国家教材委员会专家委员会审核通过
2019

普通高中教科书

物理

必修

第二册



ESPH 教育科学出版社

普 通 高 中 教 科 书

物理

必修

第二册



教育科学出版社

·北 京·

主　　编　陈熙谋　吴祖仁
本册主编　蔡铁权　周昌鲜
本册编者（按姓氏笔画排序）
尹　强　李勇强　宋怀彬　张丹彤
张生文　谭崇宇　薛义荣

目录



第一章　抛体运动

1. 认识曲线运动 …… 2
2. 运动的合成与分解 …… 7
3. 探究平抛运动的特点 …… 11
4. 研究平抛运动的规律 …… 15
5. 斜抛运动（选学） …… 20
反思·小结·交流 …… 24
本章复习题 …… 25



第二章　匀速圆周运动

1. 圆周运动 …… 28
2. 匀速圆周运动的向心力和向心加速度 …… 33
3. 圆周运动的实例分析 …… 42
4. 圆周运动与人类文明（选学） …… 50
反思·小结·交流 …… 55
本章复习题 …… 56



第三章　万有引力定律

1. 天体运动 …… 58
2. 万有引力定律 …… 61
3. 预言未知星体　计算天体质量 …… 66
4. 人造卫星　宇宙速度 …… 69
5. 太空探索（选学） …… 73
反思·小结·交流 …… 75
本章复习题 …… 76



第四章　机械能及其守恒定律

1. 功 …… 78
2. 功率 …… 84
3. 动能　动能定理 …… 89
4. 势能 …… 96
5. 机械能守恒定律 …… 102
6. 实验：验证机械能守恒定律 …… 108
反思·小结·交流 …… 111
本章复习题 …… 112



第五章　经典力学的局限性与相对论初步

1. 经典力学的成就与局限性 …… 114
2. 相对论时空观简介 …… 117
3. 宇宙的起源和演化 …… 125
反思·小结·交流 …… 128
本章复习题 …… 128

附录 …… 129
后记 …… 130



第一章

抛体运动

主题一　曲线运动

- 认识曲线运动
- 运动的合成与分解

主题二　抛体运动

- 探究平抛运动的特点
- 研究平抛运动的规律
- 斜抛运动（选学）

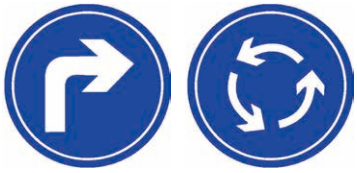
喷泉射出的水柱在空中划出一道道美丽的弧线，令人赏心悦目。这种弧线具有什么特征？哪些运动的轨迹跟它具有相同的特征？这类运动遵循怎样的规律？

这是一种常见的曲线运动——抛体运动。本章我们将认识它的特点与规律。

1 认识曲线运动

在《物理 必修 第一册》中，我们学习了匀变速直线运动及其规律。但在现实生活中，我们接触的却是大量的曲线运动。

随处可见的曲线运动

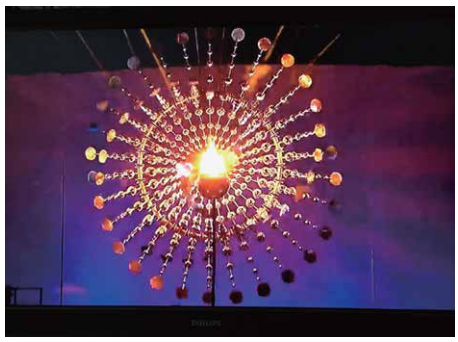


▲ **图1-1-1** 表示转弯的交通标志

本章首页图中，景观喷泉喷出的水柱在空中形成美丽的弧线。在公路上，有许多提示车辆转弯的交通标志（图1-1-1），它们引导车辆沿正确的方向行驶；在足球场上，你可能看到“香蕉球”在空中划出一道漂亮的弧线。物理学中，我们把物体运动轨迹是曲线的运动，叫作**曲线运动**（curvilinear motion）。曲线运动是一种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）里约奥运会开幕式上灯随杆的运动



（c）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

如图 1-1-4 所示，水平桌面上放一磁性画板，在画板上固定一塑料圆弧形挡板。

磁性画板的构造及原理

画板的两层板之间夹着蜂窝状的孔，孔内装有铁粉，下底面装有一根磁条。当移动磁条时，铁粉被吸到孔的底部，上面板呈白色；当磁性笔或磁性物体在上面板上滑动时，所经之处的铁粉被吸上，从而显示出运动轨迹。



（a）实验装置　　（b）运动轨迹

▲ **图1-1-4**　研究曲线运动的方向

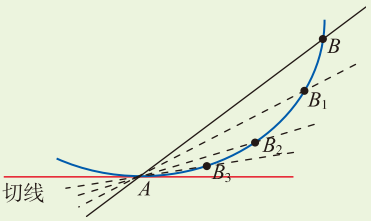
让一个磁性小球以一定的初速度在圆弧形挡板的约束下运动。更换挡板，可以改变挡板的弯曲程度，重复几次实验。观察并思考：

1. 小球离开挡板后，运动轨迹是怎样的？
2. 根据运动轨迹，你能推测小球离开挡板时的速度方向吗？

在《物理　必修　第一册》的学习中，我们知道，瞬时速度是描述物体运动快慢的物理量。那么做曲线运动的物体的瞬时速度方向是怎样的？

理论探究

如图 1-1-5 所示，质点沿曲线运动，某段时间从 A 运动到 B，过 A、B 两点作直线，这条直线叫作曲线的割线。从 A 到 B 就是质点位移的方向，也就是这段时间内的平均速度方向。设想研究的时间段逐渐缩短，则 B 点逐渐向 A 点靠近，这条割线的位置将不断变化。当时间段变得非常非常小的时候，B 点非常非常接近 A 点，这条割线就将与过 A 点的切线重合。因此，可以认为质点在 A 点的瞬时速度方向沿曲线在 A 点的切线方向。

