经全国中小学教材审定委员会 2004 年初审通过

普通高中课程标准实验教科书

物理

WULI

必修 2



教育科学出版社

·北 京·

微信公众号：电子课本大全

目录



第一章　抛体运动

1. 曲线运动……2
2. 运动的合成与分解……5
3. 平抛运动……8
4. 斜抛运动（选学）……13

本章小结……17

习　题……18

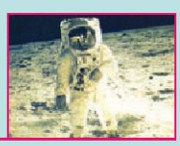


第二章　匀速圆周运动

1. 圆周运动……20
2. 匀速圆周运动的向心力和向心加速度……25
3. 圆周运动的实例分析……30
4. 圆周运动与人类文明（选学）……36

本章小结……40

习　题……40



第三章　万有引力定律

1. 天体运动……42
2. 万有引力定律……45
3. 万有引力定律的应用……49
4. 人造卫星　宇宙速度……52

本章小结……55

习　题……56



第四章　机械能和能源

1. 功……58
2. 功率……61
3. 势能……64
4. 动能　动能定理……67
5. 机械能守恒定律……72
6. 能源的开发与利用……76

本章小结……81

习　题……81



第五章　经典力学的成就与局限性

1. 经典力学的成就与局限性……84
2. 了解相对论（选学）……86
3. 初识量子论（选学）……90

本章小结……92

习　题……92

附录　中英文索引……93

微信公众号：电子课本大全

第一章 抛体运动

- 曲线运动
- 运动的合成与分解
- 平抛运动
- 斜抛运动（选学）

喷泉射出的水柱在空中划出一道道美丽的弧线，令人赏心悦目．这种弧线具有什么特征？哪些运动的轨迹跟它具有相同的特征？这类运动遵循怎样的规律？



微信公众号：电子课本大全

1 曲线运动

随处可见的曲线运动

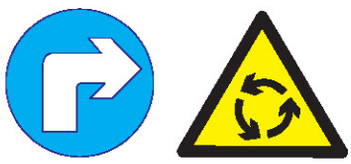


图 1-1-1　表示转弯的交通标志

在公路上，你可以看到许多提示车辆转弯的交通标志（图 1-1-1），它们指引着车辆沿正确的方向行驶；在足球场上，你有时可以看到“香蕉球”在空中划出一道漂亮的弧线. 物体运动轨迹是曲线的运动，叫做**曲线运动**（curvilinear motion）. 曲线运动是十分常见的运动形式（图 1-1-2）.



（a）汽车在环形立交桥上的运动



（b）过山车的运动



（c）飞机的飞行表演

图 1-1-2　形形色色的曲线运动

曲线运动的速度方向



图 1-1-3　砂轮切割钢材时，火花飞溅

物体做曲线运动时，怎样确定该物体在某一位置的速度方向呢？

观察图 1-1-3，你能从中得到怎样的启示？

实验探究

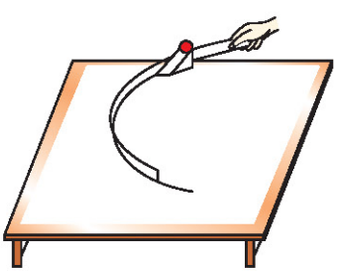


图1-1-4　研究曲线运动的速度方向

如图 1-1-4 所示，水平板上铺着一张白纸，纸和平板上刻有一道弧形窄缝，缝上嵌着一条透明胶片做的弧形护栏. 让一个表面沾有红色印泥的铁球从斜槽的顶端滚下.

拉动透明胶片，改变弧形护栏的末端在窄缝的位置，重复几次实验. 观察并思考：

（1）铁球每次离开护栏后，运动轨迹是怎样的？

（2）根据运动轨迹，你能说出小铁球离开护栏时的速度方向吗？

微信公众号：电子课本大全

理论探究

如图 1-1-5 所示，质点沿曲线从 A 运动到 B，过 A、B 两点作直线，这条直线叫做曲线的割线．从 A 到 B 就是质点位移的方向，也是它从 A 至 B 的平均速度方向．设想 A 点逐渐向 B 点移动，这条割线的位置就不断变化．当 A 点非常接近 B 点时，这条割线就将与过 B 点的切线重合．因此，质点在 B 点的瞬时速度方向就是曲线在 B 点的切线方向．

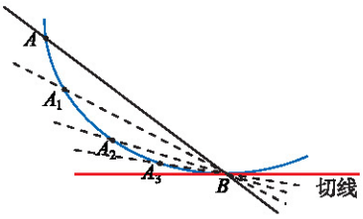


图 1-1-5　A 点逐渐向 B 点靠近时，AB 割线的变化

实验和理论分析表明，质点在做曲线运动时，在某一位置的速度方向就是曲线在这一点的切线方向（图 1-1-6）．因为曲线运动的速度方向时刻在变化，所以曲线运动是一种变速运动．

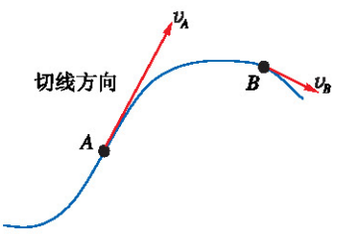


图 1-1-6　曲线运动的速度方向

曲线运动的条件

实验探究

曲线运动是一种变速运动．根据牛顿第二定律，要使物体的速度发生改变，必须对物体施加力的作用．如图 1-1-7 所示，钢珠在水平面上做直线运动，磁铁要在什么方向上吸引钢珠，钢珠才会偏离原来的运动方向而做曲线运动？

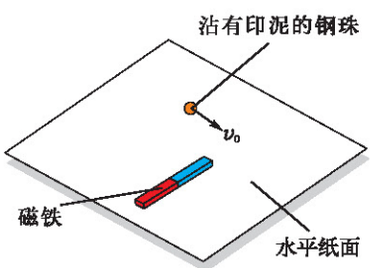


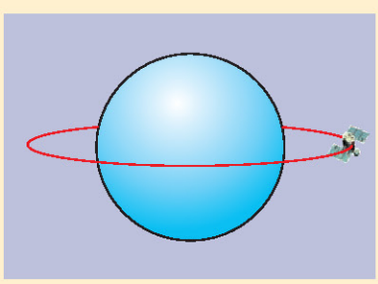
图 1-1-7　研究曲线运动的条件

实验表明，**当运动物体所受合外力的方向跟它的速度方向不在同一直线上时，物体就做曲线运动．**

要改变速度方向，力的方向能否与速度方向相同？能否与速度的方向相反？力的方向应当与速度方向成怎样的关系才能使速度方向发生变化？

讨论交流

图 1-1-8 中的人造卫星和羽毛球各是靠什么力来改变运动方向而做曲线运动的？



（a）人造卫星绕地球运动



（b）羽毛球在空中运动

图 1-1-8　曲线运动的两个实例

微信公众号：电子课本大全

练习与评价

1. 学习驾驶汽车时需要进行多次转弯的训练，图 1-1-9 为一汽车训练时的运动轨迹，汽车先后经过 A、B、C 三点. 试在图上标出汽车在这三个位置的速度方向.



图 1-1-9

2. 一质点做曲线运动，它的速度方向和加速度方向的关系是（　　）.

A. 质点速度方向时刻在改变

B. 质点加速度方向时刻在改变

C. 质点速度方向一定与加速度方向相同

D. 质点速度方向一定沿曲线的切线方向

3. 将湿透的雨伞快速旋转，看看水滴的运动方向，并在图 1-1-10 中画出水滴 A 被抛出后的俯视轨迹.

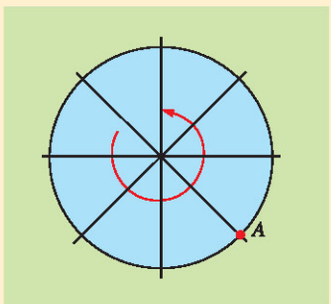


图 1-1-10　伞面俯视图

发展空间

课外阅览

化曲为直

图 1-1-11 中左边的曲线 AB 是某质点做曲线运动的一段轨迹，在此轨迹上取一小段 CD 进行放大，再在 CD 上取一小段 EF 进行放大，如此继续，当所取的小段足够短时，想一想，它是弯曲的还是平直的？

由此可见，在曲线运动中，当所取小段足够短时，质点在这一小段的运动就可视为直线运动.

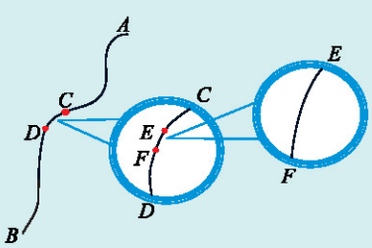


图 1-1-11　化曲为直

“香蕉球”成因探秘

你喜欢观看足球比赛吗？在球场上罚任意球时，运动员踢出的足球有时会在行进中绕过“人墙”转弯进入球门，其轨迹如图 1-1-13 所示，这就是所谓的“香蕉球”. 你知道“香蕉球”是怎样形成的吗？

原来，运动员踢出足球时，一方面使它向前运动，另一方面又使它绕轴旋转［设旋转方向和前进方向如图 1-1-14（a）所示］. 若自上向下看，如图 1-1-14（b），由于足球的自转，足球表面附近有一层空气被球带动做同一旋向的转动. 结果，造成足球 A、B 两侧附近空气相对于球的速度不相等，A 侧附近空气的流速大于 B 侧附近空气的流速. 根据流体的速度与压强的关系可知，空气对足球 B 侧的压强


图 1-1-12　运动员踢出“香蕉球”

微信公众号：电子课本大全

大于对A侧的压强，从而使足球的A、B两侧形成一个压力差，其合力F的方向由B指向A. 正是这个压力差，使足球偏离了原来的运动方向，在空中划出一条形如香蕉的轨迹.

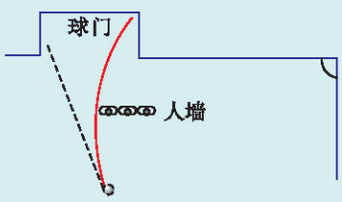


图 1-1-13　“香蕉球”的轨迹

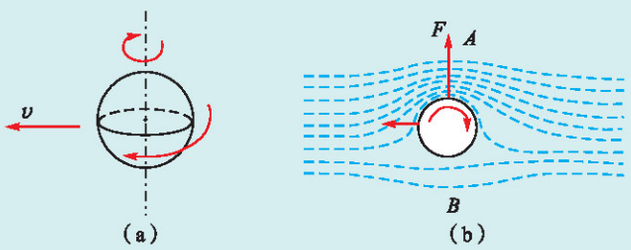


图 1-1-14　“香蕉球”成因分析

2 运动的合成与分解

位移和速度的合成与分解

观察思考

一条宽阔的大河上有两个码头A、B隔河正面相对. 小明驾着小船从这边的码头A出发，将一批货物运送到对岸的码头B. 他驾船时始终保持船头指向与河岸垂直，但小明惊奇地发现小船行驶的路线并不与河岸垂直，而是朝河的下游方向偏移. 怎样来研究这种运动呢?

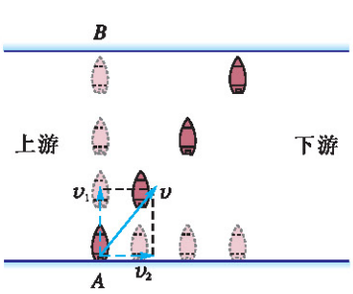


图 1-2-1　小船渡河同时参与了两个运动

如图 1-2-1 所示，小船渡河时，如果河水不流动，小船将沿与河岸垂直的方向运动；如果关闭小船的发动机，小船将沿河岸顺流而下. 实际上，小船同时参与了这两个运动. 我们把这两个运动叫做分运动，实际的运动叫做合运动. 那么合运动的位移与分运动的位移有什么样的关系呢?

微信公众号：电子课本大全

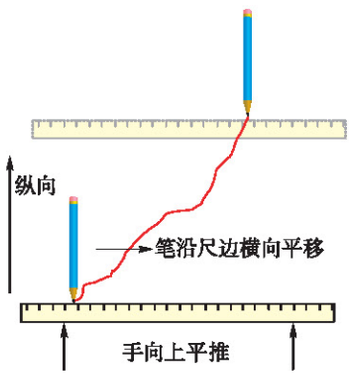


图 1-2-2　运动的合成实验

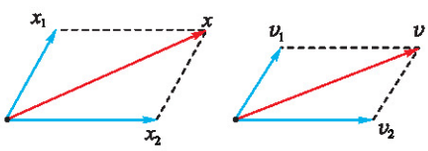


图 1-2-3　位移与速度的合成与分解

活动

在一张白纸上，让铅笔笔尖靠着直尺沿横向移动，同时让直尺沿纵向移动，如图 1-2-2 所示. 推进一段距离之后，可以发现笔尖描出的轨迹是一条不规则的曲线，连接这段曲线的首尾便得到笔尖走过的位移. 分别做几次实验，看一看，笔尖沿横向的位移、沿纵向的位移与笔的实际位移有什么关系？

由上述实验和观察可以得到：一个物体同时发生两个方向的位移（分位移），它的效果可以用合位移来替代；同样，这个物体运动的合位移也可以用两个分位移来替代. 由分位移求合位移叫做位移的合成；由合位移求分位移叫做位移的分解，它们都遵循矢量合成的平行四边形定则.

由于合运动和分运动对应的时间是相同的，而位移的合成和分解遵循平行四边形定则，那么，速度的合成和分解也必然遵循平行四边形定则.

运动的合成与分解的应用

已知分运动求合运动，叫做**运动的合成**；已知合运动求分运动，叫做**运动的分解**. 运动的合成与分解在生产、生活和科技中有着广泛的应用.

研究比较复杂的运动时，可以把一个运动分解成两个或几个比较简单的运动，从而使问题变得容易解决.

【例题】某条河宽度为 700 m，河水均匀流动，流速为 2 m/s. 若小船在静水中的运动速度为 4 m/s，则小船的船头向哪个方向行驶才能恰好到达河的正对岸？渡河时间为多少？

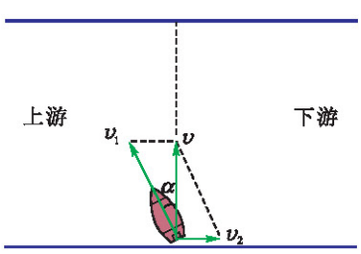


图 1-2-4　小船的运动

【解】如图 1-2-4 所示，小船实际的运动是垂直于河流方向的运动，它可以看做是小船斜向上游方向和沿水流方向两个分运动的合运动. 由图可见

$$\sin\alpha = \frac{v_2}{v_1} = \frac{2}{4} = 0.5$$

$$\alpha = 30°$$

即小船应朝偏向上游 30° 的方向行驶.

由图还可以得到合速度的大小为

微信公众号：电子课本大全

$$v=\sqrt{v_1^2-v_2^2}=\sqrt{4^2-2^2}\ \text{m/s}\approx 3.5\ \text{m/s}$$

渡河时间为

$$t=\frac{x}{v}=\frac{700}{3.5}\ \text{s}=200\ \text{s}$$

本题也可以先由合位移 x 求出分位移 x_1，再利用位移公式由 x_1 和 v_1 求出时间 t. 你不妨试一下，再将两种解法做一下比较.

讨论交流

在上述例题中，若行驶的过程中始终保持小船船头的指向垂直于河岸（如图 1-2-1 所示），则渡河的时间是多少？小船到达对岸时向下游偏移的位移是多少？

练习与评价

1. 雨滴在下落一定时间后的运动是匀速的. 设没有风时，雨滴着地的速度为 6 m/s. 现在有风，风可给雨滴 3 m/s 的水平向西的速度. 试求此时雨滴着地的速度.

2. 在长江三峡库区中，在江的同一侧有甲和乙两地，甲在上游，乙在下游，两地相距为 x. 三峡大坝建造前，甲、乙两地之间江水的流速为 v_1. 有一只快艇在静水中的行驶速度为 v_2，已知 $v_2>v_1$，则这只快艇在甲、乙两地之间往返一次需要多少时间？现由于建造了三峡大坝，甲、乙两地之间江水假定不再流动. 则此时同一只快艇在甲、乙两地往返一次需要的时间有什么变化？

3. 铅球运动员以 20 m/s 的速度、40° 的倾角，将铅球斜向上掷出，请作出速度沿水平方向和竖直方向分解的图示，并求出这两个分速度的大小.（$\sin 40°\approx 0.6428$；$\cos 40°\approx 0.7660$）



图 1-2-5　掷铅球

微信公众号：电子课本大全

3 平抛运动

什么叫平抛运动

观察思考



图 1-3-1 现代滑翔机

设想你正乘着一架滑翔机（图 1-3-1）沿水平方向运动，下面是你熟悉的地方. 当滑翔机经过你的一位好友住宅的正上方时，你将一包礼物释放. 虽然空中没有风，但这包礼物却没有落在朋友的住宅处. 为什么会造成这样的结果呢？

原来，礼物释放后在水平方向上具有一定的初速度，由于惯性，它在水平方向仍要继续向前运动，就像水平桌面上被推出的物体离开桌面后的运动一样（图 1-3-2），它的运动轨迹并不是一条竖直线，而是一条被称为抛物线的曲线.

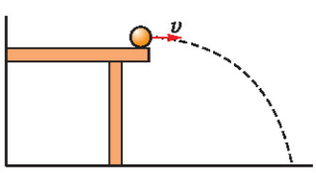


图 1-3-2 平抛运动

将物体以一定的初速度沿水平方向抛出，不考虑空气的阻力，物体只在重力作用下所做的运动，叫做**平抛运动**（motion of body projected horizontally）. 以一定速度从水平桌面上滑落的小球的运动，运动员水平击出的排球的运动，沿水平方向飞行的飞机所释放的物体的运动等等，都可视为平抛运动.

平抛运动的特点

讨论交流

平抛运动是一种曲线运动，其速度的大小和方向都时刻发生改变. 对这种比较陌生、复杂的运动，能否利用运动的分解，将它转化为我们所熟悉的、简单的运动呢？

1. 假如物体在空中被水平抛出后不受重力的作用，将会怎样运动？

微信公众号：电子课本大全

2. 假如物体没有水平速度，松手后，物体将会怎样运动？

3. 以水平速度抛出一个物体，物体将如何运动？

实验探究

1. 如图 1-3-3 所示，用小锤轻击弹性金属片，A 球向水平方向飞出，做平抛运动，同时 B 球被松开，做自由落体运动．观察两球运动的路线，比较它们落地时间的先后．

用较大的力打击金属片，改变击球点离地的高度，多次重复上述实验，结果有何变化？

实验现象说明了什么？

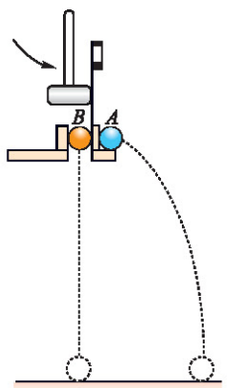


图 1-3-3　比较平抛运动和自由落体运动

2. 我们还可以用频闪照相的方法研究上述 A、B 两个小球的运动．图 1-3-4 是它们运动过程的频闪照片．照片为我们提供了哪些信息？根据这些信息，你认为做平抛运动的小球在水平方向上做什么运动？在竖直方向上做什么运动？

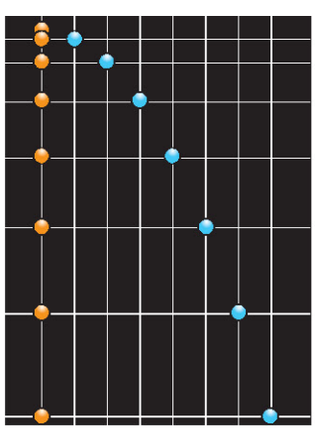


图 1-3-4　平抛运动和自由落体运动的频闪照片

早在 300 多年前，伽利略就曾研究过平抛运动．他推断：从同一炮台水平发射的炮弹（图 1-3-5），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．这实际上已经揭示了平抛物体在竖直方向上的运动为自由落体运动．

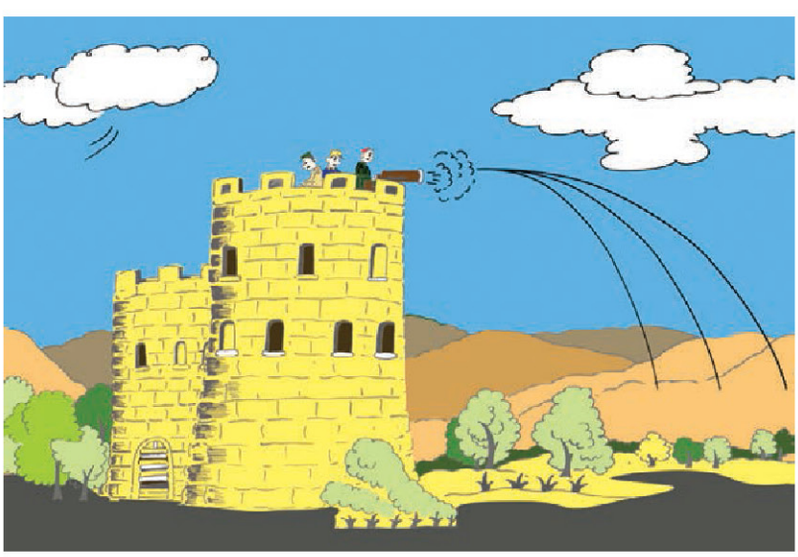


图 1-3-5　炮弹初速度不同，运动轨迹不同，但飞行时间相同

微信公众号：电子课本大全

理论探究

由上述实验可知，平抛运动可以分解为水平方向上的匀速直线运动和竖直方向上的自由落体运动，为什么可以做这样的分解呢？

在水平方向上，如果物体不受力，由于惯性将做保持初速度不变的匀速直线运动；在竖直方向上，物体受重力的作用，如果初速度为零，将做自由落体运动．因此，平抛运动可以看成是由上述两个分运动合成的．

平抛运动的规律

以平抛物体的抛出点为原点O，初速度方向为x轴的正方向，竖直向下为y轴的正方向，建立一个直角坐标系xOy．由平抛运动的分解可知：

在水平方向，物体的位移和速度分别为

$$x = v_x t$$

$$v_x = v_0$$

在竖直方向，物体做自由落体运动，物体的位移和速度分别为

$$y = \frac{1}{2} g t^2$$

$$v_y = gt$$

由水平和竖直方向的位移公式可以求得任一时刻物体的位置坐标（x，y），在坐标系上标出物体在不同时刻的位置，并用平滑的曲线将它们连起来，就得到平抛运动的轨迹（图 1-3-6）．

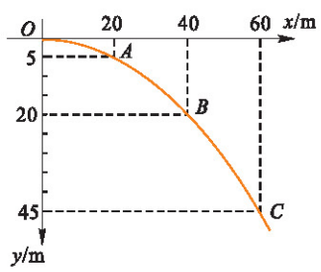


图 1-3-6　平抛运动的轨迹是一条抛物线．作图时取物体的初速度为 20 m/s，g 取 10 m/s²，图中的 A、B、C 分别为物体在 1 s 末、2 s 末、3 s 末时的位置

由水平和竖直方向的速度公式可以求得任一时刻物体的分速度v_x、v_y，则任一时刻物体实际速度v_t的大小为$v_t = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$．$v_t$的方向是平抛轨迹的切线方向，可以用$v_t$与$x$轴正方向的夹角$\theta$表示，有$\tan\theta = \frac{v_y}{v_x}$，如图 1-3-7 所示．

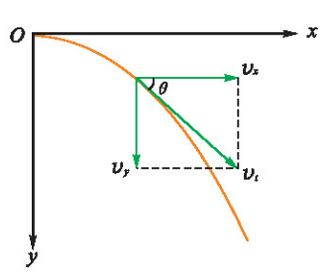


图 1-3-7　平抛运动的速度

微信公众号：电子课本大全

学生实验：研究平抛运动

实验装置如图 1-3-8 所示，把坐标纸固定在竖直板面上，使坐标纸纵格线处于竖直方向．在坐标纸上作 xOy 坐标系，使 O 点处于斜槽的末端，x 轴与坐标纸横格线平行，y 轴与坐标纸纵格线平行．

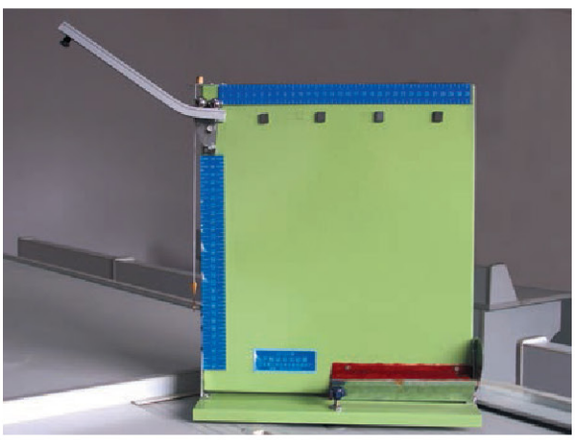


图 1-3-8　研究平抛运动的实验装置图

在斜槽上选定小钢球运动的起点，使小球由静止开始滚下，并由 O 点水平射出，做平抛运动．记录小钢球做平抛运动的几个点迹，并用平滑的曲线将它们连接起来，就得到了小钢球做平抛运动的轨迹．

在轨迹上选取几个不同的点，测出它们的横坐标 x 和纵坐标 y，根据公式 $y=\frac{1}{2}gt^2$ 和 $x=v_0t$，求出小钢球做平抛运动的初速度 v_0．算出求得的几个 v_0 的平均值，即为平抛运动的初速度．

讨论交流

1. 如何保证小球抛出后的运动是平抛运动？

2. 为什么小球每次要从同一位置滚下？

3. 如何根据平抛物体运动轨迹上某一点的坐标 x、y，求出物体在该点的瞬时速度？

微信公众号：电子课本大全

练习与评价

1. 用 m、v_0、h 分别表示做平抛运动物体的质量、初速度和抛出点离水平地面的高度. 在这三个量中：

（1）物体在空中运动的时间是由_____决定的；

（2）在空中运动的水平位移是由_____决定的；

（3）落地时瞬时速度的大小是由_____决定的；

（4）落地时瞬时速度的方向是由_____决定的.



