长为 l 导体棒 ab 通过劲度系数 k=4N/m 的绝缘轻质弹簧静止悬挂于紧靠导轨磁场上边界的下方,始终与导轨接触良好。开关 S_1 和 S_2 断开,不计其它电阻和摩擦阻力。

(1) S_2 掷向 2,求电容器所带电荷量的大小 q;

(2) S_2 掷向 1,ab 棒以 v=0.5m/s 的速度向上离开磁场,

①求此时电容器剩余的电荷量大小 q_1;

②ab 棒返回磁场上边界前断开 S_2,接通 S_1,ab 棒第一次向下运动至距磁场上边界 0.05m 处时速度为 0,求此过程中电阻 R 消耗的焦耳热。(提示:以弹簧处于自然长度时为弹性势能零势能点,当伸长量为 x 时,其弹性势能为 $\frac{1}{2}kx^2$)



(1) 开关 S_2 掷向 2,电容器充电。

根据法拉第电磁感应定律可知:$E=\frac{1}{2}B\omega r^2$　1 分

则电容器的电荷量为:$q=CU=\frac{CE}{2}$　1 分

联立解得:q=0.4C　1 分

(2) ①电容器放电过程有:$Blq_2=mv$　2 分

q_2=0.25C

电容器所带电荷量的大小 $q_1=q-q_2$=0.15C　1 分

②ab 棒返回磁场时的速度 v=0.5m/s,从返回刚进入磁场到至距磁场上边界 h=0.05m 处由能量守恒可得 $mgh+\frac{1}{2}mv^2=Q_{总}+\Delta E_P$　1 分

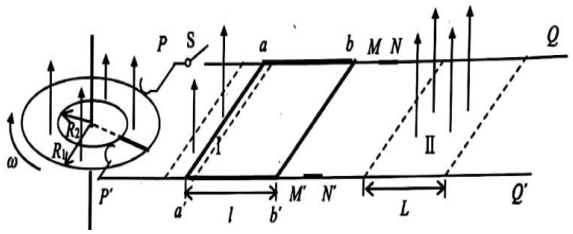
$mg=kx_0$,　$x_0=0.25m$　1 分

$\Delta E_P=\frac{1}{2}k(x_0+h)^2-\frac{1}{2}kx_0^2$=0.055J　1 分

联立解得:$Q_{总}$=7.5×10⁻³ J　$Q_R=\frac{1}{2}Q_{总}$=3.75×10⁻³ J　1 分

5.(10 分)如图所示,水平金属圆环由沿半径方向的金属杆连接,外环和内环的半径分别为 $R_1=0.2\text{m}$,$R_2=0.1\text{m}$,圆环区域存在方向竖直向上,磁感应强度大小 B=1T 的匀强磁场。两环通过电刷分别与间距 l=0.4m 的两平行光滑足够长水平轨道 PQ 和 $P'Q'$ 相连,MN 和 $M'N'$ 为轨道对称位置的绝缘小段,区域Ⅰ、Ⅱ内存在磁感应强度方向竖直向上,大小均为 B=1T 的匀强磁场。一质量 m=0.02kg 边长 l=0.4m 的正方形闭合金属框 $aba'b'$ 的 aa' 边靠近区域Ⅰ的右边界放置,金属框的 aa' 和 bb' 阻值均为 $R=2\Omega$,ab 和 $a'b'$ 电阻不计。金属圆环以角速度 $\omega=20\text{rad/s}$ 绕中心轴线转动,某时刻闭合电键 S,金属框瞬间弹出区域Ⅰ,并获得 $v_0=1\text{m/s}$ 的速度。金属框滑过绝缘小段

后进入区域Ⅱ，直至速度为零。金属框与轨道各处接触良好，求



（1）闭合电键 S 前，金属杆两端的电势差 U；

（2）金属框弹出区域Ⅰ过程中，通过金属杆的电量 q；

（3）设区域Ⅱ宽度为 L，则金属框速度为零时，bb' 边与区域Ⅱ左边界的最远距离 x_m 与 L 的关系。

【答案】（1）$U=BLv$　1 分　$v=\left(\omega R_1+\omega R_1\right)/2$　1 分　$U=0.3\text{V}$　1 分

（2）对金属框 aa'　$Blq_1=mv_0$　1 分　$q_1=0.05\text{C}$　1 分　aa' 与 bb' 并联 $\therefore q=2q_1=0.1$　（库）1 分

（3）金属框速度为零时，运动距离最远。设磁场中的变化长度为 x，$Bl\dfrac{Blx}{2R}=mv_0$　2 分　$x=0.5\text{m}$

①$L\geq 0.4\text{m}$　　$x_m=L+0.1(\text{m})$　1 分

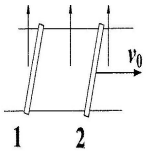
②$0.25\text{m}\leq L<0.4\text{m}$　　$x_m=0.9-L(\text{m})$　1 分

模型四　双杆（轨道变化）模型

【题型探讨】双杆切割和双杆通过安培力相互作用（或碰撞）问题。

【解题思路】：分清电源和用电器，找清电路的连接方式。双杆作用一般满足动量守恒定律。涉及作用时间，位移问题优先考虑动量定理求解。

一、无外力等距双棒



（1）电路特点：棒 2 相当于电源;棒 1 受安培力而加速起动,运动后产生反电动势.

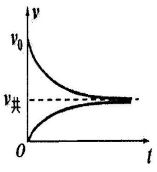
（2）电流特点：

$$I=\frac{Blv_2-Blv_1}{R_1+R_2}=\frac{Bl(v_2-v_1)}{R_1+R_2}$$

随着棒 2 的减速、棒 1 的加速，两棒的相对速度 v_2-v_1 变小，回路中电流也变小。

v_1=0 时：电流最大　$I_m=\dfrac{Blv_0}{R_1+R_2}$

v_2=v_1 时：电流　I=0



（3）两棒的运动情况

安培力大小：　$F_B=BIl=\dfrac{B^2l^2(v_2-v_1)}{R_1+R_2}$

两棒的相对速度变小,感应电流变小,安培力变小.

棒 1 做加速度变小的加速运动；棒 2 做加速度变小的减速运动，最终两棒具有共同速度

（4）两个规律

①动量规律：两棒受到安培力大小相等方向相反,系统合外力为零,系统动量守恒.

$$m_2v_0=(m_1+m_2)v_{共}$$

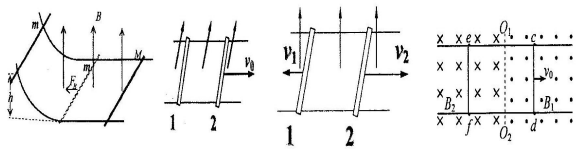
②能量转化规律：系统机械能的减小量等于内能的增加量.（类似于完全非弹性碰撞）

$$\frac{1}{2}m_2v_0^2=\frac{1}{2}(m_1+m_2)v_{共}^2+Q$$

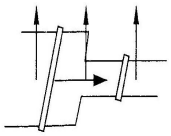
能量守恒：$Q_{总}=\frac{1}{2}m_1v_0^2-(\frac{1}{2}m_1v_{共}^2+\frac{1}{2}m_2v_{共}^2)$

两棒产生焦耳热之比：　$\dfrac{Q_1}{Q_2}=\dfrac{R_1}{R_2}$　　$\dfrac{Q_a}{Q_{总}}=\dfrac{R_1}{R_1+R_2}$

（5）变形：初速度的提供方式不同；磁场方向与导轨不垂直；两棒都有初速度；两棒位于不同磁场中



2.无外力不等距双棒



1．电路特点

棒 1 相当于电源;棒 2 受安培力而起动,运动后产生反电动势

2．电流特点

随着棒 1 的减速、棒 2 的加速，回路中电流变小；

最终当 $BL_1v_1=BL_2v_2$ 时,电流为零,两棒都做匀速运动

$$I=\frac{Bl_1v_1-Bl_2v_2}{R_1+R_2}$$

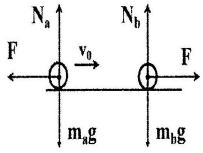
3．两棒的运动情况

棒 1 加速度变小的减速,最终匀速;

棒 2 加速度变小的加速,最终匀速.

4．最终特征

回路中电流为零　$Bl_1v_1=Bl_2v_2$



5．动量规律

两棒合外力不为零；　系统动量不守恒，利用动量定理联立求两棒末速度.

6.两棒最终速度

任一时刻两棒中电流相同，两棒受到的安培力大小之比为：　$\dfrac{F_1}{F_2}=\dfrac{BIl_1}{BIl_2}=\dfrac{l_1}{l_2}$

整个过程中两棒所受安培力冲量大小之比：　$\dfrac{I_1}{I_2}=\dfrac{F_1}{F_2}=\dfrac{l_1}{l_2}$

对棒 1：　$I_1=m_1v_0-m_1v_1$

对棒 2：　$I_2=m_2v_2-0$

结合：　$Bl_1v_1=Bl_2v_2$

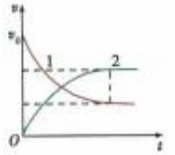
最终 $I=0$，$BL_1v_a=BL_1v_b$

两棒做匀速直线运动

$$v_1=\frac{m_1l_2^2}{m_1l_2^2+m_2l_1^2}v_0$$

$$v_2=\frac{m_1l_2l_1}{m_1l_2^2+m_2l_1^2}v_0$$

7.V-t 图像

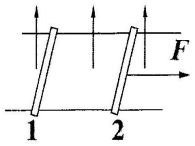


3、有外力等距双棒

（1）电路特点：棒 2 相当于电源;棒 1 受安培力而起动.

（2）运动分析：

某时刻回路中电流：　$I=\dfrac{Blv_2-Blv_1}{R_1+R_2}$



安培力大小：　$F_B=BIl$

棒 1：　$a_1=\dfrac{F_B}{m_1}$　　棒 2：$a_2=\dfrac{F-F_B}{m_2}$

最初阶段，$a_2>a_1$，只要 $a_2>a_1$，(v_2-v_1) 增大，I 增大，F_B 增大，a_1 增大，a_2 减小

当 $a_2=a_1$ 时，v_2-v_1 恒定，I 恒定，F_B 恒定，两棒匀加速

（3）稳定时的速度差

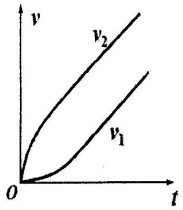
$$F=(m_1+m_2)a$$

$$F_B=m_1a$$

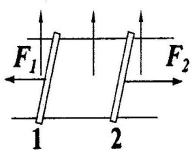
$$F_B=BIl$$

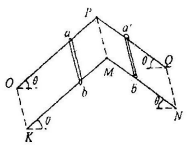
$$I=\frac{Bl(v_2-v_1)}{R_1+R_2}$$

$$v_2-v_1=\frac{(R_1+R_2)m_1F}{B^2l^2(m_1+m_2)}$$

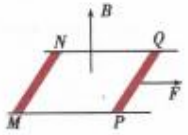
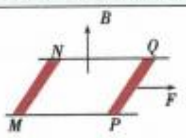
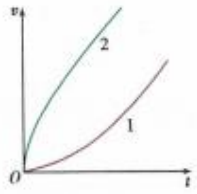


（4）变形：两棒都受外力作用；外力提供方式变化





（5）两个模型的对照

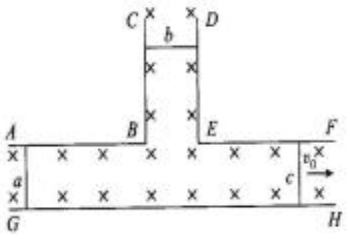
	光滑的平行导轨	不光滑平行导轨
示意图	 质量 $m_1=m_2$ 电阻 $r_1=r_2$ 长度 $L_1=L_2$	 摩擦力 $F_{f1}=F_{f2}$ 质量 $m_1=m_2$ 电阻 $r_1=r_2$ 长度 $L_1=L_2$
规律		 
分析	开始时，两杆做变加速运动；稳定时，两杆以相同的加速度做匀加速运动	开始时，若 $F_f<F\leq 2F_f$，则 PQ 杆先变加速后匀速运动；MN 杆静止。若 $F>2F_f$，PQ 杆先变加速后匀加速运动，MN 杆先静止后变加速最后和 PQ 杆同时做匀加速运动，且加速度相同

1 如图所示，三根光滑金属导轨 ABC、DEF 和 GH 水平固定，AB、EF 平行于 GH，BC 平行于 DE，导轨间距均为 L，电阻不计，且整个导轨平面都处于垂直纸面向里的匀强磁场中，磁感应强度为 B. 三根金属棒 a、b、c 垂直放置在导轨上，与导轨接触良好，其中 a、b 两金属棒质量均为 m，电阻均为 R，c 金属棒质量为 $2m$，电阻为 $2R$，开始时金属棒 a、b 处于静止状态，给 c 棒施加初速度 v_0，使其向右运动，假设轨道足够长，棒 a 只在轨道 AB 与 GH 上运动，棒 b 只在轨道 BC 与 DE 上运动. 求：

(1)金属棒 a、b、c 最终稳定的速度分别为多少；

(2)金属棒 a 从开始运动到最终稳定所产生的热量；

(3)在三根金属棒整个的运动过程中金属棒 a、b、c 与水平导轨围成的面积变化量？



解：(1)导轨光滑，所以在运动过程中 a、b、c 不受摩擦力，则在水平方向只有安培力，棒 c 以初速度 v_0 向右运动，则回路产生逆时针方向电流，则 c 受安培力指向左，a 受安培力指向右，b 受安培力方向沿 CB 方向，所以 a、b 均开始做加速运动，c 做减速运动，a、b 两者产生的感应电动势与 c 方向相反，当三者产生的感应电动势互相抵消时，回路电流为零，达到稳定平衡状态，三棒同时开始做匀速运动，故最终稳定时有 $E_c=E_a+E_b$，即 $BLv_c=BLv_a+BLv_b$ (1分)

对金属棒 a，根据动量定理得

$BLq_a=mv_a-0$ (1分)

对金属棒 b，同理得

$BLq_b=mv_b-0$ (1分)

对金属棒 c，同理得

$-BLq_c=2mv_c-2mv_0$ (1分)

由于 a、b、c 始终串联

故 $q_a=q_b=q_c$

联立解得 $v_a=v_b=\frac{2}{5}v_0$，$v_c=\frac{4}{5}v_0$ (1分)

(2)取金属棒 a、b、c 为系统，根据系统的能量守恒得

$Q=\frac{1}{2}\cdot 2mv_0^2-\frac{1}{2}mv_a^2-\frac{1}{2}mv_b^2-\frac{1}{2}\cdot 2mv_c^2$ (1分)

解得 $Q=\frac{1}{5}mv_0^2$

由于通过三根金属棒的电流相同，故产生的热量与电阻成正比，得

$Q_a=\frac{1}{4}Q=\frac{1}{20}mv_0^2$ (1分)

(3)对金属棒 a，由动量定理得 $BLq=mv_a$

解得 $q=\frac{2mv_0}{5BL}$ (1分)

电路中的电流 $\bar{I}=\frac{E}{4R}$

$\bar{I}=\frac{q}{\Delta t}$ (1分)

根据法拉第电磁感应定律

$E=\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}=\frac{B\Delta S}{\Delta t}$

联立解得 $\Delta S=\frac{8mv_0R}{5B^2L}$ (1分)

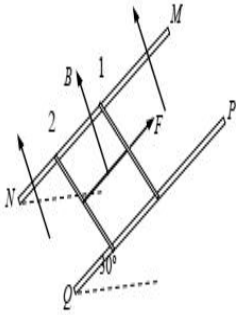
2. (10分) 如图所示，两根足够长的光滑平行金属导轨 MN、PQ 间距 l=1m，其电阻不计，两导轨及其构成的平面均与水平面成 30° 角。杆 1、杆 2 是两根用细线连接的金属杆，分别垂直导轨放置，每杆两端都与导轨始终接触良好，其质量分别为 m_1=0.1kg 和 m_2=0.2kg，两杆的总电阻 R=3Ω，两杆在沿导轨向上的外力 F 作用下保持静止。整个装置处在磁感应强度 B=1T 的匀强磁场中，磁场方向与导轨所在平面垂直。在 t=0 时刻将细线烧断，保持 F 不变，重力加速度 g=10m/s^2，求：

(1) 细线烧断瞬间，杆 1 的加速度 a_1 的大小；

(2) 细线烧断后，两杆最大速度 v_1、v_2 的大小；

(3) 两杆刚达到最大速度时，杆 1 上滑了 0.8 米，则从 t=0 时刻起到此刻用了多长时间；

(4) 在 (3) 题情景中，电路产生的焦耳热。



(1) 细线烧断瞬间：$F=(m_1+m_2)g\sin30^0$

棒 1：$F-m_1g\sin30^0=m_1a_1$，解得：$a_1=10m/s^2$

(2) 细线烧断前：$F=(m_1+m_2)g\sin30^0$

细线烧断后：$F_{安1}=F_{安2}$,方向相反，由系统动量守恒得：$m_1V_1=m_2V_2$，

两棒同时达到最大速度，之后做匀速直线运动.

对棒 2：$m_2g\sin30^0=BIL$，$I=\dfrac{BlV_1+BlV_2}{R}$

解得：$V_1=2m/s$　　$V_2=1m/s$

(3) 由系统动量守恒得：$m_1V_1=m_2V_2$ 即 $m_1x_1=m_2x_2$　　$x_2=0.4m$

设所求时间为 t,对棒 2 由动量定理得：$m_2g\sin30^0t-BIlt=m_2V_2$

$It=\dfrac{Bl(x_1+x_2)}{R}$　　解得：$t=0.6s$

(4) 由能量守恒得：Fx_1+：$m_2g\sin30^0x_2=m_1g\sin30^0x_1+\dfrac{1}{2}m_1V_1^2+\dfrac{1}{2}m_2V_2^2+Q$

$Q=0.9J$

【磁场分解问题】

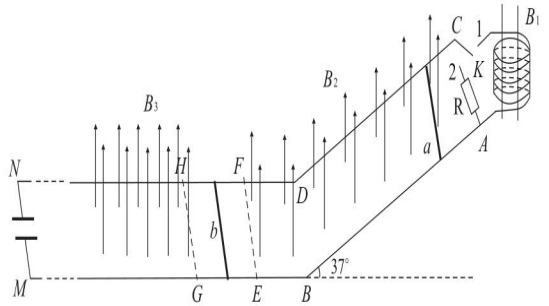
3. (10 分) 如图，两间距为 L=0.5m 的轨道平行放置，AB、CD 为倾角 θ=37° 的倾斜轨道，BM、DN 水平放置，除 EG、FH 为光滑绝缘外，其他均为电阻不计的光滑金属导轨，其中倾斜部分和 GM、HN 足够长，BE=DF=EG=FH=2m。MN 端接有 C=0.8F 的电容器，AC 端通过单刀双掷开关可以分别连接阻值 R=0.5Ω 的定值电阻或面积 S=0.2m^2、电阻也为 R 的 50 匝线圈，线圈中通有 B_1=(0.5+0.3t)T 随时间均匀变化的磁场，$ABEFDC$ 区域存在竖直向上磁感强度为 B_2 的匀强磁场，$GHMN$ 区域存在竖直向上磁感强度为 B_3=2B_2 的匀强磁场，现有两长度为 L、电阻为 R、质量为 m=0.2kg 的相同导体棒 a、b，导体棒 b 棒静止于 $EGHF$ 区域内，当开关 K 掷向 1 时，导体棒 a 刚好能静止在倾斜轨道上端靠近 AC 处，设导体棒运动过程中始终与光滑金属导轨良好接触，且导体棒经过各连接处时均没有动能损失，取 g=10m/s^2 (sin37°=0.6、cos37°=0.8)。求：

(1) 线圈中磁场 B_1 的方向及磁感应强度神 B_2 的大小；

(2) 撤去线圈中磁场 B_1，开关掷向 2 时，墙导体棒 a 从静止运动至 BD 处时的速度大小；

(3) 在 (2) 的情况下，导体棒 a 从 BD 至 EF 的过程中导体棒 a 上产生的焦耳热；

(4) 在 (2) 的情况下，若导体棒 a 与 b 发生完全非弹性碰撞，则最终电容器的带电量为多少。



【答案】(1) B_1 的磁场方向向上　　(1 分)

$E=n\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}S=3V$　　(1 分)

$I=\dfrac{E}{R+R}=3A$

$B_2IL\cdot\cos37°=mg\sin37°$

B_2=1T　　(1 分)

(2) $E=B_2Lv\cdot\cos37°$　　(1 分)

$B_2\dfrac{B_2Lv\cdot\cos37°}{R+R}L\cdot os37°=mg\sin37°$

V=7.5m/s　　(1 分)

(3) $-B_2\bar{I}L\cdot\Delta t=mv'-mv$

$\bar{I}\cdot\Delta t=\dfrac{B_2Lx}{R+R}$　　(1 分)

解得 $v'=5m/s$

$Q_a=\dfrac{1}{2}(\dfrac{1}{2}mv^2-\dfrac{1}{2}mv'^2)$　　(1 分)

得 $Q_a\approx1.56J$　　(1 分)

(2) $mv'=2mv_{共}$

$-B_3Lq=2mv_{末}-2mv_{共}$

$q=C\cdot B_3Lv_{末}$　　(任何一式给 1 分)

得 $q=\dfrac{2}{3}C$　　(1 分)

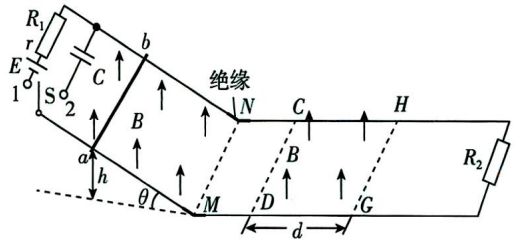
【变式】

如图 Z16-7 所示，间距 L=1 m 的两光滑金属导轨相互平行放置，水平导轨与倾斜导轨之间用绝缘材料平滑连接. 倾斜轨道的倾角 θ=37°，在倾斜轨道上端有一单刀双掷开关 S，可连接电动势 E=9 V、内阻 r=2 Ω 的电源或电容 $C=\dfrac{5}{64}$ F 的未充电的电容器. 在倾斜导轨区域和直导轨的 $CDGH$ 矩形区域存在着相同的磁场，方向竖直向上，在水平导轨的右端连接了 R_2=10 Ω 的定值电阻. 已知 R_1=10 Ω，D、G 间距离 d=3 m. 将开关 S 与 1 相连，一质量 m=0.1 kg 的金属导体棒 ab 恰好能静止在高 h=3.6 m 的倾斜导轨上. 不计导体棒在绝滑材料上运动过程中的能量损失，导体棒和导轨的电阻均不计，sin 37°=0.6，cos 37°=0.8，g 取 10 m/s^2.

(1) 求磁感应强度 B 的大小；

(2) 将开关 S 掷向 2 后，求 ab 棒滑到 MN 处时的速度大小 v；

(3) 在 ab 棒通过 $CDGH$ 磁场区域过程中，求 R_2 上产生的焦耳热.



【解析】(1) 导体棒恰好静止，由平衡条件得 $mg\tan\theta=BIL$

由闭合回路欧姆定律得 $I=\dfrac{E}{R_1+r}$

解得 B=1 T

(2) 将开关掷向 2 后，对 ab 棒，在下滑过程中任意时刻，由牛顿第二定律有 $mg\sin\theta-BI_tL\cos\theta=ma$

其中 $I_t=\dfrac{\Delta q}{\Delta t}=\dfrac{CBL\Delta v}{\Delta t}\cos\theta=CBLa\cos\theta$

联立解得 $a=\dfrac{mg\sin\theta}{m+CB^2L^2\cos^2\theta}=4$ m/s^2

所以 ab 棒匀加速下滑，滑到 MN 处时的速度 $v=\sqrt{2a\dfrac{h}{\sin\theta}}=4\sqrt{3}$ m/s

(3) 设 ab 棒出 GH 边界时的速度为 v_1，根据动量定理得

$-B\bar{I}L\Delta t=m(v_1-v)$

其中 $\bar{I}\Delta t=\frac{\bar{E}}{R_2}\Delta t=\frac{\Delta\Phi}{R_2}=\frac{BLd}{R_2}$

解得 $v_1=(4\sqrt{3}-3)$ m/s

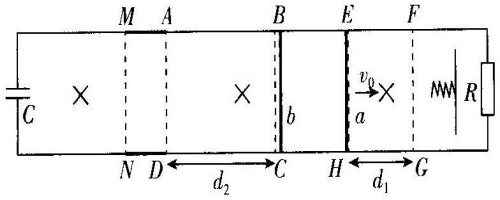
则 R_2 上产生的焦耳热 $Q=\frac{1}{2}mv^2-\frac{1}{2}mv_1^2=1.63$ J

4. 如图 16-5 所示，有两光滑平行金属导轨，导轨的间距 $l=1$ m，左侧接 $C=0.1$ F 的电容，右侧接 $R=6\ \Omega$ 的电阻，中间 MA、ND 段光滑绝缘，$ABCD$ 区域、$EFGH$ 区域、MN 左侧均存在垂直于导轨所在平面、磁感应强度 $B=1$ T 的匀强磁场，$EFGH$ 区域、$ABCD$ 区域的宽度分别为 $d_1=1.2$ m，$d_2=3.2$ m，FG 的右侧固定一轻质弹簧. 质量均为 $m=0.1$ kg 的金属杆 a、b，金属杆 a 以 $v_0=10$ m/s 的速度进入 $EFGH$ 区域磁场，金属杆 b 静止在 $ABCD$ 区域外侧，金属杆 a、b 的电阻分别为 $r_1=3\ \Omega$、$r_2=6\ \Omega$，金属杆 a、b 之间的碰撞均为弹性碰撞，MN 左侧磁场区域足够长，求：

(1)金属杆 a 刚进入磁场时，受到的安培力大小；

(2)全过程金属杆 a 上产生的焦耳热；

(3)电容器最终的带电荷量.



[解析] (1)电源电动势 $E=Blv_0=10$ V

电阻 R 与 b 并联，总电阻 $R_{总}=6\ \Omega$

$I=\frac{E}{R_{总}}$

$F_{安}=BIl=\frac{5}{3}$ N

(2)金属杆 a 通过 $EFGH$ 区域，有

$-\frac{B^2l^2\bar{v}}{R_{总}}\Delta t=m\Delta v$

又 $\bar{v}\Delta t=d_1$

解得 $\Delta v=-2$ m/s

由 $v_1-v_0=\Delta v$

解得 $v_1=8$ m/s

金属杆 a 通过与弹簧碰撞以大小为 $v_1=8$ m/s 的速度反弹，经过 $EFGH$ 区域速度再减掉 2 m/s，变成 $v_2=6$ m/s

金属杆 a、b 发生弹性碰撞，由动量守恒定律得 $mv_2=mv_a+mv_b$

由能量守恒定律得 $\frac{1}{2}mv_2^2=\frac{1}{2}mv_a^2+\frac{1}{2}mv_b^2$

解得金属杆 b 的速度为 $v_b=6$ m/s

金属杆 b 通过 $ABCD$ 区域，电路发生改变，$R'_{总}=8\ \Omega$

$-\frac{B^2l^2\bar{v}'}{R'_{总}}\Delta t=m\Delta v'$

又 $\bar{v}'\Delta t=d_2$

解得 $\Delta v'=-4$ m/s

由 $v'_b-v_b=\Delta v'$

解得 $v'_b=2$ m/s

金属杆 a 切割磁感线产生的总焦耳热 $Q_a=\frac{1}{2}mv_0^2-\frac{1}{2}mv_2^2=3.2$ J

金属杆 a 分配到 1.6 J

金属杆 b 切割磁感线产生的总焦耳热 $Q_b=\frac{1}{2}mv_b^2-\frac{1}{2}mv'^2_b=1.6$ J

金属杆 a 分配到 $Q_a=\frac{4}{15}$ J

全过程金属杆 a 总共产生了 1.87 J 的焦耳热

(3)金属杆 b 进入 MN 左侧磁场区域，当金属杆 b 两端电压和电容器两端电压相等时，匀速运动，此时速度设为 v，电容器上的电荷量和流过金属杆 b 的电荷量相等，设为 q，则

$-Bql=mv-mv'_b$

且 $\frac{q}{C}=Blv$

解得 $q=0.1$ C

题型二　恒流源问题

【题型探讨】恒流源指的是电路有恒定电流，只考虑导体棒或电阻只受安培力作用，不考虑反电动势问题。

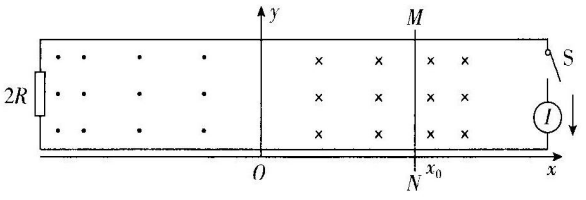
【解题思路】分段跟踪导体棒的运动模型，分段求解，可能涉及简谐振动的周期问题，利用简谐运动的对称性求解。

1.间距为 L 的两平行光滑金属导轨左侧接有阻值为 $2R$ 的电阻，如图 16-12 所示，x 轴平行于导轨，y 轴垂直于导轨. 在 y 轴位置有一厚度不计的绝缘层，隔开左、右两部分电路. 在导轨间存在的磁场相对于 y 轴对称，左、右两侧磁场方向相反，如图中所示，沿 y 轴方向磁感应强度大小不变，沿 x 轴方向磁感应强度大小随 x 变化，其中在 $x=x_0$ 处磁感应强度为 B_0. 导轨右侧的恒流源为电路提供恒定电流 I，开关 S 接通时，电流方向如图所示. 有一阻值为 R 的金属棒 MN 垂直于导轨静止在 $x=x_0$ 处，当开关接通时，发现其在 y 轴右侧的位置随时间变化规律为 $x=x_0\cos\omega t$，ω 为常数. 金属棒在 y 轴左侧导轨运动的最大距离为 $x_m(x_m<x_0)$，求：

(1)磁感应强度大小 B 与 x 的函数关系式；

(2)在开关 S 接通到金属棒运动至 y 轴左侧最远处的过程中流过金属棒的电荷量 q；

(3)在 y 轴左侧运动时金属棒产生的焦耳热 Q.



[解析] (1)金属棒做简谐运动，$F=-k|x|=-BIL$

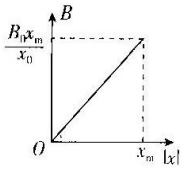
当 $x=x_0$ 时，$-kx_0=-B_0IL$

解得 $B=\dfrac{B_0}{x_0}|x|$

(2)从 $x=x_0$ 运动到 $x=0$ 的过程中，流过金属棒的电荷量 $q_1=It=I\cdot\dfrac{2\pi}{4\omega}=\dfrac{\pi I}{2\omega}$

从 $x=0$ 运动到左边最远处的过程中，流过金属棒的电荷量 $q_2=\dfrac{\Delta\Phi}{3R}$

其中左侧磁场的磁感应强度 $B=\dfrac{B_0}{x_0}|x|$，图像如图所示，

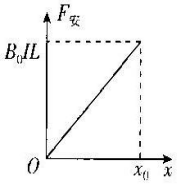


所以面积 $\Delta\Phi=\dfrac{1}{2}Lx_m\dfrac{B_0}{x_0}x_m$

可得 $q_2=\dfrac{\Delta\Phi}{3R}=\dfrac{B_0Lx_m^2}{6Rx_0}$

整个过程的电荷量为 $q=\dfrac{\pi I}{2\omega}+\dfrac{B_0Lx_m^2}{6Rx_0}$

(3)在 y 轴左侧运动时，金属棒具有的动能全部转化为回路的热量，$Q_{总}=\dfrac{1}{2}mv_0^2$



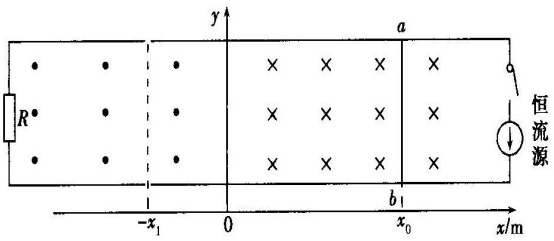
从 $x=x_0$ 运动到 $x=0$ 的过程中，由动能定理得 $W_安=\dfrac{1}{2}mv_0^2-0$，而 $F_安=BIL=IL\dfrac{B_0}{x_0}x$，可以理解为安培力与位移成正比，故利用图像法求出的面积就是 $W_安=\dfrac{B_0ILx_0}{2}$，则金属棒产生的焦耳热 $Q=\dfrac{Q_{总}}{3}=\dfrac{W_安}{3}=\dfrac{B_0IL}{6}x_0$

2.间距为 L 的两平行光滑金属导轨如图所示，x 轴平行于导轨，y 轴垂直于导轨。在 $x=-x_1$ 位置有一宽度可不计的绝缘薄层，隔开左右两部分电路。在导轨间存在磁场，y 轴左侧磁场方向垂直纸面向外，y 轴右侧磁场方向垂直纸面向里，$x<-x_1$ 区域磁场恒为 B_0，$-x_1\leqslant x\leqslant x_0$ 区域磁感应强度沿 y 轴方向大小不变，沿 x 轴方向磁感应强度大小随 x 变化，而且变化规律相同，在 $x=x_0$ 处磁感应强度大小为 B_0。导轨右侧的恒流源在开关 S 接通时为电路提供恒定的电流 I(方向如图中箭头所示)；导轨左侧接一阻值为 R 的电阻。有阻值为 R 的金属棒 ab 垂直导轨静止于 x_0 处，当开关 S 接通时发现其在 $x=-x_1$ 右侧的位移随时间的变化规律为 $x=x_0\cos\omega t$，其中 ω 为已知常数，且 $2|-x_1|=x_0$。求：

(1)金属棒 ab 的质量 m 为多少；

(2)金属棒 ab 从 $x=-x_1$ 运动至最左边的过程中流过金属棒 ab 的电荷量；

(3)金属棒 ab 从 $x=x_0$ 运动至最左边的过程金属棒 ab 产生的焦耳热 Q 为多少。



2.答案 (1)$\dfrac{B_0Il}{\omega^2x_0}$ (2)$\dfrac{\sqrt{3}I}{2\omega}$ (3)$\dfrac{2\pi I^2R}{3\omega}+\dfrac{3B_0Ilx_0}{16}$

解析 (1)对 $x=x_0\cos\omega t$ 求导有 $v=-\omega x_0\sin\omega t$

则二阶导数为 $a=-x_0\omega^2\cos\omega t$，当 $t=0$ 时则有

$B_0IL=ma_0=m\omega^2x_0$

变形可得 $m=\dfrac{B_0IL}{\omega^2x_0}$

(2)设金属棒位于 $x=-x_1$ 时，速度大小为 v_1，则 $-\dfrac{1}{2}x_0=x_0\cdot\cos\omega t_1$，

$\omega t_1=\dfrac{2}{3}\pi$，$v_1=|-\omega x_0\cdot\sin\omega t_1|$

所以过 $x=-x_1$ 时，速度大小 $v_1=\dfrac{\sqrt{3}}{2}\omega x_0$

金属棒从 $-x_1$ 到最左边的过程中，由动量定理可得

$-B_0\bar{I}Lt_2=0-mv_1$，$q_2=\bar{I}t_2$

解得 $q_2=\dfrac{\sqrt{3}I}{2\omega}$

(3)由 $x=x_0\to x=-x_1$ 过程中有 $Q_1=I^2R\cdot t_1=\dfrac{2\pi I^2R}{3\omega}$

从 $x=-x_1$ 到最左边过程有 $Q_2=\dfrac{1}{2}\cdot(\dfrac{1}{2}mv_1^2)=\dfrac{3B_0IlLx_0}{16}$

因此 $Q=Q_1+Q_2=\dfrac{2\pi I^2R}{3\omega}+\dfrac{3B_0Ilx_0}{16}$

题型三　电磁感应与简谐振动相结合问题

【题型探讨】导体棒在磁场中作简谐振动，求各物理量。

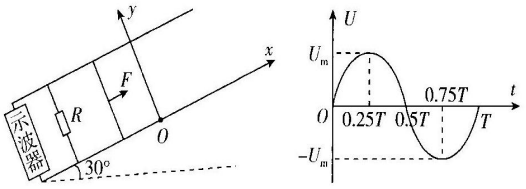
【解题思路】利用简谐振动的受力判断导体棒的运动，利用简谐振动的特点求解相关物理量。

1.如图所示，在倾角为 30°的斜面 xOy 内，固定放置着间距为 L 的两平行金属直导轨，其间连接有阻值为 R 的电阻，电阻两端连接示波器(内阻可视为无穷大)，可动态显示电阻 R 两端的电压。两导轨间存在大小为 B、方向垂直于导轨平面的匀强磁场。$t=0$ 时一质量为 m、长为 L 的导体棒在外力 F 作用下从 $x=x_0$ 位置开始做简谐运动，观察到示波器显示的电压随时间变化的波形是如图乙所示的正弦曲线。取 $x_0=-\dfrac{U_mT}{2\pi BL}$，则简谐运动的平衡位置在坐标原点 O。不计摩擦阻力和其他电阻，导体棒始终垂直于导轨运动，重力加速度为 g。求：

(1)导体棒在 $0.25T$ 时所受安培力 $F_安$ 的大小；

(2)在 $0.25T$ 至 $0.75T$ 时间内外力 F 的冲量 I；

(3)在 0 至 $0.5T$ 时间内，外力 F 所做的功 W。



甲　　乙

[解析] (1)由图乙显示的波形可得,0.25T 时棒中的电流 $I=\frac{U_m}{R}$

导体棒在 0.25T 时所受安培力 $F_A=BIL$,则 $F_A=\frac{BLU_m}{R}$

(2)设沿斜面向上为正方向,在 0.25T 至 0.75T 时间内,

安培力的冲量 $I_安=0$,$v_m=\frac{U_m}{BL}$

根据动量定理得 $I_F+I_安-mg\sin 30°\cdot 0.5T=-2mv_m$

解得 $I_F=\frac{mgT}{4}-\frac{2mU_m}{BL}$

(3)根据简谐运动对称性,$t=0.5T$ 时棒位于 $x=\frac{U_mT}{2\pi BL}$ 处,$v=0$

电压有效值 $U=\frac{\sqrt{2}}{2}U_m$,即 $Q=\frac{U^2}{R}\cdot 0.5T=\frac{U_m^2T}{4R}$

且 $Q=W_{克安}$

即 $W_F-mg\cdot 2|x_0|\sin 30°-W_{克安}=0-0$

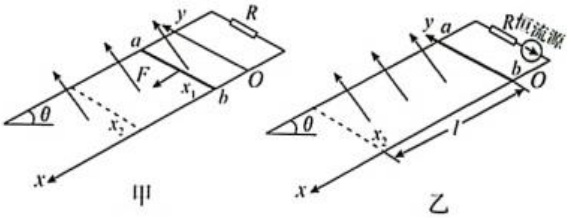
故 $W_F=\frac{U_m^2T}{4R}+\frac{mgU_mT}{2\pi BL}$

2. (10 分)如图所示,有两倾角 $\theta=30°$、间距 $d=0.1$ m 的足够长平行金属导轨,其间连有 $R=0.1\ \Omega$ 的电阻,在两导轨间存在垂直导轨平面向上的磁场。沿导轨向下建立坐标轴 xOy,磁感应强度沿 y 方向不变。质量 $m=0.1$ kg 的金属棒 ab 垂直导轨放置,在沿 x 轴方向的外力 F 作用下从 $x_1=0.2$ m 处沿导轨向下运动,其速度 v 与位置 x 满足 $v=\frac{0.5}{x}$。电阻 R 消耗的功率始终为 0.1 W,不计导轨、金属棒的电阻和摩擦阻力的大小。求:

(1)当 ab 运动到 $x_1=0.2$ m 处时的磁感应强度;

(2)在 ab 从 $x_1=0.2$ m 处运动到 $x_2=0.5$ m 处的过程中,外力 F 所做的功;

(3)撤去外力 F,保持磁场分布不变,加一恒流源,为电路提供恒定电流,电流方向如图乙所示。让金属棒从 $x=0$ 处静止释放,发现导体棒向下运动 $l=2.5$ m 后速度恰好为零。可以证明导体棒做简谐运动,且简谐运动的回复力随时间变化的规律为:$F=-m\frac{4\pi^2}{T^2}A\cos\frac{2\pi}{T}t$,其中 m 为做简谐运动的物体的质量,T 为振动周期,A 为振幅,求从 $t=0$ 到 $\frac{T}{4}$ 时间内安培力的冲量。



(1)由棒 ab 运动至 x_2 处时,根据电功率的计算公式 $P=I^2R$ 可得:$I=1$A (1 分)

$I=\frac{Bdv}{R}$

$v=\frac{0.5}{0.2}=2.5$m/s (1 分)

$B=0.4$T (1 分)

(2)根据动能定理可得:$W_F+W_G-W_A=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2$ (1 分)

其中:$W_G=mg\sin\theta(x_2-x_1)=0.15$J

安培力:$F_A=Bid=0.2x$

安培力做功为:$W_A=\frac{1}{2}\times 0.2\times(x_2^2-x_1^2)=0.021$J (1 分)

联立可得:$W_F=-0.3915$J (1 分)

(3)$t=0$ 时 $F=mg\sin\theta$

$mg\sin\theta=-m\frac{4\pi^2}{T^2}A\cos\frac{2\pi}{T}t$

可知 $A=1.25$m

得 $T=\pi$s (1 分)

从 $x=0$ 到 $x=l$ 的过程,由动能定理得:$mgl\sin\theta+W_A=0$

$F_A=BId=0.2Ix$

画出 F_A-x 图像如图所示:

分析可知 $t=0$ 到 $\frac{T}{4}$ 时间内,导体棒运动位移为 $\frac{l}{2}=1.25$m,

则安培力做功为 $-\frac{1}{4}mgl\sin\theta$,设 $\frac{T}{4}$ 时刻物体速度为 v,

由动能定理得:$\frac{1}{2}mgl\sin\theta-\frac{1}{4}mgl\sin\theta=\frac{1}{2}mv^2$

$v=2.5$m / s (1 分)

由动量定理 $mg\sin\theta\frac{T}{4}-IA=mv$ (1 分)

联立可得:$I_A=\frac{\pi-2}{8}$N·s (1 分)

3 (10 分)如图所示,倾角为 $\theta=53°$、间距 $L=1.0$ m 的足够长金属导轨 MN 和 $M'N'$ 的上端接有一个单刀双掷开关 K,当开关与 1 连接时,导轨与匝数 $n=100$ 匝、横截面积 $S=0.04$ m^2 的圆形金属线圈相连,线圈总电阻 $r=0.2\ \Omega$,整个线圈内存在垂直线圈平面的匀强磁场 B_0 且磁场随时间均匀变化.当开关与 2 连接时,导轨与一个阻值为 $R=0.3\ \Omega$ 的电阻相连.在导轨 MN 和 $M'N'$ 的平面内有垂直平面向下的匀强磁场,磁感应强度大小 $B_1=0.2$ T,倾斜导轨下端与水平的足够长平行金属导轨 NT 和 $N'T'$ 平滑对接,在水平导轨的 $PQQ'P'$ 矩形区域内有方向竖直向下的匀强磁场,磁感应强度大小 $B_2=0.5$ T,矩形区域的宽度 $d=0.5$ m.一根劲度系数 $k=2$ N/m 的轻质弹簧水平放置,右端固定在 W 点,左端与长度为 L、质量 $m_b=0.4$ kg 的绝缘杆 b 拴接(拴接点在杆 b 的中点),弹簧处于原长状态.现开关与 1 连接时,一根长度为 L、质量为 $m_a=0.1$ kg,阻值 $R_1=0.2\ \Omega$ 的金属杆恰好静止在倾斜

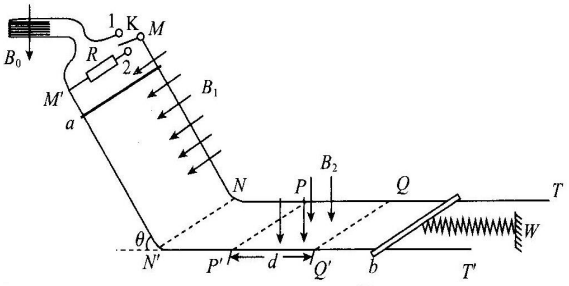
导轨上；某时刻把开关迅速拨到2，最后 a 杆能在倾斜轨道上匀速下滑，所有导轨均光滑且阻值不计，取 $\sin53^\circ=0.8$.

(1)求圆形线圈内磁场随时间的变化率 $\frac{\Delta B_0}{\Delta t}$；

(2) a 杆在穿越 $PQQ'P'$ 矩形区域过程中，求流过电阻 R 的电荷量和电阻 R 上产生的热量；

(3)若 a 杆与 b 杆发生碰撞后即刻粘在一起，且此后始终做简谐运动，请以两杆碰撞后第一次速度变为0时作为计时起点，向右为正方向，写出该简谐运动的振动方程.

已知弹簧振子振动周期公式为 $T=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$，其中 m 为振子质量，k 为弹簧的劲度系数.(提示：可以用 $F-x$ 图像下的"面积"代表力 F 做的功)



解：(1)由法拉第电磁感应定律有 $E=n\frac{\Delta B_0}{\Delta t}S$ (1分)

由受力平衡有 $m_a g\sin\theta=B_1 IL$ (1分)

$I=\frac{E}{r+R_1}$

解得 $\frac{\Delta B_0}{\Delta t}=0.4$ T/s (1分)

(2)流过电阻 R 的电荷量 $q=\bar{I}t$

$\bar{E}=\frac{B_2\Delta S}{\Delta t}=\frac{B_2 Ld}{\Delta t}$

$\bar{I}=\frac{\bar{E}}{R-R_1}$

解得 $q=0.5$ C (1分)

$m_a g\sin\theta=\frac{B_1^2L^2v_1}{R+R_1}$

解得 $v_1=10$ m/s

$-\sum B_2 IL\cdot\Delta t=m_a v_2-m_a v_1$

$\sum I\cdot\Delta t=q$

$v_2=7.5$ m/s (1分)

$Q=\frac{1}{2}m_a(v_1^2-v_2^2)$

$Q=2.1875$ J

$Q_R=\frac{R}{R+R_1}Q=1.3125$ J (1分)

(3) a 杆与 b 杆发生完全非弹性碰撞有

$m_a v_2=(m_a+m_b)v_{共}$

$v_{共}=1.5$ m/s

$E_k=\frac{1}{2}(m_a+m_b)v_{共}^2$ (1分)

$E_{弹}=\frac{1}{2}Fx=\frac{1}{2}kx^2$

$E_{弹}=E_k\quad x=0.75$ m

$A=x=0.75$ m (1分)

$T=2\pi\sqrt{\frac{m_a+m_b}{k}}=\pi$

$\omega=2$ rad/s (1分)

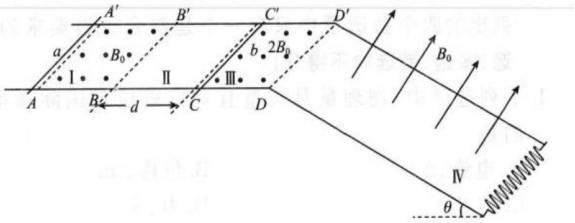
$x=A\cos\omega t=0.75\cos2t$ (m) 或 $x=A\sin(\omega t+\frac{\pi}{2})=0.75\sin(2t+\frac{\pi}{2})$ (m) (1分)

4 (10分)如图所示，在水平面内有两根间距为 l 的金属导轨平行放置，导轨末端通过一小段塑料接口与足够长的倾斜平行金属导轨平滑连接，倾斜导轨倾角为 θ. 在图示区域Ⅰ、Ⅲ和Ⅳ中，存在垂直于导轨面向上的匀强磁场，磁感应强度大小分别为 B_0、$2B_0$ 和 B_0；区域Ⅱ中导轨粗糙，宽度为 d. 其余导轨均光滑. 磁场边界 AA' 上放置金属棒 a，磁场边界 CC' 右侧附近静止放置金属棒 b，倾斜导轨足够远处连接有电感为 L 的电感线圈. 现让金属棒 a 以初速度 v_0 进入磁场，发现它最终刚好停在了 CC'(边界左侧)，而金属棒 b 恰能滑入倾斜轨道. 已知金属棒 a 与轨道粗糙部分的动摩擦因数为 μ，金属棒 a 的电阻为 R，其余电阻均不计，金属棒 a、b 的质量均为 m，重力加速度取 g，求：

(1)在金属棒 a 刚进入磁场瞬间，金属棒 b 的加速度；

(2)金属棒 a 在离开区域Ⅰ后产生的焦耳热 Q；

(3)金属棒 b 能沿倾斜导轨向下滑行的最大距离 x_m.(已知自感线圈的自感动势 $E_{自}=L\frac{\Delta I}{\Delta t}$)



解：(1)金属棒 a 进入磁场瞬间，产生的电动势和电流由法拉第电磁感应定律得 $E=B_0 lv_0$

由闭合电路的欧姆定律得 $I=\frac{E}{R}$

所以金属棒 b 受到的安培力 $F_{安}=2B_0 Il=\frac{2B_0^2l^2v_0}{R}$ (1分)

由牛顿第二定律得 $F_{安}=ma$ (1分)

解得 $a=\frac{2B_0^2l^2v_0}{mR}$ (1分)

(2)设金属棒 a 离开磁场Ⅰ区域时的速度为 v_1，此时金属棒 b 的速度为 v_2，金属棒 a 在区域Ⅱ中做匀减速运动，由运动学公式可得 $v_1^2=2\mu gd$

解得 $v_1=\sqrt{2\mu gd}$ (1分)

金属棒 a 穿越磁场区域Ⅰ的过程中，由动量定理可得

$-B_0\bar{I}lt=mv_1-mv_0$

又 $q=\bar{I}t$

联立解得 $q=\frac{m(v_0-\sqrt{2\mu gd})}{B_0 l}$

对金属棒 b，在该过程中，由动量定理可得

$2B_0\bar{I}lt=2B_0 lq=mv_2-0$

解得 $v_2=2(v_0-\sqrt{2\mu gd})$ (1分)

在之后过程中，由能量守恒定律可知，金属棒 b 此时的动能将全部转化成金属棒 a 中的焦耳热 Q，即

$Q=\frac{1}{2}mv_2^2$

解得 $Q=2m(v_0-\sqrt{2\mu gd})^2$ (1分)

(3)金属棒 b 恰能滑入倾斜轨道，则在倾斜轨道上从初速度为零开始下滑，因为 b 棒与线圈组成的回路，直流电阻为零，所以必须满足

$B_0 lv_i=L\frac{\Delta I}{\Delta t}$ (1分)

化简为 $\Delta I=\frac{B_0 l v_i \Delta t}{L}=\frac{B_0 l \Delta x}{L}$

所以 b 棒开始运动后棒上电流与 b 棒的位移成正比

即 $I=\frac{B_0 l x}{t}$ （1 分）

对 b 棒进行受力分析，由牛顿第二定律得

$mg\sin\theta-B_0\cdot\frac{B_0 l x}{L}\cdot l=ma$

可知金属棒 b 做简谐运动 （1 分）

平衡位置时，$a=0$，即 $x=\frac{mgL\sin\theta}{B_0^2 l^2}$

由简谐运动对称性可知，金属棒 b 下滑最大距离

$x_m=\frac{2mgL\sin\theta}{B_0^2 l^2}$ （1 分）

题型四　能量转化问题

【题型探讨】导体棒的运动通过轴转动获得。

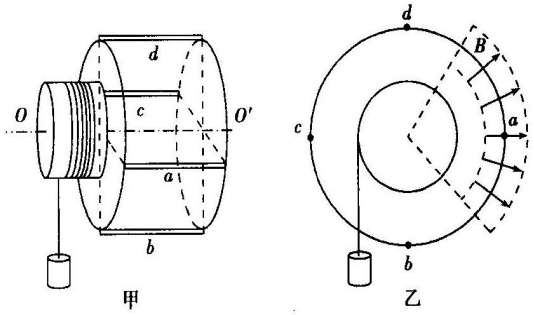
【题型解法】凡是涉及转动问题，优先考虑能量转化（守恒），当重物匀速下降时满足：mgv= $P_{电}$

1　(2020 浙江衢湖丽三地联考)如图,一轻质绝缘转轴由半径分别为 $2R$ 和 R 的两个圆柱体组成,其中大圆柱体的两底面边缘镶有圆形金属导线,两圆导线之间连接着 4 根电阻为 r,质量为 m,长度为 l 的细导体棒 a、b、c、d,导体棒在圆柱面上水平分布且间隔均匀。一足够长轻绳一端固定在小圆柱体上并紧密缠绕,另一端连接一质量为 $3m$ 的重锤。整个转轴可绕着水平轴线 OO' 自由转动,在大圆柱的$\frac{1}{4}$扇区内分布着垂直轴线 OO' 向外辐射的磁场,距离轴线 $2R$ 处的磁感应强度大小均为 B(如图乙所示),不计导线电阻和质量,以及一切摩擦。求:

(1)重锤下落至图乙时刻,导体棒 a 中的电流方向(从图乙看);

(2)重锤下落过程中能达到的最大速度 v_m;

(3)重锤达到最大速度时轻绳突然断裂,转轴还能转过的角度 θ(用弧度表示)。



(1) 由右手定则判断可得 a 棒中的感应电流方向为垂直纸面向里。(2 分)

(2) 当重锤下落速度最大时，为匀速下落状态，此时重力对重锤的功率等于导体棒克服安培力的功率，即：$3mgv_m=\bar{I}lBv$ (1 分)

又：$v_m=\omega R$ 及 $v=\omega\cdot 2R$ 知：$v=2v_m$ (1 分)

感应电流：$\bar{I}=\frac{B\bar{l}v}{r+\frac{r}{3}}=\frac{3B\bar{l}v}{4r}$ (1 分)

联立解得：$v_m=\frac{mgr}{B^2l^2}$ (1 分)

(3) 安培力的冲量等于 4 个导体棒切向动量的变化量：

$-\bar{I}lBt=0-4mv$ (1 分)

平均感应电流：$\bar{I}=\frac{B\bar{l}v}{r+\frac{r}{3}}=\frac{3B\bar{l}v}{4r}$ (1 分)　　弧长：$\bar{v}t=\theta\cdot 2R$ (1 分)

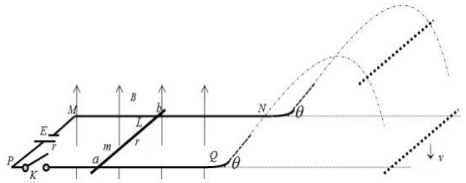
联立解得：$\theta=\frac{16gm^2r^2}{3RB^4l^4}$ (1 分)

2. (10 分) 某中学科技小组的学生在进行电磁发射装置的课题研究，模型简化如下。在水平地面上固定着相距为 L 的足够长粗糙导轨 PQ 及 MN，$PQNM$ 范围内存在可以调节的匀强磁场，方向竖直向上，如图所示，导轨左侧末端接有电动势为 E、内阻为 r 的电源，开关 K 控制电路通断。质量为 m、电阻同为 r 的导体棒 ab 垂直导轨方向静止置于上面，与导轨接触良好。电路中其余位置电阻均忽略不计。导轨右侧末端有一线度非常小的速度转向装置，能将导体棒水平向速度转为与地面成 θ 角且不改变速度大小。导体棒在导轨上运动时将受到恒定的阻力 f，导轨棒发射后，在空中会受到与速度方向相反、大小与速度大小成正比的阻力，$f_0=kv$，k 为比例常数。导体棒在运动过程中只平动，不转动。重力加速度为 g。调节磁场的磁感应强度，闭合开关 K，使导体棒获得最大的速度。(需考虑导体棒切割磁感线产生的反电动势)

(1) 求导体棒获得最大的速度 v_m；

(2) 导体棒从静止开始达到某一速度 v_1，滑过的距离为 x_0，导体棒 ab 发热量 Q，求电源提供的电能及通过电源的电量 q；

(3) 调节导体棒初始放置的位置，使其在到达 NQ 时恰好达到最大的速度，最后发现导体棒以 V 的速度竖直向下落到地面上。求导体棒自 NQ 运动到刚落地时这段过程的平均速度大小。



2. 解析（1）当棒达到最大速度时，棒受力平稳，即：

$f=F_{安}$ ----------1 分　　$F_{安}=BiL$ ----------1 分

$i=\frac{E-BLv}{2r}$ ----------1 分

综上可得：$v=\frac{-2fr}{L^2}\left(\frac{1}{B}\right)^2+\frac{E}{L}\left(\frac{1}{B}\right)$

$v_m=\frac{E^2}{8fr}$ ----------1 分

（2）根据能量守恒得：电热：2Q----------1 分

$W=\frac{1}{2}mv_1^2-0+fx_0+2Q$ ------1 分

得：$q=\frac{mv_1^2}{2E}+\frac{fx_0}{E}+\frac{2Q}{E}$ ---------1 分

（3）水平方向列动量定理

$-kv_x=m\frac{\Delta v_x}{\Delta t}\rightarrow -kv_x\Delta t=m\Delta v_x\rightarrow -k\Delta x=m\Delta v_x$ ----1 分

$\Delta x=\frac{m}{k}\frac{E^2}{8fr}\cos\theta$

竖直方向列动量定理：

$$-kv_y-mg=m\frac{\Delta v_y}{\Delta t}\rightarrow kv_y\Delta t-mg\Delta t=m\Delta v_y\rightarrow k\Delta y-mg\Delta t=m\Delta v_y$$ ----1 分

$$\Delta t=\frac{\frac{E^2}{8fr}\sin\theta+v}{g}$$ 得

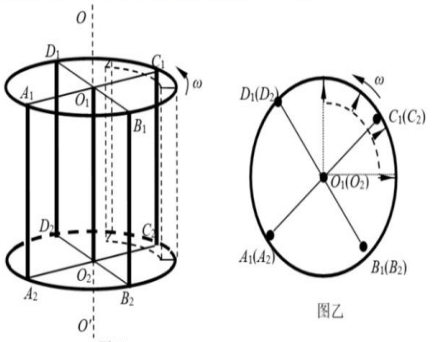
$$v_x=\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{mg}{k}\frac{E^2\cos\theta}{E^2\sin\theta+8frv}$$ ----------1 分

3.（10 分）如图甲所示为某发电机的简化示意图。金属杆 O_1O_2 固定在竖直轴 OO' 上，两相同的金属圆环水平固定，圆心分别与 O_1O_2 重合。金属杆 A_1A_2、B_1B_2、C_1C_2、D_1D_2 通过绝缘轻质杆 A_1C_1、A_2C_2、B_1D_1、B_2D_2 固连在一起，$B_1D_1\perp A_1C_1$，$B_2D_2\perp A_2C_2$，组成“十字形结构（俯视）”，可绕轴 OO' 无阻力自由转动（不能上下移动），转动时与两金属圆环接触紧密但无摩擦。在甲图的四分之一扇环形柱状区域内存在辐向磁场，四根金属杆分别转至该区域时杆所在位置的磁感应强度大小相等，均为 B，方向沿圆柱半径向外，其他区域的磁场忽略不计，俯视图如图乙所示。设 $A_1C_1=A_2C_2=B_1D_1=B_2D_2=A_1A_2=B_1B_2=C_1C_2=D_1D_2=L$，金属杆 A_1A_2、B_1B_2、C_1C_2、D_1D_2 的质量均为 m，电阻均为 r，其余部分的电阻不予考虑。现让“十字形结构”逆时针旋转，试解决下列问题：

（1）当 C_1C_2 杆刚进入磁场区域时，“十字形结构”的角速度为 ω，判断此时 A_1A_2 杆中的电流方向，计算 C_1、C_2 两点的电势差 U_{12}；

（2）若维持“十字形结构”以角速度 ω 匀速旋转，求每转一圈，C_1C_2 所产生的焦耳热 Q；

（3）若给予“十字形结构”初始角速度 ω_0，“十字形结构”到停下共转了多少圈。



图甲　　图乙

第 21 题图

21.（1）A_2 到 A_1 ----1 分　　$\varepsilon=BL\frac{L\omega}{2}$ ---1 分

$$U_{12}=-\frac{\varepsilon}{r+\frac{1}{3}r}\times\frac{1}{3}r=-\frac{B^2L^2\omega}{8}$$ ---1 分

（2）$P_1=(\frac{\varepsilon}{r+\frac{1}{3}r})^2\times r=\frac{9B^2L^4\omega^2}{64r}$ ---1 分　　$P_2=(\frac{\varepsilon}{r+\frac{1}{3}r}\times\frac{1}{3})^2\times r=\frac{B^2L^4\omega^2}{64r}$ ---1 分

$$Q=P_1\times\frac{2\pi}{\omega}\times\frac{1}{4}+P_2\times\frac{2\pi}{\omega}\times\frac{3}{4}=\frac{3\pi B^2L^4\omega}{32r}$$ ---2 分

（3）设共转了 k 圈，$\sum B\frac{BLv}{\frac{4}{3}r}L\Delta t=4m\times\omega_0\times\frac{L}{2}$ ---1 分　　$\sum v\Delta t=2\pi\times\frac{L}{2}\times k$ ---1 分

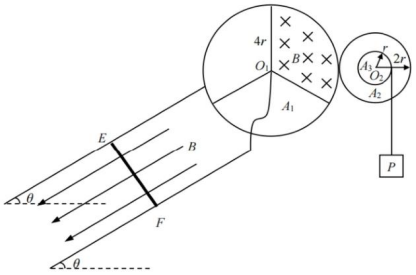
解得 $k=\frac{8mr\omega_0}{3\pi B^2L^2}$ ---1 分

4.（10 分）如图所示，金属轮 A_1 和绝缘轮 A_2，可绕各自中心金属轴 O_1 和 O_2 转动，O_1 和 O_2 平行且水平放置，A_1 金属轮由三根金属辐条和金属环组成，A_1 轮的辐条长为 $4r$、电阻为 R，连接辐条的金属环的电阻可以忽略，三根辐条互成 120°角，在图中 120°的扇形区域内存在平行于轴向里的匀强磁场，磁感应强度大小为 B。绝缘轮 A_2 半径的为 $2r$，另一半径为 r 的绝缘圆盘 A_3 与 A_2 同轴且固连在一起。一轻细绳的一端固定在 A_3 边缘上的某点，在 A_3 上绕足够匝数后，悬挂一质量为 m 的重物 P。当 P 下落时，通过细绳带动 A_3 和 A_2 绕 O_2 轴转动，转动过程中，A_1、A_2 保持接触，无相对滑动。A_1 轮的轴 O_1 和金属环通过导线与两平行的足够长的金属导轨连接，导轨倾角为 θ，其上放置一质量为 m、电阻为 R、长度为 L 的金属棒 EF，棒与轨道间的动摩擦因数为 μ，轨道间存在沿斜面向下的匀强磁场，磁感应强度大小也为 B，不计导线电阻。

（1）当 P 的速度为 v 时，求金属棒 EF 两端的电压；

（2）金属棒 EF 刚好开始运动计为 0 时刻，经过时间 t 重物 P 下落高度为 h，金属棒 EF 仍在轨道上运动，求此时金属棒 EF 的速度 u；

（3）为使金属棒 EF 不脱离轨道，轨道的倾角 θ 满足的条件。



（1）在 P 速度为 v 时，A_2 转动的角速度 $\omega_1=\frac{v}{r}$，

两盘接触点的线速度为 $v_2=\omega_1\cdot 2r=2v$

辐条的电动势 $E=\frac{1}{2}B\cdot 4rv_2=4Brv$ （1 分）

回路总电阻 $R_{总}=\frac{4}{3}R$ （1 分）

总电流 $I=\frac{E}{R_{总}}=\frac{3Brv}{R}$　　金属棒两端电压 $U=I\cdot\frac{R}{3}=Brv$ （1 分）

（2）对金属棒受力分析，由动量定理　$\Sigma[mg\sin\theta-\mu(mg\cos\theta-BI_{EF}L)]\Delta t=mu-0$（1 分）

$I_{EF}=\frac{Brv}{R}$　　代入可得 $(mg\sin\theta-\mu mg\cos\theta)t+\mu\frac{B^2rL\Sigma v\Delta t}{R}=mu$

其中 $\Sigma v\Delta t=h$　　代入可得　$u=(\sin\theta-\mu\cos\theta)gt+\mu\frac{B^2rLh}{mR}$ （2 分）

（3）当金属棒 C 与导轨的弹力为 0 时，金属棒刚好要离开导轨，设此时重物 P 下落的速度为 v_2。

此时有 $mg\cos\theta=F_{安}$　　$F_{安}=\frac{B^2rLv_2}{R}$

可得 $v_2=\frac{mgR\cos\theta}{B^2rL}$ （1 分）

若金属棒限制在导轨上运动，设重物 P 可能达到的最大速度为 v_m。

由功率关系，　$mgv_m=\frac{E_m^2}{\frac{4}{3}R}$ （1 分）

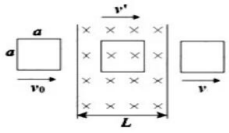
其中 $E_m=4Brv_m$　　代入得　$v_m=\frac{mgR}{12B^2r^2}$ （1 分）

要使得金属棒 C 不脱离轨道，需满足 $v_2>v_m$

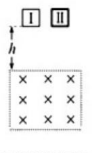
代入可得 $\cos\theta>\frac{L}{12r}$ （1 分）

题型五　线圈切割（进出）磁场问题（与动量相结合）

【题型探讨】线圈切割（进出）磁场的过程中会产生感应电动势和感应电流，克服安培力做功使机械能转化为电能。



可以证明：进出磁场过程安培力的冲量相同，并且 $v'=\frac{v+v_0}{2}$



可以证明，线圈刚进磁场时的加速度为：

$a=g-\frac{B^2\sqrt{2gh}}{16\rho\rho'}$（其中 ρ 为密度，ρ' 为电阻率，与线圈的粗细无关）

它们同时落地，落地速度也相同

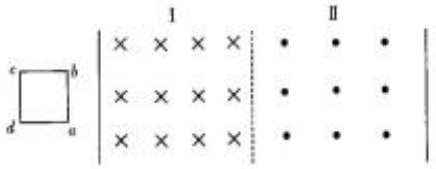
【解题思路】切割磁感线的部分导体充当电源，注意有几条边在切割磁感线，会产生几个安培力问题。进出磁场过程，可利用动量定理求速度，时间问题。

1.如图所示，水平面上有一个质量为 m，边长为 L，电阻为 R 的正方形金属框 $abcd$. 金属框 ab 边与磁场边缘平行，以初速度 v_0 垂直磁场边缘进入矩形匀强磁场区域Ⅰ，磁场区域Ⅰ的水平面光滑，金属框进入磁场区域Ⅰ过程中，金属框的速度 v 与金属框 ab 边进入磁场的位移 x 的关系是 $v=v_0-kx(x<L,k$ 已知$)$. 当金属框 ab 边刚进入磁场区域Ⅱ时，线框就受到恒定的摩擦力，动摩擦因数为 μ，金属框 cd 边离开磁场区域Ⅱ时恰好静止. 磁场区域Ⅰ的磁场方向垂直水平面向下，磁场区域Ⅱ的磁场方向垂直水平面向上，两磁场区域的磁感应强度大小相等，两磁场区域的宽度均为 $d(d>L)$. 求：

(1)磁场区域Ⅰ的磁感应强度 B；

(2)从金属框 ab 边刚进入磁场区域Ⅱ到金属框 cd 边离开磁场区域Ⅱ的时间 t；

(3)从金属框 ab 边刚进入磁场区域Ⅰ到金属框 cd 边离开磁场区域Ⅱ的过程中克服安培力所做的功.



解：(1)由楞次定律可知，金属框进入磁场区域Ⅰ过程中，感应电流方向从 $a\to b$，根据左手定则可知，ab 边受磁场力方向向左

由动量定理得 $-F_A t=mv-mv_0$ (1 分)

$E=BLv\quad I=\dfrac{E}{R}\quad F_A=BIL$

所以 $-\dfrac{B^2L^2\bar{v}}{R}t=mv-mv_0$ (1 分)

由 $x=\bar{v}t$

有 $\dfrac{B^2L^2x}{R}=mv_0-mv$ (1 分)

又 $v=v_0-kx$

所以 $B=\sqrt{\dfrac{kmR}{L^2}}$ (1 分)

(2)线框经过两磁场边界时，感应电动势为第一过程的二倍，同时两条边受力，故此过程安培力的冲量为初过程的四倍，

故总过程安培力的冲量为 $-\dfrac{6B^2L^3}{R}$ (1 分)

由动量守恒定律有

$-\mu mgt-\dfrac{6B^2L^3}{R}=0-mv_0$ (2 分)

$t=\dfrac{v_0}{\mu g}-\dfrac{6B^2L^3}{\mu mgR}=\dfrac{v_0-6kL}{\mu g}$ (1 分)

(3)由动能定理可得

$-W-\mu mg(L+d)=0-\dfrac{1}{2}mv_0^2$

解得 $W=\dfrac{1}{2}mv_0^2-\mu mg(L+d)$ (2 分)

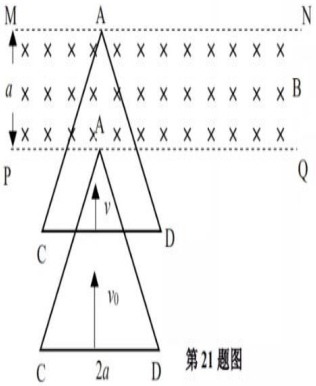
2.（10 分）如图所示，空间存在竖直向下的有界磁场，磁感应强度 B=0.5T，边界 MN、PQ 之间的距离 a=3m，一闭合的电阻均匀分布正三角形导线框置于光滑的水平面上，其边长为 $2a$，电阻 R=1Ω，质量 m=0.5kg，初始状态正三角形导线框的顶点 A 与磁场的下边界 PQ 重合，CD 边平行 PQ，导线框以 v_0=10m/s 的初速度沿垂直于 CD 边运动。当线框的顶点 A 到达磁场边界 MN 时，其速度大小减为 v_1=4m/s。不计导线框中产生的感应电流对原磁场的影响。求：

(1) 线框的顶点 A 刚到达磁场边界 MN 时，CD 两点间的电势差 U_{CD}。

(2) 从开始到线框的顶点 A 刚到达磁场边界 MN 的过程中，CD 边产生的焦耳热 Q。

(3) 线框的顶点 A 刚到达磁场边界 MN 后，继续减速，当速度减为 0 时，A 点距离磁场边界 MN 的距离 l。

(4) 若导线框以 20m/s 的初速度沿垂直于 AD 边方向进入磁场，导线框的 A 点到达磁场边界 MN 的速度大小。



第 21 题图

(1) 线框的顶点 A 刚到达磁场边界 MN 时，切割速度为 v_1=4m/s，

电动势 $E=B\dfrac{2\sqrt{3}}{3}a\,v_1=4\sqrt{3}$V　　1 分

电流 $I=\dfrac{E}{R}=4\sqrt{3}$A，方向 C 指向 D。

CD 电势差 $U=IR_{CD}=I\cdot\dfrac{R}{3}=\dfrac{4\sqrt{3}}{3}$V　　1 分

(2) 根据能量守恒可得：

$Q_{总}=\dfrac{1}{2}mv_0^2-\dfrac{1}{2}mv_1^2=21$J　　1 分

$Q=\dfrac{R_{CD}}{R}Q_{总}=7$J　　1 分

(3) 由几何关系易得：A 点过 MN 后，CD 未进入磁场前，

安培力冲量为：$\overline{F_{安}}t=\bar{I}\dfrac{2\sqrt{3}}{3}aB\cdot t=\dfrac{B^2(\frac{2\sqrt{3}}{3}a)^2}{R}l$　　2 分

动量定理：　$-\overline{F_{安}}t=0-mv_1$　　1 分

$l=\dfrac{2}{3}m$

$l<2a-\dfrac{2\sqrt{3}}{3}a$　则 CD 还未进入磁场，符合要求　　1 分

(4) 垂直 AD 方向的速度可分解为垂直 CD 的分速度和平行于 CD 的分速度。其中只有垂直与 CD 的分速度在切割磁感线，产生安培力。所以沿着平行 CD 方向的速度不变，垂直于 CD 方向的初速度分量为 10m/s，所以 A 到达磁场边界 MN 时，其速度大小也减为 4m/s

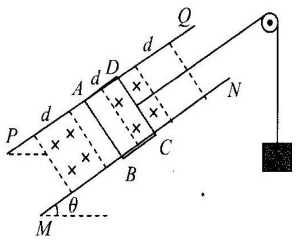
所以 $v=\sqrt{4^2+(10\sqrt{3})^2}=2\sqrt{79}$ m/s　2 分

3.(10分)如图所示,在倾角为$\theta=30°$的斜面上铺有两平行光滑绝缘轨道PQ和MN,轨道间距离为$L=1.0$ m,轨道间各矩形区间隔存在垂直斜面向下的匀强磁场,磁感应强度均为$B=1.0$ T.各矩形区的宽度均为$d=0.20$ m.有一长为L、宽度也为$d=0.20$ m的单匝矩形线框$ABCD$跨放在两轨道上,一端挂重物的细线跨过定滑轮系在CD中点并保持与斜面平行,轨道及磁场区域足够长(不考虑碰到滑轮及地面,线框不脱离轨道),其中线圈质量$m_1=1.8$ kg,重物质量$m_2=1.2$ kg,线圈总电阻$R=2.0\ \Omega$,不计滑轮摩擦阻力.

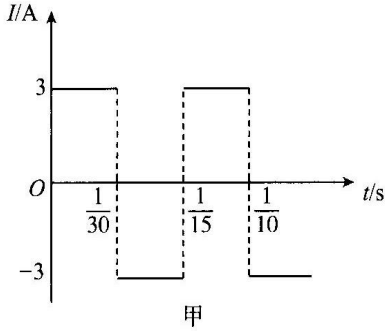
(1)画出最终稳定状态时线框中电流随时间变化的关系图(从线框CD边刚进入某磁场区域开始计时,电流以$ABCDA$方向为正);

(2)静止释放重物,当重物速度$v_1=3.0$ m/s时,求线框的加速度a;

(3)若整个磁场区以$v_2=8.0$ m/s的速度沿斜面向下移动,重物由静止释放,求最终稳定状态下的外界提供的功率P、安培力对线框做功的功率P_A、线框的热功率P_Q.



解:(1)如图甲所示 (2分.图形正确1分,全部正确2分)



甲

(2)设细线拉力为F_T,对线框有

$F_T-m_1g\sin\theta-BIL=m_1a$ (1分)

对重物有$m_2g-F_T=m_2a$ (1分)

其中$I=\dfrac{BLv}{R}$

联立可得$a=0.5$ m/s^2 (1分)

(3)设稳定后线框速度为v,则感应电动势为$\varepsilon=BL(v_2-v)$

对线框有$m_1g\sin\theta+BI'L=m_2g$ (1分)

$I'=\dfrac{BL(v_2-v)}{R}$

联立可得$v=2$ m/s (1分)

外界提供的功率$P=F_{安}\cdot v_2=3\times8$ W$=24$ W (1分)

安培力对线框做功的功率$P_A=F_{安}\cdot v=6$ W (1分)

线框的热功率$P_Q=I'^2R=3^2\times2$ W$=18$ W (1分)

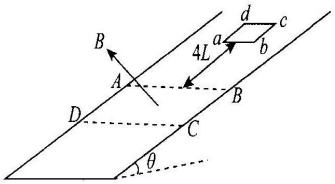
4.(10分)如图,在光滑的足够大的绝缘斜面上有一长方形区域$ABCD$,此区域内存在着方向垂直斜面向上的匀强磁场.一质量为m、边长为L、电阻为R的正方形导线框$abcd$放在斜面上,ab边与AB间距为$4L$,从图示位置由静止释放,线框刚进入磁场时开始做匀速运动.已知重力加速度大小为g,斜面倾角$\theta=30°$,$AD>L$.

(1)求磁场的磁感应强度大小B.

(2)若线框$abcd$在斜面上从ab边(ab在下、cd在上)与AB间的距离为$16L$处从静止释放,cd边经过AB和CD时的速度大小均为v,求:

①线框经过AB所用的时间t;

②线框穿过磁场的过程中产生的总焦耳热Q以及AB与CD间的距离x.



解:(1)设线框进入磁场时的速度大小为v_1,根据机械能守恒定律有

$\dfrac{1}{2}mv_1^2=mg\cdot4L\sin\theta$ (1分)

线框刚进入磁场时做匀速运动,受力平衡,则

$mg\sin\theta=BI_1L$

而$I_1=\dfrac{BLv_1}{R}$ (1分)

解得$B=\sqrt{\dfrac{mgR}{4L^2\sqrt{gL}}}$ (1分)

(2)①设线框刚进入磁场时的速度大小为v_2,进入磁场前,根据牛顿第二定律有

$mg\sin\theta=ma$

$v_2^2=2a\cdot16L$ (1分)

线框进入磁场的过程中,根据动量定理有

$mg\sin\theta\cdot t-B\bar{I}Lt=mv-mv_2$ (1分)

根据法拉第电磁感应定律有$\bar{E}=\dfrac{BL^2}{t}$

根据闭合电路欧姆定律有$\bar{I}=\dfrac{\bar{E}}{R}$

解得$t=\dfrac{2v}{g}-\dfrac{15}{2}\sqrt{\dfrac{L}{g}}$ (1分)

②由题意知,线框穿入磁场与穿出磁场过程中产生的焦耳热相等

根据能量守恒定律有$Q=2\left(mg\sin\theta\cdot17L-\dfrac{1}{2}mv^2\right)$ (1分)

解得$Q=17mgL-mv^2$ (1分)

由题意知,ab边经过CD时与经过AB时的速度相等,即为

$v_2=4\sqrt{gL}$ (1分)

整个线框均在磁场中时做匀加速直线运动,则

$v_2^2-v^2=2a(x-L)$

解得$x=17L-\dfrac{v^2}{g}$ (1分)

题型六　多磁场或分段磁场问题

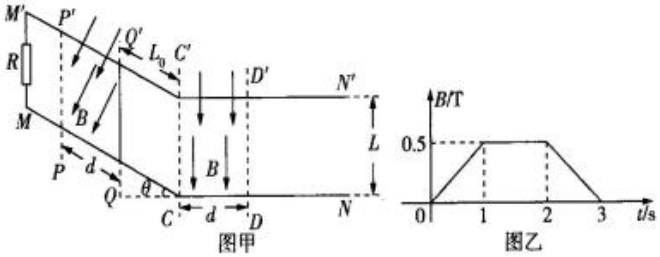
【题型探讨】导体棒或线圈依次通过多个磁场，运动情况在各磁场中可能相同或不同。

【解题思路】分析导体棒或线圈在各不同磁场的受力和运动，注意各不同磁场的作用

1.(10分)如图甲为某小组研究电磁感应的实验装置示意图，金属导轨 MCN 与 $M'C'N'$ 平行等间距固定放置，间距为 $L=2$ m，CN 与 $C'N'$ 导轨处于水平位置，斜面导轨与水平面的夹角 $\theta=37°$，在 MM' 间接电阻 $R=6\ \Omega$。只在 $PQQ'P'$ 与 $CDD'C'$ 的长方形区域内存在均匀的按同样规律变化的磁场，磁场方向各自与导轨所在平面垂直且向下，磁感应强度大小 B 按图乙所示规律变化，$PQ=CD=d=1.8$ m。有一质量为 $m=0.2$ kg、电阻 $r=3\ \Omega$、长也为 $L=2$ m 的导体棒在 $t=0$ 时刻从 QQ' 处由静止释放，释放处离斜面底端距离 $L_0=2$ m。导体棒经过斜面导轨底端 CC' 进入磁场区域 $CDD'C'$（设导体棒经过 CC' 处无能量损失），通过 $CDD'C'$ 磁场区域，最后停在 DD' 右侧离 DD' 为 $x=0.2$ m 处的导轨上。导体棒与导轨间的动摩擦因数均为 $\mu=0.25$。在运动过程中，导体棒始终与导轨垂直且接触良好，不计导轨电阻，$\sin 37°=0.6$，$\cos 37°=0.8$，$g=10\ \text{m/s}^2$。求：

(1)导体棒经过 $CDD'C'$ 磁场区域所用的时间 Δt；

(2)整个过程电路中产生的焦耳热 Q。



图甲　　图乙

【解题思路】(1)导体棒在斜面上，由牛顿第二定律有

$mg\sin\theta-\mu mg\cos\theta=ma_1$

由运动学知识有 $L_0=\frac{1}{2}a_1t_1^2$

导体棒到达 CC' 处的速度 $v_1=a_1t_1$

解得 $v_1=4$ m/s(1分)　$t_1=1$ s(1分)

此时磁感应强度大小 B 刚好不发生变化，此时 $B_1=0.5$ T

导体棒在 DD' 处时的速度 $v_2=\sqrt{2\mu gx}=1$ m/s(1分)

假设导体棒经过 $CDD'C'$ 区域的过程中磁感应强度未改变，则 Δt 应小于 1 s，由动量定理有

$-\mu mg\cdot\Delta t-\bar{F}_A\cdot\Delta t=mv_2-mv_1$(1分)

即 $\mu mg\cdot\Delta t+\frac{B^2L^2d}{R+r}=mv_1-mv_2$

解得 $\Delta t=0.8\ \text{s}<1\ \text{s}$(1分)

假设成立，则导体棒经过 $CDD'C'$ 磁场区域的时间 Δt 为 0.8 s

(2)导体棒在斜面上运动的过程

$E_1=\frac{\Delta\Phi_1}{\Delta t_1}=Ld\frac{\Delta B}{\Delta t_1}$，$I_1=\frac{E_1}{R+r}=0.2$ A(1分)

$Q_1=I_1^2(R+r)\cdot\Delta t_1=0.36$ J(1分)

导体棒经过 $CDD'C'$ 区域的过程，由动能定理有

$\mu mgd+W_安=\frac{1}{2}mv_1^2-\frac{1}{2}mv_2^2$

$W_安=Q_2$

解得 $Q_2=0.6$ J(1分)

导体棒出 $CDD'C'$ 磁场区域后，$E_2=\frac{\Delta\Phi_2}{\Delta t_2}=2Ld\frac{\Delta B}{\Delta t_2}=2E_1$，$\Delta t_1=\Delta t_2$

故 $Q_3=4Q_1$(1分)

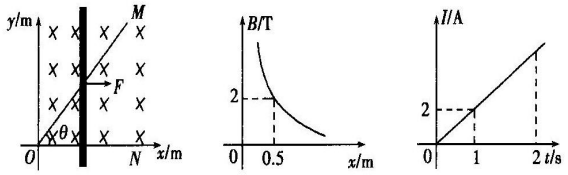
则电路中产生的焦耳热 $Q=Q_1+Q_2+Q_3=2.4$ J(1分)

题型七　变化磁场和变化导轨问题

【题型探讨】磁场本身在变化或导轨不规则，因磁场或导轨的变化而产生的电磁感应问题。

【解题思路】该题型要紧扣磁场的变化规律和不变量来寻求突破口进行解答。

1如图甲所示，水平面内的直角坐标系的第一象限有磁场分布，方向垂直于水平面向下，磁感应强度沿 y 轴方向没有变化，沿 x 轴方向 B 与 x 成反比，如图乙所示。顶角 $\theta=45°$ 的光滑金属长导轨 MON 固定在水平面内，ON 与 x 轴重合，一根与 ON 垂直的长导体棒在水平向右的外力作用下沿导轨向右滑动，导体棒在滑动过程中始终与导轨接触。已知 $t=0$ 时，导体棒位于顶点 O 处，导体棒的质量为 $m=1$ kg，回路接触点总电阻恒为 $R=0.5\ \Omega$，其余电阻不计。回路电流 I 与时间 t 的关系如图丙所示，图线是过原点的直线。求：



甲　　乙　　丙

(1)$t=2$ s 时回路的电动势 E；

(2)0~2 s 时间内流过回路的电荷量 q 和导体棒的位移大小 s；

(3)导体棒滑动过程中水平外力 F 的瞬时功率 P(单位：W)与横坐标 x(单位：m)的关系式。

解析　(1)根据 I-t 图像可知：$I=k_1t$($k_1=2$ A/s)

当 $t=2$ s 时，回路中电流 $I_1=4$ A

根据欧姆定律：$E=I_1R=2$ V

(2)流过回路的电荷量 $q=\bar{I}t$

$\bar{I}=\frac{I}{2}$，解得：$q=\frac{k_1t^2}{2}$

当 $t=2$ s 时，$q=4$ C

由欧姆定律得 $I=\frac{Blv}{R}$，$l=x\tan 45°$

根据 B-x 图像可知 $B=\frac{k_2}{x}$($k_2=1$ T·m)，解得 $v=\frac{k_1R}{k_2}t$

由于 $\frac{k_1R}{k_2}=1\ \text{m/s}^2$，再根据 $v=v_0+at$，可得 $a=1\ \text{m/s}^2$

可知导体棒做匀加速直线运动，则 0~2 s 时间内导体棒的位移 $s=\frac{1}{2}at^2=2$ m

(3)棒受到的安培力 $F_安=BIl$

根据牛顿第二定律：$F-F_{安}=ma$

根据 $v^2=2ax$，$P=Fv$

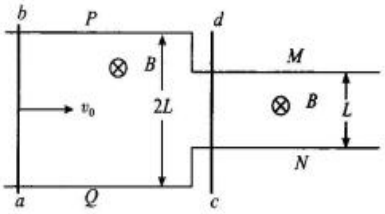
解得：$P=(\frac{k_2^2\sqrt{2ax}}{R}+ma)\sqrt{2ax}=4x+\sqrt{2x}$（W）

2. 如图所示，间距为 $2L$ 和 L 的两组足够长平行光滑导轨 P、Q 和 M、N 用导线连接，位于大小为 B、方向垂直纸面向里的匀强磁场中，质量为 m、单位长度电阻为 r_0 的两相同导体棒 ab 和 cd 垂直于导轨分别置于导轨 P、Q 和 M、N 上. 现棒 ab 以初速度 v_0 向右运动，不计导轨及连线电阻，导轨足够长.

(1)当导体棒 ab 刚开始运动时，求导体棒 ab 和 cd 运动的加速度；

(2)当两导体棒速度达到稳定时，求导体棒 ab 的速度；

(3)当两导体棒速度刚达到稳定时，棒 ab 和 cd 的位移分别为 s_1 和 s_2，求 s_1 和 s_2 之间的关系.



解：(1)ab 刚开始运动时产生电动势

$E=2BLv_0$ （1 分）

ab 棒的加速度

$a_{ab}=-\frac{4B^2Lv_0}{3r_0m}$ （1 分）

cd 棒的加速度

$a_{cd}=\frac{2B^2Lv_0}{3r_0m}$ （1 分）

(2)由动量定律，对导体棒 ab，有 $-2BL\bar{I}\Delta t=mv_1-mv_0$

即 $-2BL\Delta q=mv_1-mv_0$ （1 分）

对导体棒 cd，有 $B\bar{I}L\Delta t=mv_2$

即 $BL\Delta q=mv_2$ （1 分）

稳定时，有

$v_2=2v_1$ （1 分）

联立解得

$v_1=\frac{1}{5}v_0$ （1 分）

(3)流过 cd 电荷量 $\Delta q=\frac{2m}{5BL}v_0$ （1 分）

由电磁感应定律，得

$\Delta q=\frac{2BLs_1-BLs_2}{3r_0L}$ （1 分）

联立解得

$2s_1-s_2=\frac{6mv_0r_0}{5B^2L}$ （1 分）

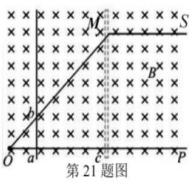
3. （10 分）如图所示，水平面内固定有一光滑且电阻不计的金属导轨 OP 和 OMS，$\angle POM=45°$，MS 平行于 OP，两导轨在 O 点用阻值 $R=2\,\Omega$ 连接，电阻不计的长导体棒垂直 OP 放置在导轨上，初始时与导轨交点分别为 a、b，ab 间导轨长度 $l_1=1$m，导体棒质量 $m=2$ kg。空间存在垂直于导轨平面向下的匀强磁场，磁感应强度 $B=0.5$T。给导体棒一向右初速度 $v_0=5$m/s，同时给导体棒施加一水平方向的外力 F，使导体棒运动过程中通过电阻 R 的电流不变，导体棒向右运动到与导轨交点为 Mc 位置，已知 $ac=4$m，求：

(1)此时导体棒的速度 v 大小；

(2)导体棒运动至 Mc 处所用时间 t；

(3)外力 F 所做的功 W；

(4)导体棒在 Mc 位置时，撤去外力 F，导体棒还能运动多远。



第 21 题图

21.（1）设在 cM 间导轨长度 l_2

$l_2=l_1+ac*\tan\theta=5$m

$E=B*l_1*v_0=2.5$V（1 分）

电流不变，电动势不变（1 分）

则 $v=1$m/s（1 分）

（2）电动势不变，从 ac 到 Mc 位置，

$E=\frac{\Delta\Phi}{t}=B\frac{\Delta S}{t}=B\frac{(l_1+l_2)\cdot ac}{2\cdot t}$（1 分）

则 $t=2.4$s（1 分）

（3）

$I=E/R=1.25$A

$Q=I^2Rt=7.5$J（1 分）

由能量守恒

$\frac{1}{2}mv^2-\frac{1}{2}mv_0^2=W-Q$（1 分）

则 $W=-16.5$J（1 分）

（4）Mc 位置后导轨长度 l_2 不变，速度减小，

由动量定理

$0-mv=-BL_2\bar{I}*\Delta t=-\frac{B^2L_2^2\bar{v}\Delta t}{R}=-\frac{B^2L_2^2x}{R}$（1 分）

则 $x=0.64$m（1 分）

题型八　电磁感应与现代科技应用相结合问题

【题型探讨】电磁感应现象在现代科技中的综合应用，如电磁驱动，磁悬浮列车，潮汐发电问题等。

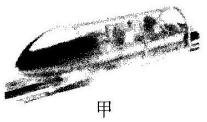
【解题思路】此类题型，模型转化是关键，同时要注意相对运动问题（此类问题往往是磁场运动引起线圈运动）。

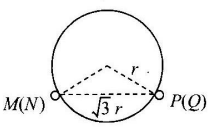
1.（10 分）如图甲的超级高铁是一种依托真空管道的未来交通工具，它具有超高速、低能耗、无噪声、零污染等特点. 已知管道中固定着两根平行金属导轨 MN、PQ，两导轨间距为 $\sqrt{3}r$，如图乙. 实验车的质量为 m，其横截面是半径为 r 的圆. 车上固定着间距为 $D=\sqrt{3}r$、与导轨垂直的两根导体棒 1 和 2，每根导体棒的电阻为 R，已知导轨的电阻率和粗细和导体棒一样，其他电阻忽略不计. 已知 $\sin37°=0.6$，$\cos37°=0.8$.

(1)当管道中的导轨平面与水平面成 $\theta=37°$ 时，如图丙，实验车恰好能无动力地匀速下滑，求车与导轨间的动摩擦因数 μ；

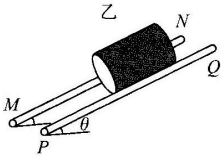
(2)接着在水平导轨上进行实验，当实验车由静止出站时，在导体棒 2 后间距为 D 处接通固定在导轨上电动势为 E 的理想电源，此时导体棒 1、2 均处于磁感应强度为 B，垂直导轨向下的匀强磁场中，如图丁. 求刚接通电源时车的加速度的大小；(不考虑摩擦及空气阻力)

(3)继续在水平导轨上进行实验，当实验车进站时，管道内依次分布磁感应强度为 B，宽度为 D 的匀强磁场，且相邻的匀强磁场的方向相反. 求车以速度 v_0 从图戊通过距离 $2D$ 后的速度 v.

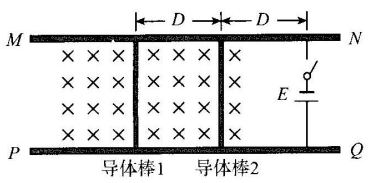

甲



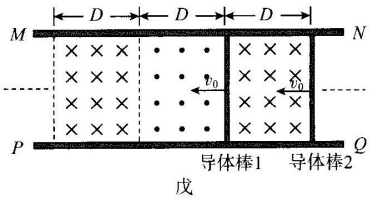
乙



丙



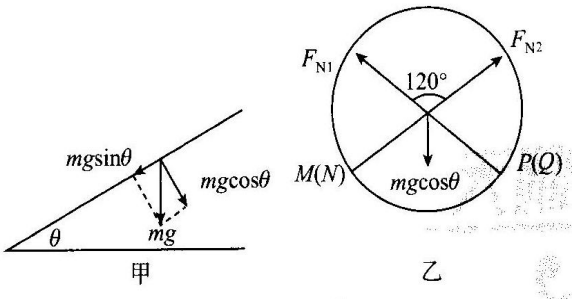
丁



戊

解：(1)将车的重力分解，如图甲所示

设轨道对车的支持力为 F_{N1}、F_{N2}，如图乙所示



甲　　乙

$F_{N1}=mg\cos\theta$，$F_{N2}=mg\cos\theta$　(1 分)

又 $f_1=\mu F_{N1}$，$f_2=\mu F_{N2}$

车匀速运动时有 $mg\sin\theta=f_1+f_2$　(1 分)

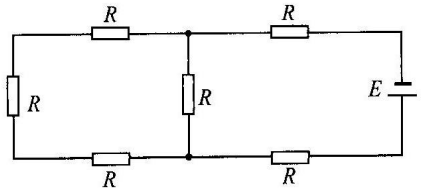
解得 $\mu=\frac{3}{8}$　(1 分)

(2)刚接通电源时，电路图如图丙所示

则 $R_{总}=\frac{11R}{4}$　(1 分)

由闭合电路的欧姆定律 $I=\frac{E}{R_{总}}$

又 $I_1=\frac{I}{4}$，$I_2=\frac{3I}{4}$



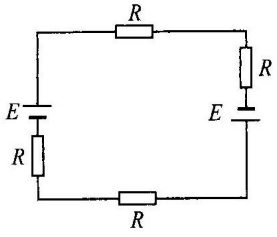
丙

导体棒所受的安培力 $F_1=BI_1\cdot\sqrt{3}r$，$F_2=BI_2\cdot\sqrt{3}r$　(1 分)

车的加速度 $a=\frac{F_1+F_2}{m}$

解得 $a=\frac{4\sqrt{3}BrE}{11mR}$　(1 分)

(3)车进站时，电路如图丁所示



丁

当车速为 v 时，由法拉第电磁感应定律

$E_1=B\cdot\sqrt{3}rv$，$E_2=B\cdot\sqrt{3}rv$

由闭合电路的欧姆定律 $I=\frac{E_1+E_2}{4R}$　(1 分)

导体棒所受的安培力 $F_1=BI_1\cdot\sqrt{3}r$，$F_2=BI_2\cdot\sqrt{3}r$

$I_1=I_2=I$

运输车所受的合力 $F=\frac{B^2\cdot 3r^2v}{R}$　(1 分)

选取一小段时间 Δt，车速度的变化量为 Δv，由动量定理有

$-\frac{B^2\cdot 3r^2v}{R}\Delta t=m\Delta v$　(1 分)

即 $-\frac{B^2\cdot 3r^2}{R}\Delta x=m\Delta v$

两边求和得 $-\frac{3B^2r^2\cdot 2D}{R}=mv-mv_0$

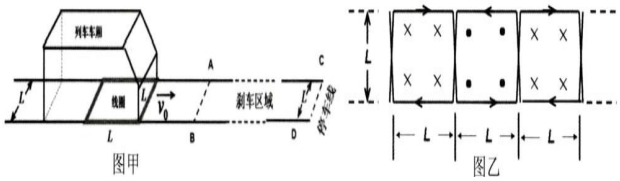
解得 $v=v_0-\frac{6B^2r^2D}{mR}=v_0-\frac{6\sqrt{3}B^2r^3}{mR}$　(1 分)

2. (10 分) 磁悬浮列车的制动方式有两种：电制动和机械制动，电制动是利用电磁阻尼的原理，机械制动是利用制动闸瓦押在轨道上产生摩擦阻力进行制动。对下面模型的研究有利于理解磁悬浮的制动方式。如图甲所示，有一节质量为 m=50t 的磁悬浮列车，车厢底部前端安装着一个匝数为 N=50 匝，边长为 L=2m 的正方形线圈，总电阻为 R=64Ω，线圈可借助于控制模块来进行闭合或断开状态的转换。两平行轨道间距也 L=2m，在 ABCD 刹车区域内铺设着励磁线圈，产生的磁场如图乙所示，每个单元为一边长为 L 的正方形，其间磁场可视为 B=2T 的匀强磁场。现列车以 v_0=360km/h 速度进站，当线圈全部进入刹车区时，调节控制模块使列车底部线圈闭合，采用电制动的方式。当列车速度减为 v_1 时，调节控制模块使列车底部线圈断开，转为机械制动的方式，所受阻力为车厢重力的 0.05 倍，机械制动 20s，列车前部刚好到达 CD 处速度减为 0，不计列车正常行驶时所受的阻力。求

(1) 列车底部线圈全部进入刹车区域时的加速度；

(2) 列车刹车过程中产生的焦耳热；

(3) 列车刹车过程的总位移。



图甲　　图乙

、解析：(1) 线圈进入磁场时，线圈切割磁感线，产生的电动势为 $E=2NBLv_0$　1 分

回路中电流为 $I=\frac{2NBLv_0}{R}$　1 分

因此线圈受到的安培力为 $F=2NBIL=\frac{4N^2B^2L^2v_0}{R}$

因此列车的加速度为 $a=\frac{4N^2B^2L^2v_0}{mR}=5m/s^2$　1 分

(2) 机械制动过程：$f=0.05mg$，减速时的加速度 $a=0.5m/s^2$

因此机械制动时的初速度为 $v_1=10m/s$　1 分

由能量守恒得，列车刹车过程中才产生的焦耳热 $Q=\frac{1}{2}mv_0^2-\frac{1}{2}mv_1^2=2.475\times10^8J$　2 分

(3) 电制动过程：

设 Δt 时间内，线圈在安培力作用下速度从 v 变为 $v+\Delta v$，由动量定理得

$-\frac{4N^2B^2L^2}{R}v\Delta t=m\Delta v$，　1 分

即 $-\frac{4N^2B^2L^2}{R}\Delta x=m\Delta v$

$-\frac{4N^2B^2L^2}{R}x_1=mv_1-mv_0$，因此有 $x_1=\frac{m(v_0-v_1)R}{4N^2B^2L^2}=1800m$　1 分

机械制动过程的位移为 $x_2=\frac{v_1}{2}t=100m$　1 分

因此刹车的总位移为 $s=x_1+x_2=1900m$　1 分

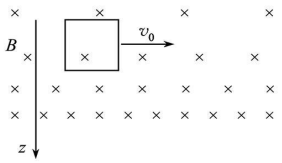
题型九　微元法在电磁感应中的应用

【题型探讨】在电磁感应现象中,如导体切割磁感线运动,产生感应电动势为 E=BLv,感应电流为 $I=\frac{BLv}{R}$,受安培力为 $F=BIL=\frac{B^2L^2}{R}v$,因为是变力问题,所以可以用微元法。

当导体棒受到变力作用而要求位移，速度和时间等问题。

【解题思路】写出导体棒合力表达式，根据加速度的定义式先把时间、速度微小化，再累加求和。

1.如图所示,竖直平面内有一边长为 L、质量为 m、电阻为 R 的正方形线框在竖直向下的匀强重力场和水平方向的磁场组成的复合场中以初速度 v_0 水平抛出,磁场方向与线框平面垂直,磁场的磁感应强度随竖直向下的 z 轴按 B=B0+kz 的规律均匀增大,已知重力加速度为 g,求:



(1)线框竖直方向速度为 v_1 时,线框中瞬时电流的大小;

(2)线框在复合场中运动的最大电功率;

(3)若线框从开始抛出到瞬时速度大小到达 v_2 所经历的时间为 t,那么,线框在时间 t 内的总位移大小为多少?