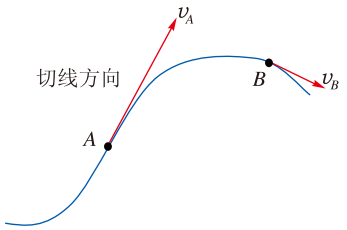


▲ **图1-1-5**　所取的时间段逐渐变小，B点逐渐向A点靠近

在曲线运动中，当所取运动过程足够短时，质点在这一极短过程中的运动就可视为直线运动。

“**化曲为直**”是处理数学问题的一种重要方法，在处理某些物理问题时，通过“化曲为直”，转换思维，可使问题得以简化。

实验和理论分析表明，质点做曲线运动，经过某一位置时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。

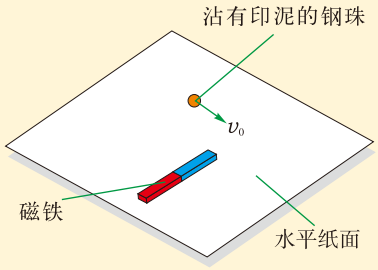


▲**图1-1-6** 曲线运动的速度方向

物体做曲线运动的条件

实验探究

曲线运动是一种变速运动。根据牛顿第一定律，要使物体的运动状态发生改变，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，进行实验并观察：把磁铁置于什么区域，钢珠才会偏离原来的方向而做曲线运动？



▲**图1-1-7** 研究曲线运动的条件

如果要改变速度方向，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？力的方向、速度方向与运动轨迹之间有怎样的关系？

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。**

讨论交流

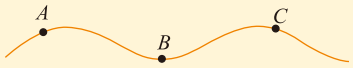
如图 1-1-8 所示，投出去的篮球靠什么力来改变运动方向而做曲线运动？



▲图1-1-8　曲线运动的实例

自我评价

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，汽车在水平地面上先后经过A、B、C三点。试在图上标出汽车经过这三个位置时的速度方向。



▲图1-1-9

2. 一质点做曲线运动，下列说法正确的是（　　）

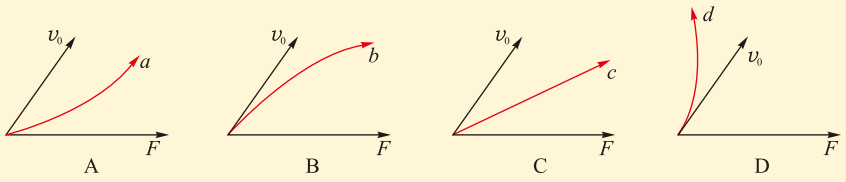
A. 质点速度方向不可能始终不变

B. 质点速度大小不可能始终不变

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. 若已知物体运动初速度v_0的方向及它受到恒定合外力F的方向，图1-1-10中曲线a、b、c、d表示物体运动的轨迹，其中可能正确的是（　　）



▲图1-1-10

发展空间

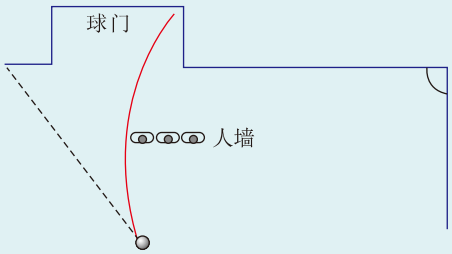
课外阅览

“香蕉球”成因

你喜欢观看足球比赛吗？如图1-1-11所示，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，图1-1-12是它的运动轨迹的俯视图，这就是所谓的“香蕉球”。那你知道“香蕉球”是怎样形成的吗？

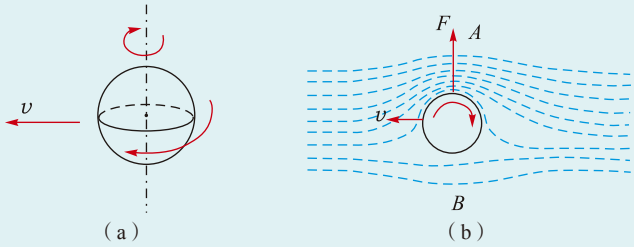


▲ **图1-1-11** 运动员踢出“香蕉球”



▲ **图1-1-12** 从空中俯视，看到的“香蕉球”的轨迹

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 1-1-13（a）所示］。若自上向下看，如图 1-1-13（b）所示，由于足球的自转，紧贴着足球表面的一薄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。正是这个压力差和重力的共同作用，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”的成因分析

2 运动的合成与分解

矢量的合成与分解

通过《物理　必修　第一册》的学习，大家已经知道力的合成与分解遵循平行四边形定则。描述物体运动的位移、速度和加速度也是矢量，其合成与分解的方法也遵循平行四边形定则。研究表明，平行四边形定则是矢量合成与分解遵循的普遍法则。这也是矢量与标量在运算方面的显著区别。

力（运动）的合成与分解，既体现了矢量的运算法则，同时又反映了物理学研究问题的重要方法——等效替代。合成与分解本身也是研究物理问题的基本方法。

通过平行四边形定则将合矢量与分矢量的关系转化为平行四边形的对角线和邻边的关系，可以把矢量运算转化为几何运算。所以，在解决力（运动）的合成与分解的问题时，作图是非常关键的一步。

◎等效替代

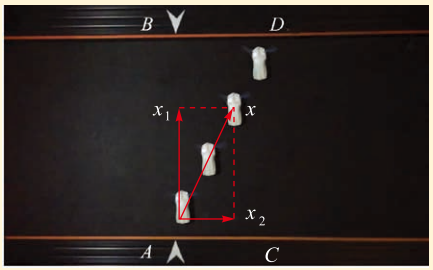
等效替代是在保证某种效果（特性和关系）相同的前提下，将实际的、复杂的物理问题和物理过程转化为等效的、简单的、易于研究的物理问题和物理过程来研究和处理的方法。

等效替代既是科学家研究问题的方法，也是同学们在学习物理中常用的方法。

位移和速度的合成与分解

观察思考

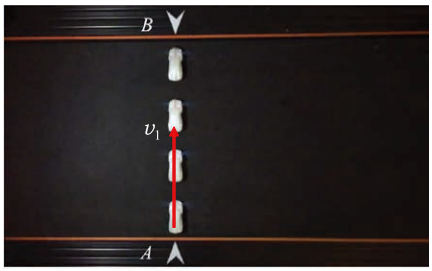
如图 1-2-1 所示，小明将玩具电动车（以下简称“小车”）放在跑步机上做游戏。跑步机履带外侧的机身上有正对的 A、B 两点。他想让小车从 A 点出发，运动到对面的 B 点。跑步机启动后，释放小车时车头指向 B 点。但他发现，小车并未到达正对面的 B 点，而是到达了 D 点，行驶的路线也并不跟跑步机履带运动方向垂直。怎样来研究这种运动呢？