图 1-3-9　汽车飞越黄河

2. 如图 1-3-9 所示，在一次“飞车过黄河”的表演中，汽车在空中飞经最高点后在对岸着地. 已知汽车从最高点至着地点经历的时间约 0.8 s，两点间的水平距离约为 30 m，忽略空气阻力，则汽车在最高点时的速度约为多大？最高点与着地点的高度差约为多大？着地时的速度多大？

3. 如图 1-3-10 所示，玩具手枪的枪管 AB 对准竖直墙面上的 C 点，B、C 间距 20 m，处于同一水平线上. 弹丸以 40 m/s 的速度从枪管射出，到达墙面时打在 D 点. 求：

（1）C、D 两点间的距离；

（2）弹丸打到 D 点时的速度（不计空气阻力）.

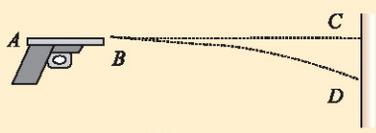


图 1-3-10

发展空间

1. 排球赛场的长为18 m，男排网高为 2.43 m.

2. 在要求不扣出界外的条件下，前排近网不同高度处沿水平方向扣球，球的最大初速度见下表.

高度 /m	最大初速度 / (m · s^{-1})
2.60	12.36
2.80	11.90
3.00	11.50

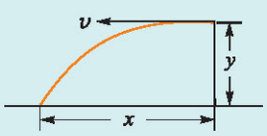


图1-3-12　扣球后排球的运动轨迹

探究排球运动中沿水平方向近网扣球的最大速度

你观看过排球比赛吗？你是否曾为运动员将球扣出界外而惋惜？在排球比赛中，如果运动员在近网处沿水平方向（垂直于网）扣球，要使球不被扣出界外，球的最大初速度为多大？（以男排比赛为例，并把扣球后排球的运动近似看做平抛运动）

1. 射程 x 一定时，排球的初速度与扣球高度的关系是_____.

2. 根据公式_____，当高度 y 取_____ m，射程 x 取_____ m 时初速度最大，且为_____ m/s.

从以上计算中，你对排球比赛中的扣球有什么认识？

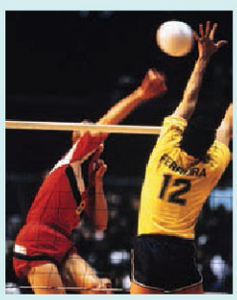


图 1-3-11　排球比赛

微信公众号：电子课本大全

4 斜抛运动（选学）

斜抛运动

马戏表演里有这样一个叫做“人弹”的有趣节目：把一个演员放在“炮膛”里，伴随着一声炮轰声和炮口冒出的一股浓烟，演员从“炮膛”里朝斜上方发射出去，然后在空中划出一道弧线，最后落到一张网上（图 1-4-1）. 当不考虑空气的阻力时，一个物体沿斜向抛出后的运动，叫做**斜抛运动**（motion of body projected obliquely）.

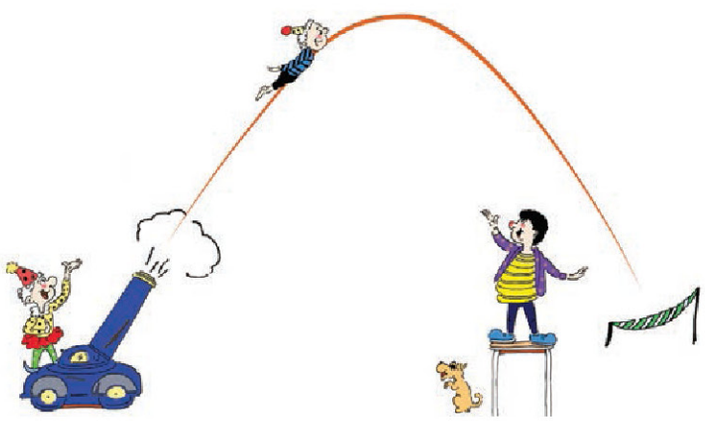


图 1-4-1　精彩的“人弹”表演

跟平抛运动一样，斜抛运动的轨迹也是一条抛物线. 但与平抛运动相比，斜抛运动是更为常见的抛体运动（图 1-4-2）.



（a）篮球的运动　　（b）喷泉水流的运动

图 1-4-2　常见的斜抛运动

微信公众号：电子课本大全

讨论交流

1. 还有哪些物体的运动可以看做斜抛运动？
2. 斜抛运动是匀变速运动，还是非匀变速运动？

观察思考

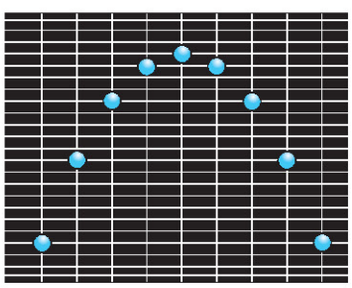


图 1-4-3　斜抛运动的频闪照片

仔细观察如图 1-4-3 所示的斜抛运动的频闪照片，并回答：

1. 斜抛运动和平抛运动有什么联系？

2. 如果将斜抛运动沿水平方向和竖直方向分解，抛射体在水平方向上做什么运动？在竖直方向上做什么运动？

实验探究

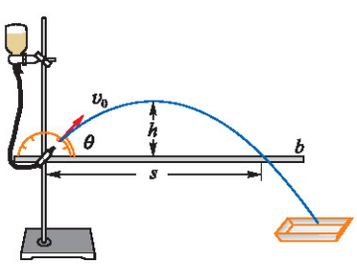


图 1-4-4　研究斜抛运动射程的实验装置

每 4 个同学为一组，每组备 1 个医用盐水瓶（带有橡皮塞）、1 个一次性输液器．把输液器上的针头插在橡皮塞上，并在橡皮塞上再插入 1 个针头（如图 1-4-4），如果输液器出水口和瓶子的高度差不变，从输液器出水口处射出的水流的速度就不变．高度差越大，速度越大．

你认为斜抛运动的射程可能跟哪些因素有关？

再给你 1 个铁架台、1 个接水盆、1 个量角器、1 把刻度尺、1 根细木杆．怎样利用这些器材定性地研究喷水的射程跟哪些因素有关？怎样利用实验检验你的猜想？先跟组内同学讨论，再跟其他组的同学交流．

根据大家比较认同的实验方案进行探究，你能得出什么结论？

理论和实验证明：斜抛运动的射程跟抛射体的初速度有关，抛射角一定时，初速度越大，射程越大，如图 1-4-5 所示；斜抛运动的射程还跟抛射角有关，如果抛射点与落地点在同一水平面上，而且空气阻力的影响可以忽略，同样大小的初速度，则当抛射角为 45° 时，射程最大，如图 1-4-6 所示．

微信公众号：电子课本大全

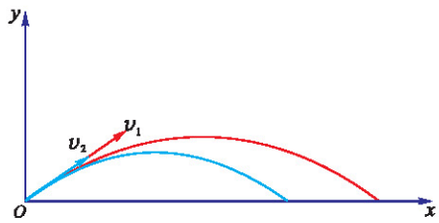


图1-4-5　斜抛运动的射程与初速度的关系（抛射角相等）

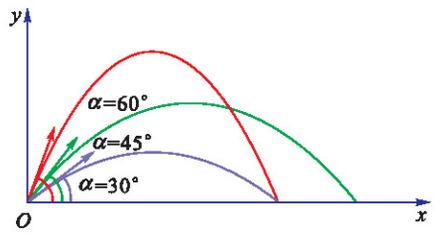


图 1-4-6　斜抛运动的射程与抛射角的关系（初速度大小相等）

空气阻力对斜抛运动的影响

物体在空气中运动时，会受到空气阻力的作用. 空气阻力对物体运动的影响有时可以忽略. 但是，像子弹或炮弹等物体，由于其飞行速度很大，空气阻力对它们的运动就会产生很大的影响. 你能想象空气阻力对子弹运动的影响有多大吗？

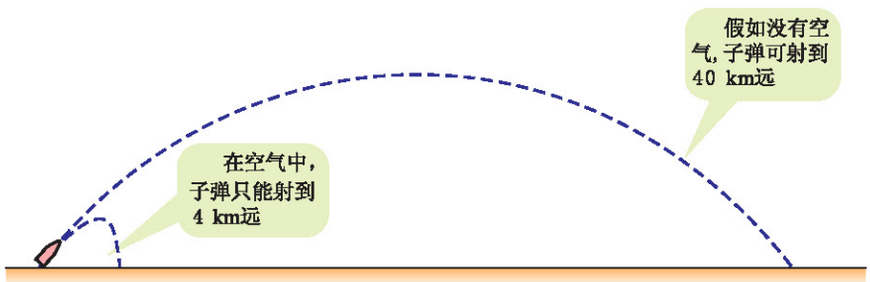


图 1-4-7　子弹的初速度为 620 m/s，沿与水平面成 45° 角的方向斜向上射出

从图1-4-7可以看出，由于空气阻力的影响，子弹不但射不到原来那么高，也射不到原来那么远，而且其轨迹的形状也变得不对称了. 弹丸或抛射体在空气中运动的轨迹叫做弹道，军事科学上有一门学科叫做外弹道学，专门研究弹丸在空中飞行运动的现象及其规律.

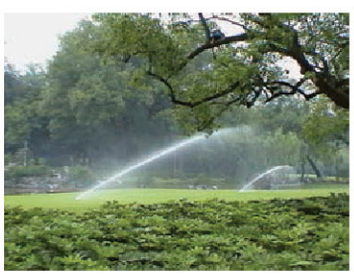


图 1-4-8　水管中射出的水流轨迹也是一条“弹道”

讨论交流

图 1-4-9 给出了发射角与初速度一定，环境条件不同时的抛体运动轨迹，你认为哪些环境因素会影响抛体的运

微信公众号：电子课本大全

动轨迹？除环境条件外还有哪些因素也会影响抛体的运动轨迹？

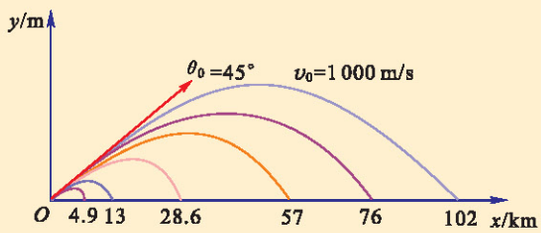


图 1-4-9　不同的抛体运动轨迹

练习与评价

1. 平抛运动与斜抛运动有哪些不同之处？有哪些相同之处？

2. 有一小球，从高度（离地面）h=1.80 m，以角度（与水平面夹角）θ=45°、初速度 v_0= 10 m/s 抛出．求：（1）小球达到的最大高度 H（离地面）．（2）小球落到地面所用的时间 t．（忽略空气阻力，取 g = 10 m/s²）

发展空间

物理在线

发射武器通常有两种典型的方式：一种是枪炮系统的发射方式，它利用高温的火药燃气在枪炮膛内的膨胀，推动弹丸以一定的速度射出膛口；另一种是火箭系统的发射方式，它利用火药燃气从火箭发动机的喷管向后喷出时所产生的反作用力，推动战斗部连同发动机本身一起在空中飞行．研究这两种发射体的运动现象及其规律的学科叫做枪炮弹道学和火箭弹道学．如果你想了解关于这方面更多的知识，可阅读《中国大百科全书·军事卷》等文献或通过互联网收集相关资料．

微信公众号：电子课本大全

本章小结

1. 物体运动轨迹为曲线的运动，叫做曲线运动. 质点做曲线运动时，在某一位置的速度方向就是曲线在这一点的切线方向.

2. 物体受到的合力跟它的速度方向不在同一直线上，物体就做曲线运动.

3. 将几个运动合成为一个运动，叫做运动的合成；将一个运动分解为几个运动，叫做运动的分解. 运动的合成与分解包括位移、速度、加速度的合成与分解. 运动的合成与分解遵循平行四边形定则.

4. 将物体以一定的初速度沿水平方向抛出，不考虑空气阻力，物体只在重力作用下的运动，叫做平抛运动. 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. 平抛运动的轨迹是抛物线.

5*. 将物体以一定的初速度沿斜向抛出，不考虑空气的阻力，物体只在重力作用下的运动，叫做斜抛运动. 斜抛运动的轨迹也是抛物线.

6*. 斜抛运动的射程跟初速度和抛射角有关. 当初速度的方向一定时，初速度越大，射程越大；如果初速度的大小一定，当抛射角为 45° 时，射程最大.

微信公众号：电子课本大全

习　题

1．在电影中常可看到这样的镜头：直升飞机沿水平方向飞行，某人沿着系在飞机上的绳索竖直向上攀升．如果飞机水平飞行的速度为 4 m/s，人沿绳索向上运动的速度为 1 m/s．求人对地的速度．

2．一架投放救援物资的飞机在某个受援区域的上空水平地匀速飞行，从飞机上每隔 1 s 投下 1 包救援物资，先后共投下 4 包，若不计空气阻力，则 4 包物资落地前（　　）．

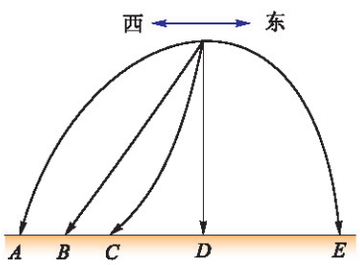
A．在空中任何时刻总是排成抛物线，它们的落地点是等间距的

B．在空中任何时刻总是排成抛物线，它们的落地点不是等间距的

C．在空中任何时刻总在飞机正下方排成竖直的直线，它们的落地点是等间距的

D．在空中任何时刻总在飞机正下方排成竖直的直线，它们的落地点不是等间距的

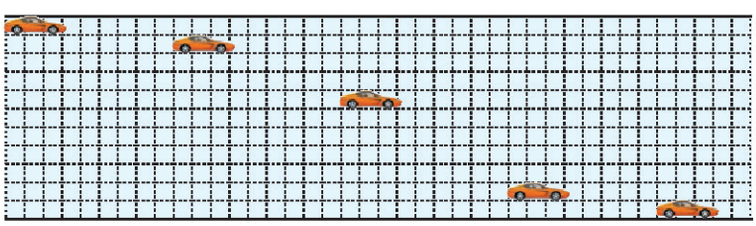
3．在向东匀速行驶的火车中，向西水平抛出一个物体，由站在地面上的人看来，该物体的运动轨迹可能是图中的哪几条？



（第 3 题图）

4．水的流量可用公式 $Q = vS$ 计算（式中 v 为流速，S 为水流截面积）．一台农用水泵的出水管是水平的，当抽水时，怎样测出水的流量 Q？请写出需要直接测量的量，并写出流量的表达式（用所测量的量来表达）．

5．做特技表演的汽车从高台水平飞出，在空中运动一段时间后着地．一架照相机通过多次曝光，拍摄到汽车在着地前后一段时间内的运动照片如图所示（虚线为正方形格子）．已知汽车长度为 3.2 m，相邻两次曝光的时间间隔相等，由照片可推算出汽车离开高台时的速度为多大？（g 取 10 m/s²）


（第 5 题图）

微信公众号：电子课本大全

第二章 匀速圆周运动

- 圆周运动
- 匀速圆周运动的向心力和向心加速度
- 圆周运动的实例分析
- 圆周运动与人类文明（选学）

圆周运动是曲线运动的一种，从地上物体的运动到各类天体的运行，常常体现着圆周运动或椭圆运动的和谐之美.

匀速圆周运动是圆周运动中最为简单的一种运动形式，让我们从匀速圆周运动出发，逐步了解圆周运动，乃至各种曲线运动.



微信公众号：电子课本大全

1 圆周运动

形形色色的圆周运动

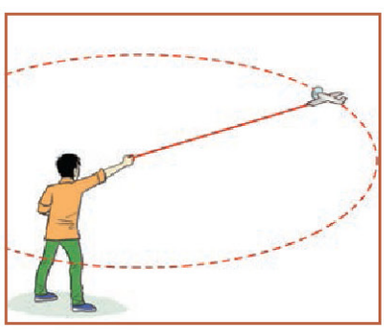
物体的运动轨迹是圆的运动叫做**圆周运动**（circular motion）. 这是一种常见的运动，从原子到星系，从你的手表到三峡的大型发电机，从玩具小车到游乐场的摩天轮，从自行车到汽车、火车和飞机……这些物体的运动中都包含圆周运动. 即使在寂静的夜晚，沉睡着的你也在跟随地球不停地做圆周运动.

观察思考

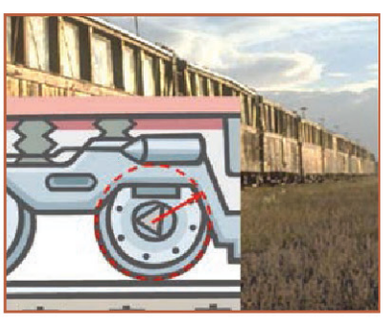
事实上转动物体上的任一质点都在绕轴心做圆周运动.



（a）你坐在游乐场的摩天轮上，饱览美丽的风光时，你正在做圆周运动



（b）当你用线操纵航模飞机参加比赛时，飞机在做圆周运动



（c）火车前进时，轮子上的每个质点都在绕轴做圆周运动



（d）打开怀表后盖，你会看到里面有许多齿轮，齿轮上的每个质点都在做圆周运动

图 2-1-1　圆周运动是一种常见的运动

1. 从运动学的角度看，上面的这些实例有什么共同的特点？

微信公众号：电子课本大全

2. 你观察过自行车吗？自行车行进时（图 2-1-2），有哪些部件绕轴做圆周运动？圆心在哪儿？



图 2-1-2　行进中的自行车

匀速圆周运动的线速度、角速度和周期

在圆周运动中，最简单的是匀速（率）圆周运动．怎样来描述匀速圆周运动的快慢呢？

讨论交流

1. 仿照匀速直线运动的定义，你认为应该怎么样来定义匀速圆周运动？

2. 有人认为：描述匀速圆周运动的快慢，可以观测圆周上一个点在单位时间内通过的弧长，你认为行不行？

3. 你认为还可以怎样描述匀速圆周运动的快慢？

质点沿圆周运动，如果在相等的时间内通过的圆弧长度相等，这种运动就叫**匀速圆周运动**（uniform circular motion）．若在时间 Δt 内，做匀速圆周运动的质点通过的弧长是 Δs（图 2-1-3），则可以用比值 $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ 来描述匀速圆周运动的快慢，这个比值称为匀速圆周运动的**线速度**（linear velocity），用公式表示为：

$$v=\frac{\Delta s}{\Delta t}$$

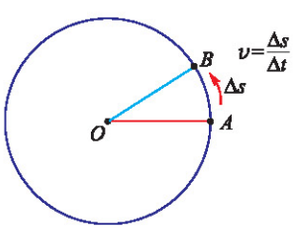


图 2-1-3　对线速度定义的说明

在匀速圆周运动中，质点运动的线速度的大小与所取的弧长的长短无关．当弧长足够短时，所求线速度的大小就等于质点在该时刻瞬时速度的大小（速率）．由上一章曲线运动的速度方向的判断可知，质点在圆周运动中任一点的线速度的方向也就是圆周上该点的切线方向（图 2-1-4）．

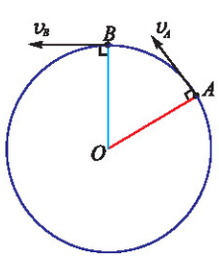


图 2-1-4　匀速圆周运动线速度的方向

线速度是矢量，做匀速圆周运动的质点在各个时刻的线速度的大小虽然相同，但线速度的方向在不断变化，因此，匀速圆周运动实际上是一种变速运动．这里所说的“匀速”只是速率不变的意思．

微信公众号：电子课本大全

讨论交流



图 2-1-5　闹钟与手表之争

闹钟与手表为什么会有上述快慢之争（图 2-1-5）？提出你的看法，和同学进行讨论.

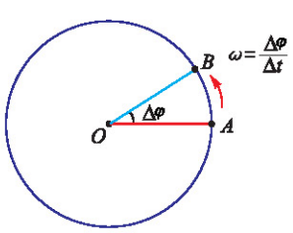


图 2-1-6　对角速度定义的说明

显然，“闹钟”和“手表”是从不同角度看圆周运动的：闹钟指的是秒针针尖的线速度；手表则指的是描述秒针运动的另一个物理量，这个物理量就是角速度.

对于做匀速圆周运动的质点（图2-1-6），连接质点和圆心的半径所转过的角度 $\Delta\varphi$ 跟所用时间 Δt 的比值叫做匀速圆周运动的**角速度**（angular velocity），用 ω 来表示：

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$$

匀速圆周运动是角速度不变的运动. 在国际单位制中，角速度的单位是**弧度每秒**，符号是 **rad/s**.

做匀速圆周运动的物体运动一周所用的时间叫做**周期**（period），用符号 T 表示. 周期也是描述匀速圆周运动快慢的一个物理量. 我们常说匀速圆周运动具有“周期性”，指的是做匀速圆周运动的物体经过一个周期 T 后，会重新回到原来的位置及运动方向.

圆心角 φ 的大小可以利用弧长与半径的比值来表示，其单位是弧度（radian），用符号 rad 表示. 周角是 2π（rad）；平角是 π（rad）；直角是 $\frac{\pi}{2}$（rad）.

微信公众号：电子课本大全

既然线速度、角速度和周期都是描述匀速圆周运动快慢的物理量，那么它们之间有什么关系呢？

线速度、角速度和周期之间的关系

设质点A沿半径为r的圆周做匀速圆周运动，它在一个周期T内转过的弧长为$2\pi r$，转过的角度为2π，所以线速度和角速度分别为

$$v=\frac{2\pi r}{T}$$

$$\omega=\frac{2\pi}{T}$$

由以上两式得

$$v=r\omega$$

这就是匀速圆周运动中线速度与角速度的关系．经过分析，我们可以知道，这个关系在所有圆周运动中均成立．

从$v=r\omega$可以看出，质点做圆周运动时，如果角速度相同，半径不同，线速度也不同．

利用公式$v=r\omega$，就可以化解闹钟与手表关于秒针针尖运动的快慢之争了．

技术中常用转速来描述物体绕轴转动的快慢．**转速**是指物体在单位时间内所转过的圈数，常用符号n表示，转速的单位有转每秒，符号是r/s，或转每分（r/min）．角速度与转速的关系是$\omega=2\pi n$．

练习与评价

1．对于做匀速圆周运动的物体，下面说法中正确的是（　　）．

A．线速度不变　　B．线速度的大小不变

C．角速度不变　　D．周期不变

2．地球绕太阳公转的运动可以近似地看做匀速圆周运动．地球距太阳约1.5×10^8 km，地球绕太阳公转的角速度是多大？线速度是多大？

3．一台准确走动的钟表上的时针、分针、秒针的长度之比为2∶3∶3，试求三针的角速度之比和三针尖端的线速度之比．

4．如图2-1-7所示，自行车的大齿轮与小齿轮通过链条相连，而后轮与小齿轮是绕共同的轴转动的．设大齿轮、小齿轮和后轮的半径分别为r_1、r_2和r_3，在它们的边缘分别取一点A、B、C．设A点的线速度大小为v，求B点和C点的线速度大小和角速度．

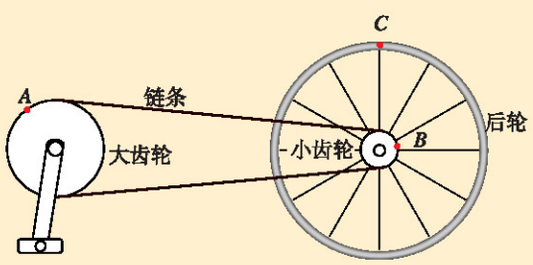


图2-1-7

微信公众号：电子课本大全

发展空间

实验室

快速转动自行车轮，你可以看清轮轴附近的一段辐条，但你能看清轮圈附近的辐条吗？试试看，并解释这个现象.

课外阅览

圆周运动与一般曲线运动的关系

如图 2-1-8 所示，车辆的运动通常是一个比较复杂的曲线运动. 这样的曲线运动应当如何描述呢？如果在复杂的运动轨迹中取出一小段来观察，问题就会变得简单. 从图 2-1-8 的照片中取一小段轨迹放大，你会发现它的轨迹非常接近某个圆的一部分. 这个发现对你有什么启发？

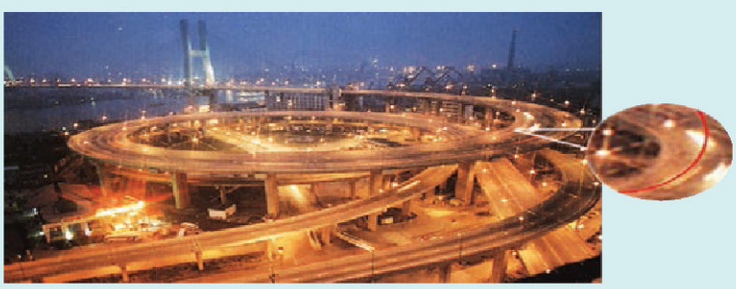


图 2-1-8　上海黄浦江大桥夜景. 图中的一缕缕曲线是用照相机长时间曝光摄得的，显示的是车辆运动的径迹



图2-1-9　你见过绘图用的曲线板吗？设计师常用曲线板来画某些比较大的弧线

任何一条平滑的曲线都可以看做是由一系列不同半径的圆弧连接而成的，这些圆弧的半径叫做曲率半径，记作 ρ（图 2-1-10）. 因此，我们就可以把物体沿任一曲线的运动，看成是物体沿一系列不同半径的小段圆弧的运动.