解析:(1)因在竖直方向两边的磁感应强度大小不同,所以产生感应电流为

$$i=\frac{e}{R}=\frac{(B_2-B_1)Lv_1}{R}=\frac{kL^2v_1}{R}$$

(2)当安培力等于重力时竖直速度最大,电功率也就最大,有

$$mg=(B_2-B_1)IL=\frac{(B_2-B_1)^2L^2v_m}{R}=\frac{k^2L^4v_m}{R}$$

所以 $v_m=\frac{mgR}{k^2L^4}$

$$P_m=mgv_m=\frac{m^2g^2R}{k^2L^4}$$

(3)线框受重力和安培力两个力,其中重力 mg 为恒力,安培力 $F_安=\frac{(B_2-B_1)^2L^2v_z}{R}=\frac{k^2L^4v_z}{R}$ 为变力,$F_合=mg-F_安=mg-\frac{k^2L^4v_z}{R}$ 是变力。

用微元法,设在微小时间 Δt 内,变力可以看做恒力,变加速运动可以看做匀加速运动,加速度为 $a=g-\frac{k^2L^4v_z}{mR}$,则在 Δt 内速度的增加为 $\Delta v=g\Delta t-\frac{k^2L^4v_z}{mR}\Delta t$,而 $v_z\Delta t=\Delta z$,所以在时间 t 内增加的速度为 $\Delta v=g\sum\Delta t-\frac{k^2L^4}{mR}\sum\Delta z$,所以 $\Delta v=gt-\frac{k^2L^4}{mR}z$。

从宏观看速度的增加为 $\sqrt{v_2^2-v_0^2}$,所以 $gt-\frac{k^2L^4}{mR}z=\sqrt{v_2^2-v_0^2}$,得线框在时间 t 内的总位移大小为 $z=\frac{mR(gt-\sqrt{v_2^2-v_0^2})}{k^2L^4}$。

时间 t 内线框的总位移大小为

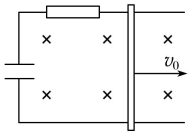
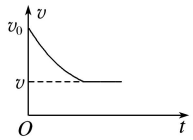
$$s=\sqrt{\frac{(mgt-m\sqrt{v_2^2-v_0^2})^2R^2}{k^4L^8}+v_0^2t^2}$$

题型十　含电容器的电磁感应问题

【题型探讨】电磁感应现象中含电容器的电路问题。

【解题思路】注意电容器充放电引起电量的变化，有时需要结合动量定理求解。当导体棒产生的感生电动势=电容器两端的电压时，导体棒处于平衡状态。

②类型一　电容器充电型

基本模型 规律	 (电阻阻值为 R，电容器电容为 C)
电路特点	导体棒相当于电源，电容器被充电.
电流特点	安培力为阻力，棒减速，E 减小，有 $I=\frac{BLv-U_C}{R}$，电容器被充电 U_C 变大，当 $BLv=U_C$ 时，$I=0$，$F_{安}=0$，棒匀速运动.
运动特点和最终特征	a 减小的加速运动，棒最终做匀速运动，此时 $I=0$，但电容器带电荷量不为零.
最终速度	电容器充电荷量：$q=CU$ 最终电容器两端电压 $U=BLv$ 对棒应用动量定理： $mv_0-mv=B\overline{I}L\cdot\Delta t=BLq$ $v=\frac{mv_0}{m+B^2L^2C}$.
$v-t$ 图像	

【总结】

1.电容器一次性充电问题

解答电容器题型的解题步骤:

第一步:找到电路稳定时电容器板间电压与金属杆切割磁感线产生的电动势的关系;

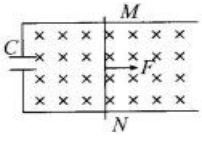
第二步:找到电容器上的电荷量 Q 与金属杆上通过的电荷量 q 的关系;

第三步:研究金属杆,利用动量定理求解金属杆上通过的电荷量 q;

第四步:联立解得金属杆的稳定速度与通过金属杆的电荷量.

2.电容器持续充电问题

【典例】如图所示，两水平放置的平行金属导轨的间距为 L，导轨的动摩擦因数为 μ，质量为 m 的金属杆 MN 静止垂直跨在导轨上，且与导轨接触良好，导轨间接有一个电容为 C 的电容器，整个装置处于垂直的匀强磁场中，磁感应强度为 B. 导轨和金属杆的电阻均不计. 现给金属杆 MN 施加一水平向右的恒力 F，使金属杆 MN 向右做加速运动，最大静摩擦力等于滑动摩擦力，重力加速度为 g，分析：



(1)金属杆 MN 的运动规律；

(2)金属杆上通过的电荷量与时间的关系.

(1)板间电压与动生电动势的关系：金属杆切割磁感线产生的电动势与电容器极板间的电压相等，即 $E=U$.

金属杆切割磁感线产生的电动势 $E=BLv$，

电容器两板间的电压 $U=\frac{Q}{C}$.

电容器上的电荷量 Q 与金属杆中通过的电荷量 q 相等，即 $Q=q$.

研究金属杆，由动量定理得

$mv-0=Ft-\mu mgt-F_{安}t=Ft-\mu mgt-BLq$.

联立解得

$v=\frac{F-\mu mg}{m+CB^2L^2}t$，$q=\frac{CBLF}{m+CB^2L^2}t$.

其中 $\frac{F-\mu mg}{m+CB^2L^2}$ 为定值，金属杆的速度随时间线性增大，即金属杆做匀加速运动，加速度 $a=\frac{F-\mu mg}{m+CB^2L^2}$.

(2)金属杆上通过的电荷量 $q=\frac{CBLF}{m+CB^2L^2}t$.

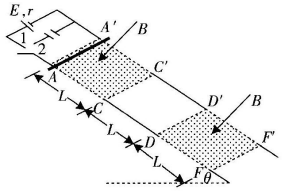
【解题思路】注意电容器充放电引起电量的变化，有时需要结合动量定理求解。当导体棒产生对电容器充电（加恒力作用时），电压不断升高，导体棒处于匀加速运动状态。

1.如图为一倾角为 $\theta=30°$ 的金属导轨，上端有一个电动势为 $E=5V$、内阻为 $r=1\Omega$ 的电源，以及一个电容为 $C=0.25F$ 的电容器，导轨通过单刀双掷开关可分别与 1、2 相连。导轨中间部分分布有两个相同的有界磁场 $AA'CC'$ 及 $DD'FF'$，磁场方向垂直导轨向下，磁场左右边界等于导轨的宽度 $d=1m$，磁场的上下边界距离如图所示均为 $L=2m$，CC' 到 DD' 的距离也为 L。除电源内阻外，其他电阻忽略不计，导体棒与导轨接触光滑。初始时刻，开关与 1 相连，一根质量为 $m=1kg$ 的导体棒能静止在导轨上 AA' 位置，导体棒处于磁场之中。当开关迅速拨向 2 以后，导体棒开始向下运动。

(1)求磁感应强度 B 的大小。

(2)求导体棒运动至 DD' 时的速度大小 v_2。

(3)当导体棒接近 DD' 时，把开关迅速拨向 1，讨论此后导体棒能否到达 FF'，如果能，求出导体棒到达 FF' 的速度 v_3。



(1)由平衡条件知，初始时刻 $mg\sin\theta=BId$，$I=\frac{E}{r}$，得 $B=\frac{mgr\sin\theta}{Ed}$，代入数据得 $B=1T$。

(2)开关拨向 2 后，导体棒开始在磁场中运动，当速度为 v 时，由牛顿运动定律得 $mg\sin\theta-Bid=ma$，$i=\frac{\Delta q}{\Delta t}$，$q=cU$，$U=Bdv$，可得 $a=\frac{mg\sin\theta}{m+CB^2d^2}=4m/s^2$，说明导体棒做匀加速运动，到达 CC' 的速度满足 $v_C^2=2aL$，从 CC' 到 DD'，导体棒做加速度为 $g\sin\theta$ 的匀加速运动，有 $v_2^2-v_C^2=2g\sin\theta L$，联立得 $v_2=6m/s$。

(3)进入第二个磁场后，导体棒受到重力、弹力、安培力，其动力学方程可写作 $mg\sin\theta-Bid=ma$，其中 $i=\frac{E+Blv}{r}$，代入后 $mg\sin\theta-\frac{BEd}{r}-\frac{B^2d^2v}{r}=ma$，注意到 $B=\frac{mgr\sin\theta}{Ed}$，上式写为 $-\frac{B^2d^2v}{r}=ma$，可等效为导体棒在仅受安培力作用下的运动，上式变形可得 $-\frac{B^2d^2x}{r}=mv_t-mv_2$，若 $x=2m$，则 $v_t=4m/s$，这说明导体棒能运动到 FF'，且到达 FF' 时的速度为 4m/s。

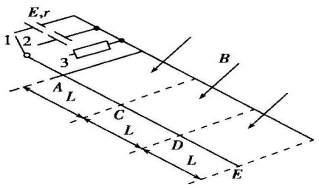
2.为了研究导体棒在磁场中的运动，某研究小组设计了两间距 $d=1$ m 的平行金属导轨，装置如图所示，倾斜光滑轨道倾角为 30°，上端接有一个电源（电动势为 $E=5$ V，内阻 $r=1\ \Omega$）、一个电容器（$C=0.25$ F）和一个电阻（$R=0.8\ \Omega$），单刀开关可以分别与 1、2、3 相连，导轨中间分布着垂直倾斜轨道向下的匀强磁场，磁感应强度大小 $B=1$ T，把磁场分成宽 $L=2$ m 的等间距三部分，开始时开关接 1 位置，导体棒恰好能静止在磁场上边缘 A 处，接着把开关瞬间打到 2 位置，导体棒向下运动，当导体棒刚好到 C 位置时，把开关瞬间打到 3 位置，导体棒继续运动，当导体棒刚好运动到 D 位置时，把开关瞬间打到 1 位置，导体棒继续运动到 E 处，除电源和电阻外，其他电阻不计，导体棒运动过程中始终垂直轨道，求（$g=10\ m/s^2$）

(1)导体棒的质量；

(2)导体棒运动到 C 处时的速度大小；

(3)导体棒从 C 到 D 过程中电阻 R 上产生的焦耳热；

(4)导体棒运动到 E 处的速度大小。



解析 (1)由平衡条件知，初始时刻 $mg\sin\theta=BId$，$I=\frac{E}{r}$，得 $m=\frac{BEd}{gr\sin\theta}$，代入数据得 $m=1$ kg

(2)开关拨向 2 后，导体棒开始在磁场中运动，当速度为 v 时，由牛顿运动定律得

$mg\sin\theta-BId=ma$，$I=\frac{q}{\Delta t}$，$q=CU$，$U=Bdv$，可得 $a=\frac{mg\sin\theta}{m+CB^2d^2}=4\ m/s^2$

所以导体棒从 A 到 C 处做匀加速运动，则有 $v_C=\sqrt{2aL}=4$ m/s

(3)在 C、D 间由于 $mg\sin\theta=\frac{B^2d^2v}{R}$，此时 $v=4$ m/s

故导体棒刚好在 C、D 间做匀速运动，重力势能的减小量即为电路中产生的焦耳热

$Q_R=mgL\sin\theta=10$ J

(4)在 D、E 间,导体棒受到重力、弹力、安培力,由牛顿第二定律知

$mg\sin\theta - BId = ma$

其中 $I = \frac{E+Bdv}{r}$,因为 $mg\sin\theta = \frac{BEd}{r}$,所以上式可以简化为

$-\frac{B^2d^2v}{r} = ma$

可等效为导体棒在仅受安培力作用下的运动,则 $-Bqd = m(v_E - v_D)$,其中 $q = \frac{BdL}{r}$,$v_D = v_C = 4$ m/s

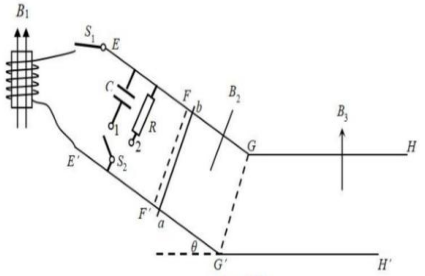
上式可以化简为 $-\frac{B^2d^2L}{r} = m(v_E - v_D)$,得 $v_E = 2$ m/s

3.(10分)如图所示,匝数 $N=100$、截面积 $S=0.05m^2$ 的线圈内有方向垂直于线圈平面向上的随时间均匀增加的匀强磁场 B_1,其变化率 $k=0.8$T/s。线圈通过开关 S_1 连接两根相互平行、间距 $d=1.50$ m 的倾斜光滑导轨 EG、$E'G'$,倾斜导轨与水平面夹角为 $\theta=30°$,下端 $FF'GG'$ 矩形区域内有垂直导轨方向的匀强磁场 B_2(大小方向未知),F 到 G 的距离 $L=4$m,导轨间的电容 $C=0.2$F 和定值电阻 $R=12\Omega$ 可以通过单刀双掷开关与导轨连接。倾斜导轨底端与足够长水平光滑平行导轨 GH、$G'H'$ 平滑连接,导轨间有竖直向上的匀强磁场 $B_3=1$T。$t=0$ 时 S_1 闭合、S_2 接 1,质量 $m=0.40$kg、电阻 $r=6\Omega$ 的导体棒 ab 紧贴 FF' 放置在磁场内恰好能静止。$t=1$s 时断开 S_1 同时将 S_2 接 2,ab 导体棒沿倾斜轨道向下运动到 GG' 前已达到最大速度。导轨电阻、线圈电阻和各接触点接触电阻均不计。求:

(1) $FF'GG'$ 矩形区域内匀强磁场 B_2 的大小和方向;

(2) ab 导体棒到达 GG' 的时刻和此前导体棒 ab 上产生的焦耳热;

(3) 若 ab 导体棒到达 GG' 时将 S_2 接 1,则 ab 导体棒将做什么运动?最终速度是多少?



第21题图

(1) 对线圈分析,根据楞次定律:$E_1 = N\frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = NSK = 4V$ (1分)

对导体棒受力分析:$mg\sin30° = B_2d\frac{E_1}{r}$, (1分)

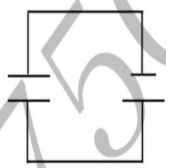
得 $B_2 = 2$T,方向垂直倾斜轨道向下。 (1分)

(2) 此时导体棒和定值电阻构成闭合回路,导体棒沿倾斜导轨向下做变加速运动,当速度达到最大时开始匀速。受力分析:$mg\sin30° = B_2d\frac{B_2dv_m}{R+r}$,得 $v_m = 4m/s$

对下滑过程分析,由动量定律 $mg\sin30°t - B_2d\frac{B_2dL}{R+r} = mv_m - 0$,得 $t=1.8$s (2分)

由动能定理 $mg\sin30°L - Q = \frac{1}{2}mv_m^2 - 0$,得 $Q=4.8$J,$Q_{ab} = \frac{1}{3}Q = 1.6J$ (2分)

(3) 如图所示,导体棒在磁场中切割产生电动势,与电容器相连,构成闭合回路,由于导体棒两端电动势大于电容器原来电压,所以接下来将给电容器充电,导体棒在安培力作用下做减速运动。



设导体棒最终运动速度大小为 v_1,电容器两端电压开始时是 $U = E_1 = 4V$, (1分)

最终电压为 U_1,$U_1 = B_3dv_1$,电容器两端电量得变化量 $\Delta q = C(U_1 - U)$, (1分)

对导体棒分析,由动量定理 $-B_3d\Delta q = mv_1 - mv_m$,得 $v_1 = \frac{56}{17}m/s$ (1分)

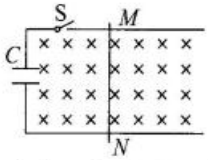
②类型二　电容器放电型

【解题思路】注意电容器充放电引起电量的变化,有时需要结合动量定理求解。当导体棒产生的感生电动势=电容器两端的电压时,导体棒处于平衡状态。

【典例】【典例】如图所示,两水平放置的光滑平行金属导轨的间距为 L,质量为 m 的金属杆 MN 静止垂直跨在导轨上,且与导轨接触良好,导轨间接有一个电容为 C 的电容器,初始时刻电容器的电荷量为 Q,上极板带正电,整个装置处于垂直导轨平面向下的匀强磁场中,磁感应强度为 B.导轨和金属杆的电阻均不计.现闭合开关 S,当金属杆向右运动时,求:

(1)金属杆 MN 稳定运动的速度大小;

(2)金属杆上通过的电荷量.



(1)电路稳定的条件是电容器两板间的电压等于金属杆切割磁感线产生的电动势,即 $E=U$.

电路稳定时,电容器两板间仍有电压,故电容器上仍有电荷量剩余,剩余的电荷量为 Q'.

金属杆切割磁感线产生的电动势 $E=BLv$,

电容器两板间的电压 $U=\frac{Q'}{C}$,

电容器上电荷量的变化量 ΔQ 与金属杆中通过的电荷量 q 相等,即 $\Delta Q=q$,$\Delta Q = Q-Q' = Q-CBLv$.

研究金属杆,由动量定理得

$mv-0=F_{安}t=BLq$,

联立解得

$v=\frac{BLQ}{m+CB^2L^2}$,$q=\frac{mQ}{m+CB^2L^2}$,$Q'=\frac{CB^2L^2Q}{m+CB^2L^2}$.

(2)金属杆上通过的电荷量 $q=\frac{mQ}{m+CB^2L^2}$.

总结

电容器放电属于通电导线在磁场中受力的问题,同时考查反电动势.当反电动势与电容器极板间电压相等时,电路达到稳定状态;电路稳定时,电容器上的电荷量不为0,电容器两极板上仍有剩余电荷量.

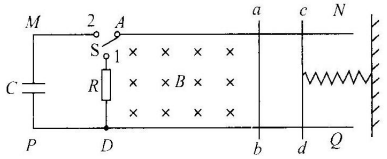
1.(10分)如图所示,间距为 d 的两根平行光滑金属导轨 MN、PQ 放置于同一水平面内,导轨左端有一阻值为 R 的定值电阻与一电容为 C 的电容器并联(电容器开始不带电),S为单刀双掷开关,导体棒 ab 垂直于导轨放置在导轨上,在 ab 棒左侧和导轨间存在竖直向下足够长的匀强磁场,且磁场以 ab 为右边界,磁感应强度大小为 B,在 ab 棒右侧有一绝缘棒 cd,cd 棒与 ab 棒平行,且与固定在墙上的轻弹簧接触但不相连,弹簧处于压缩状态且被锁

定.现将S连接到“1”,解除弹簧锁定,cd棒在弹簧的作用下向左移动,脱离弹簧后以速度v_0与ab棒发生碰撞并粘在一起.已知ab、cd棒的质量均为m,碰撞前后两棒始终垂直于导轨,ab棒在两导轨之间的部分的电阻为r,导轨电阻、接触电阻以及空气阻力均忽略不计,ab棒总是保持与导轨良好接触,不计电路中感应电流的磁场.求:

(1)弹簧初始时的弹性势能;

(2)从ab棒被碰后到ab棒速度为$\frac{v_0}{4}$过程,ab棒的位移;

(3)当ab棒速度为$\frac{v_0}{4}$时将S连接到“2”,求ab棒的最终速度.



1.(10分)

解:(1)对cd棒,由能量守恒,可得弹簧的弹性势能为

$E_p=\frac{1}{2}mv_0^2$ (2分)

(2)cd棒与ab棒相碰撞前后,由动量守恒定律知

$mv_0=2mv_1$ (1分)

设ab棒速度为$\frac{v_0}{4}$时向左滑行的距离为x,由动量定理有

$\frac{B^2d^2x}{R+r}=2mv_1-2m\cdot\frac{v_0}{4}$ (2分)

解得$x=\frac{(R+r)mv_0}{2B^2d^2}$ (1分)

(3)当ab棒产生的感应电动势与电容器两端电压相等时,ab棒以v_2匀速运动

则$U=Bdv_2$ (1分)

ab棒从$\frac{v_0}{4}$到v_2过程中,由动量定理得

$B\bar{I}d\cdot t=2m\cdot\frac{v_0}{4}-2mv_2$ (1分)

对电容有$q=\bar{I}\cdot t=C\cdot U$ (1分)

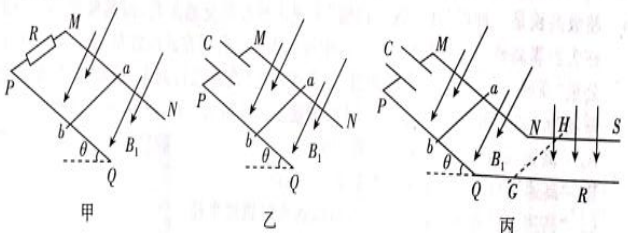
联立解得$v_2=\frac{mv_0}{2B^2d^2C+4m}$ (1分)

2.(10分)如图F4-18甲所示,两根光滑的平行金属导轨MN、PQ相距$d=0.5$ m,导轨与水平面成$\theta=37°$角放置,匀强磁场的磁感应强度$B_1=1$ T,方向垂直于导轨平面向下,质量为$m=0.1$ kg的导体棒ab垂直于MN、PQ放在导轨上,与导轨接触良好,导轨间接有$R=0.5\ \Omega$的电阻,其他电阻均不计.整个运动过程中棒ab一直与导轨垂直.$\sin 37°=0.6$,$\cos 37°=0.8$,g取10 m/s^2.

(1)将棒ab由静止释放,假设导轨足够长,求棒ab能达到的最大速度.

(2)如图乙所示,将电阻换成$C=2$ F的电容器(击穿电压较高),将棒ab由静止释放,导体棒运动到Q、N时的速度$v=4$ m/s.求释放时棒ab离Q、N点的距离.

(3)如图丙所示,在第(2)问的基础上在Q、N处各接上一根相互平行的足够长的水平光滑金属导轨QR、NS,QR与PQ在同一竖直面内,在与QN平行的GH边界右侧导轨间有竖直向下的匀强磁场,磁感应强度$B_2=0.5$ T,Q、G间导轨表面有绝缘光滑膜,棒ab经过QN时速度大小$v=4$ m/s保持不变,求最终电容器上所带的电荷量.



[解析](1)棒ab达到最大速度时,受力平衡,有$mg\sin\theta=B_1Id$

$I=\frac{B_1dv}{R}$

联立解得$v=1.2$ m/s

(2)在极短时间Δt内,$I=\frac{B_1dC\Delta t}{\Delta t}$

由牛顿第二定律得$mg\sin\theta-B_1Id=ma$

解得$a=1$ m/s^2

导体棒做匀加速直线运动,有$v^2=2ax$

解得$x=8$ m

(3)极短时间Δt内,$B_2Id\Delta t=m\Delta v$

由进入磁感应强度为B_2的磁场到最后匀速运动的过程中,速度由v变大到v',有

$\sum B_2dI\Delta t=\sum m\Delta v$

即$B_2d\Delta q=m(v'-v)$

$B_2dv'C=B_1dvC-\Delta q$

$q=B_2dv'C$

解得$q=\frac{28}{9}$ C

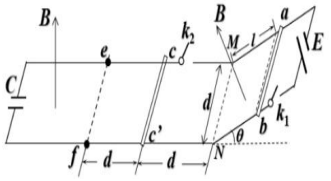
3.(10分)如图所示,电阻均可忽略、固定的光滑金属导轨间距为d,导轨在M、N处平滑连接,MN右端导轨倾角θ,上端连接有一电动势为E、内阻不计的电源,斜面下段存在一宽度为l、磁感应强度为B、垂直斜面向上的匀强磁场区域,水平导轨左侧连接一电容为C的电容器,导轨上e与f点绝缘,在ef左侧存在方向竖直向上、磁感应强度为B的匀强磁场。现在闭合电键k_1,断开电键k_2,并将质量为m、电阻为R的导体棒ab从磁场上边缘由静止释放,在出磁场前已经开始匀速,在出磁场瞬间闭合电键k_2,随后导体棒ab进入水平轨道并与质量为$2m$、电阻为R的静止导体棒cc'发生弹性碰撞,导体棒cc'初始与ef、MN的距离均为d。则:

(1)求导体棒ab匀速下滑的速度v;

(2)若已知下滑过程通过导体棒ab的电量为q,求导体棒ab从释放到导体棒cc'进入ef左侧磁场前ab棒上产生的焦耳热Q;

(3)若使导体棒ab与棒cc'碰后粘为一体,求棒整体进入ef左侧足够长导轨后最终电容器的带电量q_C。

注意:本题中第(2)、(3)问结果均用v表示。



21.(1)$mg\sin\theta=BdI$ (1分)

$I=\frac{E+Bdv}{R}$ (1分)

$\Rightarrow v=\frac{mgR\sin\theta}{B^2d^2}-\frac{E}{Bd}$ (1分)

(2)$E\cdot q+mgl\sin\theta=\frac{1}{2}mv^2+Q_1$ (1分)

$mv=mv_1+Mv_2$

$\frac{1}{2}mv^2=\frac{1}{2}mv_1^2+\frac{1}{2}Mv_2^2$ (1分)

$Q_2=\frac{E^2}{R}\cdot(\frac{d}{v}+\frac{d}{v_2})$ (1分)

$Q=Q_1+Q_2\ \Rightarrow Q=Eq+mgl\sin\theta-\frac{1}{2}mv^2+\frac{5E^2d}{2Rv}$ (1分)

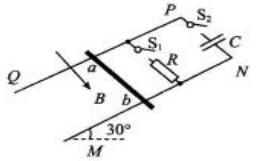
(3)$mv=3mv_3$ (1分)

$U=Bdv_4\qquad q_C=CU$

$Bdq_C=3m(v_3-v_4)$ (1分)

$\Rightarrow q_C=\frac{CmBdv}{3m+CB^2d^2}$ (1分)

③类型三 能量转化型

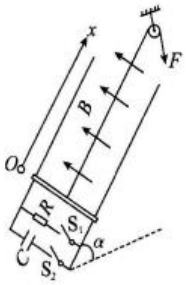


设轨道光滑，则 ab 棒下滑过程中减小的重力势能转化为动能和电容器储存的电能 $E=\frac{1}{2}CU^2$

1. 如图所示是一涉及电磁原理的健身器材示意图，光滑平行的金属导轨与水平面成 $\alpha=30°$ 角，导轨间距为 r，导轨下端并接一电容为 C 的电容器与阻值为 R 的电阻器，一根质量为 m、长为 r 金属棒水平放置在导轨底端 O 点处，绝缘细线通过轻质光滑定滑轮与金属棒相连接. 在空间内有垂直于导轨平面的磁场，磁感应强度大小沿导轨方向 x 变化，变化规律为 $B=kx$，k 为大于零的常数. 仅闭合开关 S_1，在细线末端施加方向竖直向下、大小 $F=3mg$ 的恒力，金属棒从 $x=0$ 位置由静止开始向上运动，当 $x_1=4r$ 时速度达到最大. 不计金属棒与金属导轨的电阻，忽略空气阻力的影响，导轨足够长，磁场区域足够大，重力加速度为 g.

(1)求金属棒运动的最大速度及上升 x_1 过程中通过金属棒的电荷量；

(2)若磁场的磁感应强度大小恒为 B_0，仅闭合开关 S_2，仍以大小 $F=3mg$ 的恒力从 $x=0$ 位置由静止开始拉金属棒，求金属棒运动到 $x_2=5r$ 位置时的加速度及电容器所存储的能量.



解：(1)设金属棒上升 x_1 时的最大速度为 v_m，对金属棒进行受力分析，由平衡条件得

$F=mg\sin 30°+F_{安}$ (1 分)

安培力大小 $F_{安}=BIr=kx_1Ir$ (1 分)

感应电流 $I=\frac{Brv_m}{R}=\frac{kx_1rv_m}{R}$ (1 分)

解得 $v_m=\frac{5mgR}{32k^2r^4}$ (1 分)

金属棒上升 x_1 过程，通过金属棒的电荷量为

$q=\bar{I}\cdot\Delta t=\frac{\bar{E}}{R}\cdot\Delta t=\frac{\Delta\Phi}{R}=\frac{\frac{0+B}{2}\cdot x_1r-0}{R}$

$=\frac{8kr^3}{R}$ (1 分)

(2)设某时刻金属棒的切割速度为 v，该时刻电容器存储的电荷量为

$Q=CE=CB_0rv$

回路中的电流为

$I=\frac{\Delta Q}{\Delta t}=CB_0r\frac{\Delta v}{\Delta t}=CB_0ra$ (1 分)

对金属棒，根据牛顿第二定律得

$F-mg\sin 30°-B_0Ir=ma$ (1 分)

整理得 $a=\frac{5mg}{2(m+CB_0^2r^2)}$ (1 分)

可见 a 恒定，金属棒做匀加速直线运动

金属棒向上运动 x_2 时的速度为

$v^2=2ax_2$

上升过程由功能关系得

$Fx_2=mgx_2\cdot\sin 30°+\frac{1}{2}mv^2+E_{电}$ (1 分)

整理得电容器储存的能量为

$E_{电}=\frac{25mgr}{2}\left(1-\frac{m}{m+CB_0^2r^2}\right)$ (1 分)

题型十一　电磁感应与交流电及等效思想问题

【题型探讨】电磁感应现象与交流电相结合，求解生热、能量转化等问题。

【解题思路】1.涉及交流电生热问题要用有效值进行求解，导体棒的运动问题有时可以等效为线圈在磁场中转动，产生正（余）弦交流电。

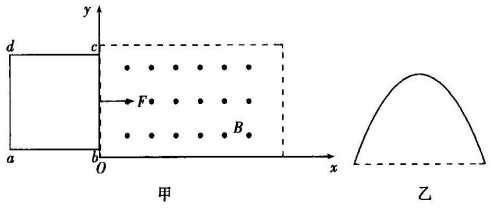
2.线圈（或导体棒）运动产生的电流相对于正（余）弦交流电时，等价于线圈绕轴以角速度 ω 转动模型。

1.如图甲所示，在 Xoy 光滑水平面上的 $0\leqslant x\leqslant 1$ m、$0\leqslant y\leqslant 0.6$ m 区域内存在方向垂直平面向外的匀强磁场。一电阻值 $R=0.5\ \Omega$、边长 $L=0.5$ m 的正方形金属框的右边界 bc 恰好位于 y 轴上。$t=0$ 时，线框受到一沿 x 轴正方向的外力 $F=0.5v+0.25$(N)(v 为线框的速度)作用，从静止开始运动。线框仅在进磁场时有外力，在外力作用期间，测得线框中电流与时间成正比，比例系数 $k=1$ A/s。

(1)指出金属线框在外力作用期间做何种运动；

(2)若线框恰好能离开磁场，求外力 F 作用的时间；

(3)如图乙所示，已知抛物线与底边直线所围成的面积等于 $\frac{2ah}{3}$，其中 a 为底边长度，h 为抛物线的高。试求线框进入磁场过程中，消耗的焦耳热。



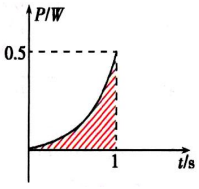
甲　　乙

解析　(1)线框进入磁场的某时刻，设其速度为 v，则 $E=BLv$，$I=\frac{E}{R}$，$I=\frac{BLv}{R}=\frac{BLa}{R}t$，因为线框中电流与时间成正比，可知 a 为恒量，即线框做匀加速运动。

(2)根据牛顿第二定律可知 $F-BIL=ma$，即 $F-\frac{B^2L^2v}{R}=ma$，又 $F=0.5v+0.25$(N)，则 $\frac{B^2L^2}{R}=0.5\ \text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$，解得 $B=1$ T，$0.25\ \text{N}=ma$，又 $k=\frac{BLa}{R}=1$ A/s，解得 $a=1\ \text{m/s}^2$，$m=0.25$ kg

设 F 作用时间为 t，则 $v=at$，$x_1=\frac{1}{2}at^2=0.5t^2$，线框若恰能离开磁场，则离开磁场时的速度恰为零，由动量定理得 $-B\bar{I}_1Lt-B\bar{I}_2Lt'=0-mv$，其中 $\bar{I}_1t=q_1$，$\bar{I}_2t'=q_2$，则 $Bq_1L+Bq_2L=mv$，其中 $q_1=\frac{B(L-x_1)L}{R}$，$q_2=\frac{BL^2}{R}$，将以上各式联立可得 $t^2+t-2=0$，解得 $t=1$ s，$x_1=0.5$ m(注意：其他方法正确均可)。

(3)因 $I=kt$，则线框进入磁场时消耗的功率为 $P=I^2R=0.5t^2$，画出图像为如图所示的抛物线，线框进入磁场过程中，消耗的焦耳热大小等于 $P-t$ 图像与时间轴围成的面积，则可得 $Q=0.5\times 1\ \text{J}-\frac{2}{3}\times 0.5\times 1\ \text{J}=\frac{1}{6}$ J。

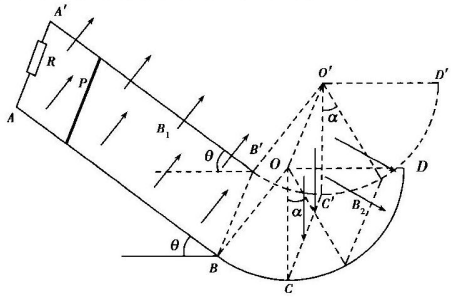


2.如图甲所示，间距为 L=0.5m 的两条平行金属导轨 $ABCD$ 和 $A'B'C'D'$ 由倾斜部分与圆弧部分平滑连接组成，倾斜部分导轨的倾角 $\theta=37°$，处在垂直于导轨平面向上的匀强磁场中，磁感应强度大小 $B_1=1.0$ T，AA' 之间连接一定值电阻 $R=0.1\ \Omega$，圆弧部分导轨的半径 $r=1.44$ m，中间圆弧部分没有磁场，右侧四分之一圆弧轨道区域存在均匀分布的辐向磁场，导轨所在处的磁感应强度大小 $B_2=\sqrt{\frac{5}{3\pi}}$ T。导体棒 P 的质量 $m=0.25$ kg、电阻 $R=0.1\ \Omega$，在沿斜面向下的力 F 作用下从倾斜导轨上端某位置由静止开始运动，运动到 BB' 时撤去力 F，定值电阻 R 两端的电压随时间的变化规律如图乙所示。当 P 经过 CC' 进入右侧圆弧运动时，始终受到水平向右的外力 F'，并满足 $F'=mg\tan\alpha$（α 为导体棒所在位置和圆心的连线与竖直方向的夹角）。导体棒在运动过程中始终与导轨垂直并接触良好，不计摩擦阻力和导轨电阻。（已知 $\sin 37°=0.6$，$\cos 37°=0.8$，$g=10\ \mathrm{m/s^2}$）

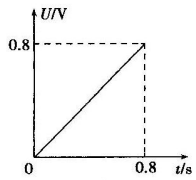
(1)求导体棒沿斜面向下运动过程中力 F 随时间 t 的表达式；

(2)通过分析判断导体棒能否到达 DD'，如果能，求它到达该位置的速度大小；如果不能，求导体棒上升的最大高度；

(3)求导体棒在辐向磁场运动中电阻 R 产生的焦耳热。



甲



乙

(1) 根据 U-t 图象可知：$U=t$

$$U=\frac{E}{2}=\frac{B_1Lv}{2}$$ (1分)

解得：$v=4t$

导体棒在倾斜轨道做匀加速直线运动，加速度 $a=4m/s^2$ (1分)

根据牛顿第二定律：$F+mg\sin\theta-IlB_1=ma$ (1分)

$$I=\frac{B_1Lv}{2R}$$

解得：$F=5t-0.5$ (1分)

(2) 导体棒运动到 BB'时的速度 v_B=3.2m/s

从 BB'运动到 CC'，根据动能定理：

$$mgr(1-\cos\theta)=\frac{1}{2}mv_C^2-\frac{1}{2}mv_B^2$$ (1分)

解得：v_C=4.0m/s (1分)

由于 $F'=mg\tan\theta$，导体棒在辐向磁场中的运动可等效为在安培力作用下沿光滑水平导轨的运动，导体棒运动的位移大小等于沿圆弧运动的弧长。

假设导体棒的速度减为 0，根据动量定理：

$$-\bar{I}LB_2t=0-mv_C$$ (1分)

$$q=\bar{I}t=\frac{B_2Lx}{2R}$$ (1分)

解得：$x=0.48\pi m=\frac{\pi r}{3}<\frac{\pi r}{2}$

故导体棒不能到达 DD' (1分)

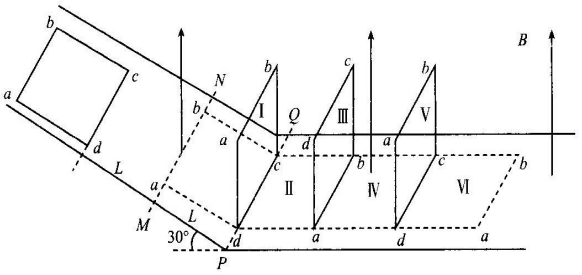
上升的最大高度 $h=r(1-\cos\frac{\pi}{3})=0.72m$ (1分)

(3) 导体棒最终将静止于 h 高度处，根据能量守恒：

$$Q=\frac{1}{2}mv_C^2=2.0J$$ (1分)

$$Q_R=\frac{Q}{2}=1.0J$$ (1分)

3(10分)如图甲所示，倾角为 30°的光滑斜面固定在粗糙程度较大的水平地面上，斜面底部 $MNQP$ 区域内及 PQ 右侧区域分布着竖直向上的匀强磁场，磁感应强度大小为 B，边界 MN、PQ 间的距离为 L，PQ 为斜面最低处. 将质量为 m、电阻为 R、边长为 L 的正方形匀质金属框 $abcd$（表面涂有绝缘漆）从 cd 边距 MN 边界的距离为 L 处静止释放，当 cd 边到达 PQ 处时刚好速度为零，接着用外力使框做“翻跟头”运动，即框以 cd 边为轴顺时针翻转 150°，然后以 ab 边为轴顺时针翻转 180°，再以 cd 边为轴顺时针翻转 180°……如此不断重复，每转到竖直和水平时位置记为 Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ……翻转过程中，金属框不打滑，并保持角速度大小恒为 ω，空气阻力不计，重力加速度为 g，以位置 Ⅰ 作为计时起点即 $t=0$.



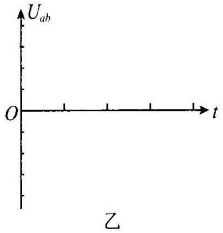
甲

(1)求金属框进入 $MNQP$ 区域的过程中，流过 ab 边的电荷量；

(2)写出金属框从位置 Ⅰ 到位置 Ⅱ 的过程中，a、b 两点的电势差 U_{ab} 随时间变化的函数式；

(3)求金属框从位置 Ⅰ 到位置 Ⅱ 的过程中，外力对金属框做的功；

(4)在图示坐标系内画出金属框从位置 Ⅰ 到位置 Ⅴ 的过程中，电势差 U_{ab} 随时间变化的函数图像（标出相应的纵、横坐标）.



乙

解:(1)由题意得 $q=\bar{I}t=\frac{\Delta\Phi}{R}$ (1分)

解得 $q=\frac{BS\cos30^\circ}{R}=\frac{\sqrt{3}BL^2}{2R}$ (1分)

(2)电动势 $e=BL^2\omega\cos\omega t$ (1分)

解得 $U_{ab}=\frac{3}{4}BL^2\omega\cos\omega t$ (1分)

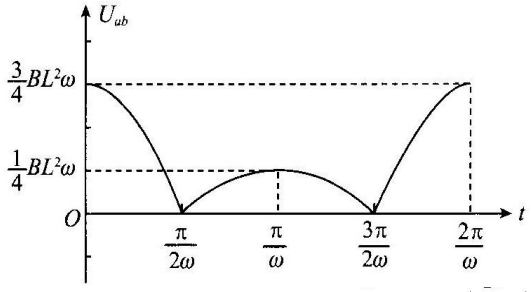
(3)由题意得 $W_A=(\frac{BL^2\omega}{\sqrt{2}})^2\times\frac{1}{R}\times\frac{\pi}{2\omega}$

$=\frac{\pi\omega B^2L^4}{4R}$ (1分)

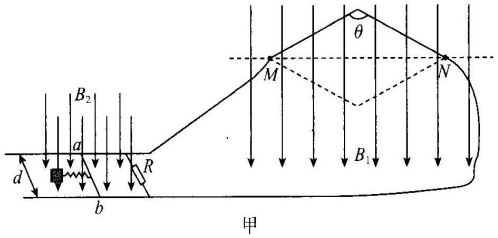
$W+\frac{1}{2}mgL-W_A=0$ (1分)

联立得 $W=\frac{\pi\omega B^2L^4}{4R}-\frac{1}{2}mgL$ (1分)

(4)如图所示 (3分)



4 (10分)某兴趣小组设计了"摇绳发电"的方案.如图所示,"∧"形等腰金属架两个端点 M、N 位于同一水平面上,通过导线与固定在水平面上的两根平行金属导轨相连,导轨间接有 $R=10\ \Omega$ 的电阻.金属棒 ab 垂直搁置在导轨上,ab 中点通过轻质绝缘弹簧连接一个滑块.金属架和金属棒所在区域均存在竖直向下的匀强磁场.让滑块运动且金属架绕轴线 MN 以 $\omega=12$ rad/s 的角速度匀速转动,金属棒始终保持静止.已知金属架腰长 $L=5$ m,总电阻 $r_1=5\ \Omega$,两腰夹角 $\theta=106^\circ$;金属棒长度为 1 m,阻值 $r_2=10\ \Omega$;导轨间距 $d=1$ m;$B_1=5.0\times10^{-3}$ T,$B_2=1.0$ T,忽略一切摩擦.



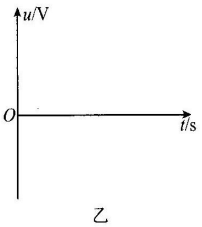
甲

(1)以金属架到达图示位置时开始计时,在图乙中画出感应电动势随时间变化的图像;

(2)在金属架由图中位置垂直纸面向外转动 30°的过程中,求通过电阻 R 的电荷量;

(3)求金属架转动一周的过程中,金属棒产生的焦耳热;

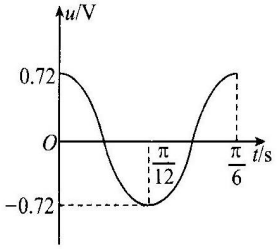
(4)已知弹簧振子原长 $x_0=0.05$ m,劲度系数 $k=1.0$ N/m,当金属架与竖直方向成 60°夹角时,滑块距离金属棒多远?



乙

解:(1)感应电动势的最大值 $E_m=B_1S\omega=0.72$ V (1分)

变化周期 $T=\frac{2\pi}{\omega}=\frac{\pi}{6}$ s,感应电动势随时间变化的图像如图所示 (1分)



(2)磁通量变化量 $\Delta\Phi=\frac{1}{2}BS$,通过电路的总电荷量

$q=\frac{\Delta\Phi}{R_{总}}=3\times10^{-3}$ C (1分)

通过电阻 R 的电荷量 $q_R=1.5\times10^{-3}$ C (1分)

(3)通过金属棒的电流有效值 $I=\frac{I_m}{\sqrt{2}}=\frac{0.036}{\sqrt{2}}$ A (1分)

一个周期内产生的热量 $Q=I^2r_2T$ (1分)

解得 $Q=1.08\pi\times10^{-3}$ J (1分)

(4)此时感应电动势大小 $e=0.72\cos60^\circ=0.36$ V,通过金属棒的电流 $I=0.018$ A,安培力大小 $F_A=IdB_2=0.018$ N (1分)

弹力大小 $F=kx=F_A$,弹簧形变量 $x=1.8$ cm

①当电流方向从 a 到 b 时,弹簧距离金属棒的距离为 6.8 cm (1分)

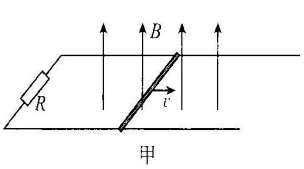
②当电流方向从 b 到 a 时,弹簧距离金属棒的距离为 3.2 cm (1分)

5 (10分)如图甲所示,两足够长的光滑平行导轨固定在水平面内,处于磁感应强度大小为 B、方向竖直向上的匀强磁场中,导轨间距为 L,一端连接阻值为 R 的电阻.一金属棒垂直导轨放置,质量为 m,接入电路的电阻为 r.在金属棒中点对棒施加一个水平向右、平行于导轨的拉力,棒与导轨始终接触良好,导轨电阻不计,重力加速度为 g.

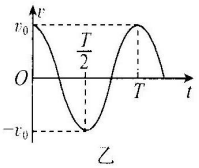
(1)若金属棒以速度 v_0 做匀速运动,求棒受到的拉力大小 F_1;

(2)若金属棒在水平拉力 F_2 作用下,速度 v 随时间 t 按余弦规律变化,如图乙所示,取水平向右为正方向,求 $t=0$ 到 $t=\frac{T}{4}$ 的过程中,整个回路产生的热量 Q 以及拉力 F_2 做的功 W;

(3)在(2)的情况下,求 $t=0$ 到 $t=\frac{T}{4}$ 的过程中,通过电阻 R 的电荷量 q 及拉力 F_2 的冲量 I.



甲



乙

解:(1)金属棒匀速运动时产生的感应电动势 $E=BLv_0$ (1分)

形成的感应电流 $I=\frac{E}{R+r}$

受到的安培力 $F_0=ILB$ (1分)

由平衡条件有 $F_1=F_0$

解得 $F_1=\frac{B^2L^2v_0}{R+r}$ (1分)

(2)速度随时间的变化关系为 $v=v_0\cos\frac{2\pi}{T}t$

电路中产生余弦式交变电流，电动势的峰值 $E_0=BLv_0$

电动势的有效值 $E=\frac{E_0}{\sqrt{2}}$

产生的热量 $Q=\frac{E^2}{R+r}\cdot\frac{T}{4}$ （1分）

解得 $Q=\frac{B^2L^2v_0^2T}{8(R+r)}$ （1分）

安培力做的功 $W_A=-Q$

由动能定理有 $W+W_A=0-\frac{1}{2}mv_0^2$ （1分）

解得 $W=\frac{B^2L^2v_0^2T}{8(R+r)}-\frac{1}{2}mv_0^2$ （1分）

(3)单匝线圈在匀强磁场中转动产生交变电流的模型中，从平行磁感线位置开始转动后的四分之一周期内，流过线圈的电荷量为 $q=\bar{I}t=\frac{\Delta\Phi}{tR_{总}}t=\frac{BS}{R_{总}}=\frac{E_mT}{2\pi R_{总}}$（其中 $E_m=BS\omega$）

将本题由于速度变化产生交变电流的情景与单匝线圈在匀强磁场中转动产生交变电流的模型类比，可得

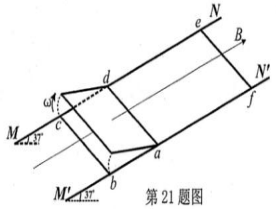
$q=\frac{BS}{R_{总}}=\frac{E_0T}{2\pi R_{总}}=\frac{BLv_0T}{2\pi(R+r)}$ （1分）

根据动量定理有 $I-I_{安}=0-mv_0$ （1分）

又因为 $I_{安}=\bar{F}t=BL\bar{I}t=BLq$

$I=I_{安}-mv_0=\frac{B^2L^2v_0T}{2\pi(R+r)}-mv_0$ （1分）

6. （10分）如图所示，电阻不计的粗糙金属轨道 MN 与 $M'N'$ 平行放置，轨道间距 L=2 m，轨道平面与水平方向成 37°角。同种材料、粗细均匀的正方形金属框 $abcd$ 边长也为 L，a、d 两点通过铰链与轨道连接。在外力 F_0（F_0 未知）的作用下，使金属框 $abcd$ 以 ad 为转轴顺时针匀速转动，转动角速度 ω=1rad/s。t=0 时刻，ab 边、cd 边分别与轨道重合，此时水平放置的导体杆 ef 在导轨上静止释放。已知导体杆 ef 与轨道之间的动摩擦因数 $\mu=\frac{3}{4}$（最大静摩擦力等于滑动摩擦力），且杆 ef 与 ad 间距足够远。金属框 $abcd$ 质量 $m_1=\frac{6\pi}{49}$ kg，各边电阻均为 1Ω；杆 ef 质量 $m_2=\frac{1}{14}$ kg，电阻为 1Ω。空间存在平行于轨道且斜向上的匀强磁场，磁感应强度 B=0.5T。（sin37°=0.6，cos37°=0.8）



第 21 题图

(1) 金属框 $abcd$ 从 t=0 时刻转过 37°时，请比较 b 点与 c 点的电势高低，并求出 bc 边产生的电动势；

(2) 金属框 $abcd$ 从 t=0 时刻转过 90°的过程中，求外力 F_0 对金属框 $abcd$ 所做的功 W；

(3) 金属框 $abcd$ 从 t=0 时刻转过 90°时，求杆 ef 的瞬时速度大小。

21.（10分）（1）由题意：$\varphi_c>\varphi_b$ （1分）

在金属框转至水平方向时：$v=\omega L$，$E=BLv\cos37°=1.6V$ （1分）

（2）由题意电路的总电阻 $R_{总}=3.5\Omega$ ① （1分）

cd边中电流的有效值 $E_{有效}=\frac{BL^2\omega}{\sqrt{2}}=\sqrt{2}V$ ② （1分）

总焦耳热 $Q_{总}=\frac{E_{有效}^2}{R_{总}}\times\frac{T}{4}=\frac{2\pi}{7}(J)$，$W_{说A}=Q_{总}$ ③ （1分）

（只要步骤③正确，①~③步骤，得3分；若步骤③错误，则①②逐步给分）

$W_G=m_1g\times\frac{(L\sin37°+L\cos37°)}{2}=\frac{12\pi}{7}(J)$ （1分）

对金属框，有动能定理：$W-W_{说A}-W_G=0$ $\therefore W=2\pi(J)$（或用能量守恒）（1分）

（3）金属框转过90°的过程中，ef 杆沿轨道下滑。由动量定理：

$m_2g\sin37°\times t-\mu(m_2g\cos37°-\frac{1}{2}BIL)t=m_2v_1$，即 $\frac{1}{2}\mu BqL=m_2v_1$ （1分）

（说明：直接写 $\frac{1}{2}\mu BqL=m_2v_1$ 也可以，得1分）

金属框转过 90°的过程中：$E=\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$，$\therefore q=It=\frac{\Delta\Phi}{R_{总}}=\frac{4}{7}C$ （1分）

（说明：上两步中电荷量可以不用求，直接写出 $\frac{\mu B^2L^3}{2R_{总}}=m_2v_1$ 也可以，得2分）

$\therefore v_1=3m/s$ （1分）

注：以上各步用其他方法解题的，只要合理，得同样的分。

7. （10分）在平面坐标 xOy 沿 x 轴方向上分布有如图1所示的光滑金属导轨，其中 AD 为左端接有一个定值电阻 R 的平行导轨，DG 为相互嵌套、彼此绝缘（如放大图所示）的正弦型导轨，O_1、O_2 为两个交点，水平长度为 $2L$；在 AB、CD 区域分布有宽度为 $L/2$、磁感应强度为 B、方向垂直纸面向外的匀强磁场；DG 区域分布有相同的磁场。质量为 m 电阻不计的导体棒在如图2(后半段为正弦型)所示的外力 F 的作用下，从静止开始运动，恰好可以匀速穿过 CD 区域。已知导轨间距 d = 0.5 m，F_0 = 8 N、m = 1 kg、R = 0.5 Ω、B = 2 T、L = 2 m，导体棒运动过程中始终保持保持水平，求导体棒：

(1) 到达 C 处时的速度大小；

(2) 从 A 运动到 D 所用的时间；

(3) 从 D 运动到 F 的过程中外力 F 所做的功和通过电阻的电量。

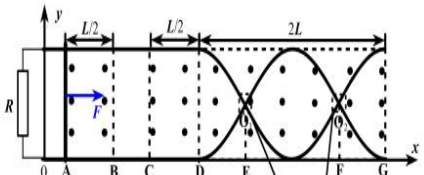


图1

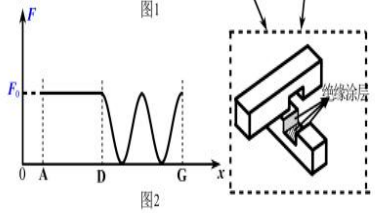


图2

21.【解析】：

(1) $F_A=F_0=\frac{B^2d^2v_m}{R}$ （1分）

$v_m=\frac{F_0R}{B^2d^2}=4$ m/s （1分）

(2) 对全过程使用动量定理可得：

$F_0t-\frac{B^2d^2L}{R}=mv_m$ （2分）

$t=\frac{B^2d^2L}{F_0R}+\frac{mR}{B^2d^2}=1$ s （2分）

(3) 判断做匀速运动

$F_A=\left|\frac{B^2d^2v_m}{R}\cos\omega t\right|=F$ （1分）

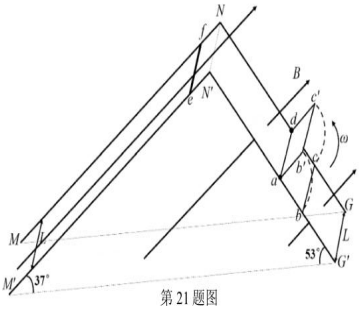
$e=Bdv_m\cos\omega t=\dfrac{F_0R}{Bd}\cos\omega t$　　$W_F=Q=\dfrac{E_{有}^2}{R}t=\dfrac{3}{4}F_0L=12\text{ J}$　　（1 分）

等效为交流电的线框旋转可得：

$E_m=\dfrac{F_0R}{Bd}BS\omega$，$\omega=\dfrac{2\pi}{T}=\dfrac{2\pi F_0R}{B^2d^2L}$，$BS=\dfrac{LBd}{2\pi}$　　（1 分）

$q=\dfrac{\Delta\Phi}{R}=\dfrac{2BS}{R}=\dfrac{LBd}{\pi R}=4/\pi$　　（1 分）

8.如图所示，弯折成 90^0 角的两根足够长金属导轨平行竖直放置，形成左右两个斜导轨平面，左导轨平面与水平面成 37°角，右导轨平面与水平面成 53°角，两导轨间距 $L=2$m，电阻不计。同种材料、粗细均匀的正方形金属框 $abcd$ 边长也为 L，a、d 两点通过金属铰链与导轨连接。在外力作用下，使金属框 $abcd$ 以 ad 边为转轴逆时针匀速转动，转动角速度 $\omega=1$rad/s。$t=0$ 时刻，ab 边、cd 边分别与导轨 $N'G'$、NG 重合，此时水平放置的金属杆 ef 在 $NN'M'M$ 导轨上由静止释放。已知杆 ef 与 $NN'M'M$ 导轨之间的动摩擦因数 $\mu=0.5$（最大静摩擦力等于滑动摩擦力）。金属框 $abcd$ 各边电阻均为 2Ω；杆 ef 质量 $m=\dfrac{1}{14\pi}$kg，电阻为 2Ω，空间存在平行于导轨 $NN'M'M$ 且斜向上的匀强磁场，磁感应强度 $B=0.5$T，不计 ef、ad 与导轨间的接触电阻。（$\sin37°=0.6$，$\cos37°=0.8$）



第 21 题图

（1）金属框 $abcd$ 从 $t=0$ 时刻转至 90°时，请比较 b'点与 c'点的电势高低，并求出 $b'c'$边产生的电动势；

（2）金属框 $abcd$ 从 $t=0$ 时刻转过 180°的过程中，求金属框 $abcd$ 产生的焦耳热；

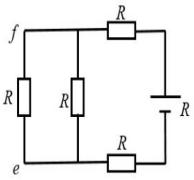
（3）金属框 $abcd$ 从 $t=0$ 时刻转过 90°时，求杆 ef 的瞬时速度大小。

21. 解：（1）此时线框中 bc 边垂直切割磁感线，由右手定则判断：

c'点电势高于 b'点电势（即 $\varphi_{c'}>\varphi_{b'}$）【1 分】

$e=BL\cdot L\omega=2$V【1 分】

（2）金属框 $abcd$ 从 t=0 时刻转过 180°的过程中产生半周期的正弦交电流，此交流电电动势的有效值：$E=\dfrac{e}{\sqrt{2}}=\sqrt{2}$V。



电路结构分析如图所示，可求得总电阻：

$R_{总}=7\Omega$【1 分】

整个电路的焦耳热：

$Q_{总}=\dfrac{E^2}{R_{总}}\times\dfrac{\pi}{\omega}=\dfrac{2\pi}{7}$J【1 分】

热量分配：

$Q_{ef}=Q_{总}\times\dfrac{1}{14}=\dfrac{\pi}{49}$J【1 分】（或列 ef 杆的焦耳定律）

所以：$Q_{abcd}=Q_{总}-Q_{ef}=\dfrac{13\pi}{49}$J【1 分】

（3）对 ef 杆列动量定理：

$mg\sin37^\circ\cdot\Delta t-\mu(mg\cos37^\circ-\dfrac{1}{2}\bar{BI}L)\cdot\Delta t=mv-0$【2 分】

整理得：$(mg\sin37^\circ-\mu mg\cos37^\circ)\cdot\dfrac{\pi}{2\omega}-\dfrac{1}{2}BLq_{总}=mv-0$

总电量：$q_{总}=\dfrac{BL^2}{R_{总}}=\dfrac{2}{7}C$【1 分】

解得：$v=2\pi$ m/s【1 分】

（经判断此时导体棒并未脱离导轨）

第 3 节　涡流、电磁阻尼和电磁驱动

一、电磁感应现象中的感生电场

1. 感生电场：变化的磁场能在周围空间激发一种电场，我们把这种电场叫感生电场。

⚠ 提醒

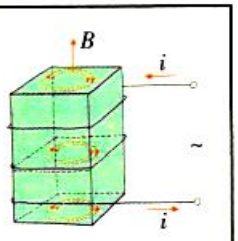
在变化的磁场周围产生电场，是一种普遍存在的现象，与是否存在闭合导体回路无关。

2.感生电场方向的判断

假设存在垂直磁场的环形回路 → 回路中的磁场方向 / 回路的磁通量变化 → 回路中感应电流的方向 → 感生电场的方向

3. 感生电动势：感生电场使导体产生的电动势叫感生电动势。感生电动势在电路中的作用是充当电源，其电路就是内电路，它与外电路连接就会对外电路供电。

二、涡流

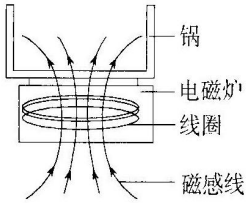
定义	导体可以看成是由许多闭合导体框组成的，当存在变化的磁场时，会在导体中感应出漩涡状的感应电流，叫涡流电流，简称涡流 
特点	若金属的电阻率小，涡流往往很强，产生的热量很多
应用	①涡流热效应的应用：如真空冶炼炉、电磁炉。 ②涡流磁效应的应用：如探雷器、安检门
防止	电动机、变压器等设备中应防止铁芯中涡流过大而导致浪费能量，损坏电器。 ①途径一：增大铁芯材料的电阻率。 ②途径二：用互相绝缘的硅钢片叠成的铁芯代替整块硅钢铁芯

【理解】

①涡流是整块导体发生的电磁感应现象，同样遵循法拉第电磁感应定律。

②磁场变化越快($\dfrac{\Delta B}{\Delta t}$越大)，导体的横截面积 S 越大，导体材料的电阻率越小，形成的涡流就越大。

【典例】如图所示是描述电磁炉工作原理的示意图。炉子的内部有一个金属线圈，当电流通过线圈时会产生磁场，这个磁场的大小和方向是不断变化的，这个变化的磁场又会引起放在电磁炉上面的铁质（或钢质）锅底内产生感应电流，由于锅底有电阻，所以感应电流会在锅底产生热效应，这些热能便起到加热食物的作用。因为电磁炉是以电磁感应产生电流，利用电流的热效应产生热量，所以不是所有的锅或器具都适用。以下说法正确的是　　（　　）



A.最好使用铝锅或铜锅

B.最好使用平底不锈钢锅或铁锅

C.最好使用陶瓷锅或耐热玻璃锅

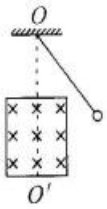
D.在电磁炉与铁锅之间放一层白纸后无法加热铁锅

【答案】B

三、电磁阻尼和电磁驱动

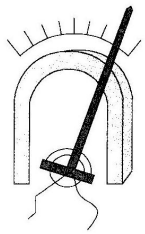
1.电磁阻尼

(1)电磁阻尼:小金属环用绝缘绳挂在O处,金属环在摆动的过程中,由于安培力的阻碍作用,金属环摆动的角度越来越小,直到环只在磁场区域发生摆动,这种现象称为电磁阻尼.



(2)应用:电学仪表指针迅速停下来、电磁制动器.

【典例】如图所示,磁电式电流表的线圈常用铝框做骨架,把线圈绕在铝框上,铝框的两端装有转轴,转轴的两边各有一个螺旋弹簧(绕制方向相反)。关于磁电式电流表,下列说法正确的是 ( )



A.线圈通电后,由于螺旋弹簧的弹力作用,可以使指针尽快稳定下来

B.线圈通电后,由于铝框中的电磁阻尼作用,可以使指针尽快稳定下来

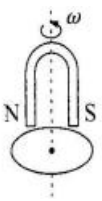
C.线圈骨架换成塑料,通电后也可以使指针尽快稳定下来

D.在运输时要把正负接线柱用导线连在一起,主要是为了增强铝框中的电磁阻尼作用

【答案】B

2.电磁驱动

如果磁场相对导体运动,导体中会产生感应电流,感应电流使导体受到安培力的作用,安培力使导体运动起来,这种现象叫作电磁驱动.

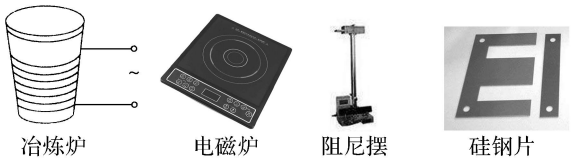


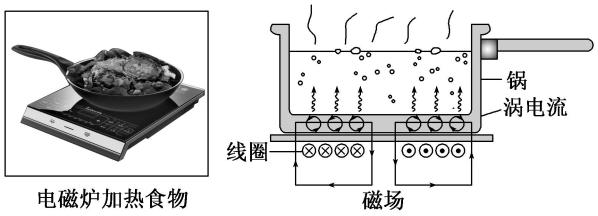
【注意】磁铁与线圈之间存在相对运动

3.**电磁阻尼与电磁驱动的比较**

		电磁阻尼	电磁驱动
不同点	成因	由于导体在磁场中运动而产生感应电流,从而使导体受到安培力	由于磁场运动引起磁通量的变化而产生感应电流,从而使导体受到安培力
	效果	安培力的方向与导体运动方向相反,阻碍导体运动	导体受安培力的方向与导体运动方向相同,推动导体运动
	能量转化	导体克服安培力做功,其他形式的能转化为电能,最终转化为内能	由于电磁感应,磁场能转化为电能,通过安培力做功,电能转化为导体的机械能,而对外做功
相同点		两者都是电磁感应现象,都遵循楞次定律,都是安培力阻碍引起感应电流的导体与磁场间的相对运动。	

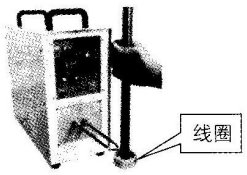
【应用模型】





甲方案中,铝板摆动时能产生涡流,起电磁阻尼的作用

管道高频焊机可以对由钢板卷成的圆管的接缝实施焊接.焊机的原理如图所示,圆管通过一个接有高频交流电源的线圈,线圈所产生的交变磁场使圆管中产生交变电流,电流产生的热量使接缝处的材料熔化后焊接在一起.



家用电度表(转盘式)————利用涡流

家用电度表的工作原理是当用电时,电压线圈与电流线圈产生的两个磁场在铝质表盘上相互作用,会产生推动铝质表盘从左向右的正向转动,从而带动齿轮机构并最终带动机械数字码盘实现用电计量,家用电表的转盘中有涡流产生,与涡流有关,

第4节 互感和自感

一、互感现象

1.互感现象

两个线圈之间并没有导线连接,但当一个线圈中的电流变化时,它所产生的变化的磁场会在另一个线圈中产生感应电动势。这种现象叫互感。

2. 互感电动势

由互感现象产生的感应电动势叫互感电动势。

3. 应用与防止

(1)利用互感现象可以把能量由一个线圈传递到另一个线圈，因此互感在电工技术和电子技术中有广泛的应用。变压器就是利用互感现象制成的。

(2)在电力工程中和电子电路中，互感现象有时会影响电路的正常工作，这时要设法减小电路间的互感。

⚠ 提醒

互感现象不仅发生于绕在同一铁芯上的两个线圈之间，而且可以发生于任何两个相互靠近的电路之间。

二、自感现象

1. **定义**：当一个线圈中的电流变化时，它所产生的变化的磁场在线圈本身激发出感应电动势。这种现象称为自感。

2. 自感电动势

(1)定义：由于自感而产生的感应电动势叫自感电动势。

(2)作用：总是阻碍导体中原来电流的变化。

(3)当电流增大时，自感电动势与原电流方向相反；当电流减小时，自感电动势与原电流方向相同。总之，自感电动势起着推迟电流变化的作用。

(4)大小：自感电动势也遵从法拉第电磁感应定律。

自感电动势跟电流的变化率成正比，$E=L\frac{\Delta I}{\Delta t}$。

⚠ 提醒

自感电动势阻碍原电流的变化，而不是阻止，电流仍会变化，只是使原电流的变化时间变长。

3. 自感系数

(1)定义：描述线圈在电流变化快慢相同的情况下，产生的感应电动势不同的特性，用符号 L 表示。

(2)自感系数的大小：由线圈本身的特性决定，与线圈的大小、形状、匝数，以及是否有铁芯等因素有关。线圈的长度越大，线圈的横截面积越大，单位长度的匝数越多，线圈的自感系数 L 就越大；线圈有铁芯比无铁芯时自感系数 L 大得多。

(3)单位：亨利(H)，1 H $=10^3$ mH$=10^6$ μH。

$L=\mu n^2 V$

V 为螺线管的体积，n 为单位长度的匝数，磁导率为 μ。

4. 自感现象的应用与防止

(1)应用：在交流电路中，电感线圈通直流、阻交流，通低频、阻高频。在各种电器设备和无线电技术中应用广泛，如日光灯电路中的镇流器，LC 振荡电路。

(2)危害与防止：切断自感系数很大、电流很强的电路瞬间，会产生很高的自感电动势，形成电弧，危及工作人员及设备安全，应采用特别的开关。制作精密电阻时，采用双线绕法消除自感现象。

5.自感现象的四大特点

(1)自感电动势总是阻碍导体中原电流的变化。

(2)自感线圈的三个等效作用

①通电瞬间，自感线圈相当于大电阻；

②断电瞬间，自感线圈相当于电源；

③电流稳定时，自感线圈相当于定值电阻.

(3)分析自感现象的两个注意事项

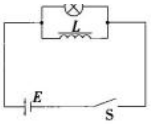
①通过自感线圈中电流不能发生突变，即通电过程中，电流逐渐变大，断电过程中，电流逐渐变小；

②断电自感现象中灯泡是否“闪亮”问题的判断在于分析瞬时电流的变化情况.

(4)线圈的自感系数越大，自感现象越明显，自感电动势只是延缓了过程的进行，但它不能使过程停止，更不能使过程反向。

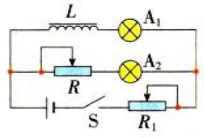
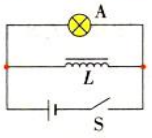
三、磁场中的能量

开关闭合时，线圈中有电流，电流产生磁场，能量储存在磁场中；开关断开时，线圈的作用相当于电源，把磁场中的能量转化成电能。

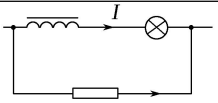
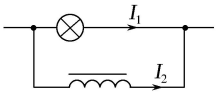


四、两种自感现象

1.通电自感与断电自感的比较

项目	通电自感	断电自感
电路图		
器材要求	A_1、A_2 同规格，$R=R_L$，L 较大	L 很大(有铁芯)，$R_L \ll R_A$
现象	在 S 闭合的瞬间，A_2 灯立即亮起来，A_1 灯逐渐变亮，最终一样亮	在开关 S 断开时，灯 A 突然闪亮一下后再逐渐熄灭
原因	开关闭合时，通过电感线圈的电流迅速增大，线圈产生自感电动势，阻碍电流的增大，使通过 A_1 灯的电流比通过 A_2 灯的电流增加得慢	断开开关 S 时，通过线圈的电流减小，线圈产生自感电动势，此时线圈相当于电源，通过灯泡 A 的电流与原方向相反，由于 $R_L \ll R_A$，使得灯泡 A 出现闪亮一下的情况
能量转化情况	电能转化为磁场能	磁场能转化为电能

2.自感中“闪亮”与“不闪亮”问题

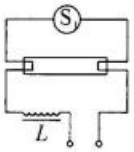
	与线圈串联的灯泡	与线圈并联的灯泡
电路图		
通电时	电流逐渐增大，灯泡逐渐变亮	电流突然增大，然后逐渐减小达到稳定
断电时	电流逐渐减小，灯泡逐渐变暗，电流方向不变	电路中稳态电流为 I_1、I_2：①若 $I_2 \leqslant I_1$，灯泡逐渐变暗；②若 $I_2 > I_1$，灯泡闪亮后逐渐变暗。两种情况灯泡中电流方向均改变

【小结】分析自感问题的三个技巧

三个技巧：
- 通电自感：通电时自感线圈相当于一个变化的电阻，阻值由无穷大逐渐减小
- 断电自感：断电时自感线圈相当于电源，电动势由某值逐渐减小到零
- 电流稳定时，自感线圈相当于导体，是否需要考虑其电阻，根据题意而定

3.日光灯的工作原理

如图所示，S_1 为启辉器（启辉器中有动静触片、氖气，初始状态为断路），S_2 为开关（图中未画出），L 为镇流器（自感线圈），灯管为图中矩形，灯管两端有灯丝，灯管中有氩气、水银、荧光粉．日光灯需要高压才能启动，家用电压为 220 V，分析日光灯的启动原理．



已知氖气电离的电压为 60～70 V，在开关接通的瞬间，电源电压立即通过镇流器和灯丝加到启辉器的两极，220 V 的电压立即使启辉器中的惰性气体氖气电离，启辉器由断路变成通路，产生辉光，此时电阻很大，产生大量热量，使动触片伸长，动静触片接触，镇流器线圈和灯管中的灯丝就有电流通过，但此刻灯管断路．

动静触片接触后，启辉器电阻减小，产生的热量减小，动触片自动复位，启辉器由通路变成断路．

在启辉器变成断路的瞬间，电路电流突然消失，镇流器产生很大的自感电动势，与电源电压叠加形成高压作用于灯管两端，灯丝在两端高电压的作用下，释放出电子，电子被高压加速撞击惰性气体氩气，使惰性气体氩气电离发光，氩气产生紫外线照射到荧光粉上产生肉眼可见的白光，灯管由断路变成通路，日光灯正常发光．

日光灯启动后，仅需要很小的电压就可以维持正常发光．交流电通过镇流器，镇流器中产生自感电动势，自感电动势阻碍线圈中的电流变化，镇流器起到降压限流的作用，使回路中电流稳定在灯管的额定电流范围内，灯管两端的电压也稳定在额定工作电压范围内．

(1)启辉器相当于一个自动开关，使镇流器产生自感电动势．

(2)镇流器在日光灯启动时，因启辉器的断开而产生高压，使日光灯正常启动．

(3)镇流器在日光灯正常发光后，相当于一个定值电阻，起保护电路的作用．

【记忆口诀】

电磁感应磁生电，磁通变化是条件。
回路闭合有电流，电路断开是电源。
感应电动势大小，磁通变化率知晓。
楞次定律定方向，阻碍变化是关键。
导体切割磁感线，右手定则更方便。
楞次定律是抽象，真正理解从三方，
阻碍磁通增和减，相对运动总反抗，
自感电流想阻挡，能量守恒理应当。
电磁感应题型多，力能分析找思路。
电流联系力与路，动量能量莫忘记。
含容恒流和振动，知识综合和等效。

【本章高频考点】

1.左右手定则，楞次定律。
2.电磁感应现象的综合应用（以压轴题的形式出现）

第三部分 物理方法概述

一、等效法

等效法就是在特定的某种意义上，在保证效果相同的前提下，将陌生的、复杂的、难处理的问题转换成熟悉的、容易的、易处理的问题的一种方法。

二、微元法

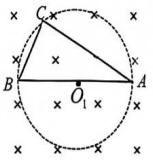
微元法是指在处理问题时，从对事物的极小部分分析入手，进而分析事物整体的方法。其思想就是“化整为零”，先分析“微元”，再通过“微元”分析整体。

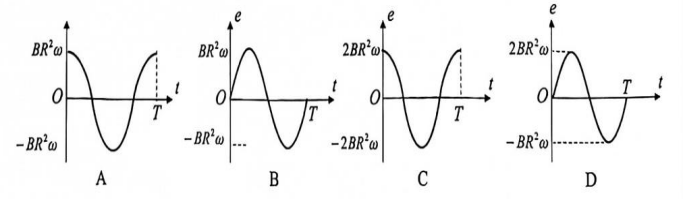
三、守恒思想

守恒思想是指在物理变化的过程中，常存在着某些不变的关系或不变的量，在讨论一个物理变化过程时，对其中的各个量或量的变化关系进行分析，寻找到整个过程中或过程发生前后存在着的不变关系或不变量的思维方法。

第四部分 易错、疑难问题选

1. 如图所示，空间存在垂直于纸面向内的匀强磁场 B，现有用细软导线围成的三角形导体框 ABC，其中 AB 两点固定在半径为 R 的圆 O_1 的直径两端，C 点一直沿着圆弧做角速度为 ω 的匀速圆周运动，则导线框 ABC 上的 C 点从 A 点出发，逆时针运动一周（时间为 T）过程中产生的感应电动势（取电流 B 到 A 的方向为电动势的正方向）随时间的变化图线正确的是





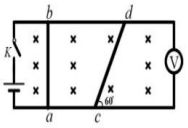
【答案】A

2. 如图所示，水平放置的平行光滑导轨左端连接开关 K 和电源，右端接有理想电压表。匀强磁场垂直于导轨所在的平面。ab、cd 两根导体棒单位长度电阻相同、单位长度质量也相同，ab 垂直于导轨，cd 与导轨成 60°角。两棒的端点恰在导轨上，且与导轨接触良好，除导体棒外，其余电阻不计。下列说法正确的是

A. 闭合开关 K 瞬间，两棒所受安培力大小相等

B. 闭合开关 K 瞬间，两棒加速度大小相等

C. 断开开关 K，让两棒以相同的速度水平向右切割磁感线，电压表无示数

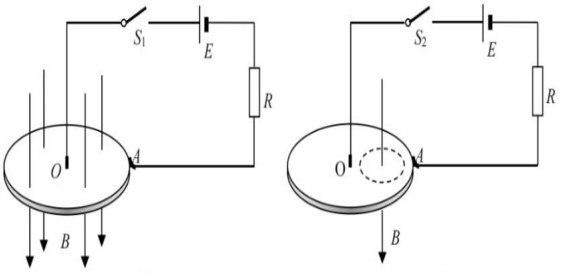


第 12 题图

D. 断开开关 K，固定 ab，让 cd 棒以速度 v 沿导轨向右运动时电压表示数为 U_1；固定 cd，让 ab 棒以速度 v 沿导轨向右运动时电压表示数为 U_2，则 $U_1=U_2$

【答案】A

3. 电阻不可忽略的导电圆盘的边缘用电阻不计的导电材料包裹，圆盘可绕固定点 O 在水平面内转动，其轴心 O 和边缘处电刷 A 均不会在转动时产生阻力，空气阻力也忽略不计。用导线将电动势为 E 的电源、导电圆盘、电阻和开关连接成闭合回路，如图甲所示在圆盘所在区域内充满竖直向下的匀强磁场，如图乙所示只在 A、O 之间的一块圆形区域内存在竖直向下的匀强磁场，两图中磁场的磁感应强度大小均为 B，且磁场区域固定。将图甲和图乙中的开关 S_1 和 S_2 闭合，经足够长时间后，两图中的圆盘转速均达到稳定。则



甲　　乙

A. 从上往下看，圆盘沿顺时针方向转动

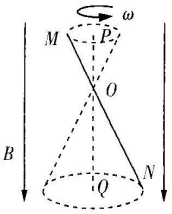
B. 刚闭合开关时，图甲中的圆盘比图乙中的圆盘加速得快

C. 将两图中的开关断开，图乙中的圆盘仍然匀速转动

D. 将两图中的开关断开，图甲中的圆盘比图乙中的圆盘减速得快

【答案】B

4. 如图所示，空间存在竖直向下的匀强磁场，金属棒 MN 以角速度 ω 绕过 O 点的竖直轴 PQ 沿逆时针方向（从上往下看）旋转。$NO=2MO$，则



A. M 点电势高于 N 点电势

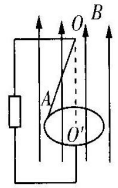
B. N、O 两点间电势差是 M、O 两点间电势差的 2 倍

C. 若磁感应强度 B 增加一倍，则 M、N 两点间的电势差不变

D. 若角速度 ω 增加一倍，则 M、N 两点间的电势差将变为原来的 4 倍

【答案】A

5. 如图所示，水平固定的光滑圆铜环的圆心为 O'，OO' 为过圆心的竖直轴，长为 $2l$、电阻为 r 的铜棒 OA 的一端在 O 处，另一端与铜环良好接触，OA 与 OO' 的夹角为 30°，整个装置处在磁感应强度大小为 B、方向竖直向上的匀强磁场中。现使铜棒 OA 绕 OO' 以角速度 ω 逆时针（俯视）匀速转动，A 端始终在铜环上，定值电阻的阻值为 $3r$，其他电阻不计，下列说法正确的是



A. O 点的电势比 A 点的电势低

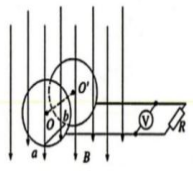
B. 回路中的电流为 $\dfrac{\omega Bl^2}{4r}$

C. 该定值电阻两端的电压为 $\dfrac{3}{8}\omega Bl^2$

D. 该定值电阻上的热功率为 $\dfrac{\omega^2B^2l^4}{16r}$

【答案】AC

6. 如图所示，水平导体棒 ab 质量 m=0.1πkg、长 L=1m、电阻 R_{ab}=0.25Ω，其两个端点分别搭接在竖直平行正对放置的两光滑金属圆环上，两圆环半径均为 r=1m、电阻不计。阻值 R=0.25Ω 的电阻用导线与圆环相连接，理想交流电压表 V 接在电阻 R 两端。整个空间有磁感应强度大小为 B=1T、方向竖直向下的匀强磁场。导体棒 ab 在外力 F 作用下以速率 v=1m/s 绕两圆环的中心轴 OO′匀速转动，ab 在圆环最低点时记为 t=0 时刻，重力加速度为 g=10m/s²。下列说法正确的是



A. 棒中的电流 $i=2\sin t$ (A)

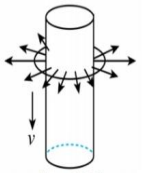
B. 电压表的示数为 $\sqrt{2}$/2V

C. 从 t=0 到 0.5πs 的过程中通过 R 的电量为 2C

D. 从 t=0 到 0.5πs 的过程中外力 F 做功为 1.5πJ

【答案】CD

7. 如图所示，一足够长的竖直放置的圆柱形磁铁，产生一个中心辐射的磁场（磁场水平向外），一个与磁铁同轴的圆形金属环，环的质量 m=0.2kg，环单位长度的电阻为0.1πΩ/m，半径 r=0.1m（稍大于圆柱形磁铁的半径）。金属环由静止开始下落，环面始终水平，金属环切割处的磁感应强度大小均为 B=0.5T，不计空气阻力，重力加速度 g 取 10m/s²。则



第 13 题图

A. 环下落过程的最大速度为 0.4m/s

B. 环下落过程中，电流始终为逆时针（从上往下看）

C. 若下落时间为 2s 时环已经达到最大速度，则这个过程通过环截面的电荷量是 32C

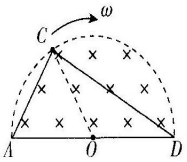
D. 若下落高度为 3m 时环已经达到最大速度，则这个过程环产生的热量为 4.4J

【答案】D

8. 如图所示，在以水平线段 AD 为直径的半圆形区域内有磁感应强度大小为 B、方向垂直纸面向里的有界匀强磁场. 现有一个闭合导线框 ACD（由细软弹性电阻丝制成），端点 A、D 固定. 在竖直面内，将导线与圆周的接触点 C 点以恒定角速度 ω（相对圆心 O）从 A 点沿圆弧移动至 D 点，使导线框上产生感应电流. 设导线框的电阻恒为 r，圆的半径为 R，从 A 点开始计时，下列说法正确的是（　　）

A. 导线框中感应电流的方向始终为逆时针

B. 导线框中感应电流的方向先顺时针，后逆时针

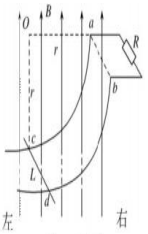


C. 在 C 从 A 点移动到 D 点的过程中，穿过 ACD 回路的磁通量与时间的关系为 $\Phi=BR^2\cos\omega t$

D. 在 C 从 A 点移动到图中 $\angle CAD=60°$ 位置的过程中，通过导线截面的电荷量为 $\dfrac{\sqrt{3}BR^2}{2r}$

【答案】D

9. 如图所示，两根等高光滑的 $\frac{1}{4}$ 圆弧轨道，半径为 r、间距为 L，轨道电阻不计。在轨道顶端连有一阻值为 R 的电阻，整个装置处在一竖直向上的匀强磁场中，磁感应强度为 B。现有一根长度稍大于 L、电阻不计的金属棒从轨道最低位置 cd 开始，在神墙拉力作用下以初速度 v_0 向右沿轨道做匀速圆周运动至 ab 处，则该过程中



第 12 题图

A. 通过 R 的电流方向为 $a\to R\to b$　　B. 通过 R 的电流大小为 $\dfrac{BLv_0}{R}$

C. 流过 R 的电荷量为 $\dfrac{\pi BLr}{2R}$　　D. R 上产生的热量为 $\dfrac{\pi rB^2L^2v_0}{4R}$

【答案】D

10. 如图 16-11 所示，将一根绝缘硬金属导线弯曲成一个完整的正弦曲线形状，它通过两个小金属环 a、b 与长直金属杆导通，在外力 F 作用下，导线可以在杆上无摩擦地滑动. 杆的电阻不计，导线电阻为 R，a、b 间距离为 $2L$，导线组成的正弦图形顶部到杆的距离都是 $\dfrac{L}{2}$. 在导线和杆平面内有一有界匀强磁场区域，磁场的宽度为 L，磁感应强度为 B. 现在外力 F 作用下导线沿杆以恒定的速度 v 向右运动，在运动过程中导线和杆组成的平面始终与磁场垂直. $t=0$ 时刻

导线从 O 点进入磁场，直到全部穿过磁场，外力 F 所做的功为 （　　）

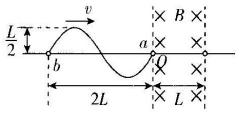


图 16-11

A. $\frac{B^2L^2v^2}{R}$　　B. $\frac{B^2L^3v}{2R}$

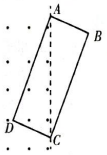
C. $\frac{3B^2L^3v}{4R}$　　D. $\frac{3B^2L^2v^2}{4R}$

【答案】C

11. 如图所示，矩形线框 ABCD 以恒定的角速度 ω 绕对角线 AC 转动。AC 的左侧存在着垂直纸面向外、磁感应强度为 B 的匀强磁场，已知 AB 长为 l_1，BC 长为 l_2，线框电阻为 R。$t=0$ 时刻线框平面与纸面重合，下列说法正确的是

A. 矩形线框该时刻的电流值最大

B. 矩形线框产生的感应电动势有效值为 $\frac{\sqrt{2}}{2}Bl_1l_2\omega$

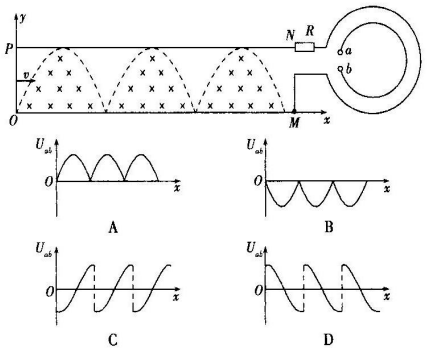


C. 矩形线框转过半圈过程中产生的热量为 $\frac{\pi B^2l_1^2l_2^2\omega}{2R}$

D. 矩形线框从图示位置转过 180°过程中，通过线框任意横截面的电荷量为 $\frac{Bl_1l_2}{R}$

【答案】D

12. 如图所示。导体直导轨 OM 和 PN 平行且 OM 与 x 轴重合，两导轨间距为 d，两导轨间垂直纸面向里的匀强磁场沿 y 轴方向的宽度按 $y=d\left|\sin\frac{\pi}{2d}x\right|$ 规律分布，两金属圆环固定在同一绝缘平面内，内、外圆环与两导轨接触良好，与两导轨接触良好的导体棒从 OP 开始始终垂直导轨沿 x 轴正方向以速度 v 做匀速运动，规定内圆环 a 端电势高于 b 端电势时，a、b 间的电压 U_{ab} 为正，下列 U_{ab}-x 图像可能正确的是 （　　）



【答案】D

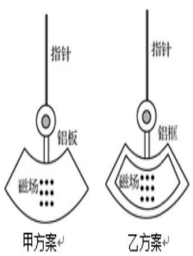
13. 为了使灵敏电流计的指针在零刻度附近快速停下，实验小组的同学利用“电磁阻尼”来实现。他们设计了如图所示的甲、乙两种方案，甲方案：在指针转轴上装上扇形铝板，磁场位于零刻度中间；乙方案：在指针转轴上装上扇形铝框，磁场位于零刻度中间。下列说法正确的是

A. 甲方案中，铝板摆动时磁通量不变，不会产生感应电流

B. 甲方案中，铝板摆动时都能产生涡流，起电磁阻尼的作用

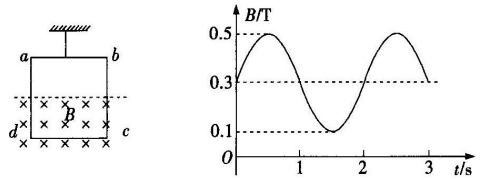
C. 乙方案中，铝框小幅度摆动时会产生感应电流

D. 乙方案比甲方案更合理



【答案】B

14. [多选]如图甲所示，轻质绝缘细线吊着一匝数为 10、边长为 1 m、总电阻为 1 Ω、总质量为 1 kg 的正方形闭合导线圈 $abcd$。在线圈的中间位置以下区域分布着方向垂直线圈平面向里的磁场，磁感应强度大小随时间变化的关系图象如图乙所示，图线为正弦曲线。g 取 10 m/s^2，则



图甲　　图乙

A. 线圈中产生的感应电流的方向一直沿顺时针方向

B. 线圈的平均电功率为 $\frac{\pi^2}{2}$ W

C. 通过线圈的电流有效值为 $\frac{\sqrt{2}}{2}\pi$ A

D. 在 $t=2$ s 时细线的拉力大小为 2 N

【答案】BC

第三章　交变电流

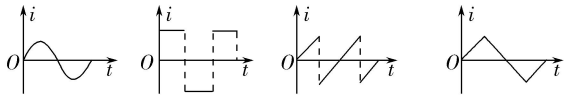
第一部分　基础知识点

第 1 节　交变电流

一、交变电流

1.定义：大小和方向都随时间做周期性变化的电流。

2.图象：如图(a)、(b)、(c)、(d)所示都属于交变电流。其中按正弦规律变化的交变电流叫正弦式交变电流，如图(a)所示。

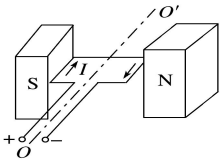


(a)　(b)　(c)　(d)

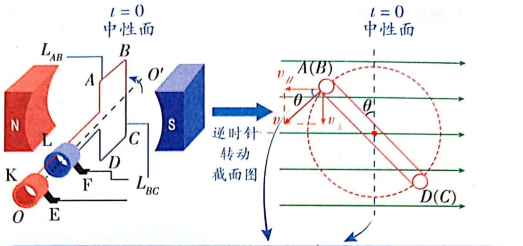
【规律】只要电流方向发生变化即为交流电。

二、交变电流的产生

1.产生：在匀强磁场里，线圈绕垂直于磁场方向的轴匀速转动。



2.正弦交变电流瞬时值表达式的推导



若线圈平面从中性面开始转动，则经过时间 t，线圈转过的角度为 $\theta=\omega t$，AB 边线速度与磁感线的夹角也为 $\theta=\omega t$

↓

AB 边转动的线速度大小 $v=\omega\frac{L_{BC}}{2}$

↓

AB 边产生的感应电动势

$e_{AB}=BL_{AB}v\sin\theta=BL_{AB}\omega\frac{L_{BC}}{2}\sin\theta=\frac{1}{2}BS\omega\sin\omega t$

↓

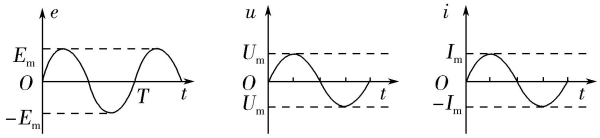
一匝线圈产生的感应电动势 $e_1=e_{AB}+e_{CD}=2e_{AB}=BS\omega\sin\omega t$

↓

N 匝线圈产生的总感应电动势 $e=Ne_1=NBS\omega\sin\omega t$

注意：若线圈平面处于与中性面成 φ_0 夹角位置开始计时，则瞬时值表达式中加初相位 φ_0 即可，表达式为 $e=NBS\omega\sin(\omega t+\varphi_0)$。若线圈以垂直中性面位置开始计时（此时 $\varphi_0=\frac{\pi}{2}$），则 $e=NBS\omega\cos\omega t$。

3.图象：用以描述交变电流随时间变化的规律，如果线圈从中性面位置开始计时，其图象为正弦曲线。如图(e)、(f)、(g)所示。

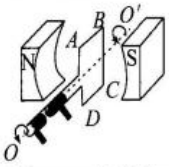


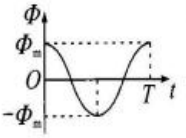
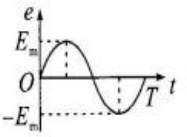
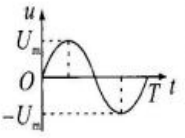
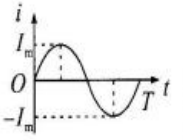
(e) (f) (g)

三、交变电流的变化规律

1.初始位置处于中性面处

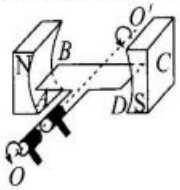
如图所示，匝数为 n 的金属线框由中性面开始以角速度 ω 匀速转动，线框内阻为 r，线框与电阻 R 串联形成闭合回路，线框的磁通量、产生的电动势、路端电压和电流的变化规律如下表所示.

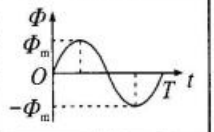
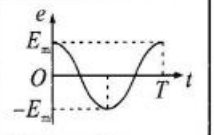
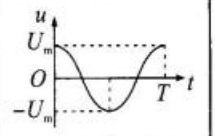
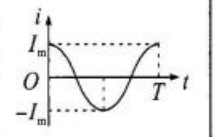


	瞬时表达式	图像
磁通量	$\Phi=\Phi_m\cos\omega t$ $=BS\cos\omega t$	
电动势	$e=E_m\sin\omega t$ $=nBS\omega\sin\omega t$	
电压	$u=U_m\sin\omega t$ $=\frac{RE_m}{R+r}\sin\omega t$	
电流	$i=I_m\sin\omega t$ $=\frac{E_m}{R+r}\sin\omega t$	

2. 初始位置处于磁通量为 0 处（峰值面）

如图所示，若金属线框由磁通量为 0 处开始匀速转动，线框的磁通量、产生的电动势、路端电压和电流的变化规律如下表所示.



	瞬时表达式	图像
磁通量	$\Phi=\Phi_m\sin\omega t$ $=BS\sin\omega t$	
电动势	$e=E_m\cos\omega t$ $=nBS\omega\cos\omega t$	
电压	$u=U_m\cos\omega t=$ $\frac{RE_m}{R+r}\cos\omega t$	
电流	$i=I_m\cos\omega t$ $=\frac{E_m}{R+r}\cos\omega t$	
周期 $T=\frac{2\pi}{\omega}$，频率 $f=\frac{1}{T}$ 记忆：角速度 $\omega=100\pi$→周期 $T=$ 0.02 s→频率 $f=50$ Hz		

3.解决交变电流图象问题的三点注意

(1)只有当线圈从中性面位置开始计时，电流的瞬时值表达式才是正弦形式。

(2)注意峰值公式 $E_m=NBS\omega$ 中的 S 为有效面积。

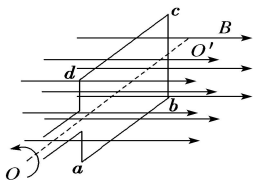
(3)在解决有关交变电流的图象问题时，应先把交变电流的图象与线圈的转动位置对应起来，再根据特殊位置求特征解。

四.交流电流产生过程中的**两个特殊位置**

1.中性面：

①定义：与磁场方向垂直的平面，是假想的一个参考面。

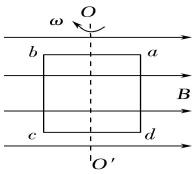
②特点：当线圈平面与中性面重合时，S⊥B，Φ最大，但此时 $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}=0$，$e=0$，$i=0$，线圈每经过中性面一次，电流方向就改变一次，线圈转动一周，两次经过中性面，所以电流的方向一个周期内要改变 2 次。



2.峰值面：

①定义：线圈平面与中性面垂直时所处的平面

②特点：S∥B，Φ=0，但 $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$ 最大，e 最大，i 最大，电流方向不改变。



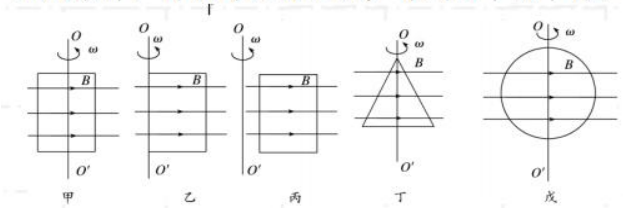
3. 电动势最大值的特点

交变电动势的最大值 $E_m=nBS\omega$，

最大值与线圈匝数、线圈面积、转动角

速度、磁感应强度有关，与线圈形状和转轴位置无关.

适用条件：转轴与磁场垂直，与线圈平面平行。



五、交流发电机

小型发电机（电压低于 500V）一般为旋转电枢（线圈）式发电机（电压过高，可能发生火花放电，滑环和电刷会烧坏）；大型发电机（电压几千伏---几万伏）一般为旋转磁极式发电机。

第 2 节 交变电流的描述

一、周期和频率

1.周期(T)：交变电流完成一次周期性变化(线圈转一周)所需的时间，单位是秒(s)，公式 $T=\frac{2\pi}{\omega}$。

2.频率(f)：交变电流在 1 s 内完成周期性变化的次数。单位是:赫兹(Hz)。

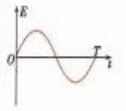
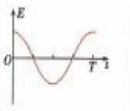
3.周期和频率的关系：$T=\frac{1}{f}$或 $f=\frac{1}{T}$。

二、峰值和有效值

1.交变电流的瞬时值、峰值、有效值和平均值的比较

物理量	物理含义	重要关系	适用情况及说明
瞬时值	交变电流某一时刻的值	从中性面开始计时 $e=E_m\sin\omega t$ $i=I_m\sin\omega t$	用于计算线圈某时刻的受力情况，负载的瞬时功率，氖灯的发光时间等问题(随时间而变化）
峰值（最大值）	最大的瞬时值	$E_m=nBS\omega$ $I_m=\frac{E_m}{R+r}$	讨论电容器、晶体管的击穿电压（耐压值）时使用(不随时间变化）
有效值	跟交变电流的热效应等效的恒定电流的值	$E=\frac{E_m}{\sqrt{2}}$；$U=\frac{U_m}{\sqrt{2}}$ $I=\frac{I_m}{\sqrt{2}}$（只适用于正余式交流电非正弦式交变电流一般不满足此关系。特别提醒：上述关系对于正弦交变电流的一个周期波形、半个周期波形、两端是 0 和峰值的$\frac{1}{4}$周期波形都成立。）	(1)计算与电流的热效应有关的量(如电功、电功率、电热等) (2)电气设备“铭牌”上所标的一般是指有效值 (3)保险丝的熔断电流为有效值 (4)交流电压表和电流表的读数为有效值
平均值	某段时间内感应电动势或电流的平均值	$E=BLv$ $E=n\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ $I=\frac{E}{R+r}$	计算通过电路截面的电荷量 $q=n\frac{\Delta\Phi}{R_{总}}$（随取时间而变化）

2.平均值的求法：

对比内容	正弦图像	余弦图像	二者联系
图像形状			正弦图像通过平移可得余弦图像，二者本质一样，只是计时起点不同
$0\sim\frac{T}{4}$	平均值 $\bar{E}=\frac{2}{\pi}nBS\omega$，最大值 $E_m=nBS\omega$	平均值 $\bar{E}=\frac{2}{\pi}nBS\omega$，最大值 $E_m=nBS\omega$	平均值 $\bar{E}=\frac{2}{\pi}E_m$
$0\sim\frac{T}{2}$	平均值 $\bar{E}=\frac{2}{\pi}nBS\omega$，最大值 $E_m=nBS\omega$	平均值 $\bar{E}=0$，最大值 $E_m=nBS\omega$	无关系
$0\sim\frac{3T}{4}$	平均值 $\bar{E}=\frac{2}{3\pi}nBS\omega$，最大值 $E_m=nBS\omega$	平均值 $\bar{E}=-\frac{2}{3\pi}nBS\omega$，最大值 $E_m=nBS\omega$	平均值大小相等、方向相反
$0\sim T$	平均值 $\bar{E}=0$，最大值 $E_m=nBS\omega$	平均值 $\bar{E}=0$，最大值 $E_m=nBS\omega$	平均值 $\bar{E}=0$

3.有效值的求法

（1）公式法

利用 $E=\frac{E_m}{\sqrt{2}}$、$U=\frac{U_m}{\sqrt{2}}$、$I=\frac{I_m}{\sqrt{2}}$计算，只适用于正(余)弦式交变电流。

【知识拓展】正（余）弦式交流电有效值公式的推导

设正弦交流电 $i=I_m\sin\omega t$（周期 $T=\frac{2\pi}{\omega}$）通过一纯电阻 R 时，瞬时功率为：$P=I_m^2\sin^2\omega t=\frac{1}{2}I_m^2R(1-\cos 2\omega t)$，式中 $\frac{1}{2}I_m^2R$ 为一不随时间变化的常量，而 $\frac{1}{2}I_m^2R\cos 2\omega t$ 是一个幅值为 $\frac{1}{2}I_m^2R$，周期为 $T'=\frac{2\pi}{2\omega}=\frac{T}{2}$ 的余弦函数。

作出 $P-t$ 图像如图 56-1 所示，图线与 t 轴所围的面积就是一定时间内交流电的发热量.