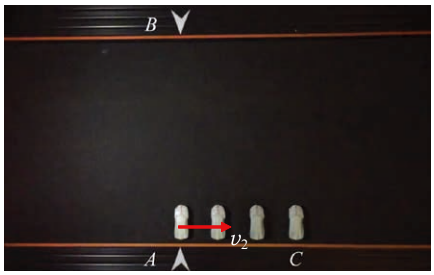
▲ 图1-2-1　小车与履带同时运动

若跑步机履带不动时，小车从 A 点启动，车头正对 B 点，经过一段时间，小车将到达 B 点，如图 1-2-2 所示。

若将小车静置于跑步机履带上，履带向右运动，小车将到达 A 点右方的 C 处，如图 1-2-3 所示。



▲ **图1-2-2** 小车运动，履带静止

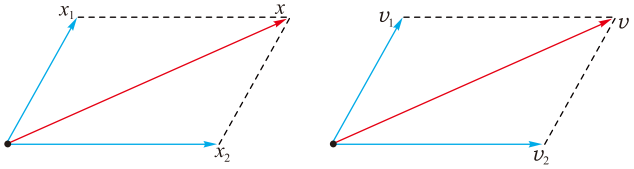


▲ **图1-2-3** 小车静止，履带运动

实际上，图 1-2-1 中小车同时参与了以上两个运动。我们把这两个运动叫作分运动，实际的运动叫作合运动。那么合运动的位移与分运动的位移之间有什么样的关系呢？

由上述实验可以得到：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。已知分位移求合位移叫作**位移的合成**；已知合位移求分位移叫作**位移的分解**，它们都遵循平行四边形定则。

由于合运动与分运动对应的时间是相同的，而位移的合成与分解遵循平行四边形定则，那么，速度的合成与分解也必然遵循平行四边形定则，如图 1-2-4 所示。同样的，加速度的合成与分解也必然遵循平行四边形定则。



▲ **图1-2-4** 位移和速度的合成与分解

位移、速度和加速度都是描述物体运动的物理量，运动的合成与分解包括这些物理量的合成与分解。已知分运动求合运动，叫作**运动的合成**；已知合运动求分运动，叫作**运动的分解**。

讨论交流

在图 1-2-1 中，为了使玩具电动车从 A 点出发到达正对的 B 点，小车的车头应该朝什么方向？

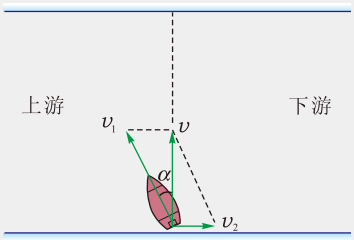
运动合成与分解的应用

研究比较复杂的运动时，常常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。运动的合成与分解在生产、生活和科技中有广泛的应用。

例题示范

问题　某条河宽度为 $x = 700$ m，河水均匀流动，流速为 $v_2 = 2$ m/s。若小船在静水中的运动速度为 $v_1 = 4$ m/s，则小船的船头指向哪个方向才能恰好到达河的正对岸？渡河时间为多少？

分析　如图1-2-5所示，为了使小船恰好到达河的正对岸，必须使船的合速度 v 的方向与河岸垂直。



▲ **图1-2-5**　小船垂直河岸运动

解　由图可知

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

$$\alpha = 30°$$

即小船应朝偏上游30° 的方向行驶。

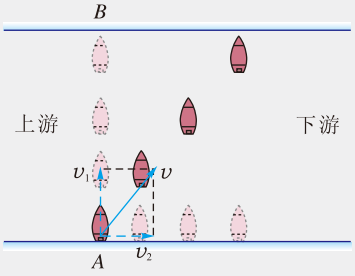
由图还可以得到合速度的大小为

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

渡河时间为

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

拓展　在上述例题中，若小船在行驶的过程中始终保持船头的指向垂直于河岸（图1-2-6），则渡河时间是多少？小船到达对岸时向下游偏移的位移是多少？



▲ **图1-2-6**　小船船头垂直河岸的运动

自我评价

1. 关于合运动与分运动的关系，下列说法中正确的是（　　）

A. 合运动的速度一定大于分运动的速度

B. 合运动的速度可以小于分运动的速度

C. 合运动的位移就是两个分运动位移的代数和

D. 合运动的时间与分运动的时间不一样

2. 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，雨滴随风水平向西的速度大小是 3 m/s。试求此时雨滴着地的速度。

3. 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。有一只快艇相对于静水行驶的速度为 v_2，已知 v_2 大于 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？

4. 某同学以 10 m/s 的初速度，与水平方向成 60° 的倾角，将篮球斜向上投出，请作出初速度沿水平方向和竖直方向分解的示意图，并求出这两个分速度的大小。

发展空间

走向社会

跑马射箭

民族运动会上有一个骑射项目，运动员骑在奔驰的马背上，弯弓放箭射向固定目标（即图1-2-7中的箭靶，箭靶平面与马运动方向平行）。



▲ **图1-2-7**　跑马射箭

假设运动员骑马奔驰的速度为 v_1，运动员静止时射出的箭速度为 v_2，跑道离固定目标的最近距离为 d。要想命中目标且射出的箭在空中飞行时间最短。不考虑空气阻力和重力的影响，则：

1. 箭被射出到射中靶的最短时间为多少？

2. 运动员放箭处与目标的距离为多少？

3 探究平抛运动的特点

什么是平抛运动?

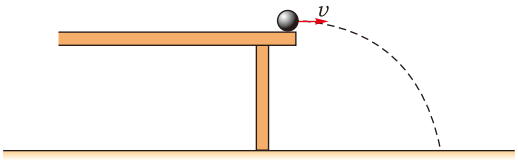
观察思考

设想你正乘着一架滑翔机（图 1-3-1）沿水平方向运动，下方的陆地是你熟悉的地方。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?