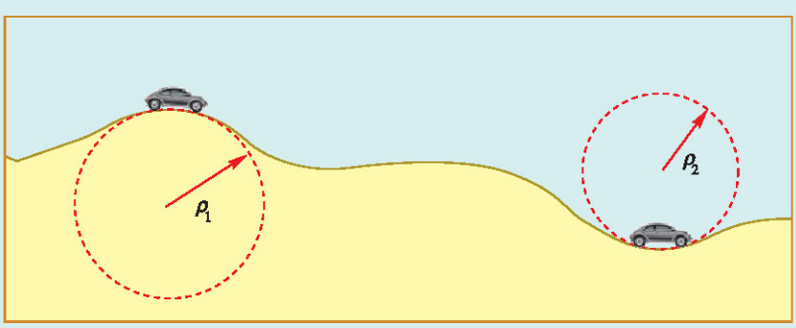


图 2-1-10　曲线运动中，各点的曲率半径表示了曲线在此处的弯曲程度

微信公众号：电子课本大全

2 匀速圆周运动的向心力和向心加速度

活动

感受向心力

如图2-2-1所示，用一根结实的细绳，一端拴一个小物体，如橡皮或软木塞. 在光滑桌面上抡动细绳，使小物体做圆周运动，体验手对做圆周运动的物体的拉力.

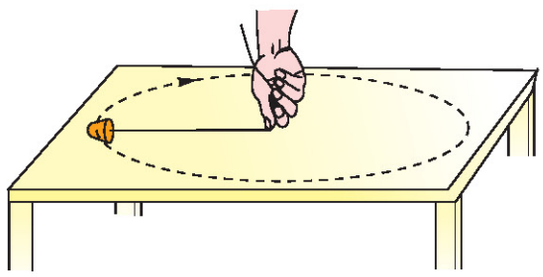


图 2-2-1　体验手拉绳的力

拉力的方向是怎样的?

减小旋转的速度，拉力怎样变化?

增大旋转半径，拉力怎样变化.

松手后，物体还能维持圆周运动吗?

换一个质量较大的铁球进行实验，拉力怎样变化?

什么是向心力

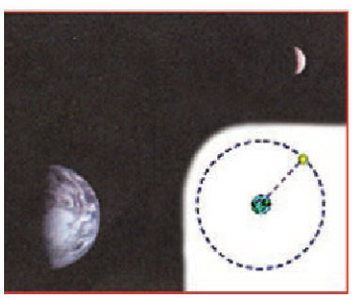
当你抡动细绳，使物体做匀速圆周运动时，作用在物体上的拉力，总是沿绳子指向圆心. 那么，做匀速圆周运动的物体，是否都受到指向圆心的力的作用呢?

讨论交流

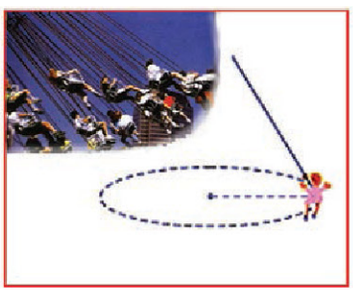
观察图 2-2-2 中的图片，思考：

1. 月球、“旋转秋千”做匀速圆周运动时，它们会受到沿圆周切线方向的力的作用吗?

2. 月球、“旋转秋千”做匀速圆周运动时，它们所受的合力是否改变速度的大小? 其方向与线速度方向有什么关系?



(a)月球受地球的引力，绕地球做匀速圆周运动



(b) 游乐场里的“旋转秋千”，受重力和吊绳的拉力共同作用，在水平面内做匀速圆周运动

图 2-2-2　匀速圆周运动的两个实例

大量实例说明，物体做匀速圆周运动时所受合力方向始终指向圆心，这个指向圆心的合力就叫做**向心力**(centripetal force).

向心力可以由弹力提供，也可以由其他性质的力提供；可以由一个力提供，也可以由几个力的合力提供.

微信公众号：电子课本大全

牛顿很早就认识到了向心力和圆周运动的关系．他认为，所有做圆周运动的物体，如果没有向心力，物体将由于惯性而沿圆周的切线方向飞出．正是由于向心力时刻改变着速度的方向，才使得物体可以沿着一个圆周运动．

● 向心力的大小

上述感受向心力的实验表明，物体做匀速圆周运动所需向心力的大小与物体的质量、角速度大小和运动半径有关．

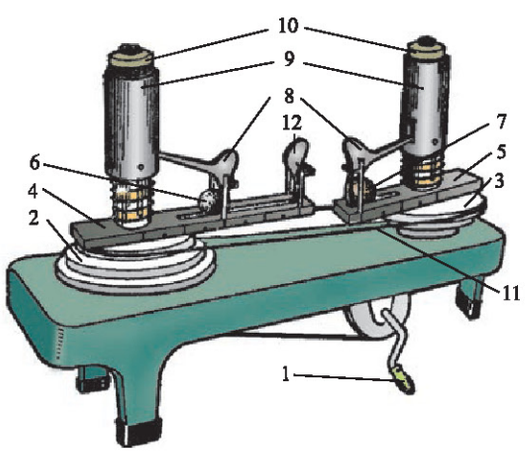
想想看，做匀速圆周运动的物体所需向心力的大小与质量、角速度和半径之间有什么定量关系呢？

实验探究

探究向心力的大小 F 与质量 m、角速度 ω 和半径 r 之间的关系

我们用如图 2-2-3 所示的实验装置来探究这个关系．

转动手柄使长槽和短槽分别随变速轮塔匀速转动，槽内的球就做匀速圆周运动．横臂的挡板对球的压力提供了向心力，球对挡板的反作用力通过横臂的杠杆作用使弹簧测力筒下降，从而露出标尺，标尺上的红白相间的等分格显示出两个球所受向心力的比值．



1. 手柄
2. 变速轮塔
3. 变速轮塔
4. 长槽
5. 短槽
6. 小球
7. 小球
8. 横臂
9. 弹簧测力筒
10. 标尺
11. 传动皮带
12. 挡板

图 2-2-3　探究向心力的大小与质量、角速度和半径之间关系的实验装置

1．保持 ω 和 r 相同，研究小球做圆周运动所需向心力 F 与质量 m 之间的关系（如图 2-2-4 所示），记录实验数据．

2．保持 m 和 r 相同，研究小球做圆周运动所需向心力 F 与角速度 ω 之间的关系（如图 2-2-5 所示），记录实验数据．

微信公众号：电子课本大全

3. 保持ω和m相同，研究小球做圆周运动所需向心力F与半径r之间的关系（如图2-2-6所示），记录实验数据.

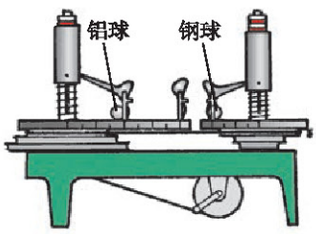


图2-2-4　研究向心力与质量之间的关系

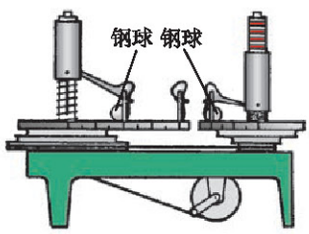


图2-2-5　研究向心力与角速度之间的关系

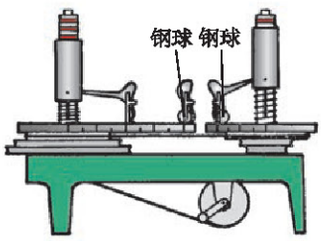


图2-2-6　研究向心力与半径之间的关系

分析实验所测得的数据，你认为物体做匀速圆周运动所需向心力的大小与物体的质量、运动半径和角速度之间有何关系？

精确的实验表明：做匀速圆周运动所需向心力的大小，在质量和角速度一定时，与半径成正比；在质量和半径一定时，与角速度的平方成正比；在半径和角速度一定时，与质量成正比. 用公式可以表示为

$$F = m\omega^2 r$$

由于$v = r\omega$，可得

$$F = m\frac{v^2}{r}$$

由此可见，物体做匀速圆周运动，必须有向心力来维持，其大小为$F = m\dfrac{v^2}{r}$.

因为向心力的方向总与物体的速度方向垂直，它只改变速度的方向，不改变速度的大小.

讨论交流

为什么在向心力大小的两种表达式中，一个式子中向心力的大小与半径成正比，而另一式子中向心力的大小却与半径成反比？它们相互矛盾吗？

微信公众号：电子课本大全

向心加速度

根据牛顿第二定律可知，做匀速圆周运动的物体，在向心力的作用下，必然要产生一个**向心加速度**（centripetal acceleration），它的方向与向心力的方向相同，总是指向圆心，它的大小为$\frac{F}{m}$，即

$$a=\frac{v^2}{r}$$

或

$$a=\omega^2 r$$

如果线速度的单位是米每秒（m/s）[或角速度的单位是弧度每秒（rad/s）]，圆周半径的单位是米（m），那么向心加速度的单位就是米每二次方秒（m/s^2）.

对于某一做匀速圆周运动的物体来说，质量 m 以及圆周半径 r、线速度 v 和角速度 ω 的大小一定时，向心力和向心加速度的大小不变，但向心力和向心加速度的方向却时刻在改变，所以匀速圆周运动是加速度的方向不断改变的变加速运动.

向心力和向心加速度的公式虽然是从匀速圆周运动得出的，但是也适用于一般的圆周运动，当速度的大小发生变化时，向心力和向心加速度的大小也必定同步发生变化，利用公式求质点在圆周的某一点时的向心力和向心加速度的大小，必须用该点的瞬时速度值.

【例题】 “神舟”五号飞船（图 2-2-7）发射升空后，进入椭圆轨道，然后实施变轨进入距地球表面约 343 km 的圆形轨道. 已知飞船的质量为 8000 kg，飞船约 90 min 绕地球一圈，地球半径取 6.37×10^3km，试求飞船在变轨成功后的向心加速度及其所受的向心力.



图 2-2-7 “神舟”五号飞船

想一想，飞船所需的向心力是由什么力来提供的？这个问题我们将在第三章中进行研究.

【解】 由已知数据可算出飞船的角速度

$$\omega=\frac{2\pi}{T}=\frac{2\pi}{90\times60}\ \text{rad/s}=1.16\times10^{-3}\ \text{rad/s}$$

飞船的向心加速度

$$a=\omega^2 r=(1.16\times10^{-3})^2\times(6370+343)\times10^3\ \text{m/s}^2$$
$$=9.03\text{m/s}^2$$

飞船所受的向心力

$$F=m\omega^2 r=8000\times(1.16\times10^{-3})^2\times(6370+343)\times10^3\text{N}$$
$$=7.23\times10^4\text{N}$$

微信公众号：电子课本大全

练习与评价

1. 在某旋转餐厅（图 2-2-8），餐桌离转轴中心约 20 m，转动一周的时间约 1 h，请通过估算，说明就餐的顾客为什么感觉不到向心力的作用.



图 2-2-8　旋转餐厅

2. 质点做半径为 r 的匀速圆周运动，其向心力的大小为 F，当它的半径不变，角速度增大到原来的 2 倍时，其向心力的大小比原来增大了 15 N，则原来的向心力大小 F 是多大？

3. 在长 0.2 m 的细绳的一端系一小球，绳的另一端固定在水平桌面上，使小球以 0.6 m/s 的速度在桌面上做匀速圆周运动，求小球运动的向心加速度和角速度.

发展空间

课外阅览

利用速度合成求向心加速度

做匀速圆周运动的物体，其速度的大小（速率）不变，方向不断改变，所以加速度 a 没有与 v 同方向的分量，它只是反映了速度 v 方向的不断改变.

设某一时刻 t 质点运动到 A 点，速度为 v_A，经过 Δt 时间后，运动到 B 点，速度为 v_B. 平移速度 v_B 的起点 B 使之与速度 v_A 的起点 A 重合，则从 v_A 末端到 v_B 末端的连线为速度的变化量 Δv，如图 2-2-9 所示.

因为 v_A 和 v_B 大小相等，$v_A \perp OA$，$v_B \perp OB$，可知 v_A、v_B 及 Δv 构成的等腰三角形和 $\triangle OAB$ 是相似三角形. 用 v 表示 v_A 和 v_B 的大小，用 Δl 表示弦 AB 的长度，根据相似三角形的性质可以得到：$\dfrac{\Delta v}{v}=\dfrac{\Delta l}{r}$，所以，$\dfrac{\Delta v}{\Delta t}=\dfrac{v}{r}\cdot\dfrac{\Delta l}{\Delta t}$.

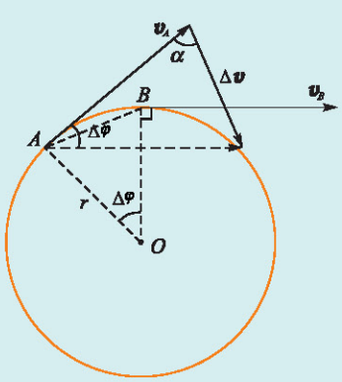


图 2-2-9　匀速圆周运动中速度和加速度的关系

用 Δs 表示弧 AB 的长度. 当 $\Delta t \to 0$ 时，$B \to A$，弦长 Δl →弧长 Δs，这时 $\dfrac{\Delta v}{\Delta t}$ 就是加速度 a 的大小，$\dfrac{\Delta s}{\Delta t}$ 就是线速度的大小 v. 于是得到 $a=\dfrac{v}{r}\cdot v=\dfrac{v^2}{r}$.

a 的方向就是 Δv 的极限方向. 在 v_A、v_B 和 Δv 构成的等腰三角形中，Δv 与 v_A 的夹角 $\alpha=\dfrac{\pi-\Delta\varphi}{2}$. 当 $\Delta t \to 0$ 时，$\Delta\varphi \to 0$，这时 $\alpha \to \dfrac{\pi}{2}$，即 $a \perp v_A$. 这表明 A 点加速度的方向与 A 点速度的方向垂直，沿半径指向圆心，因此被称为向心加速度.

微信公众号：电子课本大全

3 圆周运动的实例分析

● 汽车过拱形桥

汽车通过拱形桥时的运动也可看做圆周运动．质量为 m 的汽车以速度 v 通过拱形桥最高点时，若桥面的圆弧半径为 R，则此时汽车对拱桥的压力多大？

选择汽车为研究对象．分析汽车所受的力，知道桥对汽车的支持力 N，就可以知道桥所受的压力 N'．

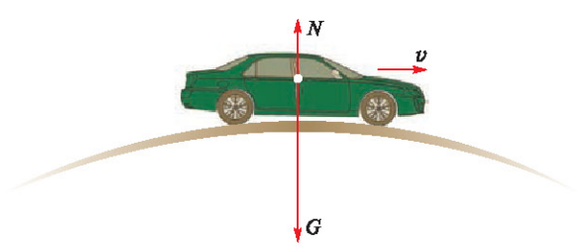


图 2-3-1　汽车通过拱形桥

如图 2-3-1 所示，在拱形桥最高点汽车在竖直方向上受到重力 G 和桥的支持力 N，它们的合力提供使汽车做圆周运动的向心力，即

$$F_{合} = G - N = mg - N$$

以 a 表示汽车此时的向心加速度，根据牛顿第二定律

$$F_{合} = ma = m\frac{v^2}{R}$$

则有

$$mg - N = m\frac{v^2}{R}$$

由此解出桥对汽车的支持力

$$N = mg - m\frac{v^2}{R}$$

汽车对桥的压力 N' 与桥对汽车的支持力 N 是一对作用力和反作用力，大小相等．所以汽车对桥面压力的大小为

$$N' = mg - m\frac{v^2}{R}$$

分析最后结果可以看出，汽车对桥的压力 N' 小于汽车的重力 mg，而且汽车通过最高点时的速度越大，汽车对桥面的压力就越小．想一想，当汽车的速度为多大时，汽车对桥面的压力恰好为零？

微信公众号：电子课本大全

“旋转秋千”

“旋转秋千”是游乐园里常见的游乐项目，它有数十个座椅通过缆绳固定在旋转圆盘上，每一座椅可坐一人．启动时，座椅在旋转圆盘的带动下围绕竖直的中心轴旋转飘游，如图 2-3-2 所示．角速度越来越大，座椅越转越高．想一想，“旋转秋千”的圆周运动中有哪些物理问题？能否对这些问题进行分析？



图 2-3-2　“旋转秋千”

例如：“旋转秋千”中的缆绳跟中心轴的夹角与哪些因素有关？

体重不同的人坐在秋千上旋转时，缆绳与中心轴的夹角相同吗？

“旋转秋千”的运动经过简化，可以看做如下的物理模型：在一根长为 l 的细线下面系一质量为 m 的小球，将小球拉离竖直位置，使悬线与竖直方向成 α 角，给小球一个初速度，使小球在水平面内做匀速圆周运动，悬线旋转形成一个圆锥面，这种装置叫做圆锥摆．

解决匀速圆周运动问题的关键是分析谁提供向心力．圆锥摆运动的小球做匀速圆周运动的向心力是其所受的重力 mg 和悬线拉力 T 的合力 $F_{合}$ 提供的，如图 2-3-3 所示．$F_{合}$ 一定在圆轨道平面内且指向圆心 O，由力的分解和几何关系可得

$$F_{合}=mg\tan\alpha$$

$$r=l\sin\alpha$$

根据牛顿第二定律　$F_{合}=m\omega^2 r$

解得　$\omega=\sqrt{\dfrac{g}{l\cos\alpha}}$

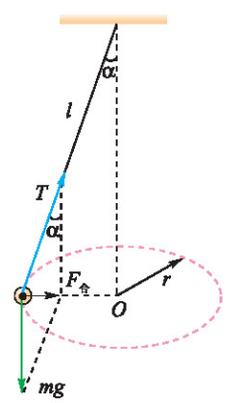


图 2-3-3　圆锥摆的模型

所以

$$\cos\alpha=\frac{g}{\omega^2 l}$$

由此式可知，缆绳与中心轴的夹角跟“旋转秋千”的角速度和绳长有关，而与所乘坐人的体重无关．在绳长一定的情况下，角速度越大则缆绳与中心轴的夹角也越大（小于 90°）．想一想，怎样求出它的运动周期？

微信公众号：电子课本大全

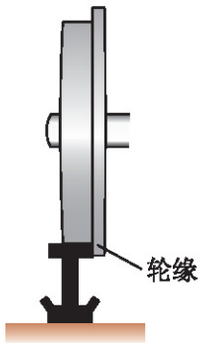


图 2-3-4　火车车轮有突出的轮缘

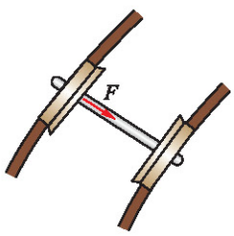


图 2-3-5　火车转弯时，外轨对轮缘的弹力提供向心力

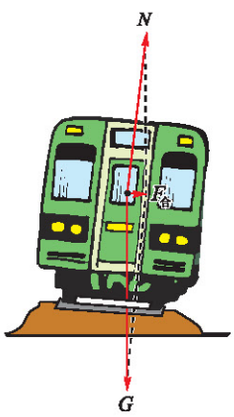


图 2-3-6　火车转弯时由重力和支持力的合力提供向心力

为什么火车转弯时要限定车速，既不能过大也不能过小？

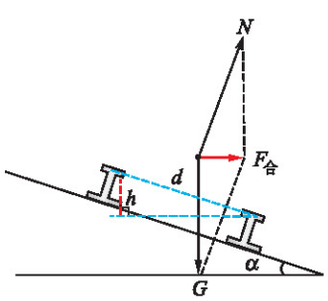


图 2-3-7　倾斜的铁路路基

● 火车转弯

讨论交流

假定你是一个铁路设计的工程师，你打算用什么方法为火车转弯提供向心力？与你的同学交流并评价各自的方法.

火车在水平面内以恒定的速率转弯时，可以把它视为做匀速圆周运动，其向心加速度指向圆心. 如何为它提供向心力呢？

观察火车的车轮，可以发现，车轮上有突出的轮缘（图 2-3-4），在铁轨上可以起到限定方向的作用. 如果让火车在水平路基上转弯，外侧车轮的轮缘将挤压外轨，使外轨发生弹性形变而产生弹力. 外轨对轮缘的弹力就为火车转弯提供了向心力，如图 2-3-5 所示. 在这种设计方案中，由于轮缘与外轨挤压、摩擦而产生磨损，而且火车的质量、车速越大时，磨损越厉害. 显然这不是一种最佳的设计方案.

在通常的设计中，设计师总使转弯处的外轨略高于内轨（图 2-3-6），火车转弯时铁轨对火车的支持力 N 的方向不再是竖直的，而是斜向弯道的内侧，它与重力 G 的合力指向圆心，为火车转弯提供了一部分向心力. 这就减轻了轮缘与外轨的挤压. 在修筑铁路时，要根据弯道的半径和规定的行驶速度，确定内外轨的高度差，使火车转弯时所需的向心力几乎完全由重力 G 和支持力 N 的合力来提供.

【例题】某铁路转弯处的圆弧半径是 300 m，两铁轨之间的距离是 1.435 m，若规定火车通过这个弯道的速度为 72 km/h，则内外铁轨的高度差应该是多大才能使火车转弯时内外轨均不受轮缘的挤压？

【解】火车在转弯时所需的向心力应由火车所受的重力和轨道对火车支持力的合力提供（图 2-3-7）. 图中 h 为内外铁轨的高度差，d 为轨道之间的距离. 由向心力公式和几何关系可知

$$F = mg\tan\alpha = m\frac{v^2}{R}$$

微信公众号：电子课本大全

解得　　$\tan\alpha=\dfrac{v^2}{gR}$

由于轨道平面和水平面间的夹角一般较小，可以近似地认为

$$\tan\alpha\approx\sin\alpha=\frac{h}{d}$$

代入上式，得

$$\frac{h}{d}=\frac{v^2}{gR}$$

所以内外轨的高度差

$$h=\frac{v^2d}{Rg}=\frac{20^2\times1.435}{300\times9.8}\ \text{m}=0.195\ \text{m}$$

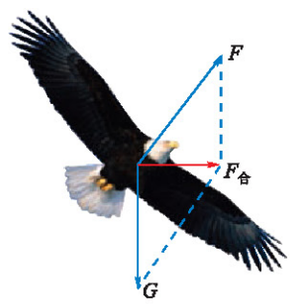


图 2-3-8　鹰盘旋时受到的力

倾斜的路面，为转弯的汽车或火车获得向心力提供了条件．与此相类似，盘旋的鸟或飞机，也是依靠倾斜来获得所需要的向心力．鸟或飞机借助垂直于翼面的空气作用力——升力，在空中飞翔．当翼面倾斜时，垂直于翼面的升力 F 和重力 G 的合力 $F_{合}$ 提供向心力，使鸟或飞机转弯（图 2-3-8）.

离心运动

活动

用一个侧壁上扎有许多小孔的瓶盖做成一个能绕中心轴转动的竖直滚筒（图 2-3-9），在里面放些湿棉球，转起来时可以看到有小水滴向外飞出.


图 2-3-9　小小甩干机

在做圆周运动时，由于合外力提供的向心力消失或不足，以致物体沿圆周运动的切线方向飞出或远离圆心而去的运动叫做**离心运动**.

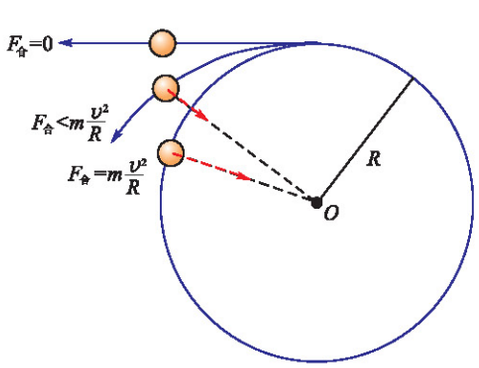
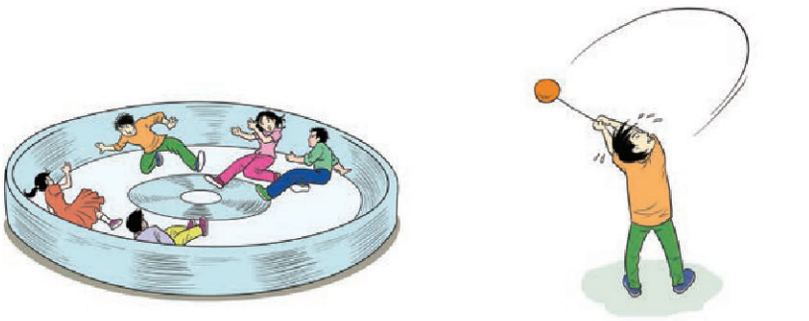


图 2-3-10　离心运动

微信公众号：电子课本大全



（a）在游乐园里玩“魔盘”游戏的人，会被抛到盘的边缘地带

（b）当拉力突然消失时，链球做离心运动，沿切线方向飞出

图 2-3-11　离心运动

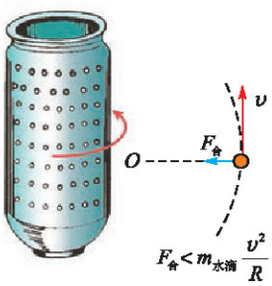


图 2-3-12　洗衣机脱水的原理



图 2-3-13　低温离心机

离心运动有许多重要的应用．利用离心运动的机械叫做**离心机械**．

洗衣机的脱水筒是家庭常见的离心机械，当它高速转动时，由于筒内衣服上的水滴所受合力不足以提供向心力，水滴离开衣服，从脱水筒壁的小孔飞出筒外（图2-3-12），衣服就被甩干了．

离心机是科研、生产中重要的实验装置，它可以把密度不同的几种液体混合物分离开．医学研究中，常将血浆注入低温离心机（图2-3-13）内，血液在离心机内高速转动时，因为血清和血细胞的密度不同，密度大的红细胞不能获得相应大的向心力，因而做离心运动，从而将血清和血细胞分离．

离心运动在生产和生活中广泛存在，但它并不总是有利的，有时会造成危害．对圆周运动进行受力分析，能帮助我们找到有效的控制方法．



图 2-3-14　在转弯的地方，汽车的行驶速度不允许超过限定的值，以免因为离心运动造成交通事故

微信公众号：电子课本大全

练习与评价

1. 如图2-3-15所示，玻璃球沿碗的内壁做匀速圆周运动（若忽略摩擦），这时球受到的力是（　　）.