由图线的对称性可知，$\bar{P}$ 以上阴影部分的面积正好填补 $\bar{P}$ 以下阴影部分的面积，所以余弦曲线与 t 轴所包围的面积正好等于直线 $\bar{P}=\frac{1}{2}I_m^2R$ 与 t 轴所围的面积. 因此，一个周期内交流电的产生的热量 $Q_{交}=\bar{P}\cdot T=\frac{1}{2}I_m^2RT$. 根据有效值的定义，有 $Q_{交}=Q_{直}$，即 $\frac{1}{2}I_m^2RT=I^2RT$，故电流有效值 $I=\frac{I_m}{\sqrt{2}}$.

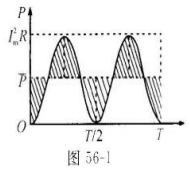


图 56-1

（2）有效值的定义计算法(非正弦式电流)

计算时要抓住“三同”：“相同时间”内“相同电阻”上产生“相同热量”，列式求解，注意时间至少取一个周期或周期的整

数倍。

①分段计算电热求和得出一个周期内产生的总热量.

②若图象部分是正弦(或余弦)式交变电流，其中的$\frac{1}{4}$周期(必须是从零至最大值或从最大值至零)和$\frac{1}{2}$周期部分可直接应用正弦式交变电流有效值与最大值间的关系$I=\frac{I_m}{\sqrt{2}}$、$U=\frac{U_m}{\sqrt{2}}$求解.

（3）能量关系法

当有电能和其他形式的能转化时，可利用能的转化和守恒定律来求有效值。

（4）微元法

例 2 如图 56-3 所示是示波器中的锯齿形扫描电压 u 随时间 t 的变化图像，已知最大扫描电压为 U_m，求此交变电压的有效值.

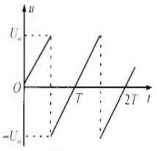
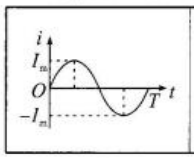


图 56-3

解析 我们按前半个周期进行计算，电压在这半个周期内随时间的变化规律可表示为 $u=kt$，再将$\frac{T}{2}$均分 n 等分，在第一个等分时间内交流电通过电阻 R 产生的热量为 $\Delta Q_1=\frac{\left(k\cdot\frac{T}{2n}\right)^2}{R}\cdot\frac{T}{2n}$，第二个等分时间内产生的热量为 $\Delta Q_2=\frac{\left(k\cdot 2\frac{T}{2n}\right)^2}{R}\cdot\frac{T}{2n}$，…，第 n 个等分时间内产生的热量为 $\Delta Q_n=\frac{\left(k\cdot n\frac{T}{2n}\right)^2}{R}\cdot\frac{T}{2n}$，故在$\frac{T}{2}$时间内所产生的总热量为 $Q=\frac{k^2T^3}{8n^3R}(1^2+2^2+\cdots+n^2)$，注意到 $U_m=k\cdot\frac{T}{2}$，$1^2+2^2+\cdots+n^2=\frac{1}{6}n(n+1)(2n+1)$，当 $n\to\infty$ 时，得 $Q_T=2Q=\frac{U_m^2T}{3R}$，利用 $Q_T=Q_{直}=\frac{U^2}{R}T$，解得有效值 $U=\frac{\sqrt{3}}{3}U_m$.

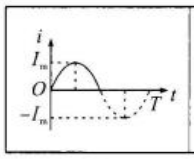
【有效值求法总结】

(1)完整的正弦式交流电的有效值



0～T，有效值为 $I=\frac{I_m}{\sqrt{2}}$

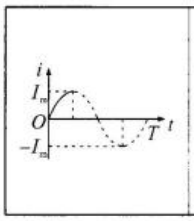
(2)$\frac{1}{2}$正弦式交流电的有效值



0～$\frac{T}{2}$，有效值为 $I=\frac{I_m}{\sqrt{2}}$

0～T，有效值为 $I=\frac{I_m}{2}$

(3)$\frac{1}{4}$正弦式交流电的有效值

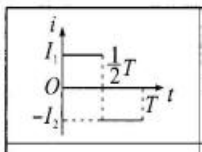


0～$\frac{T}{4}$，有效值为 $I=\frac{I_m}{\sqrt{2}}$

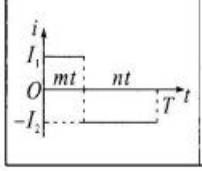
0～$\frac{T}{2}$，有效值为 $I=\frac{I_m}{2}$

0～T，有效值为 $I=\frac{I_m}{2\sqrt{2}}$

(4)矩形波交流电的有效值



0～T，有效值为 $I=\sqrt{\frac{I_1^2+I_2^2}{2}}$

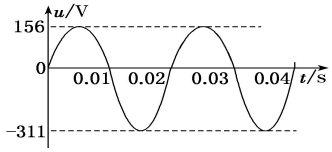


其中 $mt+nt=T$

0～T，有效值为

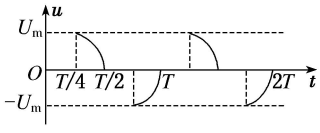
$I=\sqrt{\frac{mI_1^2+nI_2^2}{m+n}}$

[变式 1] 峰值不对称的波形

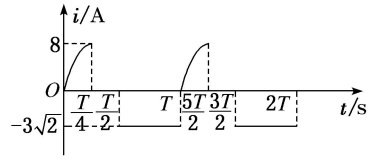


答案：174 V

[变式 2] $\frac{1}{4}$周期的波形

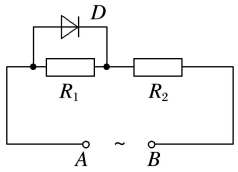


$U=\frac{U_m}{2}$

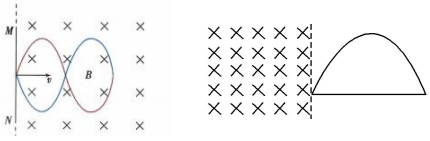
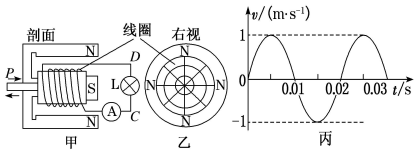
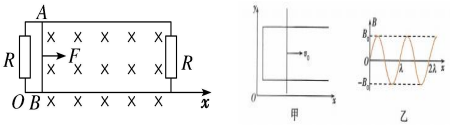
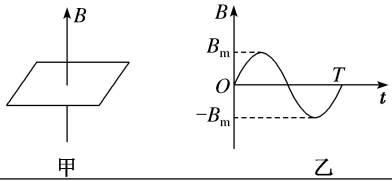


$I=\sqrt{17}$ A

【变式 3】含晶体二极管电路



三、产生正弦交流电的其他几种方式：

1.导体棒在匀强磁场中平动	导体棒在匀强磁场中匀速平动，但导体棒切割磁感线的有效长度按正弦规律变化，则导体棒组成的闭合电路中就会产生正弦式交变电流。如图。
2.导体棒在匀强磁场中振动	导体棒在匀强磁场中沿平行导轨平动切割磁感线时，棒的速度按正弦规律变化，则棒中会产生正弦交变电流。如图。
3.棒在不均匀磁场中平动	导体棒在磁场中匀速平动切割磁感线，在棒的平动方向上，磁场按照正弦规律变化，则棒中会产生正弦交变电流。如图 $B=B_0\sin\frac{\pi x}{2L}$
4.线圈处于周期性变化的磁场中	闭合线圈垂直于匀强磁场，线圈静止不动，磁场按正弦规律做周期性变化，则线圈中会产生正弦交变电流。如图。

四、正弦式交变电流的公式和图像(线圈在中性面位置开始计时)

1.电动势 e 随时间变化的规律：$e=E_m\sin\omega t$。

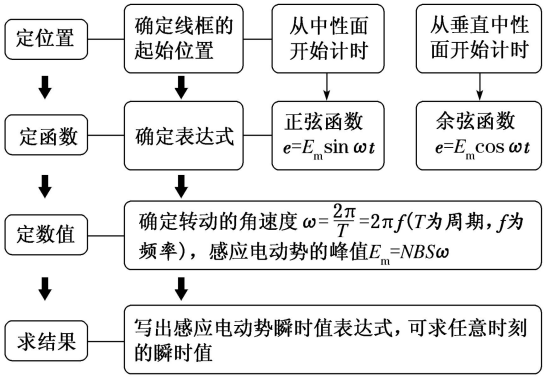
2.负载两端的电压 u 随时间变化的规律：$u=U_m\sin\omega t$。

3.电流 i 随时间变化的规律：$i=I_m\sin\omega t$。其中ω等于线圈转动的

角速度，$E_m=NBS\omega$。

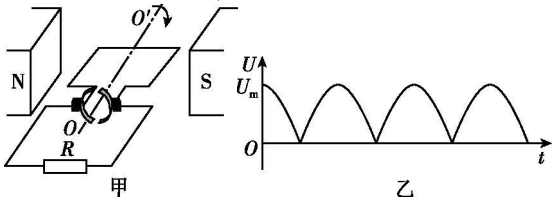
①线圈从中性面开始转动：$e=E_m\sin\omega t$。,②线圈从平行于磁场方向（峰值面）开始转动：$e=E_m\cos\omega t$。

4.求解交变电流瞬时值表达式的解题流程



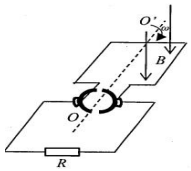
【拓展】关于换向器问题

1.如果起点在峰值面，则交流电变成直流（如图）



甲　　乙

2. 如果起点在中性面，则为交流电（如图）



【发电机线圈中产生的电流始终是交流电，如果外电路中使用的是两个铜质圆环，则外电路中的电流是交流电，如果是两个铜质半环（与线圈相连，并随线圈一起转动），则外电路中的电流是直流电（半环的作用相当于换向器）】

五、电感和电容对交变电流的作用

1.电感器对交变电流的阻碍作用

(1)感抗：电感器对交变电流阻碍作用的大小。

(2)影响因素：线圈的自感系数越大，交流的频率越高，感抗越大。

自感线圈的感抗公式：$X_L=2\pi fL$（其中 f 为交流电的频率，L 为自感系数）.

(3)感抗的应用

类型 / 区别	低频扼流圈	高频扼流圈
自感系数	较大	较小
感抗大小	较大	较小
作用	通直流、阻交流	通低频、阻高频

2.电容器对交变电流的阻碍作用

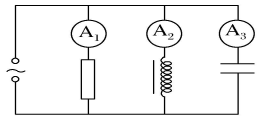
(1)容抗：电容器对交变电流阻碍作用的大小。

(2)影响因素：电容器的电容越大，交流的频率越高，容抗越小。

电容器的容抗公式：$X_C=\dfrac{1}{2\pi fC}$（其中 f 为交流电的频率，C 为电容）

(3)感抗的应用

类型 / 区别	隔直电容	高频旁路电容
电容	较小	较大
容抗大小	较大	较小
作用	通交流，隔直流	通高频，阻低频



当交流电的频率增大时，A_1 示数不变，A_2 示数变小，A_3 示数变大。

【补充一】电感和电容对交流电相位的影响

在纯电感电路中，电流比电压落后 $\pi/2$（图 3-21）。

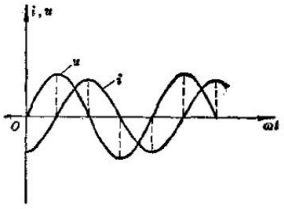


图 3-21　电感对交流电相位的影响

（根据 $u=L\dfrac{\Delta i}{\Delta t}$ 及 $i=I_m\sin\omega t$ 求导可得），且一个周期内平均功率为 0,即不消耗电能。

在纯电容电路中，电流比电压超前 $\pi/2$（图 3-22）。

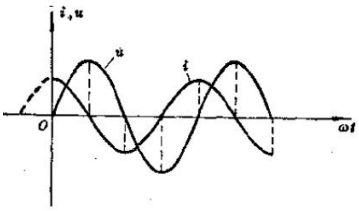
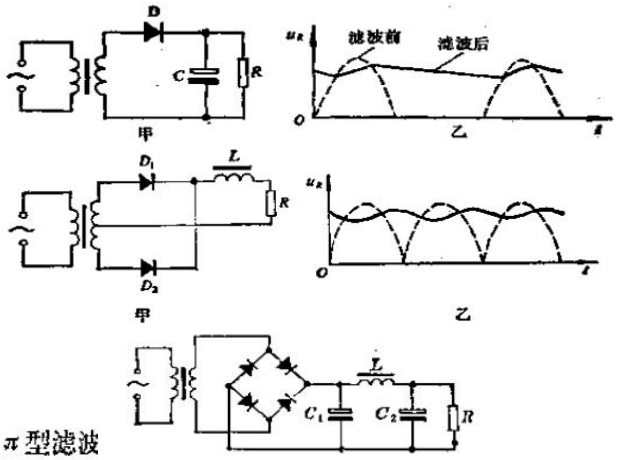


图 3-22　电容对交流电相位的影响

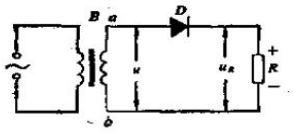
（根据 $i=\dfrac{\Delta Q}{\Delta t}=C\dfrac{\Delta u}{\Delta t}$ 及 $u=U_m\sin\omega t$ 求导可得）

【补充二】滤波

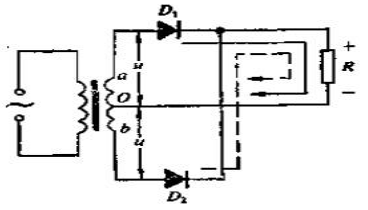


【补充三】交流电的整流

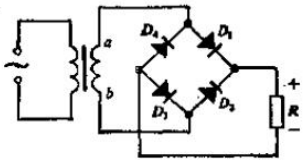
（一）半波整流



（二）全波整流



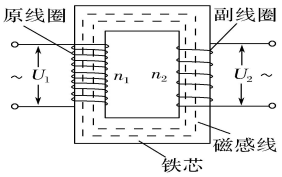
（三）桥式整流



第 3 节　变压器

一、变压器的构造

1.**构造**：如图所示，变压器是由闭合铁芯和绕在铁芯上的两个线圈组成的。



(1)原线圈：与交流电源连接的线圈，也叫初级线圈。

(2)副线圈：与负载连接的线圈，也叫次级线圈。

（3）铁芯：

铁芯的作用：将原线圈中电流产生的磁场全部封闭在铁芯内部，使任意时刻原副线圈的磁通量均相同.

2.符号：



二、变压器的工作原理

①给原线圈通上交变电流，原线圈在铁芯中产生变化的磁场，即电生磁（电流的磁效应）；

②由于铁芯的封闭作用，原线圈与副线圈中磁通量与磁通量的变化量相同，原、副线圈中均产生感应电动势，即磁生电（电磁感应：互感现象）.

副线圈中存在感应电动势，产生电能，变压器将能量从原线圈转移到副线圈.

变压器通过闭合铁芯，利用互感现象实现以下转化：电能（原线圈）→磁场能（变化磁场）→电能（副线圈）

【点拨】(1)互感现象是变压器的工作基础，其实质是电磁感应现象。

(2)变压器改变电压的作用只适用于交变电流，不适用于恒定电流。

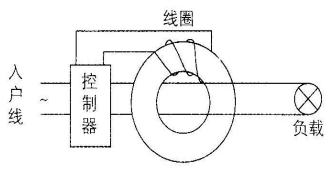
(3)若在原线圈上加交流电压，副线圈上空载（断路），则副线圈上存在感应电动势。

（4）理想变压器原、副线圈电压相位差为 π，即反相。

【原理应用】

①漏电保护器

如图是漏电保护器的部分电路图，由金属环、线圈、控制器组成，其工作原理是控制器探测到线圈中有电流时会把入户线断开，即称电路跳闸，



②钳式电流表

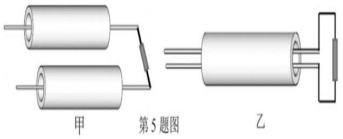
图丙中用同一钳型电流表测量电流有效值相同，但频率分别为 50Hz 和 60Hz 的交流电，两次测量值不同



丙

③输电导线的铺设

若输送的电流是交变电流，甲方案不可行（涡流），乙方案可行。



甲　　第5题图　　乙

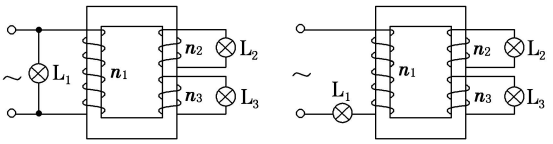
二、理想变压器的规律

1.理想变压器的的基本规律

$$\frac{E_1}{E_2}=\frac{U_1}{U_2}=\frac{n_1\frac{\Delta\Phi_1}{\Delta t}}{n_2\frac{\Delta\Phi_2}{\Delta t}}=\frac{n_1\Delta\Phi_1}{n_2\Delta\Phi_2}=\frac{n_1}{n_2}。$$

理想变压器		(1)没有“铜损”(线圈电阻为零，不发热) (2)没有“铁损”(铁芯中无涡流，不发热) (3)没有“漏磁”(磁通量全部集中在铁芯中) (4)原、副线圈的感抗趋于无穷大，从而空载电流趋于 0
基本关系	功率关系	根据能量守恒可得：原线圈的输入功率等于副线圈的输出功率，即 $P_{入}=P_{出}$
	电压关系	只有一个副线圈时：$\frac{U_1}{U_2}=\frac{n_1}{n_2}$
		有多个副线圈时：$\frac{U_1}{n_1}=\frac{U_2}{n_2}=\frac{U_3}{n_3}=\cdots$
	电流关系	只有一个副线圈时：$\frac{I_1}{I_2}=\frac{n_2}{n_1}$
		有多个副线圈时：$I_1n_1=I_2n_2+I_3n_3+\cdots+I_nn_n$
	关频率系	$f_1=f_2$(变压器不改变交变电流的频率)

当副线圈与用电器断开时，无电流通过副线圈，但副线圈两端仍存在电压。



甲　　乙

【知识深化】

①原线圈两端电压：原线圈两端电压实际是施加电压与感应电动势的叠加，这种叠加非数学数值上的加减，施加电压与感应电压存在相位差，在高中阶段不考虑这种复杂的计算情况，认为原线圈两端电压在数值上等于施加电压，也等于感应电动势.

例如，给原线圈施加 $e=E_m\sin\omega t$ 的交变电压，则原线圈中的电流为 $i=i_m\sin\omega t$，

则感应电动势 $U=L\dfrac{\Delta I}{\Delta t}=Li_m\omega\cos\omega t$，感应电动势与施加电压的相位不同，虽然感应电动势与施加电压方向相反或相同，但不能直接相加减.

②副线圈两端电压：副线圈两端电压即为副线圈产生的感应电动势.

2.理想变压器的制约关系

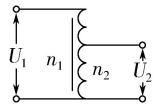
制约关系	电压	副线圈电压 U_2 由原线圈电压 U_1 和匝数比决定 $U_2=\frac{n_2}{n_1}U_1$ 【原制约副】
	功率	原线圈的输入功率 $P_{入}$ 由副线圈的输出功率 $P_{出}$ 决定 $P_{入}=P_{出}$ 【副制约原】
	电流	原线圈电流 I_1 由副线圈电流 I_2 和匝数比决定 $I_1=\frac{n_2}{n_1}I_2$ 【副制约原】

3.线圈粗细问题：

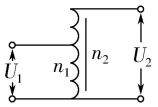
线圈粗细由电流大小决定，故升压变压器原线圈用粗导线，副线圈用细导线，降压变压器原线圈用细导线，副线圈用粗导线。

4.几种常用的变压器

(1)自耦变压器——调压变压器，如图 A、B 所示。



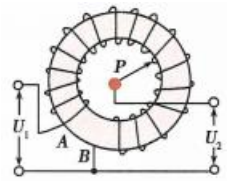
A 降压变压器



B 升压变压器

特点：只有一个线圈，三个抽头，可升压，也可降压。

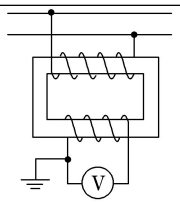
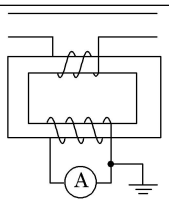
（2）调压变压器



特点：属于自耦变压器，但电压可连续调节。

(3)互感器{电压互感器：把高电压变成低电压，如图 C 所示。
电流互感器：把大电流变成小电流，如图 D 所示。

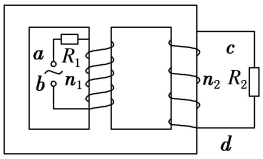
两种互感器的比较

	电压互感器	电流互感器
原理图	 图 C	 图 D
原线圈的连接	并联在高压电路中	串联在交流电路中
副线圈的连接	连接电压表	连接电流表
互感器的作用	将高电压变为低电压	将大电流变成小电流
利用的公式	$\frac{U_1}{U_2}=\frac{n_1}{n_2}$	$I_1n_1=I_2n_2$

三、变压器问题分类讨论

1.“日”字形铁芯的变压器问题

变压器的铁心为“日”字形，要注意穿过原线圈的磁通量的变化率与穿过副线圈磁通量的变化率不相等，电压比$\frac{U_1}{U_2}=\frac{n_1}{n_2}$不再成立，应根据法拉第电磁感应定律推导 U_1 与 U_2 的关系，即$\frac{U_1}{U_2}=\frac{n_1\frac{\Delta\Phi_1}{\Delta t}}{n_2\frac{\Delta\Phi_2}{\Delta t}}=\frac{n_1\Delta\Phi_1}{n_2\Delta\Phi_2}$。



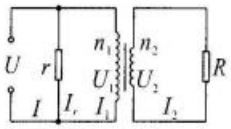
已知原线圈匝数 $n_1=40$ 匝，副线圈匝数 $n_2=20$ 匝，

因该变压器通过副线圈的磁通量是通过原线圈磁通量的一半，则

$\frac{U_1}{U_2}=\frac{n_1\frac{\Delta\Phi_1}{\Delta t}}{n_2\frac{\Delta\Phi_2}{\Delta t}}=\frac{4}{1}$，故$\frac{I_1}{I_2}=\frac{1}{4}$，

2.原线圈并联电阻的问题

【典例 1】如图所示，理想变压器原、副线圈的匝数比为 $n_1:n_2$，原线圈与定值电阻 r 并联，接在输入电压恒为 U 的正弦交流电源上，副线圈接一定值电阻 R，分析原线圈中的电流、电压与输入的电流、电压的关系.



原线圈与定值电阻 r 并联，由并联电路关系知

电压的关系为 $U=U_1$，

电流的关系为 $I=I_1+I_r$.

综上所述，原线圈中的电流与定值电阻 r 中的电流之和等于干路电流，原线圈两端的电压等于输入电压.

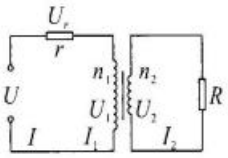
总结

原线圈被并联时，原线圈两端的电压等于输入电压，原线圈被并联不影响原线圈的电压与电流，仅仅影响干路的电流大小.

3.原线圈有串联负载的变压器

【注意】分析原线圈有串联负载的变压器电路问题时要注意变压器的输入电压不等于电源的电压，而是等于电源电压减去串联负载的电压，即：$U_1=U_{源}-U_{串}$。

【典例 2】如图所示，理想变压器原、副线圈的匝数比为 $n_1:n_2$，原线圈与定值电阻 r 串联，接在输入电压恒为 U 的正弦交流电源上，副线圈接一定值电阻 R，分析原线圈中的电流电压与输入的电流电压的关系.



原线圈与定值电阻 r 串联，由串联电路关系知

电压的关系为 $U=U_1+U_r$，电流的关系为 $I=I_1$.

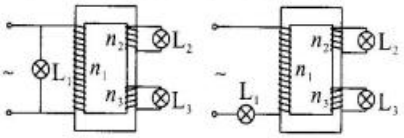
综上所述，原线圈中的电流等于定值电阻 r 中的电流，原线圈两端电压与定值电阻 r 两端电压之和等于输入电压.

总结

原线圈被串联时，原线圈两端电压与串联电阻两端电压之和等于输入电压，这是需要注意的地方，再利用基本关系列出等式来解题.

4. 多个副线圈的变压器问题

【典例 3】如图所示的为一理想变压器在两种情况下工作的示意图. 其中灯泡 L_2、L_3 的功率均为 P，且 L_1、L_2、L_3 为相同的灯泡，原、副线圈的匝数比为 $n_1:n_2=4:1$，求图甲中 L_1 的功率和图乙中 L_1 的功率.



甲　　乙

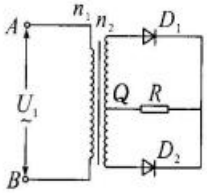
解法一：对图甲，原线圈电压等于 L_1 两端电压，由 $n_1:n_2=4:1$ 知 $U_1=4U_2$，由 $P=\dfrac{U^2}{R}$ 知 $P_1=16P$.

对图乙，$n_1I_1=n_2I_2+n_3I_3$，$2n_2I_2=n_1I_1$，解得 $I_1=\dfrac{2n_2}{n_1}I_2=\dfrac{1}{2}I_2$，又 $P=I_2^2R$，联立解得 $P_1'=I_1^2R=\dfrac{1}{4}P$.

5. 变压器中含有二极管问题

【注意】分析含有二极管的变压器电路问题时要注意理想二极管单向导电性，对交变电流的影响，及对应有效值的变化。

【典例 4】如图所示，在 AB 间接入 $U_1=311\sin 314t$ V 的正弦交流电，通过理想变压器和相同的理想二极管 D_1、D_2 给阻值 $R=20\ \Omega$ 的纯电阻供电，变压器原线圈 $n_1=1100$ 匝，副线圈 $n_2=200$ 匝，Q 为副线圈正中央抽头. 为保证安全，求二极管的反向耐压值 U_0 的最小值与电阻 R 上消耗的电功率 P.



由函数表达式可知，AB 间接入正弦交流电的电压有效值为 $U_1=220$ V，变压器原线圈 $n_1=1100$ 匝，副线圈 $n_2=200$ 匝，$U_2=\dfrac{n_2}{n_1}U_1=40$ V.

将副线圈看成交变电源，当副线圈最上端为正极时，根据二极管的特性，D_1 与 R 组成回路，Q 端在副线圈中点，此时电阻 R 两端电压为 $\dfrac{U_2}{2}$，D_1 相当于导线，D_2 两端的电压等于副线圈的电压 U_2；同理分析副线圈最下端为正极的情况，无论上端为正极或下端为正极，电阻两端电压均为 $\dfrac{U_2}{2}$，施加在二极管两端的电压最大值为 U_2，二极管的反向耐压值 U_0 的最小值为副线圈电压的最大值，$U_0=40\sqrt{2}$ V $=56.6$ V；Q 为副线圈正中央抽头，则 R 两端的电压为 $U=20$ V，R 消耗的热功率 $P=\dfrac{U^2}{R}=20$ W.

总结

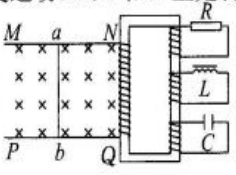
含有二极管的交变电流问题，主要是考查二极管的单向导电特性，需要理解二极管的特性.

6. 变压器中含有电容、电感问题

【典例 5】如图所示，MN 和 PQ 为处于同一水平面内的两根足够长的平行光滑金属导轨(电阻不计)，垂直导轨放置金属棒 ab，金属棒 ab 与导轨接触良好. N、Q 端接理想变压器的初级线圈，理想变压器的输出端有三组次级线圈，分别接有电阻元件 R、电感元件 L 和电容元件 C. 在水平金属导轨之间加竖直向下的匀强磁场，若用 I_R、I_L、I_C 分别表示通过 R、L 和 C 的电流，分析：

(1)当 ab 棒沿导轨匀速运动时，R、L 和 C 上是否有电流；

(2)若 ab 棒沿导轨在某一中心位置附近做简谐往复运动，R、L 和 C 上是否有电流.



(1)在 ab 棒匀速运动的过程中，ab 棒产生恒定的感应电动势，左边原线圈中产生恒定的电流，形成恒定的磁场，穿过右侧的三个副线圈的磁通量不变，则副线圈中没有感应电动势产生，所以 $I_R=0$、$I_L=0$、$I_C=0$.

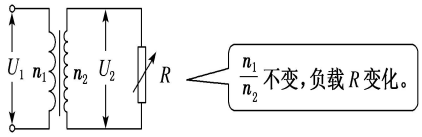
(2)若 ab 棒在某一中心位置附近做简谐运动，则原线圈中产生正弦式交变电流，副线圈中将有感应电流产生，故 $I_R\neq0$、$I_L\neq0$、$I_C\neq0$.

第二部分 方法、规律与技巧

一、变压器的两类动态变化问题

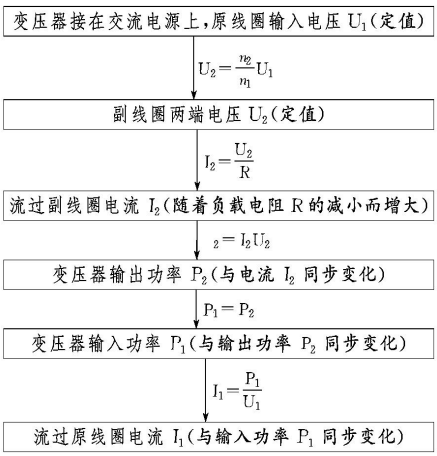
1.匝数比不变、负载变化的情况分析思路

如图所示：



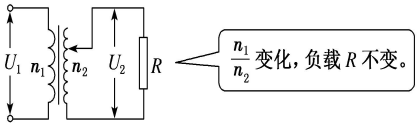
动态分析过程

解答变压器动态问题关键是要分清变量和不变量，弄清理想变压器中“谁决定谁”的问题。



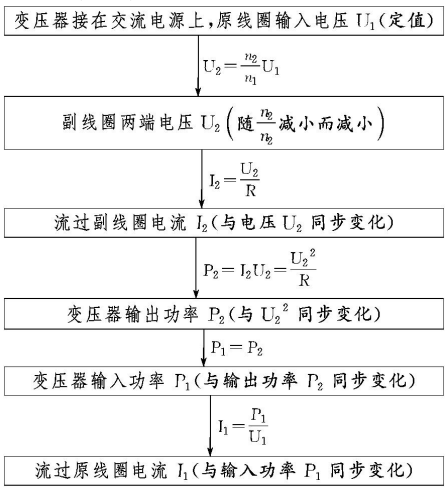
2.匝数比改变、负载不变的情况

分析思路,如图所示：



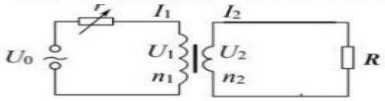
动态分析过程

解答变压器动态问题关键是要分清变量和不变量，弄清理想变压器中“谁决定谁”的问题。,变压器接在交流电源上，原线圈输入电压 U_1(定值)



二、变压器中的“等效电阻、电源”问题

如图（1）所示变压器电路，输入电压有效值为 U_0，原线圈回路总电阻为 r，副线圈回路负载为纯电阻元件 R，变压器的参数如图。

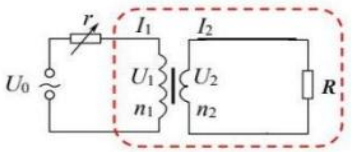


图（1）

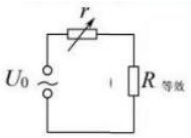
1、等效电阻的参数推导

如图（2）所示，我们可以将虚线框所围的电路等效为一个纯电阻 $R_{等效}$，其等效电路图如图（3）所示。

则 $R_{等效}$ 两端的电压就是 U_1、通过的电流就是 I_1，则有 $R_{等效}=\frac{U_1}{I_1}$，即



图（2）



图（3）

$$R_{等效}=\frac{U_1}{I_1}=\frac{\frac{n_1}{n_2}U_2}{\frac{n_2}{n_1}I_2}=\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2\cdot\frac{U_2}{I_2}=\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2R$$

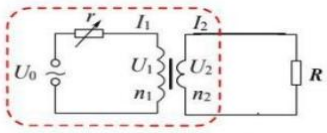
2、等效电压源的参数推导

如图（4）所示，我们可以将虚线框所围的电路等效为一个电压源（E'，r'），其等效电路图如图（5）所示。

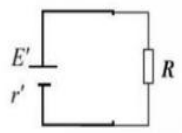
则电压源（E'，r'）的输出电压即 U_2，输出电流即 I_2，则有

$U_2=E'-I_2r'$，而 $U_1=U_0-I_1r$，即 $\frac{n_1}{n_2}U_2=U_0-\frac{n_2}{n_1}I_2r$，变形，得：

$$U_2=\frac{n_2}{n_1}U_0-I_2\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2r$$



图（4）



图（5）

对比 $U_2=E'-I_2r'$，可得

$$E'=\frac{n_2}{n_1}U_0,\quad r'=\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2r$$

【记忆方法】等效电动势与匝数成正比，等效电阻与匝数比的平方成正比，等效电路开口朝哪侧，哪侧的匝数就在分子上。

【例 1】如图所示，理想变压器原、副线圈的匝数比为 $n_1:n_2$，原线圈接在输出电压恒为 U_1 的正弦交流电源上，副线圈接一定值电阻 R. 现将变压器等效成定值电阻，求等效电阻的阻值.



研究变压器，由基本关系知

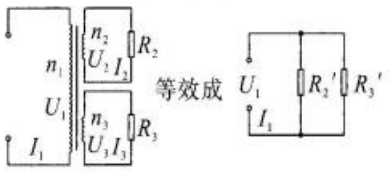
$$I_2=\frac{n_1}{n_2}I_1,P_R=I_2^2R=\left(\frac{n_1}{n_2}I_1\right)^2R=I_1^2\frac{n_1^2}{n_2^2}R,$$

研究等效电路，等效电阻的功率 $P_{R'}=I_1^2R'$.

将变压器等效成定值电阻，定值电阻的功率与变压器功率相同，即 $P_R=I_1^2\frac{n_1^2}{n_2^2}R=P_{R'}=I_1^2R'$，由此可得 $R'=\frac{n_1^2}{n_2^2}R$.

【条件：副线圈为纯电阻】

【例 2】如图所示，理想变压器原、副线圈的匝数比为 $n_1:n_2:n_3$，原线圈接在输出电压恒为 U_1 的正弦交流电源上，副线圈分别接定值电阻 R_2 与 R_3. 现将变压器等效成定值电阻，求等效电阻的阻值.



变压器含有多个副线圈时，每个线圈等效的电阻应为并联关系. 研究变压器，由基本关系知

$$U_2=\frac{n_2}{n_1}U_1,\ P_{R2}=\frac{U_2^2}{R}=\frac{\left(\frac{n_2}{n_1}U_1\right)^2}{R}=\frac{U_1^2}{\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2R},$$

$$U_3=\frac{n_3}{n_1}U_1,\ P_{R3}=\frac{U_3^2}{R}=\frac{\left(\frac{n_3}{n_1}U_1\right)^2}{R}=\frac{U_1^2}{\left(\frac{n_1}{n_3}\right)^2R},$$

研究等效电路，

R_2 等效电阻的功率 $P_{R2}'=\frac{U_1^2}{R_2'}$，

R_3 等效电阻的功率 $P_{R3}'=\frac{U_1^2}{R_3'}$，

将变压器等效成定值电阻，定值电阻的功率与变压器的功率相同，即 $P_{R2}=P_{R2}'$，$P_{R3}=P_{R3}'$，

由此可得 $R_2'=\frac{n_1^2}{n_2^2}R_2$，$R_3'=\frac{n_1^2}{n_3^2}R_3$，

R_2' 支路的电流 $I_2'=\frac{n_2}{n_1}I_2$，

R_3' 支路的电流 $I_3'=\frac{n_3}{n_1}I_3$，

则干路电流 $I_1=I_2'+I_3'=\frac{n_2}{n_1}I_2+\frac{n_3}{n_1}I_3$.

总结

利用等效电阻解决变压器问题时，会有意想不到的效果，但是等效电阻法只能分析原线圈电路的电学问题.

等效电阻的应用范围：

①帮助理解变压器电路的原理；

②计算理想变压器的匝数比；

③计算原线圈电路中的电流、电压和功率.

【在探究变压器线圈两端的电压与匝数的关系实验中，由于交变电流的磁场对铁芯有吸引、排斥作用，使铁芯振动发声，故变压器内部有轻微的“嗡嗡”声；若去掉铁芯，则漏磁现象太大，无法完成实验】

第 4 节　电能的输送

一、降低输电损耗的两个途径

1.输送电能的基本要求

(1)可靠：保证供电线路正常工作，故障少。

(2)保质：保证供电质量——电压和频率稳定。

(3)经济：线路建设和运行的费用低，电能损耗少。

2. 输电线上功率损失的原因

任何输电线都有电阻，输电线上的功率损失 $P_{损}=I_{线}^2R_{线}=\left(\frac{P}{U}\right)^2\cdot\rho\frac{l}{S}$。

3. 降低输电损耗的途径

理论依据：$P_{损}=I^2R$.

减小输电线的电阻：根据电阻定律 $R=\rho\frac{l}{S}$，要减小输电线的电阻 R，在保证输电距离的情况下，可采用减小材料电阻率、增大导线截面积等方法.

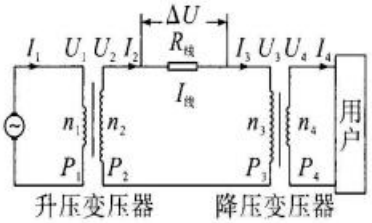
减小输电导线中的电流：在输电功率一定的情况下，根据 $P=UI$，要减小电流，必须提高电压.

【注意】

若电能通过同一线路进行远距离输电，相同电压下采用直流输电损耗的电能比用交流输电损耗的电能小（因为交流输电时还有感抗和容抗损耗电能。

二、远距离输电

1. 远距离输电的基本关系



(1)功率关系

$P_1=P_2$，$P_3=P_4$，$P_2=P_{损}+P_3$.

(2)电压关系

$$\frac{U_1}{U_2}=\frac{n_1}{n_2},\frac{U_3}{U_4}=\frac{n_3}{n_4},U_2=\Delta U+U_3.$$

(3)电流关系

$$\frac{I_1}{I_2}=\frac{n_2}{n_1},\frac{n_3}{n_4}=\frac{I_4}{I_3},I_2=I_3=I_{线}.$$

(4)输电电流

$$I_{线}=\frac{P_2}{U_2}=\frac{P_3}{U_3}=\frac{U_2-U_3}{R_{线}}=\frac{\Delta U}{R_{线}}.$$

(5)周期、频率关系

输电过程中，交变电流的周期、频率不发生改变.

2.输电线路功率损失的计算方法

(1)$P_{损}=P_1-P_3=P_2-P_3=P_1-P_4=P_2-P_4$.

(2)$P_{损}=I_{线}^2R_{线}$，$I_{线}$为线上电流，$R_{线}$为线阻.

(3)$P_{损}=\frac{\Delta U^2}{R_{线}}$，$\Delta U$为线阻电压，$R_{线}$为线阻.

(4)$P_{损}=\Delta UI_{线}$，ΔU为线阻电压，$I_{线}$为线上电流.

总结

(1)远距离输电过程中，交变电流的周期、频率始终不变.

(2)输电电压越高，线路上的损耗功率越小，当输送功率一定时，输电电压增大n倍，线路的损耗功率减小到原来的$\frac{1}{n^2}$.

(3)远距离输电的两种方式. ①恒定功率：输入电压和电流为定值；②恒定电压：输入电压不变，输入电流可以发生变化.

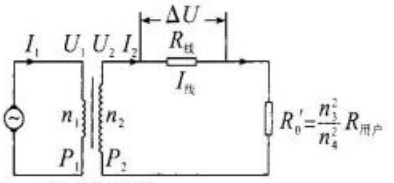
3. 用等效思想理解高压输电

如图所示，将高压输电电路等效成恒定电流电路.

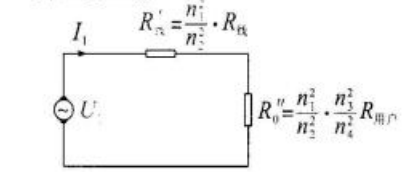
将降压变压器等效成电阻R_0'，$R_0'=\frac{n_3^2}{n_4^2}R_{用户}$，

将升压变压器等效成电阻R，

$$R=\frac{n_1^2}{n_2^2}(R_{线}+R_0')=\frac{n_1^2}{n_2^2}R_{线}+\frac{n_1^2}{n_2^2}\cdot\frac{n_3^2}{n_4^2}R_{用户}=R_{线}'+R_0''.$$



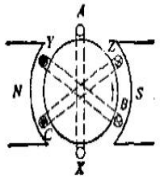
升压变压器

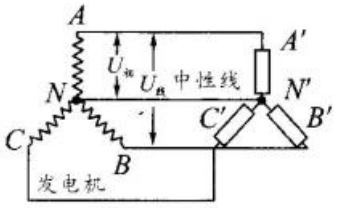


若$n_1=n_4<n_2=n_3$，$R_0''=R_{用户}$，则$R=\frac{n_1^2}{n_2^2}R_{线}+R_{用户}$，高压输电的实质是利用变压器减小线路电阻，从而减小线路电阻的电压与损耗功率，使用户可以分到更高的电压，获得更高的功率.

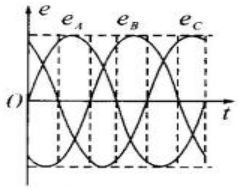
升压变压器的匝数比$\frac{n_1}{n_2}$越小，线阻阻值减小的倍数越多，线阻的等效电阻越小，线阻的等效电阻为$\frac{n_1^2}{n_2^2}R_{线}$.

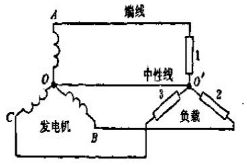
【补充】三相交流电





三相发电机的示意图　　单相单连

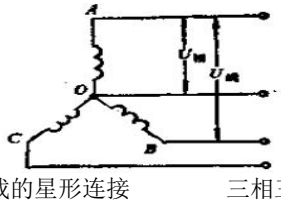




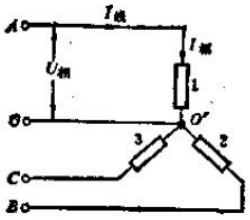
三相发电机的电动势　　三相四线制

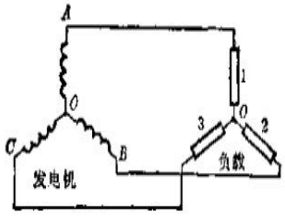
三相电源的连接

①电源的星形连接　　特点：$U_{线}=\sqrt{3}U_{相}$

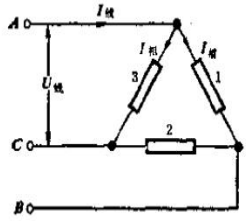


②负载的星形连接　　三相三线制





③ 负载的三角形连接　特点：$I_{线}=\sqrt{3}I_{相}$



【记忆口诀】

匀强磁场有线圈，旋转产生交流电。
电流电压电动势，变化规律是弦线。
中性计时是正弦，峰值开始是余弦。
NBSω最大值，热量计算有效值。
变压器供交流用，恒定电流不可用。
理想变压三不计，互感现象是原理。
电压电流匝数比，原副制约功率等。
远程输电三回路，输电电流是纽带。

【本章高频考点】

1.交变电流的产生，有效值，平均值，峰值，最大值等计算。
2.理想变压器规律及其应用。
3.远距离输电及动态分析。

第三部分 物理方法概述

一、等效替代法

等效替代法是在保证某种效果(特性和关系)相同的前提下，将实际的、陌生的、复杂的物理问题和物理过程用等效的、简单的、易于研究的物理问题和物理过程代替来研究和处理的方法。等效替代法既是科学家研究问题的方法，也是学生在学习物理中常用的方法，掌握等效替代法，有助于提高学生的科学素养。

二、数形结合法

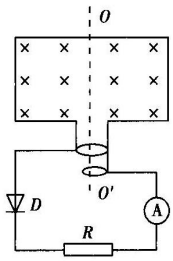
所谓数形结合法，就是根据数与形之间的对应关系，通过数与形的相互转化来解决实际问题的思想方法。用“数”来解决“形”，也可以将形用代数进行处理。在我们遇到的很多物理题中，物理量是用图形来表示的，其中描述物理量变化规律的示意图居多。

三、程序法

程序法是指按物理现象、物理过程显现的顺序，根据它们遵循的物理规律，建立已知物理量之间的关系式或者已知物理量与未知物理量之间的关系式，然后通过数学方法解决物理问题的方法。

第四部分　易错、疑难问题选

1.(2021 届浙江杭州高级中学期中,16)(多选)如图所示,N 匝矩形导线框以角速度 ω 在磁感应强度为 B 的匀强磁场中绕轴 OO'匀速转动,线框面积为 S,线框的电阻、电感均不计,外电路接电阻 R、理想交流电流表 A 和二极管 D。二极管 D 具有单向导电性,即正向电阻为零,反向电阻无穷大。下列说法正确的是　(　　)



A.R 两端电压的有效值 $U=\dfrac{\omega NBS}{2}$

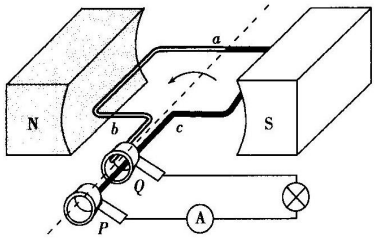
B.一个周期内通过 R 的电荷量 $q=\dfrac{2NBS}{R}$

C.交流电流表的示数 $I=\dfrac{\omega NBS}{R}$

D.图示位置电流表的示数为 0

【答案】AB

2.(2021 届浙江“七彩阳光”新高考研究联盟开学联考,16)(多选)如图所示,一小型交流发电机中,矩形金属线圈的面积为 S,匝数为 n,转轴与线圈相交于 a 点,将 ab 段线圈与滑环 Q 相接触,ac 段线圈与滑环 P 相接触。金属线圈处在磁感应强度为 B 的匀强磁场中,绕轴以角速度 ω_0 匀速转动,交流电流表的示数为 I_0,小灯泡恰好正常发光。已知小灯泡电阻随温度变化,线圈、滑环、电刷、导线、电流表总电阻为 r。下列说法正确的是　(　　)



A.ac 段线圈所受安培力大小的变化周期是 $\dfrac{\pi}{\omega_0}$,且线圈处于中性面时安培力大小为 0

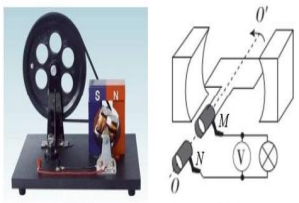
B.线圈从水平方向转过 90°,通过小灯泡的电荷量为 $\dfrac{\pi I_0}{2\omega_0}$

C.小灯泡的额定功率为 $\dfrac{\sqrt{2}n\omega_0 BS}{2}I_0-I_0^2r$

D.若角速度减小为原来的 $\dfrac{1}{2}$,交流电流表的示数减小为原来的 $\dfrac{1}{2}$

【答案】AC

3. 如图甲所示，手摇式发电机是我们教学中常用的演示工具，它的简化图如图乙所示. 该手摇式交流发电机的矩形线圈在磁感应强度为 B 的匀强磁场中绕中轴线 OO' 以恒定角速度 ω 转动，产生的交流电通过 M、N 与外电路连接，已知矩形线圈的面积为 S，匝数为 n，线圈总电阻为 r，外电路电灯的电阻为 R，电压表为理想交流电表. 线圈平面由平行于磁场方向的位置转过90°的过程中



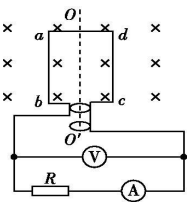
图甲　　图乙

A. 电压表 V 的示数为 $nBS\omega\dfrac{R}{R+r}$　　B. 通过灯泡的电荷量为 $\dfrac{BS}{R+r}$

C. 电灯中产生的焦耳热为 $\dfrac{n^2B^2S^2\omega\pi R}{4(R+r)^2}$　　D. 位于中性面位置时线圈中的电流为 $\dfrac{nBS\omega}{R+r}$

【答案】C

4.如图所示,矩形线圈面积为 S,匝数为 N,线圈电阻为 r,在磁感应强度为 B 的匀强磁场中绕 OO'轴以角速度ω匀速转动,外电路电阻为 R.下列判断正确的是(　　)



A.电压表的读数为 $\frac{NBS\omega R}{\sqrt{2}(R+r)}$

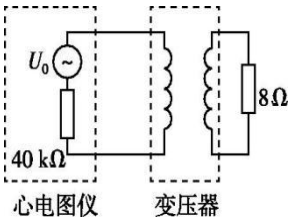
B.当线圈由图示位置转过 30°的过程中,通过电阻 R 的电荷量为 $\frac{NBS}{2(R+r)}$

C.在线圈转过一周的过程中,电阻 R 上产生的焦耳热为 $\frac{N^2B^2S^2\omega R\pi}{4(R+r)^2}$

D.当线圈由图示位置转过 30°时,通过电阻 R 的电流为 $\frac{NBS\omega}{2(R+r)}$

【答案】AD

5.心电图仪是将心肌收缩产生的脉动转化为电压脉冲的仪器,其输出部分可用一个与大电阻(40 kΩ)相连的交流电源来等效,如图所示.心电图仪与一理想变压器的初级线圈相连,扬声器(可以等效成阻值为 8 Ω的电阻)与该变压器的次级线圈相连.在等效电源的电压有效值 U_0 不变的情况下,为使扬声器获得最大功率,变压器的初级线圈和次级线圈的匝数比约为 (　　)

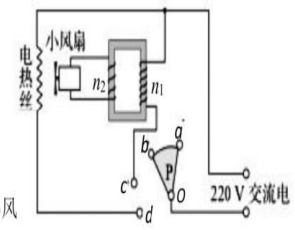


A.1∶5000　　B.1∶70　　C.70∶1　　D.5000∶1

【答案】C

6. 如图所示为某种电吹风机电路图,a、b、c、d 为四个固定触点。绕 O 点转动的扇形金属触片 P,可同时接触两个触点,触片 P 处于不同位置时,吹风机可处于停机、吹冷风和吹热风三种工作状态。n_1 和 n_2 分别是理想变压器原、副线圈的匝数,该电吹风的各项参数如下表所示。下列说法正确的是

冷风时输入功率	60W
热风时输入功率	460W
小风扇额定电压	60V
正常工作时小风扇输出功率	52W



第13题图

A. 触片 P 同时接触 b、c 两个触点时电吹风吹热风

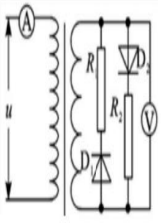
B. 理想变压器原、副线圈的匝数比 n_1:n_2=3:11

C. 电吹风吹热风时电热丝上的电流为 $\frac{23}{11}A$

D. 小风扇的内阻为 8Ω

【答案】D

7. 如图所示,理想二极管(正向电阻为零,反向电阻无穷大)D_1 与电阻 R_1 串联、理想二极管 D_2 和电阻 R_2 串联,然后并联接入理想变压器的副线圈中,电阻 R_1=R_2=R。变压器的原、副线圈的匝数比为 2∶1,原线圈接入电压为 U_0 的正弦交流电,图中的电压表和电流表均为理想交流电表,则下列说法正确的是



A. 若电阻 R_1 上的电流有效值为 I_1,则电流表的示数为 I_1

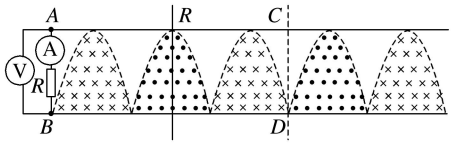
B. 若 R_1 两端的电压有效值为 U_1,电压表示数为 $\sqrt{2}U_1$

C. 副线圈上的电流有效值是电阻 R_1 上电流的两倍

D. 原线圈的输入电压是电阻 R_1 两端电压的 4 倍

【答案】B

8.如图所示,两根间距为 $20\sqrt{2}$ cm 的无限长光滑金属导轨,电阻不计,其左端连接一阻值为 10 Ω的定值电阻,两导轨之间存在着磁感应强度为 1 T 的匀强磁场,磁场边界虚线均为正弦曲线的一部分,一根接入电路中的电阻为 10 Ω的光滑导体棒,在外力作用下以 10 m/s 的速度匀速向右运动(接触电阻不计),交流电压表和交流电流表均为理想电表,则(　　)



A.回路中产生的是正弦式交变电流

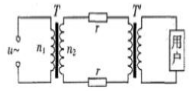
B.电压表的示数是 2 V

C.导体棒运动到图示虚线位置时,电流表示数为零

D.导体棒上消耗的热功率为 0.2 W

【答案】 A

9. 2020年11月1日,三峡工程完成整体竣工验收。截至2020年8月底,三峡电站累计发电量超过13541亿千瓦时,有力支持了华东、华中、广东等地区电力供应。如图所示,这是三峡电站向浙江地区送电的简化模型。两变压器均为理想变压器,升压变压器原副线圈匝数比为 k_1,降压变压器原副线圈匝数比为 k_2,用户端得到的是电压为 $u=U_m\sin(\omega t)$、功率为 P 的正弦式交变电流,输电线总电阻为 $2r$,不考虑其他影响,下列说法正确的是



A. 升压变压器输出端的电压为 $\frac{\sqrt{2}k_2^2U_m^2+4\sqrt{2}P\cdot r}{2k_2U_m}$

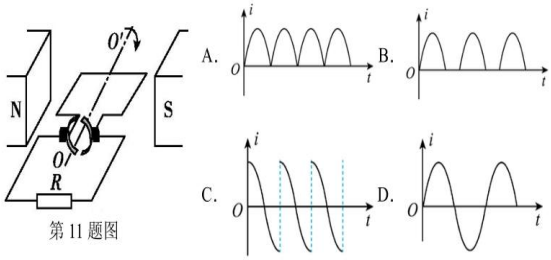
B. 降压变压器的输入端的电压为 $k_2\cdot U_m$

C. 输电线上的电流为 $\frac{P}{\sqrt{2}k_2\cdot U_m}$

D. 输电线上损失的功率为 $\frac{2P^2r}{k_2^2\cdot U_m^2}$

【答案】A

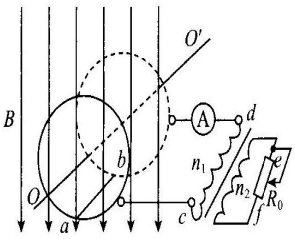
10. 如图所示,发电机的矩形线框绕对称轴 OO' 以一定的转速匀速转动,同时给外电阻 R 供电。取线框处于中性面时开始计时,则流过电阻的电流图像,下列正确的是



第11题图

【答案】A

11. 如图所示,电阻为 R、长度为 L 的导体棒 ab 两个端点分别搭在两个竖直放置、电阻不计、直径也为 L 且相等的金属圆环上,圆环通过电刷与导线 c 和 d 相接.c、d 两个端点接在匝数比为 n_1∶n_2=10∶1 的理想变压器原线圈两端,变压器副线圈接一滑动变阻器 R_0,匀强磁场的磁感应强度大小为 B,方向竖直向下.当导体棒绕与 ab 平行的水平轴 OO' 以角速度 ω 匀速转



动时，下列说法正确的是（　　）

A. ab 在环的最低点开始计时，产生的瞬时电动势的表达式是 $u=\frac{1}{2}BL^2 2\omega\sin\omega t$

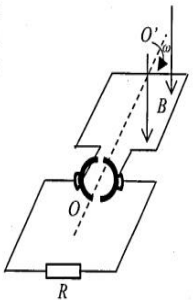
B. 当图中的交流电流表的示数为 I 时，滑动变阻器上的电流为 $\frac{1}{10}I$

C. 当滑动变阻器的滑片向 f 移动时，原线圈两端的输入功率变小

D. 当滑动变阻器的滑片向 f 移动时，交流电流表 A 示数变大

【答案】D

12. 学了发电机的原理后，小明所在的研究小组设计了如下的方案，边长为 L 的正方形金属框，以恒定角速度 ω 绕水平轴 OO' 转动，仅在 OO' 轴的右侧存在竖直向下的匀强磁场，磁感应强度为 B，线圈外部连有阻值为 R 的电阻，其它电阻不计。则金属框转动一周



A. 电阻 R 上通过的电流方向不变

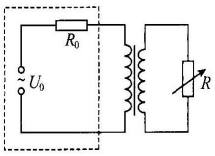
B. 线圈产生的感应电动势的有效值为 $\frac{\sqrt{2}}{2}B\omega L^2$

C. 电阻 R 上通过的电量是 $\frac{2BL^2}{R}$

D. 电阻 R 上产生的焦耳热是 $\frac{\pi B^2\omega L^4}{4R}$

【答案】D

13. 心电图仪是将心肌收缩产生的脉动转化为电压脉冲的仪器，其输出部分可以等效为虚线框内的交流电源和定值电阻 R_0 串联，如图所示. 心电图仪与一理想变压器的原线圈连接，一可变电阻 R 与该变压器的副线圈连接，原、副线圈的匝数分别为 n_1、n_2. 在交流电源的电压有效值 U_0 不变的情况下，将可变电阻 R 的阻值调大的过程中（　　）



A. 原线圈两端的电压不变，副线圈两端的电压不变

B. 通过原线圈的电流不变，通过副线圈的电流变小

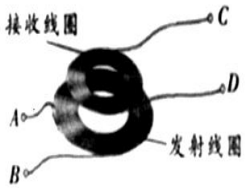
C. 当 $R=R_0$ 时，R 获得的功率最大

D. 当 $R=\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 R_0$ 时，R 获得的功率最大

【答案】D

14. 智能手机无线充电器利用互感原理工作，由发射器和接收器组成，分别有发射线圈和接收线圈。已知发射、接收线圈匝数比为 n_1：n_2=5：1，AB 端输入电压为 $U=5\sqrt{2}\sin 200\pi t$(V)，则





A. 接收线圈的输出电压有效值为1V

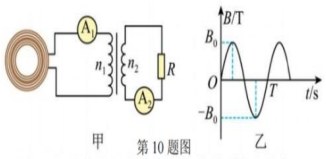
B. 接收线圈中输出电流方向每秒变化 200 次

C. 接收线圈的输出功率等于发射线圈输入功率

D. 改变发射器和接收器的距离，不影响其充电效率

【答案】B

15. 如图甲所示，100 匝圆形线圈接入理想变压器的原线圈，变压器的副线圈接入阻值为 R 的电阻，电表都是理想电表。已知每匝线圈的电阻均为 R，线圈位置存在垂直于线圈平面的磁场，磁感应强度 B 随时间 t 按正弦规律变化的图像如图乙所示，圆形线圈的热功率与电阻 R 的功率相等。下列说法正确的是（　　）



第 10 题图

A. 原、副线圈匝数比 n_1:n_2=10:1

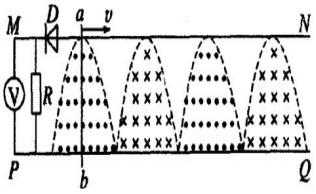
B. $\frac{T}{4}$ 时刻两电流表示数均为 0

C. 原副线圈电流周期之比为 T_1:T_2=10:1

D. 对圆形线圈某一小段导线（长度小于周长）而言，当磁感应强度最大时，其受到的安培力最大

【答案】A

16. 如图，足够长的两平行光滑金属导轨 MN、PQ 水平放置，间距 l=1 m，导轨中间分布有磁感应强度为 1 T 的匀强磁场，磁场边界为正弦曲线. 一粗细均匀的导体棒以 10 m/s 的速度向右匀速滑动，定值电阻 R 的阻值为 1 Ω，导体棒接入电路的电阻也为 1 Ω，二极管 D 正向电阻为零，反向电阻无穷大，导轨电阻不计，下列说法正确的是(　　)



A. 理想电压表示数为 2.5 V

B. 导体棒运动到图示位置时，有电流流过电阻 R

C. 流经电阻 R 的最大电流为 5 A

D. 导体棒上热功率为 6.25 W

【答案】ACD

第四章　电磁振荡与电磁波

第一部分　基础知识点

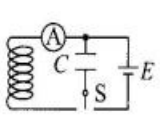
第 1 节　电磁振荡

一、电磁振荡的产生

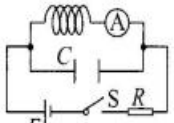
振荡电流：大小和方向都做周期性迅速变化的电流，即高频交变电流.

振荡电路：产生振荡电流的电路叫作振荡电路. 由线圈 L 与电容器 C 组成的电路，就是最简单的振荡电路，简称 LC 振荡电路.

常见 LC 振荡电路有两种：如图甲、乙所示.



甲



乙

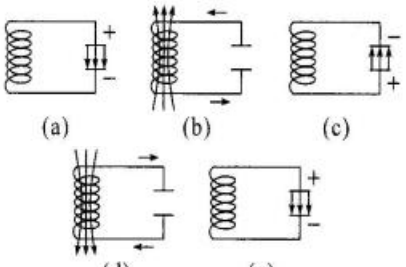
图甲振荡原理：先将开关 S 接通电源，给电容器 C 充满电，再将开关 S 接到线圈 L，线圈 L 与电容器 C 形成振荡电路，初始时电容器 C 充满电荷.

图乙振荡原理：开关 S 闭合，等到电路中电流稳定，此时线圈 L 相当于导线，电容器 C 中无电荷量；再断开开关 S，由于线圈 L 的自感作用，产生相反的感应电流，此时电容器 L 与线圈 C 形成振荡电路，初始时电容器 C 中无电荷.

图甲振荡电路的振荡原理分析：电容器 C 充满电后与线圈 L 形成振荡电路，此时电容器 C 充满电荷.

过程一$\left(0\sim\frac{T}{4}\right)$：如图丙(a)所示，接通电路后，电容器 C 开始放电，回路中产生逆时针电流，如图丙(b)所示. 电容器 C 初始放电时，放电电流最大，但由于线圈 L 的自感作用，回路中电流由 0 逐渐增大，同时电容器 C 上的电荷量逐渐减小，当电容器上的电荷量为 0 时，回路中的电流达到最大，电容器放电完毕.

在这个过程中，电容器 C 中的电场逐渐减小，线圈 L 中的磁场逐渐增强，电场能逐渐转化为磁场能，在放电完毕的瞬间，电场能全部转化成磁场能.

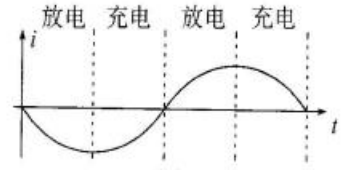


丙

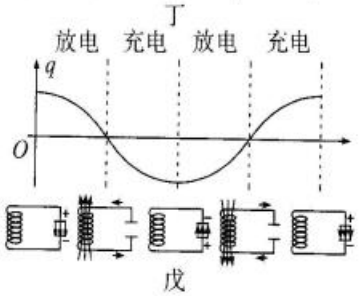
思考：为什么电容器 C 上电荷量为 0 时，电流最大？

解释：这个结论是通过解振荡方程得到电流的表达式，电流的表达式中含有电容器的电荷量，当电荷量为 0 时，电流取最大值.

电流变化的图像如图丁所示，电容器 C 上电荷量变化的图像如图戊所示.



丁



戊

过程二$\left(\frac{T}{4}\sim\frac{T}{2}\right)$：电容器 C 放电完毕后，由于线圈 L 的自感作用，产生与原电流同向的感应电流，并逐渐减小，感应电流对电容器 C 充电，电容器 C 两极板带上与原来相反的电荷，当回路中感应电流减小为 0 时，电容器重新充满电.

在这个过程中，电容器 C 中的电场逐渐增大，线圈 L 中的磁场逐渐减小，磁场能逐渐转化为电场能.

在充电完毕的瞬间，磁场能全部转化成电场能.

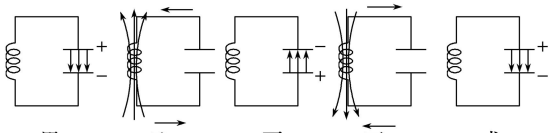
过程三、四$\left(\frac{T}{2}\sim T\right)$：电容器 C 再放电，再充电，变化规律与过程一、二相同.

通过不断充电、放电，回路中就出现了大小、方向周期性变化的电流，即振荡电流.

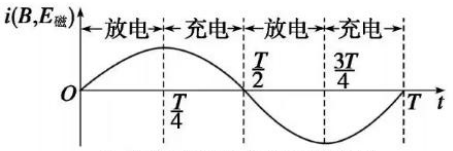
在这个过程中，电容器 C 极板上的电荷量 q、回路中的电流 i、电容器中的电场强度 E、线圈 L 中的磁感应强度 B 都在周期性地变化着，这种现象就是电磁振荡.

总结：图甲振荡电路中电容器 C 先放电后充电，图乙振荡电路中电容器 C 先充电后放电；图乙的振荡原理与图甲相同，图乙振荡电路的 i 与 q 周期性变化规律的图像从图甲变化规律的图像的$\frac{T}{4}$时刻开始.

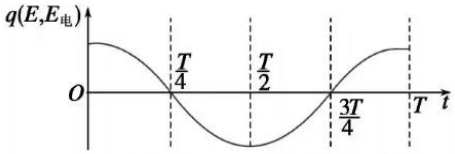
【总结 1】电磁振荡中的物理量的变化



时刻 t	0	$\frac{T}{4}$	$\frac{T}{2}$	$\frac{3T}{4}$	T
电荷量 q	最多	0	最多	0	最多
电场能	最大	0	最大	0	最大
电流 i	0	最大	0	最大	0
磁场能	0	最大	0	最大	0



(a) 以逆时针方向电流为正



(b) 图中 q 为上极板的电荷量

电流 i、电容器电荷量 q 的周期性变化

电学量(q、U、E、$E_{电}$)同步变化，磁学量(i、B、$E_{磁}$)同步变化，且两者异向变化

二、电磁振荡的周期和频率

(1)振荡电路发生电磁振荡时，如果没有能量损失，也不受其他外界条件的影响，这时电磁振荡的周期和频率叫振荡电路的固有周期和固有频率，简称振荡电路的周期和频率。

(2)**周期**：电磁振荡完成一次周期性变化需要的时间，$T=2\pi\sqrt{LC}$。

(3)**频率**：单位时间内电磁振荡完成周期性变化的次数，$f=\frac{1}{T}$，即 $f=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$。

⚠ 提醒

LC 电路的周期和频率只取决于电容 *C* 和线圈的自感系数 *L*，跟电容器带电荷量 *q*、板间电压 *U* 和线路中的电流 *i* 无关。

第 2 节　电磁场与电磁波

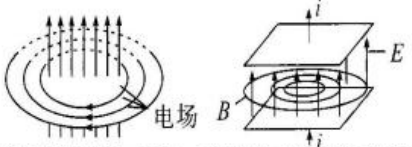
一、电磁场

1.麦克斯韦电磁场理论

变化的磁场产生电场，变化的电场产生磁场。变化的电场和变化的磁场总是相互联系成为一个完整的整体，这就是电磁场。

2.对麦克斯韦电磁场理论的理解

①变化的磁场产生的电场叫感应电场；变化的电场产生的磁场叫感应磁场，如下图所示.



变化的磁场产生电场　变化的电场产生磁场

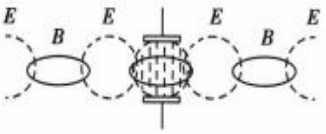
②感应电场与感应磁场的场线都是闭合曲线，而且相互正交、套连(静电场的电场线不能闭合，因为沿着电场线的方向电势降低，但感应电场的电场线可以闭合).

③感应电场的方向由楞次定律判断得出，感应磁场的方向由安培定则判断得出.

④“变化”的理解：“变化”指非均匀变化.

均匀变化的磁场能够在周围的空间产生恒定的电场，恒定的电场无法在周围空间产生变化的磁场，电磁场无法周期性交替产生，这里的变化指非均匀变化.

非均匀变化的磁场能够在周围空间产生非均匀变化的电场，非均匀变化的电场能够在周围空间产生非均匀变化的磁场. 周期性变化的电场与磁场相互联系、交替产生，形成一个不可分割的统一体，即电磁场.



【小结】

- 麦克斯韦电磁场理论
  - 变化的磁场产生电场
    - 均匀变化的磁场产生恒定电场
    - 非均匀变化的磁场产生变化的电场
    - 周期性振荡的磁场产生同频率振荡的电场
  - 变化的电场产生磁场
    - 均匀变化的电场产生恒定磁场
    - 非均匀变化的电场产生变化的磁场
    - 周期性振荡的电场产生同频率振荡的磁场

电磁波的验证：德国科学家赫兹通过实验捕捉到电磁波(同时发现光电效应现象)，证实了麦克斯韦关于光的电磁场理论.

3. 静电场与感应电场的对比

	静电场	感应电场(涡旋电场)
场源	电荷	变化的磁场
场线	不闭合(有源场)	闭合(无源场)
能的性质	有电势概念，移动电荷时电场力做功与路径无关，移动一周总功为零	无电势概念，移动电荷时电场力做功与路径有关，移动一周总功不一定为零
相同点	都对处于其中的电荷产生力的作用，$F=qE$	

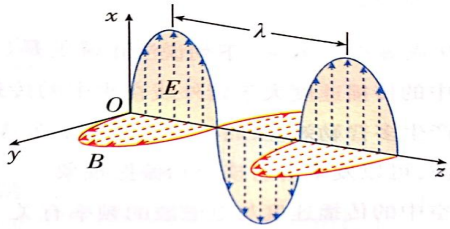
麦克斯韦的贡献：①预言电磁波；②电磁波在真空中传播的速度等于光速；③建立完整的电磁场理论.

二、电磁波

1.概念

变化的电场和磁场并不局限于空间某个区域，而是由近及远向周围空间传播开去。电磁场这样由近及远地传播，就形成了电磁波。

2.图像



3.特点

(1)横波，电场方向、磁场方向、传播方向相互垂直。

(2)不需要介质，真空中传播速度最大，$c=3.0\times10^8$ m/s。

(3)可以脱离“波源”独立存在。

(4)同一电磁波在不同介质中传播时频率不变，

波速、波长改变。

(5)不同电磁波在同一介质中传播时波速与频率有关:频率越高,波速越小。

(6)电磁波具有波的共性,满足 $v=\lambda f$ 的关系。能发生反射、折射、干涉、衍射、偏振、多普勒效应等现象。

(7)电磁波本身是一种物质.

【小结】

电磁波特点的总结	
电磁波的产生	由周期性变化的电场、磁场产生
电磁波的特点	横波
电磁波的速度	①在真空中等于光速 $c=3\times10^8$ m/s ②由介质与频率决定,不同频率的电磁波在同一介质中传播,频率越高,波速越小 ④$v=\lambda f$,f 是电磁波的频率
是否需要介质	不需要介质(在真空中仍可传播)
能量传播	电磁能

4.电磁波和机械波的区别

名称 / 项目	电磁波	机械波
产生	由周期性变化的电场、磁场产生	由质点(波源)的振动产生
波的特点	横波	纵波或横波
波速	在真空中等于光速 c=3×10^8 m/s【波速还与频率有关,在同一介质中,频率越大,其传播速度越小。】	在空气中不大(如声波波速在空气中一般为340 m/s)【由介质决定】
是否需要介质	不需要介质(在真空中仍可传播)	必须有介质(真空中不能传播)
能量传播	电磁能	机械能

第 3 节　无线电波的发射和接收

一、无线电磁波的发射

1. 电磁波发射的条件

(1)要有足够高的振荡频率,频率越高,振荡电路发射电磁波的本领越大.

(2)电路必须开放,使振荡电路的电场与磁场分散到尽可能大的空间.

2. 发射原理

图甲是最简单的振荡电路,在电磁振荡的过程中,电场能与磁场能主要在电容器 C 与线圈 L 中相互转化.辐射出去的能量很少.



改造图甲中的电路:如图乙所示,改变电容器 C 极板间张角,使电场和磁场扩展到电容器 C 的外部,将电磁波发射出去.

如图丙所示,增大电容器 C 极板间的距离;如图丁所示,将一个极板简化成天线,另一个极板简化成导线接地,不仅增大了距离和张角,也使分散的空间尽可能大.

像图丙与图丁这样的发射电磁波的振荡电路称为开放电路.

3.发射过程-------电磁波的调制

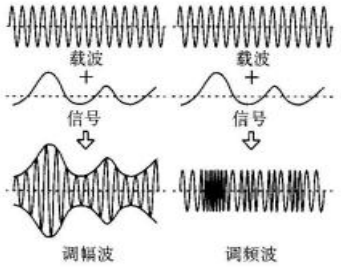
(1)定义:改变电磁波的波形,让电磁波随各种信息而发生改变的技术叫调制。

(2)调制的目的:使电磁波携带信息,并利用电磁波传递信息。

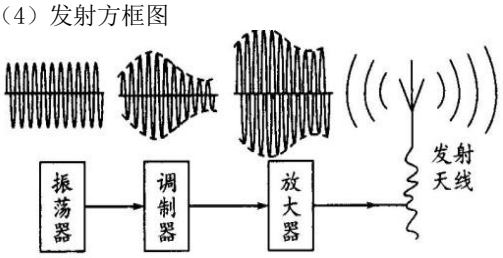
(3)调制的方式:

①调幅(AM):使高频电磁波的振幅随信号的强弱而变化,这种调制叫调幅。

②调频(FM):使高频电磁波的频率随信号的强弱而变化,这种调制叫调频。与调幅相比有:1.抗干扰能力强。2.波频带宽。3.功率利用率大。



(4)发射方框图



二、无线电波的接收

电谐振:当接收电路的固有频率跟接收到的电磁波的频率相同时,接收电路中产生的振荡电流最强,这种现象叫电谐振,相当于机械振动中的共振.

调谐:调整接收电路的固有频率,使接收电路产生电谐振的过程.

解调:从接收到电磁波的高频电路中还原出所携带的信号的过程.解调是调制的逆过程,调幅波的解调也叫作检波.

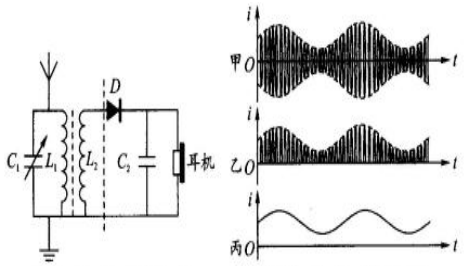


图 14-3-6　检波电路　　图 14-3-7　检波作用

甲:检波前的高频调幅电流,乙:检波后的单向脉动电流,丙:流过耳机的音频电流.

三、电磁波的发射和接收过程图

信号 → 调制(调幅/调频) → 发射 → 接收 → 调谐 → 解调 → 信号

【注意】无线电波是通过大气层的电离层反射回地面。

四、信息社会化

1. 电磁波与信息的传递

(1)电磁波的传输途径:①用电缆、光缆进行有线传输;②无线传输。

(2)电磁波的传输特点:电磁波的频率越高,相同时间传递的信息量越大,光的频率比无线电波的频率高得多,因此光缆可以传递大量信息。

2. 电磁波的应用

(1)雷达的工作原理

①雷达利用微波遇到障碍物的反射现象来测定物体的位置。

②若从发射无线电波到接收反射波的时间为 t,就可以确定障碍物的距离 $s=\frac{ct}{2}$,再由发射无线电波的方向和仰角确定障碍物的位置。

(2)电视广播的发射和接收过程

摄像机:摄取景物图像并将其转换为电信号

↓

调制和发射

↓

天线接收高频信号,调谐、解调

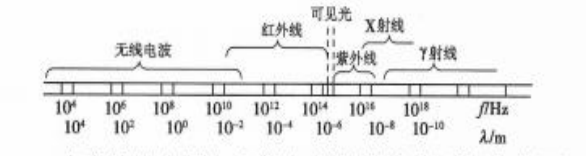
↓

显示器:还原出与摄像机屏上相同的图像

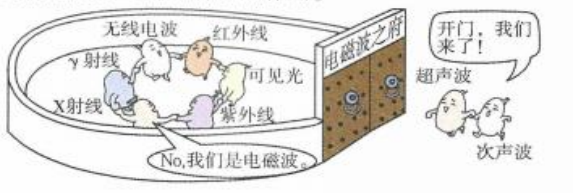
第 4 节　电磁波谱

一、无线电波

1.电磁波谱：按电磁波的波长大小或频率高低的顺序把它们排列成谱，叫电磁波谱（如下图）。



电磁波是个很大的家族,按波长由长到短包括无线电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线、γ 射线,不同的电磁波有不同的特性和作用。



2.电磁波的特性及应用

特性 \ 名称	无线电波	红外线	可见光	紫外线	X 射线	γ 射线
波长	大于 1mm	760nm-1mm	400-760nm	5-370nm	很短	最短
主要作用	波动性强、易发生衍射	热效应	视觉作用	化学作用、荧光效应、杀菌	穿透作用	贯穿作用
产生机理	振荡电路中自由电子的周期性运动	原子外层电子受激发			原子内层电子受激发	原子核受激发
真空中的速度	都是 $c=3\times10^8$ m/s					
频率	小→大					
同介质中速度	大→小					
注	①频率和波长不同的电磁波,表现出不同的特性。其中波长较长的无线电波和红外线等,易发生干涉、衍射现象;波长较短的紫外线、X 射线、γ 射线等,穿透能力较强 ②电磁波谱中,相邻两波段的电磁波的波长并没有很明显的界线,如紫外线和 X 射线,X 射线和 γ 射线都有重叠,但它们产生的机理不同					

3. 电磁波的能量

(1)电磁波是物质存在的一种形式。

(2)电磁波具有能量,它以电磁场的形式存在,电磁波的发射过程就是辐射能量的过程。

(3)电磁波的能量与频率有关,频率越大,能量越大。

（4）电磁波频率越高，越容易表现出粒子性;电磁波频率越低,越容易表现出波动性.无线电波的频率低,波长长,易表现出波动性,能发生明显的衍射现象,可绕过大山传递信息.

4. 无线电波的分类

λ>1 毫米的电磁波叫无线电波.无线电波可以分成若干波段.

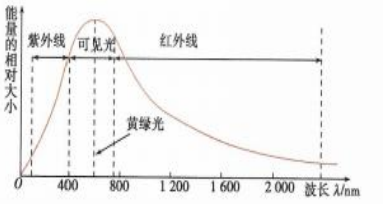
波段		波长	频率	传播方式	主要用途
长波		30 000～3 000 米	10～100 千赫	地波	超远程无线电通讯和导航
中波		3 000～200 米	100～1 500 千赫	地波和天波	无线电广播和电报通讯
中短波		200～50 米	1 500～6 000 千赫		
短波		50～10 米	6～30 兆赫	天波	
微波	米波	10～1 米	30～300 兆赫	近似直线传播	无线电广播、电视、导航
	分米波	10～1 分米	300～3 000 兆赫	直线传播	电视、雷达、导航
	厘米波	10～1 厘米	3 000～30 000 兆赫		
	毫米波	10～1 毫米	30 000～300 000 兆赫		

二、太阳辐射

太阳辐射:太阳光中含有可见光、无线电波、红外线、紫外线、X 射线、γ 射线。太阳辐射的能量主要集中在可见光、红外线和紫外线三个区域。

【拓展】太阳光中,波长在黄绿光附近,辐射的能量最强,而我们的眼睛正好对这个区域的电磁辐射最敏感。

太阳辐射能量图



【本章高频考点】

1.**电磁振荡的过程分析**

2.**电磁波谱及电磁波的特性考查。**

3.**电磁波的发射和接收过程。**

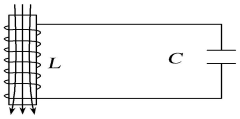
第二部分 物理方法概述

图像法

图像法是根据题意把抽象复杂的物理过程有针对性地表示成物理图像,利用图像直观、形象、简明的特点,来分析解决物理问题的方法。在 LC 振荡电路中,常常以 $u-t$ 及 $q-t$ 图像的形式,考查振荡电路的规律,利用图像中各物理量的变化情况结合振荡过程分析具体问题。

第三部分 易错、疑难问题选

1.LC 振荡电路中,某时刻磁场方向如图所示,则下列说法正确的是(　　)



A.此时电路中电流的方向为顺时针

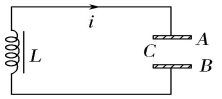
B.若磁场正在减弱,则电容器上极板带正电

C.若电容器正在放电,则电容器上极板带正电

D.若电容器正在放电,则自感电动势正在阻碍电流增大

【答案】ABD

2 图所示的 LC 振荡电路中,已知某时刻电流 i 的方向指向 A 板,且正在增大,则此时(　　)

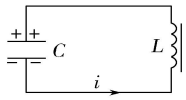


A.A 板带正电　　B.线圈 L 两端电压在增大

C.电容器 C 正在充电　　D.电场能正在转化为磁场能

【答案】D

3.某时刻 LC 振荡电路的状态如图所示,则此时刻(　　)



A.振荡电流 i 在减小　　B.振荡电流 i 在增大

C.电场能正在向磁场能转化　　D.磁场能正在向电场能转化

【答案】AD

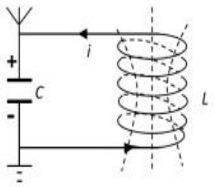
4. 如图是电磁波发射电路中的 LC 电磁振荡电路,某时刻电路中正形成如图所示方向的电流,此时电容器的上极板带正电,下极板带负电,则以下说法正确的是

A. 线圈中的磁场向上且正在增强

B. 电容器中的电场向下且正在减弱

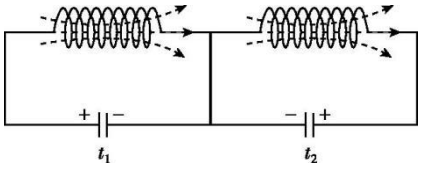
C. 若在线圈中插入铁芯,则发射电磁波的频率变大

D. 若增大电容器极板间的距离,则发射电磁波的波长变小



【答案】D

5.(多选)LC 振荡电路在 t_1 和 t_2 时刻自感线圈中磁感线方向和电容器极板带电情况如图所示,若 $t_2-t_1=\frac{\pi}{2}\sqrt{LC}$,则(　　)



A.在 t_1 时刻电容器正充电

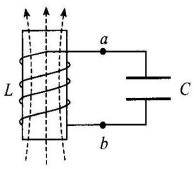
B.在 t_2 时刻电容器两极板间电场正在增强

C.在 t_1 时刻电路中电流正在增大

D.在 t_2 时刻自感线圈中磁场正在增强

【答案】BC

6.如图所示的 LC 振荡电路中,某时刻线圈中磁场方向向上,且电路的电流正在增强,则此时(　　)



A. a 点电势比 b 点高

B. 电容器两极板间场强正在减小

C. 电容器中储存的电场能正在增大

D. 线圈中感应电动势正在增大

6. B 【考点定位】本题考查电磁振荡电路.

【全能解析】根据安培定则可知,线圈中的电流从 b 到 a,此时电流正在增强,表明电容器正在放电,所以下极板带正电,上极板带负电,a 点电势比 b 点低,电容器两极板间场强正在减小,电场能正在减小,电流放电变慢,线圈中感应电动势变小,故 B 正确,ACD 错误.

【答案】B

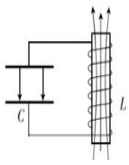
7.在 LC 振荡电路中,某时刻电容器 C 中的电场方向和线圈 L 中的磁场方向如图所示,则此时

A.电容器正在放电

B.电容器两端电压正在增大

C.电场能正在转化为磁场能

D.回路的电流正在变大



【答案】B

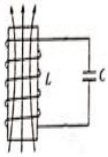
8. 如图所示的LC振荡电路中,某时刻线圈中磁场方向向上,且电路中的电流正在减小,则此时

A. 电容器上极板带负电,下极板带正电

B. 振荡电路中能量正在从磁场能转化为电场能

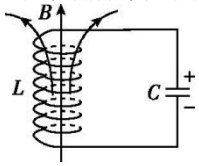
C. 电容器两极板间的场强正在减小

D. 线圈中的磁通量变化率正在变小



【答案】B

9.图表示 LC 振荡电路某时刻的情况,以下说法错误的是(　　)



A.电容器正在充电

B.电感线圈中的电流正在增加

C.电感线圈中的磁场能正在增加

D.此时刻自感电动势正在阻碍电流增大

【答案】A

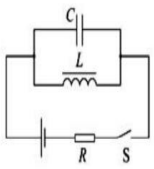
10. 如图所示,L 为电感线圈,C 为电容器,R 为定值电阻,线圈及导线电阻均不计。先闭合开关 S,稳定后,再将其断开,并规定此时 $t=0$。当 $t_1=0.01$s 时,LC 回路中电容器右极板带正电荷且电荷量第一次达到最大值,则

A. LC 回路的振荡周期为 0.02s

B. LC 回路中电流最大时电场能最大

C. $t_2=0.12$s 时线圈中磁场能最大

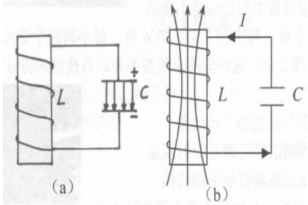
D. $t_3=0.125$s 时回路中电流沿顺时针方向



第 10 题图

【答案】C

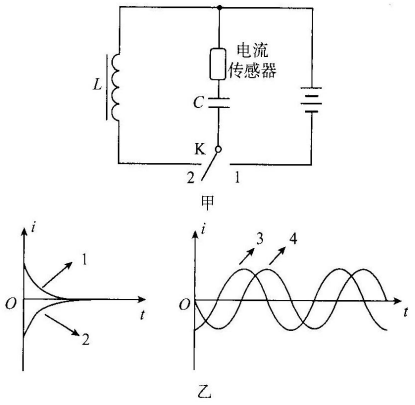
11. 如图所示是由线圈 L 和电容器 C 组成的最简单的 LC 振荡电路。先把电容器充满电。$t=0$ 时如图(a)所示,电容器两板间的电势差最大,电容器开始放电。$t=0.005$s 时如图(b)所示,LC 回路中线圈上的电流第一次达到最大值,则



A. 此 LC 振荡电路的周期 T=0.01s
B. t=0.025s 时，回路电流方向与图（b）中所示电流方向相反
C. t=0.035s 时，线圈中的磁场能最大
D. t=0.040s 至 t=0.045s 时，线圈中的电流逐渐减小

【答案】C

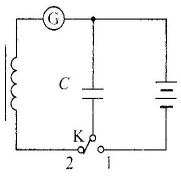
12. 如图甲所示电路中，把开关 K 扳到 1，电源对电容器充电，待充电完毕，把开关 K 扳到 2，电容器与带铁芯的线圈 L 组成的 LC 振荡电路中产生振荡电流，电流传感器能实时显示流过电容器的电流，电流向下流过传感器的方向为正方向. 如图乙所示的 1、2、3、4 是某同学绘制的四种电流随时间变化的图像. 下列说法正确的是（　　）



A. K 扳到 1 时电流如图线 1 所示，K 扳到 2 时电流如图线 4 所示
B. K 扳到 1 时电流如图线 2 所示，K 扳到 2 时电流如图线 3 所示
C. 换用电动势更大的电源，振荡电流的周期将变大
D. 拔出线圈的铁芯，振荡电流的频率将降低

【答案】A

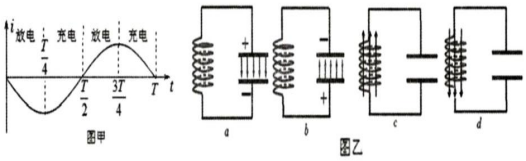
13. 如图所示的 LC 振荡电路，开关 K 先拨至 1，使电容器充满电，然后将开关 K 拨至 2，电容器开始放电，则下列说法中正确的是（　　）



A. 电容器放电结束时，电感线圈 L 中的感应电动势最大
B. 电容器放电结束时，电感线圈 L 中的磁感应强度最大
C. 如果电容器的正对面积减半，则该振荡电路的周期将减半
D. 如果一开始只给电容器充一半的电荷量，则该振荡电路的频率将减半

【答案】B

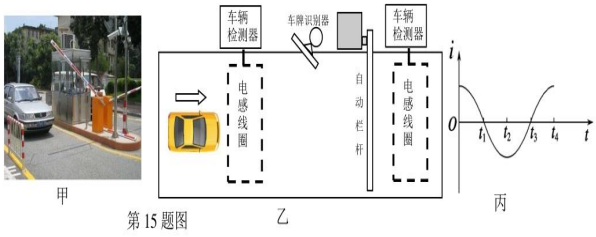
14. 如图所示，图甲是 LC 振荡回路中电流随时间的变化关系，若以图乙回路中顺时针方向的电流为正，a、b、c、d 均为电场能或磁场能最大的时刻，下列说法正确的是



A. 图乙中的 a 是电场能最大的时刻，对应图甲中的 $\frac{3T}{4}$ 时刻
B. 图乙中的 b 是电场能最大的时刻，此后的 $\frac{T}{4}$ 内电流方向为正
C. 图乙中的 c 是磁场能最大的时刻，对应图甲中的 $\frac{T}{4}$ 时刻
D. 图乙中的 d 是磁场能最大的时刻，此后电容 C 的下极板将充上正电荷

【答案】BC

15. 如图甲所示为某小区进口处的智能道闸系统，其简化示意图如图乙所示，两个车辆检测器的电感线圈分别铺设在自动栏杆前、后的地面下，检测器内部的电容器与电感线圈构成 LC 振荡电路，振荡电流如图丙所示。当汽车接近或离开线圈时，使线圈的自感系数发生变化，从而引起振荡电路中的电流频率发生变化，车辆检测器检测到这个变化就发出电信号，“通知”车牌识别器对车辆身份进行鉴别，然后控制自动栏杆抬起或落下。下列说法正确的是

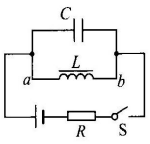


第 15 题图

A. 图丙中，t_1 时刻电容器两端电压为最大值
B. 图丙中，t_3～t_4 时间内，电容器上的电荷量增加
C. 汽车接近线圈时，线圈的自感系数增大，振荡电流的频率降低
D. 汽车离开线圈时，线圈的自感系数增大，振荡电流的频率升高

【答案】AC

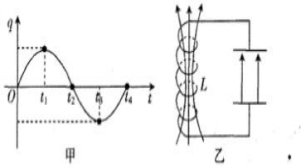
16. 如图所示，线圈 L 的自感系数为 0.1 H，电容器 C 的电容为 40 μF，电阻 R 的阻值为 3 Ω，电源电动势为 1.5 V，内阻不计. 闭合开关 S，待电路达到稳定状态后断开开关 S，LC 电路中将产生电磁振荡. 若断开开关 S 的时刻为 t=0，忽略线圈 L 直流电阻和振荡过程中的能量损耗，则（　　）



A. t=0 时，电容器两极间电压为 1.5 V
B. $t=\pi\times10^{-2}$ s 时，线圈 L 的自感电动势为 0
C. $t=2\pi\times10^{-2}$ s 时，通过线圈电流方向 $a\to b$
D. 电路中产生的振荡电流有效值为 0.5 A

【答案】BC

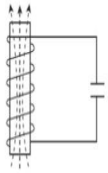
17. LC 振荡电路中电容器上极板电量 q 随时间 t 在一个周期内的变化图线如图甲所示，某时刻线圈中的磁感应强度方向和极板间的电场强度方向如图乙所示。下列说法正确的是



A. t_1 时刻线圈中自感电动势最大
B. t_2 时刻线圈中电流方向发生变化
C. t_2～t_3 中某时刻与图乙状态相对应
D. t_3～t_4 时间内回路中的电流为顺时针方向

【答案】ACD

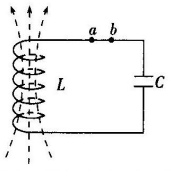
18. LC 振荡电路中，某时刻的磁场方向如图所示，则



A. 若磁场正在减弱，则电容器上极板带正电
B. 若电容器正在放电，则电容器上极板带正电
C. 若电容器上极板带正电，则线圈中电流正在增大
D. 若在电容器板间插入电介质，则振荡频率会增大

【答案】A

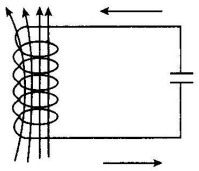
19. （多选）LC 振荡电路中，某时刻的磁场方向如图所示，则（　　）



A. 若磁场正在减弱，则电容器正在充电，电流由 b 向 a
B. 若磁场正在减弱，则电场能正在增大，电容器上极板带负电
C. 若磁场正在增强，则电场能正在减小，电容器上极板带正电
D. 若磁场正在增强，则电容器正在充电，电流由 a 向 b

【答案】ABC

20. 如图为 LC 振荡电路在 t=0 时刻的状态，该时刻电容器放电刚结束，电磁振荡的周期 $T=0.8$ s，下列说法正确的是（　　）



A. $t=0.1$ s 时，线圈中的自感电动势在增大

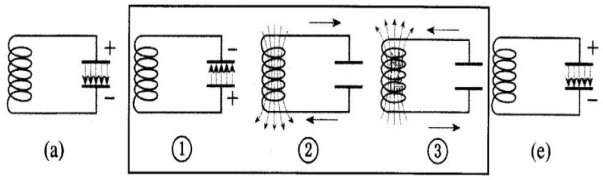
B. $t=0.3$ s 时，电场方向向下，电场强度大小逐渐减小

C. $t=0.5$ s 时，磁感应强度方向向下，大小逐渐减小

D. $t=5.68$ s 时，电路中电流正在增大，极板带电荷量在减小

【答案】AC

21. 如图所示为 LC 电路产生电磁振荡的一个循环过程。从图中状态（a）开始，经过一个周期又回到初始态（e），则对于方框中三个状态在该周期中出现的先后顺序正确的是



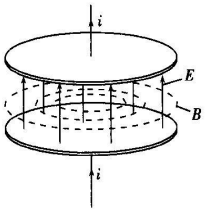
第 5 题图

A. ①②③　　B. ③②①　　C. ③①②　　D. ②①③

【答案】C

22. 麦克斯韦的电磁场理论

提出：变化的电场产生磁场。以平行板电容器为例：圆形平行板电容器在充、放电的过程中，板间电场发生变化，产生的磁场相当于一连接两板的板间直导线通以充、放电电流时所产生的磁场。如图所示，LC 电路中若某时刻连接电容器的导线具有向上的电流，则下列说法中正确的是（　　）



A. 电容器正在放电

B. 两平行板间的电场强度在减小

C. 该变化电场产生顺时针方向（俯视）的磁场

D. 两极板间电场最强时，板间电场产生的磁场却为零

【答案】D

23. 红外线测温仪在抗击新冠肺炎疫情中发挥了重要作用，根据所学知识判断，红外线测温仪是根据红外线的哪一个特性来测量人的体温的？



A. 红外线的热效应

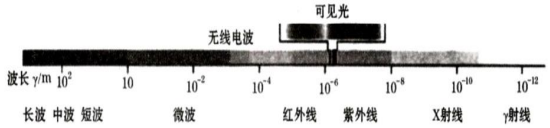
B. 一切物体都发射红外线

C. 红外线波长较长，容易穿透云雾

D. 物体的温度越高，红外辐射越强

【答案】D

24. 太赫兹辐射通常指频率在 0.1~10THz(1THz=10^{12}Hz)，太赫兹波对人体无危害，多用于国家安全、信息技术领域，被誉为“改变未来世界十大技术”之一。通过和电磁波谱对比，下列关于太赫兹波说法正确的是



A. 太赫兹波光子能量比红外线光子能量更大

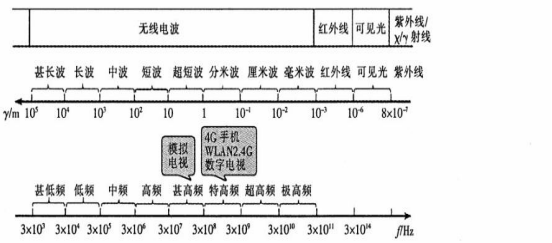
B. 太赫兹波比紫外线更难使金属发生光电效应

C. 太赫兹波比微波更容易发生衍射

D. 太赫兹波比 X 射线穿透能力更强

【答案】B

25. 5G 是“第五代移动通信网络”的简称，目前世界各国正大力发展 5G 网络。5G 网络使用的无线电波通信频率在 3.0GHz 以上的超高频段和极高频段，比目前 4G 及以下网络（通信频率在 0.3GHz~3.0GHz 间的特高频段）拥有更大的带宽和更快的传输速率。未来 5G 网络的传输速率（指单位时间传送的数据量大小）可达 10G bps（bps 为 bits per second 的英文缩写，即比特率、比特/秒），是 4G 网络的 50~100 倍。关于 5G 网络使用的无线电波相比 4G 网络，下列说法正确的是



A. 在真空中的传播速度更快　　B. 在真空中的波长更长

C. 衍射的本领更弱　　D. 频率更高，相同时间传递的信息量更大

【答案】CD

第五章　传感器

第一部分　基础知识点

第 1 节　认识传感器

一、神奇的传感器

1. 定义

能够感受诸如力、温度、光、声、化学成分等被测量，并能把它们按照一定的规律转换为便于传送和处理的可用信号输出的一类器件或装置。

【点拨】通常转换成的可用信号是电压、电流等电学量或转换为电路的通断。非电学量转换为电学量的意义在于可以方便地进行测量、传输、处理和控制。

2. 传感器的组成与应用模式



图 5.1-4　人的感觉器官与传感器的类比

二、传感器的种类

①根据被测量的不同，可分为声、光、压力、位移、加速度、温度等传感器。

②根据具体工作原理的不同，可分为电阻式、电容式、电感式、光电式、热电式、压电式、磁电式等传感器。



甲　利用温度传感器制成的电子体温计



乙　利用压力传感器制成的电子秤



丙　利用电化学气体传感器制成的可燃气体报警器



丁　利用葡萄糖生物传感器制成的血糖仪

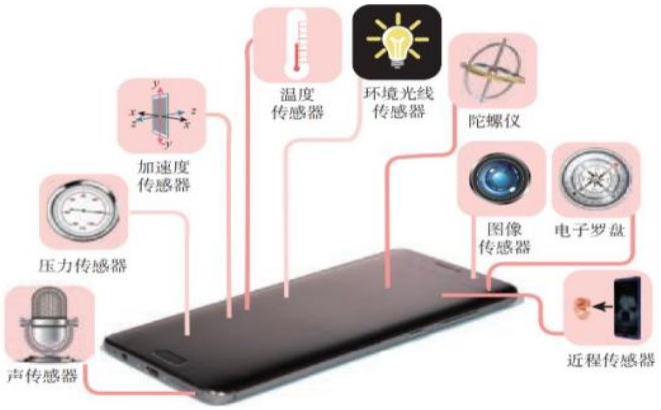


图 5.1-6　智能手机中的部分传感器

三、分析传感器问题需要注意的几点

(1)感受量分析：明确传感器所感受的物理量，如力、热、光、磁等。

(2)输出信号分析：明确敏感元件，分析它的输入信号和输出信号，及二者间的变化规律。

(3)电路结构分析：分析传感器所在电路的结构。

(4)执行机构工作分析：根据信息获得控制执行机构进行工作的过程。

第 2 节　常见传感器的工作原理及应用

1.光敏电阻

(1)定义：感知光照强弱的敏感元件。

(2)作用：把光照强弱这个光学量(非电学量)转换为电阻这个电学量。

(3)特点：光敏电阻的阻值大小与光照的强弱有关。光敏电阻是由半导体材料制成的，无光照时，载流子极少，导电性能不好，即阻值较大；随着光照的增强，载流子增多，导电性能变好，即阻值变小。

⚠ 提醒

一般电阻阻值的大小与光照强弱无关。

(4)光电计数的原理：当有物体挡住射向光敏电阻的光时，光敏电阻的阻值变大，供给信号处理系统的电压变高，这种高低交替变化的信号经过处理转换为相应的数字，就能实现自动计数的功能。



图 5.2-1　光敏电阻

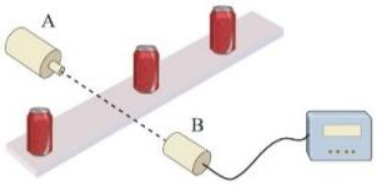


图 5.2-3　光电计数的基本原理

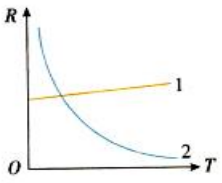
2.金属热电阻与热敏电阻

(1)定义：感知温度的敏感元件。

(2)作用：把温度这个热学量(非电学量)转换为电阻这个电学量。

(3)特点

①金属热电阻与热敏电阻的电阻大小都与温度的高低有关。



②金属热电阻由金属丝制成，温度越高时电阻越大。

③热敏电阻由半导体材料制成，温度低时，载流子极少，导电性能不好；随着温度的升高，载流子增多，导电性能变好。即热敏电阻在高温时，电阻值很小；在低温时，电阻值较大。

(4)金属热电阻与热敏电阻的比较

项目	金属热电阻	热敏电阻
制作材料	金属(铂)	半导体(氧化锰)
特点	金属的电阻率随温度的升高而增大	半导体材料的电阻率随温度的升高而减小
优点	化学稳定性好，测温范围大	灵敏度高

3.电阻应变片

(1)定义：力敏元件。

(2)作用：把物体形变这个力学量转换为电阻这个电学量。

(3)分类

①金属电阻应变片：金属导体在外力作用下发生机械形变(伸长或缩短)时，其电阻随着它所受机械形变的变化而变化的现象称为金属的电阻应变效应，金属电阻应变片是利用这一原理制成的。

②半导体电阻应变片：是利用半导体材料的压阻效应制成的。

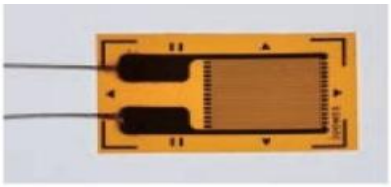
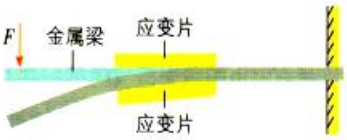


图 5.2-6　电阻应变片

4.力传感器的应用---------电子秤

(1)应变式力传感器的构造：由金属梁和电阻应变片组成。

(2)应变式力传感器的原理：如图所示，用弹簧钢制成的梁形元件右端固定，在梁的上、下表面各贴一个应变片。在梁的自由端施力 F，则梁发生弯曲，上表面拉伸，下表面压缩，上表面应变片的电阻变大，下表面应变片的电阻变小。F 越大，弯曲形变越大，应变片的电阻变化就越大。如果让应变片中通过的电流保持恒定，那么上表面应变片两端的电压变大，下表面应变片两端的电压变小。传感器把这两个电压的差值输出。外力越大，输出的电压差值也就越大。



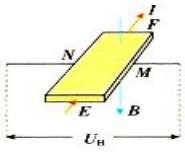
(3)应用：电子秤，测量汽车载重的地磅秤等。

⚠ 提醒

力传感器除了可以测量重力外，应变式力传感器也用来测量其他各种力，如汽车和卷扬机的牵引力等。

5.霍尔元件

(1)组成：如图所示，在一个很小的矩形半导体（如砷化镓）薄片上，制作四个电极 E、F、M、N，它就成为一个霍尔元件。



(2)作用：把磁感应强度这个磁学量转换为电压这个电学量。

(3)原理：在 E、F 间通入恒定的电流 I，同时外加与薄片垂直的磁场 B 时，薄片中的载流子在洛伦兹力作用下，向着与电流和磁场都垂直的方向漂移，使 M、N 间出现电压（如上图），称为霍尔电压 U_H。

(4)霍尔电压：$U_H=k\frac{IB}{d}$，其中 k 为比例系数，称为霍尔系数，其大小与薄片的材料有关，d 为薄片的厚度。霍尔电压 U_H 与磁感应强度有线性关系，因此利用霍尔元件可以测量磁感应强度的大小和方向。

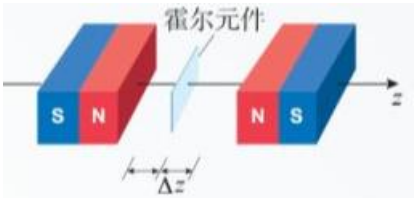
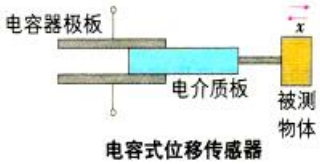


图 5.2-13　利用霍尔元件测量微小位移

6.电容式传感器

(1)作用：电容式传感器可以把物体的某个非电学物理量（如位移、压力等）转换为电容这个电学量。

(2)原理：物体的非电学量变化引起电容器的极板间距 d、两极板正对面积 S 和电介质的相对介电常数 ε_r 等的变化，导致电容器的电容发生变化，从而影响电路中的电流和电压，达到测量、处理和控制的目的。



电容式位移传感器

【总结】

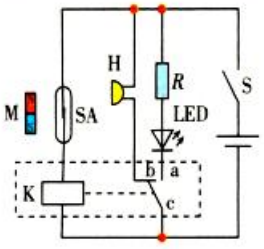
常见传感器

传感器种类	敏感元件	与之相联系的物理知识
光电传感器	光敏电阻	直流电路动态分析
温度传感器	热敏电阻	直流电路问题
力传感器	压敏电阻等	力学、运动学与直流电路
电容传感器	电容器	力、运动与含电容电路

第 3 节　利用传感器制作简单的自动控制装置

1.门窗防盗报警装置

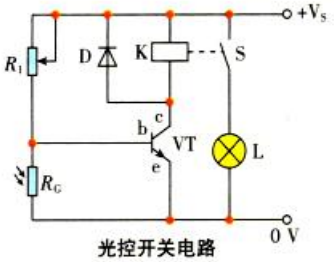
门窗防盗报警装置具有自动提示报警的功能。在睡觉前连接好电路，启动防盗报警装置。当门窗紧闭时，蜂鸣器不响，指示灯亮；当门窗被打开时，蜂鸣器发出声音警报，指示灯灭。



门窗防盗报警装置电路图

2.光控开关

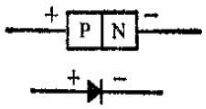
光控路灯可以根据光照的变化自动开启或关闭。



光控开关电路

【补充知识】晶体二极管与晶体三极管

（1）晶体二极管



（2） 晶体三极管

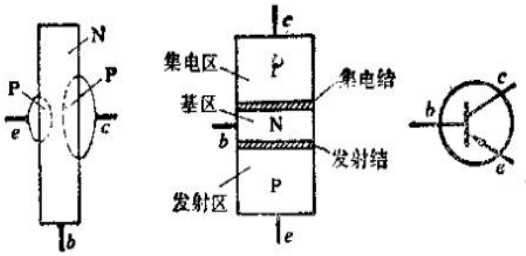


图 8-28 PNP 型晶体三极管

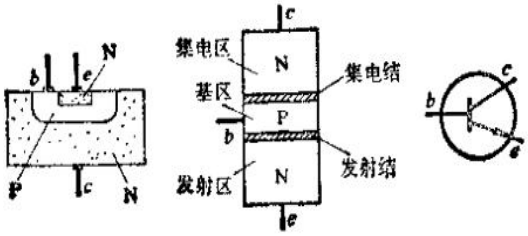


图 8-29 NPN 型晶体三极管

选择性必修第三册

第一章 分子动理论

第一部分 基础知识点

第 1 节 分子动理论的基本内容

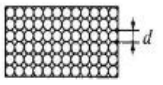
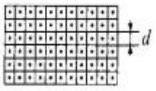
一、物体是由大量分子组成的

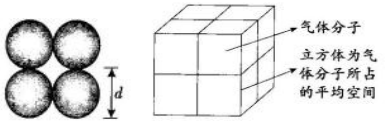
1.物体是由大量分子组成的

构成物质的单元是多种多样的，有原子、离子、分子等. 在热学中，由于这些微粒做热运动时遵从相同的规律，所以统称为分子.