▲ **图1-3-1**　现代滑翔机

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

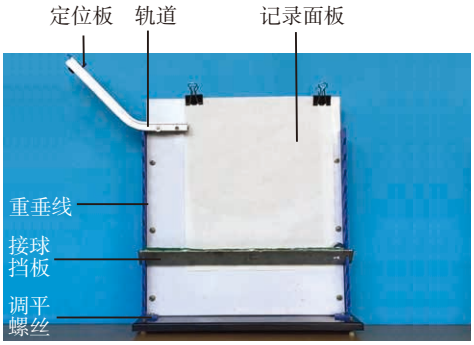
物体以一定的初速度沿水平方向抛出，不考虑空气的阻力，物体只在重力作用下所做的运动，叫作**平抛运动**（motion of body projected horizontally）。以一定速度沿水平方向飞出的小球的运动、运动员水平击出的排球的运动、沿水平方向飞行的飞机所释放的物体的运动等，如果空气阻力对运动的影响可以忽略，都可视为平抛运动。

要研究平抛物体的运动规律，最好能记录下它在空中画出的优美曲线。我们怎样才能得到平抛运动的轨迹呢?

描绘平抛运动的轨迹

1. 实验仪器

如图 1-3-3 所示的装置是实验室中常见的用来描绘平抛运动轨迹的仪器。



▲ 图1-3-3 实验装置

观察思考

请仔细观察如图 1-3-3 所示仪器的构造，思考以下问题：

1. 怎样确保小球做的是平抛运动？
2. 如何记录小球的位置？
3. 如何得到平抛运动的轨迹？

2. 实验操作

我们可以按照下面的步骤进行操作，描出小球运动的轨迹。

调节水平和竖直的目的是什么？

（1）将实验仪器置于桌面，调节调平螺丝，观察重垂线，使面板处于竖直平面内，卡好定位板。装好平抛轨道，使轨道的抛射端处于水平位置。

若用白纸作为记录纸，可事先用铅笔在纸上画出 x 轴和 y 轴两条坐标轴。

（2）在描迹记录纸后衬垫一张复写纸或打字蜡纸，并用压纸板将它们紧贴固定在面板上。使横坐标 x 轴在水平方向上，纵坐标 y 轴沿竖直方向向下，并注意使坐标原点的位置在平抛物体（钢球）的中心离开轨道处。

（3）把接球挡板置于最上方一格。

（4）将定位板在某一位置固定好。钢球紧靠定位板释放，球沿轨道向下运动，以一定的初速度由轨道的平直部分水平抛出。

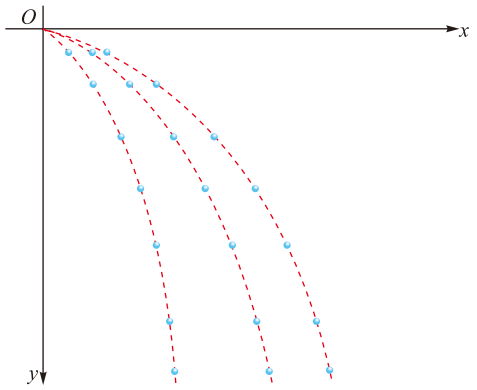
下落的钢球打在接球挡板上，由于挡板平面向记录面板倾斜，小球将挤压记录纸，留下一个迹点。

（5）将接球挡板向下移动一格，重复上述操作方法，得到第二个印迹点，如此继续下移接球挡板，直至最低点，即可得到平抛的钢球下落时的一系列迹点。

（6）改变定位板的位置，即可改变钢球平抛的初速度，重复上述实验操作步骤，便可获得另一系列迹点。

3. 描绘平抛运动的轨迹

取下记录纸，将各次实验所记录的点分别用平滑曲线连接起来，即可得到以不同的初速度做平抛运动的小钢球的轨迹图线，如图 1-3-4 所示。



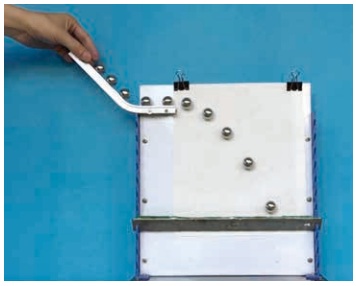
▲ **图1-3-4**　以不同的初速度做平抛运动的轨迹

讨论交流

1. 实验中，为了减小误差，我们可以采取哪些措施？
2. 你能对该实验提出改进的方案吗？
3. 你还有其他更好的方案描绘平抛运动的轨迹吗？

在《物理　必修　第一册》的学习中我们了解到，频闪照相技术可以记录下运动物体在不同时刻的位置，是研究各种运动的有效手段。随着技术的进步，要获得“频闪照片”变得简单起来。

我们用手机对平抛运动进行“录像”，再用软件把连拍的多张照片合成到一张照片上，也可以得出平抛运动的大致轨迹，如图 1-3-5 所示。



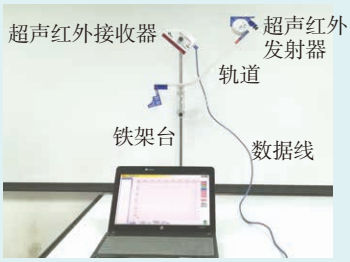
▲ **图1-3-5**　用手机结合软件描绘平抛运动的轨迹

发展空间

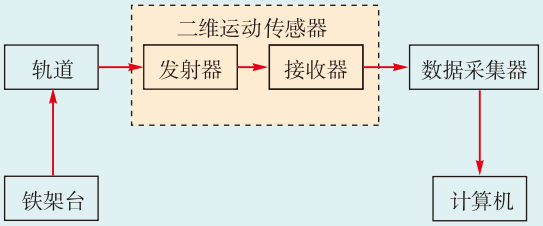
实验室

用二维运动传感器探究平抛运动的特点

如图1-3-6（a）所示，我们可以用二维运动传感器探究平抛运动的特点。装置主要由超声红外发射器和接收器组成。图1-3-6（b）为其结构示意图。该装置将对在二维平面内运动的物体的轨迹进行实时跟踪描绘，并记录在计算机屏幕上。