A. 重力和向心力　　B. 重力和支持力

C. 重力、支持力和向心力　　D. 重力



图 2-3-15

2. 飞机俯冲时，在最低点附近做半径是180 m的圆周运动. 如果飞行员的质量是70 kg，飞机经过最低点时的速度是360 km/h，求这时飞行员对座位的压力.（g取10 m/s^2）

3. 在高速公路的拐弯处，路面都是筑成外高内低的，即当车向右拐弯时，司机左侧的路面比右侧的要高一些，路面与水平面间的夹角为θ. 设拐弯路段是半径为R的圆弧，要使车速为v时车轮与路面之间横向（即垂直于前进方向）摩擦力等于零，则θ应为多大？

4. 如图2-3-16所示为工厂中的行车示意图，设钢丝绳悬点O到所吊铸件的重心P的距离为3 m，铸件质量为2.7 t，行车以2 m/s的速度匀速行驶，当行车突然刹车停止时，钢丝绳受到的拉力是多少？

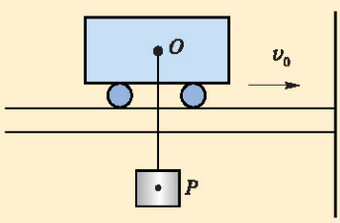


图 2-3-16　行车

发展空间

实验室

大家都看过杂技演员表演的“水流星”（如图2-3-17所示）. 一根细绳系着盛水的杯子，随着演员的抡动，杯子就在竖直面内做圆周运动，甚至杯子在运动到最高点时，水也不会从杯里洒出来. 这是为什么？你自己动手做一个“水流星”，感受一下.

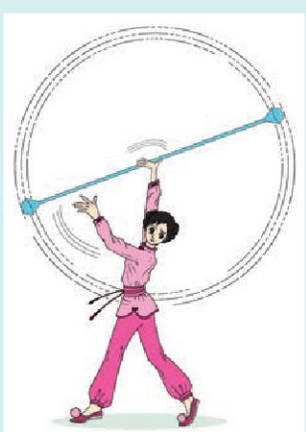


图 2-3-17　杂技演员在表演“水流星”

物理在线

通过网络查询或与有关部门联系，了解有关公路、铁路弯道路面设计的资料. 并对公路、铁路弯道进行实地考察，研究汽车、火车是怎样转弯的.

微信公众号：电子课本大全

4 圆周运动与人类文明（选学）

在古代乃至现代，人们都很崇尚圆周运动，因为在大家的眼中，有太多的自然现象与圆有关．在人类发展的历程中，应用圆周运动的发明和创造对推动社会进步起到了十分重要的作用．



图2-4-1　钻木取火：原始人通过钻木获取火种

圆周运动与古代文明

1. 钻木取火

火的利用是人类社会文明进程中的重要里程碑．钻木取火（图2-4-1）是通过转动木棒与木块摩擦发热，直至引起燃烧．这是早期人类利用圆周运动的一项发明．

2. 陶器制作

陶器是古代文化的重要象征．5000多年前，我们的祖先就能利用圆周运动的道理，制造出精致的陶器制品．

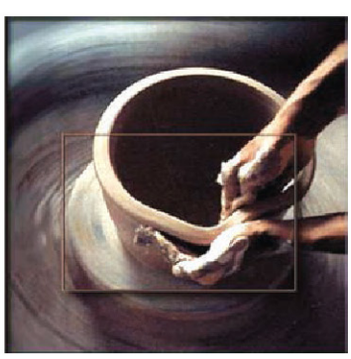


图2-4-2　“拉坯”：制陶时将泥坯摔掷在转动的辘轳车中心，拉出坯体的大致形状

3. 车轮的发明

我们的祖先在5000多年前就已经发明了车轮．车轮的发明使人类开始走出肩挑、背扛的时代，为大量利用畜力、开展远距离的运输和商贸活动创造了条件．

车轮第一次把圆周运动和直线运动联系起来，这是一个伟大的发明．

4. 机械能的利用

水轮的发明推进了人类利用自然界机械能的历史，利用水轮获得动力的水磨、水碓、水碾和水车（图2-4-4）展示了灿烂的古代文明．

微信公众号：电子课本大全



图 2-4-3　东汉时期（25—220）出现的记里鼓车：每行驶一里路，木人自动击鼓一次，因此而得名．车内装有一套具有减速作用的传动齿轮，是近代里程表和减速装置的先驱



图 2-4-4　“吱吱”鸣唱了千年的水车

圆周运动与工业技术

圆周运动的应用解决了蒸汽机技术中近一个世纪的困惑．没有圆周运动的应用，蒸汽机（图 2-4-5）就只能停留在往复运动状态，不能成为原动力，人类社会就不会有产业革命．在工业化过程中首先是机械化的实现，没有圆周运动的基础理论就不可能设计和制造齿轮和轴的机构，没有齿轮和轴就不可能有各种大型的、精密的、专用的或通用的机器（图 2-4-6 至图 2-4-9），不可能有金属切削机床、矿山机械、化工机械、能源机械、交通机械、仪器仪表和医疗卫生机械，也不可能有发电机、电动机．离开齿轮和轴的传动链，任何一部机器都会变成一堆废铁．可以说，没有圆周运动就没有机械化和工业化．即使在信息技术、数字技术越来越发达的当代，充分利用圆周运动仍然是十分必要的．



图2-4-5　瓦特（James Watt）改进后的蒸汽机

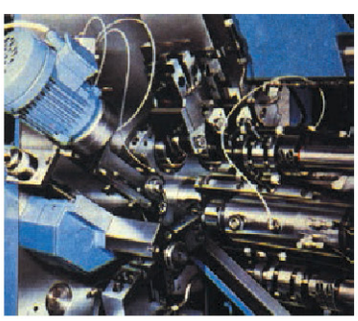


图 2-4-6　在一台多轴自动车床上可以同时从几个方向对工件实现多种工艺的切削加工，既提高效率，又提高精度

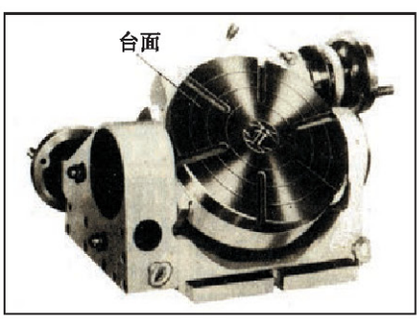


图 2-4-7　万能工作台：圆形工作台可以绕中心轴转动，中心轴又可以在空间转动．在万能工作台上可以对复杂几何构件进行切削加工和检测

微信公众号：电子课本大全

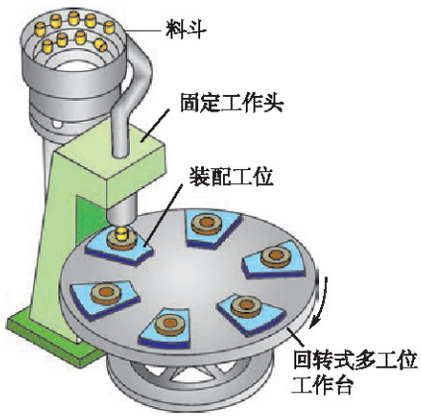


图 2-4-8　装配线将直线运动和圆周运动相结合，实现连续装配生产

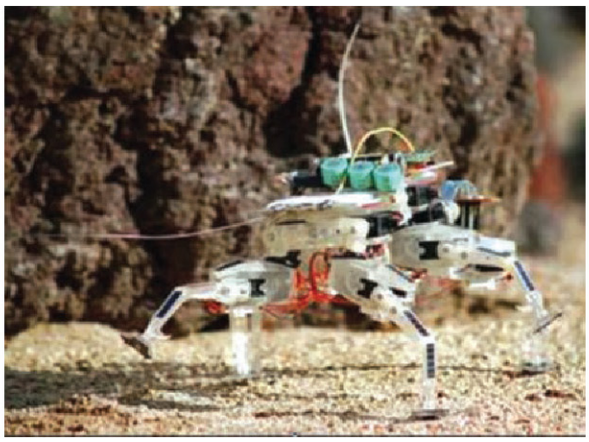


图 2-4-9　美国航空航天局研制出的蜘蛛形机器人将帮助人类对其他星球进行探测，它的每一个动作都是通过轴和齿轮的转动而实现的

圆周运动与科学实验



图2-4-10　世界上第一台回旋加速器



图 2-4-11　运载火箭中的陀螺仪



图2-4-12　用超速离心机提取DNA分子

1. 粒子物理和核物理实验

回旋加速器是进行粒子物理和核物理研究的一种设备（图 2-4-10）. 带电粒子在垂直于运动方向的匀强磁场作用下，就会沿圆形轨道运动，再用适当频率的高频电场多次加速带电粒子，就可以使带电粒子获得很高的能量.

在粒子物理和核物理实验室中还有质子加速器、重离子加速器，它们大都利用圆周运动.

2. 航天技术

火箭靠什么进入预定轨道？导弹靠什么击中目标？它们都靠高速旋转的陀螺（图 2-4-11）来控制轨道方向.

卫星绕地球做近似的圆周运动时还有自转运动，卫星在轨道定点和返回过程中都需通过发动小火箭改变圆形轨道.

3. 生命科学

21世纪是生命科学时代，各种生命体的基因图谱测序和解读是现代生命科学研究最基本的任务. 高速或超速离心机（图 2-4-12）是基因提取中的关键设备，超速离心机转速高达80 000 r/min，不仅要求回转台具有极高的中心对称性，而且要在真空状态运行.

微信公众号：电子课本大全

圆周运动与文化生活

圆是对称性最好的平面结构，从圆心到圆周的任意一点距离都相等．建筑学家把这种空间特性广泛地应用于现代化大都市的结构设计中，如环形通道（图 2-4-13）、环形地铁、环形立交桥、螺旋形引桥等，以加强人流、车流密集的都市中心向四周辐射的能力，改善城市的交通环境，提高城市居民的生活质量和工作效率．



图 2-4-13　环形通道

现代化大都市的电视塔和高层酒店往往利用自己的高空优势设计旋转餐厅，顾客静坐转椅，一方面品茶饮酒，会客交友，另一方面可以环视全城美景．这些已成为现代化都市旅游文化的亮点．

圆周运动被广泛地应用于现代化游乐设施之中，为人们提供了节假日和业余生活的文化享受．



图 2-4-14　游乐园中的圆周运动

科学玩具是儿童早期教育的重要媒介，各种各样基于圆周运动的玩具丰富了儿童的心灵世界．

圆周运动在体育、杂技、舞蹈设计中占有重要地位，是许多高难度动作的设计基础．单杠中的大回环，链球比赛的快速旋转，花样滑冰和芭蕾舞蹈中令人眼花缭乱的舞姿，杂技表演中的“车技”“蹬技”“碟技”“帽技”和“飞车走壁”等惊险动作，无不基于圆周运动的原理．



图 2-4-15　花样滑冰的优美舞姿



图 2-4-16　应用圆周运动的玩具

微信公众号：电子课本大全

本章小结

1. 物体的运动轨迹是圆的运动叫做圆周运动．线速度和角速度是描述圆周运动快慢的物理量．

2. 质点沿圆周运动，如果在相等的时间里通过的圆弧长度相等，这种运动就叫匀速圆周运动．匀速圆周运动的线速度 $v=\frac{\Delta s}{\Delta t}$．

3. 质点做匀速圆周运动，连接质点和圆心的半径所转过的角度 $\Delta\varphi$ 跟所用时间 Δt 的比值叫做匀速圆周运动的角速度，$\omega=\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$．在国际单位制中，角速度的单位是弧度每秒，符号是 rad/s．匀速圆周运动是角速度不变的运动．

4. 角速度与线速度的关系：$v=r\omega$．

5. 做匀速圆周运动的物体的加速度方向总指向圆心，这种加速度叫做向心加速度，其大小为 $a=\frac{v^2}{r}$．

6. 做匀速圆周运动的物体所受合外力的大小为 $F_{合}=m\frac{v^2}{r}$．

7. 物体做圆周运动时，如果对物体提供的向心力突然消失或不足，物体就会沿圆周的切线方向飞出，或者逐渐远离圆心，这种运动叫做离心运动．

习　题

1．走时准确的大挂钟和小闹钟，它们的分针的周期、角速度都一样吗？分针针尖线速度的大小呢？

2．一般自行车车轮的直径约为 0.7 m．当自行车以 5 m/s 的速度匀速行驶时，车轮边缘的质点相对于车轮的轴做匀速圆周运动．试求车轮边缘质点的向心加速度．若小轮自行车以相同速度匀速运动时，车轮边缘质点的向心加速度是大一些还是小一些？

3．如图所示，质量为 800 kg 的小汽车驶过一座半径为 50 m 的圆形拱桥，当它到达桥顶时，速度为 5 m/s．求此时车对桥的压力．求出压力后，与它在水平公路上行驶时做一比较，看看在什么样的路面上行驶，车对路面的压力大．



（第 3 题图）

4．30 cm 长的绳的下端拴着一个小球，小球受到一个水平冲力的作用后，在竖直面内做圆周运动．小球在圆周最高点的速度至少有多大？

5．甲、乙两球都做匀速圆周运动．甲球的质量是乙球的 3 倍，甲球在半径为 25 cm 的圆周上运动，乙球在半径为 16 cm 的圆周上运动，乙球的线速度是甲球的 2 倍．试求两球所需向心力之比．

6．如果只考虑物理因素，作为运动员参加 200 m 比赛，你认为选跑道的内圈有利，还是外圈有利？如果你在游乐园玩“魔盘”游戏，为避免被抛向边缘，你应靠近盘的中央，还是远离中央？根据你已学的知识，说明理由．

微信公众号：电子课本大全

第三章

万有引力定律

- 天体运动
- 万有引力定律
- 万有引力定律的应用
- 人造卫星　宇宙速度

牛顿发现的万有引力定律揭示了天体运行的规律与地上物体运动的规律具有内在的一致性，成功地实现了天上力学与地上力学的统一. 在这一理论指导下，人类登上了月球，对火星和太阳系其他行星的探测也取得了不少成就. 牛顿建立的力学理论显示出无穷的魅力.



微信公众号：电子课本大全

1 天体运动



图 3-1-1 “卧看牵牛织女星”

盛夏季节，银河高悬，明亮的牛郎星、织女星隔河遥望（图 3-1-1）. 夜空中斗转星移，星体的运动都遵循一定的规律，人类对这种规律的正确认识经过了漫长而曲折的历程.

讨论交流

地球上的人们总感觉天体在环绕地球运动. 然而，运动是相对的，就像我们在车上看到路旁的电线杆在后退一样，是否有可能地球也在运动呢？如果天体和地球都在运动，它们的运动可能有什么特点呢？

日心说

早期，人类只是对一些直观的自然现象（如太阳、月亮的东升西落）加以简单的解释. 公元 150 年前后，古希腊学者托勒密（Ptolemy，90—168）在他的著作《天文学大成》中构建了地心宇宙体系. 他认为地球位于宇宙的中心，是静止不动的，其他天体围绕地球转动.

波兰天文学家哥白尼在1543年出版了不朽著作《天球运行论》，提出了日心说. 他在长达36年的时间里进行了研究、观测和核校后，认为地球和别的行星一样，围绕太阳运行，只有太阳固定在这个体系的中心（图 3-1-2）.


哥白尼（Nicolaus Copernicus，1473—1543）



图 3-1-2 哥白尼的日心系

小资料

哥白尼日心说的提出，使人们对宇宙的认识从主观的、神秘的、原始的见解，上升到近代的、比较客观合理的观点. 哥白尼的日心体系引起了一连串思想上的革命，与教会长期支持的地心说相悖，受到教会强烈的反对与仇视. 由于宣扬哥白尼的日心说，1600 年 2 月 17 日，布鲁诺（Giordano Bruno）被罗马教廷以“顽固异端分子”的罪名烧死在罗马的鲜花广场；1633 年 6 月 22 日，伽利略被宗教裁判所审判，并被判处终身监禁. 直到1979年11月11日，教皇约翰·保罗二世（John Paul Ⅱ）才决定为伽利略平反，为他恢复名誉.

微信公众号：电子课本大全

《天球运行论》的出版，标志着科学开始从各种传统错误观念的束缚中解放出来，哥白尼开辟了科学的新时代，使古代科学走向了近代的牛顿力学.

开普勒行星运动定律

丹麦天文学家第谷（Tycho Brahe，1546—1601），在20余年中坚持对天体进行系统观测，获得了大量的精确资料．这些资料为开普勒发现行星运动定律做好了准备.

开普勒是德国天文学家，第谷是他的导师．在研究第谷的观测资料时，他运用行星绕太阳做匀速圆周运动的模型算出了火星运行轨道数据，发现与第谷的观测数据之间有一个偏差，开普勒坚信他导师的观测数据是不会错的，从而断然放弃了圆轨道，而用椭圆轨道进行计算，结果偏差消除了．1609年开普勒的《新天文学》出版，在此书中他发表了第一、第二行星运动定律，1619年《宇宙的和谐》一书出版，他又在该书中发表了第三定律，后人称为开普勒三定律.



约翰尼斯·开普勒（Johannes Kepler，1571—1630）

开普勒第一定律：**所有的行星围绕太阳运动的轨道都是椭圆，太阳处在所有椭圆的一个焦点上.**

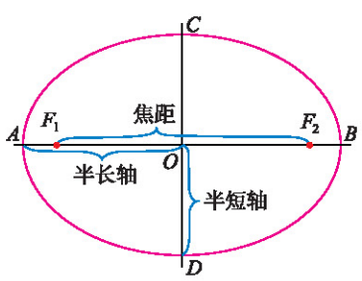


图3-1-3　椭圆是一种圆锥曲线，它有两个焦点（F_1和F_2），OA和OB称为它的半长轴

开普勒第二定律：**从太阳到行星的连线在相等的时间内扫过相等的面积.**

图3-1-4中，阴影部分的面积相同，可知行星越接近太阳，运动越快.

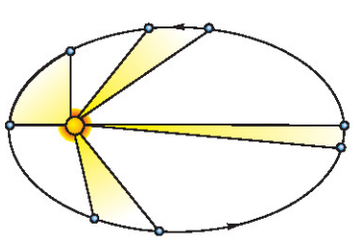


图3-1-4　开普勒第二定律图示

开普勒第三定律：**行星轨道半长轴的三次方与公转周期的二次方的比值是一个常量.**

用r代表椭圆轨道的半长轴，T代表公转周期，得到

$$\frac{r^3}{T^2}=k$$

比值k是一个与行星无关的常量.

开普勒的重要发现，为人们解决行星运动学问题提供了依据，澄清了多年来人们对天体运动神秘、模糊的认识，也为牛顿创立他的天体力学理论奠定了观测基础．开普勒是用数学公式表达物理定律并最早获得成功的人之一．从此，数学公式就成为表达物理学定律的基本方式.

微信公众号：电子课本大全

练习与评价

1. 关于地心说和日心说，下列说法中正确的是（　　）

A. 地心说的参考系是太阳

B. 日心说的参考系是太阳

C. 地心说和日心说只是参考系不同，两者具有等同的价值

D. 日心说是由开普勒提出来的

2. 关于行星绕太阳的运动，下列说法中正确的是（　　）

A. 所有行星都在同一椭圆轨道上绕太阳运动

B. 行星绕太阳运动时太阳位于行星轨道的中心处

C. 离太阳越近的行星公转周期越小

D. 离太阳越近的行星公转周期越大

3. 下表给出了太阳系八大行星平均轨道半径和公转周期的数值，请你设法利用这些数据验证开普勒第三定律.

行星	平均轨道半径 /m	公转周期 /s
水星	5.79×10^{10}	7.60×10^{6}
金星	1.08×10^{11}	1.94×10^{7}
地球	1.49×10^{11}	3.15×10^{7}
火星	2.28×10^{11}	5.94×10^{7}
木星	7.78×10^{11}	3.74×10^{8}
土星	1.43×10^{12}	9.30×10^{8}
天王星	2.87×10^{12}	2.66×10^{9}
海王星	4.50×10^{12}	5.20×10^{9}

发展空间

课外阅览

中国古代的宇宙理论

中国古代宇宙理论产生于周代至晋代. 所谓“论天六家”是指盖天、浑天、宣夜、昕天、穹天、安天.

盖天说出现于周代，主张“天圆如张盖，地方如棋局”的天圆地方说.

浑天说起于战国时期，比较详细的描述见于三国时的王蕃：“天地之体，状如鸟卵，天包于地外，犹卵之裹黄，周旋无端，其形浑浑然，故曰浑天. 其术以为天半覆地上，半在地下，其南北极持其两端，其天与日月星宿斜而回转.”

在长期的发展中，浑天说成为我国古代宇宙理论的主流学说.



图 3-1-5　中国古代著名的天文仪器——浑天仪

微信公众号：电子课本大全

物理在线

通过查阅图书或浏览互联网，查找各行星（包括地球）及其卫星的相关信息（包括文字、数据、动画、图片等）.

2 万有引力定律

在浩翰宇宙中，天体在不停地运动着．太阳系中的行星都在围绕太阳运行，月球在围绕地球运行．是什么力使天体维持这样的运动呢?

与引力有关现象的思考

讨论交流

1．为什么苹果从树上落向地面而不飞上天空?

2．在我们周围，物体都受到重力作用，那么月球受到重力作用吗?

3．为什么月球不会落到地球的表面，而是环绕地球运动?

苹果由于受到地球的吸引力而落向地面；月球如果不受外力的作用，它将沿直线由A运动到B，而事实上月球偏离了直线，绕地球做圆周运动，这表明月球受到向心力作用，方向指向地心（见图3-2-1）．牛顿思考了这个问题，他认为月球不沿直线运动，必定有力的作用，这个力就是地球对月球的引力．而且牛顿假设苹果与月球在运动中受到的是同种性质的力，都是地球对它们的引力，并进一步认为行星围绕太阳运动的向心力也是太阳对行星的引力．

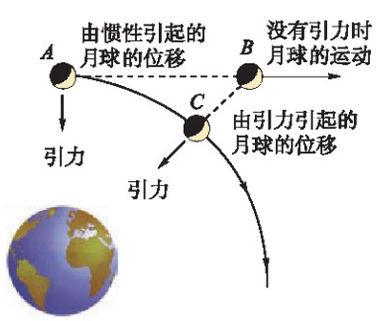


图3-2-1　一个指向地心的力使月球维持在它的轨道上

微信公众号：电子课本大全

万有引力定律

在牛顿所处的年代，许多物理学家如哈雷、胡克等都从开普勒行星运动定律中认识到行星所受太阳引力应当与距离的平方成反比，但当时人们并不知道这种引力能否使行星按椭圆轨道运动．物理学家们同时对此进行着研究，其中牛顿比较早地应用数学方法使这个问题得到证明，还指出这种引力应当与星体的质量成正比，从而确定了它的数学表达式．

为了使问题简化，我们把行星的运动当作匀速圆周运动，由牛顿第二定律和开普勒定律导出太阳与行星间的引力表达式．

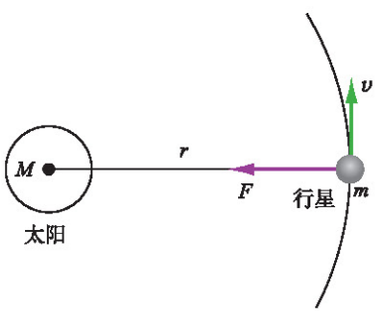


图 3-2-2　行星绕太阳运动

如图 3-2-2 所示，设行星的质量为 m，速率为 v，行星与太阳中心之间的距离为 r，行星绕太阳运动所需的向心力

$$F = m\frac{v^2}{r}$$

式中的 v 用天文观测很难直接测得，但行星公转周期容易测量，它们之间的关系是 $v = \frac{2\pi r}{T}$，代入上式，可得

$$F = 4\pi^2\left(\frac{r^3}{T^2}\right)\frac{m}{r^2}$$

由开普勒第三定律可知，$\frac{r^3}{T^2}$ 是常量，由此可得

$$F \propto \frac{m}{r^2}$$

根据牛顿第三定律，既然太阳吸引行星，行星也必然吸引太阳，设此力为 F'，则 F' 也应与太阳的质量 M 成正比，即

$$F' \propto \frac{M}{r^2}$$

F 与 F' 大小相等，因此

$$F = F' \propto \frac{Mm}{r^2}$$

牛顿还通过计算，证明月球绕地球运动，地球对月球的引力遵循同样的规律．牛顿在研究了其他不同物体间的

> 我们必须普遍地承认，一切物体，不论是什么，都被赋予了相互引力的原理．
>
> ——牛顿

微信公众号：电子课本大全

引力作用后，认为它们都遵循上述规律．这样，他就认识到普遍存在于宇宙间并且是由于物体具有质量而产生的一种作用力——万有引力．1687 年，牛顿正式发表了**万有引力定律**（law of universal gravitation）：

任何两个物体之间都存在相互作用的引力，引力的大小与这两个物体的质量的乘积成正比，与这两个物体之间的距离的平方成反比．

如果用 m_1 和 m_2 分别表示两个物体的质量，用 r 表示它们之间的距离，万有引力定律可以用下面的公式来表示：

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

式中 G 称为**引力常量**（gravitational constant），是一个与物质种类无关的普适常量．

万有引力定律中的距离 r，是指两个质点之间的距离；对于质量分布均匀的球体，指的是两个球心之间的距离．

根据两个物体之间的万有引力与距离平方成反比的规律，可得物体所受引力与距离之间的关系如图3-2-3所示．

万有引力定律的发现是几代科学家长期探索、研究的结果．牛顿是一个集大成者，他最终给出了在科学上具有划时代意义的万有引力定律．正如牛顿自己所说："如果我曾经看得远一些，那是由于我站在巨人肩膀上的缘故．"

> 你能认出真理，因为它既美又简单．
>
> ——费曼（Richard Feynman）

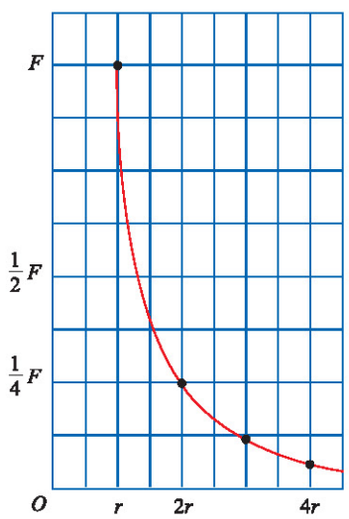


图 3-2-3　两个物体之间万有引力的大小与物体之间距离的关系

引力常量

因为缺少精密测量仪器，牛顿并没有能测定引力常量 G．在牛顿发表万有引力定律 100 多年之后的 1798 年，英国物理学家卡文迪许（Henry Cavendish，1731—1810）首先做了精确的测量．

国际科学联盟理事会科技数据委员会2002年推荐的引力常量数值为 $G = 6.672\,(10) \times 10^{-11}\ \mathrm{N \cdot m^2/kg^2}$，通常可以取 $G = 6.67 \times 10^{-11}\ \mathrm{N \cdot m^2/kg^2}$．

万有引力定律可以用来计算太阳、月亮和星星等任意一对天体之间的引力，也可以用来计算地球上物体之间的引力．例如相距 1 m 的两个质量为 1 kg 的质点之间的引力，大小为 6.67×10^{-11} N，如此微小的引力是很难探测到的．而在质量很大的物体之间，如两个星体，尽管它们距离遥远，引力还是很大的．

微信公众号：电子课本大全

练习与评价

1. 既然任何物体间都存在着引力，为什么当两个人接近时他们不会吸在一起？

2. 在宇宙天体中，大麦哲伦云的质量为太阳质量的 10^{10} 倍，即 2.0×10^{40} kg. 小麦哲伦云的质量为太阳质量的 10^{9} 倍，即 2.0×10^{39} kg. 两者相距 6.6×10^{14} l.y.（光年）. 求两者之间的引力.（1 l.y. $\approx 9.5 \times 10^{15}$ m）

3. 地球质量约为月球质量的 81 倍，一飞行器位于地球与月球之间，当它受到地球和月球的引力的合力为零时，飞行器距地心距离与距月心距离之比为多少？

发展空间

课外阅览

卡文迪许测定引力常量的实验

卡文迪许的实验装置是一个扭秤. 测量的原理如图 3-2-4 所示. 两个质量为 m_1 的小球（铅球，$m_1 = 730$ g）固定在一根轻杆的两端，用一根石英悬丝将轻杆水平地悬挂起来.