2.两种分子模型

分子的结构是很复杂的，且分子间存在空隙. 为了方便研究分子，建立两种分子模型：①对于固体和液体分子，分子模型为球体；②对于气体分子，分子模型为立方体，每个分子所占的空间为相同的立方体，气体分子在立方体的中心，分子的平均间距等于立方体的棱长.

	模型	球形模型	立方体模型
两个模型	对象	固体和液体分子	气体分子
	原理		
	结果	$d=\sqrt[3]{\frac{6V_0}{\pi}}$	$d=\sqrt[3]{V_0}$
	意义	d 为分子直径	d 为分子间平均距离
	数量级	约为 10^{-10} m	约为 10^{-29} m^3
理解“大量”	①从分子几何尺寸的大小来感受，一般分子直径的数量级为 10^{-10} m ②从分子体积的数量级来感受，一般分子体积的数量级为 10^{-29} m^3 ③从分子质量的数量级来感受，一般分子质量的数量级为 10^{-26} kg ④分子如此微小，用肉眼、光学显微镜根本无法观察，只有能放大几亿倍的扫描隧道显微镜才观察到原子的排列		



3.分子的大小

(1)**尺度大小**：多数分子大小的数量级为 10^{-10} m。

(2)**质量大小**：一般分子质量的数量级为 10^{-26} kg。

4.阿伏伽德罗常数

(1)**定义**：1 mol 任何物质都含有相同的粒子数，这个数量叫阿伏加德罗常数。

(2)**大小**：$N_A=6.02\times10^{23}$ mol^{-1}。

【点拨】阿伏加德罗常数是联系微观世界和宏观世界的桥梁。它把物质的摩尔质量、摩尔体积这些宏观物理量和分子质量、分子体积这些微观物理量联系起来了。

第二部分 方法、规律与技巧

利用阿伏伽德罗常数进行估算

1.建立微观模型

(1)**球体模型**

常应用于固体、液体分子微观量的估算。设分子直径为 d，则分子体积 $V_0=\frac{4}{3}\pi R^3=\frac{\pi}{6}d^3$。

(2)立方体模型

常应用于气体分子微观量的估算。设分子间距离为 d，则气体分子平均占有的体积 $V_0=d^3$。

2.几个常用关系

(1)一个分子的质量：$m=\frac{M}{N_A}$.

(2)一个分子的体积：$V_0=\frac{M}{\rho N_A}$.

(3)一摩尔物质的体积：$V=\frac{M}{\rho}$.

(4)单位质量中所含分子数：$n=\frac{N_A}{M}$.

(5)单位体积中所含分子数：$n'=\frac{\rho N_A}{M}$.

(6)气体分子间的距离：$d=\sqrt[3]{\frac{V}{N_A}}$.

(7)分子球体模型 $d=\sqrt[3]{\frac{6V}{\pi N_A}}$.

注意：求每个分子的体积时用公式 $V_0=\frac{M}{\rho N_A}$，只适用于固体和液体. 因为组成固体、液体的分子间隙比较小，可近似认为分子紧密排列，即忽略分子间隙，但此公式不能用于求气体分子的体积，因为气体分子间距离较大，用此公式求出的是每个气体分子平均占有的体积.

二、分子热运动

1.分子热运动

组成物体的分子永不停息地做无规则运动，这种运动跟温度有关，所以通常把分子的这种运动叫热运动。

⚠ 提醒

物体是由大量分子组成的，这些分子没有统一的运动步调，单独看来，每个分子的运动都是无规则的，带有偶然性，但大量分子的集体行为并不是无规律的，遵循统计规律。

2.扩散现象

(1)定义：不同物质互相接触时彼此进入对方的现象叫扩散。

(2)特点

①扩散快慢与物质的状态、温度有关。

②从浓度大处向浓度小处扩散。

(3)产生原因：物质分子的无规则运动。

(4)理解

①扩散现象不受外界的影响，也不是化学反应的结果，而是由物质分子的无规则运动产生的。

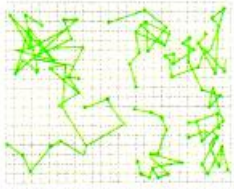
②物质处于固态、液态和气态时均发生扩散现象，只是气态物质的扩散现象最显著；常温下固态物质的扩散现象非常不明显。

③在两种物质一定的前提下，扩散现象发生的显著程度与物质的温度有关，温度越高，扩散现象越显著，这表明温度越高，分子运动得越剧烈。

(5)意义：扩散现象可以直接证明分子做无规则热运动。

3.布朗运动

(1)定义：悬浮在液体(或气体)中的固体微粒永不停息的无规则运动叫布朗运动。



用显微镜观察花粉微粒的运动

⚠ 提醒

上图并非微粒做布朗运动的运动轨迹，它是微粒的等时间位置连线图，通过它能够看出布朗运动的无规则性。

(2)特点

①永不停息的无规则运动。

②微粒越小，现象越明显。

③温度越高，运动越激烈。

(3)布朗运动的产生原因：液体(或气体)分子对微粒撞击作用的不平衡。

(4)意义：布朗运动虽不是分子的运动，但反映了液体(或气体)分子运动的情况，可以间接证明分子做无规则运动。

布朗运动的研究颗粒的直径数量级在 10^{-7} m ~ 10^{-6} m 之间，人的肉眼看不到，只能借助高倍显微镜观察. 反之人能用眼睛观察到的灰尘颗粒并不能发生明显的布朗运动.

4.扩散现象、布朗运动、分子热运动的比较

	扩散现象	布朗运动	分子热运动
对象	分子	微粒	分子
大小	约 10^{-10} m	约 10^{-7} m~10^{-6} m	约 10^{-10} m
粒子是否可见	肉眼不可见，扫描隧道显微镜可见	肉眼不可见 显微镜可见 (如花粉、PM2.5) 肉眼可见不是微粒 (如灰尘)	肉眼不可见，扫描隧道显微镜可见

运动级别	分子运动	微粒运动	分子运动
产生原因	由分子的无规则运动产生	液体分子 微粒 因分子对微粒的撞击不平衡而产生	自发产生
影响因素	温度	颗粒大小和温度	温度
活动范围	任何两种物质间	只能在液体、气体中发生	任何物质中发生
所属变化	物理变化	物理变化	物理变化
共同特点	①都是无规则运动 ②都随温度的升高而更加激烈		
联系	①扩散现象直接反映了分子热运动 ②布朗运动间接反映了分子热运动		
扩散运动举例	①墨水不断地扩散到清水中 ②香水的香味可以传得较远		

三、分子间的作用力

1.分子间存在空隙的证明

(1)分子可以不停地做无规则运动。

(2)气体很容易被压缩。

(3)水和酒精混合后总体积减小。

(4)压在一起的金块和铅块,各自的分子能扩散到对方的内部。

(5)物体的热胀冷缩现象。

2.分子间的作用力-----分子力

(1)**定义**:分子间同时存在着相互作用的引力和斥力,这两个力的合力就是分子力。

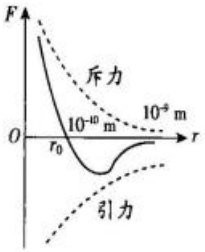
(2)**分子力存在的证据**

①分子引力存在的证据:分子间有空隙,但液体仍有一定的体积,固体有一定的体积、形状,且很难被拉断等。

②分子斥力存在的证据:分子间有空隙,但用力压缩物体,物体会产生反抗压缩的弹力。

3.分子间作用力的变化

分子间的作用力与分子间的距离有关,分子间的引力和斥力都随分子间距离的增大而减小、随分子间距离的减小而增大,但总是斥力变化得较快。

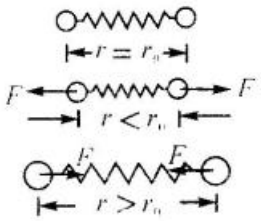


分子间作用力与分子间距离的关系

4.分子间的作用力小结

分子距离大小	$F_{引}$、$F_{斥}$的关系	分子力的表现
$r<r_0$ (压缩的弹簧)	$F_{引}<F_{斥}$	分子力表现为斥力
$r=r_0$ (原长的弹簧)	$F_{引}=F_{斥}$	分子力 $F=0$,分子处于平衡位置,r_0 约为 10^{-10} m
$r>r_0$ (伸长的弹簧)	$F_{引}>F_{斥}$	分子力表现为引力
$r>10r_0$ (拉断的弹簧)	分子力变得十分微弱,可忽略不计	

与弹簧模型(类比)



5.分子力的成因:分子间的作用力是由带正电的原子核和带负电的电子的相互作用引起的。

四、分子动理论

分子动理论是从物质微观结构的角度来研究热现象的理论。

基本内容:
- 物体是由大量分子组成的
- 分子永不停息地做无规则运动
- 分子间存在着相互作用力

第 2 节　实验:用油膜法估测油酸分子的大小

一、实验目的

1. 学习用宏观量测微观量的方法。

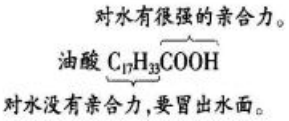
2. 估测油酸分子的大小。

二、实验原理

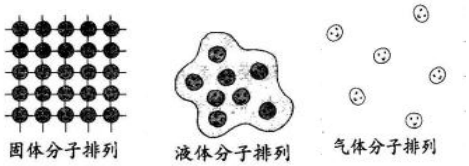
1. 将油酸分子简化为球形处理，并认为它们紧密排布。

2. 利用油酸的酒精溶液在平静的水面上形成单分子油膜，测出一定体积油酸在水面上形成的油膜面积，用 $d=\frac{V}{S}$ 计算出油膜的厚度，其中 V 为一滴油酸酒精溶液中纯油酸的体积，S 为油膜面积，这个厚度 d 就近似等于油酸分子的直径。





【物质三态的分子排列】



三、实验器材

盛水浅盘、注射器（或滴管）、试剂瓶、坐标纸、玻璃板、爽身粉（或石膏粉）、油酸、酒精、量筒、彩笔。

四、实验步骤

1.配置油酸酒精溶液

取油酸 1 mL 注入 500 mL 的容量瓶中，然后向容量瓶内注入酒精，直到液面达到 500 mL 刻度线为止，摇动容量瓶，使油酸充分溶解在酒精中，这样就得到了 500 mL 含 1 mL 纯油酸的油酸酒精溶液，即纯油酸与溶液的体积比 $\eta=\frac{1}{500}$。

2.测一滴油酸酒精溶液中的油酸的体积

用注射器取出配置好的油酸酒精溶液，缓缓推动活塞使溶液一滴一滴地滴入量筒，记下量筒内增加一定体积（如 x mL）时的滴数 n，算出一滴油酸酒精溶液的体积 $V'=\frac{x}{n}$ mL。再根据油酸酒精溶液中油酸的体积比 η，算出一滴油酸酒精溶液中油酸的体积 $V=V'\eta$。

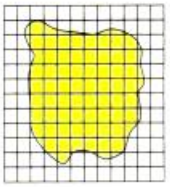
3.形成油膜

在浅盘中倒入约 2 cm 深的水，然后将爽身粉均匀地撒在水面上，再用注射器将油酸酒精溶液滴一滴在水面上，一会儿就会在水面上形成一层形状不规则的油酸薄膜。

4.测油酸薄膜的面积

待油酸薄膜的形状稳定后，将玻璃板放在浅盘上，并将油酸薄膜的形状用彩笔画在玻璃板上。

将画有油酸薄膜轮廓的玻璃板放在坐标纸上，算出油酸薄膜的面积 S。



格子为正方形，边长为1 cm。多于半格的算一格，不足半格的舍去，可数得格子数=65格，故油膜面积S=65×1 cm^2=65 cm^2。

5.估算油酸分子的大小

根据测出的一滴油酸酒精溶液里纯油酸分子的体积 V 和油酸薄膜的面积 S，可求出油膜的厚度 l，则 l 可看作油酸分子的直径 d。即 $d=l=\frac{V}{S}$。

五、注意事项

1. 测一滴油酸酒精溶液的体积时，滴入量筒中的油酸酒精溶液的体积应为整毫升数，应多滴几滴，数出对应的滴数，这样求平均值误差较小。

2. 实验前应注意浅盘是否干净，向水面滴油酸酒精溶液时，应尽量靠近水面，不能离水面太高，否则油膜难以形成。

3. 在水面撒爽身粉后，不要再触动盘中的水。

4. 待测油酸薄膜扩散后又收缩，要在稳定后再画轮廓，扩散后又收缩有两个原因：第一，水面受油酸液滴冲击凹陷后又恢复；第二，酒精挥发后液面收缩。

5. 实验要求估算分子大小，结果数量级要符合 10^{-10} m。

六、误差分析

1. 油酸酒精溶液配制后长时间放置，溶液的浓度会改变，会给实验带来较大误差。

2.油膜面积的测量误差

(1)油膜形状的画线有误差，要待油膜形状稳定后，再画轮廓，画线时视线应与板面垂直。

(2)利用数格子法计算轮廓面积时，轮廓的不规则性容易带来计算误差。为减小误差，少于半个格子的舍去，多于半个格子的算一个。方格边长的单位越小，计算出的面积越精确。

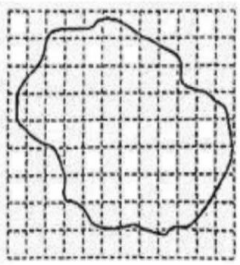
3. 测量量筒内溶液增加 1 mL 的滴数时，注意正确的观察方法。

(2) 在“油膜法估测油酸分子的大小”实验中，

①本实验中做了三点理想化假设：将油酸分子视为球形；_____；油酸分子是紧挨在一起的。

②配置油酸酒精溶液时，油酸酒精溶液的浓度为每 1000mL 溶液中有纯油酸 5mL，用注射器测得 0.5mL 上述溶液有 100 滴，把一滴该溶液滴入盛水的表面撒有痱子粉的浅盘里，测得油酸膜的近似轮廓如图丙所示，图中正方形小方格的边长为 2cm，则估测出油酸分子的直径是_____m.（此结果保留 2 位有效数字）。

③在一次实验中得到了如图丁所示的油膜，如果按此油膜来计算分子直径，你认为测量结果相对真实值会_____（填“偏大”、“偏小”或者“无系统误差”）



图丙



图丁

【答案】

(2) ①油酸分子形成单层分子膜，②$1.0\times10^{-9}$m（1.0×10^{-9}m~1.1×10^{-9}m），③偏大

第 3 节　分子运动速率分布规律

一、气体分子运动的特点

气体分子间的距离大约是分子直径的 10 倍，此时分子间的作用力几乎为 0. 通常认为，气体分子除了相互碰撞或者跟器壁碰撞外，不受力而做匀速直线运动，故气体会充满整个空间.

分子之间频繁地碰撞，每个分子的速度大小和方向频繁地改变，分子的运动杂乱无章，每个时刻向着任何一个方向运动的分子都有，且各个方向运动的气体分子数目几乎相等.

【一个空气分子在 1S 内与其他分子的碰撞达 65 亿之多】

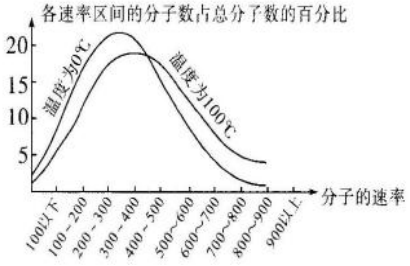
二、分子运动速率分布图像

分子的运动速率按一定规律分布，下图是氧气分子在 0 ℃和 100 ℃两种不同情况下的速率分布情况.

分布规律：

①速率呈“中间多，两头少”分布，但两个温度下具有最大比例的速率区间不同；

②100 ℃时分子的平均速率比 0 ℃时分子的平均速率大，温度越高，平均速率越大.



结论：

通过定量分析可知，理想气体的热力学温度 T 与分子的平均动能 $\overline{E_k}$ 成正比，即 $T=a\overline{E_k}$，式中 a 是比例常数.

这表明温度是分子平均动能的标志.

特别注意：

相同的温度下，不同气体（如氧气、氢气）的平均动能均相同，但平均速率不同.

动能表达式为 $E_k=\frac{1}{2}mv^2$，由于不同气体的质量不同，因此不同气体的速率不同.

三、气体压强的微观解释

(1)定义

气体作用在器壁单位面积上的压力叫作气体的压强.

(2)单位

国际单位是帕斯卡（Pa），常用单位还有标准大气压（atm）、厘米汞柱（ cmHg）.

1 atm=1.013×10^5 Pa，

1 atm=76 cmHg.

(3)微观解释

气体的压强是由气体中大量的分子做无规则的热运动时对器壁频繁持续的碰撞产生的，压强就是大量气体分子作用在器壁单位面积上的平均作用力.

【设气体分子质量为 m，平均速率为 V，容器内单位体积分子数为 n，根据统计规律，t 时间撞在面积 S 的器壁上的分子数 N=$\frac{1}{6}vtSn$

根据动量定理有 $pSt=2Nmv$ 得 $p=\frac{1}{3}nmv^2$ 】

(4)气体压强的决定因素

气体压强由气体的分子密度与平均动能决定. 在分子密度一定时，分子的平均动能越大，分子碰撞器壁对器壁产生的作用力就越大，气体的压强就越大；在分子平均动能一定时，气体分子越密集，每秒碰撞器壁单位面积的分子数就越多，气体压强也就越大.

①宏观上:气体的温度和体积.

②微观上:分子的平均动能和分子的密集程度.

第 4 节　分子的动能和分子势能

一、分子动能

1.定义：做热运动的分子具有的动能叫分子动能。

2.特点

（1）由于分子在永不停息地做无规则运动，所以不论温度高低，分子的动能都不会为 0.

(2)各个分子热运动的速率大小不一,且不断改变,所以某个分子的动能大小没有意义,我们更关注大量分子整体表现出来的热学性质,即所有分子的动能的平均值。

3.分子平均动能

(1)**定义**:物体内所有分子的动能的平均值叫分子平均动能。

(2)温度是分子平均动能的标志。物体所含分子的平均动能越大,分子热运动越剧烈,宏观表现为物体的温度越高。

⚠ 提醒

(1)温度相同的不同物体,分子平均动能相同。

(2)温度是大量分子无规则运动的宏观表现。温度升高,分子平均动能增大,并非每一个分子动能都增大,个别分子动能可能减小。

4.分子总动能

物体所含分子的总动能由两个因素决定:分子的平均动能(由物体的温度决定)和物体所含分子的数目$\left(N=\frac{m}{M}N_A\right)$。

二、分子势能

1. 定义:分子间存在着相互作用力,具有由分子间相对位置所决定的能量,叫分子势能。

2.决定因素:

a)微观上,决定于分子间距离和分子排列情况;

b)宏观上,决定于体积和状态.

3.分子力做功与分子势能的关系【与重力、弹簧的弹力、电场力类似------都属于“保守力”】

分子力做功与路径无关,分子力做的功是分子势能变化的量度,分子力做正功,分子势能减小,分子力做负功,分子势能增大,分子势能的变化量就等于分子力所做的功的量。

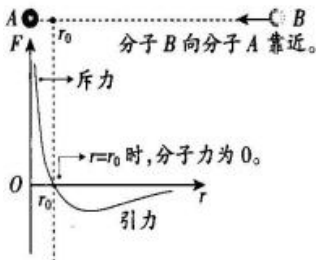
4.分子势能与分子间距离的关系

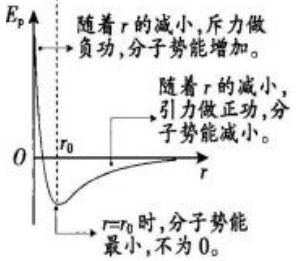
(1)当$r>r_0$时,分子力表现为引力,随着 r 的减小,分子力做正功,分子势能减小。

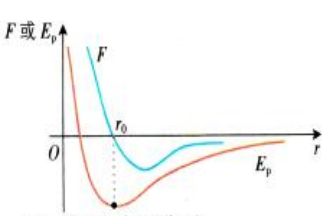
(2)当$r<r_0$时,分子力表现为斥力,随着 r 的减小,需不断克服分子斥力做功,分子势能增大。

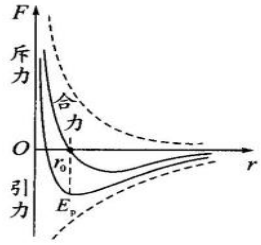
(3)当$r=r_0$时,分子力为0,分子势能为最小值。一般选定分子间距离为无限远($r\to\infty$)时,分子势能为0。

分子间的作用力与分子势能



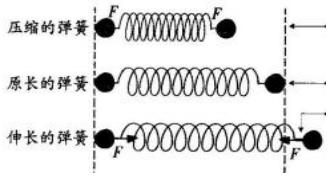






⚠ 提醒

分子势能与分子间距离有关,但不能简单地认为分子间距离变大,分子势能增大。



三、物体的内能

1. 定义:物体内所有分子的热运动动能与分子势能的总和,叫物体的内能。



2.决定因素

(1)从宏观角度看，物体的内能跟物体的温度和体积有关。

(2)从微观角度看，物体的内能取决于分子势能、分子平均动能及分子的数目。

3.对物体内能的理解

(1)一切物体都具有内能。

(2)内能是对大量分子而言的，对单个分子来说无意义。

(3)物体做机械运动具有的机械能对物体的内能没有影响。

4.内能与机械能的区别与联系

项目	内能	机械能
定义	物体内所有分子热运动动能和分子势能之和	物体的动能、重力势能和弹性势能的统称
决定因素	由物体内部状态决定	跟宏观运动状态、参考系和参考平面的选取有关
测量	无法测量	可测量
本质	微观分子的运动和相互作用的结果	宏观物体的运动和相互作用的结果
是否为0	永不为0	一定条件下可以为0
对应运动形式	微观分子的热运动	宏观物体的机械运动
联系	一定条件下可以相互转化	

5.改变物体内能的两种方式

项目	做功	热传递
本质区别	物体内能与其他形式的能量间的转化	物体间内能的转移
联系	做功和热传递都可以改变物体内能，从改变物体内能的效果上来看，两者是等效的	

6.比较物体内能大小的方法

比较物体内能的大小时，必须明确物体的内能是一个与物体内部热力学状态有关的物理量。抓住物体内能的大小与物质的量、温度、物体的体积及物态等因素有关，结合能量转化与守恒定律，综合进行分析。

1. 当物体的质量 m 一定时(相同物质的摩尔质量 M 相等)，物体所含分子数 N 就一定。

2. 当物体的温度一定时，物体内部分子的平均动能就一定。

3. 当物体的体积不变时，物体内部分子间的相对位置就不变，分子势能也不变。

4. 当物体发生物态变化时，要吸收或放出热量，物体的内能也随之改变。

第三部分 物理方法概述

一、模型法

在对实际问题的分析中,往往要摒弃次要因素,抓住主要因素,以突出事物的本质,这种科学研究方法就是模型法。单层分子油膜、将分子的形状看作立方体或球体都是热力学中的实体物质模型。

二、估算法

在分析和解决问题时应用估算法,要抓住事物的本质特征和影响事物发展的主要因素,忽略次要因素,构建物理或数学模型,再通过诸如常数、常量的应用,极值的鉴定,取值范围的确定等,使问题得到解决,迅速得出合理的结果。

第二章 气体、固体和液体

第一部分 基础知识点

第1节 温度和温标

一、状态参量与平衡态

（1）状态参量

三个概念	系统	在物理学中，通常把所研究的对象称为系统
	外界	系统以外的其他物体称为外界或环境，系统与外界之间往往存在相互的作用
	状态参量	描述系统状态的物理量叫作系统的状态参量.物理学中，需要研究系统的各种性质，包括几何性质、力学性质、热学性质、电磁性质等
三个参量	体积 V	描述系统的几何性质，确定系统的空间范围
	压强 p	描述系统的力学性质，为了确定外界与系统之间或系统内部各部分之间的力的作用
	温度 T	描述系统的热学性质，确定系统的冷热程度

（2）平衡态：

1.定义：系统所有状态参量（如体积、压强、温度）都不随时间变化的状态。

2.理解：

对平衡态的三点理解	①热力学的平衡态是一种动态平衡，组成系统的分子仍在不停地做无规则运动，只是分子运动的平均效果不随时间变化，表现为系统的宏观性质不随时间变化；而力学中的平衡态是指物体处于静止或匀速直线运动的状态 ②平衡态是一种理想情况，因为任何系统完全不受外界影响是不可能的.系统处于平衡态时，由于涨落，仍可能发生偏离平衡状态的微小变化 ③平衡态的特点：系统温度、压强、体积不发生变化.由于系统处于平衡态时，所有的性质都不随时间变化，就能比较容易地描述这些性质，所以在高中阶段只描述平衡态的问题

二、热平衡与温度

1.热平衡

(1)两个系统相互接触而传热，经过一段时间后，各自的状态参量不再变化，即两个系统达到了热平衡。

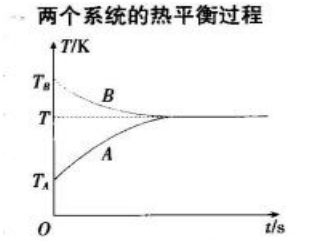
(2)系统达到热平衡的充要条件是温度相同。

2.热平衡定律（热力学第零定律）

(1)内容：如果两个系统分别与第三个系统达到热平衡，那么这两个系统彼此之间也必定处于热平衡。

(2)达到热平衡的系统都具有相同的温度。

3.热平衡过程图



当两个系统 A、B 达到热平衡时，它们必定具有相同的温度。

4.平衡态与热平衡的区别

①平衡态不是热平衡，平衡态是对某一系统而言的，热平衡是对两个接触的系统而言的.

热平衡是指两个系统达到相同的温度。

②分别处于平衡态的两个系统在相互接触时，它们的状态可能会发生变化，直到温度相同时，两系统便达到了热平衡，达到热平衡的两个系统都处于平衡态.

5.温度：表示物体的冷热程度。达到热平衡的系统具有“共同的热学性质”，也可以理解为物体的冷热程度相同。

二、温度计与温标

1.温度计

几种温度计的测温原理：测温物质与待测物体达到热平衡。

名称	原理
水银温度计	根据水银热胀冷缩的性质来测量温度
金属电阻温度计	根据金属铂的电阻随温度的变化而变化来测量温度
气体温度计	根据气体压强随温度的变化而变化来测量温度
热电偶温度计	根据不同导体因温差产生电动势的大小不同来测量温度

2.温标

(1)定义：如果要定量地描述温度，就必须有一套方法，这套方法就是温标。

(2)摄氏温标：规定标准大气压下冰的熔点为 0 摄氏度，水的沸点为 100 摄氏度，在 0 和 100 之间分成 100 等份，每一等份就是 1 ℃，这种表示温度的方法就是摄氏温标，表示的温度叫摄氏温度(t)。

(3)热力学温标：规定摄氏温度的-273.15 ℃为零值，它的一度也等于摄氏温度的一度，这种表示温度的方法就是热力学温标，表示的温度叫热力学温度(T)，单位为开尔文，简称开，符号为 K。

(4)热力学温度与摄氏温度的关系：$T=t+273.15$ K。

⚠ 提醒

(1)热力学温度的 1 K 等于摄氏温度的 1 ℃，在表示温差时，$\Delta T=\Delta t$。

(2)热力学温度的零值是低温极限，永远达不到，即热力学温度无负值。

（5）华氏温标：华氏度=32℉+摄氏度×1.8

第 2 节　气体的等温变化

一、气体的三个状态参量

1.温度------热学参量

(1)意义：宏观上表示物体的冷热程度，微观上是大量分子热运动的平均动能的标志。

(2)数值表示法

①摄氏温度 t：单位是℃，在标准大气压下，水的凝固点为 0 ℃，沸点为 100 ℃。

②热力学温度 T：单位是 K，将-273.15 ℃作为 0 K，且 $T=t+273.15$ K。

2.体积--------几何参量

(1)定义：气体充满的容器的容积，常用单位有 m^3、L、mL 等。

(2)特点

①气体体积 V 是指大量气体分子所能达到的空间的体积，而不是分子本身的体积。

②标准状态下，1 mol 任何气体的体积均为 22.4 L。

⚠ 提醒

气体分子间距离比较大，所以气体分子自身体积与气体体积相比，可以忽略。

3.压强-------力学参量

(1)意义：由于气体分子无规则的热运动，使得大量气体分子频繁地碰撞器壁而产生持续、均匀的压力。作用在器壁单位面积上的压力叫气体的压强。

(2)单位：国际单位制中压强的单位是帕(Pa)，其他常用单位有标准大气压(atm)和毫米汞柱(mmHg)。1 atm=760 mmHg=1.013×10^5 Pa。

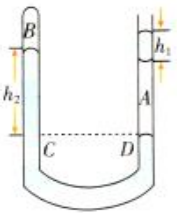
【方法与技巧】气体压强的求法

气体压强的计算常转化为力学问题来处理。我们研究活塞、液柱等，都是为了确定被它们封闭的一定质量理想气体的压强。

1.容器静止或匀速运动时，封闭气体压强的求法

(1)连通器等压面法

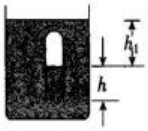
根据同种液体(中间不间断)在同一水平液面处压强相等，在连通器内灵活选取等压面，由两侧压强相等列方程求解压强。例如，下图中同一液面 C、D 处压强相等，则有 $p_B+\rho gh_2=p_A$。



容器中的液体不流动时，则
对气体 A 有：$p_A=p_0+\rho gh_1$
对气体 B 有：$p_B+\rho gh_2=p_A$
得 $p_B=p_0+\rho g(h_1-h_2)$。



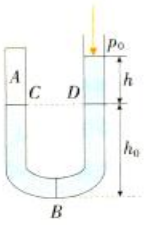
$p+\rho g\cdot h\sin 60°=p_0\Rightarrow p=p_0-\dfrac{\sqrt{3}}{2}\rho gh$



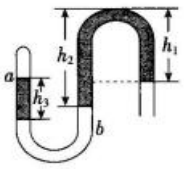
$p=p_0+\rho gh_1$

(2)取参考液片法

选取假想的液体薄片(自身重力不计)为研究对象，分析液片两侧受力情况，建立平衡方程消去面积，得到液片两侧压强相等，进而求得气体压强。



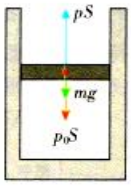
例如，图中粗细均匀的 U 形管中封闭了一定质量的气体 A，在其最低处取一液片 B，由其两侧受力平衡可知 $(p_A+p_{h_0})S=(p_0+p_h+p_{h_0})S$，即 $p_A=p_0+p_h$。(我们也可利用连通器等压面法求解，图中同一液面 C、D 处压强相等，故有 $p_A=p_0+p_h$。)



$p_0+\rho g(h_2-h_1)=p_b$，$p_a+\rho gh_3=p_b\Rightarrow p_a=p_0+\rho g(h_2-h_1-h_3)$

(3)力平衡法

选与封闭气体接触的活塞(或液柱、汽缸)为研究对象进行受力分析，得到活塞(或液柱、汽缸)的受力平衡方程，从而得到气体压强。例如，图中活塞质量为 m，处于平衡状态，则对活塞受力分析列平衡方程有 $mg+p_0S=pS$，解得 $p=p_0+\dfrac{mg}{S}$。



2.变速状态下封闭气体压强的求法

当封闭气体所在的系统处于力学非平衡状态时，欲求封闭气体的压强，首先要恰当地选择对象(如与气体相关联的液柱、活塞等)，并对其进行正确的受力分析(特别注意分析内、外气体的压力)，然后应用牛顿第二定律列方程求解压强。

二、玻意耳定律

1.理想气体

理想气体的要求：

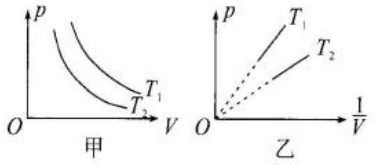
(1)不计分子间的作用力，即不计分子势能，仅考虑分子动能.

(2)不计分子重力，可视为质点.

(3)任何温度、任何压强下都遵从气体实验定律.

特别注意：由于不计分子势能，一定质量的理想气体的内能是由温度决定的，所以有“理想气体的内能看温度”的说法.

2.玻意耳定律

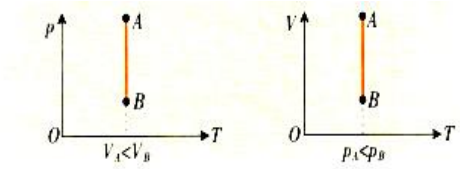
变化	等温变化
内容	一定质量的理想气体，在温度不变的情况下，压强与体积成反比
公式	$p_1V_1=p_2V_2$ 或 $pV=C$(C 为常数)
图像	不同温度下的两种等温变化图像：
关系	①等温变化中，压强与体积为反比例关系 ②图甲中，图像离 O 点越远，温度越高，$T_1>T_2$；图乙中，图像斜率越大，温度越高，$T_1>T_2$ ③$p-V$ 图像与横轴围成的面积表示理想气体对外界做的功

【点拨】(1)$pV=C$ 中，常量 C 与气体的种类、质量、温度有关。

(2)$p-V$ 图线为双曲线，同一气体的两条等温线比较，双曲线顶点离坐标原点远的温度高。

(3)$p-\dfrac{1}{V}$ 图线为过坐标原点的直线，同一气体比较，斜率大的温度高。

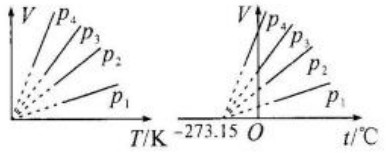
(4)其他图像



3.等温分态公式：$PV = P_1V_1 + P_2V_2 + ... + P_nV_n$

第 3 节　　气体的等压变化和等容变化

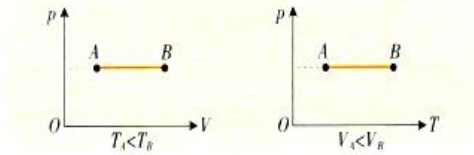
一、盖-吕萨克定律

变化	等压变化
内容	一定质量的某种气体，在压强不变的情况下，其体积与热力学温度成正比
公式	$\frac{V_1}{T_1}=\frac{V_2}{T_2}$或$\frac{V_1}{V_2}=\frac{T_1}{T_2}$或$V=CT$($C$为常数)
图像	不同压强下的两种等压变化图像： 以不同的温标为单位，可得到不同的图像，但图像表达的含义相同
关系	①等压变化中，体积与温度为正比例关系 ②V与T成正比例关系，图像必经过原点 ③利用图像比较压强：(特别重要) 由理想气体状态方程$pV=nRT$可知V与T的解析式为$V=\frac{nR}{p}T$，图像的斜率近似看成$\frac{1}{p}$，因此$p_4<p_3<p_2<p_1$

【点拨】(1)V-t图线为过-273.15 ℃的直线，V-T图线为过坐标原点的直线。

(2)同一气体的两条等压线，斜率大的压强小，即$p_1>p_2$。

(3)其他图像

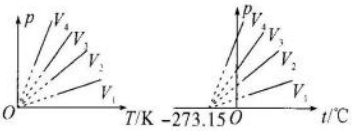


【规律】

1.等压变化中，V-T 图像一定经过 O 点，若图像不经过 O 点，则理想气体的变化是非等压变化。

2.V-T 图像斜率的倒数可近似表示 P 的大小，可利用斜率的倒数比较两种状态下压强的大小。

二、查理定律

变化	等容变化
内容	一定质量的理想气体，在体积不变的情况下，压强与热力学温度成正比
公式	$\frac{p_1}{T_1}=\frac{p_2}{T_2}$或$\frac{p_1}{p_2}=\frac{T_1}{T_2}$或$p=CT$($C$为常数)
图像	不同体积下的两种等容变化图像： 以不同的温标为单位，可得到不同的图像，但图像表达的含义相同
关系	①等容变化中，压强与温度为正比例关系 ②p与T成正比例关系，图像必经过原点 ③利用图像比较体积：(特别重要) 由理想气体状态方程$pV=nRT$知p与T的解析式为$p=\frac{nR}{V}T$，图像的斜率近似看成$\frac{1}{V}$，因此$V_4<V_3<V_2<V_1$

三、两个重要的推论

(1)一定质量的某种气体，从初状态$(p、T)$开始，发生一个等容变化过程，其压强的变化量Δp与温度的变化量ΔT间的关系为

$$\Delta p=\frac{\Delta T}{T}p$$（查理定律的分比形式）

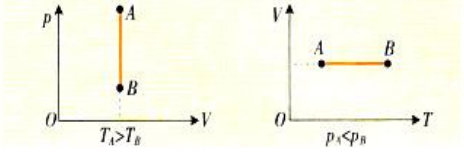
(2)一定质量的某种气体从初状态$(V、T)$开始发生等压变化，其体积的改变量ΔV与温度变化量ΔT之间的关系是

$$\Delta V=\frac{\Delta T}{T}V$$（盖-吕萨克定律的分比形式）

【点拨】(1)p-t图线为过-273.15 ℃的直线，p-T图线为过坐标原点的直线。

(2)同一气体的两条等容线，斜率大的体积小，即$V_2>V_1$。

(3)其他图像



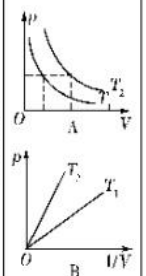
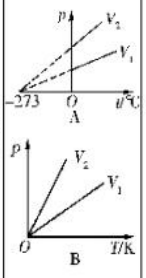
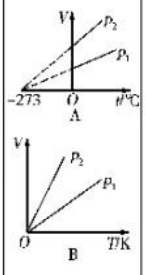
【规律】

1.等容变化中，P-T 图像一定经过 O 点，若图像不经过 O 点，则理想气体的变化是非等容变化。

2.P-T 图像斜率的倒数可近似表示 V 的大小，可利用斜率的倒数比较两种状态下体积的大小。

第二部分　方法、规律与技巧

一、气体实验定律图像对比及互换

定律	变化过程	同一气体的两条图线	图线特点
玻意耳定律	等温变化		A. 在 $p-V$ 图中图线是双曲线，由 $pV=CT$ 知；T 越大，pV 值越大，所以远离原点的等温线温度越高，即 $T_2>T_1$. B. 在 $p-\frac{1}{V}$ 图中图线是通过原点的倾斜直线. 由 $\frac{pV}{T}=C$ 得 $p=\frac{CT}{V}$，故斜率大 T 大，$T_2>T_1$
查理定律	等容变化		A. 在 $p-t$ 图中图线是通过 t 轴上 -273 ℃的直线. 由于在同一温度（如 0 ℃）下同一气体的压强大时，体积小，所以 $V_1>V_2$. B. 在 $p-T$ 图中图线是通过原点的倾斜直线，由 $\frac{pV}{T}=C$ 得 $p=\frac{CT}{V}$，可见体积 V 大时斜率小，所以 $V_1>V_2$
盖·吕萨克定律	等压变化		A. 在 $V-t$ 图中图线是通过 t 轴上 -273 ℃的直线. 由于在同一温度（如 0 ℃）下同一气体的体积大时，压强小，所以 $p_1>p_2$. B. 在 $V-T$ 图中图线是通过原点的倾斜直线，由 $\frac{pV}{T}=C$ 得 $V=\frac{CT}{p}$，可见压强 p 大时斜率小，所以 $p_1>p_2$

二、理想气体

（一）理想气体

1. 理想气体：在任何温度、任何压强下都遵从气体实验定律的气体叫理想气体。

2. 特点

(1)理想气体是一种理想化模型，是对实际气体的科学抽象。

(2)在压强不太大（不超过大气压的几倍），温度不太低（不低于零下几十摄氏度）时，可以把实际气体近似地视为理想气体。

⚠ 提醒

在微观意义上，理想气体分子间相互作用的引力和斥力很弱，可以忽略，所以理想气体的分子势能为0，理想气体的内能等于分子的总动能，故其内能只与气体的温度和质量有关，与气体的体积无关。

（二）理想气体的状态方程

1.理想气体的状态方程的表述

一定质量的理想气体状态变化时，它的压强与体积的乘积跟热力学温度之比保持不变，这种关系称为理想气体的状态方程。

2. 一定质量的理想气体，由初状态$(p_1、V_1、T_1)$变化到末状态$(p_2、V_2、T_2)$时，各量满足：

$\frac{p_1V_1}{T_1}=\frac{p_2V_2}{T_2}$ 或 $\frac{pV}{T}=C$（C 为恒量）。

⚠ 提醒

(1)该方程的适用条件是理想气体，在质量不变的条件下才适用。

(2)$\frac{pV}{T}=C$ 中的恒量 C 与气体的种类、质量有关，与其他量无关。

3.三个实验定律与理想气体状态方程的关系

气体的三个实验定律是理想气体状态方程的特例：

$\frac{p_1V_1}{T_1}=\frac{p_2V_2}{T_2}$

- 当 $T_1=T_2$ 时，$p_1V_1=p_2V_2$（玻意耳定律）
- 当 $V_1=V_2$ 时，$\frac{p_1}{T_1}=\frac{p_2}{T_2}$（查理定律）
- 当 $p_1=p_2$ 时，$\frac{V_1}{T_1}=\frac{V_2}{T_2}$（盖-吕萨克定律）

4. 克拉珀龙方程：$pV=nRT$，其中 n 为物质的量，R 为普适气体常量，$R=8.31\ \mathrm{J\cdot mol^{-1}\cdot K^{-1}}$。

5.两个推论

①密度方程：$\frac{p_1}{\rho_1T_1}=\frac{p_2}{\rho_2T_2}$，此式与气体的质量无关，即不要求质量恒定。

②道尔顿分压定律：$\frac{p_oV_o}{T_o}=\frac{p_1V_1}{T_1}+\frac{p_2V_2}{T_2}+.....+\frac{P_nV_n}{T_n}$，此式要求气体质量不变，即前后总质量相同。

（三）理想气体分子运动规律

1.气体分子运动的特点

(1)气体分子除了碰撞外，不受力而做匀速直线运动，可以在空间自由移动而充满它所能达到的空间，故气体的体积就是容器的容积。

(2)气体分子之间频繁地发生碰撞，每个分子的速度频繁地改变，某一时刻向各个方向运动的气体分子数目几乎相等。

2.分子运动速率分布

(1)气体分子运动的速率按一定的规律分布，在一定温度下，气体分子的速率分布呈“中间多、两头少”的规律。

(2)温度升高，分子运动的平均速率增大，其中速率大的分子数增多，速率小的分子数减少，仍是“中间多，两头少”的分布规律。

四、气体实验定律的微观解释

1.气体压强的微观解释

(1)产生原因：大量气体分子无规则运动碰撞器壁，形成对器壁各处均匀的、持续的压力而产生压强。

(2)影响因素

①气体分子的平均动能。

②分子的密集程度，即分子的数密度。

2.对气体实验定律的微观解释

(1)玻意耳定律的微观解释

一定质量的某种理想气体，温度保持不变时，分子的平均动能是一定的。在这种情况下，体积减小时，分子的密集程度增大，气体的压强就增大。

(2)查理定律的微观解释

一定质量的某种理想气体，体积保持不变时，分子的密集程度保持不变。在这种情况下，温度升高时，分子的平均动能增大，气体的压强就增大。

(3)盖-吕萨克定律的微观解释

一定质量的某种理想气体，温度升高时，分子的平均动能增大。只有气体的体积同时增大，使分子的密集程度减小，才能保持压强不变。

四、解决气体综合问题的基本思路

确定研究对象	根据题干信息，选出所要研究的某一定质量的气体
找状态参量	分别找出这部分气体状态发生变化前后的 p、V、T 的数值或表达式（压强的确定是关键，也是难点）
确定过程	是等温？等压？等容？还是 p、V、T 均变化？以便于正确选用物理规律
列方程	选用某一实验定律列式求解，必要时讨论结果的合理性

五、液柱、活塞移动问题

1.温度不变时，液柱或活塞的移动

温度不变的情况下，改变其他条件（运动状态、放置方式等），引起封闭气体的液柱或活塞移动。通常假设液柱或活塞不移动即气体体积不变，确定压强的变化情况，然后分别运用玻意耳定律判断各自体积如何变化，从而判断液柱或活塞的移动情况。

2.温度变化时，液柱或活塞的移动

先假设液柱或活塞不移动，两部分均做等容变化，由 $\Delta p=\frac{p}{T}\Delta T$，求出两部分气体压强的变化量 Δp，从而判断两边压力的变化量 $\Delta F=\Delta p\cdot S$，然后判断液柱或活塞的移动方向。

六、气体状态变化图像问题

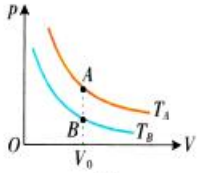
1. 能够识别 p-V 图像、p-T 图像、V-T 图像中的等温线、等容线和等压线，能从图像中解读出状态参量和状态变化过程。

2. 学会依据 $\frac{pV}{T}=C$ 认识 p-$\frac{1}{V}$ 图线、V-T 图线、p-T 图线斜率的意义。

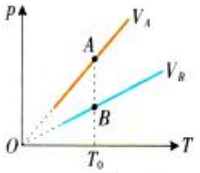
3.分析技巧

借助垂直于坐标轴的辅助线，在某一个状态参量相同的前提下，根据另一个状态参量的大小去判断第三个状态参量的大小。

例如，图甲中作辅助线如图中虚线，则在 V 相同的前提下，$p_A>p_B$，由 $\frac{pV}{T}=C$ 可得 $T_A>T_B$。



甲



乙

图乙中作辅助线如图中虚线，则在 T 相同的前提下，$p_A>p_B$，由 $\frac{pV}{T}=C$ 可得 $V_A<V_B$。

七、气体的变质量问题

气体实验定律或理想气体状态方程的适用对象都是一定质量的理想气体，对于变质量问题显然是不适用的。对于变质量问题，我们可以通过灵活地选取研究对象，将变质量问题转化为定质量问题，一般可选取原有气体为研究对象，或选取剩余气体为研究对象，一定要保证初、末状态的状态参量对应同一部分气体。

1.充气问题

向球、轮胎中充气是典型的气体变质量问题，只要选择球内原有气体和即将打入的气体作为研究对象，就可把充气过程中的气体质量变化的问题转化为定质量气体的状态变化问题。

2.抽气问题

从容器内抽气的过程中，容器内的气体质量不断减小，这属于变质量问题。分析时，将每次抽气过程中抽出的气体和剩余气体作为研究对象，质量不变，故可将抽气过程中的气体看成是等温膨胀过程。

3.气体分装问题

将一个大容器里的气体分装到多个小容器中的问题也是一个典型的变质量问题。分析这类问题时，可以把大容器中的气体和多个小容器中的气体看成整体来作为研究对象，将变质量问题转化为定质量问题。

【拓展】(1)气体的分装问题，利用分态式理想气体状态方程可避免多次运用理想气体状态方程和繁重的计算，可快速解答问题。

(2)分态式理想气体状态方程：$\frac{p_0V_0}{T_0}=\frac{p_1V_1}{T_1}+\frac{p_2V_2}{T_2}+\cdots+\frac{p_nV_n}{T_n}$，"="两边必须对应同一部分气体。(可由克拉珀龙方程导出。)

4.漏气问题

容器漏气过程中，气体的质量不断发生变化，属于变质量问题，不能用理想气体状态方程求解。如果选容器内剩余气体为研究对象，便可使问题变成一定质量的气体状态变化，可用理想气体状态方程求解。

【典例1】容积 V=20 L 的钢瓶充满氧气后，压强 p=10 atm，打开钢瓶阀门，将氧气分装到容积为 V'=5 L 的小钢瓶中去，小钢瓶已抽成真空。分装完成后，每个小钢瓶的压强 p'=2 atm。在分装过程中无漏气现象，且温度保持不变，那么最多能装的瓶数是　(　　)

A.4　　B.10　　C.16　　D.20

【答案】C

【典例2】若室内生起炉子后温度从 7 ℃升高到 27 ℃，而室内气压不变，则此时室内的空气质量减少了(　　)

A.3.3%　　B.6.7%　　C.7.1%　　D.9.4%

【答案】B

第4节　固体

一、晶体和非晶体

1.固体的分类

固体 ┬ 晶体 ┬ 单晶体
　　 │　　 └ 多晶体
　　 └ 非晶体

2.晶体和非晶体的比较

项目	晶体		非晶体
	单晶体	多晶体	
典例	石英、云母、食盐等	各种金属等	玻璃、蜂蜡、松香等
外形	有规则的几何形状	由许多单晶体组成，没有规则的几何形状	没有规则的几何形状
物理性质	各向异性	各向同性	
熔点	有确定的熔点		无确定的熔化温度
微观结构	微观粒子在空间整齐、规则排列		微观粒子在空间无规则排列
联系	①多晶体由单晶体组成，同种物质可构成物理性质不同的晶体。 ②晶体与非晶体在一定条件下可以相互转化		

3.晶体和非晶体的判定

(1)具有各向异性的固体必定是晶体，且一定是单晶体。

(2)具有确定熔点的物体必定是晶体(单晶体或多晶体)，反之必是非晶体。

⚠ 提醒

晶体中的单晶体具有各向异性，但不是在各种物理性质上都表现出各向异性。有些表现为不同方向导热性能或导电性能不同，有些表现为不同方向的光学性质不同。

(3)区分晶体和非晶体

1. 区分晶体与非晶体，关键在于是否有确定的熔点。

2. 区分单晶体与多晶体，关键在于物理性质是各向异性还是各向同性。

二、晶体的微观结构

1. 内容：组成晶体的物质微粒(分子、原子或离子)是依照一定的规律在空间中整齐排列的，具有空间上的周期性，也称空间点阵。

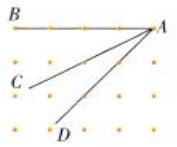


食盐晶体的微观结构

2.应用

(1)各向异性的微观解释

单晶体的微粒排列规则，但在不同的方向上物质微粒的数目不同，即在不同方向上物质微粒的排列情况不同，从而引起单晶体在不同方向上物理性质的不同。



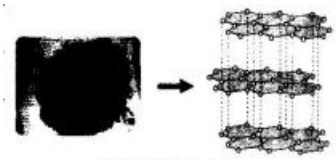
沿不同方向所画的等长线段上，物质微粒的数目不同。

(2)熔点的解释

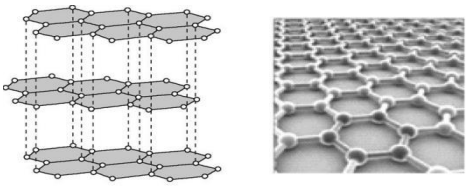
给晶体加热到一定温度时，一部分微粒有足够的动能，克服微粒间的作用力，离开平衡位置，使规则的排列被破坏，晶体开始熔化，熔化时晶体吸收的热量全部用来破坏规则的排列，温度不发生变化。

(3)同一种物质微粒可能形成不同晶体的解释

有些物质在不同条件下能够生成不同的晶体，那是因为组成它们的微粒能够按照不同的规则在空间分布。例如，金刚石和石墨都是由碳元素组成的，它们有不同的点阵结构。

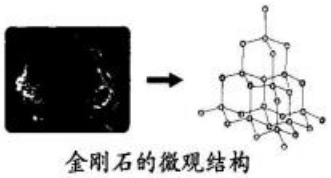


石墨的微观结构



甲　　乙

甲为石墨　　乙为石墨烯



金刚石的微观结构

【拓展】(1)组成晶体的微粒并不静止，各微粒在一定的平衡位置附近不停地做微小的振动。

(2)同一种物质可以以晶体和非晶体两种不同形态出现，物质是晶体还是非晶体不是绝对的，在一定的条件下晶体和非晶体可以相互转化。

（4）非晶体的微观结构

非晶体的微观结构与液体非常相似，所以严格地说，只有晶体才叫作真正的固体，而非晶体则是黏滞性极大的液体.

第 5 节　液体

一、液体的表面张力

1.液体的特点：液体具有一定的体积，不易被压缩，没有固定的形状，具有流动性。

2.液体的微观结构理论

(1)液体分子间距比气体小得多，在 10^{-10} m 左右，液体分子排列更接近于固体中的非晶体，相互作用力比较大。因此，液体具有一定的体积，不易被压缩。

(2)液体分子的热运动与固体类似，主要表现为在平衡位置附近做微小的振动，但液体分子的平衡位置容易发生移动，即液体分子可以在液体中移动，这就是液体具有流动性的原因。

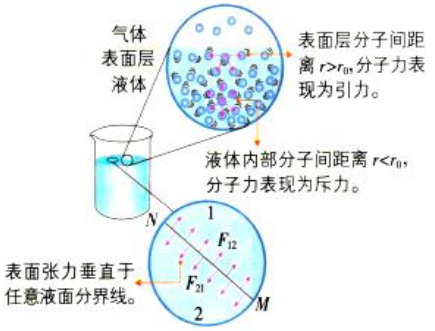
(3)由于液体分子的移动比固体中分子移动容易得多，所以在温度相同的条件下液体比固体容易扩散。

3.液体的表面张力

(1)定义：作用在液体表面上并使液体表面具有收缩趋势的一种力。

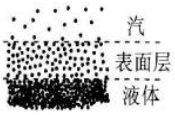
(2)作用：如果在液体表面任意画一条线，线两侧的液体之间的作用力是表面张力，它的作用是使液体表面绷紧。

(3)微观解释：表面张力是根据效果命名的力，是液体表面层内大量分子引力的宏观表现。



液体的表面张力的微观解释

(2)形成原因：如图所示，在液体内部，分子间距离在 r_0 左右，在表面层，由于蒸发现象，分子比较稀疏，分子间距大于 r_0，因此分子间的作用表现为相互吸引，形成表面张力.



(3)表面张力的方向：表面张力的方向和液面相切，垂直于液面上的各条分界线.

(4)影响张力的因素：表面张力的大小除跟边界线长度有关外，还跟液体的种类、温度有关.

(5)表面张力的作用：表面张力使液体表面具有收缩的趋势，使液体的表面积趋于最小；而在体积相同的条件下，球形的表面积最小，故草叶上的露珠、小水银滴会收缩成球形.

二、液体微观结构的三个特点

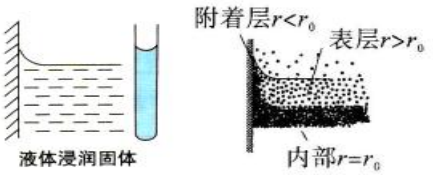
①分子间的距离很小——只比固体分子间的距离大 3%～4%；

②液体分子间的相互作用力很大；

③分子的热运动特点表现为振动与移动相结合.

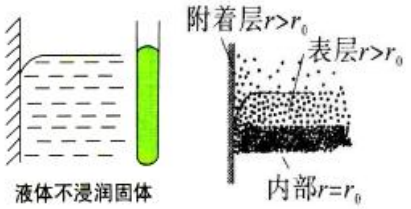
三、浸润和不浸润

1. 浸润：一种液体会润湿某种固体并附着在固体的表面上，这种现象叫浸润。水可以浸润玻璃。



产生原因：液体分子因受到固体分子的吸引力相当强，附着层内的液体分子比液体内部密集，附着层内与跟侧壁接触的液体分子间表现为相互排斥的力，表现为扩展的趋势，形成浸润现象.

2. 不浸润：一种液体不会润湿某种固体，也就不会附着在这种固体的表面，这种现象叫不浸润。水不浸润石蜡。



产生原因：因受到固体分子的吸引力比较弱，附着层内的分子比液体内部稀疏，附着层内与固体侧壁接触的液体分子就表现出表面张力相似的收缩力，这时附着层有缩小的趋势，形成不浸润现象.

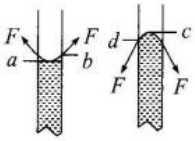
⚠ 提醒

某种液体是否浸润某种固体，与这两种物质的性质都有关。如水银不浸润玻璃，但水银浸润铅。

四、毛细现象

1.定义及特点：

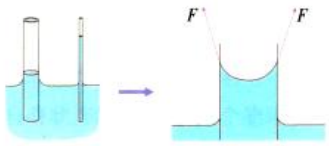
毛细现象是指浸润液体在细管中上升的现象，以及不浸润液体在细管中下降的现象，如图所示.



特点：毛细管越细，毛细现象越明显.

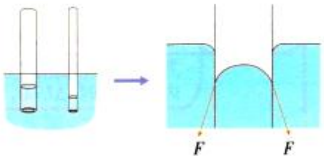
2.两种现象

(1)图甲是浸润的情况，此时管内液面呈凹形，因为表面张力的作用，液体会受到一向上的作用力，因而管内液面要比管外高。



甲

(2)图乙是不浸润的情况，管内液面呈凸形，因为表面张力的作用，液体会受到一向下的作用力，因而管内液面要比管外低。



乙

(3)管的内径越小，毛细现象越明显。

3.毛细现象的应用

(1)农民锄地是为了破坏土壤里的毛细管，防止地下的水分过快蒸发。

(2)用棉线做酒精灯的灯芯就是利用了毛细现象。

五、液晶

1. 定义：液晶是介于固态和液态之间的一种物质状态。液晶态既具有液体的流动性，又在一定程度上具有晶体分子的规则排列的性质。

(2)**液晶的特点**

①液晶具有液体的流动性；

②液晶具有晶体的光学各向异性；

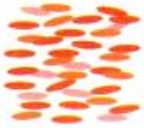
③液晶的物理性质很容易在外界条件(如电场、压力、光照、温度等)的影响下发生改变；

④从某个方向上看，液晶分子的排列比较整齐；但是从另一个方向上看，液晶分子的排列是杂乱无章的；

⑤并不是所有物质都有液晶态. 通常棒状分子、碟状分子和平板状分子的物质容易具有液晶态.



结晶态：分子的取向有序，分子重心的位置也有序。



液晶态：分子取向有序程度下降，分子重心位置的有序性消失。



液态：分子取向有序性也消失，完全进入无序的状态。

(3)液晶的应用

①做液晶显示器：没有加电压时，液晶是透明的，能使下面反射光束的光线通过，不显示笔画；当加电压时，液晶变浑浊，光线不能通过，显示出笔画.

②做彩色显示器：在某些液晶中掺入少量多色性染料，染料分子会与液晶分子结合而定向排列，当液晶中的电场强度不同时，它对不同颜色的光的吸收强度不同，从而显示出不同的颜色.

③做生物薄膜：液晶的特点与生物组织的特点很吻合，可用于研究离子的渗透性，从而了解机体对药物的吸收等生理过程.

④液晶在医学、电子工业、航空航天工业、日常生活等方面都有重要的应用.

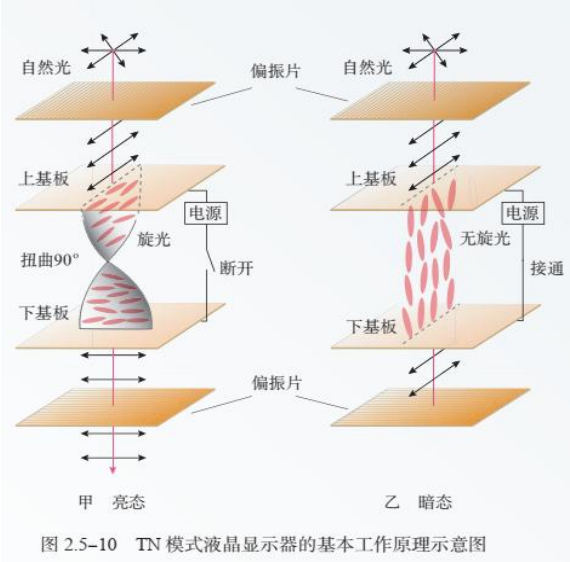


图 2.5-10 TN 模式液晶显示器的基本工作原理示意图

【补充知识】

一、蒸发与沸腾

(1)汽化的两种方式

物质从液态变成气态的过程叫作汽化，汽化的两种方式分别是蒸发与沸腾.

(2)蒸发

发生在液体表面，即液体分子由液体表面跑出去的过程.

(3)影响蒸发量的三种主要因素

表面积：由于蒸发是发生在液体表面，所以表面积越大，蒸发量越大.

温度：温度越高，液体分子热运动的平均动能越大，能够跑出液体表面的分子数就越多，蒸发越快.

通风：液面上方通风情况好，可以促使从液体中跑出来的分子更快地向外扩散，减少它们重新返回液体的机会，因而蒸发就会加快.

(4)沸腾

在一定大气压下，加热液体到某一温度时在液体表面和内部同时发生剧烈的汽化现象，其对应的温度叫沸点.

二、饱和汽与未饱和汽

(1)饱和汽与未饱和汽

在密闭容器中的液体不断地蒸发，液面上的蒸汽也不断地液化，当这两个同时存在的过程达到动态平衡时，宏观的蒸发也停止了，这种与液体处于动态平衡的蒸汽叫作饱和汽；没有达到饱和状态的蒸汽叫作未饱和汽.

(2)饱和汽压与其影响因素

在一定温度下，饱和汽的分子数密度是一定的，因而饱和汽的压强也是一定的，这个压强叫作这种液体的饱和汽压.

影响饱和汽压的因素：饱和汽压随温度的升高而增大；饱和汽压与蒸汽所占的体积无关，与该体积中有无其他气体无关.

(3)饱和汽压对沸点的影响

液体沸腾的条件就是饱和汽压和外部压强相等. 沸点就是饱和汽压等于外部压强时的温度；因为饱和汽压必须增大到和外部压强相等时才能沸腾，所以沸点随外部压强的增大而升高.

(4)湿度

绝对湿度：空气的湿度可以用空气中所含水蒸气的压强 p 来表示，这样表示的湿度叫作空气的绝对湿度.

相对湿度：我们常用空气中水蒸气的压强 p 与同一温度时水蒸气的饱和汽压 p_s 之比来描述空气的潮湿程度，并把这个比值叫作空气的相对湿度，即

$$\text{相对湿度}=\frac{\text{水蒸气的实际压强}}{\text{同温下水的饱和气压}}=\frac{p}{p_s}\times 100\%.$$

(5)湿度计及其工作原理

空气的相对湿度常用湿度计来测量，常用的湿度计有干湿泡湿度计、毛发湿度计和湿度传感器等.

①干湿泡湿度计

干湿泡湿度计由两个相同的温度计组成，其中一支温度计的玻璃泡外包着纱布，纱布的另一端浸在水中. 由于蒸发吸热，湿

泡显示的温度小于干泡显示的温度.蒸发的快慢与空气的湿度有关,也与气温有关.读出干、湿两支温度计的读数,在湿度计木架上的表格中即可查到当时空气的相对湿度,这种湿度计准确、可靠但使用时不太方便.

②毛发湿度计

头发脱脂后可以吸收水分,吸水后伸长,干燥后缩短.把头发的长短变成指针的转动,就制成了毛发湿度计.

③现代湿度计

现代湿度计用传感器测量湿度.这种湿度传感器的工作原理是在基片上涂着能够吸收水分的导电物质,当空气湿度变化时,导电物质中的水分增加或减少,导致元件的电阻值变化,从而影响电路中的电流.市场上与电子钟装在一起的大多是这种湿度计.

(6)湿度对人类生活的影响

医学研究表明,夏季引发中暑有三个临界点.

气温在 30 ℃～31 ℃,相对湿度大于 85%;

气温超过 38 ℃,相对湿度大于 50%;

气温超过 40 ℃,相对湿度大于 30%.

可以看出,在相对湿度较大时,较低的温度就能引起中暑.

理想舒适的气候环境:夏季温度为 24 ℃～29 ℃,冬季温度为 16 ℃～22 ℃,相对湿度为 40%～60%.

三、物态变化

(1)熔化和凝固

熔化:物质从固态变成液态的过程.

凝固:物质从液态变成固态的过程.

(2)熔化热

某种晶体在熔化过程中所需的能量与其质量之比,称作这种晶体的熔化热.

(3)汽化和液化

汽化:物质从液态变成气态的过程.

液化:物质从气态变成液态的过程.

(4)汽化热

某种液体汽化成同温度的气体时所需的能量与其质量之比,称作这种物质在这个温度下的汽化热.

(5)物态变化与内能变化的关系

①温度是分子平均动能的标志,温度不变,分子平均动能不变;

②抓住物态变化中的宏观特征是吸热还是放热,再由能量守恒的观点,分析内能的变化情况;

③若物体的体积变化明显,如液体汽化时分子吸收能量,不只用于增加分子势能,还用于体积膨胀时克服外界气压做功.

【记忆口诀】

研究气体定质量,确定状态找参量。

绝对温度用大 T,体积就是容积量。

压强分析封闭物,牛顿定律帮你忙。

状态找参量要找准,PV 比 T 是恒量。

第三部分 物理方法概述

一、图像法

物理图像能够直观、形象、简洁、生动地展现两个物理量之间的关系,清楚地表达物理过程和物理规律。若巧妙运用图像法,将烦琐问题化为简易模型,可快速解决实际问题。

二、极限法

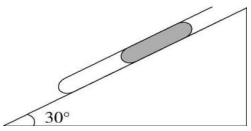
极限法即将问题推到极端状态或在极限条件下分析问题的方法。利用极限法可将非理想物理模型转化成理想物理模型,从而避免了不必要的详尽的物理过程分析和烦琐的数学推导运算,使问题的隐含条件暴露,陌生模型变得熟悉,难以判断的结论变得一目了然。

三、假设推理法

当某一变因素的存在形式限定在有限种可能时,假设该因素处于某种情况,并以此为条件进行推理,称为假设推理法。当应用假设推理法时,不能随意假设物理定律,只能假设情景或条件,例如,假设液柱不动、气体体积或压强不变等。

第四部分 易错、疑难问题选

1.有一段 12 cm 长水银柱,在均匀玻璃管中封住一定质量的气体。若管口向上将玻璃管放置在一个倾角为 30° 的光滑斜面上(如图所示),在下滑过程中被封闭气体的压强为(设大气压强为 p_0=76 cmHg)(　　)



A.76 cmHg　　B.82 cmHg　　C.88 cmHg　　D.70 cmHg

【答案】A

2.如图,竖直放置、开口向下的试管内用水银封闭一段气体,若试管由静止开始自由下落,管内气体(　　)

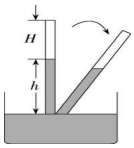


A.压强增大,体积增大B.压强增大,体积减小

C.压强减小,体积增大D.压强减小,体积减小

【答案】B

3. 如图所示,开口向下并插入水银槽中的粗细均匀的玻璃管内封闭着长为 H 的空气柱,管内水银柱的液面与水银槽的液面的高度差为 h。若将玻璃管向右旋转一定的角度(管下端未离开槽内水银面),环境温度保持不变,则 H 和 h 的变化情况为 （　　）

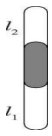


A. H 减小,h 增大　　B. H 增大,h 减小

C. H 和 h 都增大　　D. H 和 h 都减小

【答案】D

4. 如图所示,两端封闭、粗细均匀、竖直放置的玻璃管内有一段水银柱,将管内气体分为两部分,下面空气柱长为 l_1,上面空气柱长为 l_2。初始时温度相同,现使两部分气体同时升高相同的温度,下列判断正确的是(　　)

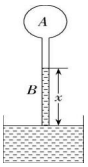


A. 若 $l_1>l_2$,水银柱将向下移动　　B. 若 $l_1<l_2$,水银柱将向上移动

C. 若 $l_1=l_2$,水银柱静止不动　　D. 两部分气体的压强增加量相同

【答案】B

5. (多选)如图为伽利略设计的一种测温装置结构示意图,玻璃泡 A 内封有一定质量的气体,与 A 相连的 B 管竖直插在水银槽中,管内外水银面的高度差 x 即可反映玻璃泡内气体的温度,即环境温度,并可由 B 管上的刻度直接读出。设 B 管的体积与 A 泡的体积相比可略去不计,在 1 标准大气压(相当于 76 cmHg 的压强)下,当温度 t_1=27 ℃时,管内外水银面的高度差 x_1=16 cm。下列说法正确的是(　　)



A. 若外界大气压不变,细管中水银柱上升,可知温度降低

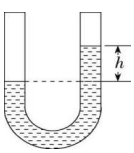
B. 若外界大气压不变,细管中水银柱上升,可知温度升高

C. 在 1 标准大气压下,t=0 ℃时管内外水银面的高度差 x_0=21.4 cm

D. 若环境真实压强比标准大气压小,管内外水银面的高度差仍为 16 cm 时,实际温度大于 27 ℃

【答案】AC

6. 如图所示,密封的 U 形管中装有水银,左、右两端都封有温度相同的空气,两水银面的高度差为 h,把 U 形管竖直浸没在热水中,高度差将　（　　）



A. 增大　　B. 减小　　C. 不变

D. 两侧空气柱的长度未知,不能确定

【答案】A

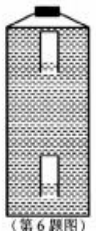
6. 如图所示，密封的矿泉水瓶中，距瓶口越近水的温度越高。一开口向下、导热良好的小瓶置于矿泉水瓶中，小瓶中封闭一段空气。挤压矿泉水瓶，小瓶缓慢下沉到底部；松开后，小瓶缓慢上浮。下沉过程中，小瓶内气体（　　）

A. 内能减少

B. 气体对外界做功

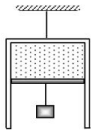
C. 内能的变化量的绝对值大于放出的热量

D. 内能的变化量的绝对值等于放出的热量


（第 6 题图）

【答案】A

7.（9 分）如图所示，一端水平悬挂的圆柱形容器用活塞密封体积 $V_1=2\times10^{-3}\,\mathrm{m}^3$ 的理想气体，活塞重力不计且能无摩擦地滑动，其下端悬挂质量 m=60kg 的重物，容器的横截面积 $S=10^{-2}\,\mathrm{m}^2$。整个装置放在大气压 $P_0=1.0\times10^5\,\mathrm{Pa}$ 的空气中，开始时气体的温度 $T_1=300\mathrm{K}$，当气体从外界吸收 300J 的热量，体积变为 $V_2=4\times10^{-3}\,\mathrm{m}^3$ 时，求，密闭气体（1）压强 P；　（2）温度 T_2；　（3）内能增加量 ΔE。



【答案】（1）体积达到 V_2 时：对活塞受力平衡 $PS+mg=P_0S$

$$P=P_0-\frac{mg}{S}=4\times10^4\,\mathrm{Pa}$$

（2）密闭气体等压变化　所以 $\frac{v_1}{T_1}=\frac{v_2}{T_2}$　2 分　$T_2=\frac{v_2}{v_1}T_1=600\mathrm{K}$

（3）热力学第一定律：$W+Q=\Delta E$

$$W=P\left(V_2-V_1\right)=80\mathrm{J}\qquad \Delta E=Q-W=220\mathrm{J}$$

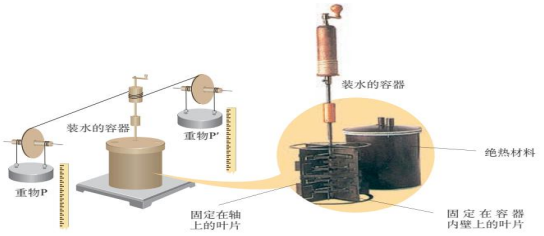
第三章　热力学定律

第一部分　基础知识点

第 1 节　功、热和内能的改变

一、焦耳的实验

实验 1　如图 3.1–1，用绝热性能良好的材料制作容器，容器中安装着叶片组成的搅拌器。重物下落时带动叶片转动，搅拌容器中的水，水由于摩擦而温度上升。



实验 2　如图 3.1–2，让正在下降的重物带动发电机发电，电流通过浸在液体中的电阻丝，由电流的热效应给液体加热，使液体温度上升。

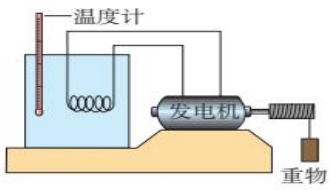


图 3.1–2　与焦耳实验原理相同的实验装置示意图

(1)**绝热过程**:系统不从外界吸热,也不向外界放热的过程。

(2)**焦耳的实验结果**:焦耳的实验表明,要使系统状态通过绝热过程发生变化,做功的数量只由始末两个状态决定,而与做功的方式无关。

二、功与内能的改变

(一)内能

1.定义

任何一个热力学系统都必定存在一个只依赖于系统自身状态的物理量,这个物理量在两个状态间的差别与外界在绝热过程中对系统所做的功相联系,我们把这个物理量称为系统的内能。

2.内能的决定因素

系统的内能由系统的状态决定。如温度、体积的变化,将引起系统内能的改变。

(二)改变内能的两种方式

(1)**做功**:当系统从某一状态经过绝热过程达到另一状态时,内能的变化量 ΔU 就等于外界对系统所做的功 W,即 $\Delta U=U_2-U_1=W$。

(2)**热传递**:当系统从某一状态经过单纯的传热达到另一状态时,内能的变化量 ΔU 就等于外界向系统传递的热量 Q,即 $\Delta U=U_2-U_1=Q$。

(3)改变内能的两种方式比较

项目	做功	热传递
内能变化	外界对系统做功,系统的内能增加;系统对外界做功,系统的内能减少	系统吸收热量,内能增加;系统放出热量,内能减少
本质	其他形式的能与内能之间的转化	不同物体间或同一物体不同部分之间内能的转移
二者联系	做一定量的功或传递一定量的热量在改变内能的效果上是相同的	



【拓展】热传递

(1)定义:热量从高温物体传递到低温物体的过程叫热传递。

(2)热传递的三种方式:热传导、热对流、热辐射。

(3)热传递的条件:有温度差。

(4)热量的概念只有在涉及能量的传递时才有意义,不能说物体具有多少热量,只能说物体吸收或放出了多少热量。

(4)系统内能及其变化的两种方法方法

方法	说明
微观法	①分子动能变化:取决于温度。 ②分子势能变化:可由体积变化判定分子力做功正负,进而判定分子势能变化。 ③内能变化:系统内能等于分子动能与分子势能的总和
宏观法	①做功情况:体积膨胀时对外做功(真空自由膨胀除外),收缩时外界对系统做功。 ②热传递情况:特别是物态变化过程中的热传递。 ③内能变化:热力学第一定律 $\Delta U=Q+W$

第 2 节　热力学第一定律

一、热力学第一定律

1.内容

一个热学系统的内能变化量等于外界向它传递的热量与外界对它所做的功的和。

2.公式

$\Delta U=Q+W$。此公式是标量式,应用时功、热量的单位应统一为国际单位制中的焦耳。

3.符号法则

符号	W	Q	ΔU
+	外界对系统做功	系统吸收热量	内能增加
−	系统对外界做功	系统放出热量	内能减少

4.物理意义

热力学第一定律不仅反映了做功和热传递这两种改变内能的方式是等效的,而且给出了内能的变化量与做功和热传递之间的定量关系。

几种特殊情况		
条件	过程	结果
$Q=0$	绝热过程	外界对物体做的功等于物体内能的增加量,$W=\Delta U$
$W=0$	等容过程	物体吸收的热量等于物体内能的增加量,$Q=\Delta U$
$\Delta U=0$	等温过程	外界对物体做的功等于物体放出的热量,$W+Q=0$ 或 $W=-Q$ 物体吸收的热量等于物体对外界所做的功,$W+Q=0$ 或 $Q=-W$

5.热力学第一定律与理想气体

项目	ΔU	W	Q
标志	气体的温度	气体的体积	容器的性质
判断	升温，ΔU为正；降温，ΔU为负	体积减小，W为正；体积增大，W为负	吸热，Q为正；放热，Q为负
特例	温度不变时，$\Delta U=0$ $W=-Q$	体积不变时，$W=0$ $\Delta U=Q$	绝热，$Q=0$ $\Delta U=W$

二、热力学第一定律的应用

1.理想气体的四个热学过程的比较

项目	压强p	体积V	温度T	内能U	外界对气体做功W	热量Q
等温过程	增大	减小	不变	不变	+	放热
	减小	增大			-	吸热
等容过程	增大	不变	升高	增大	0	吸热
	减小		降低	减小		放热
等压过程	不变	增大	升高	增大	-	吸热
		减小	降低	减小	+	放热
绝热过程	增大	减小	升高	增大	+	0
	减小	增大	降低	减小	-	

2.判断理想气体内能变化的方法

(1)若做功和热传递同时发生时，内能的变化要用热力学第一定律进行分析。

(2)若过程是绝热的，则$Q=0$，$\Delta U=W$，即气体内能的增加量(减少量)等于外界对气体(气体对外界)做的功。

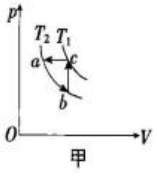
(3)若是等容变化，$W=0$，$\Delta U=Q$，即气体内能的增加量(减少量)等于气体吸收(放出)的热量。

(4)若是等温变化，$\Delta U=0$，则$W+Q=0$或$W=-Q$，即外界对气体做的功等于气体放出的热量(气体对外界做的功等于气体吸收的热量)。

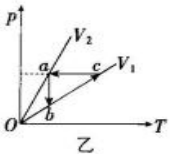
3.热力学第一定律与气体状态图像问题

(1)等温线(如图甲所示)：一定质量的理想气体，$T_1>T_2$。

$a\to b$，等温降压膨胀，内能不变，吸收的热量等于对外做的功。$b\to c$，等容升温升压，不做功，吸收的热量等于内能增加量。$c\to a$，等压降温压缩，放出的热量等于外界做的功和内能减少量之和。



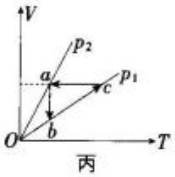
甲



乙

(2)等容线(如图乙所示)：一定质量的理想气体，$V_1>V_2$。

$a\to b$，$b\to c$，$c\to a$，状态及能量变化同等温线分析。



丙

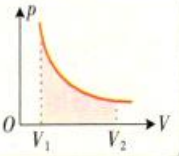
(3)等压线(如图丙所示)：一定质量的理想气体，$p_1>p_2$。

$a\to b$，等温升压压缩，内能不变，外界做的功等于放出的热量。$b\to c$，等压升温膨胀，吸收的热量等于内能增加量和对外做的功之和。

$c\to a$，等容降温降压，内能减少量等于放出的热量。

【拓展】(1)在等压变化过程中，做功$W=Fl=pS\cdot l=p\Delta V$。

(2)在p-V图像中，图线与V轴所围“面积”表示做的功。



三、热力学第一定律在理想气体中的应用

对于理想气体，常利用热力学第一定律与气体实验定律(或理想气体状态方程)结合起来分析其状态变化规律，基本思路如下：

1. 利用体积的变化分析做功情况。一般情况下，气体体积增大，气体对外做功；气体体积减小，外界对气体做功。

2. 利用温度的变化分析内能的变化。一定质量理想气体的内能只与温度有关，温度升高，内能增加，温度降低，内能减少。

3. 利用热力学第一定律判断吸热还是放热。若已分析出气体的做功情况和内能变化情况，利用热力学第一定律$\Delta U=W+Q$可判断吸、放热情况。

4. 气体的状态变化要结合$\frac{pV}{T}=C$分析。

第3节　能量守恒定律

一、探索能量守恒的足迹

(1)所有自然现象都涉及能量，人类的任何活动都离不开能量。

(2)能量具有不同的形式，有描述热运动的内能、描述机械运动的机械能、描述光辐射的光能等，不同形式的能量可以相互转化。

二、能量守恒定律

1.内容

能量既不会凭空产生，也不会凭空消失，它只能从一种形式转化为其他形式，或者从一个物体转移到别的物体，在转化或转移的过程中，能量的总量保持不变。

2.理解

(1)能量守恒定律是自然界中最基本的规律，任何自然现象(包括宏观与微观世界)都必须遵守。

(2)各种运动形式都有对应的能，各种形式的能通过某种力做功可以相互转化。

(3)能量转化与守恒是没有条件的。

3.意义

(1)能量守恒定律是比机械能守恒定律更为普遍的规律。

(2)能量守恒定律是19世纪自然科学的三大发现之一，它宣告了第一类永动机不可能制成。

(3)能量守恒定律是认识自然、改造自然的有力武器，这个定律将广泛的自然科学联系起来。

热力学第一定律，实际上是内能与其他能量发生转化或内能转移时的能量守恒定律。

三、永动机不可能制成

(1)"第一类永动机"：不需要任何动力或燃料，却能不断地对外做功的机器。

(2)失败原因：第一类永动机的思想违背了能量守恒定律，所以是不可能制成的。

(3)任何动力机械的作用都是把其他形式的能转化为机械能。

第4节　热力学第二定律

一、热力学第二定律

1.克劳修斯表述----------从传热的方向性表述

(1)**内容**：热量不能自发地从低温物体传到高温物体。

(2)**理解**

①热量会自发地从高温物体传到低温物体，在传热过程中不会对其他物体产生影响。

②如果有其他作用，热量有可能由低温物体传到高温物体。

③如果没有其他作用，热量就不可能从低温物体传到高温物体。

2.开尔文表述－－－从机械能与内能转化的方向性表述

(1)**内容**：不可能从单一热库吸收热量，使之完全变成功，而不产生其他影响。

(2)**理解**

①机械能转化为内能是自然的，可以全部转化。

②内能无法全部用来做功以转化成机械能，而不产生其他影响。

③如果引起其他变化，可能从单一热库吸收热量并把它全部用来做功。

3.实质

热力学第二定律的两种表述是等价的，可以从一种表述推出另一种表述，同时这两种表述揭示了自然界的基本规律：一切与热现象有关的宏观自然过程都具有方向性，即一切与热现象有关的宏观自然过程都是不可逆的。

4.第二类永动机

从单一热库吸收热量全部用来对外做功，即效率为100%的热机，永远不可能实现，因为它违背了热力学第二定律。

【拓展】两类永动机的比较

项目	第一类永动机	第二类永动机
特点	不需要任何动力或燃料，却能不断地对外做功的机器	从单一热库吸收热量，使之完全变成功，而不产生其他影响的机器
不可能制成的原因	违背能量守恒定律，不可能制成	不违背能量守恒定律，但违背热力学第二定律，不可能制成

5.热机

①**定义**：一种把内能转化为机械能的装置.

②**原理**：热机从热库吸收热量 Q_1，推动活塞做功 W，然后向冷凝器释放热量 Q_2.

③**效率**：由能量守恒定律得 $Q_1=W+Q_2$，我们把热机做的功 W 和它从热库吸收的热量 Q_1 的比值叫作热机效率，用 η 表示，即 $\eta=\frac{W}{Q_1}\times100\%$.

二、利用热力学第二定律分析问题

1.利用热力学第二定律的两种表述

(1)**传热的方向性**：热量不能自发地从低温物体传到高温物体。

(2)**机械能与内能转化的方向性**：不可能从单一热库吸收热量，使之完全变成功，而不产生其他影响。

2.利用热力学第二定律的微观解释

一切自然过程总是沿着大量分子热运动的无序性增大的方向进行，即在任何自然过程中，一个孤立系统的总熵不会减小。热力学第二定律揭示了自然界中进行的涉及热现象的宏观过程都具有方向性。

3.热力学过程具有方向性的实例

(1)高温物体 $\underset{\text{热量 }Q\text{ 不能自发地传给}}{\overset{\text{热量 }Q\text{ 能自发地传给}}{\rightleftharpoons}}$ 低温物体。

(2)机械能 $\underset{\text{不能自发地且不能完全转化为}}{\overset{\text{能自发地完全转化为}}{\rightleftharpoons}}$ 内能。

(3)气体体积 V_1 $\underset{\text{不能自发收缩到}}{\overset{\text{能自发膨胀到}}{\rightleftharpoons}}$ 气体体积 V_2(较大)。

(4)不同气体 A 和 B $\underset{\text{不能自发分离成}}{\overset{\text{能自发混合成}}{\rightleftharpoons}}$ 混合气体 AB。

对“自发”的理解



热量自发地从高温物体向低温物体传递。



热量不能自发地从低温物体传到高温物体。但如果有“外界的影响或帮助”,可以实现从低温物体向高温物体传热。

三、热力学第三定律

1.内容

不可能通过有限的过程把一个物体冷却到绝对零度,这个规律称为热力学第三定律。

2.理解

绝对零度是低温的极限,可以无限接近,但永远不能达到。

四、熵增加原理

1.熵

熵用来表达一个系统的无序程度,系统从有序向无序发展过程中熵在增加。

2.熵增加原理

在任何自然过程中,一个孤立系统的总熵不会减少。如果过程可逆,则熵不变;如果过程不可逆,则熵增加。

3.微观解释

(1)在自发过程中,系统总是自发地向无序方向发展。

(2)从微观的角度看,热力学第二定律是一个统计规律:一个孤立系统总是从熵小的状态向熵大的状态发展,而熵值较大代表着较为无序,所以自发的宏观过程总是向无序度更大的方向发展。

(3)热力学第二定律也叫熵增加原理。

五、能源是有限的

1.能量耗散

集中度较高且有序度较高的能量(如机械能、电能、化学能等),当它们变为环境的内能后,就成为更加分散且无序度更大的能量,我们很难把这些分散的内能重新收集起来加以利用,这样的转化过程叫能量耗散。

2.能量品质降低

各种形式的能量向内能的转化,是由无序程度较小的状态向无序程度较大的状态的转化,是能够自动发生、全额发生的。而内能向机械能的转化过程,由热力学第二定律知道,这种转化是有条件的,即环境中必须存在着温度差,而且内能不能全额转化为机械能。因此,从可被利用的价值来看,内能与机械能、电能等相比,是一种低品质的能量。

3.能源是有限的资源

在能源的使用过程中,虽然能的总量保持守恒,但能量的品质下降了。虽然能量总量不会减少,但能源会逐步减少,因此能源是有限的资源。

4.开发新能源

太阳能是最具发展前景的新能源,是一种清洁能源,不会导致环境污染。其他新能源如生物质能、风能、水能等都具有广阔的发展前景。

【补充知识】

(1)有序和无序、宏观态和微观态

①有序和无序

确定某种规则,符合这个规则的分布就是有序的,不符合确定的规则和要求的分布是无序的.

②宏观态和微观态

a)规定了某种规则,我们就规定了一个“宏观态”,这个“宏观态”可能包含一种或几种“微观态”,不同的“宏观态”对应的“微观态”的个数不同.如果一个“宏观态”对应的“微观态”比较多,就说这个“宏观态”是比较无序的.

b)我们把以系统的分子数分布而不区分具体的分子来描写的系统状态叫热力学系统的宏观态;把以分子数分布并且区分具体的分子来描写的系统状态叫热力学系统的微观态.

(2)热力学第二定律的微观解释

①气体向真空的扩散

气体的自由扩散过程是沿着无序性增大的方向进行的.

②热力学第二定律的微观意义

一切自然过程总是沿着分子热运动的

无序性增大的方向进行.

③对热力学第二定律微观意义的理解

系统的热力学过程就是大量分子无序运动状态的变化.

在功转化为热的过程中,从微观上看,自然过程是大量分子从有序运动状态向无序运动状态转化的过程,但其逆过程不能自发地进行,即不可能由大量分子无规则的热运动自发转变为有序运动.

在热传递的过程中,从微观上看,自然过程是大量分子从无序程度小的运动状态向无序程度大的运动状态转化的过程,其逆过程不能自发进行.

大量分子无序运动状态变化的方向总是向无序性增大的方向进行,即一切自然过程总是沿着无序性增大的方向进行,这就是热力学第二定律的微观意义.

(3)熵增加原理

在任何自然过程中,一个孤立系统的总熵不会减小,这就是熵增加原理,也就是热力学第二定律的另一种表述.

①由熵的定义可知,熵较大的宏观状态就是无序程度较大的宏观状态,也就是出现概率较大的宏观状态.在自然过程中熵总是增加的,并非因为有序是不可能的,而是因为通向无序的渠道要比通向有序的渠道多得多.把事情搞得乱糟糟的方式要比把事情做得整整齐齐的方式多得多.

②从微观的角度看,热力学第二定律是一个统计规律:一个孤立系统总是从熵小的状态向熵大的状态发展,而熵值较大代表着较为无序,所以自发的宏观过程总是向无序度更大的方向发展.若过程可逆,则熵不变;若过程不可逆,则熵增加.

【记忆口诀】

第一定律热力学，能量守恒好感觉。
内能变化等多少，热量做功不能少。
正负符号要准确，收入支出来理解。
对内做功和吸热，内能增加皆正值。
对外做功和放热，内能减少皆负值。
热力学第二定律，热传递是不可逆。
功转热和热转功，具有方向性不逐。

第四章 原子结构和波粒二象性

第一部分 基础知识点

第 1 节 普朗克黑体辐射理论

一、黑体与黑体辐射

1. 热辐射

(1)定义:我们周围的一切物体都在辐射电磁波,这种辐射与物体的温度有关,所以叫热辐射。

(2)特性:热辐射强度按波长的分布情况随物体的温度而有所不同。

【拓展】(1)任何物体在任何温度下都可以发生热辐射。

(2)除热辐射外,物体表面还会吸收和反射外界射来的电磁波。常温下我们看到的不发光物体的颜色是物体表面反射外界射来的电磁波所致。

（3）辐射物质的实质是电磁波，真空中电磁波的波长和频率的关系满足:光速=电磁波波长×电磁波频率,即 $c=\lambda\nu$.对于电磁波来说,频率越高(即波长越短),能量越高,反之越低.

2. 黑体

（1）定义:

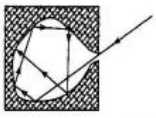
能够完全吸收入射的各种波长的电磁波而不发生反射的物体。

黑体辐射的特点:黑体辐射电磁波的强度按波长的分布只与黑体的温度有关.

(2)对黑体的理解

①黑体是一个理想化的物理模型;

②如图所示,如果在一个空腔壁上开一个很小的孔,那么射入小孔的电磁波在空腔内表面会发生多次反射和吸收,最终不能从空腔射出,因此小孔不会反射环境的辐射强度,小孔本身可自发的向外辐射电磁波,故把这个小孔近似看成一个绝对黑体;



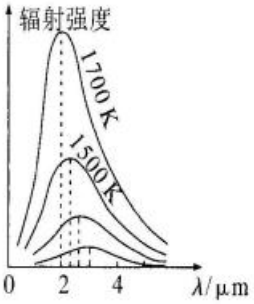
③黑体看上去不一定是黑色的.有些可看作黑体的物体,由于自身有较强的辐射,看起来还会很明亮,如炼钢炉口上的小孔、一些发光体(如太阳、白炽灯丝)也被当作黑体来处理.

3. 黑体辐射的实验规律

(1)一般材料的物体辐射的电磁波除与温度有关外,还与材料的种类及表面状况有关.

(2)黑体是指只吸收而不反射外界射来的电磁波的物体,由于黑体只进行热辐射,所以黑体辐射电磁波的强度按波长的分布只与黑体的温度有关.

(3)黑体辐射的实验规律:随着温度的升高,一方面,各种波长的辐射强度都有增加(辐射的能量变大);另一方面,辐射强度的极大值向波长较短的方向移动,如图所示.



【规律】1. 温度越高，辐射本领越强。
2. 频率越高（波长越短），辐射本领越强。

二、能量量子化

【背景】

为了解释辐射规律:

1896 年,德国物理学家维恩提出了辐射强度按波长分布的理论公式,称为维恩公式,此公式可解释短波区的变化规律,无法解释长波区的变化规律.

1900 年,英国物理学家瑞利提出了辐射强度按波长分布的理论公式,称为瑞利公式,此公式可解释长波区的变化规律,无法解释短波区的变化规律,且当波长趋于 0 时,辐射强度无穷大,这是荒谬的! 当波长很小时,辐射属于紫外区,故此理论称为物理学理论的灾难,被称为"紫外灾难".