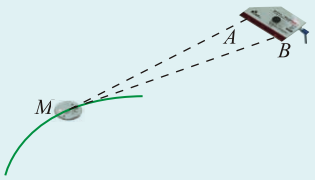
（a）实物图



（b）结构示意图

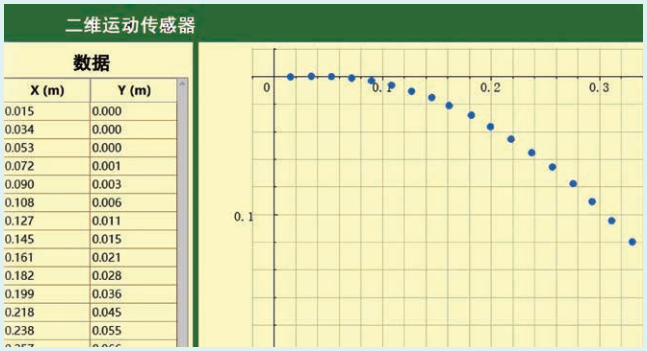
▲ **图1-3-6**

如图1-3-7所示，超声红外发射器做平抛运动时，它能够在竖直平面内向各个方向同时发射超声脉冲和红外脉冲。在它运动的平面内安放着超声红外接收器（内有两个接收器，设为A和B，并与计算机相连），A和B各自测出收到超声脉冲和红外脉冲的时间差，并由此算出它们与超声红外发射器的距离。这两个距离确定之后，由于A、B之间的距离是已知的，超声红外发射器的位置也就唯一地确定下来了，计算机可以即时给出超声红外发射器的位置坐标。



▲ **图1-3-7** 二维运动传感器的原理

如图1-3-6所示，将接收器固定在铁架台上，并连接到计算机；启动软件，接通发射器电源；将发射器放在轨道的抛射点处，点击软件按钮，校准接收器的水平坐标；点击“开始记录”按钮，并从轨道上释放发射器；待发射器完成平抛运动后，再点击“停止记录”，即可得到发射器的轨迹图，如图1-3-8所示。



▲ **图1-3-8** 计算机描出的平抛运动的轨迹

二维运动传感器，还可以用来进行许多有关曲线运动的实验，同学们不妨自己想一想、试一试。

4　研究平抛运动的规律

平抛运动是一种曲线运动，其速度的大小和方向时刻发生改变。对这种比较复杂的运动，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？

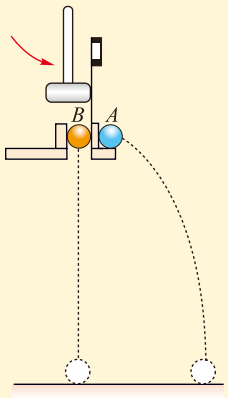
平抛运动的实验研究

讨论交流

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？
2. 假如物体没有水平速度，松手后，物体将会怎样运动？
3. 在空中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 1-4-1 所示的仪器称为平抛竖落仪。把它固定在铁架台上，*B* 球被弹片夹住，*A* 球放在弹片右边的水平平台上，两球处于同一高度。用小锤击打弹片，*A* 球沿水平方向抛出，同时 *B* 球被释放，做自由落体运动。观察两球的运动路径，比较它们落地时间的先后。



▲ **图1-4-1**　比较平抛运动和自由落体运动

（1）保持仪器离地的高度不变，改变击打弹片的力度，多次重复上面的实验，看看实验结果有什么不同，这说明了什么问题？

（2）改变仪器离地面的高度，再多次重复上面的实验，看结果有什么变化，这又说明了什么问题？

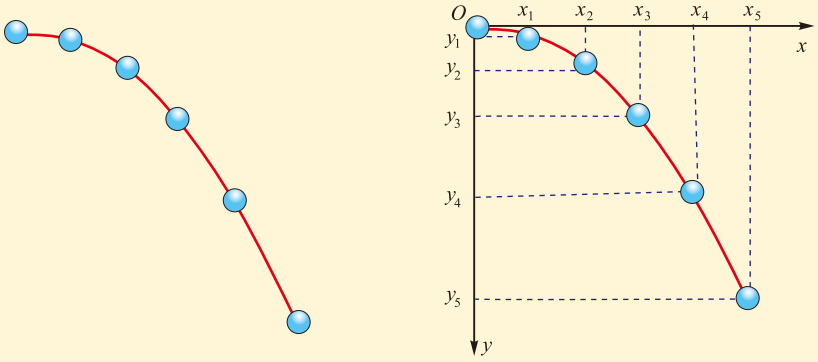
当我们保持仪器的高度不变，而改变打击弹片的力度，就是改变小球 *A* 抛出时的初速度。比较各次实验结果，可发现各次都与做自由落体运动的小球 *B* 同时落地，但各次 *A* 球落地点的距离远近不同，这说明平抛物体抛出时的水平初速度的大小不影响在空中运动的时间，只影响水平分运动的位移。

当我们改变仪器离地的高度，再多次重复上面的实验，*A*、*B* 两球仍然是同

时落地，这说明做平抛运动的物体沿竖直方向的分运动与自由落体运动相同。

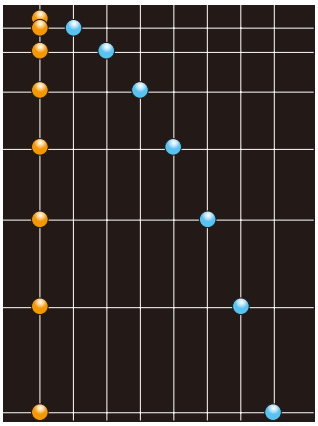
2. 图 1-3-5 记录了钢珠运动时每隔相同的时间间隔所处的位置。我们截取图 1-3-5 钢珠做平抛运动的部分图像，适当放大，并把钢珠球心的各位置用一条光滑的曲线连接起来，这就是钢珠做平抛运动的轨迹，如图 1-4-2（a）所示。以抛出点为原点，以抛出时初速度方向为 x 轴正方向，以竖直向下为 y 轴正方向建立平面直角坐标系，如图 1-4-2（b）所示。