测量时，把两个质量为 m_2 的大球（铅球，$m_2 = 158$ kg）放在质量为 m_1 的小球附近. 根据万有引力定律，当大球放在 A 位置时，由于小球受到大球的吸引力，固定小球的轻杆由于受到一个力矩而转动，从而使石英悬丝扭转. 引力力矩最后被悬丝的弹性恢复力矩所平衡. 这时悬丝扭转的角度 θ 可以从一个读尺系统中读出. 为了提高测量的灵敏度，还可将大球放在 B 位置，即向相反方向吸引小球. 这样，两次悬杆平衡位置之间的夹角就增大了一倍. 通过平面镜反射，可以把微小的转动清晰地显示出来，测量的灵敏度又一次得到提高. 卡文迪许的实验是通过测量扭秤偏转角度而得到 G 值的.

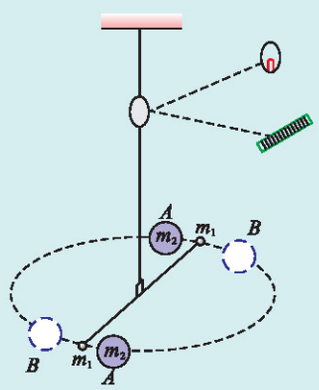


图 3-2-4 卡文迪许测定引力常量的实验原理图

为了使 G 的测量值精确，卡文迪许经过多次实验，设法避免空气不均匀受热引起的漂移等干扰，还进行了其他各种修正.

卡文迪许测定的引力常量数值 $G = 6.745 \times 10^{-11}\ \mathrm{N \cdot m^2/kg^2}$. 这个测量值与现代更精密的测量结果是很接近的.

物理在线

为了验证地面上物体的重力与地球吸引月球、太阳吸引行星的力是同一性质的力，遵守同样的规律，牛顿还做了著名的“月—地”检验. 其基本想法是：如果重力和星体间的引力是同一性质的力，都与距离的二次方成反比关系，那么月球绕地球做近似圆周运动的向心加速度就应该是地面重力加速度的 1/3 600，因为月心到地心的距离是地球半径的 60 倍. 牛顿计算了月球绕地球运动的向心加速度，结果证明他的想法是正确的.

请你查找有关数据，计算一下月球绕地球做圆周运动的向心加速度，看看是否为地面上重力加速度的 1/3 600.

微信公众号：电子课本大全

3 万有引力定律的应用

天体之间的作用力，主要是万有引力．万有引力定律的发现对天文学的发展起到了巨大的推动作用．

一个成功的理论不仅要能解释已知的事实，更重要的是能预言未知的现象．

预言彗星回归

在牛顿之前，彗星的出现被看做是一种神秘的现象，牛顿却断言，行星的运动规律同样适用于彗星．哈雷（Halley）根据牛顿的引力理论，对1682年出现的大彗星（后来命名为哈雷彗星）的轨道运动进行了计算，指出它就是1531年、1607年出现的同一颗彗星，并预言它将于1758年再次出现．1743年，克雷洛（Clairaugh）计算了遥远的行星（木星和土星）对这颗彗星运动规律的影响，指出它将推迟于1759年4月份经过近日点．这个预言果然得到了证实．1986年哈雷彗星又一次临近了地球，下次来访将是在2062年．



图3-3-1　哈雷彗星1986年4月临近地球时的照片

预言未知星体

1781年，人们通过望远镜发现了天王星，经过仔细的观测发现：天王星的运动轨道与由万有引力定律计算出来的轨道之间存在明显的偏差．由此一些人对万有引力定律产生了怀疑，而另一些人则认为可能在天王星附近存在未知天体，偏差是由于未知天体对天王星的引力作用引起的．为了证实后一种猜想，在1843年到1845年间，英国剑桥大学的学生亚当斯、法国年轻的天文爱好者勒维耶同时独立地预言了在天王星轨道之外有一颗当时还未知的行星，并计算了这颗未知星体的质量、轨道和位置．勒维耶将他的计算结果写信告诉了柏林天文台的伽勒．伽勒于1846年9月23日夜间在预定的区域发现了这颗神秘的行星——海王星．它的发现，被认为是牛顿引力理论的伟大胜利．

1930年，汤姆博夫根据海王星自身运动不规则性的记载发现了冥王星，这可以说是前一成就的历史回声．

微信公众号：电子课本大全

计算天体质量

卡文迪许把他自己的实验说成是“称地球的重量”(严格地说应是“测量地球的质量”). 如果已知引力常量G、地球半径R和重力加速度g,我们可以认为地球表面处的物体受到的重力等于地球对物体的万有引力$mg = G\cdot\frac{Mm}{R^2}$,那么就可以计算地球的质量$M=\frac{gR^2}{G}$.

另外,如果已知某行星绕太阳运行的情况,由于其所需的向心力是由太阳对该行星的万有引力提供的,我们可以由此求出太阳的质量.

设太阳的质量为m_S,某个行星的质量为m,它们之间的距离为r,行星公转的周期为T,行星做匀速圆周运动所需的向心力为

$$F = mr\omega^2 = mr\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2$$

行星运动的向心力是由万有引力提供的,所以

$$G\frac{m_S m}{r^2} = mr\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2$$

由此解出

$$m_S = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2}$$

可见,只要测出行星的公转周期T以及它和太阳之间的距离r,就可以计算出太阳的质量.

活动

一些近地轨道的人造地球卫星绕地球的运动可以近似地看做匀速圆周运动,地球对卫星的万有引力为卫星提供了绕地球做圆周运动所需要的向心力. 若我们只知道引力常量$G = 6.67\times10^{-11}\ \mathrm{N\cdot m^2/kg^2}$,卫星绕地球的周期$T=5\,400\ \mathrm{s}$,如何估测地球的平均密度?

微信公众号:电子课本大全

练习与评价

1. 已知引力常量 G 和下列某组数据，就能计算出地球的质量．这组数据是（　　）

A. 地球绕太阳运行的周期及地球与太阳之间的距离

B. 月球绕地球运行的周期及月球与地球之间的距离

C. 人造地球卫星在地面附近绕行的速度及运行周期

D. 若不考虑地球自转，已知地球的半径及重力加速度

2. 太阳光到达地球需要的时间约为 500 s，地球绕太阳运行一周需要的时间约为 365 天，试估算出太阳的质量．（取一位有效数字）

3. 已知海王星的直径为地球的4倍，海王星表面的重力加速度与地球表面的重力加速度大致相等，求海王星的质量．（已知地球半径约为 6 400 km）

4. 登月舱在离月球表面 112 km 的高空环绕月球运行，运行周期为 120.5 min．已知月球半径约为 1.7×10^3 km，试估算月球质量．（不考虑地球对登月舱的作用力）

发展空间

实验室

估测太阳的密度

设太阳的半径为 R，地球到太阳中心的距离 OO'（即地球做圆周运动的轨道半径）为 r，地球做圆周运动的周期为 T．地球上观察太阳的视角为 θ，这时，与观察者眼睛距离为 D、视角为 θ 的物体宽度为 d，如图 3-3-2 所示．根据相似三角形可以近似得到 $\frac{R}{r}=\frac{d/2}{D}$，由此可得太阳密度与相关量之间的关系为 $\rho=\frac{3\pi}{GT^2}\left(\frac{r}{R}\right)^3=\frac{24\pi}{GT^2}\left(\frac{D}{d}\right)^3$，其中 D、d 的值可用仪器测得．

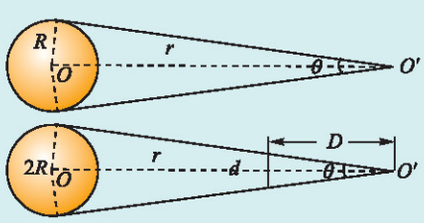


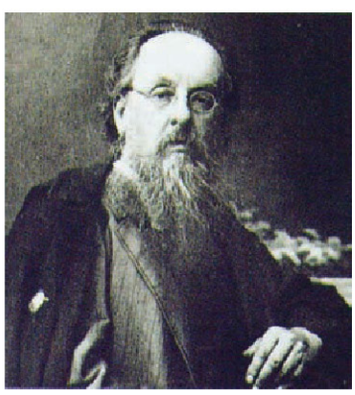
图 3-3-2　观测太阳时的几何关系

由于一般不能用裸眼直接观察太阳，因此，上述观测应如何进行？针对图中 D、d 的值的测量，设计实验方案．这样的测量，可以有几种方法？

微信公众号：电子课本大全

4 人造卫星 宇宙速度

地球的天然卫星是月球，人类应用万有引力定律结合各种先进技术已经逐步进入太空，并登上了月球.



齐奥尔科夫斯基（K.E.Tsiolkovsky，1857—1935）

地球是人类的摇篮，但人类不可能永远被束缚在摇篮里.

——齐奥尔科夫斯基

人造卫星

卫星是一些自然的或人工的在太空中绕行星运动的物体. 早在1895年，俄国宇航先驱齐奥尔科夫斯基在一篇名为《天地幻想和全球引力效应》的论文中，率先提出了制造人造地球卫星的设想.

1957年10月4日，当时的苏联将第一颗人造卫星送入环绕地球的轨道，震惊了全世界. 此后，数以千计的人造卫星、空间站，被相继发射进入轨道，用于通信、导航、收集气象数据和其他许多领域内的科学研究.

宇宙速度

从地球表面发射人造地球卫星，一般使用三级火箭，最后一级火箭脱离时卫星的速度称为发射速度. 使卫星能环绕地球运行所需的最小发射速度叫做**第一宇宙速度**（first cosmic velocity）.



图 3-4-1 航天飞机的发射

如果忽略空气阻力，被发射的人造卫星的质量为m，地球的质量为m_E，人造卫星到地心的距离为r，人造卫星沿圆轨道绕地球飞行的速度为v. 由于这时人造卫星做圆周运动所需的向心力就是地球对它的万有引力，所以

$$\frac{Gm_E m}{r^2}=\frac{mv^2}{r}$$

由此解得

$$v=\sqrt{\frac{Gm_E}{r}}$$

从上式可以知道，卫星距地心越远，它运行的速度越小. 但是，向高轨道发射卫星，火箭克服地球引力所消耗的

微信公众号：电子课本大全

能量就更多，所以发射更困难.

对于靠近地面运行的人造卫星，可以认为此时的 r 近似等于地球的半径 R，所以

$$v_1=\sqrt{\frac{Gm_E}{R}}$$
$$=\sqrt{\frac{6.67\times10^{-11}\times5.98\times10^{24}}{6.37\times10^{6}}}\ \text{m/s}$$
$$\approx 7.9\ \text{km/s}$$

这就是第一宇宙速度.



图 3-4-2　中国“神舟”飞船

活动

第一宇宙速度的另一种表达式为 $v=\sqrt{Rg}$，请你用已学的知识进行推导.

使人造卫星脱离地球的引力束缚，不再绕地球运行，从地球表面发射所需的最小速度叫做**第二宇宙速度**（second cosmic velocity）. 第二宇宙速度为 $v_2=11.2$ km/s.

人造卫星进入地面附近轨道，如果它发射时的初速度大于7.9 km/s，而小于11.2 km/s，它仍将绕地球运转，但这时运动的轨道不再是一个圆，而是偏心率不同的椭圆.

对椭圆而言，偏心率等于焦距的一半与半长轴的比值. 可以看出，偏心率越小，椭圆越趋近于圆.

达到第二宇宙速度的物体还受到太阳的引力束缚，它将绕太阳运转. 使物体脱离太阳的束缚而飞离太阳系，从地球表面发射所需的最小速度，叫做**第三宇宙速度**（third cosmic velocity）. 第三宇宙速度的大小为 16.7 km/s.

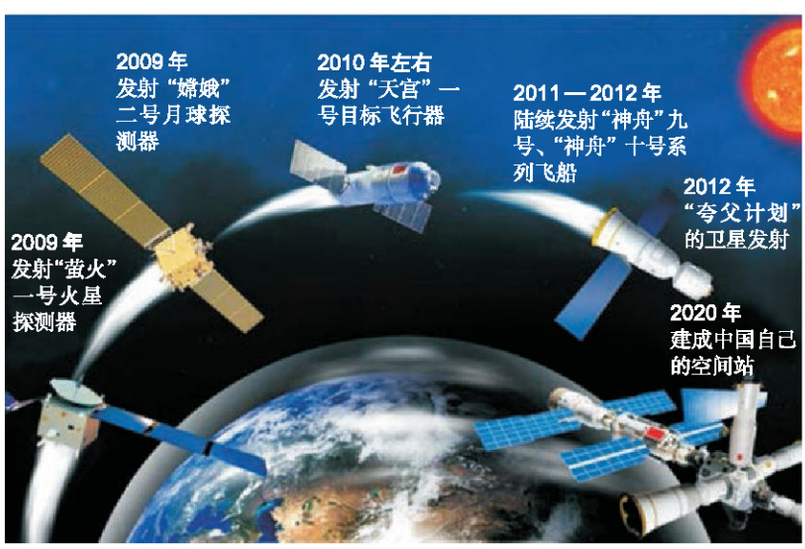
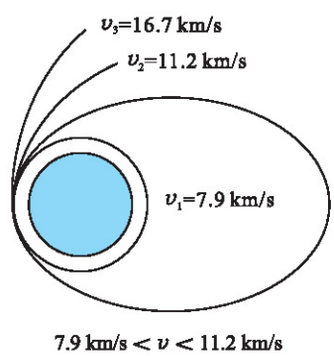


图 3-4-4　中国国家航天计划示意图



$7.9\ \text{km/s} < v < 11.2\ \text{km/s}$

图 3-4-3　三个宇宙速度

微信公众号：电子课本大全

练习与评价

1. 在绕地球做匀速圆周运动的太空实验室内，下列仪器中可正常使用的有（　　）

A. 摆钟　　B. 天平　　C. 弹簧测力计　　D. 秒表

2. 有人根据公式$v=r\omega$认为，人造卫星的轨道半径增大2倍，卫星的速度也增大2倍，但由公式$v=\sqrt{\frac{Gm_E}{r}}$可知，轨道半径增大时，卫星的速度是减小的，应当怎样正确理解这个问题？人造卫星的轨道半径越大，周期越大还是越小？

3. 一位同学根据向心力公式$F=m\frac{v^2}{r}$认为，如果人造卫星的质量不变，当轨道半径增大到2倍时，人造卫星需要的向心力减小为原来的1/2；另一位同学根据卫星的向心力是地球对它的引力，由公式$F=G\frac{m_1m_2}{r^2}$推断，当轨道半径增大到2倍时，人造卫星需要的向心力减小为原来的1/4. 哪位同学的看法对？错了的同学错在哪里？说明理由.

4. 有两颗人造地球卫星，它们的质量之比$m_1:m_2=2:1$，轨道半径之比$r_1:r_2=3:1$，那么，它们所受向心力大小之比$F_1:F_2=$_____；它们的运行速率之比$v_1:v_2=$_____；它们的向心加速度之比$a_1:a_2=$_____；它们的周期之比$T_1:T_2=$_____.

5. 假定一颗人造地球卫星正在离地面1 700 km高空的圆形轨道上运行，它的速率多大？（已知地球半径6 400 km，地球表面处的重力加速度g取10 m/s²）

6. 人造地球卫星绕地球做匀速圆周运动，假如卫星的线速度减小到原来的1/2，卫星仍做匀速圆周运动，则（　　）

A. 卫星的向心加速度减小到原来的1/4　　B. 卫星的角速度减小到原来的1/2

C. 卫星的周期增大到原来的8倍　　D. 卫星的周期增大到原来的2倍

发展空间



课外阅览

地球同步卫星

1984年4月8日，我国成功地发射了一颗地球同步轨道通信卫星. 8天后，该卫星定位于东经125° 的赤道上空，使我国成为少数几个能独立发射地球同步卫星的国家之一.

地球同步轨道卫星是保持在地球赤道的地面上空、运行周期与地球自转周期相等的人造地球卫星.

地球同步轨道卫星的轨道近似于圆形，偏心率不大于0.001，轨道半径约为地球半径的6.6倍，约为42 000 km，离地高度约为35 840 km. 由于其运行周期与地球自转周期相同，卫星运转方向与地球自转方向相同，轨道倾角为零度，轨道平面与赤道平面一致，所以从地面上看来，卫星在赤道上空一定的经度处静止不动. 因此，地球同步轨道卫星又称静止轨道卫星.

要把地球同步卫星发射到规定的高度，发射速度需达到第二宇宙速度的0.96倍，所以发射同步卫星的难度相当大，只要稍有误差，卫星就会飞离地球.

微信公众号：电子课本大全

怎样把卫星发射到同步轨道上去呢？有两种方法，一种是直线发射，由火箭把卫星发射到离地面约36 000 km的赤道上空，然后使它转折飞行而进入轨道；另一种方法是变轨发射，即先把卫星发射到离地面高度为200km～300 km的圆形轨道上，这条轨道叫停泊轨道，当卫星穿过赤道平面时，末级火箭点火工作，使卫星进入一条大的椭圆轨道，其远地点恰好在地球赤道上空约36 000 km处，这条轨道叫转移轨道，当卫星到达远地点时，再开动卫星上的发动机，使之进入同步轨道，也叫静止轨道．第一种发射方法，在整个发射过程中，火箭都处于动力飞行状态，要消耗大量燃料，还必须在赤道上设置发射场，有一定的局限性；第二种发射方法，运载火箭消耗的燃料较少，发射场的位置也不受限制．目前各国发射同步卫星都用第二种方法，但这种方法在操作上和控制上都比较复杂．

卫星在地球同步轨道上定位后，由于受到太阳、月球和其他天体引力作用的影响，会产生不同方向的漂移运动，偏离原来的位置，因此在地球上看到的同步轨道卫星并不是完全静止的．卫星偏离轨道，可以通过卫星的小发动机进行修正，但是由于受到卫星上携带燃料的限制，只在偏离较大时才进行修正．

实验室

了解在人造卫星上进行的失重条件下的实验，在你已有的科学知识范围内（不限于物理学科），设计一套在人造卫星或宇宙飞船上进行失重条件下实验的方案，并说明基本的原理，试试看．

物理在线

请通过互联网了解经典力学对航天技术发展的贡献，收集关于世界与我国航天技术发展的历史和前景的资料，特别是有关我国“神舟”系列飞船载人航天、宇航员太空行走成功及登月计划的资料．

本章小结

1．开普勒行星运动三定律

第一定律：所有的行星围绕太阳运动的轨道都是椭圆，太阳处在所有椭圆的一个焦点上；

第二定律：从太阳到行星的连线在相等的时间内扫过相等的面积；

第三定律：行星轨道半长轴的三次方与公转周期的二次方的比值是一个常量．

2．牛顿在前人工作的基础上，总结出了万有引力定律．万有引力定律的表达式为

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

3．卡文迪许第一个在实验室中测定了引力常量 G 的值，通常取 $G = 6.67 \times 10^{-11}\ \mathrm{N \cdot m^2/kg^2}$．

4．第一宇宙速度 $v_1 = 7.9\ \mathrm{km/s}$．第二宇宙速度 $v_2 = 11.2\ \mathrm{km/s}$．第三宇宙速度 $v_3 = 16.7\ \mathrm{km/s}$．

微信公众号：电子课本大全

习　题

1．一个物体在地球表面所受的引力为 F，则在距地面高度为地球半径的 2 倍时，所受引力为（　　）.

A. $F/2$　　B. $F/3$　　C. $F/4$　　D. $F/9$

2．你受到太阳的引力是多大？和你受到地球的引力比较一下，可得出什么样的结论？已知太阳的质量是 2.0×10^{30} kg，地球到太阳的距离为 1.5×10^{11} m.

3．行星的质量为 m，一个绕它做匀速圆周运动的卫星的轨道半径为 R，周期为 T. 试用两种方法求出卫星在轨道上的向心加速度.

4．若人造卫星绕地球做匀速圆周运动，则离地面越近的卫星（　　）.

A．速度越大　　B．角速度越大

C．向心加速度越大　　D．周期越大

5．某行星的一颗小卫星在半径为 r 的圆轨道上绕该行星运行，运行的周期是 T，已知引力常量 G，求这颗行星的质量 m.

6．某中子星的质量约为 2.0×10^{30} kg，与太阳的质量大致相等，但是它的半径只有 10 km，求：

（1）此中子星表面的重力加速度；

（2）贴近中子星表面，沿圆轨道运动的小卫星的速度.

7．网上消息：某年某月某日，一质量为 100 kg、周期为 1.0 h 的人造环月宇宙飞船发射成功. 一位同学记不住引力常量 G 的数值，手边也没有可查找的资料，但他记得月球半径约为地球半径的 1/4，月球表面重力加速度约为地球的 1/6，经过推理，他认定该消息是则假新闻. 试写出他的论证方案.（地球半径约为 6.4×10^3 km，地球表面的重力加速度为 9.8 m/s^2）

8．简述万有引力定律发现的历史过程.

微信公众号：电子课本大全

第四章

机械能和能源

- 功
- 功率
- 势能
- 动能　动能定理
- 机械能守恒定律
- 能源的开发与利用

宇宙间形形色色的能量赋予世界勃勃的生机和无限的活力，使世界不断地发生运动和变化，时刻呈现出新的景象.



微信公众号：电子课本大全

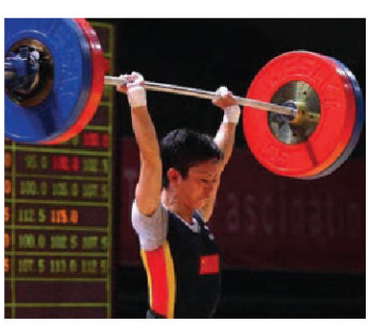
1 功

举重是一个大运动量的体育项目，运动员在举重时要消耗大量的能量.如果想要知道运动员在举起杠铃的过程中消耗的能量，该怎样测量呢?

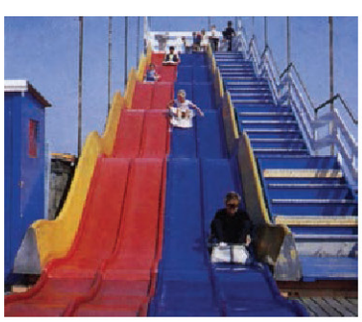
做功与能量的变化

观察思考

观察下面三张图片，回答图中提出的问题.



(a)举起杠铃过程中，什么力对杠铃做功?能量怎样变化



(b)人在下滑时，什么力对人做功?能量怎样变化



(c)箭射出时，什么力对箭做功?能量怎样变化

图 4-1-1　几种不同的做功过程及能量变化

如果物体受到力的作用，并在力的方向上发生了位移，我们就说力对物体做了**功**(work).做功总是与能量的变化密切相关，做功的过程就是能量变化的过程.