(1)能量子

普朗克为了解释辐射规律,提出假设:振动着的带电微粒的能量只能是某一最小能量值的整数倍,当带电微粒辐射或吸收能量时,只能是辐射或吸收这个最小能量值的整数倍,这个不可再分的最小能量值叫作能量子.

能量子 $\varepsilon=h\nu$.

ν 是电磁波的频率,h 是普朗克常量,其值为 $h=6.63\times10^{-34}\ \mathrm{J\cdot s}$。

(2)对能量子的理解

①物体在发射或接收能量的时候,只能从某一状态"飞跃"地过渡到另一状态,而不可能停留在不符合这些能量的任何一个中间状态;

②在宏观尺度内研究物体的运动时,我们可以认为:物体的运动是连续的,能量变化是连续的,不必考虑量子化;在研究微观粒子时必须考虑能量量子化;

③普朗克的能量子学说仅认为带电微粒在吸收或辐射时满足量子化,没有假设能量在传播的过程中也满足量子化,这是与爱因斯坦的光子理论的不同之处.

2. 能量量子化:在微观世界中,能量不能连续变化,只能取某些分立值,这种现象叫能量量子化。

【拓展】能量子假说的意义:德国物理学家普朗克借助能量子的假说,成功解释了黑体辐射规律,使人类对微观世界的本质有了崭新的认识,对现代物理学的发展产生了革命性的影响。

第 2 节　光电效应

一、光电效应现象

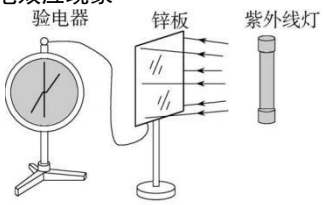
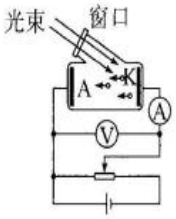


图1　光电效应实验

光电效应:照射到金属表面的光,能使金属中的电子从表面逸出的现象. 赫兹最早发现了光电效应现象.

(1)光电效应的实验

研究光电效应的电路图如所示.



实验原理:照射到金属表面的光,能使金属中的电子从表面逸出的现象.

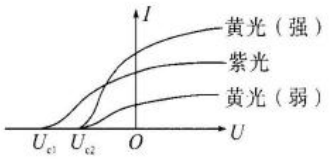
实验步骤:

①用不同频率的黄光与紫光去照射金属板;

②用相同频率、不同光照强度的黄光去照射金属板;

③调节金属板两端的电压,读取灵敏电流计示数.

实验现象:



解释:光照强度是指单位面积上所接受光的能量,光照强度相同,即指单位面积上接受光的能量相同. 因紫光的能量子大于黄光的能量子,故用相同光照强度的紫光和黄光照射金属板时,紫光的光子数小于黄光的光子数,紫光产生的光电流小于黄光产生的

光电流. 同理可以比较其他情况下光电流的大小关系.

(2)实验结论

①存在饱和电流

用某种固定光强、固定频率的光照射金属板,装置已经发生光电效应,不断增加正向电压,光电流先增大后趋近一个饱和值,再增加电压,电流不再增大.

a)增加正向电压,光电流增大的原因:光强一定,单位时间内从金属板表面逸出的电子数一定,但是电子逸出方向是任意的,有部分电子射向外侧,无法到达另一块金属板,增大正向电压,可以使更多的电子到达另一块金属板,形成光电流,故电流会增大.

b)存在饱和值的原因:当单位时间的逸出的电子全部到达另一块金属板时,再增加电压,单位时间到达另一块金属板的电子数不再增加,故电流不变.

②存在遏止电压和截止频率

用某种固定光强、固定频率的光照射金属板,装置已经发生光电效应,如果增大反向电压,反向电压使电子减速,达到另一块金属板的电子数减少,光电流逐渐减小,使光电流为 0 的反向电压称为遏止电压.

光电流为 0 的临界条件:速度方向正对另一块金属板的电子恰好到达另一块金属板,但与金属板不接触.

使用不同频率的光照射金属板,当入射光的频率减小到某种频率时,回路中没有光电流,即没有发生光电效应,恰好不发生光电效应的频率(发生光电效应的最小频率)称为截止频率或极限频率.

发生光电效应的条件:入射光的频率大于截止频率或极限频率.

③光电效应具有瞬时性

频率大于截止频率的入射光照射金属表面时立即产生电流,精确测量表明产生电流的时间小于 10^{-9} s.

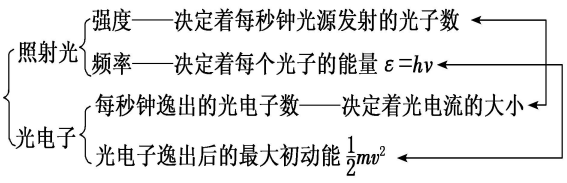
④逸出功

逸出功是指使电子脱离某种金属所做功的最小值,用 W_0 表示,不同金属的逸出功不同.

金属越活跃，逸出功越小，越容易发生光电效应。

【总结】

1.两条对应关系



【注意】

(1)能否发生光电效应,不取决于光的强度而取决于光的频率.

(2)饱和光电流大小取决于光的强度.

(3)光电效应中的“光”不是特指可见光,也包括不可见光.

(4)逸出功的大小由金属本身决定,与入射光无关.

(5)光电子不是光子,而是电子.

2. 光电效应与光的电磁理论的矛盾

(1)不存在截止频率,任何频率的光都能产生光电效应.

(2)光越强,光电子的初动能越大,遏止电压与光的强弱有关.

(3)在光很弱时,放出电子的时间应远大于 10^{-9} s.

3. 爱因斯坦光电效应方程

(1)光子理论

在空间传播的光不是连续的,而是一份一份的,每一份叫作一个光子,光子的能量 $\varepsilon=h\nu$.

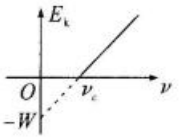
(2)光电效应方程

表达式:$h\nu=E_k+W_0$ 或 $E_k=h\nu-W_0$.

物理意义:金属表面的电子吸收一个光子获得的能量是 $h\nu$,这些能量的一部分用来克服金属的逸出功 W_0,剩下的表现为逸出后电子的初动能.

(3)光电效应方程的图像

如图所示,光电效应方程 $E_k-\nu$ 图像.



①横截距:$E_k=h\nu_c-W_0=0$,解得 $\nu_c=\frac{W_0}{h}$.

横截距的物理意义:横截距是指该金属板发生光电效应的截止频率或极限频率.

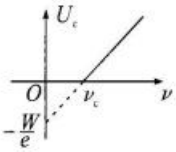
②纵截距的绝对值为该金属板的逸出功;

③斜率为普朗克常量.

(4)最大初动能与遏止电压的关系

关系式:$E_k=h\nu-W_0=eU_c$,即 $U_c=\frac{h}{e}\nu-\frac{W_0}{e}$,

$U_c-\nu$ 图像如图所示.



①横截距：$U_c=\frac{h}{e}\nu_c-\frac{W_0}{e}=0$，解得 $\nu_c=\frac{W_0}{h}$.

横截距的物理意义：横截距为该金属板发生光电效应的截止频率或极限频率.

②纵截距的绝对值为$\frac{W_0}{e}$.

③斜率为$\frac{h}{e}$.

【规律总结】1：

光电效应问题的三个关系式和三个图像

（一）三个关系式：

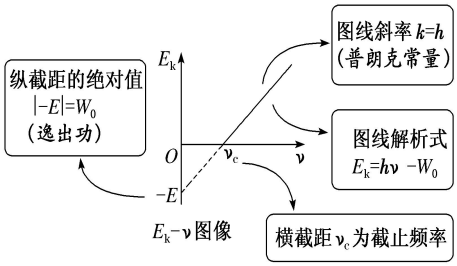
①爱因斯坦光电效应方程：$E_k=h\nu-W_0$.

②最大初动能与遏止电压的关系：$E_k=eU_c$.

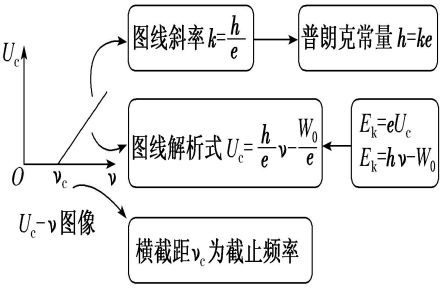
③逸出功与极限频率的关系：$W_0=h\nu_0$.

（二）三类图像：

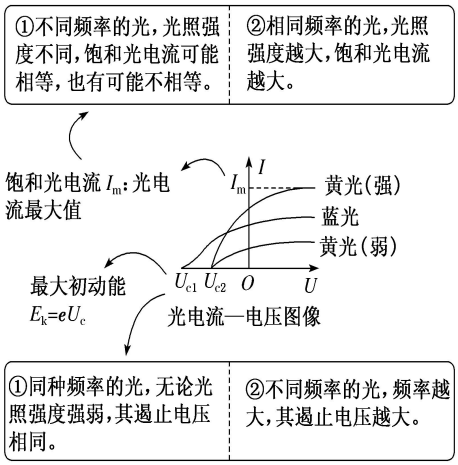
（1）最大初动能 E_k 与入射光频率ν的关系图线



（2）遏止电压 U_c 与入射光频率ν的关系图线



（3）光电流与电压的关系



【规律总结】2：

实验规律	对规律的解释
截止频率	爱因斯坦光电效应方程表明，只有当 $h\nu>W_0$ 时，才有光电子逸出，$\nu_c=\frac{W_0}{h}$ 就是光电效应的截止频率
遏止电压	由 $E_k=eU_c$、$E_k=h\nu-W_0$ 可得 $U_c=\frac{h}{e}\nu-\frac{W_0}{e}$，即遏止电压与入射光频率有关，与光强无关
瞬时性	电子一次性吸收光子的全部能量，不需要积累能量的时间，光电流几乎是瞬时产生的
饱和电流	光的颜色不变的情况下，光强较大时，单位时间内照射到金属表面的光子数较多，发生光电效应产生的光电子较多，因而饱和电流较大

【规律总结】3：

与光电效应有关的五组“易混”概念

(1)光子与光电子：光子指光在空间传播时的每一份能量，光子不带电；光电子是金属表面受到光照射时发射出来的电子，其本质是电子。光子是因，光电子是果。

(2)光电子的动能与光电子的最大初动能：只有金属表面的电子直接向外飞出时，只需克服原子核的引力做功的情况，才具有最大初动能。

(3)光电流和饱和光电流：金属板飞出的光电子到达阳极，回路中便产生光电流，随着所加正向电压的增大，光电流趋于一个饱和值，这个饱和值是饱和光电流，在一定的光照条件下，饱和光电流与所加电压大小无关。

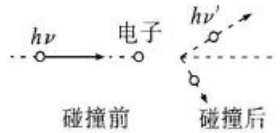
(4)入射光强度与光子能量：入射光强度指单位时间内照射到金属表面单位面积上的总能量。

(5)光的强度与饱和光电流：频率相同的光照射金属产生光电效应，入射光越强，饱和光电流越大，但不是简单的正比关系。

二、康普顿效应

1. 康普顿效应

美国物理学家康普顿在研究石墨对 X 射线的散射时，发现在散射的 X 射线中，除了与入射波长 λ_0 相同的成分外，还有波长大于 λ_0 的成分，这个现象称为康普顿效应.



解释：X 射线的光子与电子发生碰撞，由于光子的速度是光速，而物质中的电子速度相对很小，电子可以看作静止，碰撞前后动量和能量都守恒，碰撞后电子的动量和能量增加，光子的动量和能量减小，因此散射后光子的频率要减小，光子的波长变长.

2. 康普顿效应的物理意义

光电效应已经说明光具有能量和粒子性；康普顿效应表明光子除了具有能量之外还具有动量，进一步揭示了光的粒子性的一面.

3. 光子的动量

光子的能量：$\varepsilon=h\nu$，

质能方程：$\varepsilon=mc^2$，

电磁波：$c=\lambda\nu$，

光子的动量：$p=mc=\frac{\varepsilon}{c}=\frac{h\nu}{c}=\frac{h}{\lambda}$，即 $p=\frac{h}{\lambda}$.

结论：由 $\varepsilon=h\nu$ 与 $p=\frac{h}{\lambda}$ 知，光子的能量与动量具有高度的对称性.

【光子能量越高，康普顿效应越明显】

三、光的波粒二象性

1. 光的波动性

19 世纪，托马斯·杨的光干涉实验中出现的明暗相间的条纹、菲涅尔的光的衍射实验中的衍射图与马吕斯的光的偏振现象，说明光具有波动性.

2. 光的粒子性

光电效应说明光具有能量和粒子性；康普顿效应说明光子具有动量，进一步说明光具有粒子性.

3. 波动性与粒子性的统一

由 $\varepsilon=h\nu$ 与 $p=\frac{h}{\lambda}$ 也可以看出，光的波动性和粒子性并不矛盾，且具有高度对称性，表达式中含有描述波动性的物理量——频率 ν 和波长 λ，以及描述粒子性的物理量——动量.

4. 光的波动性与粒子性表现区别

(1)从数量上看：个别光子的作用效果往往表现为粒子性；大量光子的作用效果往往表现为波动性.

(2)从频率上看：频率越低，波动性越显著，越容易看到光的干涉和衍射现象；频率越高，粒子性越显著.贯穿本领越强，越不容易看到光的干涉和衍射现象.

(3)从传播与作用上看：光在传播过程中往往表现出波动性；在与物质发生作用时往往表现出粒子性.

光本性学说的发展史

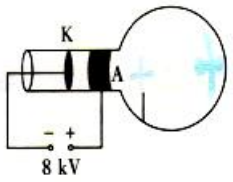
学说名称	微粒说	波动说	电磁说	光子说	波粒二象性
代表人物	牛顿	惠更斯	麦克斯韦	爱因斯坦	公认
实验依据	光的直进光的反射	光的干涉衍射	能在真空中传播，是横波，光速等于电磁波速	光电效应康普顿效应	光既有波动现象，又有粒子特征
内容要点	光是一群弹性粒子	光是一种机械波	光是一种电磁波	光是由一份一份光子组成的	光是具有电磁本性的物质，既有波动性又有粒子性

第 3 节　　原子的核式结构模型

一、电子的发现：

1.阴极射线

(1)产生：如图所示，真空玻璃管中 K 是金属板制成的阴极，A 是金属环制成的阳极，它们分别连接在感应圈的负极和正极上。在两极间加有高压时，阴极会发出一种射线，这种射线称为阴极射线。



【拓展】阴极射线不是稀薄气体导电时的辉光放电现象。

(2)特点：阴极射线能使荧光物质发光。

2. 电子的发现

- 汤姆孙
  - 1897 年，根据阴极射线在电场和磁场中的偏转情况，判断它的本质是带负电的粒子流，并求出了这种粒子的比荷
  - 用不同材料的阴极做实验，所得粒子比荷的数值都是相同的，说明这种粒子是构成物质的共有成分
- 密立根
  - 在 1909~1913 年间通过著名的“油滴实验”精确地测定了电子的电荷量

(1)电子：组成阴极射线的粒子称为电子，是原子的组成部分。

(2)电子的电荷量 $e=1.60\times10^{-19}$ C；

电子的质量 $m_e=9.1\times10^{-31}$ kg；

质子质量与电子质量的比值 $\frac{m_p}{m_e}=1\,836$。

3. 电子发现的意义

电子的发现使人们认识到原子不是构成物质的最小微粒，原子也是有内部结构的。

二、原子的核式结构模型

1. 汤姆孙的原子模型

汤姆孙认为原子是一个球体，正电荷弥漫性地均匀分布在整个球体内，电子镶嵌其中——“枣糕模型”或“西瓜模型”。



JJ.汤姆孙的原子模型

2. α 粒子散射实验

1909 年卢瑟福和他的助手做了 α 粒子轰击金箔的实验。

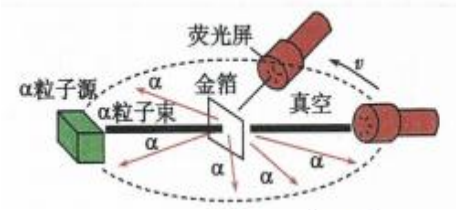
此实验由卢瑟福指导他的学生盖革和马斯顿所做.

(1)实验装置

放射源：放出 α 粒子(^4_2He)

金箔：靶子

显微镜荧光屏(可转动)：观察工具



α 粒子散射实验装置示意图

(2)实验现象

①绝大多数 α 粒子穿过金箔后，基本上仍沿原来的方向前进。

②少数 α 粒子发生较大偏转。

③极少数 α 粒子偏转的角度超过 90°，甚至被金箔“反弹”回来。

(3)汤姆孙的原子模型无法解释 α 粒子散射实验的现象。

（4）注意事项

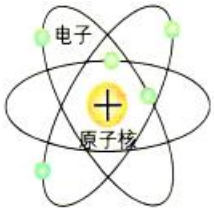
①整个实验过程在真空中进行；

②α 粒子是氦原子核，体积很小，金箔需要做得很薄，α 粒子才能穿过；

③α 粒子的质量是电子质量的 7300 倍，电子对 α 粒子的运动基本没有影响.

3. 卢瑟福核式结构模型

(1)内容：原子的中心有一个很小的核，称为原子核，原子的全部正电荷和几乎全部质量都集中在原子核里，带负电的电子在核外空间绕核旋转。



【拓展】电荷间的相互作用力为库仑力，库仑力提供电子绕核旋转的向心力。

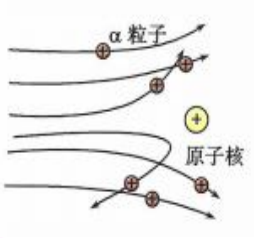
（2）对α粒子散射实验结果的解释

①当 α 粒子穿过原子时，如果离核较远，受到原子核的斥力很小，运动方向改变很小，因为原子核很小，所以绝大多数 α 粒子不发生偏转；

②只有当 α 粒子十分接近原子核穿过时，才受到很大的库仑力作用，偏转角才很大，而这种机会很少；

③如果 α 粒子正对着原子核射来，偏转角几乎达到 180°，这种机会极少；

④α 粒子散射实验估算出原子的半径的数量级为 10^{-10} m，原子核半径的数量级为 10^{-15} m，原子核的半径只相当于原子半径的十万分之一，体积只相当于原子体积的 10^{-15}，所以原子核很小很小，原子核内部十分“空旷”.



⚠ 提醒

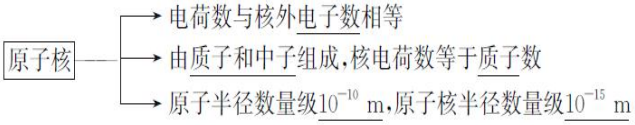
核式结构模型尽管成功地解释了 α 粒子散射实验，但在解释原子发光和原子的稳定性时却遇到了困难。

三、原子核的电荷与尺度

(1)电荷：原子核由质子和中子组成，核电荷数=质子数。

(2)尺度：原子半径的数量级为 10^{-10} m，原子核半径的数量级为 10^{-15} m。因此，原子核在原子中所占体积很小。

【总结】

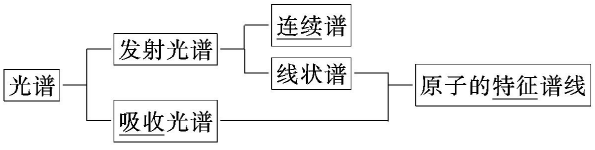


第 4 节 氢原子光谱和玻尔的原子模型

一、光谱：

1.**定义：**用光栅或棱镜可以把各种颜色的光按波长展开，获得光的波长(频率)和强度分布的记录，即光谱。

2.**光谱分类**



3. 发射光谱

(1)定义：发光物体直接产生的光谱。

(2)连续谱

①特点：连续分布的包含一切波段的光谱。



连续谱

②产生：由炽热固体、液体、高压气体发光产生的光谱。

(3)线状谱

①特点：只含有一些不连续的亮线的光谱，又称为原子光谱。不同原子对应的亮线位置不同，说明不同原子的发光频率不同，这些亮线称为原子的特征谱线。



线状谱

②产生：由稀薄气体或金属蒸气发光产生的光谱。

4. 吸收光谱

(1)定义：物体发出的白光，通过温度较低的物质蒸气时，某些波长的光被该物质吸收后形成的光谱。



吸收光谱

(2)特点：连续光谱中某些波长的光被吸收后出现一些暗线。

【拓展】同种元素的吸收光谱与线状谱是一一对应的，所以吸收光谱中的暗线也是原子的特征谱线。

5. 光谱的应用----光谱分析

(1)定义：由于每种原子都有自己的特征谱线，我们就可以利用它来鉴别物质和确定物质的组成成分，这种方法叫光谱分析。

(2)优点：光谱分析的优点是灵敏度高，某种元素只要含量达到 10^{-10} g，就可以从光谱中发现它的特征谱线。

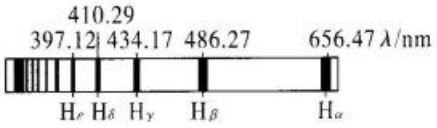
⚠ 提醒

线状谱和吸收光谱都含有原子的特征谱线，可以用于光谱分析，连续谱不能用于光谱分析。

二、氢原子光谱的实验规律

(1)氢谱

从氢气放电管可获得氢原子光谱，如图所示。



(2)巴耳末公式

巴尔末对当时在可见光区（可见光的波长在 400 nm～760 nm，光子能量范围在 1.61～3.10 eV）的四条谱线进行分析，得到如下公式：

$\frac{1}{\lambda}=R\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{n^2}\right)$，$n=3,4,5,\cdots$．式中 R 叫作里德伯常量，$R=1.10\times10^7\ \mathrm{m}^{-1}$，公式中只能取 $n\geqslant3$ 的整数，不能连续取值，波长是分立的值．

除了巴耳末系，氢原子光谱在红外区和紫外光区的其他谱线，也都满足与巴耳末公式类似的关系式．

【氢原子的其他光谱线系】（了解）

在氢原子的光谱线中，除了满足巴尔末公式的巴尔末系外，其他还有红外区、紫外区内的一些线系。

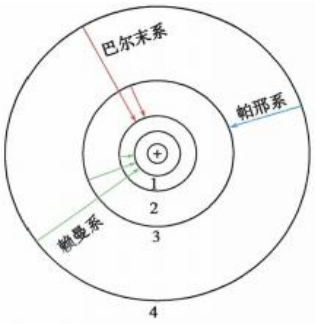
赖曼系（紫外区）$\frac{1}{\lambda}=R\left(\frac{1}{1^2}-\frac{1}{n^2}\right)(n=2,3,4\cdots)$

帕邢系（近红外区）$\frac{1}{\lambda}=R\left(\frac{1}{3^2}-\frac{1}{n^2}\right)(n=4,5,6\cdots)$

布拉开系（红外区）$\frac{1}{\lambda}=R\left(\frac{1}{4^2}-\frac{1}{n^2}\right)(n=5,6,7\cdots)$

氢原子光谱线是最早发现、研究的光谱线，这些光谱线可用一个统一的公式表示：$\frac{1}{\lambda}=R\left(\frac{1}{m^2}-\frac{1}{n^2}\right)$

式中 $m=1,2,3\cdots$ 对每一个 m，有 $n=m+1,m+2,m+3\cdots$



三、经典理论的困难

将电子绕原子的运动理解成卫星绕地球运动．核外电子绕原子核转动，做周期性运动：

电子做周期性转动，电子形成的电磁场做周期性变化．周期性变化的电磁场激发产生电磁波，电磁波向外发射，电子失去能量，轨道越来越低，最终栽到原子核上，但事实不是这样，原子是稳定的系统：

电子辐射电磁波的频率与它绕核转动的频率相同，电子轨道越来越低，频率越来越快且变化连续，也就是说辐射的电磁波的频率是连续变化的，形成的光谱应该是连续谱，而实际产生的光谱为线状谱．

以上现象无法利用经典电磁理论解释原子世界的现象，需要新的理论进行解释．

四、玻尔原子理论的基本假设（**三大假设**）

(1)定态**假设**：原子只能处于一系列不连续的能量状态中，在这些能量状态中原子是稳定的，电子虽然绕核运动，但并不向外辐射能量。且满足：

$$mvr=n\frac{h}{2\pi}\quad(n=1,2,3,\cdots)$$

(2)跃迁**假设**：原子从一种定态跃迁到另一种定态时，它辐射或吸收一定频率的光子，光子的能量由这两个定态的能量差决定，即 $h\nu=E_m-E_n$。(h 是普朗克常量，$h=6.63\times10^{-34}$ J·s)

(3)轨道**假设**：原子的不同能量状态跟电子在不同的圆周轨道绕核运动相对应。原子的定态是不连续的，因此电子的可能轨道也是不连续的。

五、玻尔理论对氢光谱的解释

(1)原子光谱的分立性

通常情况下，原子处于基态，处于基态的原子是稳定的，处于激发态的原子是不稳定的。原子从高能级跃迁到低能级放出的光子的能量等于前后两个能级之差。由于原子的能级是分立的，所以放出的光子的能量也是分立的。因此，原子的发射光谱只有一些分立的亮线。

(2)特征谱线

由于不同的原子具有不同的结构，能级各不相同，因此辐射(或吸收)的光子频率也不同，这就是不同元素的原子具有不同的特征谱线的原因。

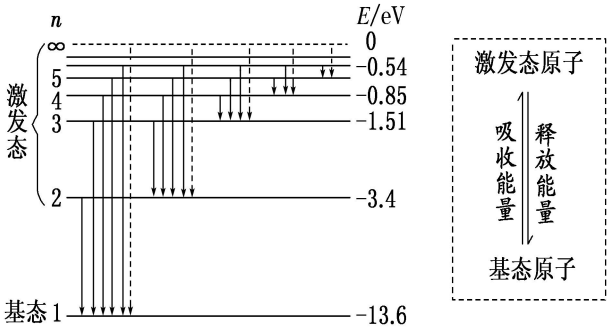
(3)玻尔理论对巴耳末系的解释

根据玻尔理论，巴耳末公式 $\frac{1}{\lambda}=R_\infty\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{n^2}\right)$($n=3,4,5,\cdots$)中的正整数 n 和 2，正好代表电子跃迁之前和跃迁之后所处的定态轨道量子数 n 和 2。因此，巴耳末公式代表的应是量子数分别为 $n=3,4,5,\cdots$ 的能级向量子数 $n=2$ 的能级跃迁时放出的光谱线。

(4)对气体导电时发光的解释

通常情况下，原子处于基态，基态是最稳定的。气体导电管中的原子受到高速运动的电子的撞击，有可能跃迁到激发态。处于激发态的原子是不稳定的，会自发地向能量较低的能级跃迁，最终回到基态，放出光子。

六、能级图如图所示



①氢原子的能级公式：$E_n=\frac{1}{n^2}E_1$($n=1,2,3,\cdots$)，其中基态能量 E_1 最低，其数值为 $E_1=-13.6$ eV。

②氢原子的半径公式：$r_n=n^2r_1$($n=1,2,3,\cdots$)，其中 r_1 为基态半径，又称玻尔半径，其数值为 $r_1=0.53\times10^{-10}$ m。

氢原子任一能级：$E_n=E_p+E_k$；$E_n=\frac{E_1}{n^2}$；$r_n=n^2r_1$

$\frac{ke^2}{r_n^2}=m\frac{v_n^2}{r_n}$；$E_{kn}=\frac{1}{2}mv_n^2=\frac{ke^2}{2r_n}$；$E_n=-E_k$；$E_p=-2E_k$

量子数n↑，r↑，E_n↑，E_p↑，E_k↓，v↓，T(周期)↑，吸收光子

【拓展】关于跃迁问题的深入讨论

（一）跃迁

(1)定义：电子由一个轨道到另一个轨道的过程称为跃迁。

(2)辐射与激发

①辐射：从高能级向低能级的自发跃迁过程，若以释放光子的形式释放能量，称为辐射。

②激发：从低能级向高能级的受激跃迁过程称为激发。

（二）升轨跃迁

电子升轨跃迁需要吸收能量，电子从能量较低的定态轨道跃迁到能量较高的定态轨道时，会吸收能量，吸收的能量 $E=E_m-E_n$，根据吸收的能量来源进行分析讨论：

(1)吸收的能量来源：电磁辐射

若吸收的能量来源于电磁辐射(简单地理解成光照)，则光子的能量必须等于两能级差的能量，若光子的能量为 $h\nu$，则必须满足 $h\nu=E_m-E_n$。

举例：当两能级的能量差 $E=E_2-E_1=-3.4\text{ eV}-(-13.6)\text{ eV}=10.2\text{ eV}$ 时，若光子的能量为 10.3 eV，则电子不会吸收该光子的能量跃迁；若光子的能量为 10.1 eV，则光子的能量小于能级差的能量，无法满足跃迁的能量，升轨跃迁吸收的能量必须等于能级的能量差值。

特别注意：若光子的能量大于电离能，则电子会吸收这种大于能级差的能量。例如，一轨道能量为 −13.6 eV，若光子的能量大于 13.6 eV，则电子会吸收该光子的能量且脱离原子核的束缚，发生电离现象，即电子脱离该原子核的束缚，多余的能量转化成电子脱离束缚后的动能，这与光电效应的原理等效。

(2)吸收的能量来源:碰撞

若吸收的能量来源于其他高速实物粒子的碰撞,实物粒子的动能可全部或部分地被核外电子吸收,则需要高速实物粒子的动能需大于等于两能级差的能量,设核外电子吸收的能量为 E,则 $E=E_m-E_n$,升轨跃迁吸收的能量必须等于能级的能量差值.

特别注意:如果高速粒子的能量大于电离能,电子会吸收高速粒子的全部能量,多余的能量转化成电子脱离束缚后的动能,这与光电效应的原理等效.

(3)吸收的能量来源:加热

若吸收的能量来源于加热,加热使电子的能量增加,即电子的动能增加,设电子吸收的热能为 E,则 $E=E_m-E_n$,升轨跃迁吸收的能量必须等于能级的能量差值.

特别注意:如果电子吸收的能量来源于加热,持续加热时,电子会逐级升轨跃迁,最后脱离原子核的束缚,发生电离现象.

(三)降轨跃迁

电子降轨跃迁会释放能量,并以电磁波的形式释放能量.电子从能量较高的定态能级跃迁到能量较低的定态能级时,释放的电磁波的能量 $E=E_m-E_n=h\nu$,降轨跃迁释放的电磁波种类与氢原子所处的能级和数量有关,根据氢原子的数量进行分析讨论:

七、玻尔理论的局限性

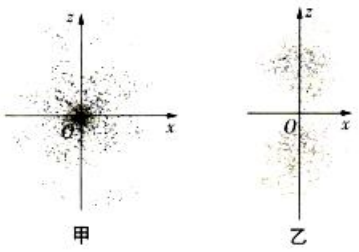
1. 成功之处:第一次将量子观念引入原子领域,提出了定态与跃迁的概念,成功解释了氢原子光谱的实验规律。

2. 局限性:玻尔理论保留了一些经典理论,认为电子的运动有一定的轨道,无法解释复杂的原子光谱现象。

3. 电子云

(1)实际上电子的坐标没有确定的值,我们只能说某时刻电子在某点附近单位体积内出现的概率是多少,而不能把电子的运动看作一个具有确定坐标的质点的轨道运动。如果用疏密不同的点来表示电子在各个位置出现的概率,作出的图称为电子云。

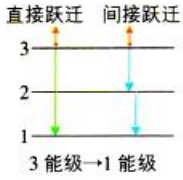
(2)如图所示,甲为氢原子处于 $n=1$ 状态时的电子云。当 $n=2$ 时有几个可能的状态,乙图是其中一个状态的电子云。



八、几组概念的区分

1.直接跃迁与间接跃迁

原子从一种能量状态跃迁到另一种能量状态时,有时可能是直接跃迁,有时可能是间接跃迁,两种情况的辐射(或吸收)光子的频率可能不同。



3 能级→1 能级

2. 一群氢原子的跃迁

若一群氢原子处于量子数为 n 的能级时,可能向 $(n-1)$、$(n-2)$、$(n-3)$、…、1 各能级跃迁,共有 $(n-1)$ 条谱线,跃迁到 $(n-1)$ 能级的又可向 $(n-2)$、$(n-3)$、…、1 各能级跃迁,共有 $(n-2)$ 条谱线,…,归纳为 $\frac{n(n-1)}{2}$,即 C_n^2 条。

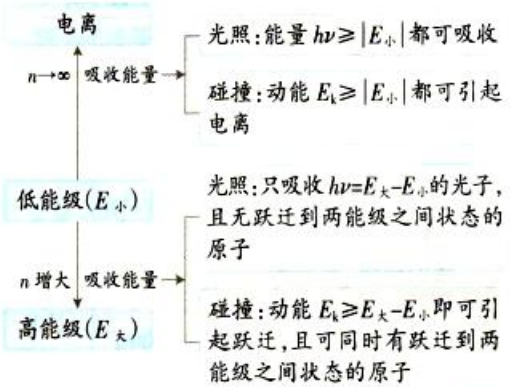
3. 一个氢原子的跃迁

若一个氢原子处于量子数为 n 的能级时,可能发生直接跃迁,可能发生间接跃迁,如先到中间某个能级上,再向基态跃迁,可能逐渐跃迁,先到 $(n-1)$,再到 $(n-2)$、$(n-3)$、…、1。即一个氢原子发生跃迁时,最少放出一个光子,最多放出 $(n-1)$ 个光子。

4. 跃迁与电离

跃迁	根据玻尔理论,当原子从低能级向高能级跃迁时,需要吸收能量;当原子从高能级向低能级跃迁时,会放出能量。跃迁时吸收或放出的能量必须等于两个能级之差
电离	不论原子处于什么状态,只要入射光子的能量大于该状态的原子电离所需要的能量就可使之电离。原子一旦电离,原子结构将被破坏,不再遵守有关原子理论

【规律总结】



如吸收能量足够大,克服电离能后,获得自由的电子还携带动能。

第 5 节 粒子的波动性和量子力学的建立

一、粒子的波动性

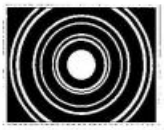
1. 物质波的提出

法国物理学家德布罗意提出：任何一个运动着的物体都与一个对应的波相联系，这种与实物粒子相联系的波称为德布罗意波，也叫作物质波.

物质波的波长 $\lambda=\frac{h}{p}$，频率 $\nu=\frac{\varepsilon}{h}$.

2. 物质波的验证

美国物理学家戴维孙和英国物理学家 G. P. 汤姆孙分别获得了电子束在晶体上的衍射图样，如图所示的为电子束穿过铝箔后的衍射图样，从而证实了实物粒子——电子的波动性.



3. 粒子的波粒二象性

粒子本身就具有粒子性，现证明粒子又具有波动性，粒子产生的波称为物质波，故世间一切物质均具有波粒二象性.

（一）光的波粒二象性

(1)光的干涉、衍射、偏振现象证明光具有波动性。

(2)光电效应说明光具有粒子性。

(3)光既具有波动性，又具有粒子性，称为光的波粒二象性。

（二）对光的波粒二象性的理解

从数量上看	个别光子的作用效果往往表现为粒子性；大量光子的作用效果往往表现为波动性
从频率上看	频率越低波动性越显著，越容易看到光的干涉和衍射现象；频率越高粒子性越显著，越不容易看到光的干涉和衍射现象，贯穿本领越强
从传播与作用上看	光在传播过程中往往表现出波动性；在与物质发生作用时往往表现出粒子性
波动性与粒子性的统一	由光子的能量ε=hν、光子的动量表达式 $p=\frac{h}{\lambda}$ 也可以看出，光的波动性和粒子性并不矛盾，表示粒子性的粒子能量和动量的计算式中都含有表示波的特征的物理量——频率ν和波长λ

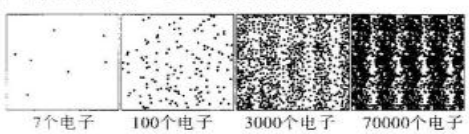
【提醒】

不可把光当成经典观念中的波，也不可把光子当成经典观念中的粒子。对光子而言，有 E=hν=pc, 对实物粒子而言，有 $p=\sqrt{2mE_k}$，$E_k=\frac{p^2}{2m}$

二、概率波

1. 概率波的验证

1960 年，约恩孙直接做了电子双缝干涉实验，从屏上摄得了微弱电子束的干涉图样和光的干涉图样非常相似，如图所示，也证明了实物粒子的确具有波动性.



电子与光均具有波动性，所以也会产生明暗相间的条纹. 电子落在亮条纹的概率大，落在暗处的概率小，无法具体推测电子的落点，电子产生的物质波是概率波，因此物质波均是概率波.

2. 根据概率波总结光的波粒二象性的特点

(1)光子既具有粒子性，又具有波动性. 光子在和其他物质作用的过程中(如光电效应、康普顿效应)表现出粒子性，光在传播过程中表现出波动性.

(2)对于频率低、波长长的光，波动性特征明显；对于频率高、波长短的光，粒子性特征明显.

(3)大量光子产生的效果表现出波动性，少量光子产生的效果表现出粒子性.

(4)在光的传播过程中，光子在空间各点出现的概率由波动性起主导作用，因此光波为概率波.

三、不确定性关系

1. 不确定性关系

在经典力学中，一个质点的位置和动量是可以同时精确测定的. 而在量子理论中，要同时准确地测出微观粒子的位置和动量是不可能的，也就是说不能同时用位置和动量来描述微观粒子的运动.

利用数学方法对微观粒子的运动进行分析可知，如果以 Δx 表示粒子位置的不确定量，以 Δp 表示粒子在该方向上的动量的不确定量，那么 $\Delta x\Delta p\geqslant\frac{h}{4\pi}$，式中 h 为普朗克常量.

这就是著名的不确定性关系，简称不确定关系. 我们把这种关系叫作不确定性关系.

2. 电子云

由不确定性关系可知原子中的电子在原子核周围的运动是不确定的，电子在空间各点出现的概率是不同的，因而不能用“轨道”来描述它的运动.

当原子处于稳定状态时，电子会形成一个稳定的概率分布. 人们常用一些小黑圆点来表示这种概率分布：概率大的地方，小黑圆点密一些；概率小的地方，小黑圆点疏一些. 这样电子的概率分布图的结果如同电子在原子核周围形成云雾，这就是著名的“电

子云”.

3. 对电子云的理解

(1)电子云描述的是电子在原子核外空间各点出现的概率大小的一种形象化的图示,并不是代表电子的位置.

(2)我们通常认为的“核外电子轨道”,只不过是电子出现概率最大的地方.

⚠ 提醒

(1)宏观物体观察不到其波动性的原因是其波长太短,波动性太弱。

(2)物质波是概率波,光波也是概率波。

(3)微观粒子的动量和位置坐标不能同时准确地确定。

三、量子力学的建立和应用

(1)量子力学:描述微观世界行为的理论。 1927年第五届索尔维会议。

(2)量子力学的创立是物理学历史上的一次重要革命。量子力学和相对论共同构成了20世纪以来物理学的基础。

(3)量子力学的应用

①量子力学推动了核物理和粒子物理的发展。

②量子力学推动了原子、分子物理和光学的发展。

③量子力学推动了固体物理的发展。 量子力学极大地推动了人类的进步。

【记忆口诀1】

原子核、中央站,电子分层围它转;
向外跃迁为激发,辐射光子向内迁;
光子能量hγ,能级差值来计算。
一个一群有差异,光子电子不一样。.
跃迁电离能量异,理尔理论来解释。

【记忆口诀2】

光照金属能生电,入射光线有极限。
最大动能大和小,光子频率有关联。
电子数目多和少,光线强弱紧相连。
光电效应瞬间生,频率取决逸出功。

【本章高频考点】

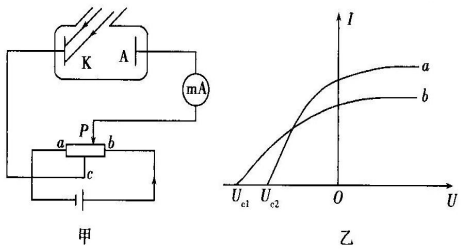
1.光电效应的应用。2.氢原子的跃迁。

第三部分 物理方法概述

图像法:物理图像能够直观、形象、简洁、生动地展现两个物理量之间的关系,清楚地表达物理过程和物理规律。对于与光电效应现象有关的图像,可以根据爱因斯坦光电效应方程 $E_k=h\nu-W_0$ 及动能定理 $-eU_c=-E_k$ 进行分析。

第四部分 易错、疑难问题选

1. 如图所示是光电管的原理图,用该光电管研究 a、b 两种单色光产生的光电效应,得到光电流 I 与光电管两极间所加电压 U 的关系如图乙。则对两种光的说法,正确的是 ( )



A.照射该光电管时 b 光使其逸出的光电子最大初动能大

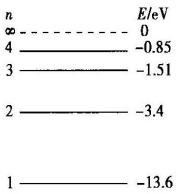
B.两种光照射到金属表面的逸出功相同,a 光的遏止电压大于 b 光的遏止电压

C.若将变阻器滑动头 P 从图示位置向右滑,始终用 a 光照射,则电路中光电流一定增大

D.分别用 a、b 两种单色光照射图甲光电管时,若将变阻器滑动头 P 从图示位置向左滑过中心 c 点,最先出现电路中无光电流且向左滑动距离最小的是 a 光

【答案】AD

2.(2020浙江杭州五校联考,2)氢原子的能级图如图所示,如果大量氢原子处在 $n=3$ 能级的激发态,则下列说法正确的是 ( )



A.这群氢原子能辐射出3种不同的频率的光子

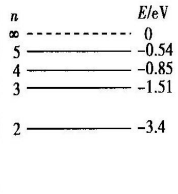
B.波长最长的辐射光是氢原子从 $n=3$ 能级跃迁到 $n=1$ 能级产生的

C.辐射光子的最小能量为12.09 eV

D.处于该能级的氢原子至少需吸收13.6 eV能量的光子才能电离

【答案】A

3.(2020浙江名校协作体联考,15)(多选)如图为氢原子能级图,已知可见光的光子的能量范围为1.62~3.11 eV,普朗克常量 $h=6.63\times10^{-34}$ J·s。下列说法正确的是 ( )



A.能量为13.0 eV的光子或者电子均可使处于基态的氢原子跃迁到激发态

B.处于 $n=3$ 能级的氢原子能吸收任意频率的紫外线

C.锌的逸出功是3.34 eV,一群处于 $n=3$ 能级的氢原子向基态跃迁时,发出的光照射锌板,锌板表面所发出的光电子的最大初动能为8.75 eV

D.波长为60 nm的伦琴射线能使处于基态的氢原子电离

【答案】BCD

4. [2020·湖州模拟] 一定强度的激光(含有两种频率的复色光)沿半径方向入射到半圆形玻璃砖的圆心 O,如图20-6甲所示.现让经过玻璃砖后的 A、B、C 三束光分别照射相同的光电管的阴极(如图乙所示),其中 C 光照射时恰好有光电流产生,则 ( )

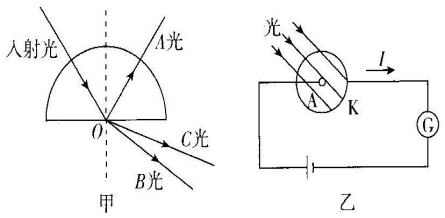


图20-6

A. B 光照射光电管的阴极时,一定有光电子打出

B. A 光和 C 光分别照射光电管的阴极时,A 光打出的光电子的最大初动能较大

C. 入射光的入射角从0开始增大,C 光比 B 光先消失

D. 若是激发态的氢原子直接跃迁到基态辐射出 B 光、C 光,则 B 光对应的能级较高

【答案】C

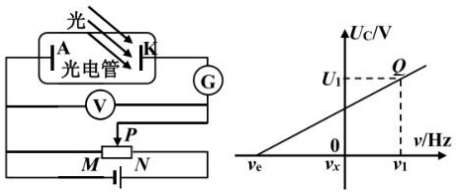
5. 为研究金属的遏止电压 U_c 与入射光频率 ν 的关系，美国物理学家密立根利用图甲所示的电路描绘出图乙所示的图像，由此计算出普朗克常量 h。电子电量用 e 表示，下列说法正确的是

A. 在获取图乙所示图像的实验中应逐渐增大入射光强度

B. 若入射光的频率增大，为测量遏止电压，则滑动变阻器的滑片 P 应向 M 端移动

C. 这种金属的截止频率为 ν_e

D. 普朗克常量表达式为 $h=\dfrac{U_1 e}{\nu_1-\nu_e}$



【答案】CD

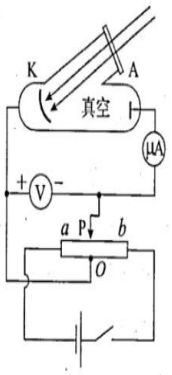
6. 如图所示是研究光电效应的实验装置，某同学进行了如下操作：①用频率为 ν_1 的光照射光电管，此时微安表中有电流，将滑动变阻器滑片 P 调至位置 M（图中未画出），使微安表示数恰好变为 0，此时电压表示数为 U_1；②用频率为 ν_2 的光照射光电管，将滑片 P 调至位置 N（图中未画出），使微安表示数恰好变为 0，此时电压表的示数为 U_2。已知元电荷为 e，$\nu_1<\nu_2$。关于该实验，下列说法正确的是

A. 位置 M 比位置 N 更靠近 b 端

B. 位置 M、N 与光强有关

C. 可求得普朗克常量为 $\dfrac{e(U_1-U_2)}{\nu_2-\nu_1}$

D. 该光电管中金属的极限频率为 $\dfrac{\nu_2U_1-\nu_1U_2}{U_1-U_2}$



第 16 题图

【答案】AD

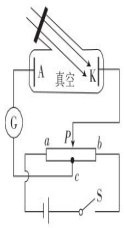
7. 如图所示，这是研究光电效应的实验装置，c 为滑动变阻器的中点。将滑动变阻器的滑片 P 移到中点处，用红光照射光电管，此时电流表中有电流，则（　　）

A. 将滑片 P 向 a 端移动，光电子的最大初动能不变

B. 将滑片 P 向 a 端移动，光电流将一直变小

C. 将滑片 P 向 b 端移动，光电流将一直变大

D. 将滑片 P 向 a 端移动，将光强相同的红光与紫光分别照射光电管，形成的饱和电流大小相等



【答案】A

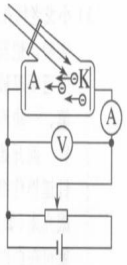
8. 如图所示，用波长为 λ_0 的单色光照射某金属，调节滑动变阻器，当电压表的示数为某值时，电流表的示数恰好减小为零；再用波长为 $\dfrac{4\lambda_0}{5}$ 的单色光重复上述实验，当电压表的示数增加到原来的 2 倍时，电流表的示数又恰好减小为零。已知普朗克常量为 h，真空中光速为 c。下列分析正确的是

A. 用波长为 $2\lambda_0$ 的单色光照射该金属一定能发生光电效应

B. 该金属的逸出功为 $\dfrac{7hc}{4\lambda_0}$

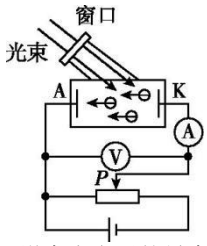
C. 两种光照射出的光电子的最大初动能之比为 1∶2

D. 若将电源的正负极调换，仍用波长为 λ_0 的单色光照射，将滑动变阻器滑片向右移动，电流表的示数将一定增大



【答案】C

9.(多选)研究光电效应现象的实验电路如图所示，A、K 为光电管的两个电极.已知该光电管阴极 K 的极限频率为 ν_0，元电荷电荷量为 e，普朗克常量为 h.现用频率为 ν（$\nu>\nu_0$）的光照射阴极 K，则下列说法正确的是（　　）



A.将滑片 P 向右滑动，可增大光电子的最大初动能

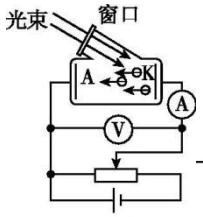
B.若两电极间电压为 U，则到达阳极 A 的光电子最大动能为 $h(\nu-\nu_0)+eU$

C.将滑片 P 向右滑动，则电流表的示数一定会不断增大

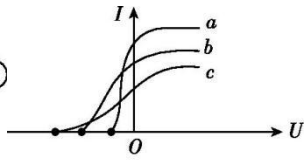
D.将电源正、负极对调，当两电极间的电压大于 $\dfrac{h(\nu-\nu_0)}{e}$ 时，电流表的示数为 0

【答案】BD

10.(多选)一群处于 n=3 能级的氢原子自发跃迁，产生了光子 a、b、c，射入如图甲所示的光电管且都能发生光电效应，实验中三种光子对应的光电流 I 与电压 U 的关系图像如图乙所示，则（　　）



甲



乙

A.光子 a 对应产生的光电子的遏止电压最大

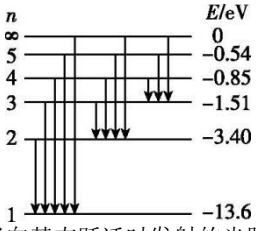
B.光子 c 对应产生的光电子最大初动能最大

C.在同一介质中，光子 c 的折射率最大

D.在同一介质中，光子 a 的临界角最大

【答案】BCD

11.锌的逸出功是 3.34 eV.图为氢原子的能级示意图.对于氢原子在能级跃迁过程中发射或吸收光子的特征认识，下列说法错误的是（　　）



A.用氢原子从高能级向基态跃迁时发射的光照射锌板一定能产生光电效应

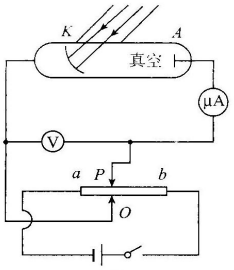
B.一群处于 n=3 能级的氢原子向基态跃迁时，能放出 3 种不同频率的光

C.一群处于 n=3 能级的氢原子向基态跃迁时发出的光照射锌板，锌板表面所发出的光电子的最大初动能为 8.75 eV

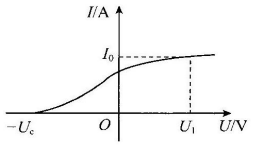
D.用能量为 10.3 eV 的光子照射，可使处于基态的氢原子跃迁到激发态

【答案】D

12. 如图甲所示为光电效应实验的电路图，其中电压表的零刻度值在表盘的中间，滑动变阻器滑片 O 位置不动，滑片 P 可以左右滑动. 某次实验中保持光的颜色和光照强度不变，只移动滑动变阻器滑片 P 的位置，得到电流表的示数 I 随电压表的示数 U 变化规律如图乙所示，当电流增大到最大值 I_0 时，对应的电压为 U_1. 则下列说法正确的是（　　）



甲



乙

A. 图中滑片 P 向 a 端滑动时，可以得到电压 U_1 的值

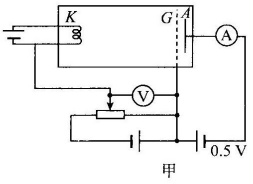
B. 金属 K 的逸出功等于 eU_c

C. 光电子的最大初动能等于 eU_c

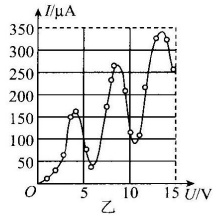
D. 保持光的颜色不变，只增加光照强度，图乙 $I-U$ 图像的 U_c 会增大

【答案】C

13. 弗兰克—赫兹实验是研究汞原子能量是否具有量子化特点的重要实验. 实验原理如图甲所示，灯丝 K 发射出初速度不计的电子，K 与栅极 G 间的电场使电子加速，G、A 间加有电压为 0.5 V 的反向电场，使电子减速，电流表的示数大小间接反映了单位时间内能到达 A 极电子的多少. 在原来真空的容器中充稀薄汞蒸汽后，发现 K、G 间电压 U 每升高 4.9 V 时，电流表的示数 I 就会显著下降，如图乙所示. 科学家猜测电流的变化与电子和汞原子的碰撞有关，玻尔进一步指出该现象应从汞原子能量量子化的角度去解释. 依据本实验结果下列判断合理的是 （ ）



甲



乙

A. 电子运动过程中只可能与汞原子发生一次碰撞

B. 汞原子基态和第一激发态的能级之差可能为 4.9 eV

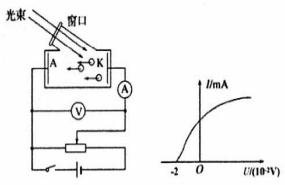
C. K、G 间电子的动能越大，越容易使汞原子发生跃迁

D. K、G 间电压越大，单位时间内到达 A 极的电子数越多

【答案】B

14.新冠病毒疫情防控工作中，额温枪在医院、车站、小区、学校等地方被广泛使用，成为重要的防疫装备之一。某一种额温枪的工作原理是：任何物体温度高于绝对零度（-273℃）时都会向外发出红外线，额温枪通过红外线照射到温度传感器，发生光电效应，将光信号转化为电信号，从而显示出物体的温度。已知人的体温正常时能辐射波长为 10μm 的红外线，如图甲所示，用该红外光线照射光电管的阴极 K 时，电路中有光电流产生，光电流随电压变化的图像如图乙所示，已知 $h=6.63\times10^{-34}$J·s，$e=1.6\times10^{-19}$C，则





甲　乙

第14题图

A.波长 10μm 的红外线在真空中的频率为 3×10^{13} Hz

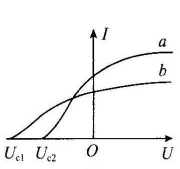
B.将图甲中的电源正负极反接，将不会产生电信号

C.由图乙可知，该光电管的阴极金属逸出功约为 0.1eV

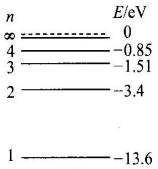
D.若人体温度升高，辐射红外线的强度增大，光电流减小

【答案】AC

15. a、b 两种可见光在同一光电效应装置中测得的光电流和电压的关系如图甲所示. 图乙为氢原子能级图，已知可见光的光子能量在 1.62 eV 到 3.11 eV 之间，下列说法正确的是 （ ）



甲



乙

A. a 光的波长比 b 光的短

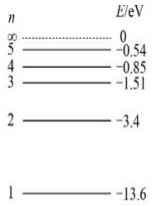
B. 单色光 a 的光子动量比单色光 b 的光子动量大

C. 若 a 光是氢原子从 $n=4$ 能级跃迁到 $n=2$ 能级时发出的光，则 b 光可能是从 $n=5$ 能级跃迁到 $n=2$ 能级时发出的光

D. 用 $E=12.8$ eV 的电子去轰击基态的氢原子，可能得到两种频率的可见光

【答案】 CD

16. 氢原子能级图如图所示，已知普朗克常量 $h=6.63\times10^{-34}$J•s，元电荷 $e=1.60\times10^{-19}$C，可见光的光子能量范围介于 1.62~3.10eV，真空中光速 $c=3.0\times10^{8}$m/s。下列说法正确的是



第16题图

A. 氢原子从高能级向低能级跃迁时，原子总能量减少

B. 氢原子从高能级向 $n=2$ 能级直接跃迁都能够辐射出可见光

C. 氢原子从 $n=4$ 能级向低能级跃迁时，辐射出的光的最大波长约为 1884nm

D. 处于 $n=4$ 激发态的原子至少需要吸收 13.6eV 的能量才能电离

【答案】AC

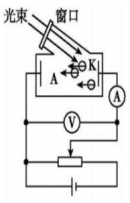
17. 如图 15 所示，甲图为演示光电效应的实验装置；乙图为 a、b、c 三种光照射下得到的三条电流表与电压表读数之间的关系曲线；丙图为氢原子的能级图。下列说法正确的是

A. 同一介质中 a 光的波长大于 c 光

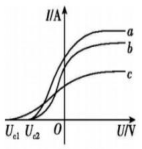
B. 若 b 光为可见光，则 a 光可能是紫外线

C. 若 b 光光子能量为 2.86 eV，用它直接照射大量处于 $n=2$ 激发态的氢原子，可以产生 6 种不同频率的光

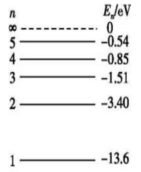
D. 若 b 光光子是由处于 $n=3$ 激发态的氢原子向 $n=2$ 跃迁产生的，则 a 光光子也可能是由处于 $n=3$ 激发态的氢原子向 $n=2$ 跃迁产生的



甲



乙

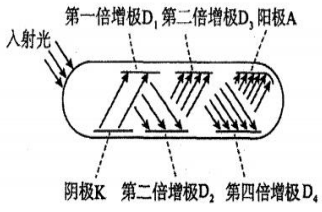


丙

第15题图

【答案】AD

18. 光电倍增管（PMT）是一种高灵敏度和超快时间响应光探测器，如图所示，它由光阴极 K、倍增级和阳极 A 等组成，由玻璃封装，内部高真空，其倍增级又由一系列倍增极组成，每个倍增极工作在前级更高的电压下。当入射光照射光阴极，产生光电子，经电场加速聚焦后，带着更高的能量撞击第一级倍增管，发射更多的低能量的电子，这些电子依次被加速向下级倍增极撞击，导致一系列的几何级倍增，最后，在高电位的阳极收集到放大了的光电流。下列说法正确的是 （ ）



A. 只要有光入射，就能在阳极获得放大的光电流

B. 入射光的频率越高，阴极 K 发射出的光电子的初动能越大

C. 增大倍增级间的电压有利于提高其灵敏度

D. 增大光强不影响其灵敏度

【答案】C

19. 如图所示，真空中有一平行板电容器，电容为 C，两极板 M、N 分别由银和锌（其极限频率分别为 ν_1 和 ν_2）制成。现用频率为 $\nu(\nu_2<\nu<\nu_1)$的单色光持续照射两极板内表面，已知普朗克常量 h，电子的电荷量

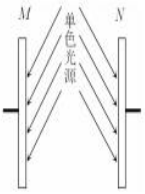
为e，则电容器两个极板最终带电情况是

A.N极板带负电，带电荷量为$\frac{Ch(\nu-\nu_2)}{e}$

B.N极板带正电，带电荷量为$\frac{Ch(\nu-\nu_2)}{e}$

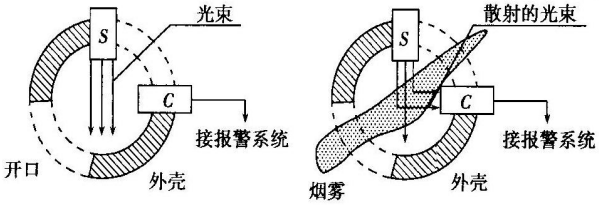
C.M极板带负电，带电荷量为$\frac{Ch(\nu_1-\nu)}{e}$

D.M极板带正电，带电荷量为$\frac{Ch(\nu_1-\nu)}{e}$



答案：B

20. 小宇同学参加学校科技嘉年华，设计了一个光电烟雾探测器，如图所示，S为光源，发出一束光，当有烟雾进入探测器时，来自S的光会被烟雾散射进入光电管C，当光射到光电管中的钠表面（钠的极限频率为6.00×10^{14} Hz）时，会产生光电子。当光电流大于10^{-8} A时，便会触发报警系统。已知元电荷$e=1.6\times10^{-19}$ C，下列说法不正确的是（　　）



A.要使该探测器正常工作，光源S发出的光波波长不能大于0.5 μm

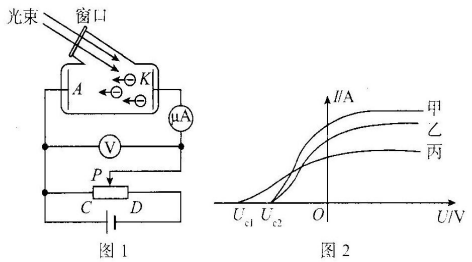
B.若光源S发出的光波能使光电管发生光电效应，则光源越强，光电烟雾探测器探测到的光电子数越多

C.光束遇到烟雾发生散射是一种折射现象

D.若5%射向光电管C的光子会产生光电子，当报警器报警时，每秒射向钠表面的光子数目最少是1.25×10^{12}个

【答案】C

21. 光电管是应用光电效应原理制成的光电转换器件，在光度测量、有声电影、自动计数、自动报警等方面有着广泛的应用. 现有含光电管的电路如图1所示，图2是用甲、乙、丙三束光分别照射光电管得到的$I-U$图线，U_{c1}、U_{c2}表示遏止电压，下列说法中正确的是（　　）



A. 图1中光电管两端所加的电压为反向电压

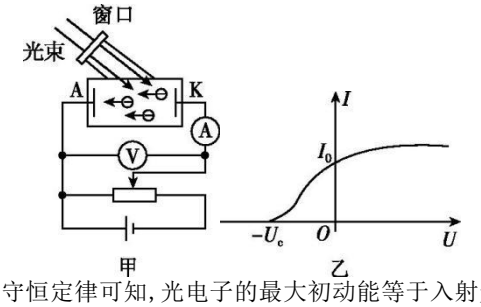
B. 甲光照射时光电子的最大初动能比丙光照射时光电子的最大初动能大

C. 分别用甲光、丙光做双缝干涉实验，甲光的干涉条纹比丙光的宽

D. 甲、乙是相同频率的光，甲比乙在单位时间内发射的光子数多

【答案】CD

22.(多选) 图甲为光电效应实验电路图，移动滑动变阻器滑片位置或对调电源正、负极，得到电流表的示数I随电压表的示数U变化的规律如图乙所示. 下列说法中正确的是（　　）



A.由能量守恒定律可知，光电子的最大初动能等于入射光子的能量

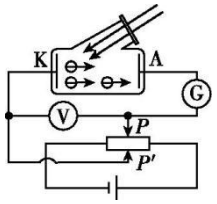
B.由欧姆定律可知，电压表的示数为零时，电流表的示数也为零

C.保持光的颜色不变，只增加光照强度时，I-U图像的纵截距I_0会增大

D.只改变光的颜色，发现I-U图像的横截距的绝对值U_c增大，这种光在同一双缝干涉装置中的干涉条纹间距比原来的光要小

【答案】CD

23.研究光电效应现象的实验电路如图所示，A、K为光电管的两个电极，电压表V、电流计G均为理想电表. 已知该光电管阴极K的极限频率为ν_0，电子电荷量的绝对值为e，普朗克常量为h，开始时滑片P、P'上下对齐. 现用频率为ν的光照射阴极K（$\nu>\nu_0$），则下列说法正确的是（　　）



A.该光电管阴极材料的逸出功为$h\nu$

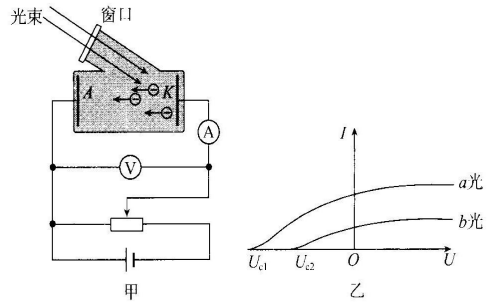
B.若加在光电管两端的正向电压为U，则到达阳极A的光电子的最大动能为$h\nu-h\nu_0$

C.若将滑片P向右滑动，则电流计G的示数一定会不断增大

D.若将滑片P'向右滑动，则当滑片P、P'间的电压大小为$\frac{h\nu-h\nu_0}{e}$时，电流计G的示数恰好为0

【答案】D

24. 如图甲所示为光电效应实验的电路图，用一定强度的单色光a、b分别照射阴极K，用电流表A测量流过光电管的电流I，用电压表测量光电管两极间的电压U，调节滑动变阻器，得到图乙所示的光电流I与电压U的关系图像. 下列说法正确的是（　　）



A. 将a、b两种光由空气射入水中，水对a光的折射率大于b光

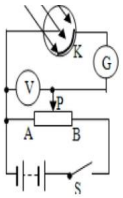
B. a、b两种光在水中的传播速度应该是a光更小

C. 用a光照射时光电管的极限频率高于用b光照射时光电管的极限频率

D. 当滑动变阻器的滑片滑到最左端时，光电流I为零

【答案】AB

25. 如图所示，用频率为ν的可见光照射到光电管的阴极K，此时电表G中有电流通过，已知电子电荷量为e，则下列说法正确的是



A. 仅调换电源的正负极方向，电表G还是有电流

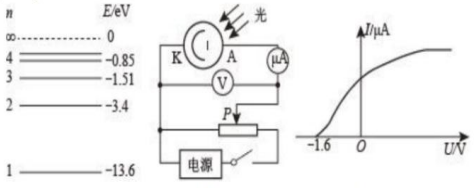
B. 仅增加入射光的强度，电表G的示数变大

C. 变阻器的滑动端P向左滑动时，电表G的示数变小

D. 电表G的示数变为0时，电压表的读数为U_0，此材料的截止频率为$\dfrac{eU_0}{h}$

【答案】AB

26. 氢原子的能级图如图（a）所示，一群处于n=4 能级的氢原子，用其向低能级跃迁过程中发出的光照射如下图（b）电路阴极K的金属，只有1种频率的光能使之发生光电效应，产生光电子，测得其电流随电压变化的图像如图（c）所示。电子电荷量为1.6×10^{-19}C，则下列说法正确的是（　　）



第15题图

A. 题述氢原子跃迁一共能发出4种不同频率的光子

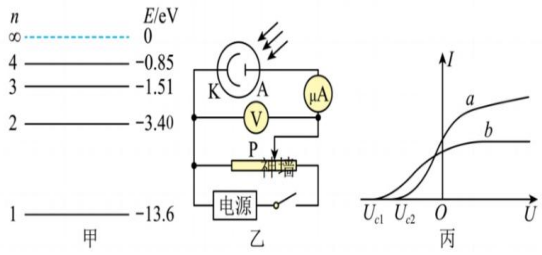
B. 阴极金属的逸出功为12.75ev

C. 题述光电子能使处于n=3 能级的氢原子电离

D. 若图（c）中饱和光电流为I=3.2μA，则1s内最少有2×10^{13}个氢原子发生跃迁

【答案】CD

27. 氢原子的能级图如图甲所示，一群处于第4能级的氢原子，向低能级跃迁过程中能发出不同频率的光，其中只有频率为ν_a、ν_b两种光可让图乙所示的光电管阴极K发生光电效应。分别用频率为ν_a、ν_b的两个光源照射光电管阴极K，测得电流随电压变化的图像如图丙所示。下列说法中正确的是



A. 用能量为13eV的光子照射可以使处于基态的氢原子跃迁到第4能级

B. 这群氢原子向低能级跃迁时可以最多辐射4种不同频率的电磁波

C. 图丙中的图线a所表示的光是氢原子由第4能级向基态跃迁发出的

D. 若$U_{c1}=2U_{c2}$，则光电管的逸出功为11.43eV

【答案】D

第五章　原子核

第一部分　基础知识点

第1节　原子核的组成

一、天然放射现象

1.**天然放射现象**

(1)定义：放射性元素**自发**地放出射线的现象，首先由贝克勒尔于1896年发现。

（2）意义：天然放射现象的发现，说明**原子核**具有复杂的结构。

2.放射性

(1)概念：物质发射射线的性质称为放射性。

(2)放射性元素：具有放射性的元素称为放射性元素，原子序数大于或等于83的元素，都能自发地发出射线，原子序数小于83的元素，有的也能放出射线，它们放射出来的射线共有三种。

3. 玛丽·居里和她的丈夫皮埃尔·居里发现了两种放射性更强的新元素，命名为钋(Po)和镭(Ra).

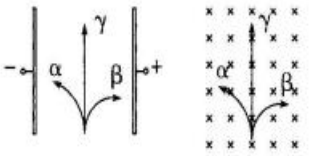
二、射线的本质

1.三种射线的比较

三种射线的本质及特征	种类	α射线	β射线	γ射线
	组成	高速氦核流	高速电子流	光子流(高频电磁波)
	带电荷量	$2e$	$-e$	0
	质量	$4m_p$，m_p=1.67×10^{-27} kg	$\dfrac{m_p}{1\,836}$	静止质量为零
	出射速度	$0.1c$	$0.99c$	c(光速)
	在电磁场中	偏转	与α射线反向偏转	不偏转
	贯穿本领	最弱，用纸能挡住	较强，穿透几毫米的铝板	最强，穿透几厘米的铅板
	对空气的电离作用	很强	较弱	很弱
空气中的径迹		短、粗、直	细、长、曲	几乎不可见

2.三种射线在电磁场的轨迹

三种射线在电场和磁场中的偏转轨迹如图所示.



【规律】

在匀强电场中，α粒子和β粒子沿相反方向做类平抛运动，且在同样的条件下，β粒子的偏移大。

在匀强磁场中，α粒子和β粒子沿相反方向做匀速圆周运动，且在同样条件下，β粒子的轨道半径小，偏移大。

三、原子核的组成

1. 质子的发现

1919年，卢瑟福用α粒子轰击氮原子核发现了质子，核反应方程：$^4_2\mathrm{He}+^{14}_7\mathrm{N}\rightarrow^{17}_8\mathrm{O}+^1_1\mathrm{H}$.

2. 中子的发现

卢瑟福猜想原子核内存在着一种质量与质子相同，但不带电的粒子，称为中子. 查德威克利用云室进行实验，验证了中子的存在.

发现中子的核反应方程：$^4_2\mathrm{He}+^9_4\mathrm{Be}\rightarrow^{12}_6\mathrm{C}+^1_0\mathrm{n}$.

3. 原子核的组成：原子核由质子和中子组成.

4. 原子核的符号：$^A_Z\mathrm{X}$

A(原子核的质量数)＝质子数＋中子

数，元素符号，

Z（核电荷数）＝原子核中质子数，即原子序数.

5. 同位素

具有相同的质子数而中子数不同的原子，在元素周期表中处于同一位置，它们互称为同位素. 例如，氢有三种同位素：${}_{1}^{1}\mathrm{H}$、${}_{1}^{2}\mathrm{H}$、${}_{1}^{3}\mathrm{H}$.

(2)理解

①同位素的化学性质相同。

②同位素的物理性质不同。

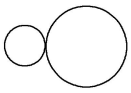
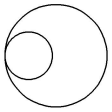
③同位素可以用物理方法分离。

第 2 节　放射性元素的衰变

一、原子核的衰变

1. 定义：原子核放出 α 粒子或 β 粒子，由于核电荷数变了，它在元素周期表中的位置就变了，变成另一种原子核，我们把这种变化称为原子核的衰变。

2.α衰变和β衰变的比较

衰变类型	α衰变	β衰变
衰变方程	${}_{Z}^{M}\mathrm{X}\rightarrow{}_{Z-2}^{M-4}\mathrm{Y}+{}_{2}^{4}\mathrm{He}$	${}_{Z}^{M}\mathrm{X}\rightarrow{}_{Z+1}^{M}\mathrm{Y}+{}_{-1}^{0}\mathrm{e}$
衰变实质	2 个质子和 2 个中子结合成一个整体射出	中子转化为质子和电子
	${}_{1}^{2}\mathrm{H}+{}_{1}^{2}\mathrm{H}\rightarrow{}_{2}^{4}\mathrm{He}$	${}_{0}^{1}\mathrm{n}\rightarrow{}_{1}^{1}\mathrm{H}+{}_{-1}^{0}\mathrm{e}$
匀强磁场中轨迹形状	 【大圆为α粒子】	 【大圆为β粒子】
衰变规律	电荷数守恒、质量数守恒，但质量不守恒	

α 衰变轨迹图 两圆外切	β 衰变轨迹图 两圆内切
${}_{Z}^{A}\mathrm{X}\rightarrow{}_{Z-2}^{A-4}\mathrm{Y}+{}_{2}^{4}\mathrm{He}$ ${}_{Z-2}^{A-4}\mathrm{Y}$：$Q=+(Z-2)e$ ${}_{2}^{4}\mathrm{He}$：$q=+2e$	${}_{Z}^{A}\mathrm{X}\rightarrow{}_{Z+1}^{A}\mathrm{Y}+{}_{-1}^{0}\mathrm{e}$ ${}_{Z+1}^{A}\mathrm{Y}$：$Q=+(Z+1)e$ ${}_{-1}^{0}\mathrm{e}$：$q=-e$
动量守恒： $m_{\mathrm{Y}}v_{\mathrm{Y}}=m_{\alpha}v_{\alpha}$， 即$\frac{r_{\mathrm{Y}}}{r_{\alpha}}=\frac{r_1}{r_2}=\frac{2}{Z-2}$	动量守恒： $m_{\mathrm{Y}}v_{\mathrm{Y}}=m_{\beta}v_{\beta}$， 即$\frac{r_{\mathrm{Y}}}{r_{\beta}}=\frac{r_1}{r_2}=\frac{1}{Z+1}$

3. 两点说明

(1)α 衰变中产生的新元素在元素周期表中前移 2 位，β 衰变中产生的新元素在元素周期表中后退 1 位。

(2)γ 射线经常是伴随 α 射线与 β 射线产生的。因为原子核在发生 α 衰变、β 衰变时往往有核能释放，使产生的新核处于高能级，它要由高能级向低能级跃迁，能量以 γ 光子的形式辐射出来。

二、半衰期

1. 定义

放射性元素的原子核有半数发生衰变所需的时间，叫这种元素的半衰期。

2. 特点

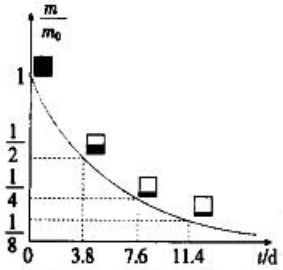
(1)放射性元素衰变的快慢由核内部自身的因素决定，跟原子所处的化学状态和外部条件无关。

(2)衰变不需要条件。

3. 公式

$N_{余}=N_{原}\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{\tau}}$；$m_{余}=m_{原}\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{\tau}}$，$t$ 表示衰变时间，τ 表示半衰期。

4. 图像



氡的衰变，半衰期为 3.8 天。

5. 适用条件

半衰期是一个统计学概念，是对大量原子核衰变规律的总结. 对于几个或者少量的原子核，不能说经过一个半衰期，还剩下半数的原子核未衰变. 例如，不能说 800 个 ${}_{92}^{235}\mathrm{U}$ 经过一个半衰期后还有 400 个 ${}_{92}^{235}\mathrm{U}$ 未衰变.

6. 影响半衰期的因素

放射性元素衰变的快慢是由核内部自身的因素决定的，跟原子所处的化学状态和外部条件（温度、压强等）没有关系.

【注意：同位素的半衰期不一定相同】

7. 衰变次数的计算方法

1. 衰变特点法

由于 β 衰变不改变质量数，首先由质量数的改变确定 α 衰变次数，再由电荷数守恒确定 β 衰变次数。

2. 方程式法

若放射性元素 ${}_{Z}^{A}\mathrm{X}$ 经过 n 次 α 衰变与 m 次 β 衰变，变成稳定新元素 ${}_{Z'}^{A'}\mathrm{Y}$，则有核反应方程

${}_{Z}^{A}\mathrm{X}\rightarrow{}_{Z'}^{A'}\mathrm{Y}+n\,{}_{2}^{4}\mathrm{He}+m\,{}_{-1}^{0}\mathrm{e}$

由电荷数守恒与质量数守恒得

$$\begin{cases}A=A'+4n\\Z=Z'+2n-m\end{cases}$$

即 $n=\frac{A-A'}{4}$，$m=\frac{A-A'}{2}+Z'-Z$（由二元一次方程组可求出）。

三、核反应

1.核反应

(1)定义：原子核在其他粒子的轰击下产生新原子核的过程，称为核反应。

(2)实质：用粒子轰击原子核并非粒子与核碰撞将原子核打开，而是粒子打入原子核内部使核发生了转变。

(3)规律：在核反应中，遵循质量数守恒、电荷数守恒、动量守恒、能量守恒。

(4)重要示例

①1919年，卢瑟福用α粒子轰击氮原子核，产生质子的核反应方程：$^{14}_{7}N + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}H$。

②1932年，查德威克发现中子的核反应方程：

$^{9}_{4}Be + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{12}_{6}C + ^{1}_{0}n$。

③1934年约里奥·居里夫妇发现人工放射性同位素、发现正电子的核反应：

$^{4}_{2}He + ^{27}_{13}Al \rightarrow ^{30}_{15}P + ^{1}_{0}n$

$^{30}_{15}P \rightarrow ^{0}_{1}e + ^{30}_{14}Si$。

四、放射性同位素及其应用

1.放射性同位素分类：有天然放射性同位素（不超过40余种）和人工放射性同位素（已达1000余种）两类，放射性同位素的化学性质相同。

2. 放射性同位素的应用与防护

(1)应用

①在工业上可以用γ射线来探测工件内部裂痕；

②在工业上可以用α射线来消除静电；

③在农业上可以用γ射线照射种子，会使种子的遗传基因发生变异，从而培育出新品种；

④在农业上利用$^{30}_{15}P$作为示踪原子来研究农作物对磷肥的吸收情况.

(2)防护

人类一直生活在放射性的环境中，过量的射线对人体组织有破坏作用，要防止放射性物质对水源、空气、用具等的污染.

(3)防护：防止放射性对人体组织的伤害。

3.人工放射性同位素的优点

①放射强度容易控制；

②可以制成各种所需的形状；

③半衰期很短，废料容易处理.

五、辐射与安全

(1)人类一直生活在放射性的环境中，不过辐射的强度都在安全剂量之内。

(2)过量的射线对人体组织有破坏作用，这些破坏往往是对细胞核的破坏，有时不会马上察觉。因此，在使用放射性同位素时，必须严格遵守操作规程，注意人身安全，同时，要防止放射性物质对空气、水源、用具等的污染。

六、射线的探测

1. 探测射线的理论依据

(1)放射线中的粒子会使气体或液体电离，以这些离子为核心，过饱和蒸气会产生雾滴，过热液体会产生气泡.

(2)放射线中的粒子会使照相乳胶感光.

(3)放射线中的粒子会使荧光物质产生荧光.

2. 探测射线的仪器

(1)威耳逊云室；(2)气泡室；(3)盖革·米勒计数器.

3. 实验现象：轨迹规律

威尔逊云室、气泡室	
α粒子	α粒子显示的径迹：直而粗
β粒子	β粒子显示的径迹：细而弯曲
γ粒子	看不到γ粒子的径迹
盖革·米勒计数器	
无论发生α、β衰变，计数器均产生一次脉冲电压，盖革·米勒计数器无法区分衰变种类	

第3节　核力与结合能

一、核力与四种基本相互作用

1.四种基本作用

	定义	说明
万有引力	相互吸引的作用存在于一切物体之间，强度随距离的增大而减弱	(1)强度与质点间距离为平方反比关系 (2)长程力 (3)将恒星、行星等聚在一起的是万有引力
电磁相互作用	电荷间的相互作用、磁体间的相互作用	(1)强度与粒子间距离为平方反比关系 (2)长程力
强相互作用	存在于原子核内的核子之间，使核子结合成原子核时起作用的力	(1)短程力，作用范围约10^{-15} m (2)相邻核子间才存在强相互作用 (3)强度随核子间距离的增大而急剧减小

弱相互作用力是引起原子核β衰变的原因，即引起中子转变成质子的原因.弱相互作用力也是短程力，其力程比强力更短，为10^{-18} m，作用强度比电磁力小.

【小结】

①弹力和摩擦力属于电磁相互作用

②万有引力、电磁力和核力分别在不同的尺度上发挥作用：在原子核内，核力将核子束缚在一起。在原子核外部，电磁力使电子不脱离原子核，并且使原子结合成分子，分子结合成各种物质；而万有引力主要在宏观世界中起主导作用。

2.核力

①.定义：原子核内把核子紧紧地束缚在一起的力叫核力。

②.特点：

(1)核力是强相互作用(强力)的一种表现。在它的作用范围内，核力比库仑力大得多。

(2)核力是短程力，作用范围约 10^{-15} m。核力在大于 0.8×10^{-15} m 时表现为吸引力，且随距离增大而减小，超过 1.5×10^{-15} m，核力急剧下降几乎消失；而在距离小于 0.8×10^{-15} m 时，核力表现为斥力，因此核子不会融合在一起。

(3)每个核子只跟相邻的核子发生核力作用，这种性质称为核力的饱和性。

（4）核子间存在核力，所以原子核内蕴含着巨大能量。

（5）原子核内除核力外，还有弱相互作用。

3.原子核的稳定问题

①质子与质子间既有核力也有库仑斥力，质子与中子或中子与中子间只有核力；

②随着核子数的增加，核子间的距离也会增加，距离增加，库仑力与核力均下降，但是核力减小得更快，当核力无法平衡库仑力时，原子核将不再稳定；

③由于中子不带电，核子间只有核力，没有库仑力，有助于原子核的稳定，这也是重核里中子数大于质子数的原因. 但是中子数不能无限增长，当中子间的距离大到一定程度时，核力急剧下降，也会不稳定.

二、结合能

1.结合能

定义：使原子核分解成单个核子，克服核力束缚所消耗的能量或使若干个核子结合成原子核时释放的能量.

注意：结合能不是核子结合成原子核而具有的能量，而是把核子分开所需要的能量.

2.比结合能（也叫平均结合能）

(1)概念：原子核的结合能与其核子数之比，称做比结合能。

(2)与原子核稳定性的关系

①比结合能越大，原子核越稳定；比结合能越小，原子核越不稳定.

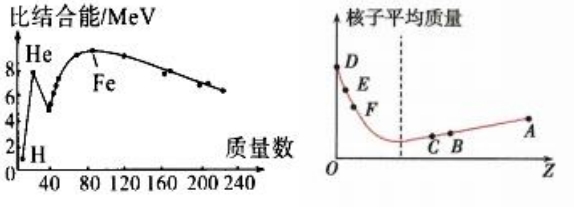
使原子核分解成单个核子消耗的能量越多，表示原子核结合得越紧密，原子核越稳定，即比结合能越大，原子核越稳定.

②比结合能越大，单个核子的质量亏损越大；比结合能越小，核子的质量亏损越小.

③当比结合能较小的原子核转化成比结合能较大的原子核时，就可释放核能。

3.与质量数的关系

如图所示，不同原子核的比结合能不同，图示为按照比结合能的实际测量结果所画的图像. 一般情况下，中等质量的原子核比轻核和重核的比结合能大，其中铁的比结合能最大.



【总结】

1.比结合能越大，原子核越稳定，核子平均质量越小。

2.核子数越多，结合能越大，但比结合能不一定越大。铁核附近最稳定。

3. 反应产物的结合能比反应物的结合能大，故反应产物更稳定。

4. 解释衰变过程中释放能量的现象

$$^{238}_{92}\mathrm{U}\rightarrow{}^{234}_{90}\mathrm{Th}+{}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

解释：衰变后的比结合能增大，单个核子的质量亏损增大，原子核对外界释放能量，释放的能量等于反应前后的总结合能差值.

三、质量亏损

(1)质量亏损

原子核的质量小于组成它的核子的质量之和，这个现象叫质量亏损。

(2)对质量亏损的理解

①物体的质量包括静止质量与运动质量，质量亏损指的是静止质量的减少，减少的静止质量转变成与辐射能量有关的运动质量；

②质量亏损并不是这部分质量消失或转变成能量，只是静止质量减少了；

③核反应中仍然遵守质量守恒和能量守恒定律；

④质量只是物体具有多少能量及能量转变多少的一种度量.

（3）质能方程

原子核释放能量时，要产生质量亏损，物体的能量和质量之间存在着密切的联系。

爱因斯坦质能方程：$E=mc^2$或 $\Delta E=\Delta mc^2$。

（4）对质能方程的理解

①质能方程仅仅表示质量与能量的数学关系，不能说质量转换成能量；

②物质向外辐射能量，质量会出现亏损.

四、核能

（一）定义：核子在结合成原子核时出现质量亏损Δm，释放出对应的能量ΔE＝Δmc²。或原子核分解成核子时要吸收一定的能量，相应的质量增加Δm，需要吸收的能量为ΔE＝Δmc²，叫核能。

（二）核反应遵循的规律：

① 动量守恒：静止的核裂变之后的两个新核动量等大反向；

② 能量守恒：核能（静止时的能量）+动能（运动的能量）=$E_{总}$.

（三）核能的五种计算方法

1.根据质量亏损计算，步骤如下

（1）根据核反应方程，计算核反应前和核反应后的质量亏损 Δm。

（2）根据爱因斯坦质能方程 $E=mc^2$ 或 $\Delta E=\Delta mc^2$ 计算核能。

（3）计算过程中 Δm 的单位是千克，ΔE 的单位是焦耳。

2.利用原子质量单位 u 和电子伏特计算

（1）明确原子质量单位 u 和电子伏特间的关系。由1 u = 1.660 6×10^{-27} kg，1 eV = 1.6×10^{-19} J，得 $E=mc^2$ = 931.5 MeV。

（2）根据 1 原子质量单位（1 u）相当于 931.5 MeV 能量，用核子结合成原子核时质量亏损的原子质量单位数乘以 931.5 MeV，即得$\Delta E=\Delta m\times 931.5$ MeV。

3.利用比结合能来计算核能

原子核的结合能＝核子的比结合能×核子数。核反应中反应前系统内所有原子核的总结合能与反应后生成的所有新核的总结合能之差，就是该次核反应所释放（或吸收）的核能。

【或反应前的结合能+释放的核能之和=反应后原子核的结合能】

4.根据能量守恒和动量守恒来计算核能

参与核反应的粒子所组成的系统，在核反应过程中的动量和能量是守恒的，因此，在题给的条件中没有涉及质量亏损，或者核反应所释放的核能全部转化为生成的新粒子的动能而无光子辐射的情况下，根据动量和能量的守恒可以计算出核能的变化。

5.应用阿伏加德罗常数计算核能

若要计算具有宏观质量的物质中所有原子核都发生核反应所放出的总能量，应用阿伏加德罗常数计算核能较为简便。

第 4 节　核裂变与核聚变

一、核裂变的发现

1. 核裂变

重核被中子轰击后分裂成两个质量差不多的新原子核，并放出核能的过程叫作核裂变.

2. 铀核裂变

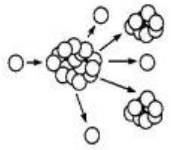
用中子轰击铀核时，铀核发生裂变，其产物是多种多样的，其中两种典型的反应如下：

$^{235}_{92}U+^{1}_{0}n\longrightarrow^{144}_{56}Ba+^{89}_{36}Kr+3^{1}_{0}n$；

$^{235}_{92}U+^{1}_{0}n\longrightarrow^{136}_{54}Xe+^{90}_{38}Sr+10^{1}_{0}n$，

3. 链式反应

当一个中子引起一个铀核裂变后，裂变释放的中子再引起其他铀核裂变，且能不断持续反应下去，这种反应叫核裂变的链式反应.



4. 链式反应的条件

（1）发生裂变物质的体积大于等于临界体积.

（2）有足够浓度的铀 235.

（3）有足够数量的慢中子.

5. 重核裂变的实质

重核裂变是中子轰击质量数较大的原子核，使重核分解为两个中等质量的原子核，反应前后出现质量亏损，释放大量能量，放出更多中子的过程.

重核裂变是放能核反应，重核分解为两个中等质量核的过程中要释放能量，而且释放的能量远大于它俘获中子时得到的能量.

二、反应堆与核电站

(1)反应堆构造：核燃料、减速剂、镉棒、防护层。

①核燃料：天然铀或浓缩铀（铀 235 占 2%-4%）

②减速剂：铀 235 容易俘获慢中子，不易俘获快中子，因此需要慢化剂（石墨、重水、普通水（也叫轻水）使裂变产生的快中子变为慢中子。

③镉棒：调节中子数目以控制反应速度。当反应过于激烈时，将镉棒插入深一些，让它多吸收一些中子。反之，可释放更多中子。

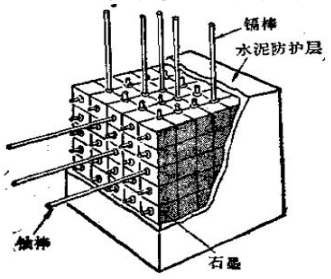


图 9-14　原子反应堆示意图

(2)工作原理

核燃料裂变释放的能量，使反应区温度升高.

(3)能量输出

利用水或液态的金属钠等流体在反应堆内外循环流动，把反应堆内的热量传输出去，用于发电.

【注意】核反应堆是把核能转化为热能再转化为电能，而不是把核能直接转化为电能。

(4)核污染的处理

在反应堆的外面需要修建很厚的水泥层，用来屏蔽裂变反应放出的各种射线，核废料具有很强的放射性，需要装入特制的容器，深埋地下或海底.

(5)裂变的应用

原子弹、核反应堆。

四、核聚变

1.核聚变

(1)定义：两个轻核结合成质量较大的核的反应过程。轻核聚变反应必须在高温下（克服库仑力使核达到反应距离）进行，因此又叫热核反应。

(2)典型的聚变反应方程：

$^{2}_{1}H+^{3}_{1}H\rightarrow^{4}_{2}He+^{1}_{0}n+17.6\ MeV$

2. 核聚变的条件

(1)轻核的距离要达到 10^{-15} m 以内.

(2)需要加热到很高的温度，又叫热核反应.

3. 氢弹原理

首先由普通炸药引爆原子弹，再由原子弹爆炸产生的高温、高压引发热核爆炸.

4. 核聚变的应用

(1)氢弹.

(2)热核反应在宇宙中时时刻刻地进行着，太阳就是一个巨大的热核反应堆.

5. 核聚变的优缺点

(1)核裂变比核聚变的能效低，相同质量的核燃料，聚变产生的能量比核裂变产生的能量更多.

(2)地球上核聚变的材料氘核容易获得，每升水中约含有 0.03 g 氘核.

(3)轻核聚变更加安全、清洁.

(4)核聚变很难人工控制，除了制造氢弹，现实中无法实际应用，难点在于无法找到可以承受核聚变高温的容器.