在图 1-4-2（b）的直角坐标系中，我们把小球各位置的 x 坐标和 y 坐标都标示出来，分别为 x_1、x_2、x_3、x_4、x_5 及 y_1、y_2、y_3、y_4、y_5，它们分别是做平抛运动的小球的两个分运动各个时刻已发生位移的数值。测量沿 x 方向各段相等时间间隔内的位移值，发现 $Ox_1=x_1x_2=x_2x_3=x_3x_4=x_4x_5$，可以认为沿 x 方向的分运动是匀速运动；测量沿 y 方向各段相等时间间隔内的位移值，发现 $Oy_1 : y_1y_2 : y_2y_3 : y_3y_4 : y_4y_5 \approx 1 : 3 : 5 : 7 : 9$，可以认为沿 y 方向的分运动是初速为零的匀加速直线运动。



（a）截取平抛运动的部分　　（b）建立平面直角坐标系

▲ **图 1-4-2**　对平抛运动频闪照片的研究



▲ **图1-4-3**　平抛运动和自由落体运动的频闪照片

若要更精确地测量和计算，我们可以拍摄小球的频闪照片（图 1-4-3），沿 x 方向和沿 y 方向各固定一把刻度尺，可测量出各段位移的数值。只要知道频闪照片的时间间隔，就可以计算出它在竖直方向的加速度。其值近似等于 g，即小球在竖直方向做的是自由落体运动。

平抛运动的理论探究

讨论交流

请联系牛顿运动定律等动力学知识，解释为什么平抛物体的运动具有上述的运动规律。

物体的运动与受力情况有关。做平抛运动的物体，在空中运动的过程中，只受重力作用，方向竖直向下。在水平方向，由于惯性，物体将保持原来的速度做匀速直线运动；在竖直方向，物体受重力的作用，且竖直方向的初速度为零，因此物体在竖直方向上做自由落体运动。这就是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的原因。

如图1-4-2(b)所示，设物体水平抛出时的初速度为 v_0，则经过时间 t，它的位置坐标分别是

$$\begin{cases} x = v_0 t \\ y = \dfrac{1}{2} g t^2 \end{cases}$$

它的两个分速度分别是

$$\begin{cases} v_x = v_0 \\ v_y = gt \end{cases}$$

讨论交流

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。这是一条什么类型的曲线？

由 $x = v_0 t$，得 $t = \dfrac{x}{v_0}$，将它代入 $y = \dfrac{1}{2} g t^2$，得

$$y = \frac{g}{2v_0^2} x^2$$

式中 g、v_0 都是不随时间变化的常量，即 $y=kx^2$，这正是我们在数学中学过的抛物线方程！

例题示范

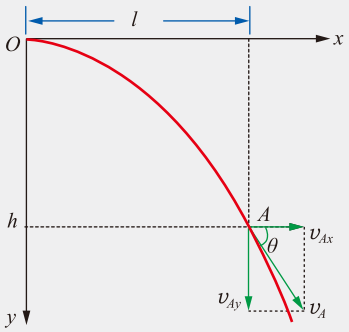
问题 一架直升机沿水平方向匀速飞行，速度是30 m/s，离地面高度是200 m，它要把机上携带的救灾物资投放到灾区的接收场。（不考虑空气阻力的影响）

（1）它需要在到达接收场前水平距离多远处释放物资？

（2）该物资接触地面时的速度大小和方向如何？

分析 直升机上携带的救灾物资随直升机沿水平方向做匀速运动，从直升机上释放的瞬间，具有水平初速度v_0=30 m/s，而后在空中做平抛运动。根据平抛运动的规律，可以分解为两个分运动，沿竖直方向做自由落体运动，沿水平方向做匀速直线运动。

解 （1）以平抛物体的抛出点为坐标原点O，初速度方向为x轴的正方向，竖直向下为y轴的正方向，建立一个平面直角坐标系xOy（图1-4-4），图中的A点为接收场的位置。



▲ 图1-4-4 建立坐标系

在竖直方向，物资做自由落体运动，所用时间为t，满足关系式

$$h=\frac{1}{2}gt^2$$

在水平方向，物资做匀速运动，水平飞行距离

$$l=v_0t$$

联立以上二式，解得

$$l=v_0\sqrt{\frac{2h}{g}}=30\times\sqrt{\frac{2\times200}{9.8}}\ \text{m}\approx191.7\ \text{m}$$

（2）落地时刻，其水平分速度$v_{Ax}=v_0$，

竖直分速度

$$v_{Ay}=gt=\sqrt{2gh}=\sqrt{2\times9.8\times200}\ \text{m/s}\approx62.6\ \text{m/s}$$

合速度大小

$$v_A=\sqrt{v_{Ax}^2+v_{Ay}^2}=\sqrt{30^2+62.6^2}\ \text{m/s}\approx69.4\ \text{m/s}$$

它与水平方向的夹角

$$\tan\theta=\frac{v_{Ay}}{v_{Ax}}=\frac{62.6}{30}\approx2.1$$

查阅数学用表得$\theta\approx64.7°$。

自我评价

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）物体在空中运动的水平位移是由_____决定的；

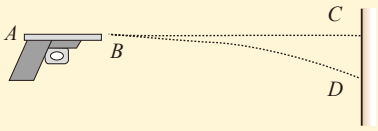
（3）物体落地时瞬时速度的大小是由_____决定的；

（4）物体落地时瞬时速度的方向是由_____决定的。

2. 如图1-4-5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B端射出，到达墙面时打在D点。不计空气阻力，求：

（1）C、D两点间的距离；

（2）弹丸打到D点时的速度。



▲ 图1-4-5

发展空间

走向社会

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（图1-4-6），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作平抛运动，分析如图1-4-7所示。

1. 射程x一定时，排球的初速度与扣球高度的关系是_____。

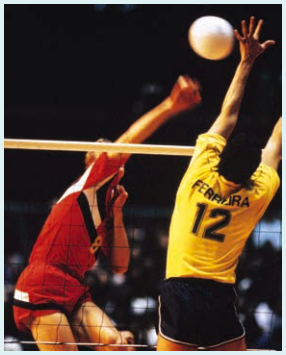
2. 根据公式_____，当高度y取_____m，射程x取_____m时初速度最大，且为_____m/s。