图 4-1-2　大狗以斜向上的力拉动小狗

功的计算公式

我们在初中已经学过，当力的方向与物体运动的方向一致时，力对物体做的功可用公式 $W=Fx$ 计算.但许多情况下力的方向与物体运动的方向并不一致，而是存在一个夹角(图 4-1-2).在这种情况下，这个力做的功该怎样计算呢?

微信公众号：电子课本大全

活动

如图 4-1-3 所示，当恒力 F 的方向与物体位移 x 的方向成某一夹角 α 时，如何计算力 F 对物体做的功？

你能否通过对力进行分解来解决这个问题？力的分解有多种不同的方式，你将采用怎样的方式？说出你这样进行分解的依据.

按照你认为可行的方式进行分解，并在图 4-1-3 上作出力的分解图示，你能由此推出功的计算式吗？

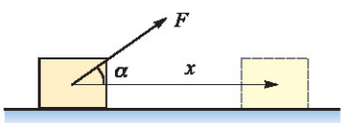


图 4-1-3　力与位移存在夹角的情况

当力 F 的方向与运动方向成某一角度时，可以把力 F 分解为两个分力：跟位移方向一致的分力 $F\cos\alpha$；垂直于位移方向的分力 $F\sin\alpha$. 前一个分力与位移方向一致，所做的功为 $Fx\cos\alpha$；后一个分力与位移方向垂直，没有对物体做功. 因此，图 4-1-3 中恒力对物体所做的功 W 实际上就等于平行于物体位移方向的分力所做的功.

力对物体做的功等于力的大小、位移的大小、力和位移夹角的余弦这三者的乘积，即

$$W = Fx\cos\alpha$$

在国际单位制中，功的单位是**焦耳**，简称**焦**，符号是 J. 1 J 等于 1 N 的力使物体在力的方向上发生了 1 m 的位移所做的功.

$$1\ \mathrm{J} = 1\ \mathrm{N} \times 1\ \mathrm{m} = 1\ \mathrm{N \cdot m}$$

● 功的正负　合力的功

由功的计算公式可知，力对物体做功可能会出现以下几种情况：

当 $0 \leqslant \alpha < 90°$ 时，$\cos\alpha > 0$，$W > 0$，表示力对物体做正功. 人用力拉车向前运动时，人的拉力做正功.

当 $\alpha = 90°$ 时，$\cos\alpha = 0$，$W = 0$，表示力对物体不做功. 在水平地面上运动的物体，物体的重力和地面的支持力都与位移方向垂直，这两个力都不做功.

当 $90° < \alpha \leqslant 180°$ 时，$\cos\alpha < 0$，$W < 0$，表示力对物体做负功，也可以说物体克服这个力做功，如图 4-1-4 所示. 汽车关闭发动机后，在阻力作用下逐渐停下来，阻力对汽

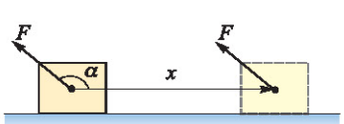


图 4-1-4　力对物体做负功

微信公众号：电子课本大全

车做负功，也可以说汽车克服阻力做功.

活动



图 4-1-5　滑雪运动

如图 4-1-5 所示，质量为 70 kg 的滑雪运动员沿倾角为 30° 的斜坡滑下，已知斜坡表面与滑雪运动员的滑雪板之间的动摩擦因数为 0.05. 试求运动员在下滑 5 m 的过程中，作用在运动员身上的重力、支持力和摩擦力所做的功，以及合力所做的功，填入下表. 其中哪个力做的功为正？哪个力做的功为负？哪个力不做功？并由此谈谈力做正功、负功和不做功的条件，以及功的正负的物理意义. 合力的功与各分力的功之间有怎样的数量关系？

	重力	支持力	摩擦力	合力
力的大小 / N				
功 / J				

功是标量. 功的正负表示所作用的力是动力还是阻力. 动力所做的功为正，阻力所做的功为负.

可以证明，当物体在多个力共同作用下发生一定位移时，合力对物体所做的功等于各分力对物体所做功的代数和.

练习与评价

1. 如图 4-1-6 所示，重为 G 的物体静止在倾角为 α 的粗糙斜面体上，现使斜面体向右做匀速直线运动，位移为 x，则在这个过程中，弹力对物体做功为_____，静摩擦力做功为_____，重力做功为_____，合力做功为_____. 其中合力的功与分力的功之间存在着什么关系？

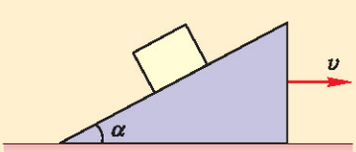


图 4-1-6

2. 试举例说明：

（1）摩擦力可以做正功；

（2）摩擦力可以做负功；

（3）摩擦力可以不做功.

3. 在下列各种情况下，哪些力对物体做正功？哪些力做负功？哪些力不做功？

（1）关闭发动机后，在平直轨道上行驶着的列车；

（2）沿粗糙斜面加速下滑的物体；

（3）在空中匀速落下的雨滴.

4. 甲、乙两人在河的两岸同时用绳拉船，使船在河的中间沿直线路径行驶，甲、乙的拉力分别为 F_1 和 F_2，其大小和方向如图 4-1-7 所示. 在船行驶 80 m 的过程中，用两种方法

微信公众号：电子课本大全

求合力对船所做的功：

（1）先求出合力，再求合力所做的功；

（2）先求出两个分力所做的功，再求两个功的代数和．

比较两种方法计算的结果，你能得出什么结论？

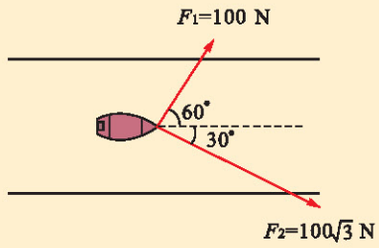


图 4-1-7

2 功　率

人和起重机向同一艘船上搬运同样数量的物品，做了相同的功，起重机所用的时间比人所用的时间少得多．这说明起重机比人做功快得多．用什么物理量来描述物体（或机器）做功的快慢呢？



图 4-2-1　起重机向船上搬运物品

功率的含义

不同的物体做相同的功，所用时间往往不同．做相同的功，用时少，表示做功快；用时多，表示做功慢．在相同时间内，有的物体做的功多，有的物体做的功少；也是由于做功的快慢不同．在物理学中，我们用功率 P 来表示做功的快慢．力对物体所做的功 W 与做功所用时间 t 的比值叫做**功率**（power），即

$$P=\frac{W}{t}$$

在国际单位制中，功率的单位是**瓦特**，简称**瓦**，符号为 W．1s 内完成 1J 的功，功率就是 1W．1W = 1 J/s．瓦这个单位比较小，技术上常用千瓦（kW）作功率的单位．1kW = 1 000W．

机器工作时，外界对机器做功的功率叫**输入功率**，机器对外界做功的功率叫**输出功率**．机器的机械效率

$$\eta=\frac{P_{输出}}{P_{输入}}$$

讨论交流

上楼时，无论你是慢步走上，还是快步跑上，只要你

微信公众号：电子课本大全

上升的高度相同，你克服重力所做的功就相等，但为什么快步上楼时人会气喘吁吁，而慢步上楼却不会？老年人上楼为什么比年轻人上楼要慢些？

从能量转化的角度看，许多机器实际上都是能量转化器．机器的功率越大，能量转化得越快．由于各种机器在一定的时间内能够转化的能量是有限的，各种机器都有一个长时间正常工作允许的功率，叫做**额定功率**．例如，某汽车内燃机的额定功率是 100 kW，但在平直公路上行驶时发动机的实际输出功率只有 25 kW 左右，而在越过障碍时，实际输出功率会大于额定功率．实际运行的功率可以小于或等于额定功率，而不允许长时间超过额定功率．人和牲畜做功也有一定的功率，长时间超过一定的功率对外做功，人和牲畜的身体就会受到损伤．



（a）人长时间做功时，功率约 70 W



（b）马长时间做功时，功率约 450 W



（c）大客车的额定功率约 100 kW

图 4-2-2　功率不同的几种情况

● 功率、力和速度之间的关系

有一种装有换速挡的自行车（图 4-2-3），当在坡度较大的坡道上向上行驶时，通常需要将它调到低速挡．这样做的理由是什么？这个问题涉及功率、力和速度三者之间的关系．



图 4-2-3　变速自行车

当作用力的方向与物体位移的方向相同，即夹角 $\alpha=0$ 时，$W=Fx$．将此式代入公式 $P=\frac{W}{t}$ 中，再利用公式 $v=\frac{x}{t}$，可得到功率 P 与力 F、物体运动速度 v 的关系式

$$P=Fv$$

当物体做变速运动时，若式中的 v 为某段时间内的平均速度，则 P 表示该段时间内的**平均功率**；若 v 为某一时刻的瞬时速度，则 P 表示该时刻的**瞬时功率**．

微信公众号：电子课本大全

讨论交流

1. 人沿盘山公路往上骑车的速度通常要比在水平路面上慢些，试用公式 $P=Fv$ 解释这一现象.

2. 汽车上坡时，司机常会加大油门和降低速度，这样做的目的是什么？

3. 小轿车行驶时受到的阻力要比一般的大卡车小得多，但有的小轿车的功率反而比大卡车大，为什么？

若力 F 的方向与速度 v 的方向夹角为 α，则功率、力和速度的关系式为 $P=Fv\cos\alpha$.



图 4-2-4　赛车出发，将做一段时间的加速运动

【例题】汽车从车站开出时，总要有一段加速运动. 试问能否让汽车一直保持加速运动，使汽车的速度无限增大？为什么？

【解】设汽车的功率为 P，行驶时受到的阻力为 f，根据关系式 $P=Fv$ 可知，汽车的牵引力

$$F=\frac{P}{v}$$

根据牛顿第二定律可知，汽车的加速度为

$$a=\frac{F_{合}}{m}=\frac{F-f}{m}=\frac{\frac{P}{v}-f}{m}$$

汽车起动时，通过加大油门可以使功率 P 逐渐增大，但功率的增大受到额定功率的限制. 当汽车保持额定功率行驶时，加速度 a 将随着速度 v 的增大而减小（此时速度仍然在增大）；当速度增至 $v_{max}=\frac{P}{f}$ 时，加速度将减至零，此后，汽车的速度将不再增大.

练习与评价

1. 起重机沿竖直方向匀速吊起重物（图 4-2-5），第一次以速度 v 起吊，第二次以速度 $2v$ 起吊，两次吊起的货物等重. 则两次起吊货物相比，起重机的牵引力有什么变化？起重机的功率有什么变化？

2. 汽车满载时的最大行驶速度为什么比空载时的最大行驶速度小一些？

3. 拖拉机的输出功率是 2.72×10^4 W，已知拖拉机的三挡速度分别为 36 km/h、46 km/h 和 54 km/h. 则拖拉机在采用这三挡速度行驶时的牵引力各为多大？

4. 体重为 750 N 的短跑运动员，如果要在 2 s 内匀加速地达到 10 m/s 的速度，求他在这 2 s 内的平均功率和 2 s 末的瞬时功率.



图 4-2-5　起重机起吊货物

微信公众号：电子课本大全

发展空间

估测“引体向上”的平均功率

如图 4-2-6 所示，做一次“引体向上”，使你的整个身体升高约一个手臂的高度，估测这个过程中你克服重力所做的功及其平均功率.



图 4-2-6 引体向上

3 势 能

重力势能

高处有一块巨大的石头摇摇欲坠（图 4-3-2），在它的下面你可能会感到胆怯. 这是因为高处的石头蕴涵着一种能量，当它下落时会将这种能量释放出来，可能对你造成伤害. 物体由于位于高处而具有的能量叫做**重力势能**（gravitational potential energy）. 如果物体要由较低处上升到较高处，必须克服重力做功，这时物体的重力势能就会增加.



图 4-3-1 吊起的重物具有重力势能



图 4-3-2 高处的石头具有重力势能

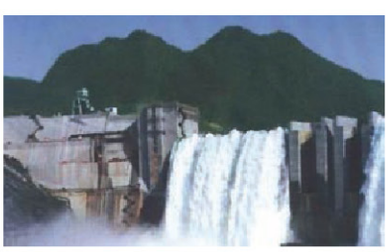


图 4-3-3 被拦在高处的水具有重力势能

我们在初中的学习中已经知道，重力势能的大小跟物体的质量和所在的高度都有关. 为了得到重力势能的计算公式，我们先看看重力做功的特点.

讨论交流

设想你要从某座高楼的第 17 层下到第 8 层，你可以

微信公众号：电子课本大全

乘电梯下，也可以沿楼梯走下（图4-3-4）. 两种方式下楼，重力对你做的功是否相等？

这个问题可以归结为一个新的问题：重力做功跟物体运动的路径是否有关？

如图 4-3-5，物体从位置 A 沿两条路径移到位置 B：沿直线路径 AB；沿折线路径 ACB. 比较物体沿两条路径移动时，重力对物体做功的大小.

通过比较，你能得出什么结论？

需要指出的是，你的结论只是在较为特殊的情况下得出的. 在一般情况下，若物体从位置 A 沿曲线路径 APB 移至位置 B，结论又是如何呢？建议你将曲线分割成一个个小段进行分析，每一小段曲线都可看成直线段.



图 4-3-4　两种方式下楼

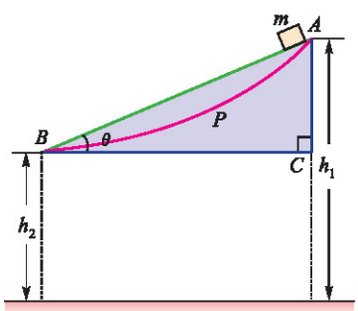


图 4-3-5　研究重力做功与路径的关系. 其中 AC 是竖直线，BC 是水平线

重力对物体做的功跟路径无关，仅由物体的质量和始、末两个位置的高度决定，即

$$W_G = mgh_1 - mgh_2$$

式中 h_1、h_2 分别代表始、末两个位置的高度.

从能量转化的角度看，力对物体做了多少功，就有多少能量发生了变化. 可以发现，上式左边的 W_G 是重力做的功，所以右边的 mgh_1 和 mgh_2 应当是物体的某种能量. 这种能量由物体的质量和所在的高度决定，它就是物体的重力势能，用 E_p 表示，即

$$E_p = mgh$$

物体的重力势能等于物体受到的重力和它的高度的乘积. 重力势能是标量. 它的单位和功的单位相同，在国际单位制中都是焦耳. $1\ \mathrm{kg \cdot m \cdot s^{-2} \cdot m} = 1\ \mathrm{N \cdot m} = 1\ \mathrm{J}$.

一个物体的重力势能与位置有关，在计算重力势能时，应先选取一个水平面为参考平面. 这样，这个物体相对参考平面的位置就确定了. 在参考平面上，物体的重力势能为零；在参考平面的上方，物体的重力势能为正；在参考平面的下方，物体的重力势能为负（如图 4-3-6）.



图 4-3-6　在双层列车上，以上层地板作为参考平面，则上层旅客具有正的重力势能，下层旅客具有负的重力势能

重力势能为负值表示物体在这个位置具有的重力势能比在参考平面上具有的重力势能小.

选择不同的参考平面，物体的重力势能的数值就不相同，即物体的势能是相对的，但物体在两个不同位置之间势能的差值是确定的，并不随参考平面的改变而改变.

微信公众号：电子课本大全

讨论交流

重力对物体做功，物体的重力势能会发生变化吗？怎样变化？

弹性势能



图 4-3-7　机械钟内的弹簧片（发条）

你见过机械钟的内部机构（图 4-3-7）吗？机械钟内的发条卷紧后会积蓄一种能量，当发条放松过程中，它会释放出这种能量，从而带动齿轮和指针转动，对外做功.

如图 4-3-8 所示，小球与墙壁间夹有一个轻质弹簧. 用力将球向左推，使弹簧压缩. 松手后，弹簧会将小球弹出. 可见，被压缩的弹簧具有一定的能量.

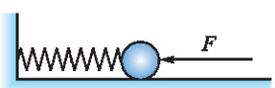


图 4-3-8　被压缩的弹簧具有势能

物体由于发生弹性形变而具有的能量叫做**弹性势能**（elastic potential energy）. 物体的形变越大，弹性势能越大. 重力势能和弹性势能都是**势能**（potential energy）的一种类型.

势能是系统所共有的



图 4-3-9　重力势能是飞机和地球所共有的

应该注意，不论重力势能还是弹性势能，都不是物体单独所有，而是系统所有.

对于重力势能来说，物体处于不同高度，它的重力势能就不同. 若没有地球，物体不受重力，就谈不上重力势能. 所以，重力势能是地球与受重力作用的物体组成的系统所共有的.

与重力势能一样，弹性势能也是弹力装置与受弹力作用的物体组成的系统所共有的.

练习与评价

1. 一架总质量为 200 t 的波音客机，在升高 2.5 km 的过程中，客机克服重力做了多少功？重力势能变化了多少？（g 取 10 m/s²）

2. 滑雪运动员沿斜坡下滑了一段距离，重力对他做功为 2 000 J，他克服阻力做功 100 J. 他的重力势能（　　）

A. 减小了 2 000 J　　B. 减小了 2 100 J

C. 增加了 2 000 J　　D. 减小了 1 900 J

微信公众号：电子课本大全

3. 关于重力势能，以下说法中正确的是（　　）

A. 某个物体处于某个位置，重力势能的大小是唯一确定的

B. 重力势能为 0 的物体，不可能对别的物体做功

C. 物体做匀速直线运动时，重力势能一定不变

D. 只要重力做功，重力势能一定变化



图 4-3-10　弹簧门

4. 如图 4-3-10 所示是弹簧门的一角，依靠弹簧形变后储存的弹性势能能够自动将打开的门关闭. 当将弹簧门打开时，弹簧的弹力对门做 _____ 功，弹性势能 _____；当弹簧门关闭时，弹簧的弹力对门做 _____ 功，弹性势能 _____.

发展空间

估测人在水平路面上行走时克服重力做功的功率

在水平路面上行走要克服重力做功吗？其实人只要走路，其重心就一定会发生上下位置的变化，重心升高就需要克服重力做功. 在行走过程中，当身体的重力作用线通过你着地的一只脚的底面时，你的重心最高；当你跨出一步双脚同时着地时，你的重心最低. 量一量你的腿有多长，再根据步距，就能够粗略估计出你跨出一步重心的高度会变化多少. 请你在操场的跑道上按你平常的速度行走 50 m 或 100 m，设法计算出你每跨出一步重力势能的变化，并估测出你克服重力所做的功和功率，记录你实验中测量物理量的数值和计算的结果. 当然这种功是无用的，走路时上下颠簸得越厉害，消耗的无用功也就越多，想想竞走运动员比赛时的身体姿势吧！

4 动能　动能定理

动能

汹涌的波涛能冲决堤岸，龙卷风能拔起大树. 这些都说明运动的物体可以做功，运动的物体也具有能量. 物理学中把物体由于运动而具有的能量叫做**动能**（kinetic energy）.



（a）惊涛拍岸



（b）龙卷风

图 4-4-1　与动能有关的现象

微信公众号：电子课本大全

人类早就利用风的动能推动帆船前进，利用水的动能驱动水车，现在我们能更有效地利用风和水流的动能来发电．那么物体动能的大小跟哪些因素有关呢？

在初中时我们已经知道，物体动能的大小跟物体的质量、速度都有关．那么，能否得到一个简单的公式，来计算物体的动能呢？

设一个物体的质量为 m，在沿运动方向的恒力 F（合外力）的作用下发生了一段位移 x，速度由 v_1 增大到 v_2，如图 4-4-2 所示．这个过程中，力 F 做的功 $W=Fx$．根据牛顿第二定律 $F=ma$ 和匀加速运动公式 $v_2^2-v_1^2=2ax$，可得

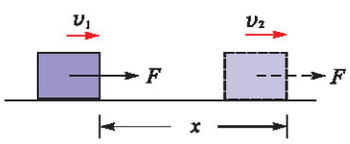


图 4-4-2　做功与动能的改变

$$W=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2$$

根据功与能量变化的关系，上式左边的 W 是合外力所做的功，所以，右边的 $\frac{1}{2}mv_1^2$ 和 $\frac{1}{2}mv_2^2$ 应当是物体在初、末两个状态的某种能量，这种能量跟物体的质量和速度大小直接相关，它就是物体的动能，用 E_k 表示，即

$$E_k=\frac{1}{2}mv^2$$

物体的动能等于物体质量与物体速度大小的二次方的乘积的一半．动能是标量，它的单位与功的单位相同．在国际单位制中都是焦耳．$1\ \mathrm{J}=1\ \mathrm{kg\cdot m^2\cdot s^{-2}}$．

合外力做功和物体动能的变化

用 E_{k1} 表示物体的初动能 $\frac{1}{2}mv_1^2$，用 E_{k2} 表示物体的末动能 $\frac{1}{2}mv_2^2$，于是合外力的功与动能变化的关系式

$$W=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2$$

可以表示为

$$W=E_{k2}-E_{k1}$$

用 ΔE_k 表示动能的改变量（$E_{k2}-E_{k1}$），则

$$W=\Delta E_k$$

通过实验，我们也可以验证这个关系式．

微信公众号：电子课本大全

活动

研究合外力做功和动能变化的关系

为了研究合外力做功和动能变化的关系，我们不妨借用在必修1的“探究a与F、m之间的定量关系”实验中所打出的纸带及拉力F与小车质量m的数据，量出起始点至各计数点的距离，计算小车在打下各计数点时的瞬时速度，进而计算出小车运动到打下各计数点过程中合外力对它做的功W以及所增加的动能ΔE_k，看看它们是否相等.

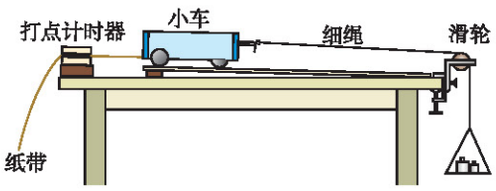


图4-4-3　探究加速度与力、质量关系的实验装置

图4-4-4是实验得到的一条纸带，起始点O至各计数点A、B、C、D、E、F、G的距离依次为15.50 cm、21.60 cm、28.61 cm、36.70 cm、45.75 cm、55.75 cm、66.77 cm，相邻计数点间的时间间隔为0.1 s. 实验时小车所受拉力F为0.2 N，小车的质量m为200 g. 计算合外力所做的功和小车动能的变化，填入表格. 根据计算结果可得出什么结论?

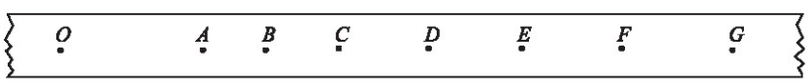


图4-4-4　实验打出的纸带

	$O—B$	$O—C$	$O—D$	$O—E$	$O—F$
W/J					
ΔE_k/J					

分析上述数据，可以得到合外力所做功W与物体动能的改变量ΔE_k之间的关系是

$$W = \Delta E_k$$

这与理论推导的结果是一致的. 它表明：**合外力所做的功等于物体动能的变化**. 这一关系称为**动能定理**（theorem of kinetic energy）. 从式中可以看出，当合外力对物体做正功时，末动能大于初动能，物体的动能增大，汽车的启动过程就是这种情况. 当合外力对物体做负功或者说物体克服合外力做功时，末动能小于初动能，物体的动能减小，汽车的刹车过程就是这种情况.

讨论交流

1. 利用动能定理$W = E_{k2} - E_{k1}$，说明合外力所做的

微信公众号：电子课本大全

功的正负与物体动能变化的关系.

2. 动能定理为我们计算力所做的功提供了新的方法. 用 $W=E_{k2}-E_{k1}$ 计算功和用 $W=Fx\cos\alpha$ 计算功有什么不同?

动能定理的应用

在前面的分析中,动能定理是在物体受恒力的作用,并且做直线运动的情况下得到的. 可以证明, 当物体受变力作用或做曲线运动时, 动能定理同样适用. 利用动能定理, 我们能够方便地解释生活中的一些现象, 解决生产中的一些问题.