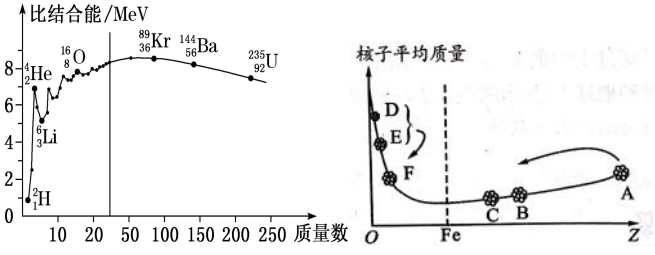
（6）实现核聚变的难点：控制方法

①磁约束：利用强磁场来约束参加反应的物质。目前性能最好的磁约束装置是环流器。

②惯性约束：利用强激光的惯性压力约束参加反应的物质。

7.为什么轻核聚变和重核裂变都会释放能量

（1）可以从核子的平均结合能上看



从图中可以看出，铁的平均结合能最大，也就是核子结合成铁或铁附近的原子核时，每个核子平均放出的能量大。因此，两个比铁轻的原子核结合时，或比铁重的重核分裂时，都要放出能量。

（2）也可以根据核子的平均质量图分析：由图可知，铁原子核的平均质量最小，如果原子序数较大的 A 裂变成 B 或 C，或者原子序数较小的 D 和 E 结合成 F 核，都会有质量亏损，故要放出能量。

第二部分 方法、规律与技巧

1.核反应的四种类型

类　型		可控性	核反应方程典例	
衰变	α衰变	自发	$^{238}_{92}U\longrightarrow^{234}_{90}Th+^{4}_{2}He$	
	β衰变	自发	$^{234}_{90}Th\longrightarrow^{234}_{91}Pa+^{0}_{-1}e$	
人工转变		人工控制	$^{14}_{7}N+^{4}_{2}He\longrightarrow^{17}_{8}O+^{1}_{1}H$（卢瑟福发现质子）	
			$^{4}_{2}He+^{9}_{4}Be\longrightarrow^{12}_{6}C+^{1}_{0}n$（查德威克发现中子）	
			$^{27}_{13}Al+^{4}_{2}He\longrightarrow^{30}_{15}P+^{1}_{0}n$	约里奥·居里夫妇发现放射性同位素，同时发现正电子
			$^{30}_{15}P\longrightarrow^{30}_{14}Si+^{0}_{+1}e$	
重核裂变		比较容易进行人工控制	$^{235}_{92}U+^{1}_{0}n\longrightarrow^{144}_{56}Ba+^{89}_{36}Kr+3^{1}_{0}n$	
			$^{235}_{92}U+^{1}_{0}n\longrightarrow^{136}_{54}Xe+^{90}_{38}Sr+10^{1}_{0}n$	
轻核聚变		很难控制	$^{2}_{1}H+^{3}_{1}H\longrightarrow^{4}_{2}He+^{1}_{0}n$	

2.书写核反应方程时应注意

（1）必须遵守电荷数守恒、质量数守恒规律。

（2）核反应方程中的箭头（→）表示核反应进行的方向，不能把箭头写成等号。

3.物理与医疗、生活

①胸透视-----x 射线

②B 超----声波的反射

③彩超----多普勒效应

④CT-----X 射线，r 射线

⑤核磁共振---氢原子核共振

⑥微波炉----水分子共振

⑦电磁炉----电磁感应现象

⑧电子显微镜分辨率为 0.2nm,光学显微镜分辨率为 200nm

（波长越短分辨率越高，故相同速度的质子和电子显微镜，质子显微镜分辨率更高$\lambda=\frac{h}{p}$）

第 5 节 “基本”粒子

一、发现新粒子

(1)反粒子:质量、寿命、自旋等物理性质与相对应的粒子相同，而电荷等其他性质相反。如质子的反粒子是反质子，它的电荷量与质子相同，但带的是负电荷。

(2)μ 子:比质子的质量小。

(3)K 介子与 π 介子:质量介于电子与质子之间。

(4)超子:质量比质子大很多。

二、粒子的分类

粒子的分类	概念	实例
强子	参与强相互作用的粒子	质子、中子
轻子	不参与强相互作用的粒子	电子、电子中微子、μ子、μ子中微子以及τ子和τ子中微子
规范玻色子	传递各种相互作用的粒子	光子、中间玻色子(W和Z玻色子)、胶子
希格斯玻色子	希格斯场的量子激发	基本粒子因与希格斯场耦合而获得质量

三、宇宙的演化进程

(1)宇宙演化过程的方框图

大爆炸 ⟶ 夸克、轻子、胶子等粒子 ⟶ 强子时代 ⟶ 轻子时代 ⟶ 核合成时代 ⟶ 电子与质子复合成氢原子 ⟶ 形成恒星和星系

(2)恒星演化过程的方框图

宇宙尘埃 ⟶ 星云团 ⟶ 恒星诞生 ⟶ 氢核聚合成氦核 ⟶ 氦核聚合成碳核 ⟶ 其他聚变过程 ⟶ 无聚变反应,形成白矮星或中子星或黑洞

【记忆口诀】

原子核，能改变，α β两衰变。
α粒子是氦核，β射线是电子流。
γ光子不单有，伴随衰变而出现。
铀核分开是裂变，中子撞击是条件。
裂变可造原子弹，还可用它来发电。
质量亏损放能量，反应过程需两剂。
轻核聚合是聚变，温度极高是条件。
聚变可以造氢弹，还是太阳能量源;
和平利用前景好，可惜至今未实现。

【本章高频考点】

1.衰变现象。2.核反应、核能的计算。

第三部分 易错、疑难问题选

1. 中子n、质子p、氘核D的静止质量分别为m_n、m_p、m_D，现用光子能量为E的γ射线照射静止氘核D使之分解，其反应方程为γ+D⟶p+n.若分解后中子、质子的动能可视为相等，则中子的动能是 ( )

A. $\frac{1}{2}[(m_D-m_p-m_n)c^2+E]$

B. $\frac{1}{2}[(m_p-m_n-m_D)c^2+E]$

C. $\frac{1}{2}[(m_D-m_p-m_n)c^2-E]$

D. $\frac{1}{2}[(m_p+m_n-m_D)c^2-E]$

【答案】A

2. 2020年12月4日，新一代"人造太阳"装置—中国环流器二号M装置（HL-2M）在成都建成并实现首次放电，HL-2M反应堆的成功对于全世界而言都有重大研究意义，它意味着中国能够掌握利用核聚变技术发电。氘核聚变反应的方程为：${}_1^2\mathrm{H}+{}_1^2\mathrm{H}\rightarrow x+{}_0^1\mathrm{n}$。已知氘核的比结合能为$E$。核反应中释放的核能为$\Delta E$，核反应中发射一种γ光子，该γ光子照射到逸出功为$W_0$的金属上打出的最大初动能的光电子的速度为$v$。已知光电子的质量为$m$，光速为$c$，普朗克常量为$h$。下列说法正确的是

A. 裂变反应比聚变反应更难控制

B. x的比结合能为$\frac{4}{3}E+\frac{\Delta E}{3}$

C. 光电子的德布罗意波长为$\frac{h}{mc}$

D. γ光子的频率为$\frac{mv^2+2W_0}{2h}$



第15题图

【答案】BD

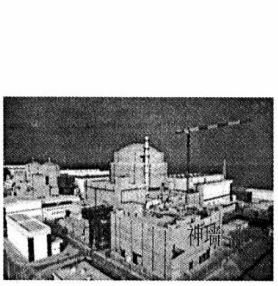
3. 2020年11月27日00时41分，华龙一号全球首堆中核集团福清核电5号机组首次并网成功。如图所示是原子核的比结合能与质量数的关系图，下列说法正确的是：

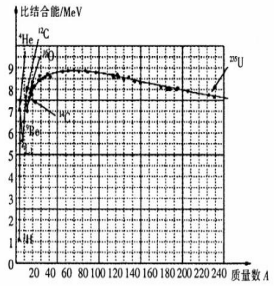
A. 核反应中，质量数守恒，电荷数守恒

B. 华龙一号的原理是热核反应

C. 原子核结合能越大，原子核越稳定

D. 核裂变反应发生后，核子的平均质量减小





【答案】AD

4. 铀原子核既可发生衰变，也可发生裂变。其衰变方程为 ${}_{92}^{238}\mathrm{U}\rightarrow{}_{90}^{234}\mathrm{Th}+\mathrm{X}$，裂变方程为 ${}_{92}^{235}\mathrm{U}+{}_0^1\mathrm{n}\rightarrow\mathrm{Y}+{}_{36}^{89}\mathrm{Kr}+3{}_0^1\mathrm{n}$，其中${}_{92}^{235}\mathrm{U}$、${}_0^1\mathrm{n}$、Y、${}_{36}^{89}\mathrm{Kr}$的质量分别为$m_1$、$m_2$、$m_3$、$m_4$，光在真空中的传播速度为$c$。下列叙述正确的是

A. Y的核内共有144个核子

B. ${}_{92}^{238}\mathrm{U}$发生的衰变产生的X，能够轻易的穿过纸片

C. 裂变时释放的能量为$(m_1+2m_2-m_3-m_4)c^2$

D. 一个在匀强磁场中静止的${}_{92}^{238}\mathrm{U}$发生衰变产生的${}_{90}^{234}\mathrm{Th}$与X动能之比为117:1

【答案】A

5. 太阳现正处于主序星演化阶段，它主要是由电子和${}_1^1\mathrm{H}$、${}_2^4\mathrm{He}$组成。维持太阳辐射的是它内部的核聚变反应，核反应方程是$2x+4{}_1^1\mathrm{H}\rightarrow{}_2^4\mathrm{He}+$释放的核能ΔE，这些核能最后转化为辐射能，根据目前关于恒星演化的理论，若由于聚变反应而使太阳中的${}_1^1\mathrm{H}$核数目从现有数减少10%，太阳将离开主序星阶段而转入红巨星的演化阶段。为了简化，假定目前太阳全部由电子和${}_1^1\mathrm{H}$核组成。已知质子质量$m_p=1.6726\times10^{-27}$kg，${}_2^4\mathrm{He}$质量$m_\alpha=6.6458\times10^{-27}$kg，电子质量$m_e=0.9\times10^{-30}$kg，光速$c=3\times10^8$m/s，太阳质量$M=2\times10^{30}$kg，太阳辐射功率为$P=4\times10^{26}$w，普朗克常量$h=6.63\times10^{-34}$J. s。下列结论正确的是

A. 核反应中的x是电子

B. 释放的核能ΔE约为4.2×10^{-12}J

C. 若释放的核能全由波长为300nm的光子组成，一次核反应释放出的光子数约为6.3×10^8个

D. 太阳继续保持在主序星阶段的时间约为10^{10}年

【答案】ABD

6. 某天然放射性元素，其原子核A连续经过3次α衰变，生成原子核B.已知原子核A的比结合能为E_1，质量数为m，原子核B的比结合能为E_2，α粒子的比结合能为E_3，不计反应前后各原子核的动能，每次衰变均以γ光子向外辐射能量.则下列说法正确的是 ( )

A. 原子核B在元素周期表的位置比原子核A前移6位

B. 原子核B的比结合能大于原子核A的比结合能

C. 释放出 γ 光子的总能量为 $12E_3+(m-12)E_2-mE_1$

D. 每次衰变都遵循电荷守恒和质量守恒

【答案】ABC

7. 中子衰变后转化成质子和电子，同时放出质量可视为零的反中微子，其核反应方程为 ${}_0^1n\rightarrow{}_1^1p+{}_{-1}^0e+\bar{\nu}_e$ 已知：中子质量 m_n=939.57MeV/c^2，质子质量 m_p=938.27MeV/c^2，电子质量 m_e=0.51MeV/c^2，c 为光速，不考虑粒子之间的相互作用，不考虑中子的初动能。若质子的动量 $p=3\times10^{-8}$MeV·s·m^{-1}。以下说法正确的是

A. 核反应产物中子、质子、中微子总动量为零

B. 质子的动能为 0.043 MeV

C. 电子和反中微子的总动能为 0.747 MeV

D. 电子和反中微子的总动能为 0.833 MeV

【答案】BC

8. 某天然放射性元素，其原子核 A 连续经过 3 次 α 衰变，生成原子核 B。已知原子核 A 的比结合能为 E_1，质量数为 m，原子核 B 的比结合能为 E_2，α 粒子的比结合能为 E_3，不计反应前后各原子核的动能，每次衰变均以 γ 光子向外辐射能量。则下列说法正确的是：

A. B 核在元素周期表的位置比 A 核前移 6 位

B. 原子核 B 的比结合能大于原子核 A 的比结合能

C. 释放出 γ 光子的总能量为 $12E_3+(m-12)E_2-mE_1$

D. 各次衰变都遵循电荷守恒和质量守恒

【答案】ABC

9. “快堆”中的钚 239 裂变释放出快中子，反应区周围的铀 238 吸收快中子后变成铀 239，铀 239 很不稳定，经过两次 β 衰变后变成钚 239，从而实现钚燃料的“增殖”。某 5kg 的钚 239 核燃料，每秒钟约有 1.1×10^{13} 个钚 239 发生自然衰变，放出 α 粒子，已知钚 239 原子的 α 衰变质量亏损了 0.0057u。已知 1u 相当于 931.5MeV 的能量，α 粒子的在核燃料中减速会释放出热能，下列说法正确的是

A. 铀 239 两次 β 衰变后，比结合能减小

B. 原子核衰变时，动量守恒，机械能不守恒

C. 原子核衰变时释放的 α 射线比 β 射线穿透能力更强

D. 假设衰变释放的能量最终变成内能，该 5kg 的钚 239 核燃料的发热功率约为 10W

【答案】BD

10. 由于太阳温度足够高，所有的原子均电离成了原子核和电子，因此太阳是理想的热等离子球体。太阳用核聚变的方式向太空辐射能量，通过光谱分析知太阳的主要成分是氢，涉及氢的核聚变反应式为 $4{}_1^1H\rightarrow{}_2^4He+2{}_1^0e+2\nu_e$，所有产生的正电子将会与太阳中的电子发生湮灭。已知电子质量 $m_e=0.51\ \text{MeV}/c^2$，质子质量 $m_H=938.3\ \text{MeV}/c^2$，${}_2^4He$ 核质量 $m_{He}=3\ 727.5\ \text{MeV}/c^2$，中微子 ν_e 的质量和电荷量可不计，下列说法中正确的是

（　　）

A. 正电子与电子湮灭方程一定是 ${}_1^0e+{}_{-1}^0e\rightarrow\gamma$，其中 γ 是光子

B. 氢的核聚变反应释放的核能约为 4×10^{-12} J

C. 平均每个质子产生的太阳辐射能最多为 6.17 MeV

D. 上述核反应元素在地球上储量丰富，人类已经掌握和平利用聚变核能的技术

【答案】B

11. 2020 年 12 月 4 日，新一代“人造太阳”装置——中国环流器二号 M 装置（HL－2M）在成都建成并实现首次放电，该装置是中国目前规模最大、参数最高的先进托卡马克装置，是中国新一代先进磁约束核聚变实验研究装置. 我国重大科学工程“人造太阳”主要是将氘核聚变反应释放的能量用来发电. 氘核聚变反应的方程为 ${}_1^2H+{}_1^2H\longrightarrow x+{}_0^1n$. 已知氘核的质量为 m_1，比结合能为 E，中子的质量为 m_2，反应中释放的核能为 ΔE，光速为 c，下列说法正确的是（　　）

A. 要使该聚变反应发生，必须克服两氘核间巨大的库仑斥力

B. 反应产物 x 为 ${}_2^4He$

C. x 核的质量为 $\frac{\Delta E}{c^2}+m_2-2m_1$

D. x 的比结合能为 $\frac{4}{3}E+\frac{\Delta E}{3}$

【答案】AD

12. 铀原子核既可发生衰变，也可发生裂变. 其衰变方程为 ${}_{92}^{238}U\longrightarrow{}_{90}^{234}Th+X$，裂变方程为 ${}_{92}^{235}U+{}_0^1n\longrightarrow Y+{}_{36}^{89}Kr+3{}_0^1n$，其中 ${}_{92}^{235}U$、${}_0^1n$、Y、${}_{36}^{89}Kr$ 的质量分别为 m_1、m_2、m_3、m_4，光在真空中的传播速度为 c. 下列叙述正确的是（　　）

A. Y 的核内共有 144 个核子

B. ${}_{92}^{238}U$ 发生的衰变产生的 X，能够轻易地穿过纸片

C. 裂变时释放的能量为 $(m_1+2m_2-m_3-m_4)c^2$

D. 一个在匀强磁场中静止的 ${}_{92}^{238}U$ 发生衰变产生的 ${}_{90}^{234}Th$ 与 X 动能之比为 117∶1

答案：AC

13. 在匀强磁场中，静止的钚的放射性同位素 ${}_{94}^{239}Pu$ 衰变为铀核 ${}_{92}^{235}U$，并放出 α 粒子，已知 ${}_{94}^{239}Pu$、${}_{92}^{235}U$ 和 α 粒子的质量分别为 m_{Pu}、m_U 和 m_α，衰变放出的光子的动量和能量均忽略不计，α 粒子的运动方向与磁场相垂直，则

A. α 粒子的动能为 $(m_{Pu}-m_U-m_\alpha)c^2$

B. α 粒子的动量为 $\sqrt{\frac{2m_\alpha^2(m_{Pu}-m_U-m_\alpha)c^2}{m_\alpha+m_U}}$

C. ${}_{92}^{235}U$ 与 α 粒子在磁场中的运动半径之比约为 4∶235

D. ${}_{92}^{235}U$ 与 α 粒子在磁场中的周期之比约为 1.3∶1

【答案】D

14. 在磁感应强度为 B 的均匀磁场内放置一极薄的金属片，其极限波长为 λ_0（波长为 λ_0 的入射光恰能产生光电效应），今用频率为 ν 的弱单色光照射，发现没有电子放出。实验证明：在采用相同频率 ν 的强激光照射下，电子能吸收多个光子，也能产生光电效应，释放出的电子（质量为 m，电荷量的绝对值为 e）能在垂直于磁场的平面内做圆周运动，最大半径为 R，则

A. 遏止电压为 $\frac{eB^2R^2}{2m}$

B. 此照射光光子的能量可能为 $\frac{hc}{2\lambda_0}+\frac{(eRB)^2}{4m}$

C. 放出电子的最大动量为 $\frac{h\nu}{c}+\frac{h}{\lambda_0}$

D. 单色光光子的动量可能为 $\frac{h}{3\lambda_0}+\frac{(eBR)^2}{6mc}$

【答案】 ABD

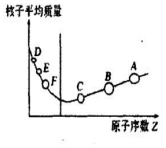
15. 关于原子结构和核反应的说法中正确的是（　　）

A. 卢瑟福在 α 粒子散射实验的基础上提出了原子的核式结构模型

B. 发现中子的核反应方程是 ${}_4^9Be+{}_2^4He\rightarrow{}_6^{12}C+{}_0^1n$

C. 2000 个 ${}_{92}^{238}U$ 的原子核经过两个半衰期后剩下 500 个 ${}_{92}^{238}U$

D. 据图可知，原子核 D 和 E 聚变成原子核 F 要吸收能量



【答案】AB

第二部分 高中物理易错易混概念及模型

（1）位移和路程的联系与区别

【位移为矢量，路程是标量，当物体作单向直线运动时，位移大小等于路程】

（2）矢量和标量的区别

【1.高中物理学中涉及的矢量：速度、位移、加速度、重力加速度、力、线速度、角速度、向心加速度、向心力、电场力、库伦力、电场强度、磁感应强度、安培力、洛伦兹力、动量、冲量、回复力、波速。

2.高中物理学中涉及的标量：时间、路程、周期、转速、频率、功、功率、重力势能、弹性势能、动能、机械能、电势、电势差、电势能、电容、电量、电动势、电压、电阻、电流、电功率、电热、热功率、磁通量、感应电动势、自感系数、折射率、能级（差）、（比）结合能。

3.物理量前正负号的含义：

【 ①对于矢量：其正负号表示方向，比较其大小应比较其绝对值。

②对于标量：其正负号一般表示其大小，比较其大小应比较其实际值。如电势、电势能、重力势能、温度、高度、重力势能均表示大小。

③但要特别注意以下几个标量：

1.磁通量前的正负号既不表示大小又不表示方向。

2.功有正负之分，比较功的大小应比较其绝对值。

3.电流是标量，但有方向。】

（3）x －t 图与 v－t 图

（4）平均速度＝$\frac{位移}{时间}$与平均速率＝$\frac{路程}{时间}$

（5）全程区间限速与全程区间测速

（6）电磁打点计时器与电火花计时器

（7）平均速度和瞬时速度

（8）速度变化率与速度变化量

（9）极限法与微元法

（10）计时点与计数点

（11）中点位置的瞬时速度与中间时刻的瞬时速度

（12）竖直上抛与自由落体运动

（13）伽利略斜面实验与理想斜面实验

（14）力的图示和示意图

（15）垂直向下与竖直向下

（16）轻绳、轻弹簧与轻杆的弹力方向

（17）自由杆与固定杆的弹力方向

（18）滑动摩擦力与静摩擦力的区别

（19）最大静摩擦力与滑动摩擦力

（20）骑车与推车的摩擦力方向分析

（21）作用力和反作用力与二力平衡的区别

（22）效果力与性质力

（23）轻绳与重绳的弹力方向

（24）“静止”和“v＝0”

（25）“活结”与“死结”模型

（26）“活杆”与“死杆”模型

（27）“缓慢”与“匀速”

（28）动态平衡问题中的图解法与相似法

（29）整体法与隔离法

（30）惯性定律与惯性

（31）牛顿第二定律实验研究方法：控制变量法、图像法、“化曲为直”法

（32）“重盘”与“轻盘”

（33）惯性系与非惯性系

（34）刚性绳模型(细钢丝、细线、轻杆等)弹力可以突变。)轻弹簧模型(轻弹簧、橡皮绳、弹性绳等)弹力的大小不能突变。

（35）基本单位与导出单位

（36）1，求加 F 的压力与加 Mg 的物体的加速度

2，求施加 F=mg 的拉力与悬挂 mg 的物体 A 的加速度

（35）等时圆模型【轨道光滑】与等高的斜面及同底的斜面模型。

（36）斜面模型

（37）滑块--滑板类模型

（38）传送带模型

（39）超重与失重

（40）实重与视（示）重

（41）小船渡河与绳子末端速度问题

（42）平抛运动中速度和位移与水平方向的夹角关系

（43）平抛运动‘落在斜面’与‘撞在斜面’上的区分

（44）匀速圆周运动与非匀速圆周运动得区别

（45）竖直平面内圆周运动中的轻绳与轻杆模型

（46）汽（火）车拐弯平面

（47）开普勒行星运动三大定律

（48）重力与万有引力的区别

（49）三种宇宙速度

（50）近地卫星，同步卫星与赤道上的物体问题

（51）卫星的变轨

（52）双星与三（多）星问题

（53）恒力与变力做功的求法

（54）平均功率与瞬时功率

（55）机车以恒定功率与恒定加速度启动

（56）动能定理与机械能守恒定律的区别

（57）系统机械能守恒定律

（58）各力做功与能量转化关系

（59）一对静摩擦力，一对滑动摩擦力，一对作用力与反作用力的做功关系

（60）滑动摩擦力做功与摩擦生热的区别

(61)三种起电方式的区别

(62)元电荷与质子电子的区别，检验电荷（试探电荷）、场源电荷、点电荷的区别

(63)场强的三个公式的区别

(64)电场线与等势面的区别

(65)电势、电势差、电势能的区别与联系

(66)静电平衡、静电屏蔽、尖端放电、避雷针等静电现象

(67)电容器电容的两个公式，两类基本问题。

(68)验电器与静电计

(69)带电粒子在电场中的加速和偏转

(70)等效重力和等效场问题

(71)电动势和电势差

(72)线性元件与非线性元件

(73)滑动变阻器分压式和限流式接法

(74)电压表与电流表的改装

(75)纯电阻电路与非纯电阻电路

(76)测电阻的常用方法：伏安法、安安法、伏伏法、半偏法、等效替代法、电桥法。

(77)游标卡尺与螺旋测微器

(78)欧姆表与电压表、电流表

(79)闭合电路的总功率、输出功率、热功率、效率

(80)电路的动态分析方法及含电容器电路

(81)测电源电动势和内阻的三种方法及数据处理技巧

(82)磁感线与电场线的区别

(83)左手定则与右手定则

(84)电偏转与磁偏转

(85)安培力与洛伦兹力

(86)各种有界磁场（直线、圆形、三角形、四边形、环形）的基本规律

(87)多粒子与单粒子的运动

(88)磁发散与磁聚焦模型

(89)最小面积问题的求法

(90)磁场的应用模型（回旋加速器、质谱仪、速度选择器、磁流体发电机、电磁流量计、霍尔效应、电磁天平、电磁泵等）

(91) 电生磁与磁生电

(92) 感生电动势与动生电动势

(93) 法拉第电磁感应定律中求电动势的四个公式
(94) 自感与互感、涡流、电磁阻尼、电磁驱动
(95) 双杆滑动的稳定条件
(96) 电容器的充电、放电及蓄能问题
（97）等效思想解决电磁感应综合问题
（98）线圈切割问题
（99）磁场、导体棒（线圈）相对运动问题
（100）导体棒在磁场的简谐运动问题
（101）电磁感应中的求电量问题
（102）电磁感应中的求导和积分问题
（104）中性面与峰值面
（105）交流电的“四值”
（106）电感和电容对交流电的影响
（107）理想变压器的理想条件及工作规律
（108）变压器的分类及动态分析
（109）电压互感器与电流互感器
（110）远距离输电的“三个回路”及相互关系
（111）变压器中的等效电路问题
（112）振动图像与波动图像
（113）弹簧振子与单摆
（114）纵波与横波
（115)波速与振动速度
(116)波速、频率、波长的决定因素
(117)波的干涉、衍射、多普勒效应
(118)光疏与光密介质
(119)光的干涉、衍射、偏振现象
(120)增透膜、增反膜、偏振片。
(121)麦克斯韦电磁场理论
(122)LC 振荡回路及周期公式
(123)电磁波的发射（调制、调谐、检波）
(124)电磁波谱及产生机理
(125)碰撞规律及分类
(126)平均动量守恒（人船模型、子弹打木块模型）
（100）黑体辐射规律
（101）遏止电压、逸出功、最大初动能、饱和电流
（102）跃迁与电离、光子与电子、一个和一群光子
（103）衰变与人工核反应
（104）裂变与聚变
（105）结合能与比结合能
（106）减速剂与控制棒
（107）质能方程与核能释放
（108）α 和 β 衰变的本质及在磁场中的轨迹特点
（109）分子两大模型
（110）布朗运动与扩散、热运动
（111）分子动能和分子势能
（112）分子力和分子势能图
（113）气体压强的计算
（114）理想气体的实验定律
（115）晶体和非晶体
（116）浸润和不浸润、毛细现象
（117）热力学第一定律、第二定律、第三定律
（118）气体方程和图像互换

第三部分　精读教材，不放过每一个细节

1.在物理学中，突出问题的主要 方面，忽略次要因素，建立理想化的 “物理模型”，并将其作为研究对象，是经常采用的一种科学研究方法.足球运动中常说的“香蕉球”是球在空中旋转、整体运动径迹为类似香蕉型弧线的一种运动。

2,在国际单位制中,速度的单位是米每秒,符号是 m/s 或 $m \cdot s^{-1}$。常用的单位还有千米每时（km/h 或 $km \cdot h^{-1}$ ）、厘米每秒（cm/s 或 $cm \cdot s^{-1}$ ）等。

3,在以后的叙述中，“速度”一词有时指平均速度，有时指瞬时速度，有时是指速率，要根据上下文判断.车速度计不能显示车辆运动的方向，它的读数实际是汽车的速率。

4.打点计时器只能连续工作很短时间，打点之后要立即关闭电源。电火花计时器纸带运动时受到的阻力比较小，实验误差也就比较小。

5.在作曲线“拟合”坐标系中的点时，要注意“顺势”“平滑”。如果有些点难以落在曲线上，应该使它们大致均匀地分布在曲线两侧。

6.变化率表示变化的快慢，不表示变化的大小。

7.世界上第一条商业运行的磁浮列车——“上海磁浮”，已于 2003 年 10 月 1 日正式运营。

8.一般应该先用字母代表物理量进行运算，得出用已知量表达未知量的关系式，然后再 把数值代入式中，求出未知量的值。这样做能够清楚地看出未知量与已知量的关系，计算也比较简便。

9.常见的弹力、摩擦力是由电磁力引起的。流体的阻力跟物体相对于流体的速度有关，速度越大，阻力越大。雨滴在空气中下落，速度越来越大，所受空气阻力也越来越大。当阻力增加到跟雨滴所受的重力相等时，二力平衡，雨滴匀速下落.流体的阻力还跟物体的横截面积有关，横截面积越大，阻力越大.流体的阻力还跟物体的形状有关系。

10.原子核紧密地保持在一起。这种作用称做强相互作用。在放射现象中起作用的还有另一种基本相互作用，称为弱相互用。弱相互作用的作用范围也很小，与强相互作用相同，但强度只有强相互作用的 10^{-12} 倍。

11.轮胎表面都有花纹状的沟槽。雨天，沟槽能把轮胎与地面间的水排出，保持两者的良好接触以产生足够的摩擦力。

12.流体的阻力跟物体相对于流体的速度有关,还跟物体的横截面积有关，物体的形状有关系

13.力的合成的平行四边形定则，只适用于共点力。

14.在有些参考系中，不受力的物体会保持静止或匀速直线运动的状态，这样的参考系叫做惯性参考系，简称惯性系。以加速运动的火车为参考系，牛顿第一定律并不成立，这样的参考系叫做非惯性系。早在 1916 年，爱因斯坦就根据他的广义相对论认为应该存在引力波。

15.运算中应该尽量使用代表物理量的字母，必要时再把已知量的数值代入

16.测量值跟被测物理量的真实值之间总会有差异,这种差异叫做误差。由偶然因素造成的，叫做偶然误差。可以用取平均值的方法来减小偶然误差系统误差是由仪器结构缺陷、实验方法不完善造成的。绝对误差＝测量值-真实值。

相对误差＝ 绝对误差/测量值。这种带有一位不可靠数字的近似数字叫做有效数字。为了正确表述有效数字，特别大或特别小的数字都要用科学记数法，中学阶段不做要求，运算结果一般取两位或三位有效数字就可以了。

17.弧度不是通常意义上的单位，所以，带单位计算时，不要把“rad”或“弧度” 代到算式中。这时角速度的单位应该写为 s-1。

18.有人把航天器失重的原因说成是它离地球太远，从而摆脱了地球引力，这是错误的。正是由于地球引力的存在，才使航天器连同其中的乘员有可能做环绕地球的圆周运动。

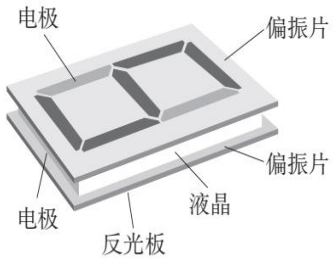
19.在炼钢厂中，把熔化的钢水浇入圆柱形模子，模子沿圆柱的中心轴线高速旋转，钢水由于离心运动趋于周壁，冷却后就形成无缝钢管。水泥管道和水泥电线杆的制造也可采用这种离心制管技术。

20.开普勒关于行星运动的描述为万有引力定律的发现奠定了基础。
21.人类对行星运动规律的认识 ：1.托勒密：地心宇宙。2.哥白尼：日心说。3.第谷·布拉赫：天才的观测家 4.开普勒：真理超出期望 ，
22.月—地检验 假定维持月球绕地球运动的力与使得苹果下落的力真的是同一种力，同样遵从“平方反比”的规律；物体在月球轨道上运动时的加速度（月球公转的向心加速 度）也就应该是它在地面附近下落时的加速度（自由落体加速度）的 $\frac{1}{60^2}$
23.德国的伽勒在勒维耶预言的位置附近发现了海王-----“笔尖下发现的行星”
24.2003 年 10 月中国第一位航天员杨利伟入太空。为我国航天事业作出特殊贡献的科学家钱学森被誉为“中国航天之父”.
25.第一宇宙速度又叫作环绕速度，第二宇宙速度又叫作逃逸速度。理论分析表明，逃逸速度是环绕速度的$\sqrt{2}$ 倍，即 V=$\sqrt{\frac{2GM}{R}}$ 。这个关系对于其他天体也是正确的。由此可知，天体的质量 m 越大，半径 R 越小，逃逸速度也就越大，也就是说，其表面的物体就越不容易脱离它的束缚.

26.经典力学有它的适用范围：只适用于低速运动，不适用于高速运动；只适用于宏观世界，不适用于微观世界。
27.任何形式的势能，都是物体系统由于其中各物体之间，或物体内的各部分之间存在相互作用（力）而具有的能，是由各物体的相对位置决定的。例如，分子之间由于存在相互作用而具有势能，叫做分子势能，由分子间的相对位置决定；电荷之间由于存在相互作用而具有势能，叫做电势能，由电荷间相对位置决定。分子势能或电势能分别属于分子或电荷组成的系统，
28.科学家们一直在关注自然现象之间的普遍联系
……
1801 年 戴维发现电流的化学效应(电和化学的联系)
1820 年 奥斯特发现电流的磁效应(电和磁的联系)
1821 年 塞贝克发现温差电现象(热和电的联系)
1831 年 法拉第发现电磁感应现象(电和磁的联系)
1840 年 焦耳发现电流的热效应(电和热的联系)
1842 年迈尔表述了能量守恒定律，并计算出热功当量的数值(力和热的联系)
1843 年 焦耳测定了热功当量的数值(力和热的联系)
1847 年 亥姆霍兹在理论上概括和总结能量守恒定律
29.静电现象在技术中有很多应用，其物理原理大多基于静电力的作用。例如，静电喷漆时使被喷的金属件与油漆雾滴带相反的电荷，这样能使漆与金属表面结合得更牢固，而且金属表面凹陷部位也能均匀着漆。又如，静电植绒是使绒丝在静电力的作用下扎入布基的纤维中，使绒丝均匀、牢固地植入。复印机应用了静电吸附的原理。
30.电场以及磁场已被证明是一种客观存在，并且是互相联系的，统称为电磁场。
31.实验器材中的电荷无论流入大地或从大地流出，对地球的电学状态影响不大，地球的电势十分稳定，因此可以把地球的电势定为零电势。
32.导体尖端的电荷密度很大，附近的电场很强，空气中残留的带电粒子在强电场的作用下发生剧烈的运动，把空气中的气体分子撞“散”，也就是使分子中的正负电荷分离。这个现象叫做空气的电离。中性的分子电离后变成带负电的自由电子和失去电子而带正电的离子。这些带电粒子在强电场的作用下加速，撞击空气中的分子，使它们进一步电离，产生更多的带电粒子。那些所带电荷与导体尖端的电荷符号相反的粒子，由于被吸引而奔向尖端，与尖端上的电荷中和，这相当于导体从尖端失去电荷。这个现象叫做尖端放电。尖端放电会导致高压设备上电能的损失，所以高压设备中导体的表面应该尽量光滑。夜间高压线周围有时会出现一层绿色光晕，俗称电晕，这是一种微弱的尖端放电。
33.实现静电屏蔽不一定要用密封的金属容器，金属网也能起到屏蔽作用。野外高压输电线受到雷击的可能性很大，所以在三条输电线的上方还有两条导线，它们与大地相连，形成一个稀疏的金属“网”，把高压线屏蔽起来，免遭雷击超高压带电作业的工人， 所穿衣服的织物中掺入了金属丝，
34.静电计实质上也是一种验电器。把它的金属球与一个导体连接，金属外壳与另一个导体连接（或者金属外壳与另一个导体同时接地），从指针偏转角度的大小可以推知两个导体间电势差的大小。
35.电容器外壳上标的是工作电压，或称额定电压，这个数值比击穿电压低。
36.范德格拉夫静电加速器由两部分组成，一部分是产生高电压的装置，叫做范德格拉夫起电机；另一部分是利用高电压加速带电粒子的加速管.
37.电源把正电荷从负极搬运到正极的过程中，这种非静电力在做功，使电荷的电势能增加。在电池中，非静电力是化学作用，它使化学能转化为电势能；在发电机中，非静电力的作用是电磁作用，它使机械能转化为电势能。
38.电动势取决于电池正、负极材料及电解液的化学性质，跟电池的大小无关。电池的容量就是电池放电时能输出的总电荷量，通常以安培小时（A·h）或毫安小时（mA·h）做单位。对同一种电池来说，体积越大，电池的容量越大，内阻越小。
39.某一个金属导体，在温度没有显著变化时，电阻是不变的，它的伏安特性曲线是通过坐标原点的直线，具有这种伏安特性的电学元件叫做线性元件。
40.电阻温度计是利用金属的电阻随温度变化而制成的，可以用来测量很高的温度。精密的电阻温度计是用铂做的。有些合金如锰铜合金和镍铜合金，电阻率几乎不受温度变化的影响，常用来制作标准电阻。
41.二极管是非线性元件，它的电阻与通过电流的大小有关。使用不同的多用表，或使用不同倍率的欧姆挡时，即使测量的都是正向电阻，数值也会相差很多。
42.水果电池做,测定电池的电动势和内阻实验的优点是它的内阻比较大，容易测量。或者用旧干电池，因其内阻较大，容易测量。
43.东汉学者王充在《论衡》一书中描述的“司南”，人们公认是最早的磁性定向工具。指南针是我国古代四大发明之一。
44.对火星磁场的观察显示，火星不像地球那样有一个全球性的磁场，因此指南针不能在火星上工作。
45.从岩层特别是海底岩层磁性的这些变化，科学家们推断出地球磁场方向曾经与现在相反，而且这种地磁反转在最近 500 万年里曾经发生过 10 次之多!
46.为了使电流表表盘的刻度均匀，两磁极间装有极靴，极靴中间又有一个铁质圆柱。这样，极靴与圆柱间的磁场都沿半径方向，线圈无论转到什么位置，它的平面都跟磁感线平行，表盘的刻度就是均匀的了。磁电式仪表的优点是灵敏度高，可以测出很弱的电流；缺点是线圈的导线很细，允许通过的电流很弱（几十微安到几毫安）
47.质谱仪最初是由汤姆生的学生阿斯顿设计的，他用质谱仪发现了氖 20 和氖 22，证实了同位素的存在。现在质谱仪已经是一种十分精密的仪器，是测量带电粒子的质量和分析同位素的重要工具。
48.注意：在研究楞次定律时，铁环并不是必须的。没有铁环.电磁感应现象仍然发生，只是线圈中的电流弱些。
49.1831 年 10 月 28 日，法拉第在一次会议上展示了他发明的圆盘发电机。它是利用电磁感应的原理制成的，是人类历史上的第一台发电机。
50.电动机转动时，线圈中也会产生感应电动势，这个感应电动势总要削弱电源电动势的作用，我们把这个电动势称为反电动势。它的作用是阻碍线圈的转动。如果要使线圈维持原来的转动，电源就要向电动机提供能量。这正是电能转化为其他形式能的过

程。如果电动机工作中由于机械阻力过大而停止转动，这时没有了反电动势，电阻很小的线圈直接连在电源的两端，电流会很大，时间长了很可能把电动机烧毁。
51.如果感应电动势是由感生电场产生的，它也叫做“感生电动势”如果感应电动势是由于导体运动而产生的，它也叫做“动生电动势”。
52.自感系数 L 与线圈的大小、形状、圈数，以及是否有铁芯等因素有关。利用涡流冶炼金属的优点是整个过程能在真空中进行，这样就能防止空气中的杂质进入金属，可以冶炼高质量的合金。减小涡流。途径之一是增大铁芯材料的电阻率，常用的铁芯材料是硅钢，它的电阻率比较大。另一个途径就是用互相绝缘的硅钢片叠成的铁芯来代替整块硅钢铁芯。探测地雷的探雷器，机场的安检门也是利用涡流工作的。
53.微安表的表头在运输时，应该把两个接线柱连在一起。
54.把电容器接在交流电路中，就需要知道电压的峰值。电容器所能承受的电压要高于交流电压的峰值，否则电容器就可能被击穿。
55.远距离的输电线大多是多股导线绞合而成的。有一种绞合线，中心是钢线，它的机械强度大；周围是铝线，它的电阻小、重量轻。
56.交流输电时，导线不但有电阻，还有线路的电感、电容产生的感抗和容抗。而直流输电可以克服不少问题。整流器可以将交流转换成直流。现代的直流输电，只在输电这个环节使用直流，发电机产生的仍是交流，用户使用的也主要是交流。
57.将电介质放入电场中，在前后两个表面上会分别出现正电荷与负电荷，这个现象称为极化。极化现象与介质在磁场中的磁化现象十分相似。某些电介质在去掉外加的电场后，仍然会长期保持被极化的状态，这种材料称为驻极体。

58.研究振动时所说的位移，都是对于平衡位置的位移。
59,游泳时耳朵在水中听到的音乐与在岸上听到的是一样的，说明机械波从一种介质进入另一种介质，频率并不改变；但由于波速变了，所以波长会改变。
60.惠更斯在 1690 年提出：介质中任一波面上的各点，都可以看做发射子波的波源，其后任意时刻，这些子波在波前进方向的包络面就是新的波面。这就是常说的惠更斯原理,惠更斯原理不是从某个定律推导出来的，也不是直接由实验总结出来的。它之所以正确，是因为由它得出的结论都与事实相符。
61,交通警向行进中的车辆发射频率已知的超声波，同时测量反射波的频率，根据反射波频率变化的多少就能知道车辆的速度。装有多普勒测速仪的监视器有时就装在公路方，在测速的同时把车辆牌号拍摄下来，并把测得的速度自动打印在照片上.
62,医生向人体内发射频率已知的超声波，超声波被血管中的血流反射后又被仪器接收。测出反射波的频率变化，就能知道血流的速度。这种方法俗称“彩超”，可以检查心脏、大脑和眼底血管的病变。
63,多普勒测速仪测量水在河底的流速，为养殖场寻找适合蚌类生长的场所。
64,“两个光源与屏上某点的距离之差等于半波长的偶 数倍”，包括了“距离之差为零”这种情况。这时在 P0 点出现亮条纹。
65,照相机、望远镜的镜头表面常常镀了一层透光的膜，膜的上表面与玻璃表面反射的光发生干涉。
66,泊松是光的波动说的反对者，他按照菲涅耳的理论计算了光在圆盘后的影的问题，发现对于一定的波长、在适当的距离上，影的中心会出现一个亮斑！泊松认为这是非常荒谬可笑的，并认为这样就驳倒了光的波动说。评委阿拉果在实验中观察到了这个亮斑，这样，泊松的计算反而支持了光的波动说。
67.“电磁波的振动方向”通常指其中电场的方向。
68.自然光在玻璃、水面、木质桌面等表面反射时，反射光和折射光都是偏振光。
69.摄影师在拍摄池中的游鱼、玻璃橱窗里的陈列物时，由于水面和玻璃表面的反射光的干扰，景像会不清楚。如果在照相机镜头前装一片偏振滤光片，让它的透振方向与反射光的偏振方向垂直，就可以减弱反射光而使景像清晰。
70.电子表的液晶显示也用到了偏振光,自然光在玻璃、水面、木质桌面等表面反射时，反射光和折射光都是偏振光。两块透振方向互相垂直的偏振片当中插进一个液晶盒，盒内液晶层的上下是透明的电极板，它们刻成了数字笔画的形状。外界的自然光通过第一块偏振片后，成了偏振光。这束光在通过液晶时，如果上下两极板间没有电压，光的偏振方向会被液晶旋转 90°（这种性质叫做液晶的旋光性），于是它能通过第二块偏振片。第二块偏振片的下面是反射镜，光线被反射回来，这时液晶盒看起来是透明的。但在上下两个电极间有一定大小的电压时，液晶的性质改变了，旋光性消失，于是光线通不过第二块偏振片，这个电极下的区域变暗，如果电极刻成了数字的笔画的形状，用这种方法就可以显示数字。



71.本书用全反射的知识解释了光在有机玻璃棒中的传播，并且由此粗浅地说明了光纤导光的原理。实际上两者并不完全一样,
72.电子式内窥镜的探头体积小、分辨率高，可供多人观察，所得图像能以电子文件的形式存储。
73.原子核聚变时释放的核能是一种很有希望的能源。怎样使原子核在人工控制下进行聚变反应，这是各国科学家研究的重要课题。一个可能的实现途径是，把核燃料制成小颗粒，用激光从四面八方对它进行照射，利用强激光产生的高压引起核聚变。
74.全息照片的拍摄利用了光的干涉原理，这就要求参考光和物光有很高的相干性。全息照相技术还可以记录光波的相位信息。观察全息照片时要用激光束照射照片，从照片的另一侧向照片看，可以看到原物体的立体的像。
75.根据麦克斯韦的电磁场理论，电磁波在真空中传播时，它的电场强度与磁感应强度互相垂直，而且二者均与波的传播方向垂直。因此电磁波是横波。
76.振荡电流实际上就是交变电流，不过习惯上指频率很高的交变电流。
77.俄罗斯物理学家波波夫和意大利青年马可尼 各自独立地发明了无线电报机。
78.人体在发射红外线，体温越高，发射的红外线越强。根据这个原理，红外体温计不与身体接触也可以测体温。
79.红外探测器能在较冷的背景上探测出较热物体的红外辐射，这是夜视仪器和红外摄影的基础。用灵敏的红外探测器吸收远处物体发出的红外线，然后用电子电路对信号进行处理，可以得知被测对象的形状及温度、湿度等参数。这就是红外遥感技术。
80.天空为什么是亮的，因为大气把阳光向四面八方散射。大气对波长较短的光的吸收也比较强，傍晚的阳光在穿过厚厚的大气层时，蓝光、紫光大部分被吸收掉了，剩下红光、橙光透过大气射入我们的眼睛，所以傍晚的阳光比较红。
81.太阳光里有许多紫外线，人体接受适量的紫外线照射，能促进钙的吸收，改善身体健康。但过强的紫外线会伤害眼睛和皮肤
82.γ 射线能破坏生命物质。把这个特点应用在医学上，可以摧毁病变的细胞，用来治疗某些癌症。γ射线的穿透能力很强，也可用于探测金属部件内部的缺陷。
83.食物中的水分子在微波的作用下热运动加剧，温度升高，内能增加。电磁波是一种物质。
84.最先提出动量概念的法国科学家笛卡儿，但他忽视了动量的方向性，把质量和速率的乘积定义为动量，牛顿修改了他的定义，把速率改为速度。

85. 如果某种物质能够完全吸收入射的各种波长的电磁波而不发生反射，这种物体就是绝对黑体，简称黑体。
86. 在空腔壁上开一个很小得孔，射入小孔的电磁波在空腔内表面会发生多次反射和吸收，最终不能从空腔射出，这个小孔就成了一个绝对黑体。托马斯·杨观察到了光的干涉，菲涅耳观察到了光的衍射，马吕斯观察到了光的偏振现象。麦克斯韦和赫兹先后从理论上和实验上确认了光的电磁波本质。
87. 赫兹最早发现了光电效应。汤姆孙等相继进行了实验研究. 爱因斯坦发现了光电效应的规律。
88. 当金属表面涂敷其他物质时，逸出功会有显著改变。
89.白天的天空各处都是亮的，航天员在大气层外飞行时，尽管太阳的光线耀眼刺目，其他方向的天空却是黑的，甚至可以看见星星。
90.1 mol 的任何物质都含有相同的粒子数，这个数量用阿伏加德罗常数表示，即 $N_A = 6.022\,140\,76\times10^{23}\,mol^{-1}$ 。
91.扫描隧道显微镜是一种可以探测物质表面结构的仪器，它通过移动着的探针与物质表面的相互作用，将物质表面原子的排列状态转换为图像信息，获得具有原子尺度分辨力的表面形貌信息。
92.19 世纪初，一些人观察到，悬浮在液体中 的小颗粒总在不停地运动。1827 年，英国植物学家布朗首先在显微镜下研究了这种运动。后人把悬浮微粒的这种无规则运动叫作布朗运动
93.原子内部有带正电的原子核和带负电的电子。分子间的作用力就是由这些带电粒子的相互作用引起的。
94.油酸分子中的一部分是羧基 -COOH，它对水有很强的亲合力；而另一部分烃基 C17H33- 对水没有亲合力，要冒出水面。因此，油酸分子会一个个地直立在水面上形成单分子油膜。
95.分子的个数与它们所占空间体积之比叫作分子的数密度，通常用 n 表示。
96.分子动理论将气体系统的宏观性质归结为分子的热运动及其相互作用，揭示了宏观现象的微观本质。
97.两个分子相距无穷远是指它们之间几乎没有相互作用时的距离。
98.实验室内已经获得的最低温度约 $10^{-9}K$ ，最高温度约 $10^{7}\sim10^{8}$ K。
999.选择不同的金属丝可以做成不同的热电偶温度计，有的可以测量高达 3 000 ℃的高温，有的可以测量接近绝对零度的低温。压力表式温度计是根据气体压强随温度变化的规律制作的。
100.在我们的计算中，相当于大气压几倍的压强都可以算作“压强不太大”，零下几十摄氏度的温度也可以算作“温度不太低”。
101.云母是一种矿物，化学成分为铝硅酸盐，可以剥成一片片的薄层。有些云母的绝缘性能很好，在过去没有塑料的年代，云母常在电器中当作绝缘物用。
102.同种物质也可能以晶体和非晶体两种不同的形态出现，也就是说，物质是晶体还是非晶体，并不是绝对的。例如，天然石英是晶体，而熔化以后再凝固的水晶（即石英玻璃）就是非晶体。有些非晶体在一定条件下也可以转化为晶体。
103.石墨烯是目前人类已知的强度最高的物质之一。强度比世界上最好的钢铁还要高百倍之多。同时还具有很好的韧性，且可以弯曲。在电学、热学特性方面，电子在石墨烯同种物质也可能以晶体和非晶体两种不同的形态出现，也就是说，物质是晶体还是非晶体，并不是绝对的。
104.液体放在玻璃管中，液面与管壁接触的位置是弯曲的，但有的向上弯，有的向下弯。这也是浸润与不浸润两种现象的区别。
105.分子取向排列的液晶具有光学各向异性，具体地说，沿分子长轴方向上的折射率不同于沿短轴的。入射光的偏振方向与液晶分子长轴的方向成不同夹角时，液晶对光的折射率不同。因此，一束非偏振光射入液晶层后再射出时，由于液晶折射率的各向异性会产生两束光程不同的光。这 样两束光在出射点处矢量叠加（等效于干涉），我们在显微镜下就可以观察到某种色光
106.亥姆霍兹，德国物理学家、生理学家。对生理学、光学、电磁学、数学等方面多有贡献，是能量守恒和转化学说的创建者之一
107.中微子是静止质量几乎为 0 的中性粒子
108.1850 年，克劳修斯首次提出熵的概念，熵可用来表达一个系统的无序程度，系统从有序向无序的发展过程中熵在增加。在物理学中，不与外界进行物质和能量交换的系统叫作孤立系统。在自发过程中，系统总是自发地向无序方向发展，即一个孤立系统的熵值总是不减少的，这就是熵增加原理。
109.康普顿在研究石墨对 X 射线的散射时，发现在散射的 X 射线中，除了与入射波长 λ_0 相同的成分外，还有波长大于 λ_0 的成分，这个现象称为康普顿效应。
110.光子除了具有能量之外还具有动量。由于光子不能静止下来，所以它没有静止质量。
111.据 E=h γ 和 p=$\frac{h}{\lambda}$ 知，左边的 E 和 P 反应了光的粒子性，右边的 γ 和 λ 反应了波动性，h 架起了粒子性与波动性之间的桥梁。
112. 德国物理学家劳厄提议，利用晶体中排列规则的物质微粒作为衍射光栅，来检验伦琴射线的波动性。证实了伦琴射线就是波长为十分之几纳米的电磁波。戴维孙和汤姆孙分别利用晶体做了电子衍射的实验。
113. 现代电子显微镜的分辨率本领可以达到 0.2nm,能够看到蛋白质分子和金属的晶体结构。
114. 光的波动性不是光子之间的相互作用引起的，而是光子自身固有的性质。
115. 海森伯，德国物理学家，不确定性关系的提出者，量子力学的奠基人之一。
116. 密立根，精确测量了电子电荷及实验验证光电效应方程。
117.阴极射线的机理是：管中残存气体分子中的正负电荷在强电场的作用下被“拉开”（即气体分子被电离），正电荷（即正离子）在电场加速下撞击阴极，于是阴极释放更多电子，形成了阴极射线。
118.对于一般的原子核，实验确定的核半径 R 的数量级为 10^{-15} m,而整个原子半径的数量级是 10^{-10} m.
119.各种原子的发射光谱都是线状谱，每种原子都有自己的特征谱线，我们就可以利用它来鉴别物质和确定物质的组成成分，这种方法称为光谱分析。它的优点是灵敏度高，样本中一种元素的含量达到 $10^{-10}g$ 时就可以被检测到。
120.光是由原子内部电子的运动产生的。
121.通常情况下，原子处于基态，基态时最稳定的。气体放电管中的原子受到高速运动的电子的撞击，有可能向上跃迁到激发态。处于激发态的原子是不稳定的，会自发地向能量较低的能级跃迁，放出光子，最终回到基态。这就是气体导电时发光的机理。
122.各种气体原子的能级不同，跃迁时发射的能量各异，因此利用不同气体可以制成五颜六色的霓虹灯。日光灯是由气体导电发出紫外线，玻璃管壁上的荧光物质在紫外线照射下发出了可见光。有些物质在可见光或其他射线照射下发出的可见光叫做荧光。
123.原子序数大于或等于 83 的元素，都能自发地发出射线，原子序数小于 83 的元素，有的也能放出射线。
124.射线飞行途中遇到原子并将其部分能量转移给原子中的电子，使这个电子脱离核的束缚成为自由电子，这样的过程叫电离。射线的上述作用叫做电离作用。
125.原子核的能量也跟原子的能量一样，其变化是不连续的，也只能取一系列不连续的数值，因此也存在着能级，同样是能级越低越稳定。
126.放射性元素衰变的快慢是由核内部自身的因素决定的，跟原子所处的物理，化学状态无关。
127.威耳逊云室根据径迹的长短和粗细，可以知道粒子的性质；从带电粒子的运动轨迹的弯曲方向，还可以知道粒子所带电荷的正负。α粒子的质量比较大，在气体中飞行时不易改变方向。由于它的电离本领大，沿涂产生的离子多，所以在云室中的径迹直而清晰。高速的β粒子的径迹又细又直，低速的β粒子的径迹又短又粗而且是弯曲的。γ 粒子的电离本领很小，在云室中一般看不到它的径迹。
128.气泡室根据照片可以分析粒子的动量、能量及带电情况等。

129.盖革--米勒计数器只能用来计数，不能区分射线的种类。如果同时有大量粒子，或两个粒子射来的时间间隔小于 200 μs ，盖革--米勒计数器也不能区分它们。
130.放射性同位素的应用：1.使用射线测厚度。2.癌症病人接受钴 60 的放射治疗。3.培育优良品种，抑制蔬菜发芽，延长保存期。4.示踪原子。
131.食盐和有些水晶眼镜片中含有钾 40，香烟中含有钋 90，这些也是放射性同位素。
132.核力是短程力，作用范围在 1.5x10^{-15} m 之内。核力在大于 0.8x10^{-15} m 时表现为吸引力，且随距离的增大而减小，超过 1.5x 10^{-15} m，核力急据下降几乎消失，而在距离小于 0.8x10^{-15} m 时，表现为斥力。
133.1967 年温伯格、萨拉姆在格拉肖电弱统一模型的基础上提出了电弱统一的完善理论。
134.1kg 铀 235 全部裂变时放出的能量相当于 2800 吨标准煤完全燃烧时释放的化学能。
135.1942 年，费米主持建立了世界上第一个称为“核反应堆”的装置，首次通过可控制的链式反应实现了核能的释放。
136.热中子反应堆的核燃料是铀棒，其成分是天然铀或浓缩铀。
137.‘快堆’中用的核燃料是钚 239.钚 239 裂变释放出快中子，快中子使铀 238 变成 239，铀 239 经过 2 次衰变又变成钚 239.
138.实现核聚变的难点是，地球上没有容器能够经受如此高温，科学家设想了两种方案，即磁约束和惯性约束。
139.粒子分为三大类：强子（质子）、轻子（电子，电子中微子，μ 子，μ 子中微子，τ 子和τ 子中微子）、媒介子（光子，中间玻色子，胶子）。恒星的演化→-白矮星→中子星→黑洞。

第四部分　物理学史

高中物理课本中涉及的科学家及其发现

1.亚里士多德，古希腊杰出的哲学家、科学家， 形式逻辑学的创始人。在物理学方面，亚里士多德认为自然中一切对象都在不 断地运动和变化。他首先给出了时间的定义，并认为既然运动是永恒的，那么 时间也同样是永恒的。

2.胡克：英国物理学家；发现了胡克定律（$F_{弹}$=kx），同时胡克还证明如果行星轨道是圆形，它所受的引力大小跟行星到太阳距离的二次方成反比。

3.伽利略：意大利的著名物理学家；他首先采用了以实验检验猜想和假设的科学方法。伽利略科学思想方法的核心是把实验和逻辑推理（包括数学推演）和谐地结合起来。他还发明了望远镜，并用它观测天空。观测的结果，支持了天文学的新学说—日心说。1638 年出版了《两种新科学的对话》。这部著作的出版，奠定了伽利略作为近代力学创始人的地位。伽利略时代的仪器、设备十分简陋，技术也比较落后，但伽利略巧妙地运用科学的推理，给出了匀变速运动的定义，导出 S 正比于 t^2 并给以实验检验；推断并检验得出，无论物体轻重如何，其自由下落的快慢是相同的；通过斜面实验，推断出物体如不受外力作用将维持匀速直线运动的结论。后由牛顿归纳成惯性定律。伽利略的科学推理方法是人类思想史上最伟大的成就之一。同时最早发现了单摆的等时性，是近代力学创始人并**制造了第一个温度计。**

4.牛顿：英国物理学家； 动力学的奠基人，他总结和发展了前人的发现，得出牛顿定律（它们是整个动力学的核心）及万有引力定律，奠定了以牛顿定律为基础的经典力学。牛顿在 1666 年最先利用三棱镜观察到光的色散现象。1687 年，牛顿出版了名著《自然哲学的数学原理》，标志着现代意义的物理学正式诞生。牛顿和莱布尼茨发明微积分

5.开普勒：丹麦天文学家；发现了行星运动规律的开普勒三定律，奠定了万有引力定律的基础。 哥白尼提出日心说；笛卡尔第一个明确提出了动量守恒定律。

6.卡文迪许：英国物理学家；巧妙的利用扭秤装置测出了万有引力常量。被称为“能够称量地球质量的人”。

7.焦耳：英国物理学家；测定了热功当量 J=4.2 焦/卡，为能的转化守恒定律的建立提供了坚实的基础。研究电流通过导体时的发热，得到了焦耳定律。

8.开尔文：英国科学家；创立了把-273℃作为零度的热力学温标。

9.库仑：法国科学家；巧妙的利用“库仑扭秤”研究电荷之间的作用，发现了“库仑定律”。

10.密立根：美国科学家；利用带电油滴在竖直电场中的平衡，得到了基本电荷 e 。富兰克林命名了正负电荷，并发明了避雷针。

11.欧姆：德国物理学家；在实验研究的基础上，欧姆把电流与水流等比较，从而引入了电流强度、电动势、电阻等概念，并确定了它们的关系。昂尼斯（荷兰）发现超导现象。

12.奥斯特：丹麦科学家；通过试验发现了电流能产生磁场。

13.安培：法国科学家；提出了著名的分子电流假说。

14.汤姆生：英国科学家；研究阴极射线，发现电子，测得了电子的比荷 e/m；汤姆生还提出了“枣糕模型”，在当时能解释一些实验现象。狄拉克（英国）预言了“磁单极子可以独立存在”。

15.劳伦斯：美国科学家；发明了“回旋加速器”，使人类在获得高能粒子方面迈进了一步。

16.法拉第:英国科学家；发现了电磁感应，亲手制成了世界上第一台发电机（圆盘发电机），法拉第不仅提出了场的概念，而且直观地描绘了场的清晰图像。他用电力线（即电场线）和磁力线（即磁感线）形象地描述电场和磁场。但法拉第电磁感应定律的提出人为：纽曼、韦伯。法拉第提出的是“力线”的概念。“场”是麦克斯韦等人完善后形成的概念。

17.楞次：德国科学家；概括试验结果，发表了确定感应电流方向的楞次定律。亨利（美国）发现自感现象。

18.麦克斯韦：英国科学家；经典电磁场理论的创始人，统计物理学的奠基人之一。 总结前人研究电磁感应现象的基础上，建立了完整的电磁场理论。并通过电磁场理论计算出了静电力常量 K。他在电磁场理论和统计物理学方面都做出了杰出的贡献。预言了电磁波的存在。

19.赫兹：德国科学家；在麦克斯韦预言电磁波存在后二十多年，第一次用实验证实了电磁波的存在，测得电磁波传播速度等于光速，证实了光是一种电磁波。也最早发现了光电效应现象。

20.惠更斯：荷兰科学家；在对光的研究中，提出了光的波动说。发明了摆钟。提出了单摆周期公式。

21.托马斯·杨：英国物理学家、考古学家、医生，光的波动说的奠基人之一。首先巧妙而简单的解决了相干光源问题，成功地观察到光的干涉现象。（双孔或双缝干涉）。斯涅耳（荷兰）发现折射定律。

22.伦琴：德国物理学家；继英国物理学家赫谢耳发现红外线，德国物理学家里特发现紫外线后，发现了当高速电子打在管壁上，管壁能发射出 X 射线—伦琴射线。

23.**普朗克，德国物理学家，量子论的奠基人。**1900 年，**他在黑体辐射研究中引入能量子，因此于** 1918 **年获诺贝尔物理学奖。**提出量子概念—电磁辐射（含光辐射）的能量是不连续的，E 与频率 υ 成正比。其在热力学方面也有巨大贡献。

24.爱因斯坦：德籍犹太人，后加入美国籍，20 世纪最伟大的科学家，他提出了“光子”理论及光电效应方程，建立了狭义相对论及广义相对论。提出了“质能方程”。爱因斯坦就根据他的广义相对论认为应该存在引力波。后来，物理学家们又进行了理论研究，对引力波的性质做了预言。雷纳·韦斯等探测到了引力波，获得 2017 年诺贝尔物理学奖。

25.德布罗意：法国物理学家；提出一切微观粒子都有波粒二象性；提出物质波概念，任何一种运动的物体都有一种波与之对应。

26.卢瑟福：英国物理学家；通过α粒子的散射现象，提出原子的核式结构；首先实现了人工核反应，发现了质子。

27.玻尔：丹麦物理学家；把普朗克的量子理论应用到原子系统上，提出原子的玻尔理论。

28.查德威克：英国物理学家；从原子核的人工转变实验研究中，发现了中子。

29.威尔逊：英国物理学家；发明了威尔逊云室以观察α（短、粗、直）β（长、细、曲）、γ（最长）射线的径迹。

30.贝克勒尔：法国物理学家；首次发现了铀的天然放射现象，开始认识原子核结构是复杂的。

31.玛丽·居里夫妇：法国（波兰）物理学家，是原子物理的先驱者，“镭”的发现者。

32.约里奥·居里夫妇：法国物理学家；老居里夫妇的女儿女婿；首先发现了用人工核转变的方法获得放射性同位素。

33.世界上第一台“核反应堆”是费米主持建立的。

34.英国天文学家哈雷根据牛顿的万有引力定律正确地预言了它的回归。

35.洛伦兹:荷兰物理学家。他在物理学上最重要的贡献是他的电子论。1895 年他提出了著名的洛伦兹力公式。美国麻省理工学院的气象学家----“蝴蝶效应”。

36.李政道和杨振宁指出弱相互作用下宇称不守恒.

37.丁肇中发现了三喷注现象，为胶子的存在和量子色动力学提供了实验依据。他的工作还为电磁相互作用与弱相互作用的统一理论提供了实验证据。

38.吴健雄:华裔美国物理学家。她除了用实验证实宇称不守恒外，还用实验证实了电磁 相互作用与弱相互作用的密切关系，对后来电、弱统一理论的提出起了重要作用。

39.劳厄:德国物理学家，诺贝尔物理学奖获得者。他首先用晶体对 X 射线的衍射来研究晶体，并由此证明了 X 射线的波动性。

40.塞格瑞:意大利裔美籍物理学家，因发现反质子与张伯伦共获 1959 年诺贝尔物理学奖。

41.特斯拉：美国电气工 程师。他一生致力于交变电流的研究，是交变电流进入 实用领域的主要推动者。

【几个易错的物理学史】

1.静电力常量不是库仑测出的，而是麦克斯韦通过电磁场理论计算出来的。

2.泊松亮斑不是泊松发现的，而是评委阿拉果通过实验发现的。

3.法拉第电磁感应定律不是法拉第发现的，而是纽曼韦伯发现的。

4.万有引力常量不是牛顿测出的，而是卡文迪什测出的。

第五部分　高中物理常用常量

一、太阳的质量 M=2.0×10^{30} kg，　半径 R=6.96×10^{5} ㎞ ，密度 $\rho = 1.4 \times 10^{3}$ kg / m^{3}

二、地球的质量 M=6.0×10^{24} kg，半径 R=6.4×10^{3} km，密度 $\rho = 5.5 \times 10^{3}$ kg / m^{3}

三、月球的质量 M=7.3×10^{22} kg，半径 R=1.7×10^{3} km，密度 $\rho = 3.34 \times 10^{3}$ kg / m^{3}

四、太阳到地球的距离 r=1.5×10^{8} km,光到达需 500s

地球与月球的距离 r=3.84×10^{5} km,光到达需 1.28s

五、万有引力常量 G=6.67×10^{-11} N· ㎡ / Kg^{2}

重力加速度 g=9.8N / kg=9.8m / s^{2}

六、火星的半径 R=3.3×10^{3} km　密度 ρ =4.0×10^{3} kg / m^{3}

自转周期 T=25h　公转速度 v=24 ㎞ / s

七、同步卫星离地面的高度 h=3.6×10^{4} ㎞.

V=3.08 ㎞ / s　a=0.23m / s^{2}

八、近地卫星 r=R　a=g　v=7.9 ㎞ / s　T=84.8min

九、地球第一宇宙速度 v_1 =7.9km / s　地球第二宇宙速度 v_2 =11.2km / s= $\sqrt{2}$ v_1　地球第三宇宙速度 v_3 =16.7km / s　卫星势能公式 E_P =-GMm / r

十、静电力常量 K=9.0×10^{9} N·㎡ / C^{2}　基本电荷 e=1.60×10^{-19} c　电子的质量 m_e =0.91×10^{-30} kg

质子的质量 m_H =1.67×10^{-27} kg

中子的质量 m_n =1.67×10^{-27} kg

十一、普朗克常量 h=6.63×10^{-34} J·S　1M=10^{6}　1G=10^{9}　1nm=10^{-9} m　1 埃（A）=10^{-10} m，1THZ=10^{12} HZ。

十二、真空中的光速 c=3×10^{8} m / s　1u=1.67×10^{-27} kg　1u 相当于 931.5Mev

十三、可见光的频率范围：3.9×10^{14}~7.7×10^{14} Hz，可见光的波长范围为 $4.0\times10^{-7}m \sim 7.6\times10^{-7}m$ ，　能量数量级 10^{-19} J 能量范围：1.62ev---3.11ev

十四、氢原子能级 E_1 =-13.6ev;　E_2 =-3.4ev;　E_3 =-1.51ev;　E_4 =-0.85ev;　E_5 =-0.54ev;　氢原子第一轨道 r_1 =0.53×10^{-10} m，Epn =2E_n .氢原子任一能级：

$E_n = E_p + E_k$；　$E_n = \frac{E_1}{n_2}$；　$r_n = n^2 r_1$

$\frac{ke^2}{r_n^2} = m\frac{v_n^2}{r_n}$；　$E_{kn} = \frac{1}{2}mv_n^2 = \frac{ke^2}{2r_n}$；　$E_n = -E_k$；　$E_p = -2E_k$

十五、有关核反应方程式

（1）α 衰变　$^{A}_{Z}X \rightarrow ^{A-4}_{Z-2}Y + ^{4}_{2}He$ (贝克勒尔：法国)

β 衰变　$^{A}_{Z}X \rightarrow ^{A}_{Z+1}Y + ^{0}_{-1}e$ (贝克勒尔：法国)

（2）质子的发现　$^{14}_{7}N + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}H$ (卢瑟福:英国)

（3）中子的发现　$^{9}_{4}Be + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{12}_{6}C + ^{1}_{0}n$ (查德威克:英国)

（4）同位素的发现　$^{27}_{13}Al + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{30}_{15}P + ^{1}_{0}n$ (约里奥·居里夫妇：法国)

（5）正电子的发现　$^{30}_{15}P \rightarrow ^{30}_{14}Si + ^{0}_{+1}e$ （约里奥·居里夫妇：法国)

（6）U 核裂　$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{136}_{54}Xe + ^{90}_{38}Sr + 10\,^{1}_{0}n$ (哈恩与斯特拉斯曼：德国)

（7）氢核聚变　$^{2}_{1}H + ^{3}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}_{0}n$ （马克·欧力峰：澳洲）

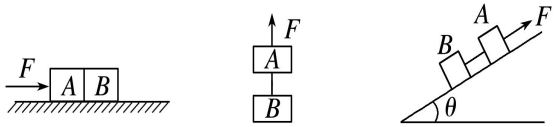
【记忆口诀】卤（卢）蛋（氮）子（质），茶（查）中培（铍），不（贝）衰裂。居正殿（电），雨（铝）淋（磷）归（硅）。

第六部分　结论规律型二级结论（一）

1. 物体沿倾角为α的斜面匀速下滑时， μ= tanα

2. “刹车陷阱”，应先求滑行至速度为零即停止的时间 t_0，确定了滑行时间 t 大于 t_0时，用 $v_t^2 = 2as$ 或 $S=v_0t/2$，求滑行距离；若 t 小于 t_0时 $s = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$

3. 一起加速运动的物体系，若力是作用于 m_1 上，则 m_1 和 m_2 的相互作用力为 $N = \frac{m_2 \cdot F}{m_1 + m_2}$， 与有无摩擦无关，物体在平面、斜面、竖直方向运动都一样成立。



4. 平抛运动中有① tanα=2tanβ（α为速度与水平方向的夹角，β为位移与水平方向的夹角）

5. 和为定值的两个电阻，阻值相等时并联值最大。

6. 外电路中任一电阻增大，总电阻增大，总电流减小，路端电压增大。

7. 当 R=r 时，电源的输出功率最大，P= $\frac{E^2}{4r}$

8. $R_1 \neq R_2$，分别接同一电源：当 $R_1R_2 = r^2$ 时，输出功率 $P_1 = P_2$。

9. 含电容器的电路中，电容器是断路，其电压值等于与它并联的电阻上的电压，稳定时，与它串联的电阻是虚设。电路发生变化时，有充放电电流。

10. 电路动态分析口诀：串反并同，压同流反。

11. 故障分析：串联电路中断路点两端有电压，通路两端无电压（电压表并联测量）。断开电源，用欧姆表测：断路点两端电阻无穷大，短路处电阻为零。

12. 冲击电流的冲量： $BIL\Delta t = mv$， $BLq = Mv$

13. 找力或电流口诀：左力右电（线）

14. 楞次定律：（阻碍原因）内外环电流方向：“增反减同”自感电流的方向：“增反减同”，磁铁相对线圈运动：“你追我退，你退我追”。通电导线或线圈旁的线框：线框运动时：“你来我推，你走我拉”， 电流变化时：“你增我远离，你减我靠近”

15. i 最大时（$\frac{\Delta I}{\Delta t} = 0$， $I_{框} = 0$）或 i 为零时

（$\frac{\Delta I}{\Delta t}$ 最大　$I_{框}$ 最大　）线框均不受力。

16. 转杆（轮）发电机： $\varepsilon = \frac{1}{2}BL^2\omega$

环型发电机：以任意点为轴时， $E = \frac{1}{2}B\omega(L_1^2 - L_2^2)$

感生电量：： $q = I\Delta t = \frac{n\Delta\Phi}{\Delta tR}\Delta t = \frac{n\Delta\Phi}{R}$。

17. 中性面垂直磁场方向，Φ与 e 为互余关系，此消彼长。

18. 线圈从中性面开始转动：

$$e = 2nBLV\sin\omega t = nBS\omega\sin\omega t = n\omega\Phi_n\sin\omega t = \varepsilon_n\sin\omega t$$

安培力： $F_A = nBI_mL\sin\omega t$ 线圈从平行磁场方向开始转动：

$$e = 2nBLV\cos\omega t = nBS\omega\cos\omega t = \varepsilon_m\cos\omega t$$

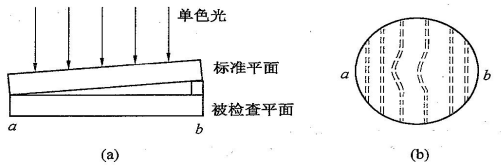
正弦交流电的有效值： I^2RT =一个周期内产生的总热量。

19. 双缝干涉条纹的宽度：$\Delta x = \frac{l}{d}\lambda$；单色光的干涉条纹为等距离的明暗相间的条纹；白光的干涉条纹中间为白色，两侧为彩色条纹，且按“紫内红外”排列。

20. 单色光的衍射条纹中间最宽，两侧逐渐变窄；白光衍射时，中间条纹为白色，两侧为彩色条纹，且按“紫内红外”排列。

21. 照相机镜头上的增透膜的最小厚度为绿光在膜中波长的 1/4。

22. 用标准样板检查工件表面的情况：条纹向窄处弯是下凹；向宽处弯是上凸。降低垫高，条纹变疏。



23. 电磁波穿过介质表面时，频率（和光的颜色）不变。光入介质， $v = \frac{c}{n}$， $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$ ，物质波波长 $\lambda = \frac{h}{p}$

24. 磁场中的衰变：外切圆是α衰变（α粒子轨迹为大圆），内切圆是β衰变（β粒子轨迹为大圆），半径与电量成反比。

25. 大量处于定态的氢原子向基态跃迁时可能产生的光谱线条数：$N = C_n^2 = \frac{n(n-1)}{2}$ 条，一个处于定态的氢原子向基态跃迁时可能产生的光谱线条数：n-1 条.

26. 光子的能量 E=hv=pc,

27. **静止在光滑水平面上的物体，先受到水平力 $F_{甲}$ 作用一段时间，后又在反方向的水平力 $F_{乙}$ 作用下，经过相同时间，恰返回出发点，则 $F_{乙} = 3F_{甲}$。**

二级结论（二）

(1)一力撤去后合力多大：几个力相平衡，则其中一个力与其他力的合力平衡。

(2)多力作用的合力范围：n 个力合成，合力的最大值是 n 个力的和。最大力减去其余各力的和，若差值大于0，则这 n 个力的最小值等于这个差值；若差值小于等于0，则这 n 个力的最小值等于0。

(3)合力与分力大小关系：在力的三角形中，任一边可以充当合力，因此合力可以大于等于或小于任一分力。

(4)物体沿斜面匀速下滑的条件：$mg\sin\theta = \mu mg\cos\theta$，解得 $\mu = \tan\theta$(平衡摩擦力)。

(5)物块之间弹力的计算：$F_N = \frac{m_1F_2 + m_2F_1}{m_1 + m_2}$。其中 m_1 一侧的作用外力为 F_1，m_1 一侧的作用外力为 F_2。不论是在水平面、竖直面还是在斜面上，也不论接触面光滑还是粗糙(摩擦因数相等)，该结论总成立。

(6)位移中点速度公式：$v_{\frac{s}{2}} = \sqrt{\frac{v_0^2 + v_t^2}{2}}$，且有 $\sqrt{\frac{v_0^2 + v_t^2}{2}} > \frac{v_0 + v_t}{2}$。

(7)根据纸带计算加速度：

①如果是偶数段 $N=2n$，则平均加速度为 $\bar{a} = \frac{x_{后} - x_{前}}{n^2T^2} \times 10^{-2}$；

②如果是奇数段 $N=2n+1$，则平均加速度为 $\bar{a} = \frac{x_{后} - x_{前}}{n(n+1)T^2} \times 10^{-2}$，舍掉中间段。

(8)物体在斜面上的加速度：下滑 $a = g\sin\theta - \mu g\cos\theta$，上滑 $a = g\sin\theta + \mu g\cos\theta$。

(9)等时圆：物体沿任意光滑弦(发端于或终止于竖直直径两端点)滑下的时间 $t = 2\sqrt{\frac{R}{g}}$ 都相等。

(10)平抛运动的角度关系：$\tan\theta=2\tan\alpha$。末速度反向延长线必交水平位移 x 的中点。

(11)物体在光滑圆周两点处的弹力之差：

①最低点与最高点的弹力之差为 $6mg$。

②最低点与圆心等高处弹力之差为 $3mg$。

(12)人造卫星的快慢规律："高慢低快"。即 r 越大，线速度、角速度、频率越小，周期越大。"同轨同速"，即在同一轨道上运行的卫星速度相等。

(13)人造卫星的能量规律："高轨高能"，即距离中心天体表面越远的卫星，其机械能越高。

(14)同步卫星："一天转一圈，赤道上空悬，半径四万二，它把信息传。"地球同步卫星的公转周期与地球自转周期相等，是 24h；它的轨道与赤道是共面同心圆；公转半径是 42000km，距离地表是 35600km，即为地球半径的 5.6 倍；它的线速度约为 3.14km/s；它的功能是通信。

(15)双星："两个恒星等周期，彼此提供向心力，轨道正是同心圆，质量半径成反比。"双星一般由两个相距很近的恒星组成，而且远离其他星体；双星围绕共同的圆心在同一直径上运动，具有相等的周期和角速度；它们之间的万有引力提供彼此做圆周运动所需的向心力，$G\frac{m_1m_2}{r^2}=m_1r_1\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2=m_2r_2\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2$，可得 $m_1r_1=m_2r_2$，即它们做圆周运动的半径与各自的质量成反比关系。

(16)近地卫星的密度关系：$\rho_1T_1^2=\rho_2T_2^2$。两个中心天体，它们各自的密度分别为 ρ_1、ρ_2，它们各自的近地卫星的周期分别为 T_1、T_2。

(17)第一宇宙速度：由 $G\frac{Mm}{R^2}\approx mg=m\frac{v_1^2}{R}$，得 $v_1=\sqrt{\frac{GM}{R}}=\sqrt{gR}$。

(18)保守力做功的特点：保守力做功仅与始末位置有关，与具体的运动路径无关。如重力、弹簧的弹力、电场力等都是保守力，凡是保守力都有相应的势能。

(19)保守力做功与势能的增量的关系：$W_{保}=-\Delta E_P$。保守力做正功，势能就减少多少，保守力做负功，势能就增加多少。

(20)何时考虑内力的影响：对于一个系统而言，只有在研究功能问题时必须考查内力，否则内力一概不予考虑。所谓"谈作用只看外部，谈能量内外兼顾"。

(21)等量异种点电荷连线中垂线上的场强和电势：

①场强。从中点到两边，场强逐渐减小，连线中点处最大，无穷远处为零。方向平行于电荷连线指向负电荷。

②电势。处处为零，中垂线就是零等势线。

(22)等量同正点电荷连线中垂线上的场强和电势：

①场强。从中点到两边，先增大后减小，因为中点处为零，无穷远处场强也为零。方向沿着中垂线，从中点指向两边。

②电势。从中点到两边，电势越来越低，且均为正值。

(23)等量同负点电荷连线中垂线处的场强和电势：

①场强。从中点到两边，先增大后减小，因为中点处为零，无穷远处场强为零。方向沿着中垂线，从两边指向中点。

②电势。从两边到中点，电势越来越低，且均为负值。

(24)非匀强电场场强与电势差的关系：$U=\overline{E}\cdot d$。平均场强大处电势差大。

(25)电场线与等势面的关系：

①处处正交。

②密度一致。

(26)匀强电场的场强公式：$E=\frac{4\pi kQ}{\varepsilon_rS}$。与位置 r 无关，故处处相等。

(27)电势差与线段的关系：

①在匀强电场中，任一线段上任一分点把该线段分为两段，这两段线段的长度与相应的电势差成正比。中点处的电势等于两端点电势之和的一半。

②匀强电场中，任两平行线段的长度与相应的电势差成正比。任两条平行且相等的线段，它们所对应的电势差总相等。

(28)粒子电偏转若干结论：

①偏转的时间通常由极板的长度决定：$t=\frac{L}{v_0}$。

②侧移电压与侧移距离的关系：$E=\frac{U_y}{y}=\frac{U}{d}$。

③功能关系：$\frac{1}{2}mv_0^2<\frac{1}{2}mv_0^2+\frac{1}{2}mv_y^2=\frac{1}{2}mv^2$，$qU_y=\frac{1}{2}mv_y^2=E_{P1}-E_{P2}$。

④粒子源似乎在电场的"中点"：$\tan\theta=\frac{y}{\frac{L}{2}}$。

⑤粒子偏转程度（$y=\frac{qUL^2}{2mdv_0^2}$ 和 $\tan\theta=\frac{qUL}{mdv_0^2}$）由粒子的性质、初始条件及电场决定。

⑥从静止开始，依次通过相同加速电场和偏转电场的不同带电粒子具有相等的偏转（$y=\frac{U_2L_2}{2d_2U_1}$ 和 $\tan\theta=\frac{U_2L_2^2}{4d_2U_1}$）。

(29)电阻丝均匀拉伸 n 倍、截成相等的 m 段后并联电阻为：$R=\left(\frac{n}{m}\right)^2R_0$。

(30)并联电阻：

①并联总电阻小于任一分电阻（$R=\frac{R_2}{R_1+R_2}R_1<R_1$，$R=\frac{R_1}{R_1+R_2}R_2<R_2$）。

②并联总电阻，随任一分电阻的增大而增大，减小而减小。

(31)滑动变阻器"串一并式"接法：当两并联支路的电阻相等时，总电阻最大，最大阻值等于 $\frac{R+R_0}{4}$。随着滑片从一端向另一端的滑动，总阻值先增大后减小。当 $R=0$ 时，这个结论依旧成立，不过最大阻值等于 $\frac{R_0}{4}$，如图 11-38 所示。

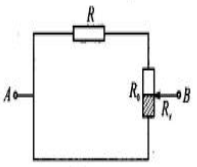


图 11-38

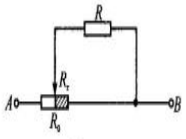


图 11-39

(32)滑动变阻器"并一串式"接法：总电阻随串联部分电阻的增大而增大，减小而减小。如图 11-39 所示。

(33)并联电流增量的关系：$|\Delta I|=|\Delta I_2|-|\Delta I_1|$。干路增加（减小）的电流，等于各支路增加（减小）的电流之和减去减小（增加）的电流之和。

(34)串联电压增量的关系：$|\Delta U_1|=|\Delta U_2|-|\Delta U_3|$。在串联电路中，某部分两端总电压的增加（减小）量，等于各电阻两端电压增加（减小）量之和减去减小（增加）量之和。电路路端电压的变化量等于电源内压的变化量，即 $|\Delta U_{内}|=|\Delta U_1|$。

(35)闭合电路的串反并同：随着滑动变阻器电阻的增大（减小），它所在串联支路和干路的电流反而减小（增大），与它并联的支路的电流却变大（减小）。

(36)圆形磁场的半径关系：$\frac{\sin\frac{\alpha}{2}}{R}=\frac{\cos\left(\theta\pm\frac{\alpha}{2}\right)}{r}$。一带电粒子质量为 m，电量大小为 q，以初速度 v_0 射入圆形匀强磁场 O_1 之中。已知磁感应强度为 B，初速度与磁场圆半径 R 之间的夹角为 θ，带电粒子在磁场中运动一段圆弧（所对应的圆心角为 α）后从 P 点射出，粒子的轨迹圆圆心为 O_2，半径为 r。则关于粒子的边角关系有如下二级结论成立：

①若粒子向上偏转，如图 11-40 所示，二级结论为 $\frac{\sin\frac{\alpha}{2}}{R}=\frac{\cos\left(\theta+\frac{\alpha}{2}\right)}{r}$；

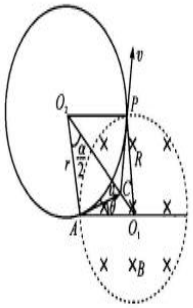


图 11-40

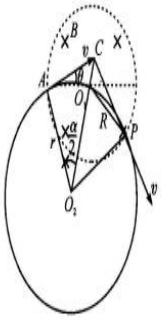


图 11-41

②若粒子向下偏转，如图 11-41 所示，二级结论为$\frac{\sin\frac{\alpha}{2}}{R}=\frac{\cos\left(\theta-\frac{\alpha}{2}\right)}{r}$。

(41)电磁感应中的安培力：$F_{安}=\frac{B^2L^2}{R+r}v$。

(42)高压线径与电压关系：$U_1^2S_1=U_2^2S_2$。

(43)气体实验定律增量式：

①玻意耳定律的增量式。$\frac{p_1}{V_2}=\frac{p_2}{V_1}=-\frac{\Delta p}{\Delta V}$。

②查理定律的增量式。$\frac{p}{T}=\frac{\Delta p}{\Delta T}$。

③盖—吕萨克定律的增量式。$\frac{V}{T}=\frac{\Delta V}{\Delta T}$。

(44)理想气体状态方程的密度形式：$\frac{p_1}{\rho_1T_1}=\frac{p_2}{\rho_2T_2}$。

(45)干涉花样的数学本质：双曲线。

(46)相干波源之间的距离：$(n-1)\frac{\lambda}{2}<d<(n+1)\frac{\lambda}{2}$。若两相干波源间共有 n 条明纹或暗纹。

(47)薄膜干涉法检验平面：向凹背凸。如果条纹向着交棱的一侧弯曲，表明待检查平面凹下去的；如果条纹背着交棱的一侧弯曲，表明待检查平面是凸起来的。

(48)多普勒效应频率公式：$f'_{观测}=\frac{v\pm u_{观}}{v\mp u_{源}}f$。$v$ 为波速，$v_{观}$ 为观察者运动速度，$v_{源}$ 为声运动速度。

(49)平行玻璃砖的侧移量：$d=\overline{OO'}\sin(\theta_1-\theta_2)$。随入射角 θ_1、折射率 n、厚度 h 的增大增大。如图 11-45 所示。

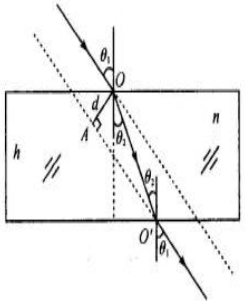


图 11-45

(50)色光的系列性质：红光在介质中的折射率 n 最小→偏折最轻→速度最大→波长最→频率最低→最易发生光电效应现象→临界角最大→最难发生全反射。

(51)天然放射性的半衰期：$m_{余}=m_{原}\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{\tau}}$。

(52)衰变次数的计算公式：

如果一个原子核经历多次 α 衰变和 β 衰变转变为另一种新核${}^{A_1}_{Z_1}X\rightarrow{}^{A_2}_{Z_2}Y$；遵守“退二进规律。

①质量数的变化是由 α 衰变引起的，那么发生 α 衰变的次数就是：$x_\alpha=\frac{A_1-A_2}{4}$。

②中子总数的变化是由 α 衰变和 β 衰变共同引起的，$Z_1-Z_2=2x_\alpha-x_\beta$，由此可得发生 β 衰变的次数是：$x_\beta=2x_\alpha-(Z_1-Z_2)$。

(53)衰变中核子数的减少：衰变过程中，质子个数的减少 $y_H=2x_\alpha-x_\beta$，中子个数的减少 $y_n=2x_\alpha+x_\beta$，核子个数的减少 $y_A=4x_\alpha=A_1-A_2$。

(54)磁场衰变的反冲径迹：“粒子必为大圆，内切 β 衰变，外切同顺同逆，内切恰恰相反。”α 衰变的半径比是 $r_\alpha:r_{新核}=Z_{新核}:2$；β 衰变的半径比是 $r_\beta:r_{新核}=Z_{新核}:1$。如图 11-46所示。

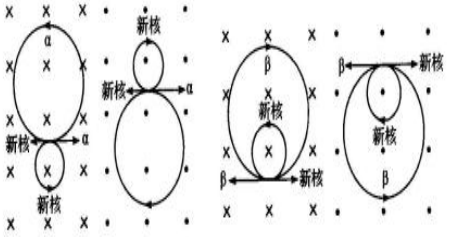


图 11-46

(55)新核与 α 粒子、β 粒子的动能之比：α 衰变是 $E_\alpha:E_{新核}=A_{新核}:4$；β 衰变是 $E_\beta:E_{新核}=A_{新核}:0\rightarrow\infty$。

第七部分 高中物理中的物理量定义法

（一）比值定义法； 比值法定义的概念往往由事物本身的因素决定，与外因无关，更能体现事物的本质。

（1）加速度的定义式 $a=\frac{\Delta v}{\Delta t}$；决定式 $a=\frac{F}{m}$

（2）速度定义式------$v=\frac{x}{t}$；决定式 $v=\frac{P}{F}$

(3)平均速度定义式 $v=\frac{\Delta x}{\Delta t}$,决定式 $v=\frac{P}{F}$

(4)重力加速度定义式 $a=\frac{\Delta v}{\Delta t}$，决定式 $g=\frac{GM}{R^2}$

(5)动摩擦因数定义式$\mu=f/F_N$,决定式.由两物体的材料和接触面的粗糙程度决定。

（6）弹簧的劲度系数定义式 K=F/x ,决定因数由弹簧本身决定。

(7)电场强度 $E=\frac{F}{q}$，点电荷的电场强度决定式：$E=k\frac{Q}{r^2}$

（8）电势定义式：$\varphi=\frac{E_P}{q}$，点电荷的电场强度决定式：kQ/r

(9)**电势差定义式**：$U_{AB}=\frac{W_{AB}}{q}$, 决定式：$U_{AB}=\varphi_A-\varphi_B$、

（11）电容的定义式：$C=\frac{Q}{U}$决定式：$C=\frac{\varepsilon_rS}{4\pi kd}$

（11）**电流**定义式：$I=\frac{q}{t}$；决定式（宏观）：$I=\frac{U}{R}$，微观 I=nqSv

（12）**电动势**定义式：$E=\frac{W_{非}}{q}$。由电源本身的构造和材料等因数决定。

（13）电阻的定义式为 $R=\frac{U}{I}$，决定式 $R=\rho\frac{l}{S}$。

（14）**电阻率**定义式 $\rho=R\frac{S}{L}$。由电阻本身的材料和温度决定。

（15）**磁感应强度**定义式 $B=\frac{F}{IL}$。由磁场本身和场点位置等决定。

(16)自感系数定义式:$L=E\Delta t/\Delta I$,决定式 $L=\mu n^2V$

(17)**折射率**定义式 $n=\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}$, 决定式 $n=\frac{c}{v}$

（二）理想化法

理想化法下定义的特点：用理想化法定义的概念，一定要注

意哪些东西呗忽略掉了，被理想化了。

（1）质点------有质量的点；
（2）匀速直线运动-----速度时刻相同；
（3）匀变速直线运动-----加速度时刻相同；
（4）自由落体运动-------只受重力；
（5）竖直上抛运动----只受重力；
（6）重心----除重心外其他各处不受重力；
（7）平抛运动------只受重力；
（8）点电荷------忽略电荷的大小和形状；
（9）匀强电（磁）场-------场强处处相同；
（10）恒定电场----电场恒定不变；
（11）恒定电流----电流的大小和方向始终不变；
（12）理想变压器-------忽略铜损，铁损和漏磁；
（12）弹簧振子-------轻质和忽略阻力；
（13）简谐运动-------回复力与位移成正比；
（14）弹性正碰-------动量和能量守恒；
（15）单摆-----忽略空气和摩擦阻力，刚性轻绳。
（16）理想气体-----满足气体实验定律。

（三）推理法

推理法下定义的特点：用推理法定义的概念，其中包含着较强的推理成分，一般体现为相关物理量的乘积形式。

（1）功 W＝Flcosα
（2）重力：G＝mg
（3）弹力 F＝kx
（4）滑动摩擦力 f=μF_N
（5）向心力 F=mω^{2}r
（6）动能 $E_k=\frac{1}{2}mv^2$
（7）重力势能 E_p＝mgh
（8）电势能 E_p＝qΦ，
（9）电功 W＝IUt.；　电功率 P＝IU.；电热：Q＝I^2Rt.
　　热功率 P＝I^2R
（10）磁通量Φ＝BSsinθ.
（11）安培力 F＝BIL
（12）洛伦兹力 F＝qvB
（13）感应电动势 E＝BLv
（14）动量 P=mv;冲量 I=Ft
（15)能量子 E＝hγ

第八部分 容易忽略的几个公式和高中物理学常用研究方法

（一）容易忽略的几个公式

(1)拉密定理：$\frac{F_1}{\sin\theta_1}=\frac{F_2}{\sin\theta_2}=\frac{F_3}{\sin\theta_3}$，可以计算三力平衡下未知力的大小或方向。

(2)第二宇宙速度：$v_2=\sqrt{2}v_1=\sqrt{\frac{2GM}{R}}$。第二宇宙速度是第一宇宙速度的$\sqrt{2}$倍。

(3)点电荷的电势：$\varphi_A=k\frac{Q}{r}$。

(4)通电直导线周围的磁场：$B=k\frac{I}{r}$。

(5)通电螺线管内部的磁场：$B=\mu\cdot nI$，μ是螺线管内部磁介质的磁导率，n是匝数密度。

(6)磁力矩：$M=nBIS\cos\theta$。磁力矩与转轴位置及其线圈的形状无关。

(7)自感系数：$L=\mu n^2V$。自感系数由线圈里的磁介质、匝数密度和线圈所围体积决定。

(8)分子力：$F_{分}=f_{引}+f_{斥}=r^{-a}+r^{-b}$。引力$f_{引}=r^{-a}$和斥力$f_{斥}=r^{-b}$都是负指数的幂函数。

(9)平均动能：$\overline{E_t}=\frac{3}{2}kT$。温度是分子平均动能的标志。

(10)压强的微观解释：$p=\frac{2}{3}n\overline{E_k}=\frac{1}{3}nmv^2$。

(11)物体的内能：$E_{内}=N(\overline{E_k}+\overline{E_P})$。

(12)克拉伯龙方程：$pV=nRT$，R国际单位制下是8.31，常用单位下是0.082。

(13)简谐运动的振幅：$A=\sqrt{x_0^2+\frac{v_0^2}{\omega^2}}$。$x_0$是初位移，$v_0$是初速度，$\omega$是圆频率。

(14)简谐运动的周期：$T=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$。m是振动物体的质量，k是振动系统的参数。

(15)简谐运动的能量：$E=\frac{1}{2}kA^2$。势能$E_p=\frac{1}{2}kx^2=\frac{1}{2}kA^2\cos^2(\omega t+\alpha)$，根据平方关系

$E_k=\frac{1}{2}kA^2\sin^2(\omega t+\alpha)$。

（16）不确定性关系：ΔxΔp≥h/4π
（17）平行班板电容器电容的决定式：$C=\frac{\varepsilon_r S}{4\pi kd}$
（18）LC 振荡回路的周期公式：T＝2π$\sqrt{LC}$，频率公式：f=$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$
（19）电容器的存储的电能 E=$\frac{1}{2}CU^2$
(20)自感电动势　E＝L$\frac{\Delta I}{\Delta t}$
(21)引力势能 Ep=-GMm/r
（22）点电荷电势能 Ep=kQq/r　电势φ=kQ/r
（23）自感线圈的感抗公式：$X_L=2\pi fL$
（24）电容器的容抗公式：$X_C=\frac{1}{2\pi fC}$
（25）弹簧的弹性势能 $E_p=\frac{1}{2}kx^2$

（二）高中物理学常用研究方法

1.理想实验法：伽利略的理想斜面实验。
2.控制变量法：研究牛顿第二定律；电阻定律。
3.极限思维法；(1)公式 v=$\frac{\Delta x}{\Delta t}$中，当Δt→0 时 v 是瞬时速度。
　(2)公式 a=$\frac{\Delta v}{\Delta t}$中，当Δt→0 时 a 是瞬时加速度。
4.类比法：电流类比于水流；电场类比于重力场。
5.科学假设法：安培分子电流假设，玻尔理论。
6.理想模型法：质点、点电荷、弹簧振子、单摆、理想变压器、匀变速直线运动、平抛运动等。
7.微元法：推导匀变速直线运动的位移公式、利用图像求变力的功、求变力的冲量等问题。
8.等效替代法：合力与分力；等效电阻（电路）。
9.放大法；库伦扭秤实验、卡文迪什扭秤实验。
10.归纳法：法拉第研究电磁感应现象。
11.形象化：法拉第提出电场线和磁感线。
12.演绎法：爱因斯坦建立相对论。
13.逻辑推理和实验相结合法：伽利略利用理想实验探究力和运动的关系。
14.整体法与隔离法：物体的受力分析。
15.电流元：把导线看成无数电流元组成。

第九部分 高中物理公式速查

（一）直线运动

1. 匀变速直线运动：$v=\frac{s}{t}$，s=vt，$t=\frac{s}{v}$.
2. 变速直线运动：$\bar{v}=\frac{s}{t}$，$s=\bar{v}t$，$t=\frac{s}{\bar{v}}$.
3. 瞬时速度：$\lim_{\Delta t\to 0}\bar{v}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta s}{\Delta t}$.
4. 加速度的定义公式：$a=\frac{v_t-v_0}{t}$，$a=\frac{\Delta v}{t}$.
5. 匀变速直线运动的速度公式：$v_t=v_0+at$.
6. 匀变速直线运动的位移公式：$s=v_0t+\frac{1}{2}at^2$.
7. 匀变速直线运动的平均速度公式：

$\bar{v}=\frac{v_0+v_t}{2}$, $\bar{v}=v_{\frac{t}{2}}$. $\bar{v}=\frac{s_n+s_{n+1}}{2T}$. $\bar{v}=v_0+\frac{1}{2}at$.

8. 匀变速直线运动的位移与初、末速度的关系公式: $2as=v_t^2-v_0^2$.

9. 匀变速直线运动的位移中点的速度: $v_{\frac{s}{2}}=\sqrt{\frac{v_0^2+v_t^2}{2}}$.

10. 匀变速直线运动的位移中点的速度大于中间时刻的速度: $v_{\frac{s}{2}}>v_{\frac{t}{2}}$.

11. 匀变速直线运动任何相等的时间内增加的位移都相等: $\Delta s=aT^2$.

12. 自由落体运动的公式: $v_t=gt$, $h=\frac{1}{2}gt^2$, $2gh=v_t^2$, $\bar{v}=\frac{v_t}{2}$.

13. 竖直上抛运动的公式: $v_t=v_0-gt$, $h=v_0t-\frac{1}{2}gt^2$.

竖直上抛运动的物体上升的最大高度: $H=\frac{v_0^2}{2g}$,

竖直上抛运动的物体上升到最高点所用的时间: $t=\frac{v_0}{g}$,

竖直上抛运动的物体从抛出点到落回抛出点全过程所用的时间: $T=\frac{2v_0}{g}$,

14. 初速度为零的匀变速直线运动的有关推论公式:

(1) 等分时间(设T为等分时间间隔)

1T末、2T末、3T末……nT末对应的瞬时速度大小之比:

$v_1:v_2:\cdots\cdots:v_n=1:2:\cdots\cdots:n$,

1T内、2T内、3T内,……,nT内的位移之比:

$s_1:s_2:\cdots\cdots:s_n=1^2:2^2:\cdots\cdots:n^2$,

第1个T内,第2个T内,……,第n个T内的位移之比:

$s_{\text{Ⅰ}}:s_{\text{Ⅱ}}:\cdots\cdots:s_{\text{Ⅳ}}=1:3:\cdots\cdots:(2n-1)$,

(2) 等分位移(设S为等分位移的长度)

1S末、2S末、3S末……nS末对应的瞬时速度大小之比:

$v_1:v_2:\cdots\cdots:v_n=\sqrt{1}:\sqrt{2}:\cdots\cdots:\sqrt{n}$

经过1S、2S、3S……nS所用的时间之比:

$t_1:t_2:\cdots\cdots:t_n=\sqrt{1}:\sqrt{2}:\cdots\cdots:\sqrt{n}$,

经过第1个S,第2个S,……,第n个S的时间之比:

$t_{\text{Ⅰ}}:t_{\text{Ⅱ}}:\cdots\cdots:t_{\text{Ⅳ}}=(\sqrt{2}-\sqrt{1}):(\sqrt{3}-\sqrt{2}):\cdots\cdots:(\sqrt{n}-\sqrt{n-1})$.

(二) 力和物体的平衡

1. 密度: $\rho=\frac{m}{V}$.

2. 压强: $P=\frac{F}{S}$, 液体压强: $P=\rho gh$.

1个标准大气压=760mmHg=1.03×10^5Pa≈10m水柱产生的压强.

3. 重力的公式: $G=mg$. ($g=9.8m/s^2$.)

重力沿斜面向下的分力: $G_1=mg\sin\theta$,

重力沿垂直斜面向下的分力: $G_2=mg\cos\theta$.

4. 弹簧的弹力: $F=-kx$.

弹簧的串联: $\frac{1}{k}=\frac{1}{k_1}+\frac{1}{k_2}+\cdots\cdots+\frac{1}{k_n}$.

弹簧的并联: $k=k_1+k_2+\cdots\cdots+k_n$.

5. 滑动摩擦力: $f=\mu N$.

物体在粗糙水平面上滑动时受到的摩擦力大小: $f=\mu mg$

物体在粗糙斜面上滑动时受到的摩擦力大小: $f=\mu mg\cos\alpha$.

最大静摩擦力: $f_{sm}=\mu_s N$.

摩擦角: $\phi=arctg\frac{f_{sm}}{N}$.

滚动摩擦: $M=KN$.

6. 阿基米德定律: $F_{浮}=\rho gV_{排}$.

7. 共点力的合成与分解,遵守平行四边形法则:合外力等于各分力的矢量和.

$\sum\vec{F}=\vec{F}_1+\vec{F}_2+\cdots+\vec{F}_n$ (矢量式)

$\vec{F}_{合}=\vec{F}_1+\vec{F}_2+\cdots+\vec{F}_n$ (矢量式)

两个力夹角为θ时有计算公式: $\sum F=\sqrt{F_1^2+F_2^2+2F_1F_2\cos\theta}$,

与F_1夹角为α,则$tg\alpha=\frac{F_2\sin\theta}{F_1+F_2\cos\theta}$.

正交分解法: $\sum F=\sqrt{(\sum F_x)^2+(\sum F_y)^2}$,

$\sum F_x=F_{1x}+F_{2x}+\cdots+F_{nx}$,

$\sum F_y=F_{1y}+F_{2y}+\cdots+F_{ny}$,

与x轴的夹角为α,则$tg\alpha=\frac{\sum F_y}{\sum F_x}$.

8. 共点作用下物体平衡条件: $\sum F=0$

9. 力矩: $M=FL$.

10. 力矩平衡的条件: $\sum M=0$,

11. 杠杆平衡的条件: $F_1\times L_1=F_2\times L_2$.

12. 一般物体的平衡条件: $\sum F=0$和$\sum M=0$.

13. 正弦定理(拉密定理): $\frac{F_1}{\sin\alpha}=\frac{F_2}{\sin\beta}=\frac{F_3}{\sin\gamma}$.

(三) 牛顿运动定律

1. 牛顿第二定律: $\Sigma F=ma$, $\Sigma F_x=ma_x$, $\Sigma F_y=ma_y$.

2. 牛顿第三定律: $F=-F'$.

3. 物体沿光滑斜面下滑: $a=g\sin\theta$,物体沿光滑斜面向上冲: $a=-g\sin\theta$.

4. 物体沿粗糙斜面下滑: $a=g(\sin\theta-\mu\cos\theta)$,物体沿粗糙斜面向上冲: $a=-g(\sin\theta+\mu\cos\theta)$.

5. 超重(失重)时的浮力公式: $F_{浮}=\rho(g\pm a)V_{排}$.

6. 超重(失重)时的液体压强公式: $P=\rho(g\pm a)h$.

(四) 曲线运动

1. 平抛运动:

水平方向的速度: $v_x=v_0$,

竖直方向的速度: $v_y=gt$,

合速度: $v=\sqrt{v_0^2+(gt)^2}$,

偏转角(即合速度方向与水平初速度的夹角): $tg\theta=\frac{v_y}{v_x}=\frac{gt}{v_0}$,

水平方向的位移：x=v_0t，

竖直方向的位移：$y=\frac{1}{2}gt^2$，

合位移：$s=\sqrt{x^2+y^2}$，

轨迹是抛物线：$y=\frac{g}{2v_0^2}x^2$.

合位移的方向与水平初速度的夹角：$tg\phi=\frac{y}{x}=\frac{\frac{1}{2}gt^2}{v_0t}=\frac{gt}{2v_0}$，

tgθ与tgφ的关系：tgθ=2tgφ.

2. 斜上抛运动：

$v_x=v_0\cos\theta$，$v_y=v_0\sin\theta-gt$

$x=v_0\cos\theta\cdot t$，$y=v_0\sin\theta\cdot t-\frac{1}{2}gt^2$

飞行时间：$T=\frac{2v_0\sin\theta}{g}$

射程：$X_m=\frac{v_0^2\sin2\theta}{g}$

最大高度：$Y_m=\frac{v_0^2\sin^2\theta}{2g}$.

3. 匀速圆周运动的公式：

周期：$T=\frac{2\pi r}{v}=\frac{2\pi}{\omega}=\frac{1}{f}$，

频率：$f=\frac{1}{T}$，

转速：n=f，

线速度大小：$v=\frac{s}{t}=\frac{2\pi r}{T}=2\pi rf=2\pi rn=\omega\cdot r$

角度速度：$\omega=\frac{\phi}{t}=\frac{2\pi}{T}=2\pi f=2\pi n=\frac{v}{r}$，

向心加速度大小：$a=\frac{v^2}{r}=r\omega^2=v\cdot\omega$，

向心力的大小：$F=m\frac{v^2}{r}=mr\omega^2=mv\cdot\omega$.

4. 竖直平面内的圆周运动：

轻绳拴一个小球在竖直平面内作圆周运动，小球经过最低点时：$T-mg=m\frac{v^2}{r}$，

小球恰好能作完整的圆周运动的临界条件：$mg=m\frac{v^2}{r}$，$v=\sqrt{gr}$，

轻杆拴一个小球在竖直平面内作圆周运动，小球恰好能作完整的圆周运动的临界条件是在最高点杆的支持力N=mg，此时小球的速度v=0.

5. 圆锥摆的周期公式：$T=2\pi\sqrt{\frac{l\cos\theta}{g}}$.

6. 相对运动：$\overrightarrow{S_{AB}}$、$\overrightarrow{v_{AB}}$、$\overrightarrow{a_{AB}}$分别表示A相对于B的位移、速度、加速度.

相对位移：$\overrightarrow{s_{AB}}=\overrightarrow{s_{AC}}+\overrightarrow{s_{CB}}$.

相对速度：$\overrightarrow{v_{AB}}=\overrightarrow{v_{AC}}+\overrightarrow{v_{CB}}$

相对加速度：$\overrightarrow{a_{AB}}=\overrightarrow{a_{AC}}+\overrightarrow{a_{CB}}$

（五）万有引力定律

1. 开普勒第三定律：$\frac{r^3}{T^2}=k$.

2. 牛顿万有引力定律：$F=\frac{GMm}{r^2}$.

3. 地面附近万有引力约等于重力：

$\frac{GMm}{R^2}\approx mg$，$GM=R^2g$，$g=\frac{GM}{R^2}$，$M=\frac{R^2g}{G}$.

4. 卫星绕地球运转的线速度大小的推导计算：

$\frac{GMm}{r^2}=m\frac{v^2}{r}$，$v=\sqrt{\frac{GM}{r}}$.

5. 卫星绕地球运转的角速度的推导计算：

$\frac{GMm}{r^2}=mr\omega^2$，$\omega=\sqrt{\frac{GM}{r^3}}$.

6. 卫星绕地球运转的周期的推导计算：

$\frac{GMm}{r^2}=mr(\frac{2\pi}{T})^2$，$T=2\pi\sqrt{\frac{r^3}{GM}}$.

7. 第一宇宙速度的推导计算：

$\frac{GMm}{R^2}=m\frac{v^2}{R}$，$v=\sqrt{\frac{GM}{R}}=\sqrt{gR}=7.9km/s$.

8. 第二宇宙速度：v_2=11.2km/s；第三宇宙速度：v_3=16.7km/s.

9. 天体质量的计算：$\frac{GMm}{r^2}=mr(\frac{2\pi}{T})^2$，$M=\frac{4\pi^2r^3}{GT^2}$.

10. 天体密度的计算：球的体积$V=\frac{4}{3}\pi r^3$，$\rho=\frac{M}{V}=\cdots=\frac{3\pi}{GT^2}$.

11. 同步卫星高度的计算：

$\frac{GMm}{(R+h)^2}=m(R+h)(\frac{2\pi}{T})^2$，$h=\sqrt[3]{\frac{GMT^2}{4\pi^2}}-R$，$h=\sqrt[3]{\frac{R^2gT^2}{4\pi^2}}-R$.

（六）动量

1. 冲量：I=F·t.