从以上计算中，你对排球比赛中的扣球有什么认识？

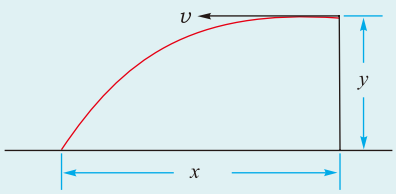
1. 排球赛场的长为18m，男排网高为2.43m。

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	最大速度/（$m \cdot s^{-1}$）
2.60	12.36
2.80	11.90
3.00	11.50



▲ 图1-4-6　排球比赛



▲ 图1-4-7　扣球后排球的运动轨迹

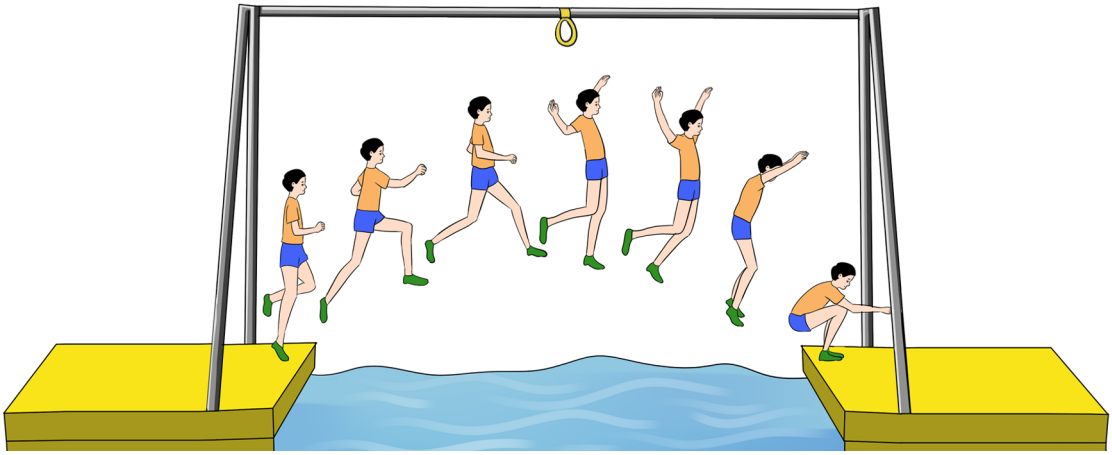
真实的排球比赛中，空气的影响不能忽略，这是因为排球的表面积比较大，空气阻力相比自身重力不是很小。此外，球的旋转也会明显地影响着球的运行轨迹。

5 斜抛运动（选学）

什么是斜抛运动

观察思考

在一项户外竞技娱乐活动中，选手以一定的初速度起跳后，没有抓住横杆上的小环，而是直接跳到对面平台上（图 1-5-1）。若要闯关成功，则两平台之间距离的最大值是多少呢？



▲ **图1-5-1** 户外闯关竞技活动

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所做的运动叫作**斜抛运动**（motion of body projected obliquely）。如图 1-5-2 所示的是一些常见的斜抛运动。



（a）铅球出手后的运动



（b）喷泉水流的运动

▲ **图1-5-2** 常见的斜抛运动

讨论交流

1. 还有哪些物体的运动可以看作斜抛运动？

2. 斜抛运动是什么性质的运动？

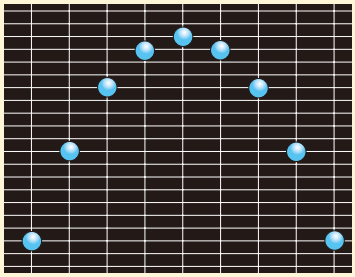
斜抛运动的特点

观察思考

仔细观察如图 1-5-3 所示的斜抛运动的频闪照片，并思考以下问题：

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？



▲ **图1-5-3**　斜抛运动的频闪照片

可以看出，斜抛运动的轨迹也是一条抛物线。

斜抛运动的规律

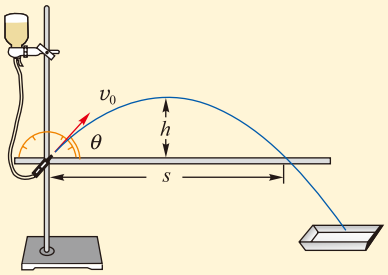
在斜抛运动中，物体初速度方向与水平方向的夹角叫作抛射角，物体能达到的最大高度叫作射高，物体从抛出点到落回同一高度的水平位移大小叫作射程。射高和射程的大小与哪些因素有关呢？我们可以通过下面的实验进行探究。

实验探究

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（图 1-5-4），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高与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 只量角器、



▲ **图1-5-4**　研究斜抛运动规律的实验装置

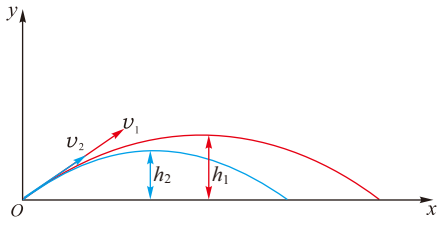
1 把刻度尺、1 根细木杆。怎样利用这些器材定性地研究喷水的射程跟哪些因素有关？怎样利用实验检验你的猜想？先跟组内同学讨论，再跟其他组的同学交流。

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？

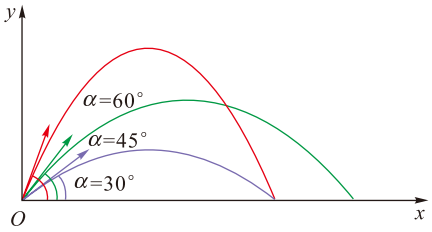
实验表明：

当斜抛运动的抛射角一定时，随着初速度的增大，射高、射程均增大，如图1-5-5所示。

当斜抛运动的初速度大小一定时，随着抛射角的增大，射高增大；当抛射角约为45° 时，射程最大，如图1-5-6所示。



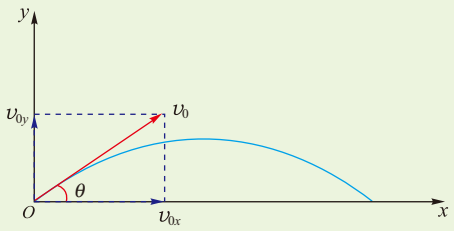
▲ **图1-5-5** 斜抛运动的射高、射程与初速度的关系（抛射角相等）



▲ **图1-5-6** 斜抛运动的射高、射程与抛射角的关系（初速度大小相等）

理论探究

以斜抛运动的抛出点为坐标原点 O，水平向右为 x 轴的正方向，竖直向上为 y 轴的正方向，建立如图 1-5-7 所示的平面直角坐标系 xOy。



▲ **图1-5-7**

初速度可以分解为 $v_{0x}=v_0\cos\theta$，$v_{0y}=v_0\sin\theta$。

在水平方向，物体的位移和速度分别为

$$x = v_x t \qquad ①$$

$$v_x = v_{0x} = v_0\cos\theta \qquad ②$$

在竖直方向，物体的位移和速度分别为

$$y = v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2 = (v_0\sin\theta)t - \frac{1}{2}gt^2 \qquad ③$$