图 4-4-5 在航空母舰上, 飞机的起飞跑道只有 80m ~ 90 m, 仅靠飞机自身的动力无法获得足够的速度实现起飞. 航空母舰利用弹射器对飞机做功, 可以使飞机更快地加速, 从而使飞机在短距离内获得起飞所需的速度飞向天空



图4-4-6 赛车需要在短时间内起动, 并且要达到300 km/h以上的速度. 发动机要在短时间内对车做很多功



图 4-4-7 在繁忙的高速公路上, 为防止意外, 就要求那些开得较快的车辆前方应当留有更长的制动距离, 以防止与前面的车辆相撞

【例题】为了安全, 在公路上行驶的汽车间应保持必要的距离. 已知某高速公路的最高限速 v_{max}=120 km/h, 假设前方车辆突然停止, 后车司机发现这一情况, 从发现情况到进行制动操作, 汽车通过的位移为 17 m, 制动时汽车受到的阻力为其重力的0.5倍, 该高速公路上汽车间的距离至少应为多大? (g 取 10 m/s^2)

【解】制动时, 路面阻力对汽车做负功

$$W=-0.5mgx,$$

汽车的动能减小直至为零. 据动能定理 $W=\Delta E_k$, 有

$$-0.5mgx=0-\frac{1}{2}mv_{max}^2$$

可得汽车制动后的滑行距离为

微信公众号: 电子课本大全

$$x=\frac{v_{max}^2}{2\times0.5g}=\frac{(120/3.6)^2}{2\times0.5\times10}\,\mathrm{m}\approx111\,\mathrm{m}$$

该高速公路上汽车之间的距离至少是

$$x_{总}=x+x'=(111+17)\,\mathrm{m}=128\,\mathrm{m}$$

练习与评价

1. 1970年4月24日，我国第一颗人造卫星——“东方红”1号（图4-4-8）发射成功，这颗卫星的质量为173 kg，设卫星以第一宇宙速度发射升空，则发射时它的动能为多少？

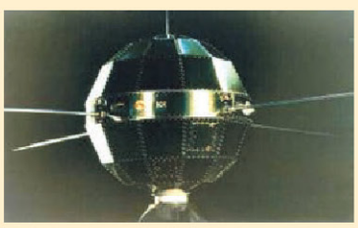


图4-4-8　“东方红”1号

2. 用子弹射穿一块钢板，需要做8×10^3 J的功．一颗质量为0.15 g的子弹以500 m/s的速度射中这块钢板时，能不能把这块钢板射穿？

3. 质量为8 t的卡车正以54 km/h的速度行驶，司机突然发现前方有一个障碍物，于是立即制动．已知制动时障碍物离卡车的距离为35 m，卡车受到的阻力为3×10^4 N，问制动后卡车会不会撞到障碍物上？

4. 质量为4 t的卡车，由静止出发在水平公路上行驶100 m后速度增大到54 km/h．若发动机的牵引力为5×10^3 N不变．

（1）牵引力做了多少功？

（2）卡车动能增加了多少？

（3）卡车克服阻力做了多少功？

5. 在航空母舰上有一架飞机，质量为1.5×10^4 kg，在飞机发动机的动力和弹射器的压力的共同作用下，在短短的85 m距离内，速度由零增大到252 km/h．在这个过程中，合外力对飞机做了多少功？飞机受到的平均合外力多大？

发展空间

估测手上抛石块所做的功

将一个物体向上抛出（图4-4-9），如果忽略空气阻力，物体向上运动到最高点的时间与从最高点落回到抛出点经历的时间相等．用一架天平和一只停表，通过实验估测用手急速竖直向上抛小石块时，手对石块所做的功．



图4-4-9　上抛石块

微信公众号：电子课本大全

5 机械能守恒定律

动能和势能的转化规律

自行车下坡时，你虽然没有蹬车，但随着车的位置下降，车的速率将逐渐增大. 从能量的观点来看，当车的势能减小时，动能将会增大，即自行车的动能和势能会相互转化. 动能和势能的相互转化是否存在某种定量的关系，遵循什么规律呢?



（a）荡秋千



（b）撑竿跳高

图 4-5-1　动能和势能转化的实例

观察思考

仔细观察如图 4-5-1（a）、（b）所示的物理过程，并分析这些过程中动能和势能的转化.

实验探究

将螺母用细线挂在铁架台上，往后拉螺母使细线与竖直方向约成45°角，测量一下螺母此时所处的高度. 放开手，让它摆起来，观察它摆到另一边时能到达多高的位置.

如图 4-5-2 所示，在铁架台上再夹上一个夹子，当螺母摆动到最低点时，细线将会被下面的夹子挡住. 重复上述实验，看看这种情况下，螺母摆到另一边时能够摆多高.

你敢不敢再做下去：保持你的头部不动，请另一位同学将螺母拉到你的鼻尖处再放手，看下次螺母会不会撞到鼻尖上.

上述实验现象说明了什么?



图 4-5-2　研究动能和势能的转化

理论探究

如图4-5-3，设想质量为m的物体在空中做抛体运动，在高度为h_1的A处速度为v_1，在高度为h_2的B处速度为v_2.

1. 写出物体在位置A、B所具有的机械能：

E_A=_____;

E_B=_____.

2. 你能用学过的知识证明以上两个位置机械能的数量

微信公众号：电子课本大全

关系吗？试写出证明过程.

3. 在以上运动过程中，什么力在做功？

大量事实表明，**在只有重力或弹力做功的物体系统内，动能和势能会发生相互转化，但机械能的总量保持不变**，这称为**机械能守恒定律**（law of conservation of mechanical energy）. 写成数学表达式，即

$$E_{p1}+E_{k1}=E_{p2}+E_{k2}$$

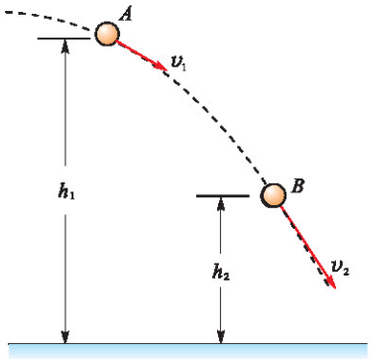


图4-5-3　抛体运动中物体的机械能转化

机械能守恒定律的应用

机械能守恒定律是力学中的一条重要规律，利用这一规律，可以方便地解决生活和生产中的许多问题.

活动

如图 4-5-4 所示，将小球从距斜轨底面 h 高处释放，使其沿竖直的圆形轨道（半径为 R）的内侧运动.

1. 若 $h<R$，小球能否通过圆形轨道最高点，为什么？

2. 若 $h=2R$，小球能否通过圆形轨道最高点，为什么？

3. 若 $h>2R$，小球能否一定通过圆形轨道最高点，为什么？

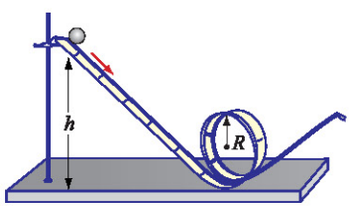


图 4-5-4　小球从斜轨上滚下

【例题】如图 4-5-5 所示是上海“明珠线”某轻轨车站的设计方案，与站台连接的轨道有一个小坡度，电车进站时要上坡，出站时要下坡. 如果坡高 2 m，电车到 a 点时速度是 25.2 km/h，此后便切断电动机的电源，不考虑电车所受的摩擦力.

（1）电车能否冲上站台 bc？

（2）如果能冲上，它到达 b 点时的速度是多大？（g 取 10 m/s²）

你知道站台做成这样一个小坡有什么好处吗？

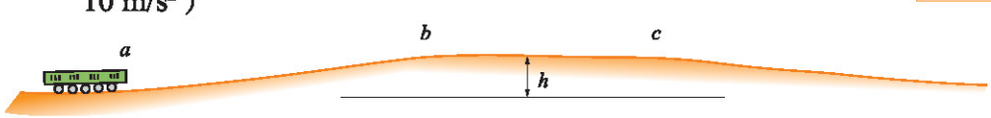


图 4-5-5　电车进站

【解】（1）取 a 点所在的水平面为重力势能的参考平面，电车在 a 点的机械能为

$$E_1=E_{k1}=\frac{1}{2}mv_1^2$$

式中 $v_1=25.2\ \text{km/h}=7\ \text{m/s}$.

微信公众号：电子课本大全

将这些动能全部转化为势能，根据机械能守恒定律，有

$$mgh' = \frac{1}{2}mv_1^2$$

$$h' = \frac{v_1^2}{2g} = \frac{7^2}{2\times10}\,\mathrm{m} = 2.45\,\mathrm{m}$$

因为 $h' > h$，所以，电车能够冲上站台．

（2）设电车到达 b 点时的速度为 v_2，据机械能守恒定律，可列出

$$\frac{1}{2}mv_1^2 = mgh + \frac{1}{2}mv_2^2$$

所以

$$v_2 = \sqrt{v_1^2 - 2gh} = \sqrt{7^2 - 2\times10\times2}\,\mathrm{m/s} = 3\,\mathrm{m/s}$$

电车到达 b 点时的速度是 3m/s．

运用机械能守恒定律解题时，我们不需要弄清斜坡的具体形状，也不需要了解电车沿斜坡运动的具体过程，这正是运用机械能守恒定律解题的优越性．

学生实验：验证机械能守恒定律

实验原理

我们采用如图4-5-6所示的实验装置，在物体自由下落的过程中，如果空气阻力和纸带受到的摩擦力可以忽略不计，则物体的机械能守恒，即系统机械能的总量应保持不变．

若以重物下落的起始点 O（静止点）为基准，设重物的质量为 m，测出物体自起始点 O 下落距离 h 时的速度 v，在误差允许范围内，由计算得出

$$\frac{1}{2}mv^2 + mgh = 0$$

则机械能守恒定律得到验证．

若以重物下落过程中的某一点 A 为基准，设重物的质量为 m，测出物体对应于 A 点的速度 v_A，再测出物体由 A 点下落 Δh 后经过 B 点的速度 v_B，在误差允许范围内，由计算得出

$$\frac{1}{2}mv_B^2 - \frac{1}{2}mv_A^2 = mg\Delta h$$

则机械能守恒定律得到验证．

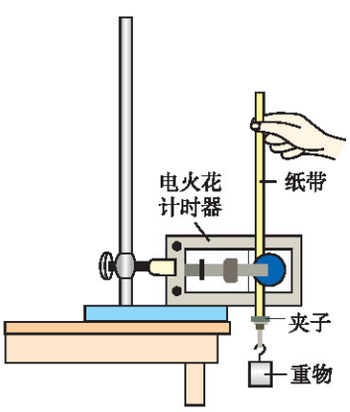


图 4-5-6

实验过程

按图4-5-6所示的装置装配好实验器材，再接通电源，松开纸带，让重物自由下落，计时器在纸带上打下一系列点．

微信公众号：电子课本大全

在点迹清晰的纸带上，沿着物体下落的方向，依次取若干个连续的点，并标记为0、1、2、3…（图4-5-7）. 以某一点为计算重力势能的参考点，量出各点到参考点的距离 h_1、h_2、h_3…（注意 h 取值的正负）.

对于匀变速直线运动，时间 t 内的平均速度等于该段时间中点 $\frac{t}{2}$ 时刻的瞬时速度. 根据这个结论，计算出纸带上1、2、3…各点对应的瞬时速度 v_1、v_2、v_3….

设计实验数据表格，将测量和计算的数据记录在表格中，看看你的实验是否能验证机械能守恒定律.

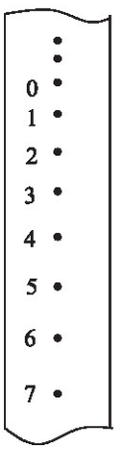


图4-5-7　在纸带上选取若干点

讨论交流

请分析以上实验的误差来源.

练习与评价

1. 下列叙述中正确的是（　　）

A. 做匀速直线运动的物体机械能一定守恒

B. 做匀速直线运动的物体机械能可能不守恒

C. 外力对物体做功为零，物体的机械能一定守恒

D. 系统内只有重力和弹力做功时，系统的机械能一定守恒

2. 一个人站在阳台上，以相同的速率分别把三个球竖直向上抛出、竖直向下抛出、水平抛出，不计空气阻力，则三个球落地时的速率（　　）

A. 上抛球最大　　B. 下抛球最大

C. 平抛球最大　　D. 三个球一样大

3. 以20 m/s的速度将一物体竖直上抛，若忽略空气阻力，g 取10 m/s²，试求：

（1）物体上升的最大高度；

（2）以水平地面为参考平面，物体在上升过程中重力势能和动能相等的位置.

4. 质量为30 kg的小孩荡秋千，运动过程中偏离竖直线的最大角度为60°，绳子承受的最大拉力为多少？（不计空气阻力）

发展空间

实验室

有一种能伸缩的圆珠笔，其内装有一根小弹簧，尾部有一个小帽，压一下小帽，笔尖就伸出. 使笔的尾部朝下，如图4-5-8所示，将笔向下按，使小帽缩进. 然后放手，可见笔将向上弹起至一定的高度. 请你用这样的实验，粗测压笔的小帽时其内部弹簧弹性势能的增加量.

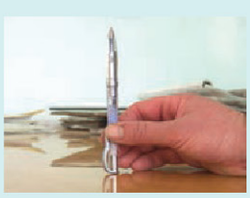


图4-5-8　尾部装有弹簧的圆珠笔

微信公众号：电子课本大全

6 能源的开发与利用

能量守恒定律

讨论交流

运动员投掷标枪使其做斜抛运动的全过程可分为三个阶段：（1）投掷出手；（2）上升到最高处；（3）下落到地面．分析三个阶段过程中哪些力做功及能量如何转化．

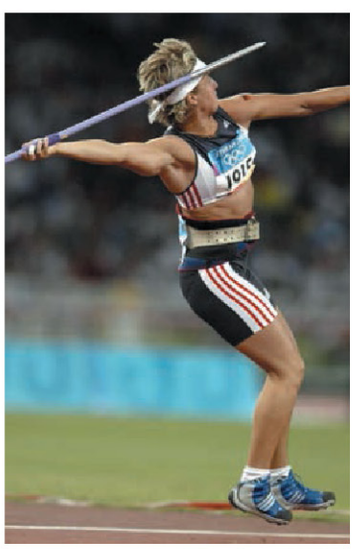


图 4-6-1　投掷标枪

食物具有化学能，我们的身体把这种化学能转化成为维持生命所必须的内能和人体运动的机械能，投掷标枪就是人体的化学能转化为标枪的机械能．风力发电站靠流动的空气推动风力发电机做功，把风能转化为电能．水电站是把高处水的重力势能转化为动能，推动水轮机转动，再带动发电机发电．家庭的用电器又把电能转化为光能（电灯）、内能（热水器）、机械能（洗衣机）．大自然中煤、石油、天然气等物质燃烧时，它们的化学能又转化为光能、内能和机械能．地球表面的绿色植物通过光合作用，将太阳能转化为化学能……

大量的实验和研究都证明，自然界任何形式的能量在转移和转化的过程中，都要遵循具有普遍意义的**能量守恒定律**（law of conservation of energy）．这条定律以这样的方式来表述：

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另一种形式，或者从一个物体转移到另一个物体，在转化或转移的过程中其总量保持不变．

历史上，科学家们一直在关注、研究各种不同的自然现象之间能量变化的普遍联系，其中包括力与热、电与热、电与磁等联系．直到 1847 年德国物理学家亥姆霍兹在理论上概括和总结了能量守恒定律．能量守恒定律的建立，是人类认识自然的一次重大飞跃．它是自然界中最重要、最普遍的规律之一．

微信公众号：电子课本大全

能源的利用

能量守恒定律也是能源利用的基础．所谓能源是指能够提供某种形式能量的物质资源．人类最先使用的能源是人的体能以及畜力、风力、水力等．随着生产和科学技术的发展，人类逐步扩大了能源的利用范围，旧的能源不断地被新的能源所取代．



柴草时期：从火的发现到18世纪，人们用树枝、杂草等做燃料，以取暖、烧饭、照明等．在这一时期，人们同时还利用畜力、风力、水力等能源．



煤炭时期：以蒸汽机为主的动力机械所带动的18世纪的产业革命，产生了对热值高又便于运输的煤的大量需求．煤的大规模开采和利用是人类历史上的第一次能源革命．



石油时期：内燃机发明后逐步地取代了蒸汽机，这就要求有新的燃料与之相适应．石油和天然气的热值比煤高，而且对环境的污染比煤小，20世纪60年代开始，人类对石油和天然气的消费量超过了煤炭，这是人类历史上的第二次能源革命．

图 4-6-2　人类利用能源的历史

能源与人类的关系十分密切，能源利用方式的改进极大地提高了劳动生产率，给人类的生活带来了极大的改善．人类社会每一次重大的经济飞跃和产业革命，都与新的能源和动力装置的利用密切相关．例如，煤炭的利用和蒸汽机的诞生引起了产业革命；1973年的世界性石油危机促使日本工业从高能耗的资本密集型向低能耗的知识密集型转移．一般来说，一个国家的经济越发达，能源的使用量就越

微信公众号：电子课本大全

大．占世界人口总数约 20% 的发达国家所消耗的能源约占世界能源消耗量的 66%．能源消耗的多少已经成为一个国家或地区经济发展水平的重要标志之一．

由于煤、石油和天然气都是几亿年以前的生物遗体形成的，所以人们也称它们为化石燃料．由于这些能源不能再次生成，也不可能重复使用，所以又称为非再生能源．地球上的煤炭、石油和天然气并不是取之不尽、用之不竭的．据研究人员估计，按照目前的开采速度，地球上的石油和天然气储藏将在几十年内全部采完；地球上的煤炭也只能开采 300 年左右．

与非再生能源相对的是再生能源．再生能源消耗一些后，能在较短的时期内再产生，再出现，得到不断的补充．

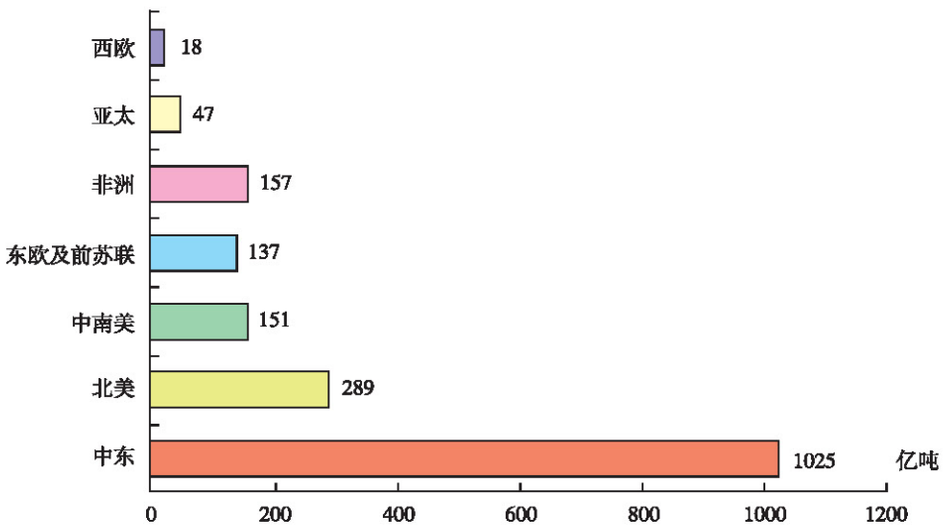


图 4-6-3　2007 年世界石油剩余探明储量分布图

能源的大量使用（特别是化石燃料的利用）引起了环境问题．例如，煤的燃烧虽然可供火力发电站发电和为家庭供暖，但煤在燃烧过程中却会产生相当数量的烟尘（图 4-6-4）．据统计，每年因燃烧煤炭而排入大气中的烟尘多达 1 亿吨左右．煤烟中还含有二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物等物质，会污染大气，造成酸雨（图 4-6-5）和温室效应，导

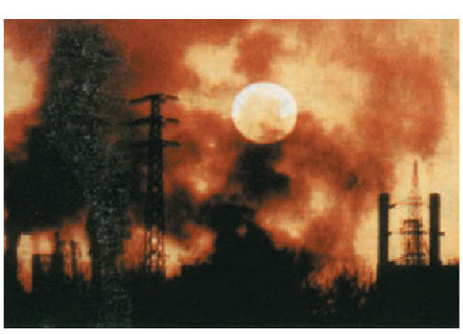


图 4-6-4　黑烟蔽日



图 4-6-5　酸雨毁林

微信公众号：电子课本大全

致两极的冰雪融化，海平面上升．烟中的致癌物质也会对人的身体造成伤害．煤炭在开采和生产过程中会破坏土壤植被，产生的废水会污染水源及农田．石油的开采、炼制、处理过程中发生的漏油、排放废气等也会对环境产生污染．汽车大量排放的尾气，也是大气的污染源之一．

讨论交流

我国人均能源占有量只有世界平均数的1/4，解决我国能源问题的基本方针是能源开发与节约并重．谈谈你可以通过哪些简单的方法改变自己的生活方式，以减少能源的使用量．

新能源的开发

由于化石燃料不可再生，而且会造成严重的环境污染，这就要求我们一方面要节约能源，另一方面要积极开发和利用新的能源．

活动

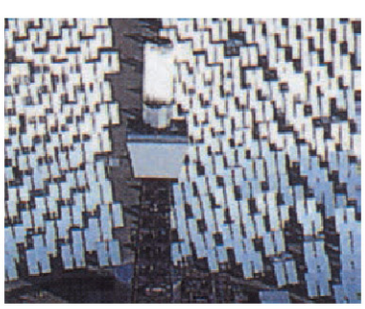
图4-6-6（a）、（b）、（c）各是利用什么能源工作的？与化石燃料相比，这些能源具有什么优点？



（a）风力发电



（b）海浪发电



（c）太阳能发电

图4-6-6　几种新能源的利用

目前，正在开发的新能源有风能、海洋能、太阳能、地热能、氢能、生物质能及核聚变能等．新能源多为可再生能源，且污染较小．新能源的开发是社会可持续发展的一个主要课题．

微信公众号：电子课本大全



图 4-6-7 太阳能汽车

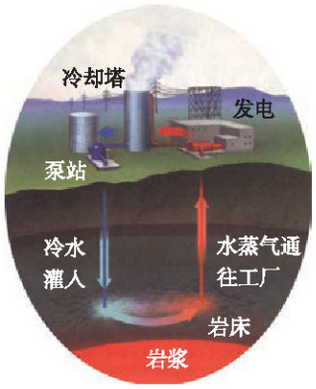


图 4-6-8 利用地热发电的过程



图 4-6-9 用液氢做燃料的火箭

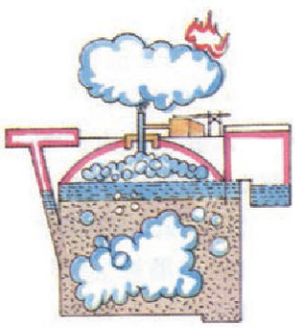


图 4-6-10 沼气（生物质能）池示意图

练习与评价

1. 观察你家中的家用电器，分别指出它们在工作时的能量转化过程.

2. 对下面各种能量的转换各举一例：化学能→内能，化学能→机械能，太阳能→化学能，动能→热能，动能→弹性势能.

3. 风能和水能是以下哪一种能的间接形式（　　）.

A. 核能　　B. 电能　　C. 太阳能　　D. 地热能

4. 下列燃料中不属于化石燃料的是（　　）.

A. 煤　　B. 木柴　　C. 石油　　D. 天然气

5. 假设你所在的地区今天突然停电，写一篇短文描述你们的生活将受到什么影响.

发展空间

永动机不可能实现

在历史上很长一段时期，有人试图制造一种不消耗任何能量却能持续不断地对外做功的永动机，他们挖空心思想出了许多机械系统（例如图 4-6-11）. 但事实一次又一次地证明，永动机只不过是一个“美丽的”幻想，这方面所有的努力最终都只能化为泡影. 永动机不能实现正是能量守恒定律的又一种表述.

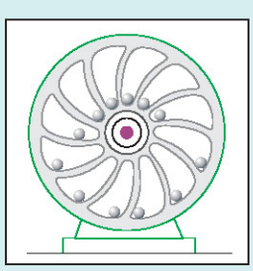


图 4-6-11 一种永动机模型：由于一边的钢球总比另外一边的离轮心远，似乎会使轮子持续旋转下去

微信公众号：电子课本大全

本章小结

1．功等于力的大小、位移的大小、力和位移夹角的余弦这三者的乘积，即 $W=Fx\cos\alpha$.

2．力对物体所做的功与做功所用时间的比值叫做功率，即 $P=\frac{W}{t}$. 它是表示做功快慢的物理量．功率与力、速度之间的关系为 $P=Fv$.

3．势能分重力势能和弹性势能，物体由于位于高处而具有的能叫做重力势能，重力势能等于物体的质量、重力加速度和它所在高度的乘积，即 $E_p=mgh$. 物体由于发生弹性形变而具有的能叫做弹性势能.

4．重力做的功跟路径无关，重力做功的大小等于物体重力势能的改变量，即 $W_G=mgh_1-mgh_2$.

5．物体由于运动而具有的能叫做动能，动能等于物体质量与速度的二次方的乘积的一半，即 $E_k=\frac{1}{2}mv^2$.

6．动能定理：合外力所做的功等于物体动能的变化，即 $W=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2$.

7．机械能守恒定律：动能和势能之间可以相互转化，在转化的过程中，如果只有系统内的重力或弹力做功，机械能的总量保持不变.

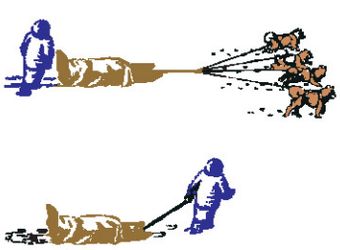
8．能量守恒定律：能量既不会凭空产生，也不会凭空消失，它只能从一种形式转化为另一种形式，或者从一个物体转移到另一个物体，在转化或转移的过程中其总量保持不变.

9．能源是指能够提供某种形式能量的物质资源．能源与人类生活密切相关，节约能源，恰当地利用能源，以及开发新能源是人类解决能源问题的基本途径.