2. 合外力的冲量：$I_{合}=\Sigma F\cdot t$，$I_{合}=I_1+I_{2+\cdots\cdots+}I_n$.

3. 动量：P=mv.

4. 动量的变化：$\Delta P=mv_t-mv_0$.

5. 动量的变化率：$\frac{\Delta P}{t}=\sum F$.

6. 动量定理：$\Sigma F\cdot t=mv_t-mv_0$，$I_1+I_{2+\cdots\cdots+}I_n=mv_t-mv_0$.

7. 动量守恒定律：

$m_1v_1+m_2v_2=m_1v_1'+m_2v_2'$

$\Delta P_1=-\Delta P_2$（一个物体增加的动量等于一个物体减小的动量）

8. 人船模型：$S_M=\frac{m}{M+m}L$，$S_m=\frac{M}{M+m}L$.

（七）机械能

1. 功：W=FScosα，W=Pt.

2. 功率：$P=\frac{W}{t}$，$P=Fv\cos\alpha$，$P=Fv$.

3. 动能：$E_k=\frac{1}{2}mv^2$.

4. 动量大小与动能的关系：$P=\sqrt{2mE_k}$，$E_k=\frac{P^2}{2m}$.

5. 重力势能：$E_P = mgh$.

6. 弹簧系统的弹性势能：$E_P = \frac{1}{2}kx^2$

7. 机械能：$E=E_k+E_P$

8. 重力做功与重力势能的变化之间的关系：$W_G=-\Delta E_P$.

9. 动能定理：$\sum F \cdot s = \frac{1}{2}mv_t^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$, $W_1+W_2+\cdots\cdots+W_n = \frac{1}{2}mv_t^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$.

10. 机械能守恒定律：在只有重力（弹簧的弹力）做功的条件下，动能和势能相互转化，但机械能的总量保持不变. $E_2=E_1$.

11. 功能原理：$W_{非} = E_2 - E_1$.

12. 能量守恒定律：子弹打木块模型是完全非弹性碰撞的典型问题，系统损失的动能转化成内能（用于发热：产生热量 Q=fL）.

fL = 系统初态动能 − 系统末态动能

$$fL = \frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}(m+M)v^2$$

$$\mu mgL = \frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}(m+M)v^2$$

$$\mu mgL = \frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}Mv_2^2 - \frac{1}{2}(m+M)v^2$$

变化量（增量；改变量）=末−初

减少量（损失量；差值）=初−末.

13. 弹性碰撞：

$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v_1' + m_2v_2'$.

$$\frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 = \frac{1}{2}m_1v_1'^2 + \frac{1}{2}m_2v_2'^2$$

$$v_1' = \frac{(m_1-m_2)v_1 + 2m_2v_2}{m_1+m_2}$$

$$v_2' = \frac{(m_2-m_2)v_2 + 2m_1v_1}{m_1+m_2}$$

等质量的物体发生弹性碰撞后交换速度；小球与墙壁发生弹性碰撞之后以等大的速率反弹.

14. 完全非弹性碰撞：

$m_1v_1 + m_2v_2 = (m_1+m_2)v$,

$$v = \frac{m_1v_1 + m_2v_2}{m_1+m_2}$$

系统损失的动能：

$$E_{k损} = (\frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2) - \frac{1}{2}(m_1+m_2)v^2 = \frac{m_1m_2(v_1-v_2)^2}{2(m_1+m_2)}.$$

15. 非弹性碰撞：两个物体在碰撞后的相对速度与碰撞前的速度相对速度之比值，叫恢复系数，即 $e = \frac{v_2'-v_1'}{v_1-v_2}$，结合动量守恒：

$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v_1' + m_2v_2'$ 可以解得：

$$v_1' = v_1 - \frac{m_2}{m_1+m_2}(1+e)(v_1-v_2)$$

$$v_2' = v_2 + \frac{m_1}{m_1+m_2}(1+e)(v_1-v_2)$$.

e=1 即为弹性碰撞，e=0 即为完全非弹性碰撞.

16. 判断同向碰撞是否可能的四条原则：

(1) m_1 追上 m_2 发生碰撞：$v_1 > v_2$;

(2) 动量守恒：$m_1v_1+m_2v_2=m_1v_1'+m_2v_2'$.

(3) 动能不会增加：

$$\frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 \geq \frac{1}{2}m_1v_1'^2 + \frac{1}{2}m_2v_2'^2$$

$$即：\frac{P_1^2}{2m_1} + \frac{P_2^2}{2m_2} \geq \frac{P_1'^2}{2m_1} + \frac{P_2'^2}{2m_2}$$

(4) 碰撞后不可能再碰一次：$v_1' \leqslant v_2'$.

17. 机械效率：$\eta = \frac{W_{有用}}{W_{总}} \times 100\%$.

18. 伯努利方程：$P_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 = 恒量$.

（八）机械振动和机械波

1. 回复力：$F=-kx$.

2. 加速度：$a = -\frac{k}{m}x$.

3. 弹簧振子的周期公式：$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$.

4. 单摆振动的周期公式：$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$. 秒摆的周期 T = 2 s，摆长 L =0.9929m.

5. 简谐振动的运动学方程：$x = A\cos(\omega t + \phi_0)$.

6. 简谐振动的能量：$E = \frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2$.

7. 波速、波长、周期、频率的关系：$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$.

8. 在一直线上两个同频率简谐振动的合成：

$x_1 = A_1\cos(\omega t + \phi_1)$, $x_2 = A_2\cos(\omega t + \phi_2)$

$$x = x_1 + x_2 = A_1\cos(\omega t + \phi_1) + A_2\cos(\omega t + \phi_2) = A\cos(\omega t + \phi)$$

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\phi_2 - \phi_1)}$$

$$tg\phi = \frac{A_1\sin\phi_1 + A_2\sin\phi_2}{A_1cso\phi_1 + A_2\cos\phi_2}.$$

（九）热学

1. 热力学温度：T=(273+t)K.

2. 热量的计算公式：$Q_{吸} = cm(t-t_0)$, $Q_{放} = cm(t_0-t)$.

燃料燃烧时放出热量：$Q_{放} = qm$，q 表示燃烧值.

熔化时吸收的热量或者凝固时放出的热量：$Q=Lm$（L表示熔化热）

汽化时吸收的热量或者液化放出的热量：$Q=\lambda m$（λ表示汽化热）

热平衡方程：$Q_{吸}=Q_{放}$.

3. 玻意耳定律：$P_1V_1=P_2V_2$. 推论：$\Delta P=-\frac{\Delta V}{V_2}P_1$.

4. 抽气问题：对于容积为V_0，其内部的气体质量为m_0的容器抽气，每次抽出气体的体积为ΔV，抽了n次，剩下的质量为m_n，则：

$$m_n=(\frac{V_0}{V_0+\Delta V})^n\cdot m_0$$

要使剩下的质量和原质量的比为$\frac{m_n}{m_0}$，则需抽n次：

$$n=\frac{\lg\frac{m_n}{m_0}}{\lg\frac{V_0}{V_0+\Delta V}}.$$

5. 查理定律：$\frac{P_1}{T_1}=\frac{P_2}{T_2}$，推论：$\Delta P=\frac{P}{T}\Delta T$；用摄氏度表示：$P_t=P_0(1+\frac{t}{273})$.

6. 盖·吕萨克定律：$\frac{V_1}{T_1}=\frac{V_2}{T_2}$，推论：$\Delta V=\frac{V}{T}\Delta T$；$V_t=V_0(1+\frac{t}{273})$.

7. 理想气体状态方程：$\frac{P_1V_1}{T_1}=\frac{P_2V_2}{T_2}$.

8. 克拉伯珑方程：PV=nRT，$PV=\frac{M}{\mu}RT$. 密度方程：$\frac{P_1}{\rho_1T_1}=\frac{P_2}{\rho_2T_2}$

9. 热力学第一定律：W+Q=ΔE.

10. 热膨胀：线膨胀，$l_t=l_0(1+\alpha t)$；体膨胀，$V_t=V_0(1+\alpha t)$.

对于均匀各向同性的固体$\beta=3\alpha$，对于气体$\beta=\frac{1}{273}$度$^{-1}$.

11. 相对湿度：$B=\frac{\rho_1}{\rho_2}\times100\%=\frac{P_1}{P_2}\times100\%$.

12. 毛细现象，液面升高的高度：$h=\frac{2\sigma}{r\rho g}$.

（十）电场

1. 库伦定律：$F=\frac{kQ_1Q_2}{r^2}$（真空中）. $F=\frac{kQ_1Q_2}{\varepsilon r^2}$（介质中）.

2. 电场强度（场强）：$E=\frac{F}{q}$.

3. 点电荷的场强：$E=\frac{kQ}{r^2}$（真空中）. $E=\frac{kQ}{\varepsilon r^2}$（电介质中）.

4. 匀强电场的场强与电势差的关系：$E=\frac{U}{d}$.

5. 电势：$U=\frac{\varepsilon}{q}$. 点电荷的电势：$U=\frac{kQ}{r}$.

6. 均匀带电球壳内、外的场强和电势公式：

球壳内：E＝0，$U=\frac{kQ}{r}=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r}$。

球壳外：$E=\frac{kQ}{r^2}=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0R^2}$，$U=\frac{kQ}{R}=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0R}$，

$$\varepsilon_0=\frac{1}{4\pi k}=8.85\times10^{-12}C^2/(N\cdot m^2)$$

7. 电势差：$U_{AB}=U_A-U_B$，，$U_{AB}=\frac{W}{q}$，匀强电场中：U=Ed.

8. 电势能：ε=qU.

9. 电场力做功（与路径无关）：$W=qU_{AB}$. W= ε $_A$- ε $_B$=- Δ ε . 1eV=1.6×10^{-19}J.

10. 电容：$C=\frac{Q}{U}$，平行板电容器的电容：$C=\frac{\varepsilon S}{4\pi kd}$.

11. 电容的串联：$Q=Q_1=Q_2=\cdots\cdots=Q_n$.

$U=U_1+U_2+\cdots\cdots+U_n$.

$$\frac{1}{C}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\cdots\cdots+\frac{1}{C_n},\ C=\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}.$$

12. 电容的并联：$U_1=U_2=\cdots\cdots=U_n$

$Q=Q_1+Q_2+\cdots\cdots+Q_n$.

$C=C_1+C_2+\cdots\cdots+C_n$。

13. 电容器充电后的电能：$\overline{W}=\frac{1}{2}CU^2$.

14. 电场中的动能定理：$W_1+W_2+\cdots\cdots+W_n=\frac{1}{2}mv_t^2-\frac{1}{2}mv_0^2$.

15. 带电粒子在电场中的偏转：

垂直于电场线的方向作匀速直线运动：$L=v_0t$.

平行于电场线方向的加速度：$a=\frac{F}{m}$

电场力：F=qE

场强：$E=\frac{U_{偏}}{d}$

偏转距离（$qU_{加}=E_k$，P表示初动量）：

$$y=\frac{1}{2}at^2=\frac{qEL^2}{2mv_0^2}=\frac{qU_{偏}L^2}{2mv_0^2d}=\frac{qU_{偏}L^2}{4E_kd}=\frac{qmU_{偏}L^2}{2P^2d}=\frac{qU_{偏}L^2}{4qU_{加}d}=\frac{U_{偏}L^2}{4U_{加}d}.$$

偏转角（即合速度方向与初速度的夹角）：$tg\theta=\frac{v_y}{v_x}=\frac{at}{v_0}=\frac{qEL}{mv_0^2}=\cdots\cdots=\frac{y}{\frac{L}{2}}$.

（十一）电路

1. 电流强度：定义公式$I=\frac{q}{t}$，微观解释的公式I=neSv.

2. 电阻定律：$R=\rho\frac{l}{S}$. 电阻率：$\rho=\frac{RS}{l}$.

3. 部分电路欧姆定律：$I=\frac{U}{R}$.

4. 全电路欧姆定律：$I=\frac{E}{R+r}$.

5. 焦耳定律:$Q=I^2Rt$.

6. 路端电压:$U=E-Ir$.

7. 电功:$W=UIt$,$W=Pt$,对纯电阻电路还有:$W=\frac{U^2}{R}t$,$W=I^2Rt$.

8. 电功率:$P=\frac{W}{t}$,$P=UI$,对纯电阻电路还有:$W=\frac{U^2}{R}$,$W=I^2R$.

9. 非纯电阻电路:$W=Q+E_{其他}$.

10. 串联电路的规律:$I_1=I_2=\cdots\cdots=I_n$

$U=U_1+U_2+\cdots\cdots+U_n$.

$R=R_1+R_2+\cdots\cdots+R_n$.

$\frac{U_1}{R_1}=\frac{U_2}{R_2}=\cdots\cdots=\frac{U_n}{R_n}=I$.

$\frac{P_1}{R_1}=\frac{P_2}{R_2}=\cdots\cdots=\frac{P_n}{R_n}=I^2$.

11. 并联电路的规律:$U=U_1=U_2=\cdots\cdots=U_n$.

$I=I_1+I_2+\cdots\cdots+I_n$.

$\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\cdots\cdots+\frac{1}{R_n}$,$R=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}$。

$I_1R_1=I_2R_2=\cdots\cdots=I_nR_n=U$.

$P_1R_1=P_2R_2=\cdots\cdots=P_nR_n=U^2$.

12. 相同电池的串联:E 总=nE,r 总=nr.

13. 相同电池的并联:$E_{总}=E,r_{总}=\frac{r}{n}$.

14. 电源的输出功率:当 R=r 时,电源的输出功率最大,$P_m=\frac{E^2}{4r}$.

15. 法拉第电解第一定律:m=KIt=Kq.K 叫做电化当量.

16. 法拉第电解第二定律:$K=\frac{M}{Fn}$.F 叫法拉第恒量,F=9.65×10^2C/mol.

17. 基尔霍夫第一定律:

对于电路的任一节点有:$I_1+I_2+\cdots\cdots+I_n=0$.

18. 基尔霍夫第二定律:

对于电路中任一回路有:$I_1R_1+I_2R_2+\cdots\cdots+I_nR_n=E_1+E_2+\cdots\cdots+E_n$.

（十二）磁场

1. 安培力:F=BIL,F=BILsinθ

2. 磁感强度:$B=\frac{F}{IL}$.

3. 直线电流的磁感应强度:$B=\frac{KI}{r}$.

4. 磁通量:ϕ=BScosθ.

5. 磁力矩:Mm=NBIS,M=Mmcosθ.

6. 安培力做的功:W=NIΔϕ.

7. 洛伦兹力:f=qBv.f=qBvsinθ.

8. 带电粒子(不计重力)在磁场中作匀速圆周运动,

轨道半径:$r=\frac{mv}{qB}=\frac{P}{qB}=\frac{\sqrt{2mE_k}}{qB}=\frac{\sqrt{2mqU_{加}}}{qB}$.

周期:$T=\frac{2\pi m}{qB}$,

粒子在磁场中运动的时间(θ表示圆心角,单位是 rad):$t=\frac{\theta}{2\pi}T$.

9. 回旋加速器:

带电质点第 i 次进入 D 盒后的轨道半径:$r_i=\frac{mv_i}{qB}$.

带电质点的运动频率:$f=\frac{1}{T}=\frac{qB}{2\pi m}=\frac{B}{2\pi}(\frac{q}{m})$.

对于半径为 R 的 D 盒,带电质点获得的最大速度:$v=\frac{qBR}{m}=BR(\frac{q}{m})$.

带电质点获得的最大动能:$E_m=\frac{1}{2}m(\frac{q}{m})^2B^2R^2$.

（十三）电磁感应

1. 法拉第电磁感应定律:感应电动势

$E=N\frac{\Delta\phi}{t}$,E=BLv,E=BLvsinθ,E=NBSω,$E=\frac{1}{2}BL^2\omega$.

2. 感应电流:$I=\frac{E}{R_{总}}$.

3. 感应电量:$q=N\frac{\Delta\phi}{R_{总}}$.

4. 自感电动势:$E=L\frac{\Delta I}{t}$.

（十四）交流电电磁振荡电磁波

1. 正弦交流电的瞬时值:$e=E_m\sin\omega t$,$u=U_m\sin\omega t$,$i=I_m\sin\omega t$.

2. 正弦交流电的最大值:$E_m=NBS\omega$.

3. 正弦交流电的有效值:$E=\frac{E_m}{\sqrt{2}}$,$U=\frac{U_m}{\sqrt{2}}$,$I=\frac{I_m}{\sqrt{2}}$.

4. 交流电的平均值:$\overline{E}=N\frac{\Delta\phi}{t}$.

5. 交流电的磁力矩:$M=M_m\cos^2\omega t$,其中$M_m=NBI_mS$.

6. 理想变压器原理:$\frac{U_1}{U_2}=\frac{n_1}{n_2}$,$P_1=P_2$.

一个输出端:$\frac{I_1}{I_2}=\frac{n_2}{n_1}$.

两个输出端:$U_1I_1=U_2I_2+U_3I_3$,或者:$n_1I_1=n_2I_2+n_3I_3$.

7. 远距离输电:$P_{耗}=I^2R_{线}=(\frac{P}{U})^2\rho\frac{L}{S}$.

8. 电磁振荡的周期:$T=2\pi\sqrt{LC}$,

频率:$f=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

9. 电磁波的速度、波长、周期、频率之间的关系:$c=\frac{\lambda}{T}=\lambda f=\lambda\gamma$。

10. 三相交流电：$e_A=E_m\sin\omega t$

$e_B=E_m\sin(\omega t-120°)$

$e_C=E_m\sin(\omega t-240°)$

星形接法中：$U_{线}=\sqrt{3}U_{相}$，$I_{线}=I_{相}$.

三角形接法中：$U_{线}=U_{相}$ $I_{线}=\sqrt{3}I_{相}$.

11. 三极管的放大系数：$\beta=\frac{\Delta I_c}{\Delta I_b}\approx\frac{I_c}{I_b}$.

（十五）几何光学　光的本性

1.折射定律：$n=\frac{\sin i}{\sin r}=\frac{c}{v}=\frac{\lambda}{\lambda'}$.

2.全反射的临界角：$C=\arcsin\frac{1}{n}$.

3.视深公式：$h'=\frac{h}{n}$.

4.三棱镜：$n=\frac{\sin\frac{\alpha+\delta_{min}}{2}}{\sin\frac{\alpha}{2}}$. α为三棱镜的顶角，$\delta_{min}$为最小偏向角.

5.透镜成像的公式：$\frac{1}{u}+\frac{1}{v}=\frac{1}{f}$，牛顿公式：x·x’=$f^2$. 放大率：$m=\frac{|v|}{u}$.

6.共轭法测凸透镜的焦距：$f=\frac{L^2-d^2}{4L}$.

7.双缝干涉中相邻两条明(暗)纹之间的距离：$\Delta x=\frac{L}{d}\lambda$.

8.光子的能量：$E=h\gamma=\frac{hc}{\lambda}=mc^2=pc$.

9.爱因斯坦光电效应方程：$\frac{1}{2}mv_m^2=h\gamma-W$.

（十六）原子　原子核

1．玻尔假设第二条：$h\gamma=E_{初}-E_{末}$.

2．玻尔假设第三条：$mvr=n\frac{h}{2\pi}$，n=1, 2, 3, ……

3.氢原子的两个公式：$r_n=n^2r_1$，$E_n=\frac{1}{n^2}E_1$，n=1, 2, 3, ……，n为量子数.

$r_1=0.53\times10^{-10}m$，E_1=-13.6eV.

4.放射性元素的衰变规律：$N=N_0(\frac{1}{2})^{\frac{t}{T}}$.

5.爱因斯坦质能方程：$E=mc^2$，$\Delta E=\Delta mc^2$.

6.α衰变的核反应方程：${}_Z^AX\rightarrow{}_{Z-2}^{A-4}Y+{}_2^4He$.

7.β衰变的核反应方程：${}_Z^AX\rightarrow{}_{Z+1}^AY+{}_{-1}^0e$.

8.质子的发现核反应方程：${}_7^{14}N+{}_2^4He\rightarrow{}_8^{17}O+{}_1^1H$.

9.中子的发现核反应方程：${}_4^9Be+{}_2^4He\rightarrow{}_6^{12}C+{}_0^1n$.

10.放射性同位素的发现及正电子的发现核反应方程：

${}_{13}^{17}Al+{}_2^4He\rightarrow{}_{15}^{30}P+{}_0^1n$，

${}_{15}^{30}P\rightarrow{}_{14}^{30}Si+{}_{+1}^0e$.

11.重核裂变的核反应方程：${}_{92}^{235}U+{}_0^1n\rightarrow{}_{54}^{136}Xe+{}_{38}^{90}Sr+10{}_0^1n+\Delta E$.

12.轻核聚变的核反应方程：${}_1^2H+{}_1^3H\rightarrow{}_2^4He+{}_0^1n+\Delta E$.

13.基本粒子：${}_0^1n\rightarrow{}_1^1H+{}_{-1}^0e$，${}_1^1H\rightarrow{}_0^1n+{}_{+1}^0e+\gamma$，${}_0^1n\rightarrow{}_1^1H+{}_{-1}^0e+\bar{\gamma}$.

14.相对论：$m=\frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$.

（十七）常用常量

1．水的密度：$\rho=1.0\times10^3kg/m^3$.

2．真空中的光速度：$c=3.0\times10^8m/s$.

3．万有引力恒量：$G=6.67\times10^{-11}N\cdot m^2/kg^2$.

4.理想气体恒量：$R=8.31J/(mol\cdot K)=0.082$大气压·升$/(mol\cdot K)$.

5．静电力恒量：$k=9.0\times10^9N\cdot m^2/kg^2$.

6.电子的质量：$m_e=0.91\times10^{-30}kg$.

7.质子的质量：$m_H=1.67\times10^{-27}kg$.

8.电子的电量：$e=1.6\times10^{-19}C$.

9.电子的荷质比：$\frac{e}{m}=1.76\times10^{11}C/kg$.

10.中子的质量：$m_n=1.67\times10^{-27}kg$.

11.普朗克常数：$h=6.63\times10^{-34}J\cdot s$

12.阿佛加德罗常数：$N_A=6.02\times10^{23}mol^{-1}$.

13.分子的直径：10^{-10}m数量级，原子的直径：10^{-10}m数量级，原子核的直径：10^{-15}m数量级.

（十八）中学物理常用的数学公式

1．一元二次方程：$ax^2+bx+c=0$，$\Delta=b^2-4ac\geq0$，

$x_{1,2}=\frac{-b\pm\sqrt{\Delta}}{2a}$.

2．直角三角形的知识：$c^2=a^2+b^2$，

$\sin\theta=\frac{a}{c}$，$\cos\theta=\frac{b}{c}$，$tg\theta=\frac{a}{b}$，$ctg\theta=\frac{b}{a}$，$ctg\theta=\frac{1}{tg\theta}$.

$\sin30°=\frac{1}{2}$，$\sin45°=\frac{\sqrt{2}}{2}$，$\sin60°=\frac{\sqrt{3}}{2}$，$\sin37°=\frac{3}{5}$.

$\cos30°=\frac{\sqrt{3}}{2}$，$\cos45°=\frac{\sqrt{2}}{2}$，$\cos60°=\frac{1}{2}$，$\cos37°=\frac{4}{5}$.

$tg30°=\frac{\sqrt{3}}{3}$，$tg45°=1$，$tg60°=\sqrt{3}$，$tg37°=\frac{3}{4}$.

3. $\sin^2\theta+\cos^2\theta=1$.

4. $\sin2\theta=2\sin\theta\cos\theta$.

5. $\sin(\alpha\pm\beta)=\sin\alpha\cos\beta\pm\cos\alpha\sin\beta$

6. $\cos(\alpha\pm\beta)=\cos\alpha\cos\beta\pm\sin\alpha\sin\beta$

7. $y=a\sin\theta+b\cos\theta=\sqrt{a^2+b^2}\sin(\theta+\phi),\phi=arctg\frac{b}{a}$,

当$\theta=\frac{\pi}{2}-\phi$时,$y$有最大.

8. 当$\theta<5^\circ=\frac{\pi}{36}$时,$\sin\theta\approx tg\theta\approx\theta$.

9. 均值不等式:$a+b\geq 2\sqrt{ab}$.

10. 等差数列 n 项和:$S_n=\frac{n(a_1+a_n)}{2}$.

11. 等比数列前 n 项和:$S_n=\frac{a_1-a_nq}{1-q}$

12. 无穷递缩等比数列求和:$S=\frac{a_1}{1-q}$.

13. 二项式定理:

$(a+b)^n=C_n^0a^n+C_n^1a^{n-1}b^1+\cdots\cdots+C_n^ra^{n-r}b^r+\cdots\cdots+C_n^nb^n$.

14. 当α很小时,$(1+\alpha)^n\approx 1+n\alpha$.

15. 球的体积公式:$V=\frac{4}{3}\pi R^3$.

16. 两点 $P_1(x_1,y_1)$ 和 $P_2(x_2,y_2)$ 之间的距离:$|P_1P_2|=\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2}$.

17. 点到直线的距离:$P(x_0,y_0)$到直线 Ax+By+C=0 的距离公式:

$$d=\frac{|Ax_0+By_0+C|}{\sqrt{A^2+B^2}}.$$

18. 椭圆的方程:$\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}=1$.

19. 对数的有关公式:$\log_a(MN)=\log_aM+\log_aN$

$$\log_a\left(\frac{M}{N}\right)=\log_aM-\log_aN$$

$$\log_aM^N=N\log_aM$$

$$\log_a\sqrt[N]{M}=\frac{1}{N}\log_aM$$

$$_a\log_aN=N$$

$$\log_aN=\frac{\log_bN}{\log_ba}.$$

(M>0,N>0,a>0 且 a≠0,b>0 且 b≠1.)

20. 两个重要极限:$\lim_{x\to0}\frac{\sin x}{x}=1$, $\lim_{x\to\infty}(1+\frac{1}{x})^x=e,e=2.7182818245\cdots$

(十九)微积分知识(了解)

1. 基本求导公式

$(C)'=0$ $\qquad$ $(x^\mu)'=\mu x^{\mu-1}$

$(a^x)'=a^x\ln a\ (a>0,a\neq1)$ $\qquad$ $(e^x)'=e^x$

$(\log_ax)'=\frac{1}{x\ln a}\ (a>0,a\neq1)$ $\qquad$ $(\ln x)'=\frac{1}{x}$

$(\sin x)'=\cos x$ $\qquad$ $(\cos x)'=-\sin x$

$(\tan x)'=\frac{1}{\cos^2x}=\sec^2x$ $\qquad$ $(\cot x)'=-\frac{1}{\sin^2x}=-\csc^2x$

$(\sec x)'=\sec x\tan x$ $\qquad$ $(\csc x)'=-\csc x\cot x$

2. 函数的和、差、积、商的求导法则

$[u(x)\pm v(x)]'=u'(x)\pm v'(x)$

$[u(x)v(x)]'=u'(x)v(x)+u(x)v'(x)$

$[Cu(x)]'=Cu'(x)$(C 为常数)

$$\left[\frac{u(x)}{v(x)}\right]'=\frac{u'(x)v(x)-u(x)v'(x)}{v^2(x)}(v(x)\neq0)$$

$$\left[\frac{C}{v(x)}\right]'=-\frac{Cv'(x)}{v^2(x)}(v(x)\neq0,C\text{为常数})$$

3.基本积分公式

根据导数基本公式和不定积分的定义可以得到下列基本积分公式:

(1) $\int0dx=C$

(2) $\int kdx=kx+C$(k 为常数) 特别地:$\int1dx=x+C$

(3) $\int x^\alpha dx=\frac{1}{\alpha+1}x^{\alpha+1}+C\quad(\alpha\neq-1)$

(4) $\int\frac{1}{x}dx=\ln|x|+C$

(5) $\int a^xdx=\frac{a^x}{\ln a}+C\quad(a>0,a\neq1)$

(6) $\int e^xdx=e^x+C$

(7) $\int\sin xdx=-\cos x+C$

(8) $\int\cos xdx=\sin x+C$

(9) $\int\frac{dx}{\cos^2x}=\int\sec^2xdx=\tan x+C$

(10) $\int\frac{dx}{\sin^2x}=\int\csc^2xdx=-\cot x+C$

(11) $\int\sec x\tan xdx=\sec x+C$

(12) $\int\csc x\cot xdx=-\csc x+C$

(13) $\int\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}dx=\arcsin x+C(=-\arccos x+C)$

(14) $\int\frac{1}{1+x^2}dx=\arctan x+C(=-\operatorname{arccot}x+C)$

(二十)可能会用到的数学公式(竞赛)

一、代数

1. 乘法及因式分解

$(a\pm b)^3=a^3\pm3a^2b+3ab^2\pm b^3$,

$(a+b+c)^2=a^2+b^2+c^2+2ab+2bc+2ca$,

$(a+b+c)^3=a^3+b^3+c^3+3a^2b+3ab^2+3b^2c+3bc^2+3a^2c+3ac^2+6abc$,

$a^3\pm b^3=(a\pm b)(a^2\mp ab+b^2)$,

$a^3+b^3+c^3-3abc=(a+b+c)(a^2+b^2+c^2-ab-bc-ca)$.

2. 比例

若$\frac{a}{b}=\frac{c}{d}$，则$\frac{a+b}{b}=\frac{c+d}{d}$(合比定理)，

$\frac{a-b}{b}=\frac{c-d}{d}$(分比定理)，

$\frac{a+b}{a-b}=\frac{c+d}{c-d}$(合分比定理).

3. 不等式

$a^2+b^2\geqslant 2ab$，$\sqrt{\frac{a^2+b^2}{2}}\geqslant\frac{a+b}{2}\geqslant\sqrt{ab}$，$\frac{a+b+c}{3}\geqslant\sqrt[3]{abc}$，$\frac{a_1+a_2+\cdots+a_n}{n}\geqslant\sqrt[n]{a_1a_2\cdots a_n}$.

4. 数列

$a+(a+d)+(a+2d)+\cdots+[a+(n-1)d]=n(a+\frac{n-1}{2}d)$，

$a+aq+aq^2+\cdots+aq^{n-1}=a\cdot\frac{1-q^n}{1-q}(q\neq 1)$，

$1+2+3+\cdots+n=\frac{n(n+1)}{2}$，$1+3+5+\cdots+(2n-1)=n^2$，

$1^2+2^2+3^2+\cdots+n^2=\frac{n(n+1)(2n+1)}{6}$，$1^2+3^2+5^2+\cdots+(2n-1)^2=\frac{n(4n^2-1)}{3}$，

$1^3+2^3+3^3+\cdots+n^3=\frac{n^2(n+1)^2}{4}$，$\frac{1}{1\cdot 2}+\frac{1}{2\cdot 3}+\frac{1}{3\cdot 4}+\cdots+\frac{1}{n(n+1)}=1-\frac{1}{n+1}$.

5. 指数与对数

$a^xa^y=a^{x+y}$，$(a^x)^y=a^{xy}$，$\frac{a^x}{a^y}=a^{x-y}$，$\sqrt[y]{a^x}=a^{\frac{x}{y}}$，

$a^{\log_a b}=b$，$\log_a 1=0$，$\log_a a=1$，$\log_a(b_1\cdot b_2)=\log_a b_1+\log_a b_2$，

$\log_a\left(\frac{b_1}{b_2}\right)=\log_a b_1-\log_a b_2$，$\log_a b^x=x\log_a b$，$\log_a b=\frac{\log_c b}{\log_c a}$，$\ln b=\frac{\lg b}{\lg e}$，e=2.7183，

ln10≈2.3026，lge≈0.4343.

6. 排列、组合及二项式公式

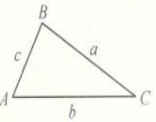
$A_m^n=m(m-1)(m-2)\cdots[m-(n-1)]=\frac{m!}{(m-n)!}$，

$C_m^n=\frac{m(m-1)(m-2)\cdots[m-(n-1)]}{1\cdot 2\cdot 3\cdot\cdots\cdot n}\cdots=\frac{m!}{n!\ (m-n)!}$，

$(1+x)^n=1+nx+\frac{n(n-1)}{2!}x^2+\cdots+\frac{n(n-1)\cdots[n-(k-1)]}{k!}x^k+\cdots+x^n$.

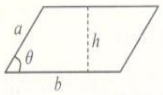
二、几何

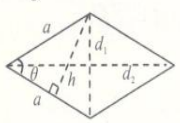
1. 面积公式

三角形 

$S=\frac{1}{2}ab\sin C$，

$S=\sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)}$，其中$s=\frac{1}{2}(a+b+c)$，

平行四边形 $S=bh$，$S=ab\sin\theta$， 

菱形 $S=ah$，$S=a^2\sin\theta$，$S=\frac{d_1d_2}{2}$， 

扇形 $S=\frac{1}{2}Rl=\frac{1}{2}R^2\theta$， 

球 $S=4\pi R^2$，

球缺(球冠)$S=2\pi Rh$(不包括底面)，

椭圆 $S=\pi ab$(a、b 分别为长半轴、短半轴).

2. 体积公式

圆锥 $V=\frac{1}{3}\pi R^2h$，圆台 $V=\frac{1}{3}\pi h(R_1^2+R_2^2+R_1R_2)$，球 $V=\frac{4}{3}\pi R^3=\frac{1}{6}\pi D^3$，

球缺 $V=\frac{1}{6}\pi h(3r^2+h^2)=\pi h^2\left(R-\frac{h}{3}\right)$($r$ 为平切圆半径、R 为球缺半径)，

棱柱 $V=SH$，棱锥 $V=\frac{1}{3}SH$，棱台 $V=\frac{1}{3}H(S_1+S_2+\sqrt{S_1S_2})$.

3. 解析几何

圆$(x-a)^2+(y-b)^2=R^2$，

椭圆$\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}=1$(焦距 $2c$，$c=\sqrt{a^2-b^2}$，离心率 $0<e=\frac{c}{a}<1$)，

双曲线$\frac{x^2}{a^2}-\frac{y^2}{b^2}=1$(焦距 $2c$，$c=\sqrt{a^2+b^2}$，离心率 $e=\frac{c}{a}>1$，渐近线 $y=\pm\frac{b}{a}x$)，

抛物线 $y^2=2px$(焦点 $F(\frac{p}{2},0)$，离心率 $e=1$，准线 $x=-\frac{p}{2}$)，

圆锥曲线极坐标方程 $\rho=\frac{p}{1-e\cos\theta}$($p$ 为半正焦弦长).

三、三角

1. 基本关系

$\sin\alpha\cdot\csc\alpha=1$，$\cos\alpha\cdot\sec\alpha=1$，$\tan\alpha\cdot\cot\alpha=1$，$\sin^2\alpha+\cos^2\alpha=1$.

2. 两角和与差的三角函数

$\sin(\alpha\pm\beta)=\sin\alpha\cos\beta\pm\cos\alpha\sin\beta$，$\cos(\alpha\pm\beta)=\cos\alpha\cos\beta\mp\sin\alpha\sin\beta$，

$\tan(\alpha\pm\beta)=\frac{\tan\alpha\pm\tan\beta}{1\mp\tan\alpha\tan\beta}$，$\cot(\alpha\pm\beta)=\frac{\cot\alpha\cot\beta\mp 1}{\cot\beta\pm\cot\alpha}$.

3. 二倍角公式

$\sin 2\alpha=2\sin\alpha\cos\alpha$，$\cos 2\alpha=\cos^2\alpha-\sin^2\alpha=1-2\sin^2\alpha=2\cos^2\alpha-1$，

$\tan 2\alpha=\frac{2\tan\alpha}{1-\tan^2\alpha}$，$\cot 2\alpha=\frac{\cot^2\alpha-1}{2\cot\alpha}$，$\sin 3\alpha=3\sin\alpha-4\sin^3\alpha$，$\cos 3\alpha=4\cos^3\alpha-3\cos\alpha$.

4. 半角公式

$\sin\frac{\alpha}{2}=\pm\sqrt{\frac{1-\cos\alpha}{2}}$，$\cos\frac{\alpha}{2}=\pm\sqrt{\frac{1+\cos\alpha}{2}}$，

$\tan\frac{\alpha}{2}=\pm\sqrt{\frac{1-\cos\alpha}{1+\cos\alpha}}=\frac{1-\cos\alpha}{\sin\alpha}=\frac{\sin\alpha}{1+\cos\alpha}$.

5. 和差与积关系

$\sin\alpha+\sin\beta=2\sin\frac{\alpha+\beta}{2}\cos\frac{\alpha-\beta}{2}$，$\sin\alpha-\sin\beta=2\cos\frac{\alpha+\beta}{2}\sin\frac{\alpha-\beta}{2}$，

$\cos\alpha+\cos\beta=2\cos\frac{\alpha+\beta}{2}\cos\frac{\alpha-\beta}{2}$，$\cos\alpha-\cos\beta=-2\sin\frac{\alpha+\beta}{2}\sin\frac{\alpha-\beta}{2}$，

$2\sin\alpha\cos\beta=\sin(\alpha+\beta)+\sin(\alpha-\beta)$，$2\cos\alpha\cos\beta=\cos(\alpha+\beta)+\cos(\alpha-\beta)$，

$-2\sin\alpha\sin\beta=\cos(\alpha+\beta)-\cos(\alpha-\beta)$.

6. 解三角形

正弦定理$\frac{a}{\sin A}=\frac{b}{\sin B}=\frac{c}{\sin C}=2R$($R$ 为外接圆半径)，余弦定理 $a^2=b^2+c^2-2bc\cos A$.

四、微积分

1. 导数

$C'=0$，$(Cv)'=Cv'$，$(u\pm v)'=u'\pm v'$，$(uv)'=u'v+uv'$，$\left(\frac{u}{v}\right)'=\frac{u'v-uv'}{v^2}$，

$(x^n)'=nx^{n-1}$，$(a^x)'=a^x\ln a$，$(\ln x)'=\frac{1}{x}$，$(\log_a x)'=\frac{1}{x\ln a}$，$(e^x)'=e^x$，$(\sin x)'=\cos x$，

$(\cos x)'=-\sin x$，$(\tan x)'=\sec^2 x$，$(\cot x)'=-\csc^2 x$，$(\arcsin x)'=\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$，

$(\arccos x)'=-\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$，$(\arctan x)'=\frac{1}{1+x^2}$，$(\operatorname{arccot} x)'=-\frac{1}{1+x^2}$.

2. 导数与微分应用

$f'(x_0)=0$，且 $f''(x_0)\neq 0$，则 $f(x_0)$ 为极值. 当 $f''(x_0)<0$ 时，$f(x_0)$ 为极大值；当 $f''(x_0)>0$ 时，$f(x_0)$ 为极小值.

当 $|x|$ 很小时，$\sqrt[n]{1+x}\approx 1+\frac{x}{n}$，$\sin x\approx x$，$\tan x\approx x$，$e^x\approx 1+x$，$a^x\approx 1+x\ln a$，$\ln(1+x)\approx x$.

3. 积分

$$\int \mathrm{d}x = x+C,\int x^n\mathrm{d}x=\frac{x^{n+1}}{n+1}+C,\int\frac{\mathrm{d}x}{x}=\ln x+C,\int e^x\mathrm{d}x=e^x+C,\int a^x\mathrm{d}x=\frac{a^x}{\ln a}+C,$$

$$\int\sin x\mathrm{d}x=-\cos x+C,\int\cos x\mathrm{d}x=\sin x+C,\int\tan x\mathrm{d}x=-\ln\cos x+C,$$

$$\int\cot x\mathrm{d}x=\ln\sin x+C,\int\frac{1}{\cos^2 x}\mathrm{d}x=\tan x+C,\int\frac{1}{\sin^2 x}\mathrm{d}x=-\cot x+C.$$

五、幂级数展开式

$$e^x=1+x+\frac{x^2}{2!}+\frac{x^3}{3!}+\cdots+\frac{x^n}{n!}+\cdots,$$

$$\ln(1+x)=x-\frac{x^2}{2}+\frac{x^3}{3}-\frac{x^4}{4}+\cdots+(-1)^{n-1}\frac{x^n}{n}+\cdots(-1<x\leqslant 1),$$

$$\sin x=\frac{x}{1}-\frac{x^3}{3!}+\frac{x^5}{5!}-\frac{x^7}{7!}+\cdots,\cos x=1-\frac{x^2}{2!}+\frac{x^4}{4!}-\frac{x^6}{6!}+\cdots,$$

$$\frac{1}{1+x}=1-x+x^2-x^3+x^4-\cdots(|x|<1).$$

第十部分　规范答题（计算题）

一. 必要的文字说明

必要的文字说明的目的是说明物理过程和答题依据，答题时应该说些什么呢？

我们应该从以下几个方面给予考虑：

1.说明研究对象(个体或系统，尤其是要用整体法和隔离法相结合求解的题目，一定要注意研究对象的转移和转化问题)；

2.画出受力分析图、电路图、光路图或运动过程的示意图；

3.说明所设字母的物理意义；

4.说明规定的正方向、零势点(面)；

5.说明题目中的隐含条件、临界条件；

6.说明所列方程的依据、名称及对应的物理过程或物理状态；

7.说明所求结果的物理意义(有时需要讨论分析)。

二.要有必要的方程式

1.写出的方程式(这是评分依据)必须是原型公式，不能以变形的结果式代替方程式，如带电粒子在磁场中运动时应有 $qvB=mv^2/r$；

2.要用字母表达方程，不要用掺有数字的方程，不要方程套方程；

3.要用原始方程组联立求解，不要用连等式，不断地“续”进一些内容；

4.方程式有多个的，应分式布列(分步得分)，不要合写一式，对各方程式最好能编号。

三.要有必要的演算过程及明确的结果

1.演算时一般先进行文字运算，从列出的方程推导出结果的计算式，最后代入数据并写出结果；

2.数据的书写要用科学记数法；

3.计算结果的有效数字的位数应根据题意确定，取两位或三位即可，如有特殊要求，应按要求选定；

4.计算结果是数据的要带单位，最好不要以无理数或分数作为计算结果(文字式的系数可以)，是字母符号的不用带单位。

四.解题过程中运用数学的方式有讲究

1.“代入数据”，解方程的具体过程可以不写出；

2.所涉及的几何关系只需写出判断结果而不必证明；

3.重要的中间结论的文字表达式要写出来；

4.所求的方程若有多个解，都要写出来，然后通过讨论，该舍去的舍去；

5.数字相乘时，数字之间不要用“·”，而应用“×”进行连接;相除时也不要用“/”，而应用“÷”。

五.使用各种字母符号要规范

1.字母符号要写清楚、规范，忌字迹潦草，阅卷时因为“v、r、ν”不分，大小写“M、m”或“L、l”不分，“G”的草体像“a”，希腊字母“ρ、μ、β、η”笔顺或形状不对而被扣分已屡见不鲜；

2.尊重题目所给的符号，题目给了符号的一定不要再另立符号.如题目给出半径是 r，你若写成 R 就算错；

3.一个字母在一个题目中只能用来表示一个物理量，忌一字母多用；一个物理量在同一题中不能有多个符号，以免混淆；

4.尊重习惯用法，如拉力用 F，摩擦力用 f 表示，阅卷人一看便明白，如果用反了就会带来误解；

5.角标要讲究，角标的位置应当在右下角，比字母本身小许多。角标的选用亦应讲究，如通过 A 点的速度用 v_A 就比用 v_1 好，通过某相同点的速度，按时间顺序第一次用 v_1、第二次用 v_2 就很清楚，如果倒置，必然带来误解；

6.物理量单位的符号源于人名的单位，由单个字母表示的应大写，如库仑 C、亨利 H，由两个字母组成的单位，一般前面的字母用大写，后面的字母用小写，如 Hz、Wb。

六.学科语言要规范，有学科特色

七.绘制图形、图象要清晰、准确

1.必须用铅笔(便于修改)、圆规、直尺、三角板绘制，反对随心所欲徒手画；

2.画函数图象时，要画好坐标原点和坐标轴上的箭头，标好物理量的符号、单位及坐标轴上的数据；

3.图形、图线应清晰、准确，线段的虚实要分明，有区别。

第十一部分 浙江省新高考真题集

（重力加速度 g 均取 10m/s^2。）

①2022 年 6 月浙江省普通高校招生**选考**科目考试**物理试题**

选择题部分

一、选择题Ⅰ（本题共 13 小题，每小题 3 分，共 39 分。每小题列出的四个备选项中只有一个是符合题目要求的，不选、多选、错选均不得分）

1.下列属于力的单位是(　　)

A．kg • m/s^2　　B．kg • m/s

C．kg • m^2/s　　D．kg • s / m^2

2.下列说法正确的是(　　)

A．链球做匀速圆周运动过程中加速度不变

B．足球下落过程中惯性不随速度增大而增大

C．乒乓球被击打过程中受到的作用力大小不变

D．篮球飞行过程中受到空气阻力的方向与速度方向无关

3.如图所示，鱼儿摆尾击水跃出水面，吞食荷花花瓣的过程中，下列说法正确的是(　　)



第 3 题图

A．鱼儿吞食花瓣时鱼儿受力平衡

B．鱼儿摆尾出水时浮力大于重力

C．鱼儿摆尾击水时受到水的作用力

D．研究鱼儿摆尾击水跃出水面的动作可把鱼儿视为质点

4.关于双缝干涉实验，下列说法正确的是(　　)

A．用复色光投射就看不到条纹

B．明暗相间条纹是两列光在屏上叠加的结果

C．把光屏前移或后移，不能看到明暗相间条纹

D．蓝光干涉条纹的间距比红光的大

5.下列说法正确的是(　　)

A．恒定磁场对静置于其中的电荷有力的作用

B．小磁针 N 极在磁场中的受力方向是该点磁感应强度的方向

C．正弦交流发电机工作时，穿过线圈平面的磁通量最大时，电流最大

D．升压变压器中，副线圈的磁通量变化率大于原线圈的磁通量变化率

6.神州十三号飞船采用“快速返回技术”，在近地轨道上，返回舱脱离天和核心舱，在圆轨道环绕并择机返回地面。则(　　)

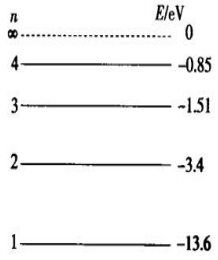
A．天和核心舱所处的圆轨道距地面高度越高，环绕速度越大

B．返回舱中的宇航员处于失重状态，不受地球的引力

C．质量不同的返回舱与天和核心舱可以在同一轨道运行

D．返回舱穿越大气层返回地面过程中，机械能守恒

7.图为氢原子的能级图。大量氢原子处于 n=3 的激发态，在向低能级跃迁时放出光子，用这些光子照射逸出功为 2. 29eV 的金属钠。下列说法正确的是



第 7 题

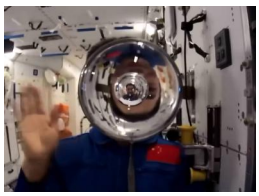
A．逸出光电子的最大初动能为 10. 80eV

B．n=3 跃迁到 n=1 放出的光电子动量最大

C．有 3 种频率的光子能使金属钠产生光电效应

D．用 0. 85eV 的光子照射，氢原子跃迁到 n=4 激发态

8.如图所示，王亚平在天宫课堂上演示了水球光学实验，在失重环境下，往大水球中央注入空气，形成了一个空气泡，气泡看起来很明亮，其主要原因是(　　)



第 8 题

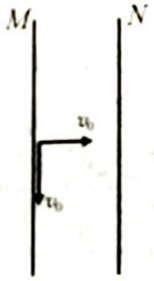
A.气泡表面有折射没有全反射

B.光射入气泡衍射形成“亮斑”

C.气泡表面有折射和全反射

D.光射入气泡干涉形成“亮斑”

9.如图所示，带等量异种电荷的两正对平行金属板 M、N 间存在匀强电场，板长为 L（不考虑边界效应）。t=0 时刻，M 板中点处的粒子源发射两个速度大小为 v_0 的相同粒子，垂直 M 板向右的粒子，到达 N 板时速度大小为 $\sqrt{2}v_0$；平行 M 板向下的粒子，刚好从 N 板下端射出。不计重力和粒子间的相互作用，则(　　)



第 9 题图

A.M 板电势高于 N 板电势

B.两个粒子的电势能都增加

C.粒子在两板间的加速度为 $a=\dfrac{2v_0^2}{L}$

D.粒子从 N 板下端射出的时间 $t=\dfrac{(\sqrt{2}-1)L}{2v_0}$

10.如图所示，一轻质晒衣架静置于水平地面上，水平横杆与四根相同的斜杆垂直，两斜杆夹角 θ=60°。一重为 G 的物体悬挂在横杆中点，则每根斜杆受到地面的(　　)

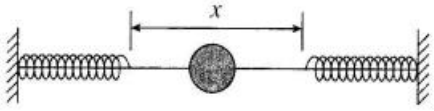


第 10 题

A.作用力为 $\dfrac{\sqrt{3}}{3}G$　　B.作用力为 $\dfrac{\sqrt{3}}{6}G$

C.摩擦力为 $\dfrac{\sqrt{3}}{4}G$　　D.摩擦力为 $\dfrac{\sqrt{3}}{8}G$

11.如图所示，一根固定在墙上的水平光滑杆，两端分别固定着相的轻弹簧，两弹簧自由端相距 x。套在杆上的小球从中点以初度 v 向右运动，小球将做周期为 T 的往复运动，则(　　)



A．小球做简谐运动

B．小球动能的变化周期为 $\dfrac{T}{2}$

C．两根弹簧的总弹性势能的变化周期为 T

D．小球的初速度为 $\dfrac{v}{2}$ 时，其运动周期为 $2T$

12.风力发电已成为我国实现“双碳”目标的重要途经之一。如图所示，风力发电机是一种将风能转化为电能的装置。某风力发电机在风速为 9m/s 时，输出电功率为 405kW，风速在 5~10m/s 范围内，转化效率可视为不变。该风机叶片旋转一周扫过的面积为 A，空气密度为 ρ，风场风速为 v，并保持风正面吹向叶片。下列说法正确的是(　　)



第 12 题

A.该风力发电机的输出电功率与风速成正比

B.单位时间流过面积 A 的流动空气动能为 $\dfrac{1}{2}\rho Av^2$

C.若每天平均有 1. 0×10^{8}kW 的风能资源，则每天发电量为 2. 4×10^{9}kW • h

D.若风场每年有 5000h 风速在 6~10m/s 的风能资源，则该发电机年发电量至少为 6. 0×10^{5}kW • h

13.小明用额定功率为1200W、最大拉力为300N的提升装置，把静置于地面的质量为20kg的重物竖直提升到高为85.2m的平台，先加速再匀速，最后做加速度大小不超过5m/s²的匀减速运动，到达平台速度刚好为零，则提升重物的最短时间为（　　）

A．13.2s　　B．14.2s　　C．15.5s　　D．17.0s

二、选择题Ⅱ（本题共3小题，每小题2分，共6分。每小题列出的四个备选项中至少有一个是符合题目要求的。全部选对的得2分，选对但不选全的得1分，有选错的得0分）

14. 秦山核电站生产 $^{14}_{6}C$ 的核反应方程为 $^{14}_{7}N+{}^{1}_{0}n\rightarrow{}^{14}_{6}C+X$，其产物 $^{14}_{6}C$ 的衰变方程为 $^{14}_{6}C\rightarrow{}^{14}_{7}N+{}^{0}_{-1}e$。下列说法正确的是（　　）

A.X是 $^{1}_{1}H$

B. $^{14}_{6}C$ 可以用作示踪原子

C. $^{0}_{-1}e$ 来自原子核外

D.经过一个半衰期，10个 $^{14}_{6}C$ 将剩下5个

15.如图为某一径向电场示意图，电场强度大小可表示为 $E=\frac{a}{r}$，a 为常量。比荷相同的两粒子在半径 r 不同的圆轨道运动。不考虑粒子间的相互作用及重力，则（　　）



第15题图

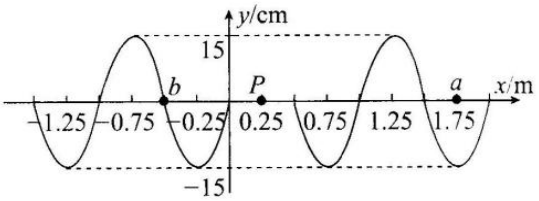
A．轨道半径 r 小的粒子角速度一定小

B．电荷量大的粒子的动能一定大

C．粒子的速度大小与轨道半径 r 一定无关

D．当加垂直纸面磁场时，粒子一定做离心运动

16.位于 $x=0.25$m 的波源 P 从 $t=0$ 时刻开始振动，形成的简谐横波沿 x 轴正负方向传播，在 $t=2.0$s 时波源停止振动，$t=2.1$s 时的部分波形如图所示，其中质点 a 的平衡位置 $x_a=1.75$m，质点 b 的平衡位置 $x_b=-0.5$m。下列说法正确的是（　　）



A.沿 x 轴正负方向传播的波发生干涉

B.$t=0.42$s 时，波源的位移为正

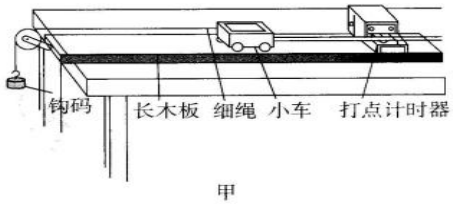
C.$t=2.25$s 时，质点 a 沿 y 轴负方向振动

D.在0到2s内，质点 b 运动总路程是2.55m

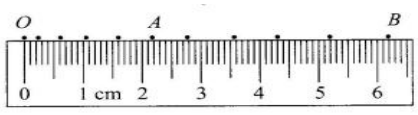
非选择题部分

三、非选择题（本题共6小题，共55分）

17.（7分）（1）①“探究小车速度随时间变化的规律”实验装置如图1所示，长木板水平放置，细绳与长木板平行。图2是打出纸带的一部分，以计数点 O 为位移测量起点和计时起点，则打计数点 B 时小车位移大小为__▲__cm。由图3中小车运动的数据点，求得加速度为__▲__m/s²（保留两位有效数字）。



甲



乙

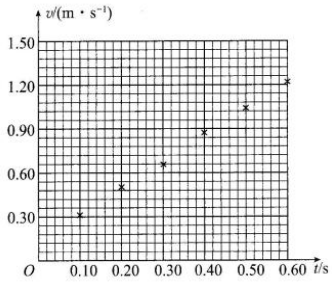
②利用图1装置“探究加速度与力、质量的关系”的实验，需调整的是__▲__（多选）。

A．换成质量更小的车

B．调整长木板的倾斜程度

C．把钩码更换成砝码盘和砝码

D．改变连接小车的细绳与长木板的夹角



丙

（2）“探究求合力的方法”的实验装置如图丁所示，在该实验中，

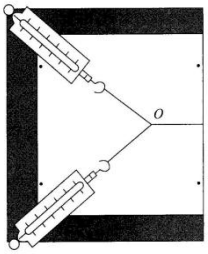
①下列说法正确的是__▲__（单选）；

A.拉着细绳套的两只弹簧秤，稳定后读数应相同

B.在已记录结点位置的情况下，确定一个拉力的方向需要再选择相距较远的两点。

C.测量时弹簧秤外壳与木板之间不能存在摩擦

D.测量时，橡皮条、细绳和弹簧秤应贴近并平行于木板



丁

② 若只有一只弹簧秤，为了完成该实验至少需要__▲__（选填“2”、“3”或“4”）次把橡皮条结点拉到 O。

18.（7分）（1）探究滑动变阻器的分压特性，采用图1所示的电路，探究滑片 P 从 A 移到 B 的过程中，负载电阻 R 两端的电压变化。

①图2为实验器材部分连线图，还需要__▲__（选填 af、bf、fd、fc、ce 或 cg）连线（多选）。

②图3所示电压表的示数为__▲__V。

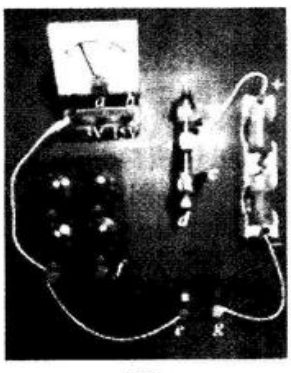


图2

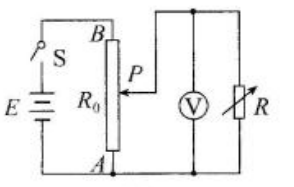


图1



图3

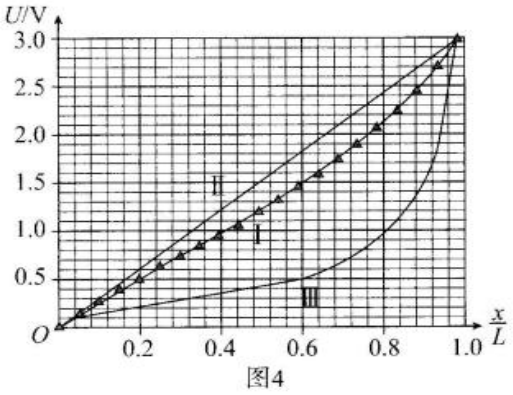


图4

③已知滑动变阻器的最大阻值 R_0=10Ω，额定电流 I=1.0A。选择负载电阻 R=10Ω，以 R 两端电压 U 为纵轴，为 $\frac{x}{L}$ 横轴（x 为 AP 的长度，L 为 AB 的长度），得到 $U-\frac{x}{L}$ 分压特性曲线为图 4 中的“I”；当 R=100Ω，分压特性曲线对应图 4 中的__▲__（选填“II”或“III”）；则滑动变阻器最大阻值的选择依据是__▲__。

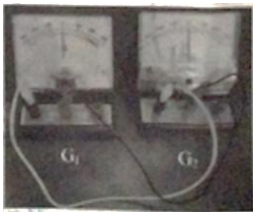
（2）两个相同的电流表 G_1 和 G_2 如图 5 所示连接，晃动 G 表，当指针向左偏转时，静止的 G_2 表的指针也向左偏转，原因是__▲__（多选）。

A．两表都是“发电机”

B．G_1 表是“发电机”，G_2 表是“电动机”

C．G_1 表和 G_2 表之间存在互感现象

D．G_1 表产生的电流流入 G_2 表，产生的安培力使 G_2 表指针偏转



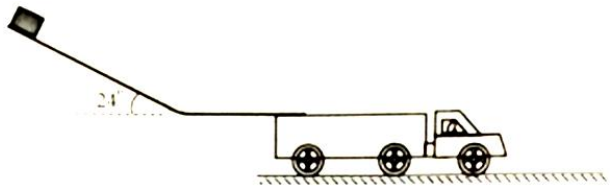
第 18 题图 5

19.（9 分）物流公司通过滑轨把货物直接装运到卡车中，如图所示，倾斜滑轨与水平面成 24° 角，长度 l_1=4m，水平滑轨长度可调，两滑轨间平滑连接。若货物从倾斜滑轨顶端由静止开始下滑，其与滑轨间的动摩擦因数均为 $\mu=\frac{2}{9}$，货物可视为质点（取 cos24°=0.9，sin24°=0.4）。

（1）求货物在倾斜滑轨上滑行时加速度 a_1 的大小；

（2）求货物在倾斜滑轨末端时速度 v 的大小；

（3）若货物滑离水平滑轨末端时的速度不超过 2m/s，求水平滑轨的最短长度 l_2。



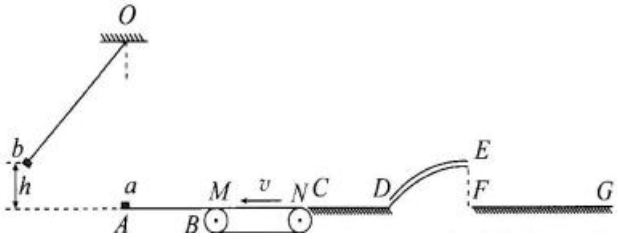
第 19 题图

20.(12 分)如图所示，在竖直面内，一质量 m 的物块 a 静置于悬点 O 正下方的 A 点，以速度 v 逆时针转动的传送带 MN 与直轨道 AB、CD、FG 处于同一水平面上，AB、MN、CD 的长度均为 l。圆弧形细管道 DE 半径为 R，EF 在竖直直径上，E 点高度为 H。开始时，与物块 a 相同的物块 b 悬挂于 O 点，并向左拉开一定的高度 h 由静止下摆，细线始终张紧，摆到最低点时恰好与 a 发生弹性正碰。已知 m=2g，l=1m，R=0.4m，H=0.2m，v=2m/s，物块与 MN、CD 之间的动摩擦因数 μ=0.5，轨道 AB 和管道 DE 均光滑，物块 a 落到 FG 时不反弹且静止。忽略 M、B 和 N、C 之间的空隙，CD 与 DE 平滑连接，物块可视为质点。

（1）若 h=1.25m，求 a、b 碰撞后瞬时物块 a 的速度 v_0 的大小；

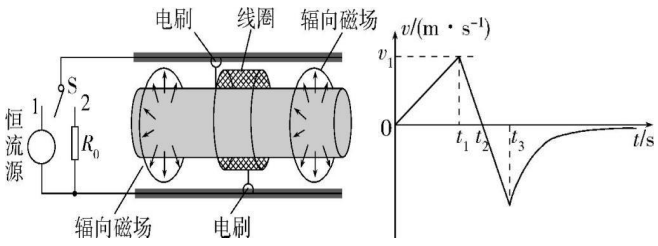
（2）物块 a 在 DE 最高点时，求管道对物块的作用力 F_N 与 h 间满足的关系；

（3）若物块 b 释放高度 0.9m<h<1.65m，求物块 a 最终静止的位置 x 值的范围（以 A 点为坐标原点，水平向右为正，建立 x 轴）。



21.（10 分）舰载机电磁弹射是现在航母最先进的弹射技术，我国在这一领域已达到世界先进水平。某兴趣小组开展电磁弹射系统的设计研究，如图 1 所示，用于推动模型飞机的动子（图中未画出）与线圈绝缘并固定，线圈带动动子，可在水平导轨上无摩擦滑动。线圈位于导轨间的辐向磁场中，其所在处的磁感应强度大小均为 B。开关 S 与 1 接通，恒流源与线圈连接，动子从静止开始推动飞机加速，飞机达到起飞速度时与动子脱离；此时 S 掷向 2 接通定值电阻 R_0，同时施加回撤力 F，在 F 和磁场力作用下，动子恰好返回初始位置停下。若动子从静止开始至返回过程的 v-t 图如图 2 所示，在 t_1 至 t_3 时间内 F=(800−10v)N，t_3 时撤去 F。已知起飞速度 v_1=80m/s，t_1=1.5s，线圈匝数 n=100 匝，每匝周长 l=1m，动子和线圈的总质量为 m=5kg,飞机的质量为 M=10kg，R_0=9.5Ω，B=0.1T，不计空气阻力和飞机起飞对动子运动速度的影响，求

（1）恒流源的电流 I；　　（2）线圈电阻 R；　　（3）时刻 t_3。



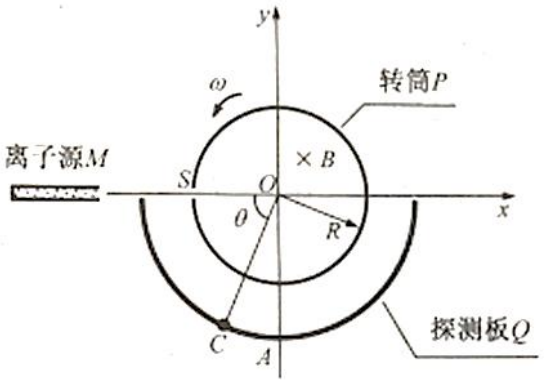
22.（10 分）离子速度分析器截面图如图所示。半径为 R 的空心转筒 P，可绕过 O 点、垂直 xOy 平面（纸面）的中心轴逆时针匀速转动（角速度大小可调），其上有一小孔 S。整个转筒内部存在方向垂直纸面向里的匀强磁场。转筒下方有一与其共轴的半圆柱面探测板 Q，板 Q 与 y 轴交于 A 点。离子源 M 能沿着 x 轴射出质量为 m、电荷量为 $-q$（q>0）、速度大小不同的离子，其中速度大小为 v_0 的离子进入转筒，经磁场偏转后恰好沿 y 轴负方向离开磁场。落在接地的筒壁或探测板上的离子被吸收且失去所带电荷，不计离子的重力和离子间的相互作用。

（1）①求磁感应强度 B 的大小；②若速度大小为 v_0 的离子能打在 Q 板的 A 处，求转筒 P 角速度ω的大小；

（2）较长时间后，转筒 P 每转一周有 N 个离子打在板 Q 的 C

处，OC 与 x 轴负方向的夹角为θ，求转筒转动一周的时间内，C 处受到平均冲力 F 的大小；

（3）若转筒 P 的角速度小于 $\frac{6v_0}{R}$，且 A 处探测到离子，求板 Q 上能探测到离子的其他θ' 的值（为探测点位置和 O 点连线与 x 轴负方向的夹角）。



第 22 题图

参考答案

一、单选题（39 分）

1.A　2.B　3.C　4.B　5.B　6.C　7.B　8.C
9.C　10.B　11.B　12.D　13.C

二、不定项选择题（6 分）

14. AB　15.BC　16.BD

三、非选择题（55 分）

17.（7 分）（1）①6.20±0.05　1.9±0.2　②BC
（2）①D　②3

18.（7 分）（1）①af、fd、ce　②1.50±0.02　③Ⅱ；$R_0<R$
(2)BD

19.（9 分）（1）牛顿定律　$mg\sin 24^0-\mu mg\cos 24^0=ma_1$
$a_1=2m/s^2$

（2）匀加速　$v^2=2a_1l_1$　v=4m/s

（3）匀减速　$v_1^2-v^2=2a_2l_2$　$a_2=-\mu g$　$l_2=2.7m$

20.（12 分）

（1）滑块 b 摆到最低点　$mgh=\frac{1}{2}mv_b^2$

弹性正碰 $v_0=v_b=5m/s$

(2)　以竖直向下为正方向　$F_N+mg=m\frac{v_E^2}{R}$

$Mgh-2\mu mgL-mgH=\frac{1}{2}mv_E^2$

$F_N=0.1h-0.14(h\geq 1.2m)$

从 h_1 释放时，滑块 a 运动到 E 点时速度恰好为零

$mgh_1-2\mu mgL-mgH=0$　$h_1=1.2m$

(3)　当 1.2m≤h<1.65m 时

$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}$　$s=v_Et$

$(3+\frac{\sqrt{3}}{5})m\leq x<(3.6+\frac{\sqrt{3}}{5})m$

当 0.9m<h<1.2m 时，从 h_2=0.9m 释放时，滑块 a 运动到距 C 点 0.8m 处速度恰好为零。

滑块 a 由 E 点速度为零，返回 CD 时距 C 点 0.6m 处速度恰好为零，故 2.6m< $x\leq 3m$.

21.（10 分）【全能解析】本题考查安培力的计算、法拉第电磁感应定律.

(1)安培力　$F_安=nBIl$　$a=\frac{v_1}{t_1}$

$I=\frac{(m+M)a}{nlB}=80\ A$

(2)感应电流　$I'=\frac{nBlv}{R_0+R}$

牛顿定律　$(800-10v)+\frac{n^2l^2B^2}{R_0+R}v=ma'$

在 t_1 至 t_3 期间加速度恒定，则 $\frac{n^2l^2B^2}{R_0+R}=10$　$R=0.5\ \Omega$

$a'=160\ m/s^2$

(3)$t_2-t_1=\frac{v_1}{a'}=0.5\ s$　$s=\frac{1}{2}t_2v_1=80\ m$

$-nBl\Delta q=0-ma'(t_3-t_2)$[或 $nBl\Delta q=ma'(t_3-t_2)$]

感应电量　$\Delta q=\frac{nBl[s-\frac{1}{2}a'(t_3-t_2)^2]}{R+R_0}$

$(t_3-t_2)^2+(t_3-t_2)-1=0$

$t_3=\frac{\sqrt{5}+3}{2}\ s$

22.（10 分）【全能解析】本题考查离子在磁场中的运动分析.

(1)①离子在磁场中运动

$qv_0B=\frac{mv_0^2}{R}$

$B=\frac{mv_0}{qR}$

②离子在磁场中的运动时间 $t=\frac{\pi R}{2v_0}$

转筒的转动角度 $\omega t=2k\pi+\frac{\pi}{2}$

$\omega=(4k+1)\frac{v_0}{R}$，$k=0,1,2,\cdots$

(2)设速度大小为 v 的离子在磁场中圆周运动半径为 R'

$R'=R\tan\frac{\theta}{2}$　$v=v_0\tan\frac{\theta}{2}$

离子在磁场中的运动时间 $t'=(\pi-\theta)\frac{R}{v_0}$

转筒的转动角度 $\omega't'=2n\pi+\theta$

转筒的转动角速度 $\omega'=\frac{(2n\pi+\theta)}{(\pi-\theta)}\frac{v_0}{R}$，$n=0,1,2,\cdots$

动量定理 $F\frac{2\pi}{\omega'}=Nmv$

$F=\frac{(2n\pi+\theta)N}{2(\pi-\theta)\pi}\frac{mv_0^2}{R}\tan\frac{\theta}{2}$，$n=0,1,2,\cdots$

(3)转筒的转动角速度

$\frac{(4k+1)v_0}{R}=\frac{(2n\pi+\theta')v_0}{(\pi-\theta')R}<\frac{6v_0}{R}$

$k=1,\theta'=\frac{5-2n}{6}\pi$，$n=0,2$

可得 $\theta'=\frac{5}{6}\pi,\frac{1}{6}\pi$

②2022 年 1 月浙江省高考选考物理卷

一、选择题Ⅰ(本题共 13 小题，每小题 3 分，共 39 分. 每小题列出的四个备选项中只有一个是符合题目要求的，不选、多选、错选均不得分)

1 单位为 J/m 的物理量是 (　　)

A. 力　　B. 功

C. 动能　　D. 电场强度

2. 下列说法正确的是 (　　)



甲　乙　丙　丁

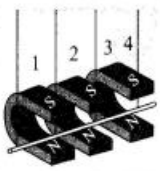
A. 研究甲图中排球运动员扣球动作时，排球可以看成质点

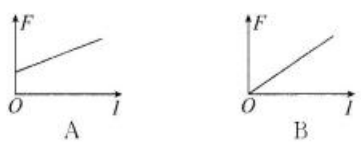
B. 研究乙图中乒乓球运动员的发球技术时，乒乓球不能看成质点

C. 研究丙图中羽毛球运动员回击羽毛球动作时，羽毛球大小可以忽略

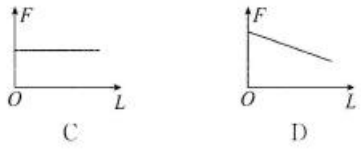
D. 研究丁图中体操运动员的平衡木动作时，运动员身体各部分的速度可视为相同

3. 利用如图所示装置探究匀强磁场中影响通电导线受力的因素，导线垂直匀强磁场方向放置. 先保持导线通电部分的长度 L 不变，改变电流 I 的大小，然后保持电流 I 不变，改变导线通电部分的长度 L，得到导线受到的力 F 分别与 I 和 L 的关系图像，则正确的是 (　　)





A　　B



C　　D

4. 如图所示，公园里有一仿制我国古代欹器的 U 形水桶，桶可绕水平轴转动，水管口持续有水流出，过一段时间桶会翻转一次. 决定桶能否翻转的主要因素是 (　　)



A. 水桶自身重力的大小

B. 水管每秒出水量的大小

C. 水流对桶撞击力的大小

D. 水桶与水整体的重心高低

5. 如图所示，学校门口水平地面上有一质量为 m 的石墩，石墩与水平地面间的动摩擦因数为 μ. 工作人员用轻绳按图示方式匀速移动石墩时，两平行轻绳与水平面间的夹角均为 θ，则下列说法正确的是 (　　)



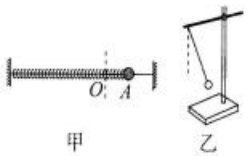
A. 轻绳的合拉力大小为 $\frac{\mu mg}{\cos\theta}$

B. 轻绳的合拉力大小为 $\frac{\mu mg}{\cos\theta+\mu\sin\theta}$

C. 减小夹角 θ，轻绳的合拉力一定减小

D. 轻绳的合拉力最小时，地面对石墩的摩擦力也最小

6. 图甲中的装置水平放置，将小球从平衡位置 O 拉到 A 后释放，小球在 O 点附近来回振动；图乙中被细绳拴着的小球由静止释放后可绕固定点来回摆动. 若将上述装置安装在太空中的我国空间站内进行同样操作，下列说法正确的是 (　　)



甲　　乙

A. 甲图中的小球将保持静止

B. 甲图中的小球仍将来回振动

C. 乙图中的小球仍将来回摆动

D. 乙图中的小球将做匀速圆周运动

7 如图所示，水平放置的电子秤上有一磁性玩具，玩具由哑铃状物件 P 和左端有玻璃挡板的凹形底座 Q 构成，其重量分



别为 G_P 和 G_Q，用手使 P 的左端与玻璃挡板靠近时，感受到 P 对手有靠向玻璃挡板的力，P 与挡板接触后放开手，P 处于“磁悬浮”状态（即 P 和 Q 的其余部分均不接触），P 与 Q 间的磁力大小为 F. 下列说法正确的是 （ ）

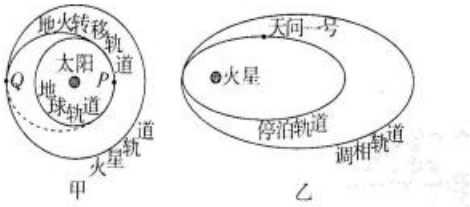
A. Q 对 P 的磁力大小等于 G_P

B. P 对 Q 的磁力方向竖直向下

C. Q 对电子秤的压力大小等于 G_Q+F

D. 电子秤对 Q 的支持力大小等于 G_P+G_Q

8 “天问一号”从地球发射后，在如图甲所示的 P 点沿地火转移轨道到 Q 点，再依次进入如图乙所示的调相轨道和停泊轨道，则“天问一号” （ ）



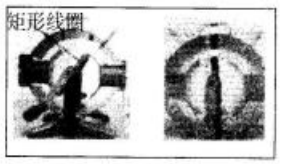
A. 发射速度介于 7.9 km/s 与 11.2 km/s 之间

B. 从 P 点转移到 Q 点的时间小于 6 个月

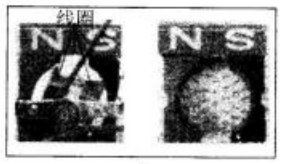
C. 在环绕火星的停泊轨道运行的周期比在调相轨道上小

D. 在地火转移轨道运动时的速度均大于地球绕太阳的速度

9. 如图所示，甲图是一种手摇发电机及用细短铁丝显示的磁场分布情况，摇动手柄可使对称固定在转轴上的矩形线圈转动；乙图是另一种手摇发电机及磁场分布情况，皮带轮带动固定在转轴两侧的两个线圈转动. 下列说法正确的是 （ ）



甲



乙

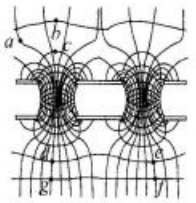
A. 甲图中线圈转动区域磁场可视为匀强磁场

B. 乙图中线圈转动区域磁场可视为匀强磁场

C. 甲图中线圈转动时产生的电流是正弦交流电

D. 乙图中线圈匀速转动时产生的电流是正弦交流电

10. 某种气体—电子放大器的局部结构是由两块夹有绝缘介质的平行金属薄膜构成，其上存在等间距小孔，其中相邻两孔截面上的电场线和等势线的分布如图所示. 下列说法正确的是 （ ）



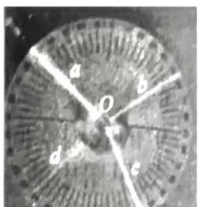
A. a 点所在的线是等势线

B. b 点的电场强度比 c 点大

C. b、c 两点间的电势差的值比 a、c 两点间的大

D. 将电荷沿图中的线从 $d\to e\to f\to g$ 移动时电场力做功为零

11. 如图所示，用激光笔照射半圆形玻璃砖圆心 O 点，发现有 a、b、c、d 四条细光束，其中 d 是光经折射和反射形成的. 当入射光束 a 绕 O 点逆时针方向转过小角度 $\Delta\theta$ 时，b、c、d 也会随之转动，则 （ ）



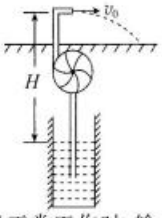
A. 光束 b 顺时针旋转角度小于 $\Delta\theta$

B. 光束 c 逆时针旋转角度小于 $\Delta\theta$

C. 光束 d 顺时针旋转角度大于 $\Delta\theta$

D. 光束 b、c 之间的夹角减小了 $2\Delta\theta$

12. 某节水喷灌系统如图所示，水以 $v_0=15$ m/s 的速度水平喷出，每秒喷出水的质量为 2.0 kg. 喷出的水是从井下抽取的，喷口离水面的高度保持 $H=3.75$ m 不变. 水泵由电动机带动，电动机正常工作时，输入电压为 220 V，输入电流为 2.0 A. 不计电动机的摩擦损耗，电动机的输出功率等于水泵所需要的输入功率. 已知水泵的抽水效率（水泵的输出功率与输入功率之比）为 75%，忽略水在管道中运动的机械能损失，则 （ ）



A. 每秒水泵对水做功为 75 J

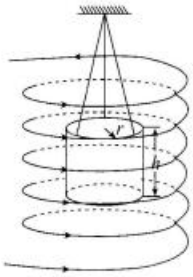
B. 每秒水泵对水做功为 225 J

C. 水泵输入功率为 440 W

D. 电动机线圈的电阻为 10 Ω

13. 如图所示，将一通电螺线管竖直放置，螺线管内部形成方向竖直向上、磁感应强度大小 $B=kt$ 的匀强磁场，在内部用绝缘轻绳悬挂一与螺线管共

轴的金属薄圆管，其电阻率为 ρ、高度为 h、半径为 r、厚度为 $d(d\ll r)$，则（　　）



A. 从上向下看，圆管中的感应电流为逆时针方向

B. 圆管的感应电动势大小为 $\dfrac{k\pi r^2}{h}$

C. 圆管的热功率大小为 $\dfrac{\pi dhk^2r^3}{2\rho}$

D. 轻绳对圆管的拉力随时间减小

二、选择题Ⅱ（本题共 3 小题，每小题 2 分，共 6 分. 每小题列出的四个备选项中至少有一个是符合题目要求的. 全部选对的得 2 分，选对但不全的得 1 分，有选错的得 0 分）

14. 2021 年 12 月 15 日秦山核电站迎来了安全发电 30 周年，核电站累计发电约 6.9×10^{11} kW·h，相当于减排二氧化碳六亿多吨. 为了提高能源利用率，核电站还将利用冷却水给周围居民供热. 下列说法正确的是（　　）



第14题图

A. 秦山核电站利用的是核聚变释放的能量

B. 秦山核电站发电使原子核亏损的质量约为 27.6 kg

C. 核电站反应堆中需要用镉棒控制链式反应的速度

D. 反应堆中存在 $^{235}_{92}\mathrm{U}+^{1}_{0}\mathrm{n}\longrightarrow^{141}_{56}\mathrm{Ba}+^{89}_{36}\mathrm{Kr}+3^{1}_{0}\mathrm{n}$ 的核反应

15. 两列振幅相等、波长均为 λ、周期均为 T 的简谐横波沿同一绳子相向传播，若两列波均由一次全振动产生，$t=0$ 时刻的波形如图 1 所示，此时两列波相距 λ，则（　　）

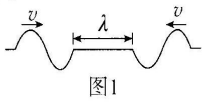


图1

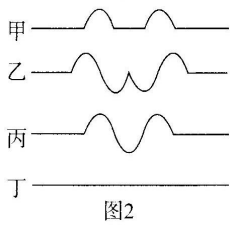


图2

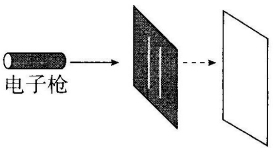
A. $t=\dfrac{T}{4}$ 时，波形如图 2 甲所示

B. $t=\dfrac{T}{2}$ 时，波形如图 2 乙所示

C. $t=\dfrac{3T}{4}$ 时，波形如图 2 丙所示

D. $t=T$ 时，波形如图 2 丁所示

16. 电子双缝干涉实验是近代证实物质波存在的实验. 如图所示，电子枪持续发射的电子动量为 1.2×10^{-23} kg·m/s，然后让它们通过双缝打到屏上. 已知电子质量取 9.1×10^{-31} kg，普朗克常量取 6.6×10^{-34} J·s，下列说法正确的是（　　）



A. 发射电子的动能约为 8.0×10^{-15} J

B. 发射电子的物质波波长约为 5.5×10^{-11} m

C. 只有成对电子分别同时通过双缝才能发生干涉

D. 如果电子是一个一个发射的，仍能得到干涉图样

三、非选择题（本题共 6 小题，共 55 分）

17.（7 分）(1) 在“研究平抛运动”实验中，以小钢球离开轨道末端时球心位置为坐标原点 O，建立水平与竖直坐标轴. 让小球从斜槽上离水平桌面高为 h 处静止释放，使其水平抛出，通过多次描点可绘出小球做平抛运动时球心的轨迹，如图 1 所示. 在轨迹上取一点 A，读取其坐标 (x_0,y_0).

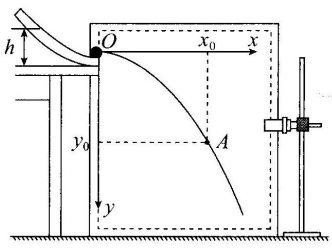


图1

①下列说法正确的是_____（单选）.

A. 实验所用斜槽应尽量光滑

B. 画轨迹时应把所有描出的点用平滑的曲线连接起来

C. 求平抛运动初速度时应读取轨迹上离原点较远的点的数据

②根据题目所给信息，小球做平抛运动的初速度大小 v_0=_____(单选).

A. $\sqrt{2gh}$　　B. $\sqrt{2gy_0}$

C. $x_0\sqrt{\frac{g}{2h}}$　　D. $x_0\sqrt{\frac{g}{2y_0}}$

③在本实验中要求小球多次从斜槽上同一位置由静止释放的理由是_____.

(2)“探究碰撞中的不变量”的实验装置如图 2 所示，阻力很小的滑轨上有两辆小车 A、B，给小车 A 一定速度去碰撞静止的小车 B，小车 A、B 碰撞前后的速度大小可由速度传感器测得.



图2

①实验应进行的操作有_____(单选).

A. 测量滑轨的长度

B. 测量小车的长度和高度

C. 碰撞前将滑轨调成水平

②如表所示是某次实验时测得的数据：

A 的质量/kg	B 的质量/kg	碰撞前 A 的速度大小/(m·s^{-1})	碰撞后 A 的速度大小/(m·s^{-1})	碰撞后 B 的速度大小/(m·s^{-1})
0.200	0.300	1.010	0.200	0.800

由表中数据可知，碰撞后小车 A、B 所构成系统的总动量大小是_____ kg·m/s(结果保留三位有效数字).

18. (7 分)小明同学根据图 1 的电路连接器材来“探究导体电阻与其影响因素的定量关系”. 实验时多次改变合金丝甲接入电路的长度 l、调节滑动变阻器的阻值，使电流表的读数 I 达到某一相同值时记录电压表的示数 U，从而得到多个 $\frac{U}{I}$ 的值，作出 $\frac{U}{I}$-l 图像，如图 2 中图线 a 所示.

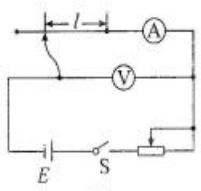


图1

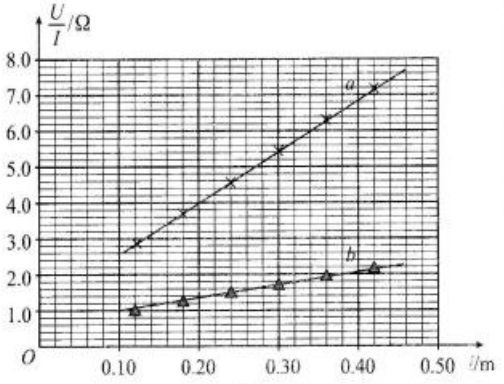


图2



图3

(1)在实验中使用的是_____(填“0～20 Ω”或“0～200 Ω”)的滑动变阻器.

(2)在某次测量时，电压表的指针位置如图 3 所示，则读数 U=_____ V.

(3)已知合金丝甲的横截面积为 7.0×10^{-8} m^2，则合金丝甲的电阻率为_____ Ω·m(结果保留两位有效数字).

(4)图 2 中图线 b 是另一根长度相同、材料相同的合金丝乙与合金丝甲并联后采用同样的方法获得的 $\frac{U}{I}$-l 图像，由图可知合金丝甲的横截面积_____(填“大于”“等于”或“小于”)合金丝乙的横截面积.

19. (9 分)第 24 届冬奥会在我国举办. 钢架雪车比赛的一段赛道如图 1 所示，长 12 m 水平直道 AB 与长 20 m 的倾斜直道 BC 在 B 点平滑连接，斜道与水平面的夹角为 15°. 运动员从 A 点由静止出发，推着雪车匀加速到 B 点时速度大小为 8 m/s，紧接着快速俯卧到车上沿 BC 匀加速下滑(图 2 所示)，到 C 点共用时 5.0 s. 若雪车(包括运动员)可视为质点，始终在冰面上运动，其总质量为 110 kg，sin15°=0.26，求雪车(包括运动员)：

(1)在直道 AB 上的加速度大小；

(2)过 C 点的速度大小；

(3)在斜道 BC 上运动时受到的阻力大小.

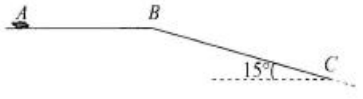


图1



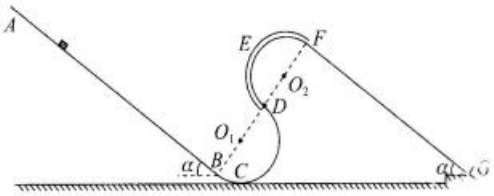
第19题图2

20.（12分）如图所示，处于竖直平面内的一探究装置，由倾角 $\alpha=37°$ 的光滑直轨道 AB、圆心为 O_1 的半圆形光滑轨道 BCD、圆心为 O_2 的半圆形光滑细圆管轨道 DEF、倾角也为 $37°$ 的粗糙直轨道 FG 组成，B、D 和 F 为轨道间的相切点，弹性板垂直轨道固定在 G 点（与 B 点等高），B、O_1、D、O_2 和 F 点处于同一直线上. 已知可视为质点的滑块质量 $m=0.1$ kg，轨道 BCD 和 DEF 的半径 $R=0.15$ m，轨道 AB 长度 $l_{AB}=3$ m，滑块与轨道 FG 间的动摩擦因数 $\mu=\frac{7}{8}$. 滑块与弹性板作用后，以等大速度弹回，$\sin37°=0.6$，$\cos37°=0.8$. 滑块开始时均从轨道 AB 上某点静止释放，

（1）若释放点距 B 点的长度 $l=0.7$ m，求滑块到最低点 C 时轨道对其支持力 F_N 的大小；

（2）设释放点距 B 点的长度为 l_x，求滑块第1次经 F 点时的速度 v 与 l_x 之间的关系式；

（3）若滑块最终静止在轨道 FG 的中点，求释放点距 B 点长度 l_x 的值.

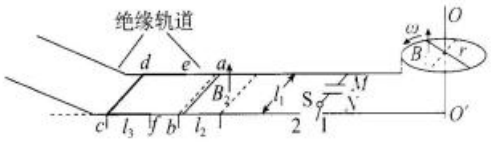


21.（10分）如图所示，水平固定一半径 $r=0.2$ m 的金属圆环，长均为 r、电阻均为 R_0 的两金属棒沿直径放置，其中一端与圆环接触良好，另一端固定在过圆心的导电竖直转轴 OO' 上，并随轴以角速度 $\omega=600$ rad/s 匀速转动，圆环内左半圆均存在磁感应强度大小为 B_1 的匀强磁场. 圆环边缘、与转轴良好接触的电刷分别与间距 l_1 的水平放置的平行金属轨道相连，轨道间接有电容 $C=0.09$ F 的电容器，通过单刀双掷开关 S 可分别与接线柱1、2相连. 电容器左侧有宽度也为 l_1、长度为 l_2、磁感应强度大小为 B_2 的匀强磁场区域. 在磁场区域内靠近左侧边缘处垂直轨道放置金属棒 ab，磁场区域外有间距也为 l_1 的绝缘轨道与金属轨道平滑连接，在绝缘轨道的水平段上放置“[”形金属框 $fcde$. 棒 ab 长度和“[”形框的宽度也均为 l_1、质量均为 $m=0.01$ kg，de 与 cf 的长度均为 $l_3=0.08$ m. 已知 $l_1=0.25$ m，$l_2=0.068$ m，$B_1=B_2=1$ T、方向均为竖直向上；棒 ab 和“[”形框的 cd 边的电阻均为 $R=0.1$ Ω，除已给电阻外其他电阻不计，轨道均光滑，棒 ab 与轨道接触良好且运动过程中始终与轨道垂直. 开始时开关 S 和接线柱1接通，待电容器充电完毕后，将 S 从1拨到2，电容器放电，棒 ab 被弹出磁场后与“[”框粘在一起形成闭合框 $abcd$，此时将 S 与2断开，已知框 $abcd$ 在倾斜轨道上重心上升0.2 m 后返回进入磁场.

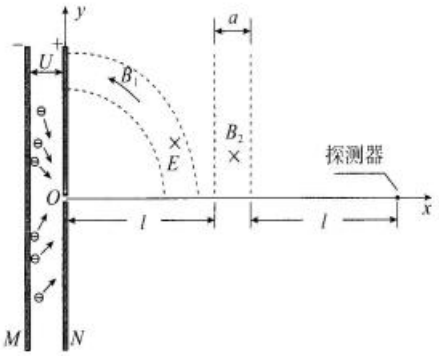
（1）求电容器充电完毕后所带的电荷量 Q，哪个极板（M 或 N）带正电？

（2）求电容器释放的电荷量 ΔQ；

（3）求框 $abcd$ 进入磁场后，ab 边与磁场区域左边界的最大距离 x.



22.（10分）如图为研究光电效应的装置示意图，该装置可用于分析光电子的信息. 在 xOy 平面（纸面）内，垂直纸面的金属薄板 M、N 与 y 轴平行放置，板 N 中间有一小孔 O. 有一由 x 轴、y 轴和以 O 为圆心、圆心角为 $90°$ 的半径不同的两条圆弧所围的区域Ⅰ，整个区域Ⅰ内存在大小可调、方向垂直纸面向里的匀强电场和磁感应强度大小恒为 B_1、磁感线与圆弧平行且沿逆时针方向的磁场. 区域Ⅰ右侧还有一左边界与 y 轴平行且相距为 l、下边界与 x 轴重合的匀强磁场区域Ⅱ，其宽度为 a，长度足够长，其中的磁场方向垂直纸面向里，磁感应强度大小可调. 光电子从板 M 逸出后经极板间电压 U 加速（板间电场视为匀强电场），调节区域Ⅰ的电场强度和区域Ⅱ的磁感应强度，使电子恰好打在坐标为 $(a+2l,0)$ 的点上，被置于该处的探测器接收. 已知电子质量为 m、电荷量为 e，板 M 的逸出功为 W_0，普朗克常量为 h. 忽略电子的重力及电子间的作用力. 当频率为 ν 的光照射板 M 时有光电子逸出，



(1)求逸出光电子的最大初动能 E_{km}，并求光电子从 O 点射入区域Ⅰ时速度 v_0 的大小范围；

(2)若区域Ⅰ的电场强度大小 $E=B_1\sqrt{\frac{3eU}{m}}$，区域Ⅱ的磁感应强度大小 $B_2=\frac{\sqrt{emU}}{ea}$，求被探测到的电子刚从板 M 逸出时速度 v_M 的大小及与 x 轴的夹角 β；

(3)为了使从 O 点以各种大小和方向的速度射向区域Ⅰ的电子都能被探测到，需要调节区域Ⅰ的电场强度 E 和区域Ⅱ的磁感应强度 B_2，求 E 的最大值和 B_2 的最大值.

物理试题参考答案

一、选择题1(本题共13小题，条小题3分，共39分，每小题列出的四个备选项中只有一个是符合题目要求的、不选，多选、错选均不得分)

1.A 2.B 3.B. 4.D 5.B 6.B 7.D
8.C 9.A 10.C 11.B 12.D 13.C

二、选择题II(本超共3小题，每小题2分，共6分，每小题列出的四个备选项中至少有一个是符合题目要求的。全部选对的得2分，选对但不全的1分，有选错的得0分)

14.CD 15.BD 16.BD

三、非选择题(本题共6小题，共55分)

17. (1)① C ② D ③ 确保多次运动的轨迹相同

(2)① C ②0.200

18. (1)0~20Q (2)01.31~1.34
(3)0.96×10-6~1.0×10-6 (4)小于

19.(9分)

解：(1)在 AB 段由运动学公式得 $v_1^2=2a_1x_1$

解得 $a_1=\frac{8}{3}\ \mathrm{m/s^2}$

(2)在 AB 段由运动学公式得 $v_1=a_1t_1$

解得 $t_1=3\ \mathrm{s}$

在 BC 段由运动学公式得 $x_2=v_1t_2+\frac{1}{2}a_2t_2^2$

解得 $a_2=2\ \mathrm{m/s^2}$

由运动学公式得 $v=v_1+a_2t_2=12\ \mathrm{m/s}$

(3)由牛顿第二定律得 $mg\sin\theta-F_f=ma_2$

解得 $F_f=66\ \mathrm{N}$

20.(12分)

解：(1)到 C 点过程有

$$mgl\sin37^\circ+mgR(1-\cos37^\circ)=\frac{1}{2}mv_C^2$$

在 C 点时有 $F_N=mg+m\frac{v_C^2}{R}=7\ \mathrm{N}$

(2)到 F 点过程有

$$mgl_x\sin37^\circ-4mgR\cos37^\circ=\frac{1}{2}mv^2$$

$$v=\sqrt{12l_x-9.6}$$

能过 F 点 $l_x\geqslant0.85\ \mathrm{m}$

(3)设摩擦力做功为滑块第一次到达 FG 中点时的 n 倍

$$mgl_x\sin37^\circ-mg\frac{l_{Bi}}{2}\sin37^\circ-n_\mu mg\frac{l_{Bi}}{2}\cos37^\circ=0$$

$$l_x=\frac{7n+6}{15}$$

当 $n=1$ 时，$l_{x1}=\frac{13}{15}\ \mathrm{m}$

当 $n=3$ 时，$l_{x2}=\frac{9}{5}\ \mathrm{m}$

当 $n=5$ 时，$l_{x3}=\frac{41}{15}\ \mathrm{m}$

21.(10分)

解：(1)M 带正电

$$E=\frac{1}{2}B_1\omega r^2$$

$$Q=CU=\frac{CE}{2}=0.54\ \mathrm{C}$$

(2)$B_2l_1\Delta Q=mv_1$

$$mv_1=(m+m)v_2$$

$$\frac{1}{2}\times2mv_2^2=2mgh$$

$$\Delta Q=\frac{2m}{B_2 l_1}\sqrt{2gh}=0.16\ \mathrm{C}$$

(3)设导体框在磁场中减速滑行的总路程为 Δx

$$\frac{B_2^2 l_1^2 \Delta x}{2R}=2mv_2$$

$\Delta x=0.128\ \mathrm{m}>0.08\ \mathrm{m}$，匀速运动距离为

$$l_3-l_2=0.012\ \mathrm{m}$$

$$x=\Delta x+l_3-l_2=0.14\ \mathrm{m}$$

22.(10 分)

解:(1)由光电效应方程得 $E_{km}=h\nu-W_0$

$$\frac{1}{2}mv_0^2=E_k+eU(0\leqslant E_k\leqslant E_{km})$$

$$\sqrt{\frac{2eU}{m}}\leqslant v_0\leqslant\sqrt{\frac{2(h\nu+eU-W_0)}{m}}$$

(2)速度选择器 $ev_0B_1=eE$

$$v_0=\frac{E}{B_1}=\sqrt{\frac{3eU}{m}}$$

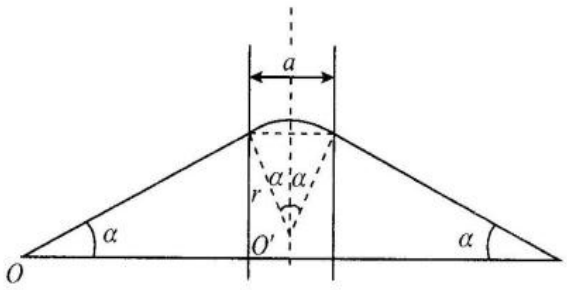
$$\frac{1}{2}mv_0^2-\frac{1}{2}mv_M^2=eU$$

$$v_M=\sqrt{\frac{eU}{m}}$$

如图所示，由几何关系有 $\frac{mv_0}{eB_2}\sin\alpha=\frac{a}{2}$

$$v_M\sin\beta=v_0\sin\alpha$$

$$\beta=30^\circ$$



(3)$E_{max}=B_1\sqrt{\frac{2(h\nu+eU-W_0)}{m}}$

$$v_0\sin\alpha\leqslant\sqrt{\frac{2(h\nu-W_0)}{m}}$$

$$B_{2max}=\frac{2\sqrt{2m(h\nu-W_0)}}{ea}$$

③2021 年 6 月浙江省普通高校招生选考科目考试物理试题

一、选择题 I（本题共 13 小题，每小题 3 分，共 39 分。每小题列出的四个备选项中只有一个是符合题目要求的，不选、多选、错选均不得分）

1.据《自然》杂志 2021 年 5 月 17 日报道，中国科学家在稻城“拉索”基地（如图）探测到迄今为止最高能量的 γ 射线，能量值为 1.40×10^{15} ev，即（　）

A.1.40×10^{15} V　　B.2.24×10^{-4} C

C.2.24×10^{-4} W　　D.2.24×10^{-4} J



2.用高速摄影机拍摄的四张照片如图所示，下列说法正确的是（　）

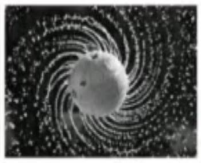
A.研究甲图中猫在地板上行走的速度时，猫可视为质点。

B.研究乙图中水珠形状形成的原因时，旋转球可视为质点。

C.研究丙图中飞翔鸟儿能否停在树桩上时，鸟儿可视为质点。

D.研究丁图中马术运动员和马能否跨越障碍物时，马可视为质点。


甲


乙


丙


丁

3.如图所示，在火箭发射塔周围有钢铁制成的四座高塔，高塔的功能最有可能的是（　　）

A.探测发射台周围风力的大小

B.发射与航天器联系的电磁波

C.预防雷电击中待发射的火箭

D.测量火箭发射过程的速度和加速度



4.2021 年 5 月 15 日，天问一号着陆器在成功着陆火星表面的过程中，经大气层 290s 的减速，速度从 4.9×10^3 m/s 减为 4.6×10^2 m/s；打开降落伞后，经过 90s 速度进一步减为 1.0×10^2 m/s；与降落伞分离，打开发动机减速后处于悬停状态；经过对着陆点的探测后平稳着陆。若打开降落伞至分离前的运动可视为竖直向下运动，则着陆器（　）

A.打开降落伞前，只受到气体阻力的作用

B.打开降落伞至分离前，受到的合力方向竖直向上

C.打开降落伞至分离前，只受到浮力和气体阻力的作用

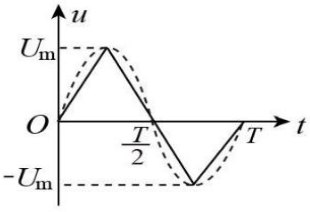
D.悬停状态中，发动机喷火的反作用力与气体阻力是平衡力



5.如图所示，虚线是正弦交流电的图像，实线是另一交流电的图像，它们的周期 T 和最大值U_m相同，则实线所对应的交流电的有效值U满足（　　）

A.$U=\frac{U_m}{2}$　　B.$U=\frac{\sqrt{2}U_m}{2}$

C.$U>\frac{\sqrt{2}U_m}{2}$　　D.$U<\frac{\sqrt{2}U_m}{2}$



第 5 题图

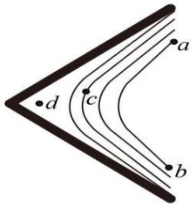
6.某书中有如图所示，用来表示横截面是“<”形导体右侧的电场线和等势面，其中 a,b 是同一条实线上的两点，c 是另一条实线上的一点，d 是导体尖角右侧表面附近的一点。下列说法正确的是（　　）

A.实线表示电场线

B.离 d 点最近的导体表面电荷密度最大

C.“<”形导体右侧表面附近电场强度方向均相同

D.电荷从 a 点到 c 点再到 b 点电场力做功一定为零



7.质量为 m 的小明坐在秋千上摆动到最高点时的照片如图所示，对该时刻，下列说法正确的是（　　）

A.秋千对小明的作用力小于 mg

B.秋千对小明的作用力大于 mg

C.小明的速度为零，所受合力为零

D.小明的加速度为零，所受合力为零



8.大功率微波对人体和其他生物有一定的杀伤作用。实验表明，当人体单位面积接收的微波功率达到 250W/m^2时会引起神经混乱，达到 1000W/m^2时会引起心肺功能衰竭。现有一微波武器，其发射功率 P=3×10^7 W.若发射的微波可视为球面波，则引起神经混乱和心肺功能衰竭的有效攻击的最远距离约为（　　）

A. 100m　25m　　B. 100m　50m

C. 200m　100m　　D. 200m　50m

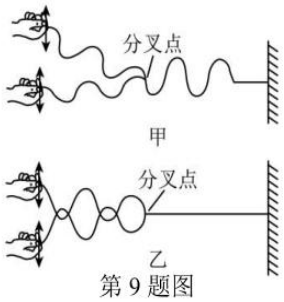
9.将一端固定在墙上的轻质绳在中点位置分叉相同的两股细绳，它们处于同一水平面上。在离分叉点相同长度处用左、右手在身体两侧分别握住直细绳的一端，同时用相同频率和振幅上下持续振动，产生的横波以相同的速率沿细绳传播。因开始振动时的情况不同，分别得到了如图甲和乙所示的波形。下列说法正确的是（　　）

A. 甲图中两手开始振动时的方向并不相同

B. 甲图中绳子的分叉点是振动减弱的位置

C. 乙图中绳子分叉点右侧始终见不到明显的波形

D. 乙图只表示细绳上两列波刚传到分叉点时的波形



第 9 题图

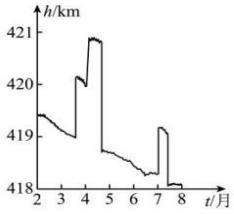
10.空间站在地球外层的稀薄大气中绕行，因气体阻力的影响，轨道高度会发生变化。空间站安装有发动机，可对轨道进行修正。图中给出了国际空间站在 2020.02--2020.08 期间离地高度随时间变化的曲线，则空间站（　　）

A.绕地运行速度约为 2.0km/s

B.绕地运行速度约为 8.0km/s

C.在 4 月份绕行的任意两小时内机械能可视为守恒

D.在 5 月份绕行的任意两小时内机械能可视为守恒



第 10 题图

11.中国制造的某一型号泵车如图所示，表中列出了其部分技术差数。已知混凝土密度为 2.4×10^3 kg/m^3,假设泵车的泵送系统以 150m^3/h 的输送量给 30m 高处输送混凝土，则每小时泵送系统对混凝土做的功至少为（　　）



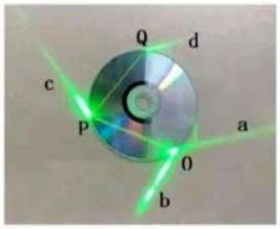
第 11 题图

发动机最大输出功率（kw）	332	最大输送高度（m）	63
整车满载质量（kg）	5.4×10^4	最大输送量（m^3/h）	180

A.1.08×10^7 J　　B.5.04×10^7 J

C.1.08×10^8 J　　D.2.72×10^8 J

12.用激光笔照射透明塑料制成的光盘边缘时观察到的现象如图所示。入射点 O 和两出射点 P、Q 恰好位于光盘边缘等间隔的三点处，空气中的四条细光束分别为入射光束 a、反射光束 b、出射光束 c 和 d，已知光束 a 和 b 间的夹角为90^0，则（　　）



第 12 题图

A.光盘材料的折射率 n=2

B.光在光盘内的速度为真空中光速的三分之二

C.光束 b、c 和 d 的强度之和等于光束 a 的强度

D.光束 c 的强度小于 O 点处折射光束 OP 的强度

13.已知普朗克常量 h=6.63×10^{-34} J・s,电子的质量为 9.11×10^{-31} kg,一个电子和一滴直径约为 4μm 的油滴具有相同的动能，则电子与油滴的德布罗意波长之比的数量级为（　　）

A.10^{-8}　　B.10^{6}　　C.10^{8}　　D.10^{16}

二、选择题Ⅱ（本题共 3 小题，每小题 2 分，共 6 分。每小题列出的四个备选项中至少有一个是符合题目要求的。全部选对的得 2 分，选对但不全的得 1 分，有选错得得 0 分）

14.对四个核反应方程：

（1）$^{238}_{92}U\rightarrow ^{234}_{90}Th+^{4}_{2}He$；

（2）$^{234}_{90}Th\rightarrow ^{234}_{91}Pa+^{0}_{-1}e$

（3）$^{14}_{7}N+^{4}_{2}He\rightarrow ^{17}_{8}O+^{1}_{1}H$；

（4）$^{2}_{1}H+^{3}_{1}H\rightarrow ^{4}_{2}He+^{1}_{0}n$ +17.6MeV.

下列说法正确的是（　　）

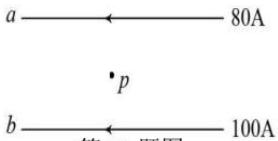
A.（1）（2）式核反应没有释放能量

B.（1）（2）（3）式均是原子核衰变方程

C.（3）式是人类第一次实现原子核转变的方程

D.利用激光引发可控的（4）式核聚变是正在尝试的技术之一

15.如图所示，有两根用超导体材料制成的长直平行细导线 a、b,分别通以 80A 和 100A 流向相同的电流，两导线构成的平面内有一点 P，到两导线的距离相等。下列说法正确的是（　　）



第 15 题图

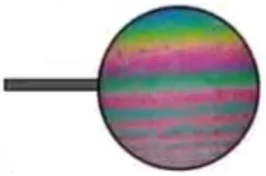
A.两导线受到的安培力$F_b=125F_a$

B.导线所受的安培力可以用 F=ILB 计算

C.移走导线 b 前后，p 点的磁感应强度方向改变

D.在离两导线所在的平面有一定距离的有限空间内，不存在磁感应强度为零的位置

16.肥皂膜的干涉条纹如图所示，条纹间距上面宽、下面窄。下列说法正确的是（　　）



A. 过肥皂膜最高和最低点的截面一定不是梯形

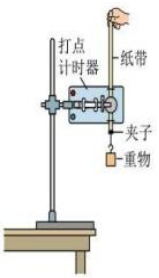
B. 肥皂膜上的条纹是前后表面反射光形成的干涉条纹

C. 肥皂膜从形成到破裂，条纹的宽度和间距不会发生变化

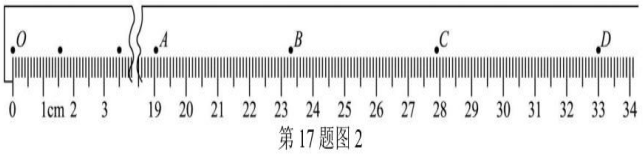
D. 将肥皂膜外金属环左侧的把柄向上转动90^0，条纹也会跟着转动90^0

三、非选择题（本题共 6 小题，共 55 分）

17.（7 分）（1)在“验证机械能守恒定律”实验中，小王用如图 1 所示的装置，让重物从静止开始下落。打出一条清晰的纸带，其中的一部分如图 2 所示。O 点是打下的第一个点，A、B、C 和 D 为另外 4 个连续打下的点。



第 17 题图 1



第 17 题图 2

①为了减小实验误差，对体积和形状相同的重物，实验时选择密度大的理由是----------。

（一）②已知交流电频率为 50Hz,重物质量为 200g,当地重力加速度 g=9.80m/s^2,则从 O 点到 C 点，重物的重力势能变化量

的绝对值$\left|\Delta E_p\right|$=_____J、C 点的动能E_{kc}=_____J（计算结果均保留 3 位有效数字）。比较E_{kc}与$\left|\Delta E_p\right|$的大小，出现这一结果的原因可能是（　　）

A.工作电压偏高　　B.存在空气阻力和摩擦力　　C.接通电源前释放了纸带

(2).图示是“用双缝干涉测量光的波长”实验的装置。实验中：

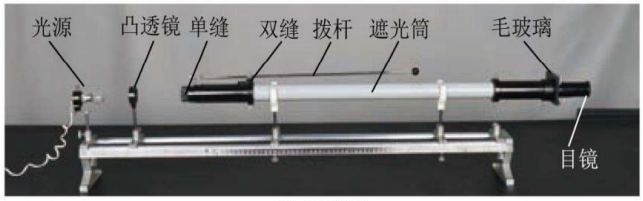
①观察到较模糊的干涉条纹，要使条纹变得清晰，值得尝试的是_____（单选）

A.旋转测量头　　B.增大单缝与双缝间的距离　　C.调节拨杆使单缝与双缝平行

②要增大观察到的条纹间距，正确的做法是_____（单选）

A.减小单缝与光源间的距离　　B.减小单缝与双缝间的距离

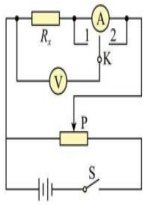
C.增大透镜与单缝间的距离　　D.增大双缝与测量头间的距离



第 17 题图 3

18. (7 分）小李在实验室测量一电阻 R 的阻值。

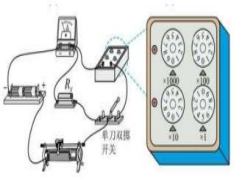
（1）因电表内阻未知，用如图 1 所示的电路来判定电流表该内接还是外接。正确连线后，合上开关 S，将滑动变阻器的滑片 P 移至合适位置。单刀双掷开关 K 掷到 1，电压表的读数U_1=1.65V，电流表的示数如图 2 所示，其读数I_1=_____A；将 K 掷到 2，电压表和电流表的读数分别为U_2=1.75V，I_2=0.33A.由此可知应采用电流表_____（填“内”或“外”）接法。



第 18 题图 1



第 18 题图 2


第 18 题图 3

（2）完成上述实验后，小李进一步尝试用其他方法进行实验；

①器材与连线如图 3 所示，请在虚线框中画出对应的电路图

②先将单刀双掷开关掷到左边，记录电流表读数，再将单刀双掷开关掷到右边，调节电阻箱的阻值，使电流表的读数与前一次尽量相同，电阻箱的示数如图 3 所示。则待测电阻R_x=____Ω。

此方法_____（填“有”或“无”）明显的实验误差，其理由是_____.

19.（9 分）机动车礼让行人是一种文明行为。如图所示，质量为 m=1.0×10^3 kg 的汽车以v_1=36km/h 的速度在水平面上匀速行驶，在距离斑马线 s=20m 处，驾驶员发现小朋友排着长l=6m 的队伍从斑马线一端开始通过，立即刹车，最终恰好停在斑马线前。假设汽车在刹车过程中所受阻力不变，且忽略驾驶员反应时间。

（1）求开始刹车到汽车停止所用的时间和所受阻力的大小；

（2）若路面宽 L=6m,小朋友行走的速度v_0=0.5m/s,求汽车在斑马线前等待小朋友全部通过所需的时间；

（3）假设驾驶员以v_2=54km/h 超速行驶，在距离斑马线 s=20m 处立即刹车，求汽车到斑马线时的速度。

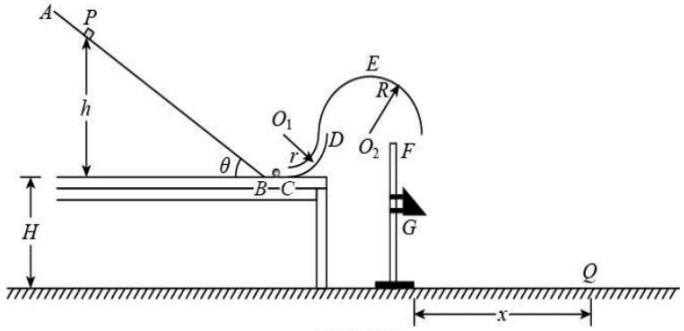


20.如图所示，水平地面上有一高 H=0.4m 的水平台面，台面上竖直放置倾角θ=37^0 的粗糙直轨道 AB、水平光滑直轨道 BC、四分之一圆周光滑细圆管道 CD 和半圆形光滑轨道 DEF，它们平滑连接，其中管道 CD 的半径 r=0.1m、圆心在o_1点，轨道 DEF 的半径 R=0.2m、圆心在o_2点，o_1、D、o_2和 F 点均处在同一水平线上。小滑块从轨道 AB 上距台面高为 h 的 P 点静止下滑，与静止在轨道 BC 上等质量的小球发生弹性碰撞，碰后小球经管道 CD、轨道 DEF 从 F 点竖直向下运动，与正下方固定在直杆上的三棱柱 G 碰撞，碰后速度方向水平向右，大小与碰撞前相同，最终落在地面上 Q 点，已知小球与轨道 AB 间的动摩擦因数μ=$\frac{1}{12}$，sin37^0=0.6.cos37^0=0.8.

(1) 若小滑块的初始高度 h=0.9m,求小滑块到达 B 点时速度v_0的大小；

(2) 若小球能完成整个运动过程，求 h 的最小值$h_{\min}$；

(3) 若小球恰好能过最高点 E，且三棱柱 G 的位置上下可调，求落地点 Q 与 F 点的水平距离x的最大值$x_{\max}$。



第 20 题图

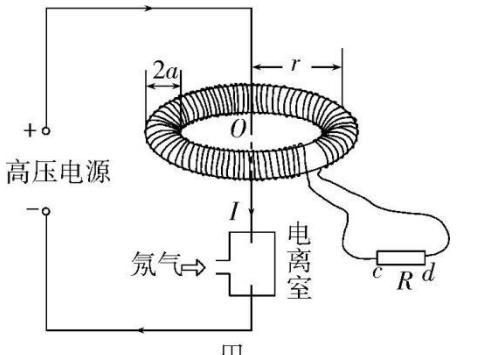
21.一种探测气体放电过程的装置如图甲所示，充满氖气（Ne)的电离室中有两电极与长直导线连接，并通过两水平长导线与高压电源相连。在与长直导线垂直的平面内，以导线为对称轴安装一个用阻值 R_0 =10 Ω 的细导线绕制、匝数 N=5× 10^3 的圆环形螺线管，细导线的始末两端 c、d 与阻值 R =90 Ω 的电阻连接。螺线管的横截面是半径 $a=1.0\times10^{-2}$ m 的圆，其中心与长直导线的距离 $r=0.1m$ 。气体被电离后在长直导线回路中产生顺时针方向的电流 I ,其 $I-t$ 图像如图乙所示。为便于计算，螺线管内各处的磁感应强度大小均为视为 $B=\dfrac{kI}{r}$ ，其中 $k=2\times10^{-7}T$ .m/A.

(1) 求 0--6.0× 10^{-3} s 内通过长直导线横截面的电荷量 Q;

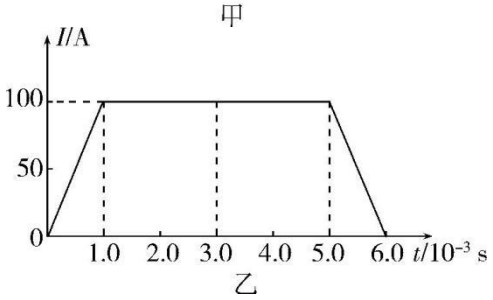
(2) 求 3.0× 10^{-3} s 时，通过螺线管某一匝线圈的磁通量Φ;

(3) 若规定 $c\rightarrow R\rightarrow d$ 为电流的正方向，在不考虑线圈自感的情况下，通过计算，画出通过电阻 R 的 i_R-t 图像;

(4) 若规定 $c\rightarrow R\rightarrow d$ 为电流的正方向，考虑线圈自感，定性画出通过电阻 R 的 i_R-t 图像。



甲



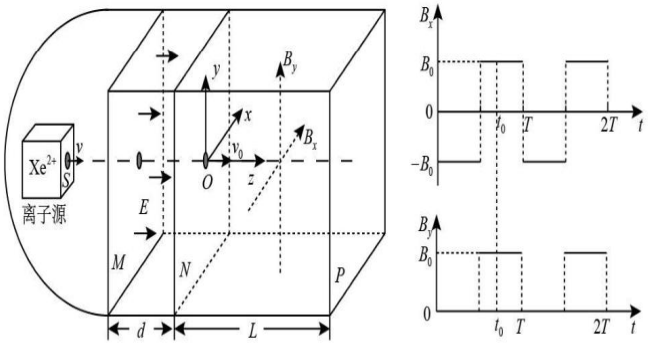
乙

22.如图甲所示，空间站上某种离子推进器由离子源、间距为 d 的中间有小孔的两平行金属板 M、N 和边长为 L 的立方体构成，其后端面 P 为喷门。以金属板 N 的中心 O 为坐标原点，垂直立方体侧面和金属板建立 x 、 y 和 z 坐标轴。M、N 板之间存在场强为 E 、方向沿 z 轴正方向的匀强电场；立方体内存在磁场，其磁感应强度沿 z 方向的分量始终为零，沿 x 和 y 方向的分量 B_x 和 B_y 随时间周期性变化规律如图乙所示。图中 B_0 可调。氙离子（ Xe^{2+} ）束从离子源小孔 S 射出，沿 z 方向匀速运动到 M 板，经电场加速进入磁场区域，最后从端面 P 射出，测得离子经电场加速后在金属板 N 中心 O 处相对推进器的速度为 v_0 。已知单个离子的质量为 m 、电荷量为 $2e$ ，忽略离子间的相互作用，且射出的离子总质量远小于推进器的质量。

（1）求离子从小孔 S 射出时相对推进器的速度大小 v ；

（2）不考虑在磁场突变时运动的离子，调节 B_0 的值，使得从小孔 S 射出的离子均能从喷口后端面 P 射出，求 B_0 的取值范围；

（3）设离子在磁场中的运动时间远小于磁场变化周期 T，单位时间从端面 P 射出的离子数为 n ，且 $B_0=\dfrac{\sqrt{2}mv_0}{5eL}$.求图乙中 t_0 时刻离子束对推进器作用力沿 z 轴方向的分力。



甲　　乙

第 22 题图

物理试题参考答案

一、选择题Ⅰ（本题共 13 小题，每小题 3 分，共 39 分）

1.D　2.A　3.C　4.B　5.D　6.D　7.A　8.B　9.C　10.D

11.C　12.D　13.C

二、选择题Ⅱ（本题共 3 小题，每小题 2 分，共 6 分）

14.CD　15.BCD　16.AB

三、非选择题（本题共 6 小题，共 55 分）

17.（7 分）

（1）①阻力与重力之比更小（或其他合理解释）

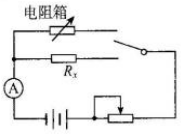
②0.542～0.550　0.570～0.590　C

（2）①C　②D

18.(7 分)

(1)0.33～0.34　外

(2)①如图所示



②5　有　电阻箱的最小分度与待测电阻比较接近(或其他合理解释)

19.(9 分)

解:(1)$t_1=\frac{s}{\bar{v}}$

$t_1=4$ s

$a=\frac{v_1}{t_1}$

$F_f=ma$

$F_f=2.5\times10^3$ N

(2)$t_2=\frac{l+L}{v_0}$

$t=t_2-t_1=20$ s

(3)$v_2^2-v^2=2as$

$v=5\sqrt{5}$ m/s

20.(12 分)

解:(1)小滑块在 AB 轨道上运动

$mgh-\mu mg\cos\theta\cdot\frac{h}{\sin\theta}=\frac{1}{2}mv_B^2$

$v_B=\frac{4}{3}\sqrt{gh}=4$ m/s

(2)小滑块与小球碰撞后速度互换

小球沿 $CDEF$ 轨道运动

$mg=m\frac{v_{E\min}^2}{R}$

$\frac{1}{2}mv_{E\min}^2+mg(R+r)=\frac{1}{2}mv_{B\min}^2$

$v_{H\min}=\frac{4}{3}\sqrt{gh_{\min}}$

$h_{\min}=0.45$ m

(3)小球从 E 点到 Q 点的运动

$\frac{1}{2}mv_Q^2=\frac{1}{2}mv_{E\min}^2+mg(R+y)$

$x=v_Qt$

$H+r-y=\frac{1}{2}gt^2$

$x=2\sqrt{(0.5-y)(0.3+y)}$

$x_{\max}=0.8$ m

21.(10 分)

解:(1)$Q=I_1\Delta t_1+I_2\Delta t_2+I_3\Delta t_3$

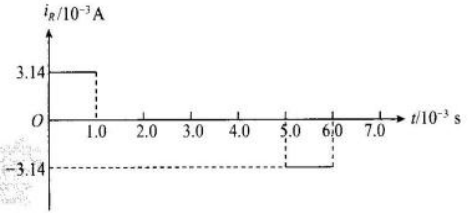
$Q=0.5$ C

(2)$\Phi=BS=\frac{kI}{r}\times\pi a^2$

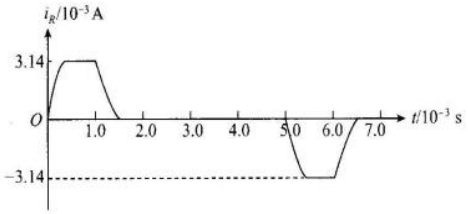
$\Phi=6.28\times10^{-8}$ Wb

(3)$E=N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}=\frac{Nk\pi a^2}{r}\times\frac{\Delta I}{\Delta t}$

$i_R=\frac{E}{R+R_0}=3.14\times10^{-3}$ A



(4)



22.(10 分)

解:(1)$qEd=\frac{1}{2}mv_0^2-\frac{1}{2}mv_S^2$

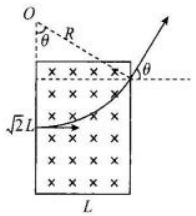
$v_S=\sqrt{v_0^2-\frac{4eEd}{m}}$

(2)当磁场仅有沿 x 方向的分量取最大值时,离子从喷口 P 的下边缘中点射出$(R_1-\frac{L}{2})^2+L^2=R_1^2$

$R_1=\frac{mv_0}{qB_0}$

$B_0=\frac{2mv_0}{5eL}$

当磁场在 x 和 y 方向的分量同取最大值时,离子从喷口 P 边缘交点射出



$(R_2-\frac{\sqrt{2}L}{2})^2+L^2=R_2^2$

$R_2=\frac{mv_0}{\sqrt{2}qB_0}$

$B_0=\frac{mv_0}{3eL}$

B_0 的取值范围:$0\sim\frac{mv_0}{3eL}$

(3)$R_3=\frac{mv_0}{\sqrt{2}qB_0}=\frac{5}{4}L$

$\cos\theta=\frac{3}{5}$

$F\Delta t=n\Delta tmv_0-0$

$F'=-F=-nmv_0$

$F_z'=-\frac{3}{5}nmv_0$

一、选择题Ⅰ(本题共13小题,每小题3分,共39分.每小题列出的四个备选项中只有一个是符合题目要求的,不选、多选、错选均不得分)

1. 如图所示是我国自主研发的全自动无人值守望远镜,它安装在位于南极大陆的昆仑站,电力供应仅为1×10^3 W.若用国际单位制基本单位的符号来表示W,正确的是 (　　)



A. N·s　　B. N·m/s

C. kg·m/s　　D. kg·m^2/s^3

2. 2020年12月我国科学家在量子计算领域取得了重大成果,构建了一台76个光子100个模式的量子计算机"九章",它处理"高斯玻色取样"的速度比目前最快的超级计算机"富岳"快一百万亿倍.关于量子,下列说法正确的是 (　　)



A. 是计算机运算的一种程序

B. 表示运算速度的一个单位

C. 表示微观世界的不连续性观念

D. 类似于质子、中子的微观粒子

3. 2020年11月10日,我国"奋斗者"号载人潜水器在马里亚纳海沟成功坐底,坐底深度10 909 m."奋斗者"号照片如图所示,下列情况中"奋斗者"号一定可视为质点的是 (　　)



A. 估算下降总时间时

B. 用推进器使其转弯时

C. 在海沟中穿越窄缝时

D. 科学家在其舱内进行实验时

4. 如图所示,电动遥控小车放在水平长木板上面,当它在长木板上水平向左加速运动时,长木板保持静止,此时 (　　)



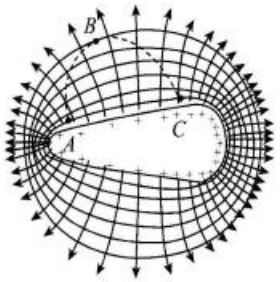
A. 小车只受重力、支持力作用

B. 木板对小车的作用力方向水平向左

C. 木板对小车的作用力大于小车对木板的作用力

D. 木板对小车的作用力与小车对木板的作用力大小一定相等

5. 如图所示是某一带电导体周围的电场线与等势面,A、C是同一等势面上的两点,B是另一等势面上的一点.下列说法正确的是 (　　)



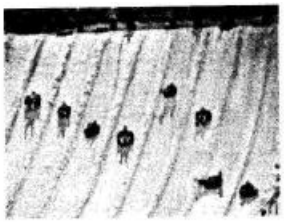
A. 导体内部的场强左端大于右端

B. A、C两点的电势均低于B点的电势

C. B点的电场强度大于A点的电场强度

D. 正电荷从A点沿虚线移到B点的过程中电场力做正功,电势能减小

6. 如图所示,同学们坐在相同的轮胎上,从倾角相同的平直雪道先后由同一高度静止滑下,各轮胎与雪道间的动摩擦因数均相同,不计空气阻力.雪道上的同学们 (　　)



A. 沿雪道做匀速直线运动

B. 下滑过程中机械能均守恒

C. 前后间的距离随时间不断增大

D. 所受重力沿雪道向下的分力相同

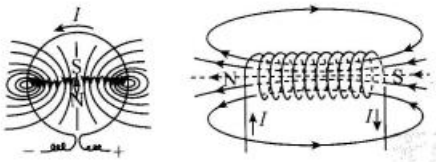
7. "嫦娥五号"探测器是我国首个实施月面采样返回的航天器,由轨道器、返回器、着陆器和上升器等多个部分组成.为等待月面采集的样品,轨道器与返回器的结合体环月做圆周运动.已知引力常量$G=6.67\times10^{-11}$ N·m^2/kg^2,地球质量$m_1=6.0\times10^{24}$ kg,月球质量$m_2=7.3\times10^{22}$ kg,月地距离$r_1=3.8\times10^5$ km,月球半径$r_2=1.7\times10^3$ km.当轨道器与返回器的组合体在月球表面上方约200 km处做环月匀速圆周运动时,其环绕速度约为 (　　)

A. 16 m/s　　B. 1.1×10^2 m/s

C. 1.6×10^3 m/s　　D. 1.4×10^4 m/s

8. 如图所示是通有恒定电流的环形线圈和螺线管的

磁感线分布图. 若通电螺线管是密绕的，下列说法正确的是 （ ）



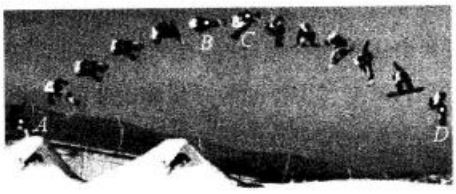
A. 电流越大，内部的磁场越接近匀强磁场

B. 螺线管越长，内部的磁场越接近匀强磁场

C. 螺线管直径越大，内部的磁场越接近匀强磁场

D. 磁感线画得越密，内部的磁场越接近匀强磁场

9. 某一滑雪运动员从滑道滑出并在空中翻转时经过多次曝光得到的照片如图所示，每次曝光的时间间隔相等. 若运动员的重心轨迹与同速度不计阻力的斜抛小球轨迹重合，A、B、C 和 D 表示重心位置，且 A 和 D 处于同一水平高度. 下列说法正确的是 （ ）



A. 相邻位置运动员重心的速度变化相同

B. 运动员在 A、D 位置时重心的速度相同

C. 运动员从 A 到 B 和从 C 到 D 的时间相同

D. 运动员重心位置的最高点位于 B 和 C 中间

10. 下列说法正确的是 （ ）

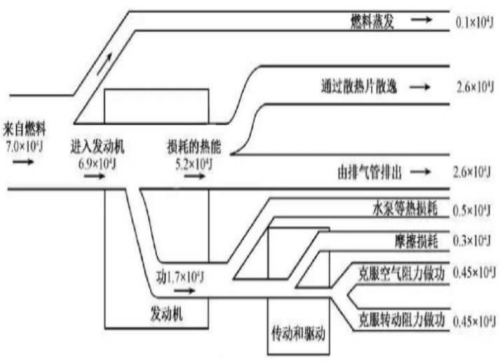
A. 光的波动性是光子之间相互作用的结果

B. 玻尔第一次将“量子”引入原子领域，提出了定态和跃迁的概念

C. 光电效应揭示了光的粒子性，证明了光子除了能量之外还具有动量

D. α 射线经过置于空气中带正电验电器金属小球的上方，验电器金属箔的张角会变大

11. 一辆汽车在水平高速公路上以 80 km/h 的速度匀速行驶，其 1 s 内能量分配情况如图所示. 则汽车 （ ）



A. 发动机的输出功率为 70 kW

B. 每 1 s 消耗的燃料最终转化成的内能是 5.7×10^4 J

C. 每 1 s 消耗的燃料最终转化成的内能是 6.9×10^4 J

D. 每 1 s 消耗的燃料最终转化成的内能是 7.0×10^4 J

12. 在爆炸实验基地有一发射塔，发射塔正下方的水平地面上安装有声音记录仪. 爆炸物自发射塔竖直向上发射，上升到空中最高点时炸裂成质量之比为 2∶1、初速度均沿水平方向的两个碎块. 遥控器引爆瞬间开始计时，在 5 s 末和 6 s 末先后记录到从空气中传来的碎块撞击地面的响声. 已知声音在空气中的传播速度为 340 m/s，忽略空气阻力. 下列说法正确的是 （ ）

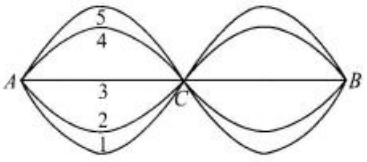
A. 两个碎块的位移大小之比为 1∶2

B. 爆炸物的爆炸点离地面高度为 80 m

C. 爆炸后质量大的碎块的初速度为 68 m/s

D. 爆炸后两碎块落地点之间的水平距离为 340 m

13. 两列频率、振幅均相同的简谐波 Ⅰ 和 Ⅱ 分别从绳子的两端持续相向传播，在相遇区域发生了干涉，在相距 0.48 m 的 A、B 间用频闪相机连续拍摄，依次获得 1、2、3、4、5 五个波形，如图所示，且 1 和 5 是同一振动周期内绳上各点位移都达到最大值时拍摄的波形. 已知频闪时间间隔为 0.12 s，下列说法正确的是 （ ）



A. 简谐波 Ⅰ 和 Ⅱ 的波长均为 0.24 m

B. 简谐波 Ⅰ 和 Ⅱ 的周期均为 0.48 s

C. 绳上各点均做振幅相同的简谐运动

D. 两波源到 A 点和 C 点的路程差之差的绝对值是 0.48 m

二、选择题 Ⅱ（本题共 3 小题，每小题 2 分，共 6 分. 每小题列出的四个备选项中至少有一个是符合题目要求的. 全部选对的得 2 分，选对但不选全的得 1 分，有选错的得 0 分）

14. 如图所示是我国全超导托卡马克核聚变实验装置. 2018 年 11 月，该装置实现了 1×10^8℃等离子体运行等多项重大突破，为未来和平利用聚变能量迈出了重要一步. 关于核聚变，下列说法正确的是 （ ）



A. 聚变又叫热核反应

B. 太阳就是一个巨大的热核反应堆

C. 高温能使原子核克服核力而聚变

D. 对相同质量的核燃料，轻核聚变比重核裂变产能多

15. 为了提高松树上松果的采摘率和工作效率，工程技术人员利用松果的惯性发明了用打击杆、振动器使松果落下的两种装置，如图甲、乙所示. 则 （ ）



甲



乙

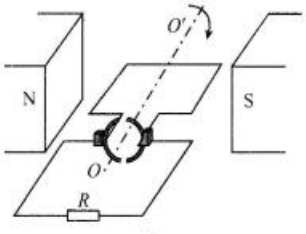
A. 针对不同树木，落果效果最好的振动频率可能不同

B. 随着振动器频率的增加，树干振动幅度一定增大

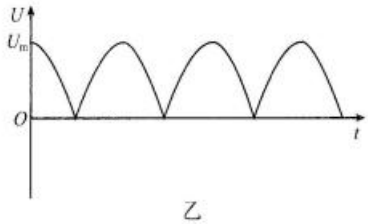
C. 打击杆对不同粗细树干打击结束后，树干的振动频率相同

D. 稳定后，不同粗细树干的振动频率始终与振动器的振动频率相同

16. 发电机的示意图如图甲所示，边长为 L 的正方形金属框，在磁感应强度为 B 的匀强磁场中以恒定角速度绕 OO' 轴转动，阻值为 R 的电阻两端的电压如图乙所示. 其他电阻不计，图乙中的 U_m 为已知量. 则金属框转动一周 （ ）



甲



乙

A. 框内电流方向不变

B. 电动势的最大值为 U_m

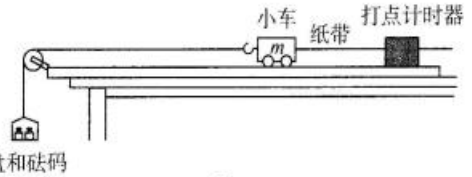
C. 流过电阻的电荷量 $q=\dfrac{2BL^2}{R}$

D. 电阻产生的焦耳热 $Q=\dfrac{\pi U_m BL^2}{R}$

非选择题部分

三、非选择题(本题共 6 小题，共 55 分)

17. (7 分)(1)用如图甲所示装置进行“探究功与速度变化的关系”实验. 装有砝码的盘用绕过滑轮的细线牵引小车，盘和砝码的重力可当作牵引力. 小车运动的位移和速度可以由打点纸带测出，以小车为研究对象，改变砝码质量，便可探究牵引力所做的功与小车速度变化的关系.



甲

①关于这个实验，下列说法正确的是_____(多选).

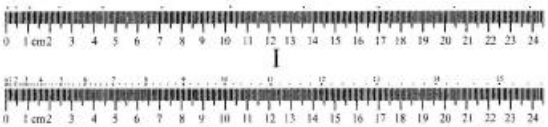
A. 需要补偿小车受到阻力的影响

B. 该实验装置可以“验证机械能守恒定律”

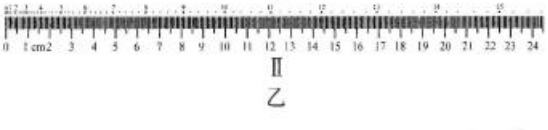
C. 需要通过调节定滑轮使细线与长木板平行

D. 需要满足盘和砝码的总质量远小于小车的质量

②如图乙所示是两条纸带，实验时打出的应是第_____(填“Ⅰ”或“Ⅱ”)条纸带.



Ⅰ

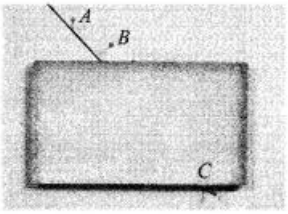


Ⅱ

乙

③根据实验数据，在坐标纸上画出的 $W-v^2$ 图像是一条过原点的直线，据此图像_____(填“能”或“不能”)求出小车的质量.

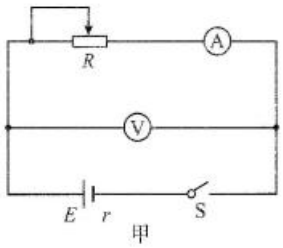
(2)小明同学在做"测定玻璃的折射率"实验时，发现只有3枚大头针，他把大头针A、B、C插在如图丙所示位置，并测出了玻璃的折射率. 请画出光路图，标出入射角i和折射角r，并写出折射率n的计算式.



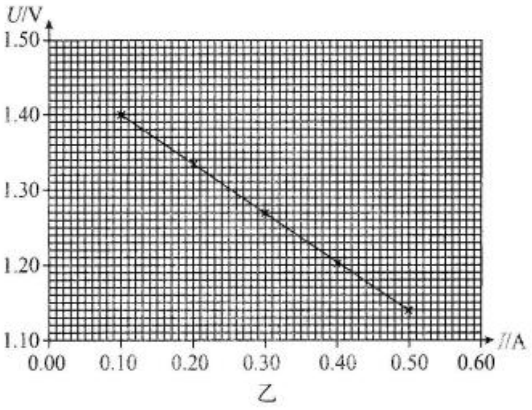
丙

18. (7分)(1)在"测定电池的电动势和内阻"实验中：

①用如图甲所示的电路图测量，得到的一条实验数据拟合线如图乙所示，则该电池的电动势$E=$_____V(保留三位有效数字)；内阻$r=$_____Ω(保留两位有效数字).



甲



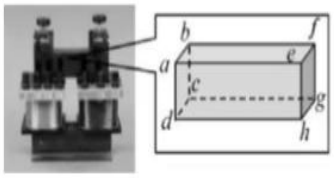
乙

②现有如图丙所示的实验器材，照片中电阻箱阻值可调范围为0～9 999 Ω，滑动变阻器阻值变化范围为0～10 Ω，电流表G的量程为0～3 mA、内阻为200 Ω，电压表的量程有0～3 V和0～15 V. 请在图丙中选择合适的器材，并画出两种测定一节干电池的电动势和内阻的电路图.



丙

(2)在"探究变压器线圈两端的电压与匝数的关系"实验中，可拆变压器如图丁所示. 为了减小涡流在铁芯中产生的热量，铁芯是由相互绝缘的硅钢片平行叠成. 硅钢片应平行于_____(单选).



第18题图4

A. 平面$abcd$　　B. 平面$abfe$

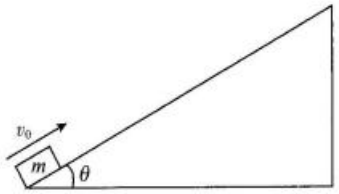
C. 平面$abgh$　　D. 平面$aehd$

19. (9分)如图所示，质量$m=2$ kg的滑块以$v_0=16$ m/s的初速度沿倾角$\theta=37°$的斜面上滑，经$t=2$ s滑行到最高点. 然后，滑块返回到出发点. 已知$\sin37°=0.6$，$\cos37°=0.8$，求滑块：

(1)最大位移值x；

(2)与斜面间的动摩擦因数μ；

(3)从最高点返回到出发点的过程中重力的平均功率$\bar{P}$.

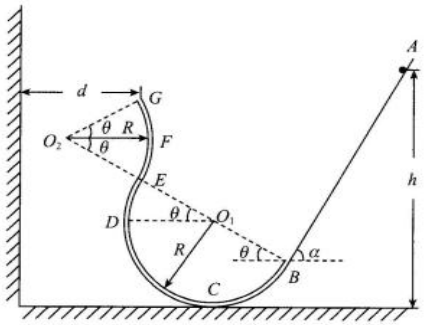


20. (12分)如图所示，竖直平面内由倾角$\alpha=60°$的斜面轨道AB、半径均为R的半圆形细圆管轨道$BCDE$和$\frac{1}{6}$圆周细圆管轨道EFG构成一游戏装置固定于地面，B、E两处轨道平滑连接，轨道所在平面与竖直墙面垂直. 轨道出口处G和圆心O_2的连线，以及O_2、E、O_1和B四点连成的直线与水平线间的夹角均为$\theta=30°$，G点与竖直墙面的距离$d=\sqrt{3}R$. 现将质量为m的小球从斜面的某高度h处静止释放. 小球只有与竖直墙面间的碰撞可视为弹性碰撞，不计小球大小和所受阻力.

(1)若释放处高度$h=h_0$，当小球第一次运动到圆管最低点C时，求速度大小v_C及在此过程中所受合力的冲量I的大小和方向；

(2)求小球在圆管内与圆心O_1点等高的D点所受弹力F_N与h的关系式；

(3)若小球释放后能从原路返回到出发点，高度h应该满足什么条件？



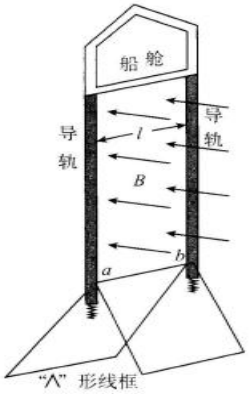
21.（10 分）“嫦娥五号”成功实现月球着陆和返回，鼓舞人心．小明知道月球上没有空气，无法靠降落伞减速降落，于是设计了一种新型着陆装置．如图所示，该装置由船舱、间距为 l 的平行导轨、产生垂直导轨平面的磁感应强度大小为 B 的匀强磁场的磁体和“Λ”形刚性线框组成，“Λ”形线框 ab 边可沿导轨滑动并接触良好．船舱、导轨和磁体固定在一起，总质量为 m_1．整个装置竖直着陆到月球表面前瞬间的速度大小为 v_0，接触月球表面后线框速度立即变为零．经过减速，在导轨下方缓冲弹簧接触月球表面前船舱已可视为匀速．已知船舱电阻为 $3r$；“Λ”形线框的质量为 m_2，其 7 条边的边长均为 l，电阻均为 r；月球表面的重力加速度为 $\frac{g}{6}$．整个运动过程中只有 ab 边在磁场中，线框与月球表面绝缘，不计导轨电阻和摩擦力．

（1）求着陆装置接触到月球表面后瞬间线框 ab 边产生的电动势 E_0；

（2）通过画等效电路图，求着陆装置接触到月球表面后瞬间流过 ab 的电流 I_0；

（3）求船舱匀速运动时的速度大小 v；

（4）同桌小张认为在磁场上方、两导轨之间连接一个电容为 C 的电容器，在着陆减速过程中还可以回收部分能量，在其他条件不变的情况下，求船舱匀速运动时的速度大小 v' 和此时电容器所带电荷量 q．



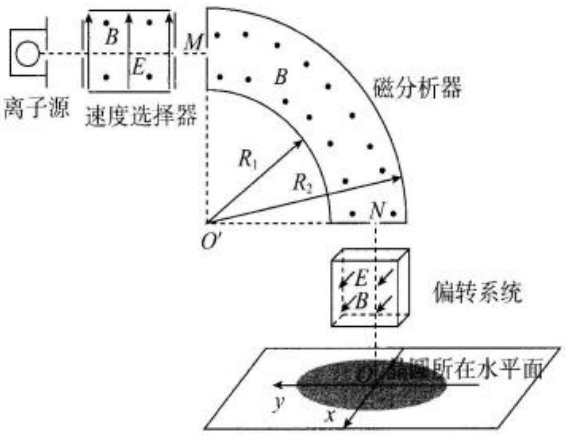
22.（10 分）在芯片制造过程中，离子注入是其中一道重要的工序．如图所示是离子注入工作原理示意图，离子经加速后沿水平方向进入速度选择器，然后通过磁分析器，选择出特定比荷的离子，经偏转系统后注入处在水平面内的晶圆（硅片）．速度选择器、磁分析器和偏转系统中的匀强磁场的磁感应强度大小均为 B，方向垂直纸面向外；速度选择器和偏转系统中的匀强电场场强大小均为 E，方向分别为竖直向上和垂直纸面向外．磁分析器截面是内外半径分别为 R_1 和 R_2 的四分之一圆环，其两端中心位置 M 和 N 处各有一个小孔；偏转系统中电场和磁场的分布区域是同一边长为 L 的正方体，其底面与晶圆所在水平面平行，间距也为 L．当偏转系统不加电场及磁场时，离子恰好竖直注入到晶圆上的 O 点（即图中坐标原点，x 轴垂直纸面向外）．整个系统置于真空中，不计离子重力，打在晶圆上的离子，经过电场和磁场偏转的角度都很小．当 α 很小时，有 $\sin\alpha\approx\tan\alpha\approx\alpha$，$\cos\alpha\approx1-\frac{1}{2}\alpha^2$．求：

（1）离子通过速度选择器后的速度大小 v 和磁分析器选择出来离子的比荷 $\frac{q}{m}$；

（2）偏转系统仅加电场时离子注入晶圆的位置，用坐标 (x,y) 表示；

（3）偏转系统仅加磁场时离子注入晶圆的位置，用坐标 (x,y) 表示；

（4）偏转系统同时加上电场和磁场时离子注入晶圆的位置，用坐标 (x,y) 表示，并说明理由．



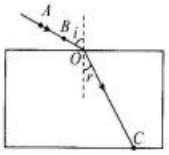
参考答案

1.D 2.C 3.A 4.D 5.D 6.C 7.C 8.B 9.A 10.B
11.C 12.B 13.D 14.ABD 15.AD 16.BD

17.(7 分)

(1)①ACD ②Ⅱ ③能

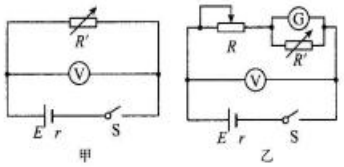
(2)光路图(如图所示,并标出 i 和 r) $n=\dfrac{\sin i}{\sin r}$



18.(7 分)

(1)①1.45(1.45～1.47) 0.67(0.63～0.67)

②如图甲、乙所示



(2)D

19.(9 分)

解:(1)滑块向上做匀减速直线运动,有

$x=\dfrac{v_0}{2}t$

解得 $x=16$ m

(2)加速度 $a_1=\dfrac{\Delta v}{t}=8\ \mathrm{m/s^2}$

上滑过程中有 $a_1=\dfrac{mg\sin\theta+\mu mg\cos\theta}{m}=g\sin\theta+\mu g\cos\theta$

解得 $\mu=0.25$

(3)下滑过程中有 $a_2=\dfrac{mg\sin\theta-\mu mg\cos\theta}{m}=g\sin\theta-\mu g\cos\theta=4\ \mathrm{m/s^2}$

由运动学公式得 $v_1=\sqrt{2a_2x}=8\sqrt{2}\ \mathrm{m/s}=11.3\ \mathrm{m/s}$

重力的平均功率 $\overline{P}=mg\overline{v}\cos(90^\circ-\theta)$

$=48\sqrt{2}\ \mathrm{W}=67.9\ \mathrm{W}$

20.(12 分)

解:(1)由机械能守恒定律得 $mgh_0=\dfrac{1}{2}mv_C^2$

$v_C=\sqrt{2gh_0}$

由动量定理得 $I=mv_C=m\sqrt{2gh_0}$

方向水平向左

(2)由机械能守恒定律得 $mg(h-R)=\dfrac{1}{2}mv_D^2$

牛顿第二定律得 $F_N=\dfrac{mv_D^2}{R}$

解得 $F_N=2mg(\dfrac{h}{R}-1)$

满足的条件 $h\geqslant R$

(3)第 1 种情况:不滑离轨道原路返回,条件是 $h\leqslant\dfrac{5}{2}R$

第 2 种情况:与墙面垂直碰撞后原路返回,在进入 G 之前做平抛运动

$v_x t=v_x\dfrac{v_y}{g}=d$,其中 $v_x=v_G\sin\theta$,$v_y=v_G\cos\theta$

$v_G\sin\theta\cdot\dfrac{v_G\cos\theta}{g}=d$

得 $v_G=2\sqrt{gR}$

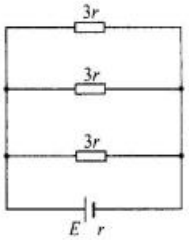
由机械能守恒定律得 $mg\left(h-\dfrac{5}{2}R\right)=\dfrac{1}{2}mv_G^2$

h 满足的条件 $h=\dfrac{9}{2}R$

21.(10 分)

解:(1)电动势 $E_0=Blv_0$

(2)等效电路如图所示.



总电阻 $R=2r$

电流 $I_0=\dfrac{E_0}{R}=\dfrac{Blv_0}{2r}$

(3)匀速运动时线框受到安培力 $F_A=\dfrac{B^2l^2v}{2r}$

根据牛顿第三定律知,质量为 m_1 的部分受力 $F=F_A$,方向竖直向上,由匀速条件得 $F=\dfrac{m_1g}{6}$

解得 $v=\dfrac{m_1gr}{3B^2l^2}$

(4)匀速运动时电容器不充放电,$v'=v=\dfrac{m_1gr}{3B^2l^2}$

$U_C=\dfrac{1}{3}I\times3r=\dfrac{m_1gr}{6Bl}$

$q=CU_C=\dfrac{m_1grC}{6Bl}$

22.（10 分）

解：(1)通过速度选择器后离子的速度大小为

$$v=\frac{E}{B}$$

从磁分析器中心孔 N 射出离子的运动半径为 $R=\frac{R_1+R_2}{2}$

由 $\frac{mv^2}{R}=qvB$

得 $\frac{q}{m}=\frac{v}{RB}=\frac{2E}{(R_1+R_2)B^2}$

(2)经过电场后，离子在 x 轴方向偏转的距离

$$x_1=\frac{1}{2}\frac{qE}{m}\left(\frac{L}{v}\right)^2$$

$$\tan\theta=\frac{qEL}{mv^2}$$

离开电场后，离子在 x 轴方向偏移的距离

$$x_2=L\tan\theta=\frac{qEL^2}{mv^2}$$

$$x=x_1+x_2=\frac{3qEL^2}{2mv^2}=\frac{3L^2}{R_1+R_2}$$

位置坐标为 $(\frac{3L^2}{R_1+R_2},0)$

(3)离子进入磁场后做圆周运动半径 $r=\frac{mv}{qB}$

$$\sin\alpha=\frac{L}{r}$$

经过磁场后，离子在 y 轴方向偏转距离

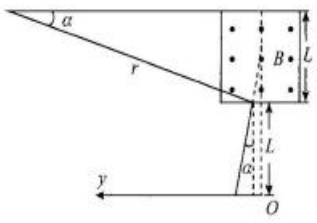
$$y_1=r(1-\cos\alpha)\approx\frac{L^2}{R_1+R_2}$$

离开磁场后，离子在 y 轴方向偏移距离

$$y_2=L\tan\alpha\approx\frac{2L^2}{R_1+R_2}$$

$$y=y_1+y_2\approx\frac{3L^2}{R_1+R_2}$$

位置坐标为 $(0,\frac{3L^2}{R_1+R_2})$



(4)注入晶圆的位置坐标为 $(\frac{3L^2}{R_1+R_2},\frac{3L^2}{R_1+R_2})$

电场引起的速度增量对 y 轴方向的运动不产生影响

本试卷 g 均取 10 m/s^2.

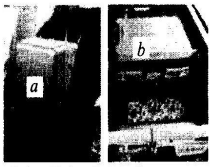
一、选择题Ⅰ(本题共 13 小题，每小题 3 分，共 39 分. 每小题列出的四个备选项中只有一个是符合题目要求的，不选、多选、错选均不得分)

1. 国际单位制中电荷量的单位符号是 C，如果用国际单位制基本单位的符号来表示，正确的是 （ ）

A. F·V　　B. A·s

C. J/V　　D. N·m/V

2. 如图所示，底部均有 4 个轮子的行李箱 a 竖立、b 平卧放置在公交车上，箱子四周有一定空间. 当公交车 （ ）



A. 缓慢启动时，两只行李箱一定相对车子向后运动

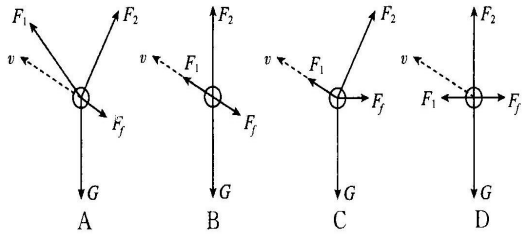
B. 急刹车时，行李箱 a 一定相对车子向前运动

C. 缓慢转弯时，两只行李箱一定相对车子向外侧运动

D. 急转弯时，行李箱 b 一定相对车子向内侧运动

3. 矢量发动机是喷口可向不同方向偏转以产生不同方向推力的一种发动机. 当“歼-20”隐形战斗机以速度 v 斜向上飞行时，其矢量发动机的喷口如图所示. 已知飞机受到重力 G、发动机推力 F_1、与速度方向垂直的升力 F_2 和与速度方向相反的空气阻力 F_f. 下列受力分析示意图可能正确的是 （ ）





4. 在抗击新冠病毒的过程中，广泛使用了红外体温计测量体温，如图所示. 下列说法正确的是 （ ）



A. 当体温超过 37.3℃时人体才辐射红外线

B. 当体温超过周围空气温度时人体才辐射红外线

C. 红外体温计是依据体温计发射红外线来测体温的

D. 红外体温计是依据人体温度越高，辐射的红外线强度越大来测体温的

5. 下列说法正确的是 （ ）

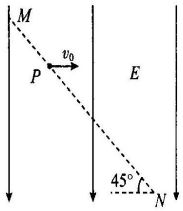
A. 质子的德布罗意波长与其动能成正比

B. 天然放射的三种射线，穿透能力最强的是 α 射线

C. 光电效应实验中的截止频率与入射光的频率有关

D. 电子束穿过铝箔后的衍射图样说明电子具有波动性

6. 如图所示，一质量为 m、电荷量为 $q(q>0)$ 的粒子以速度 v_0 从 MN 连线上的 P 点水平向右射入大小为 E、方向竖直向下的匀强电场中. 已知 MN 与水平方向成 45°角，粒子的重力可以忽略，则粒子到达 MN 连线上的某点时 （ ）



A. 所用时间为 $\frac{mv_0}{qE}$

B. 速度大小为 $3v_0$

C. 与 P 点的距离为 $\frac{2\sqrt{2}mv_0^2}{qE}$

D. 速度方向与竖直方向的夹角为 30°

7. 火星探测任务“天问一号”的标识如图所示. 若火星和地球绕太阳的运动均可视为匀速圆周运动，火星公转轨道半径与地球公转轨道半径之比为 3∶2，则火星与地球绕太阳运动的 （ ）



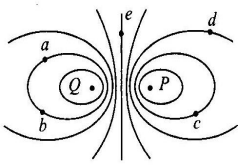
A. 轨道周长之比为 2∶3

B. 线速度大小之比为 $\sqrt{3}:\sqrt{2}$

C. 角速度大小之比为 $2\sqrt{2}:3\sqrt{3}$

D. 向心加速度大小之比为 9∶4

8. 空间 P、Q 两点处固定电荷量绝对值相等的点电荷，其中 Q 点处为正电荷，P、Q 两点附近电场的等势线分布如图所示，a、b、c、d、e 为电场中的 5 个点，设无穷远处电势为 0，则 （ ）



A. e 点的电势大于 0

B. a 点和 b 点的电场强度相同

C. b 点的电势低于 d 点的电势

D. 负电荷从 a 点移动到 c 点时电势能增加

9. 特高压直流输电是国家重点能源工程. 如图所示，两根等高、相互平行的水平长直导线分别通有方向相同的电流 I_1 和 I_2，$I_1>I_2$. a、b、c 三点连线与两根导线等高并垂直，b 点位于两根导线间的中点，a、c 两点与 b 点距离相等，d 点位于 b 点正下方. 不考虑地磁场的影响，则 （ ）



A. b 点处的磁感应强度大小为 0

B. d 点处的磁感应强度大小为 0

C. a 点处的磁感应强度方向竖直向下

D. c 点处的磁感应强度方向竖直向下

10. 如图是“中国天眼”500 m 口径球面射电望远镜维护时的照片. 为不损伤望远镜球面，质量为 m 的工作人员被悬在空中的氦气球拉着，当他在离底部有一定高度的望远镜球面上缓慢移动时，氦气球对其有大小为 $\frac{5}{6}mg$、方向竖直向上的拉力作用，使其有“人类在月球上行走”的感觉，若将人视为质点，此时工作人员 （ ）



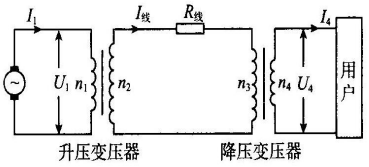
A. 受到的重力大小为 $\frac{1}{6}mg$

B. 受到的合力大小为 $\frac{1}{6}mg$

C. 对球面的压力大小为 $\frac{1}{6}mg$

D. 对球面的作用力大小为 $\frac{1}{6}mg$

11. 如图所示，某小型水电站发电机的输出功率 $P=100$ kW，发电机的电压 $U_1=250$ V，经变压器升压后向远处输电，输电线总电阻 $R_{线}=8\ \Omega$，在用户端用降压变压器把电压降为 $U_4=220$ V. 已知输电线上损失的功率 $P_{线}=5$ kW，假设两个变压器均是理想变压器，下列说法正确的是 （ ）



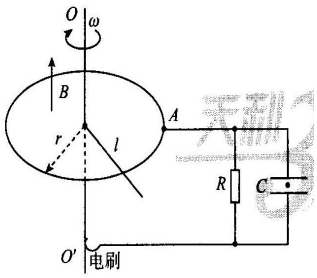
A. 发电机输出的电流 $I_1=40$ A

B. 输电线上的电流 $I_{线}=625$ A

C. 降压变压器的匝数比 $n_3:n_4=190:11$

D. 用户得到的电流 $I_4=455$ A

12. 如图所示，固定在水平面上的半径为 r 的金属圆环内存在方向竖直向上、磁感应强度大小为 B 的匀强磁场. 长为 l 的金属棒，一端与圆环接触良好，另一端固定在竖直导电转轴 OO' 上，随轴以角速度 ω 匀速转动. 在圆环的 A 点和电刷间接有阻值为 R 的电阻和电容为 C、板间距为 d 的平行板电容器，有一带电微粒在电容器极板间处于静止状态. 已知重力加速度为 g，不计其他电阻和摩擦，下列说法正确的是 （ ）



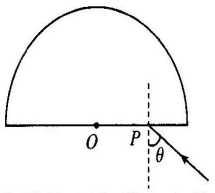
A. 棒产生的电动势为 $\frac{1}{2}Bl^2\omega$

B. 微粒的电荷量与质量之比为 $\frac{2gd}{Br^2\omega}$

C. 电阻消耗的电功率为 $\frac{\pi B^2r^4\omega}{2R}$

D. 电容器所带的电荷量为 $CBr^2\omega$

13. 如图所示，圆心为O、半径为R的半圆形玻璃砖置于水平桌面上，光线从P点垂直界面入射后，恰好在玻璃砖圆形表面发生全反射；当入射角$\theta=60°$时，光线从玻璃砖圆形表面出射后恰好与入射光平行. 已知真空中的光速为c，则 （ ）



A. 玻璃砖的折射率为1.5

B. OP之间的距离为$\frac{\sqrt{2}}{2}R$

C. 光在玻璃砖内的传播速度为$\frac{\sqrt{3}}{3}c$

D. 光从玻璃到空气的临界角为30°

二、选择题Ⅱ（本题共3小题，每小题2分，共6分. 每小题列出的四个备选项中至少有一个是符合题目要求的. 全部选对的得2分，选对但不全的得1分，有选错的得0分）

14. 太阳辐射的总功率约为4×10^{26} W，其辐射的能量来自于聚变反应. 在聚变反应中，一个质量为1 876.1 MeV/c^2（c为真空中的光速）的氘核（${}_1^2\mathrm{H}$）和一个质量为2 809.5 MeV/c^2的氚核（${}_1^3\mathrm{H}$）结合为一个质量为3 728.4 MeV/c^2的氦核（${}_2^4\mathrm{He}$），并放出一个X粒子，同时释放大约17.6 MeV的能量. 下列说法正确的是 （ ）

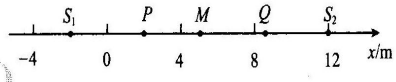
A. X粒子是质子

B. X粒子的质量为939.6 MeV/c^2

C. 太阳每秒因为辐射损失的质量约为4.4×10^9 kg

D. 太阳每秒因为辐射损失的质量约为17.6 MeV/c^2

15. 如图所示，x轴上-2 m、12 m处有两个振动周期均为4 s、振幅均为1 cm的相同的波源S_1、S_2，$t=0$时刻同时开始竖直向下振动，产生波长均为4 m沿x轴传播的简谐横波. P、M、Q分别是x轴上2 m、5 m和8.5 m的三个点，下列说法正确的是 （ ）



A. 6.0 s时P、M、Q三点均已振动

B. 8.0 s后M点的位移始终是2 cm

C. 10.0 s后P点的位移始终是0

D. 10.5 s时Q点的振动方向竖直向下

16. 如图所示，系留无人机是利用地面直流电源通过电缆供电的无人机，旋翼由电动机带动. 现有质量为20 kg、额定功率为5 kW的系留无人机从地面起飞沿竖直方向上升，经过200 s到达100 m高处后悬停并进行工作. 已知直流电源供电电压为400 V，若不计电缆的质量和电阻，忽略电缆对无人机的拉力，则 （ ）



A. 空气对无人机的作用力始终大于或等于200 N

B. 直流电源对无人机供电的额定电流为12.5 A

C. 无人机上升过程中消耗的平均功率为100 W

D. 无人机上升及悬停时均有部分功率用于对空气做功

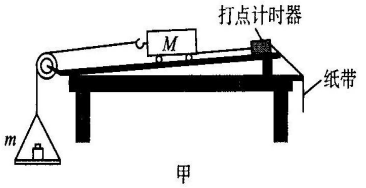
三、非选择题（本题共6小题，共55分）

17. （7分）（1）做“探究加速度与力、质量的关系”实验时，图1甲是教材中的实验方案；图1乙是拓展方案，其实验操作步骤如下：

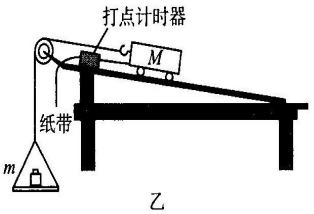
（ⅰ）挂上托盘和砝码，改变木板的倾角，使质量为M的小车拖着纸带沿木板匀速下滑；

（ⅱ）取下托盘和砝码，测出其总质量为m，让小车沿木板下滑，测出加速度a；

（ⅲ）改变砝码质量和木板倾角，多次测量，通过作图可得到$a-F$的关系.



甲



乙

图1

①实验获得如图2所示的纸带，计数点a、b、c、d、e、f间均有四个点未画出，则在打d点时小车的速度大小$v_d=$_____ m/s（保留两位有效数字）；

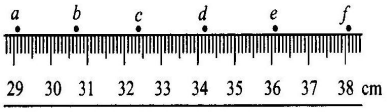


图2

②需要满足条件$M\gg m$的方案是_____（填“甲”“乙”或“甲和乙”）；在作$a-F$图像时，把mg作为F值的是_____（填“甲”“乙”或“甲和乙”）.

（2）某同学用单摆测量重力加速度：

①为了减少测量误差，下列做法正确的是_____（多选）；

A. 摆的振幅越大越好

B. 摆球质量大些、体积小些

C. 摆线尽量细些、长些、伸缩性小些

D. 计时的起、止位置选在摆球达到的最高点处

②改变摆长，多次测量，得到周期平方与摆长的关系图像如图3所示，所得结果与当地重力加速度值相符，但发现其延长线没有过原点，其原因可能是_____.

A. 测周期时多数了一个周期

B. 测周期时少数了一个周期

C. 测摆长时直接将摆线的长度作为摆长

D. 测摆长时将摆线的长度加上摆球的直径作为摆长

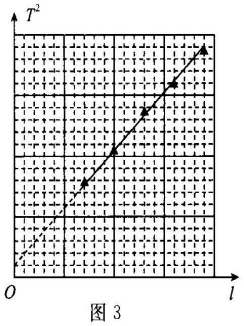


图 3

18.(7 分)某同学分别用图 1 甲和图 1 乙的电路测量同一节干电池的电动势和内阻.

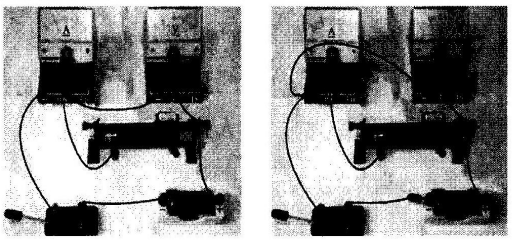

甲　　乙

图 1

(1)在相应的方框中画出图 1 乙的电路图;

(2)某次测量时电流表和电压表的示数如图 2 所示,则电流 I=_____ A,电压 U=_____ V;

(3)实验得到如图 3 所示的两条直线,图中直线Ⅰ对应电路是图 1 _____(填"甲"或"乙");

(4)该电池的电动势 E=_____ V(保留三位有效数字),内阻 r=_____ Ω(保留两位有效数字).

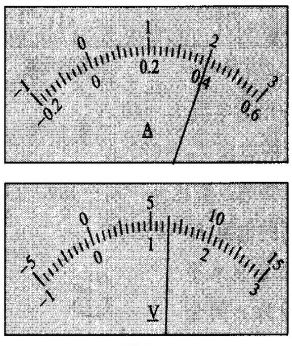


图 2

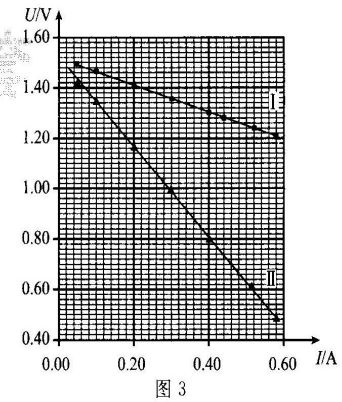


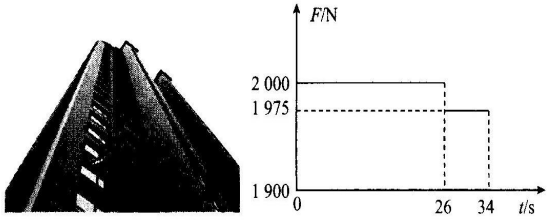
图 3

19.(9 分)如图甲所示,有一质量 m=200 kg 的物件在电机的牵引下从地面竖直向上经加速、匀速、匀减速至指定位置.当加速运动到总位移的 $\frac{1}{4}$ 时开始计时,测得电机的牵引力随时间变化的 F-t 图线如图乙所示,t=34 s 末速度减为 0 时恰好到达指定位置.若不计绳索的质量和空气阻力,求物件

(1)做匀减速运动的加速度大小和方向;

(2)匀速运动的速度大小;

(3)总位移的大小.



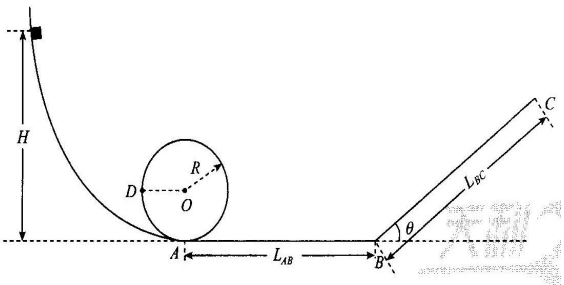
甲　　乙

20.(12 分)小明将如图所示的装置放在水平地面上,该装置由弧形轨道、竖直圆轨道、水平直轨道 AB 和倾角 θ=37° 的斜轨道 BC 平滑连接而成.质量 m=0.1 kg 的小滑块从弧形轨道离地高 H=1.0 m 处静止释放.已知 R=0.2 m,L_{AB}=L_{BC}=1.0 m,滑块与轨道 AB 和 BC 间的动摩擦因数均为 μ=0.25,弧形轨道和圆轨道均可视为光滑,忽略空气阻力.

(1)求滑块运动到与圆心 O 等高的 D 点时对轨道的压力;

(2)通过计算判断滑块能否冲出斜轨道的末端 C 点;

(3)若滑下的滑块与静止在水平直轨道上距 A 点 x 处的质量为 $2m$ 的小滑块相碰,碰后一起运动,动摩擦因数仍为 0.25,求它们在轨道 BC 上到达的高度 h 与 x 之间的关系.(碰撞时间不计,sin37°=0.6,cos37°=0.8)



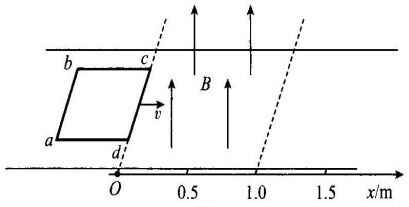
21.(10 分)如图甲所示,在绝缘光滑水平桌面上,以 O 为原点、水平向右为正方向建立 x 轴,在 0≤x≤1.0 m 区域内存在方向竖直向上的匀强磁场.桌面上有一边长 L=0.5 m、电阻 R=0.25 Ω 的正方形线框 $abcd$,当平行于磁场边界的 cd 边进入磁场时,在沿 x 方向的外力 F 作用下以 v=1.0 m/s 的速度做匀速运动,直到 ab 边进入磁场时撤去

外力. 若以 cd 边进入磁场时作为计时起点，在 $0\leqslant t\leqslant 1.0$ s 内磁感应强度 B 的大小与时间 t 的关系如图乙所示，在 $0\leqslant t\leqslant 1.3$ s 内线框始终做匀速运动.

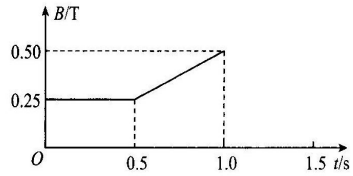
(1)求外力 F 的大小；

(2)在 $1.0\ \text{s}\leqslant t\leqslant 1.3$ s 内存在连续变化的磁场，求磁感应强度 B 的大小与时间 t 的关系；

(3)求在 $0\leqslant t\leqslant 1.3$ s 内流过导线横截面的电荷量 q.



甲



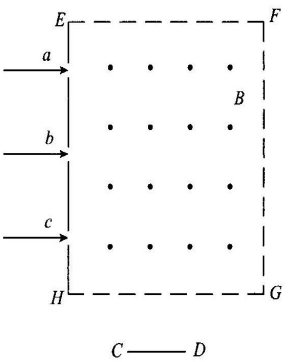
乙

22. (10 分)某种离子诊断测量简化装置如图所示. 竖直平面内存在边界为矩形 $EFGH$、方向垂直纸面向外、磁感应强度大小为 B 的匀强磁场，探测板 CD 平行于 HG 水平放置，能沿竖直方向缓慢移动且接地. a、b、c 三束宽度不计、间距相等的离子束中的离子均以相同速度持续从边界 EH 水平射入磁场，b 束中的离子在磁场中沿半径为 R 的四分之一圆弧运动后从下边界 HG 竖直向下射出，并打在探测板的右边缘 D 点. 已知每束每秒射入磁场的离子数均为 N，离子束间的距离均为 $0.6R$，探测板 CD 的宽度为 $0.5R$，离子质量均为 m、电荷量均为 q，不计重力及离子间的相互作用.

(1)求离子速度 v 的大小及 c 束中的离子射出磁场边界 HG 时与 H 点的距离 s；

(2)求探测到三束离子时探测板与边界 HG 的最大距离 $L_{\max}$；

(3)若打到探测板上的离子被全部吸收，求离子束对探测板的平均作用力的竖直分量 F 与板到 HG 距离 L 的关系.



答案

1B 2B 3A 4D 5D 6C 7C 8D 9C 10D
11C 12B 13C 14BC 15CD 16BD

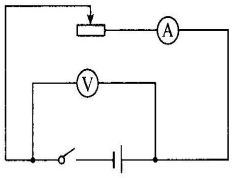
17. (7 分)

(1)①0.18～0.19 ②甲 甲和乙

(2)①BC ②C

18. (7 分)

(1)如图所示



(2)0.39～0.41 1.29～1.31

(3)乙

(4)1.51～1.54 0.52～0.54

19. (9 分)

解：(1)牛顿第二定律 $mg-F_{\text{T}}=ma$

得 $a=g-\dfrac{F_{\text{T}}}{m}=0.125\ \text{m/s}^2$

竖直向下

(2)运动学公式 $v=at_2=1\ \text{m/s}$

(3)匀速上升的位移 $h_1=vt_1=26\ \text{m}$

匀减速上升的位移 $h_2=\dfrac{v}{2}t_2=4\ \text{m}$

总位移 $h=40\ \text{m}$

【考点定位】本题考查牛顿第二定律、受力分析、匀变速直线运动规律.

20. (12 分)

解：(1)机械能守恒定律 $mgH=mgR+\dfrac{1}{2}mv_D^2$

牛顿第二定律，$F_{\text{N}}=\dfrac{mv_D^2}{R}=8\ \text{N}$

牛顿第三定律 $F'_{\text{N}}=F_{\text{N}}=8\ \text{N}$，方向水平向左

(2)能在斜轨道上到达的最高点为 C' 点，功能关系

$mgH=\mu mgL_{AB}+\mu mgL_{BC'}\cos\theta+mgL_{BC'}\sin\theta$

得 $L_{BC'}=\dfrac{15}{16}\ \text{m}<1.0\ \text{m}$，故不会冲出

(3)滑块运动到距 A 点 x 处的速度为 v，动能定理

$mgH-\mu mgx=\dfrac{1}{2}mv^2$

碰撞后的速度为 v'，动量守恒定律 $mv=3mv'$

设碰撞后滑块滑到斜轨道的高度为 h，动能定理

$-3\mu mg(L_{AB}-x)-3\mu mg\dfrac{h}{\tan\theta}-3mgh=0-\dfrac{1}{2}(3m)v'^2$

得 $h=\dfrac{1}{6}x-\dfrac{5}{48}\left(\dfrac{5}{8}\ \text{m}<x\leqslant 1\ \text{m}\right)$

$h=0\left(0\leqslant x\leqslant\dfrac{5}{8}\ \text{m}\right)$

【考点定位】本题考查动能定理、圆周运动、牛顿第二定律、牛顿第三定律、机械能守恒定律.

21. (10 分)

解：(1)$t_0=0$，$B_0=0.25\ \text{T}$

回路电流 $I=\dfrac{B_0Lv}{R}$

安培力 $F_{\text{A}}=\dfrac{B_0^2L^2}{R}v$

外力 $F=F_{\text{A}}=0.062\ 5\ \text{N}$

(2)匀速出磁场，电流为 0，磁通量不变 $\Phi_1=\Phi$

$t_1=1.0$ s 时，$B_1=0.5\ \text{T}$，磁通量 $\Phi_1=B_1L^2$

t 时刻，磁通量 $\Phi=BL[L-v(t-t_1)]$

得 $B=\dfrac{1}{6-4t}$

(3)$0\leqslant t\leqslant 0.5$ s 电荷量 $q_1=\dfrac{B_0L^2}{R}=0.25$ C

0.5 s$\leqslant t\leqslant$1.0 s 电荷量 $q_2=\dfrac{B_1L^2-B_0L^2}{R}=0.25$ C

总电荷量 $q=q_1+q_2=0.5$ C

【考点定位】本题考查法拉第电磁感应定律、受力分析、安培力、电荷量.

22.(10 分)

解:(1)$qvB=\dfrac{mv^2}{R}$ 得 $v=\dfrac{qBR}{m}$

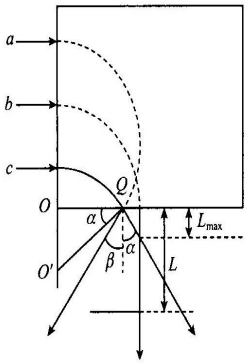
几何关系 $OO'=0.6R$

$s=\sqrt{R^2-(0.6R)^2}=0.8R$

(2)a、c 束中的离子从同一点 Q 射出,$\alpha=\beta$

$\tan\alpha=\dfrac{R-s}{L_{max}}$

$L_{max}=\dfrac{4}{15}R$



(3)a 或 c 束中每个离子动量的竖直分量

$p_z=p\cos\alpha=0.8qBR$

$0<L\leqslant\dfrac{4}{15}R$

$F_1=Np+2Np_z=2.6NqBR$

$\dfrac{4}{15}R<L\leqslant 0.4R$

$F_2=Np+Np_z=1.8NqBR$

$L>0.4R$

$F_3=Np=NqBR$

⑥2020 年 1 月浙江高考物理选考卷

本试卷 g 均取 10 m/s^2.

一、选择题Ⅰ(本题共 13 小题,每小题 3 分,共 39 分.每小题列出的四个备选项中只有一个是符合题目要求的,不选、多选、错选均不得分)

1.以下物理量为矢量,且单位是国际单位制基本单位的是 (　　)

A.电流、A　　B.位移、m

C.功、J　　D.磁感应强度、T

2.如图所示,一对父子掰手腕,父亲让儿子获胜.若父亲对儿子的力记为 F_1,儿子对父亲的力记为 F_2,则 (　　)



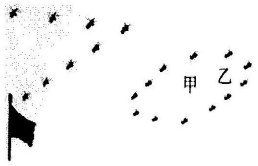
A.$F_2>F_1$

B.F_1 和 F_2 大小相等

C.F_1 先于 F_2 产生

D.F_1 后于 F_2 产生

3.如图所示,新中国成立 70 周年阅兵仪式上,国产武装直升机排列并保持“70”字样编队从天安门上空整齐飞过.甲、乙分别是编队中的两架直升机,则 (　　)



A.以甲为参考系,乙是运动的

B.以乙为参考系,甲是运动的

C.以甲为参考系,坐在观众席上的观众都是静止的

D.以乙为参考系,“70”字样编队中所有直升机都是静止的

4.下列说法正确的是 (　　)

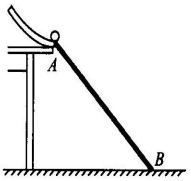
A.α 射线的穿透能力比 γ 射线强

B.天然放射现象说明原子具有复杂的结构

C.核聚变中平均每个核子放出的能量比裂变中平均每个核子的小

D.半衰期跟放射性元素以单质或化合物形式存在无关

5.如图所示,钢球从斜槽轨道末端以 v_0 的水平速度飞出,经过时间 t 落在斜靠的挡板 AB 中点.若钢球以 $2v_0$ 的速度水平飞出,则 (　　)



A.下落时间仍为 t　　B.下落时间为 $2t$

C.下落时间为 $\sqrt{2}t$　　D.落在挡板底端 B 点

6.小明在一根细橡胶管中灌满食盐水,两端用粗铜丝塞住管口,形成一段封闭的盐水柱.他将此盐水柱接到电源两端,电源电动势和内阻恒定.握住盐水柱两端将它水平均匀拉伸到原长的 1.2 倍,若忽略温度对电阻率的影响,则此盐水柱 (　　)

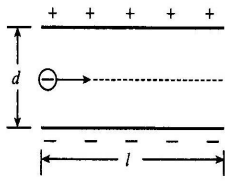
A.通过的电流增大

B.两端的电压增大

C.阻值增大为原来的 1.2 倍

D.电功率增大为原来的 1.44 倍

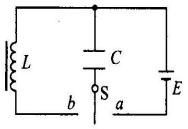
7.如图所示,电子以某一初速度沿两块平行板的中线方向射入偏转电场中,已知极板长度 l,间距 d,电子质量 m,电荷量 e.若电子恰好从极板边缘射出电场,由以上条件可以求出的是 (　　)



A.偏转电压　　B.偏转的角度

C.射出电场速度　　D.电场中运动的时间

8. 如图所示，单刀双掷开关 S 先打到 a 端让电容器充满电. $t=0$ 时开关 S 打到 b 端，$t=0.02$ s 时 LC 回路中电容器下极板带正电荷且电荷量第一次达到最大值. 则 （ ）



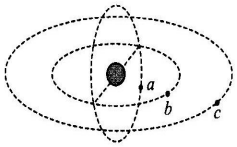
A. LC 回路的周期为 0.02 s

B. LC 回路的电流最大时电容器中电场能最大

C. $t=1.01$ s 时线圈中磁场能最大

D. $t=1.01$ s 时回路中电流沿顺时针方向

9. 如图所示，卫星 a、b、c 沿圆形轨道绕地球运行. a 是极地轨道卫星，在地球两极上空约 1 000 km 处运行；b 是低轨道卫星，距地球表面高度与 a 相等；c 是地球同步卫星，则（ ）



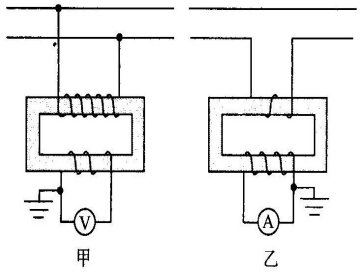
A. a、b 的周期比 c 大

B. a、b 的向心力一定相等

C. a、b 的速度大小相等

D. a、b 的向心加速度比 c 小

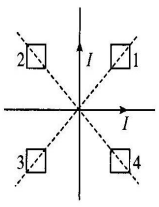
10. 如图所示，甲乙两图中的理想变压器以不同的方式接在高压电路中. 甲图中变压器原副线圈的匝数比为 k_1，电压表读数为 U，乙图中变压器原副线圈的匝数比为 k_2，电流表读数为 I. 则甲图中高压线电压和乙图中高压线电流分别为 （ ）



A. k_1U，k_2I　　B. k_1U，$\dfrac{I}{k_2}$

C. $\dfrac{U}{k_1}$，k_2I　　D. $\dfrac{U}{k_1}$，$\dfrac{I}{k_2}$

11. 如图所示，在光滑绝缘水平面上，两条固定的相互垂直彼此绝缘的导线通以大小相同的电流 I. 在角平分线上，对称放置四个相同的正方形金属框. 当电流在相同时间间隔内增加相同量，则 （ ）



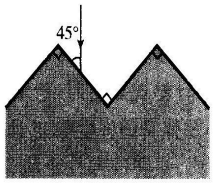
A. 1、3 线圈静止不动，2、4 线圈沿着对角线向内运动

B. 1、3 线圈静止不动，2、4 线圈沿着对角线向外运动

C. 2、4 线圈静止不动，1、3 线圈沿着对角线向内运动

D. 2、4 线圈静止不动，1、3 线圈沿着对角线向外运动

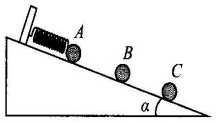
12. 如图所示，一束光与某材料表面成 45°角入射，每次反射的光能量为入射光能量的 k 倍（$0<k<1$）. 若这束光最终进入材料的能量为入射光能量的 $(1-k^2)$ 倍，则该材料折射率至少为 （ ）



A. $\dfrac{\sqrt{6}}{2}$　　B. $\sqrt{2}$

C. 1.5　　D. 2

13. 如图所示，在倾角为 α 的光滑绝缘斜面上固定一个挡板，在挡板上连接一根劲度系数为 k_0 的绝缘轻质弹簧，弹簧另一端与 A 球连接. A、B、C 三小球的质量均为 M，$q_A=q_0>0$，$q_B=-q_0$，当系统处于静止状态时，三小球等间距排列. 已知静电力常量为 k，则 （ ）



A. $q_C=\dfrac{4}{7}q_0$

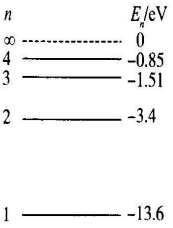
B. 弹簧伸长量为 $\dfrac{Mg\sin\alpha}{k_0}$

C. A 球受到的库仑力大小为 $2Mg$

D. 相邻两小球间距为 $q_0\sqrt{\dfrac{3k}{7Mg}}$

二、选择题Ⅱ（本题共 3 小题，每小题 2 分，共 6 分. 每小题列出的四个备选项中至少有一个是符合题目要求的. 全部选对的得 2 分，选对但不全的得 1 分，有选错的得 0 分）

14. 由玻尔原子模型求得氢原子能级如图所示，已知可见光的光子能量在 1.62 eV 到 3.11 eV 之间，则 （ ）



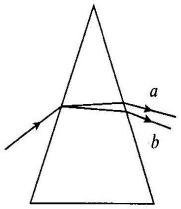
A. 氢原子从高能级向低能级跃迁时可能辐射出 γ 射线

B. 氢原子从 $n=3$ 的能级向 $n=2$ 的能级跃迁时会辐射出红外线

C. 处于 $n=3$ 能级的氢原子可以吸收任意频率的紫外线并发生电离

D. 大量氢原子从 $n=4$ 能级向低能级跃迁时可辐射出 2 种频率的可见光

15. 如图所示，波长为 λ_a 和 λ_b 的两种单色光射入三棱镜，经折射后射出两束单色光 a 和 b，则这两束光 （ ）



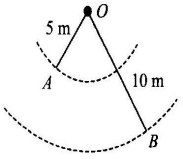
A. 照射同一种金属均有光电子逸出，光电子最大初动能 $E_{ka}>E_{kb}$

B. 射向同一双缝干涉装置，其干涉条纹间距 $\Delta x_a>\Delta x_b$

C. 在水中的传播速度 $v_a<v_b$

D. 光子动量 $p_a<p_b$

16. 如图所示，波源 O 垂直于纸面做简谐运动，所激发的横波在均匀介质中向四周传播，图中虚线表示两个波面. $t=0$ 时，离 O 点 5 m 的 A 点开始振动；$t=1$ s 时，离 O 点 10 m 的 B 点也开始振动，此时 A 点第五次回到平衡位置，则 （　　）



A. 波的周期为 0.4 s

B. 波的波长为 2 m

C. 波速为 $5\sqrt{3}$ m/s

D. $t=1$ s 时 AB 连线上有 4 个点处于最大位移

三、非选择题（本题共 6 小题，共 55 分）

17. (7 分)在“探究加速度与力、质量的关系”和用橡皮筋“探究做功与物体速度变化的关系”实验中：

(1)都是通过分析纸带上的点来测量物理量，下列说法正确的是_____(多选).

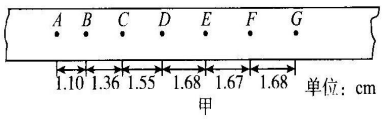
A. 都需要分析打点计时器打下的第一个点

B. 都不需要分析打点计时器打下的第一个点

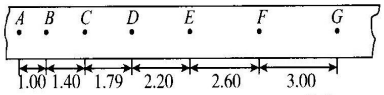
C. 一条纸带都只能获得一组数据

D. 一条纸带都能获得多组数据

(2)如图是两条纸带的一部分，A、B、C、…、G 是纸带上标出的计数点，每两个相邻的计数点之间还有 4 个打出的点未画出. 其中图_____(填“甲”或“乙”)所示的是用橡皮筋“探究做功与物体速度变化的关系”的实验纸带. “探究加速度与力、质量的关系”实验中，小车的加速度大小 $a=$_____ m/s^2(保留两位有效数字).



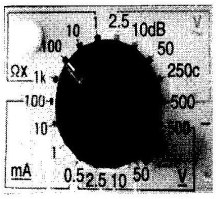
甲



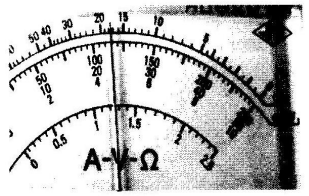
乙　　单位：cm

(3)在用橡皮筋“探究做功与物体速度变化的关系”实验中，平衡阻力后，小车与橡皮筋组成的系统在橡皮筋恢复形变前机械能_____(填“守恒”或“不守恒”).

18. (7 分)(1)小明同学用多用电表测量一未知电阻器的阻值. 经过规范操作后，所选欧姆挡倍率及指针位置分别如图甲、乙所示，则此电阻器的阻值为_____ Ω.



甲

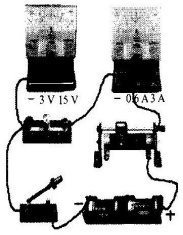


乙

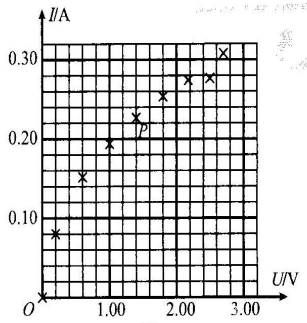
(2)在“测绘小灯泡的伏安特性曲线”实验中：

①如图丙所示，已经连接了一部分电路，请在图丙中将电路连接完整.

②合上开关后，测出 9 组 I、U 值，在 I-U 坐标系中描出各对应点，如图丁所示. 请在图丁中画出此小灯泡的伏安特性曲线.



丙



丁

③与图丁中 P 点对应的状态，小灯泡灯丝阻值最接近_____.

A. 16.7 Ω　　B. 12.4 Ω　　C. 6.2 Ω

19. (9 分)一个无风晴朗的冬日，小明乘坐游戏滑雪车从静止开始沿斜直雪道下滑，滑行 54 m 后进入水平雪道，继续滑行 40.5 m 后减速到零. 已知小明和滑雪车的总质量为 60 kg，整个滑行过程用时 10.5 s，斜直雪道倾角为 37°(sin37°=0.6). 求小明和滑雪车：

(1)滑行过程中的最大速度 v_m 的大小；

(2)在斜直雪道上滑行的时间 t_1；

(3)在斜直雪道上受到的平均阻力 F_f 的大小.

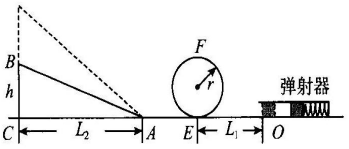


20. (12 分)如图所示，一弹射游戏装置由安装在水平台面上的固定弹射器、竖直圆轨道(在最低点 E 分别与水平轨道 EO 和 EA 相连)、高度 h 可调的斜轨道 AB 组成. 游戏时滑块从 O 点弹出，经过圆轨道并滑上斜轨道. 全程不脱离轨道且恰好停在 B 端则视为游戏成功. 已知圆轨道半径 $r=0.1$ m，OE 长 $L_1=0.2$ m，AC 长 $L_2=0.4$ m，圆轨道和 AE 光滑，滑块与 AB、OE 之间的动摩擦因数 $\mu=0.5$. 滑块质量 $m=2$ g 且可视为质点，弹射时从静止释放且弹簧的弹性势能完全转化为滑块动能. 忽略空气阻力，各部分平滑连接. 求：

(1)滑块恰好能过圆轨道最高点 F 时的速度 v_F 大小；

(2)当 $h=0.1$ m 且游戏成功时，滑块经过 E 点对圆轨道的压力 F_N 大小及弹簧的弹性势能 E_{p0}；

(3)要使游戏成功，弹簧的弹性势能 E_p 与高度 h 之间满足的关系.

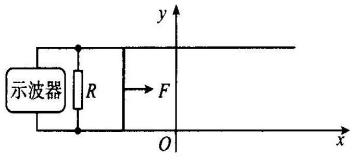


21.(10 分)如图甲所示，在 xOy 水平面内，固定放置着间距为 l 的两平行金属直导轨，其间连接有阻值为 R 的电阻，电阻两端连接示波器(内阻可视为无穷大)，可动态显示电阻 R 两端的电压.两导轨间存在大小为 B、方向垂直导轨平面的匀强磁场.$t=0$ 时一质量为 m、长为 l 的导体棒在外力 F 作用下从 $x=x_0$ 位置开始做简谐运动，观察到示波器显示的电压随时间变化的波形是如图乙所示的正弦曲线.取 $x_0=-\dfrac{U_m T}{2\pi Bl}$，则简谐运动的平衡位置在坐标原点 O.不计摩擦阻力和其他电阻，导体棒始终垂直导轨运动.(提示：可以用 F-x 图像下的“面积”代表力 F 所做的功)

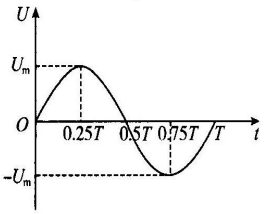
(1)求导体棒所受到的安培力 F_A 随时间 t 的变化规律；

(2)求在 0 至 $0.25T$ 时间内外力 F 的冲量；

(3)若 $t=0$ 时外力 $F_0=1$ N，$l=1$ m，$T=2\pi$ s，$m=1$ kg，$R=1\ \Omega$，$U_m=0.5$ V，$B=0.5$ T，求外力与安培力大小相等时棒的位置坐标和速度.



甲



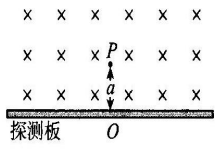
乙

22.(10 分)通过测量质子在磁场中的运动轨迹和打到探测板上的计数率(即打到探测板上质子数与衰变产生总质子数 N 的比值)，可研究中子($^1_0$n)的 β 衰变.中子衰变后转化成质子和电子，同时放出质量可视为零的反中微子 $\bar{\nu}_e$.如图所示，位于 P 点的静止中子经衰变可形成一个质子源，该质子源在纸面内各向均匀地发射 N 个质子.在 P 点下方放置有长度 $L=1.2$ m 以 O 为中点的探测板，P 点离探测板的垂直距离 OP 为 a.在探测板的上方存在方向垂直纸面向里，磁感应强度大小为 B 的匀强磁场.已知电子质量 $m_e=9.1\times10^{-31}$ kg$=0.51$ MeV/c^2，中子质量 $m_n=939.57$ MeV/c^2，质子质量 $m_p=938.27$ MeV/c^2 (c 为光速，不考虑粒子之间的相互作用).若质子的动量 $p=4.8\times10^{-21}$ kg·m·s$^{-1}=3\times10^{-8}$ MeV·s·m^{-1}.

(1)写出中子衰变的核反应式，求电子和反中微子的总动能(以 MeV 为能量单位)；

(2)当 $a=0.15$ m，$B=0.1$ T 时，求计数率；

(3)若 a 取不同的值，可通过调节 B 的大小获得与(2)问中同样的计数率，求 B 与 a 的关系并给出 B 的取值范围.



答案

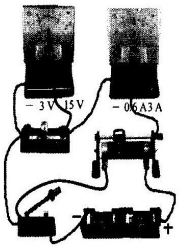
1B 2B 3D 4D 5C 6B 7B 8C 9C 10B 11B 12A 13A 14CD 15BD 16AB

17（7 分）.(1)BC (2)甲 0.40 （3）不守恒

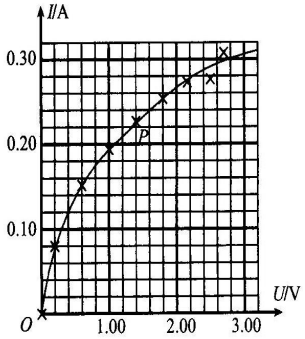
18.(7 分)

(1)1 700～1 800

(2)①如图甲所示 ②如图乙所示 ③C



甲



乙

19.(9 分)

解：(1)$\dfrac{v_m}{2}=\dfrac{x_1+x_2}{t}$

解得 $v_m=18$ m/s

(2)$x_1=\dfrac{v_m}{2}t_1$

解得 $t_1=6$ s

(3)$a=\dfrac{v_m}{t_1}=3$ m/s^2

由牛顿第二定律得

$mg\sin37°-F_f=ma$

解得 $F_f=180$ N

【考点定位】本题考查匀变速直线运动规律、牛顿第二定律.

20.(12 分)

解：(1)滑块恰过 F 点的条件

$mg=m\dfrac{v_F^2}{r}$

解得 $v_F=1$ m/s

(2)滑块从 E 到 B，动能定理

$-mgh-\mu mgL_2=0-\frac{1}{2}mv_E^2$

在 E 点的力为 F_N

$F_N-mg=m\frac{v_E^2}{r}$

$F_N=0.14$ N

从 O 到 B 点

$E_{p0}-mgh-\mu mg(L_1+L_2)=0$

得 $E_{p0}=8.0\times10^{-3}$ J

(3)滑块恰能过 F 点的弹性势能

$E_{p1}=2mgr+\mu mgL_1+\frac{1}{2}mv_F^2=7.0\times10^{-3}$ J

到 B 点减速到 0

$E_{p1}-mgh_1-\mu mg(L_1+L_2)=0$

得 $h_1=0.05$ m

能停在 B 点，则 $\mu mg\cos\theta=mg\sin\theta$

得 $\tan\theta=0.5$，此时 $h_2=0.2$ m

从 O 到 B 点

$E_p=mgh+\mu mg(L_1+L_2)=2\times10^{-3}(10h+3)$ J

其中 0.05 m$\leqslant h\leqslant$0.2 m

【考点定位】本题考查牛顿第二定律、动能定理、能量守恒定律.

21.(10 分)

解：(1)由显示的波形可得

$U=U_m\sin\frac{2\pi}{T}t$

$I=\frac{U_m}{R}\sin\frac{2\pi}{T}t$

$F_A=-BIl=-\frac{BlU_m}{R}\sin\frac{2\pi}{T}t$

(2)安培力的冲量

$I_A=-\Delta qBl=-\frac{B^2|x_0|l^2}{R}$

$v=\frac{U_m}{Bl}\sin\frac{2\pi}{T}t$

由动量定理，有 $I_F+I_A=mv_m$

$I_F=\frac{BlU_mT}{2\pi R}+\frac{mU_m}{Bl}$

(3)棒做简谐运动，有

$F_A+F=-kx$

当 $F_A=-F$ 时，$x=0$，$v=\pm v_m=\pm1$ m/s

当 $F_A=F$ 时，设 $x=x'$，$v=v'$

$F_A=-\frac{1}{2}kx'$

$F_0=-kx_0$

解得 $2x'=v'$

动能定理 $\frac{1}{2}mv'^2=\frac{1}{2}k(x_0^2-x'^2)$

$x_1'=\frac{1}{\sqrt{5}}$ m 和 $v_1'=\frac{2}{\sqrt{5}}$ m/s

$x_2'=-\frac{1}{\sqrt{5}}$ m 和 $v_2'=-\frac{2}{\sqrt{5}}$ m/s

【考点定位】本题考查安培力、动量定理、简谐运动.

22.(10 分)

解：(1)${}_0^1n\longrightarrow{}_1^1p+{}_{-1}^0e+{}_0^0\bar{\nu}_e$

$\Delta E_d=m_dc^2-(m_pc^2+m_ec^2)=0.79$ MeV

$E_{kp}=\frac{p^2}{2m_p}=0.043\,2$ MeV

$E_e+E_{\nu e}=\Delta E_d-E_{kp}=0.746\,8$ MeV

(2)质子运动半径

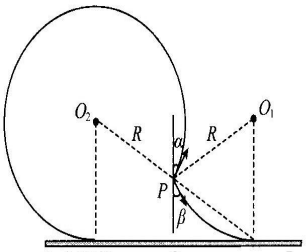
$R=\frac{p}{eB}=0.3$ m

如图甲所示，打到探测板对应发射角度

$\alpha=\beta=\frac{\pi}{6}$

可得质子计数率为

$\eta=\frac{\frac{4\pi}{3}}{2\pi}=\frac{2}{3}$



甲

(3)在确保计数率为 $\eta=\frac{2}{3}$ 的情况下

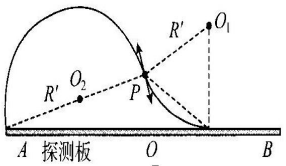
$R'=2a$

即 $B=\frac{3}{200a}$ T

如图乙所示，恰能打到探测板左端的条件为

$4R_{max}^2-\frac{R_{max}^2}{4}=\frac{L^2}{4}$

即 $B\geqslant\frac{\sqrt{15}}{40}$ T



乙