习　题

1．物理量有状态量和过程量之分，状态量仅由状态来决定，跟如何到达该状态的过程无关，而过程量则由物体经历的过程来决定．功是状态量还是过程量？能量是状态量还是过程量？

2．雪橇是生活在寒冷地区的人们常用的一种运输工具，在图中，人和狗都匀速拉着雪橇走了相同的路程，那么是人做的功多，还是4只狗做的功多？

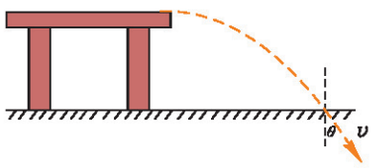


（第2题图）

3．2001年10月21日零时起，我国铁路进行第4次提速．铁

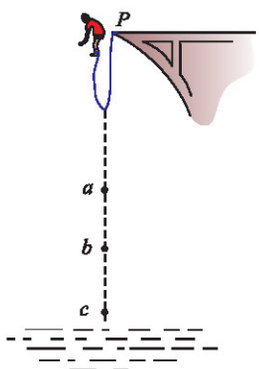
微信公众号：电子课本大全

路提速要解决许多技术问题．通常，列车受到的阻力与速度的平方成正比，即 $f = kv^2$，列车要跑得快，必须用大功率的机车牵引，试计算列车分别以 120 km/h 和 40 km/h 的速度匀速行驶时，机车功率大小的比值．



（第 4 题图）

4．如图所示，张明同学在做值日擦桌面时，不慎将桌面上的橡皮扫出桌面，已知橡皮落地时的速度方向与竖直方向的夹角为 θ．若不计空气阻力，取地面处为重力势能参考平面，抛出时物体的动能与它的重力势能之比等于多少？



（第 5 题图）

5．“蹦极”是一种很有挑战性的运动．如图所示，某人身系弹性绳从高空 P 处自由下落，做蹦极运动，图中 a 是弹性绳原长的位置，c 是人所到达的最低点，b 是人静止地悬着时的平衡位置，不计空气阻力，则人到达_____点时动能最大，人到达_____点时弹性绳的弹性势能最大．

6．通风机通过墙上的小洞将室内的空气吹出去．为了使通风机在单位时间内所吹走的空气质量增加一倍，则通风机的功率需要增大到原来的多少倍？

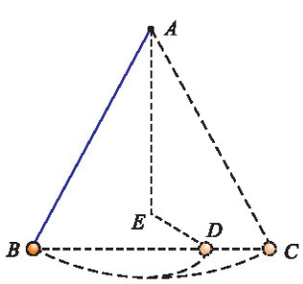
7．质量为 m 的汽车在一山坡上行驶，下坡时若关掉油门，则汽车的速度保持不变．如以恒定的功率 P 下坡，求汽车速度由 v_0 增至 $3v_0$ 的时间．（设两种情况下阻力相同）

8．港口上的起重机将船舱中的货物向上提升，如果先后两次将质量相同的货物提升到相同的高度，一次是突然地提升（加速度较大），另一次是缓慢地提升（加速度较小），哪一次提升货物起重机对货物做的功较多？哪一次拉力克服重力做的功较多？

9．某同学身高 1.80m，在运动会上他参加跳高比赛，起跳后身体横着越过了 1.80m 高的横杆．据此可估算出他起跳时竖直向上的速度大约为（　　）

A．2 m/s　　B．4 m/s　　C．6 m/s　　D．8 m/s

10．伽利略在研究运动和力的关系时，曾经考虑了一个无摩擦的理想实验：如图所示，在 A 点处悬挂一个摆球，将摆球拉至 B 点处放手，摆球将摆到与 B 等高的 C 处．假若在 A 点正下方的 E 处钉一钉子，摆球的运动路径将发生改变，但仍将升到与开始等高的 D 处．如果图中的摆线长为 l，初始时刻摆线与竖直线之间的夹角为 60°，则钉子 E 与 A 点的距离至少多大，摆球摆下后能在竖直面内做圆周运动？



（第 10 题图）

微信公众号：电子课本大全

第五章 经典力学的成就与局限性

- 经典力学的成就与局限性
- 了解相对论（选学）
- 初识量子论（选学）

经典力学在描写世界的运动规律时，认为时间、空间与物质及其运动完全无关，预言未来与过去一样确定，宇宙就像一座巨大的钟表．但世界真是这样的吗？



微信公众号：电子课本大全

1 经典力学的成就与局限性



图 5-1-1 经典力学理论是现代机械、土木建筑、交通运输以至航空航天技术的理论基础

经典力学（又称牛顿力学）体系是时代的产物，是许多科学家经过艰苦探索才完成的科学理论．它是整个现代物理学和天文学的基础，也是现代许多门类工程技术的理论基础（图 5-1-1）.

经典力学的成就

英国物理学家牛顿在1687年出版的著作《自然哲学的数学原理》中建立了一个完整的力学理论体系．经典力学只用几个基本的概念和原理就可以说明行星和卫星的轨道、开普勒的行星运动定律、彗星运动、落体运动、海洋的潮汐、汽车的运动、足球的运动以及宏观世界中人们日常看到的种种运动．经典力学能在如此广阔的范围内显示出定律的正确性，体现了它的巨大魅力．

经典力学的思想方法的影响远远超出了物理学与天文学．不仅在化学和生物学这样的自然科学领域，而且在艺术、政治、哲学等社会科学领域，也都按照经典力学描述宇宙的普遍方式来形成自己的体系，对社会和文化的发展产生了巨大的影响．

经典力学的局限性

任何一种科学理论都是一定时代的产物，不可避免地存在着历史的局限性．

经典力学是从日常的机械运动中总结出来的．超出这个范围，经典力学是否适用，需要进一步验证．现代物理学已经揭示，超出宏观的、日常生活经验的领域，经典力学常常就不适用了．

与经典力学体系相适应，牛顿还建立了绝对的时空学说．

微信公众号：电子课本大全

在牛顿看来，空间像一个大容器，它为物体运动提供了一个场所，无论物体放进去还是取出来，这个空间不会发生什么变化．时间则像一条川流不息的河流，不管有事件发生还是无事件发生，河流总是不断地、均匀地、不变地流逝着．时间、空间与物质及其运动完全无关，时间与空间也完全无关，因此称为绝对时空观．牛顿的绝对时空观，从自然观的角度来说，割裂了时间、空间、物质及其运动之间的联系，不能解释高速运动领域的许多客观现象．

牛顿所总结的运动定律，确立了严格的、用数值表示的机械运动的因果关系，按照经典力学，只要能知道初始条件，就可以准确地确定体系以往和未来的运动状态．因此，当时人们认为一切自然现象都服从力学原理，都只能按力学的规律以严格的确定性发生和演化．在经典力学中，运动都是连续变化的，即当$\Delta t \to 0$时，$\Delta x \to 0$，$\Delta v \to 0$．在这样的运动方式中，能量也就只能连续地变化，即$\Delta E \to 0$．经典力学的运动观，从自然观角度来说，给出的是一幅机械运动的图景，不能解释微观世界丰富多彩的现象．

小词典

自然观

自然观指的是对自然界的总体看法．

经典力学的适用范围

对于汽车、喷气式飞机、子弹或运动速度为10 km/s数量级的人造卫星，用经典力学去研究它们的运动规律，所得结果与实际之间是一致的．但是，当物体运动的速度达到了30 000 km/s时，经典力学的结果与实验之间大致相差1%，若物体运动的速度大到290 000 km/s（接近光速）时，经典力学与实验的偏差可以达到1 500%，即15倍，经典力学完全不适用了．一般地说，当$v \to c$时，经典力学就不再适用（式中v为物体运动速度，c为真空中的光速）．

任何理论都有一定的适用范围．超出这个范围，随着科学技术及人类认识的发展，必将有新理论出现．

实验表明，牛顿运动定律、绝对时空观和万有引力定律，对于受到很强的引力作用的物体的运动也不适用．例如在密度很大的中子星附近，经典力学理论无法正确解释有关的现象．

在微观领域，即对活动范围在10^{-10} m以内的微观粒子（质子、中子、电子等）的运动，经典力学也不适用．

因此，经典力学只适用于宏观（$>10^{-10}$ m）、低速（$v \ll c$）、弱引力场（例如地球附近）．超出以上范围，经典力学失效，要由相对论、量子论等来取代．在后面两节，我们将对相对论、量子论作一个初步介绍．

微信公众号：电子课本大全

发展空间

课外阅览

牛顿的科学思想和科学方法

牛顿的科学思想和科学方法在当时具有时代性和先进性，而且对近代科学的发展起到了奠基和导航作用.

牛顿承认物质的客观性质和世界的统一性，承认空间、时间的客观性质，承认自然界各种事物之间的联系和物质运动的规律性. 由牛顿最后完成的经典力学体系，成为唯物主义自然观的重要自然科学基础之一.

牛顿重大科学成就的取得和他创立并应用了独到的科学方法分不开. 他采用的重要科学方法为：分析的方法在于实验—归纳和演绎相结合地发现定律；综合方法则包括两个方面，一是根据已发现的一般定律，运用公理法和数学—演绎法相结合的方法建立数学化理论，二是对理论的定理——一般定律的推论做实验检验，由此证实一般定律的真理性.

在科学精神上，他始终如一的在科学上的求真风范，坚韧不拔的探索毅力，大胆的怀疑批判精神，严谨求实的科学态度，成为此后科学工作者的光辉典范.

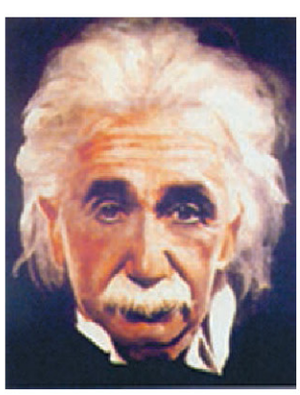
物理在线

查阅相关资料，了解中国古代的力学成就及这些成就取得的年代，与西方同时代的情况做一比较. 在比较中你得到什么结论.

走向社会

在我们的日常生活中和其他我们所知道的范围内，经典力学有哪些应用？

2 了解相对论（选学）



爱因斯坦
（Albert Einstein，1879—1955）

今天，在生产和生活的各个方面都在广泛地利用各种奇特的高新技术. 其中许多涉及粒子的高速运动. 这种高速运动都是不遵从经典力学规律的. 爱因斯坦创立的**相对论**（relativity），是关于物质运动与时间空间关系的理论，它建立了物理学中新的时空观和给出了物体做高速运动（速度接近光速）时的运动规律. 相对论已经成为现代科学技术的重要理论基础之一.

微信公众号：电子课本大全

狭义相对论

1905年，爱因斯坦针对经典力学的绝对时空观在处理物体做高速运动时所遇到的困难，创立了**狭义相对论**（special relativity）.

在狭义相对论中，主要的效应有下列几种：

（1）运动长度 l 会收缩，即 $l = l_0\sqrt{1-v^2/c^2}$. 这一收缩并不是由于物体的物理状态发生了变化，它是由于时空条件不同而引起的观测效应，其中，“长度收缩”所指的长度是指沿运动方向上的长度.

（2）运动时钟会变慢，或者说运动时钟显示的时间 τ 延缓了，即 $\tau = \tau_0 / \sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}$. 这种延缓并不是由于钟的结构改变的结果，它也是由于时空条件不同而引起的观测效应.

（3）物体质量 m 随速度 v 的增大而变大，其关系为 $m = m_0 / \sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}$，式中 m_0 为静止时的质量，m 为运动时的质量，如图 5-2-2 所示.

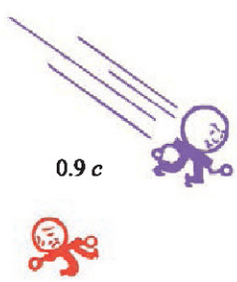


图5-2-1　实验表明，在地面上进行观测，π介子的寿命随着它们速度的增加而增加

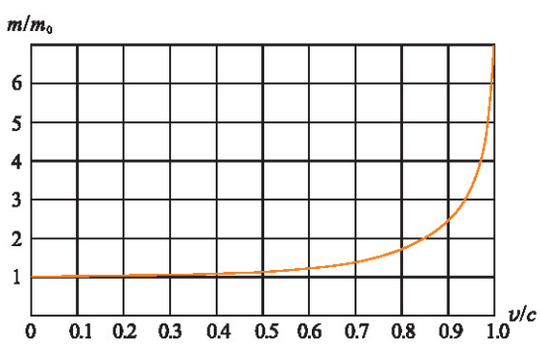


图5-2-2　质量随速度变化，当物体运动速度接近光速时，物体的质量明显地迅速增大

（4）质量 m 和能量 E 之间存在着一个相互联系的关系式：$E = mc^2$，称为质能关系，式中 c 是光速. 正是这个质能关系为人类利用核能奠定了理论基础.

（5）任何物体的速度不能超过光速 c. 超过光速将导致质量为虚数，这是不可能的.

在一般情况下，相对论效应极其微小，当 $v \ll c$ 时，相对论效应消失，其结果则还原为经典力学. 因此经典力学

微信公众号：电子课本大全

可以认为是相对论力学在低速情况下的近似.

广义相对论点滴

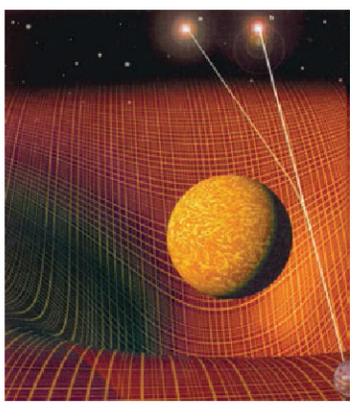


图 5-2-3　光线通过太阳边缘时发生了偏折

在狭义相对论的基础上，1916 年，爱因斯坦创立了**广义相对论**（general relativity），得出一系列重要的物理结果. 例如：当光线通过强引力场时，光线在引力场中会发生偏折，如图 5-2-3 所示；这表示在引力场中，时空会发生“弯曲”，图 5-2-4 给出一个形象化的示意图. 像电磁场存在着电磁波一样，引力场也存在引力波.

广义相对论是数学与物理学相结合的典范. 在广义相对论中，时间、空间、物质与运动是紧密地联系在一起的. 相对论这一深刻的科学观念，对 20 世纪以来自然科学的思维方式产生了极为深刻的影响.

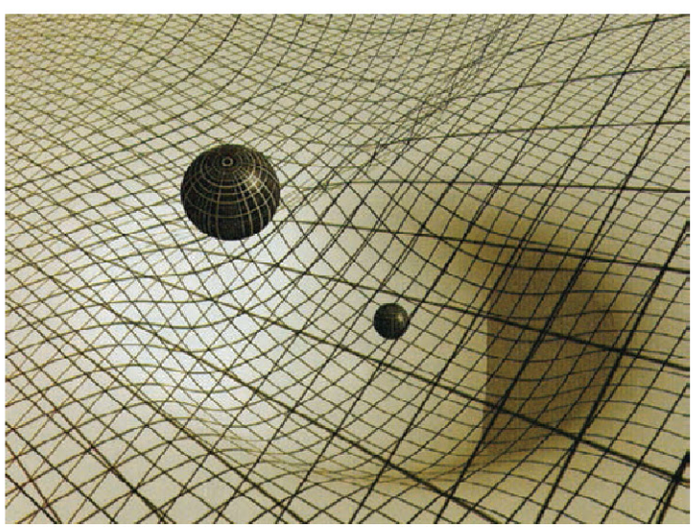


图 5-2-4　时空弯曲

小资料

黑　洞

黑洞是广义相对论所预言的一种特殊的天体.

用牛顿运动定律和万有引力定律可以推导得到人造卫星脱离地球的速度为

$$v=\sqrt{\frac{2Gm_{\mathrm{E}}}{R}}$$

式中 m_{E} 和 R 分别为地球的质量及半径. 这一公式对其他地球以外的星体同样适用. 显然，当星体的质量 m 增大，而半径减小时，v 将增大，即星体对要脱离它的物体具有更大的束缚. 如果达到 $R<2Gm/c^2$（c 为真空中光速），则 $v>c$. 而物体运动的速度是不可能超过光速的，这就是说，假如光也同一般物体一样受万有引力作用，这时光线也被星体所束缚住. 这样，在远处的观测者无法接收到这个星体所发出的光线，星体就成了所谓的黑洞了. 当然，在黑洞附近，时空已经弯曲得非常严重，牛顿万有引力定律早已失效了.

根据现有的恒星演化理论，黑洞是某些星体演化的一种结局.

微信公众号：电子课本大全

发展空间

课外阅览

运动长度收缩

现在，对“运动长度收缩”效应进行说明，使我们更好地理解狭义相对论的原理.

设有一个静止时长度为 l_0 的物体，放在火车上，长度的方向与火车的行驶方向一致. 现在，有一个站在站台上的人，来观测这个物体的长度 l，如图 5-2-5 所示.

当火车静止（$v=0$）时，站台上的人测出该物体的长度 $l=l_0$.

当火车运动速度 $v=0.50\,c$ 时，站台上的人测出该物体长度

$$l=l_0\sqrt{1-0.25}=\sqrt{0.75}l_0\approx 0.87l_0$$

当火车运动 $v=0.90\,c$ 时，站台上的人测出该物体长度

$$l=l_0\sqrt{1-0.81}=\sqrt{0.19}l_0\approx 0.44l_0$$

当火车运动速度 $v\to c$ 时，站台上的人测出该物体长度 $l\to 0$.

而火车内的人却不会因火车相对站台的运动速度增大而发现物体长度发生变化，因为，此时物体相对于火车内的人的运动速度一直是零，所以他观测到的该物体长度 l 仍为 l_0，如图 5-2-6 所示.

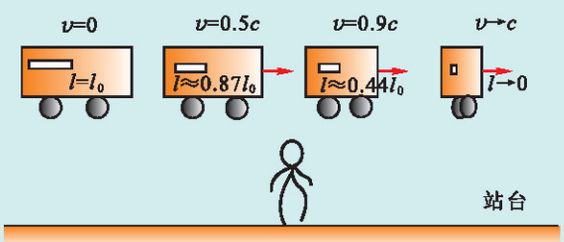


图 5-2-5　站台上的人观测运动火车中的物体长度

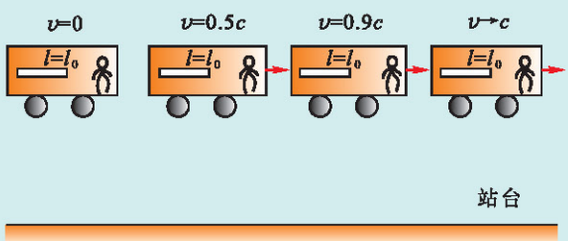


图 5-2-6　火车内的人观测运动（相对于地面）火车中的物体长度

请同学们思考：当火车以不同速度（相对于地面）运动时，火车上的人观测站台上的物体长度 l，结果应如何呢？

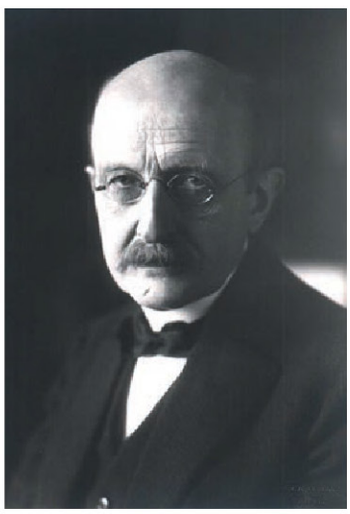
对于运动时钟变慢的相对论效应，与运动物体长度收缩说明相类似，请同学们通过类比自己作出分析.

走向社会

阅读有关相对论的科普读物，初步了解相对论的基本思想. 通过询问、访谈等方式，对相对论形成初步认识.

微信公众号：电子课本大全

3 初识量子论（选学）



普朗克（Max Planck，1858—1947）

相对论提供了新的时空观，**量子论**（quantum theory）则向人们提供了一种新的认识微观世界物质运动规律的强大武器．量子假设最早是在1900年由德国物理学家普朗克提出来的．

量子论的基本内容

在自然界，除了连续变化，还存在大量非连续变化的情况．

量子论认为微观世界的某些物理量不能连续变化而只能取某些分立值，相邻两分立值之差称为该物理量的一个量子．如物质吸收或发射的辐射能量量子，$\varepsilon = h\nu$（h是普朗克常量，ν是辐射的频率）．这种辐射能量的变化是一份一份的，即 $\Delta E = n\varepsilon$（n为自然数）．每一种量子的数值都很小，所以在较大物体的运动中量子化不发生显著影响，正如经典力学中所认为的，物理量可以连续变化．但对电子、原子等的微观运动来说，这种量子化效应就不能忽略，这时，经典力学已经不适用了．

能量子 ε 与元电荷 e 类似，能量与电荷都只能一份一份地变化．

一切微观粒子都具有波粒二象性．微观粒子在有的条件下显示出波动性（这时粒子性不显著），在有的条件下又显示出粒子性（这时波动性不显著），这种在不同条件下分别表现出同经典力学中的波动和粒子一样的性质，称为“波粒二象性”．然而，在粒子的质量或能量越大时，波动性变得越不显著．我们日常所见的宏观物体，实际上可以看做只具有粒子性．

由于微观粒子运动的特殊规律性，使一个微观粒子的某些物理量不可能同时具有确定的数值．如粒子的位置和动量，其中一个量越确定，另一个量就越不确定，粒子的运动不遵守确定性规律而遵守统计性规律．

微信公众号：电子课本大全

量子论的作用

量子论或量子力学起作用的领域主要是微观世界．量子力学的建立，标志着人们对客观规律的认识从宏观世界深入到了微观世界．量子力学成功地揭示了微观物质世界的基本规律，它和反映宏观世界基本规律的经典物理学存在原则的区别．它的创立极大地加速了原子物理学的发展，为核物理学和粒子物理学准备了理论基础，对化学和生物学的发展也起了巨大的促进作用．

正是由于量子理论揭示了微观粒子运动的规律，科学家才能从微观层次对宏观的物理、化学、生命运动作统一认识，量子论已成为现代科学技术进一步发展的理论基础．

发展空间

课外阅览

量子是什么

从纽约到可以坐火车抵达的地点之间的距离，只能以不连续的方式变化．但是那些可以坐汽车抵达的地点的距离，却可以用任意小的段落来变化，它们可以用连续的方式变化．坐汽车时距离的变化可以任意小，而坐火车时却不能．

煤矿的生产量也可以用连续的方式变化．生产出来的煤可以增加或减少任意小的部分．但是在矿上工作的矿工的数目只能以不连续的方式变化．如果有人这样说“从昨天起工人的数目增加了 3.783 个”，这句话是毫无意义的．

当你问别人的口袋里有多少钱时，只能说出一个有两位小数的数．钱的总数只能不连续地、跳跃式地变化．在美国，美元允许的最小变化，或者像我们所要说的，美国钱币的“基本量子”是 1 分．英国钱币的“基本量子”是 1/4 便士，它只值美国基本量子的一半．

我们可以说某些量可以连续地变化，而另外一些量只能不连续地变化，即从一个不能再小的单位一份一份地变化．这些不可再分的量就叫做某一种量的基本量子．

我们称量大量的沙子时，虽然它的颗粒结构非常明显，还是认为它的质量是连续的．但是如果沙变得很珍贵，而且所用的秤非常灵敏，我们就不得不考虑沙子质量变化的数目，是一个颗粒的质量的多少倍．这一个颗粒的质量，就是我们所说的基本量子．从这个例子我们可以看到，以前一直认为是连续的量，由于我们测量精密度的增大，而显示出不连续性来．

假如我们要用一句话来表明量子论的基本观念，我们可以这样说：必须假定某些以前被认为是连续的物理量是由基本量子所组成的．

（摘自爱因斯坦，英费尔德《物理学的进化》）

物理在线

查阅有关量子论的科普读物和科学史的相关资料，了解量子论的发展过程，初步了解量子论的思想方法．查阅量子论与现代科学技术，特别是与当代信息技术发展的联系．

微信公众号：电子课本大全

本章小结

1．经典力学是物理学和天文学的基础，也是现代工程技术的理论基础．经典力学的理论体系经过几代科学家长期的探索，历经曲折才建立起来．

2．经典力学具有丰富的理论成果，也建立了实证科学的方法论体系．

3．当物体运动速度很大（$v \to c$）、引力很强、活动空间很小（微观）时，经典力学理论所得的结果与实验结果之间出现了较大的偏差．

4．狭义相对论得出：运动物体在速度方向上长度会收缩，时钟会延缓，质量会因运动速度而增大．物体的质量与能量之间相互关联，即 $E = mc^2$．任何物体的运动速度都不能超过光速 c．

5．广义相对论解释了引力很强时物质运动的规律性．这时，光线在引力场中发生偏折，时空发生弯曲．

6．相对论为人们提供了新的时空观：时间、空间与物质及其运动密切相关．

7．量子论反映了微观世界的运动规律，得出：微观世界的某些物理量不能连续变化，一切微观粒子都具有波粒二象性，一个微观粒子的某些物理量（如位置和动量）不可能同时具有确定的数值．粒子的运动带有统计的性质．

习　题

1．对于经典力学理论，下述说法中正确的是（　　）

A．由于相对论、量子论的提出，经典力学已经失去了它的意义

B．经典力学在今天广泛应用，它的正确性无可怀疑，仍是普遍适用的

C．经典力学在历史上起了巨大的作用，随着物理学的发展而逐渐过时，成为一种古老的理论

D．经典力学在宏观低速运动中，引力不太大时适用

2．请将伽利略、牛顿、爱因斯坦三位科学家按历史年代先后顺序排列：_____、_____、_____．并简要写出他们在物理学上的主要贡献各一项：_____、_____、_____．

3．利用网络或图书资料，选择上题中的一位科学家，查阅他们的主要科学贡献并与同学交流．

4．人类在探索自然规律的进程中总结了许多科学方法，如分析归纳法、演绎法、等效替代法、控制变量法、理想实验法等．在下列研究中，运用理想实验法进行研究的是（　　）

A．牛顿发现万有引力定律

B．伽利略得出力不是维持物体运动原因的结论

C．爱因斯坦创立相对论

D．普朗克创立量子论

5．说说牛顿和爱因斯坦时空观点的根本区别．

6．举例说说你对量子论的认识．

微信公众号：电子课本大全

附 录

中英文索引

（名词后面的数字是它第一次出现的页码）

D

第二宇宙速度 second cosmic velocity 53
第三宇宙速度 third cosmic velocity 53
第一宇宙速度 first cosmic velocity 52
动能 kinetic energy 67
动能定理 theorem of kinetic energy 69

G

功 work 58
功率 power 61
广义相对论 general relativity 88

J

机械能守恒定律 law of conservation of mechanical energy 73
角速度 angular velocity 22

L

量子论 quantum theory 90

N

能量守恒定律 law of conservation of energy 76

P

平抛运动 motion of body projected horizontally 8

Q

曲线运动 curvilinear motion 2

S

势能 potential energy 66

T

弹性势能 elastic potential energy 66

W

万有引力定律 law of universal gravitation 47

X

狭义相对论 special relativity 87
线速度 linear velocity 21
相对论 relativity 86
向心加速度 centripetal acceleration 28
向心力 centripetal force 25
斜抛运动 motion of body projected obliquely 13

Y

引力常量 gravitational constant 47
圆周运动 circular motion 20
匀速圆周运动 uniform circular motion 21

Z

重力势能 gravitational potential energy 64
周期 period 22

微信公众号：电子课本大全