$$v_y = v_{0y} - gt = v_0\sin\theta - gt \qquad ④$$

在最高点时，$v_y=0$，由④式得到

$$t = \frac{v_0\sin\theta}{g} \qquad ⑤$$

将⑤式代入③式得物体的射高

$$y_m=\frac{v_0^2\sin^2\theta}{2g} \qquad ⑥$$

物体落回到与抛出点同一高度时，有 $y=0$，由③式得总时间

$$t_{总}=\frac{2v_0\sin\theta}{g} \qquad ⑦$$

将②⑦式代入①式得物体的射程

$$x_m=\frac{v_0^2\sin 2\theta}{g} \qquad ⑧$$

当 $\theta=45°$ 时，$\sin 2\theta$ 最大。所以对于给定大小的初速度 v_0，沿 $\theta=45°$ 方向斜向上抛出时，射程最大。

讨论交流

1. 怎样证明斜抛运动的轨迹也是一条抛物线？

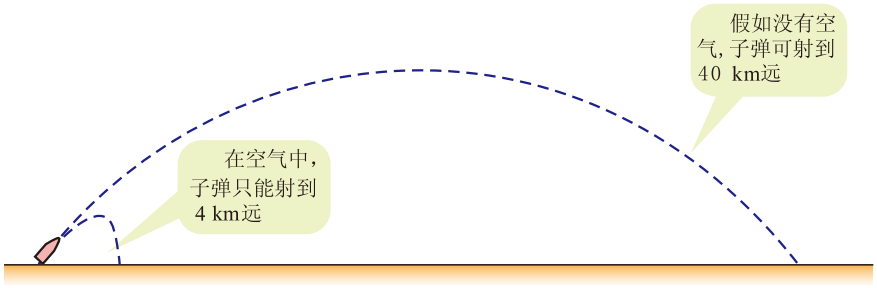
2. 做斜抛运动的物体从某一点上升到最高点和从最高点下降到同一高度所用的时间有什么关系？

3. 若图 1-5-1 中选手的起跳速度大小为 6 m/s，两平台间距的最大值不超过多少时，选手才可能成功闯关？

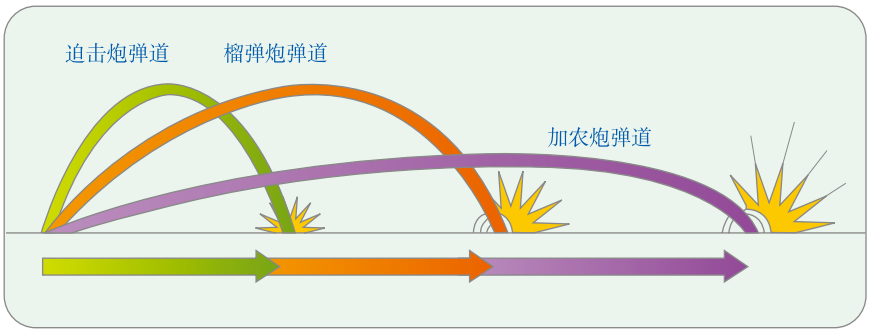
空气阻力对斜抛运动的影响

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？

从图 1-5-8 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作**弹道**，军事科学上有一门学科叫作外弹道学，专门研究弹丸在空中飞行运动的现象及其规律（图 1-5-9、图 1-5-10）。



▲ **图1-5-8** 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



▲ **图1-5-9** 各种火炮弹道示意



▲ **图1-5-10** 水管中射出的水流轨迹也是一条“弹道”

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，从距地面高h =1.80 m处，以与水平面夹角为$\theta = 45°$、大小为v_0=10 m/s的初速度斜向上抛出。求：

（1）小球达到的离地最大高度H。

（2）小球落到地面所用的时间t。（忽略空气阻力，取$g = 10\ \mathrm{m/s^2}$）

反思·小结·交流

• 学后反思

1. 曲线运动中的力、速度、轨迹三者之间存在什么样的定性关系？

2. 现实生活中的运动往往是复杂的，如飞机投下的救灾物资的运动、喷泉喷出的水流的运动，铅球出手后的运动等。我们如何研究这些纷繁复杂的运动呢？

3. 从处理平抛运动的方法中我们得到什么样的启示？

• 自主小结

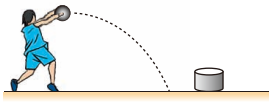
1. 物体做曲线运动的速度方向有什么特点？
2. 物体做曲线运动的条件是什么？
3. 什么是平抛运动？
4. 处理平抛运动的基本方法是什么？

• **相互交流**

1. 通过本章的学习，说说分析抛体运动这类曲线运动的基本方法。
2. 与同学一起谈谈本章内容在高中力学课程中的重要性。

本章复习题

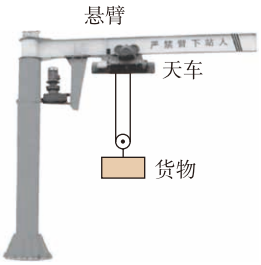
1. 如图所示，某同学将一小球水平抛出，最后球落在了正前方小桶的左侧，不计空气阻力。为了能将小球抛进桶中，他可采取的办法是（　　）

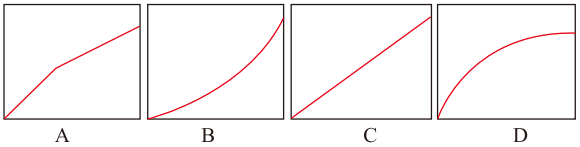


▲ 第1题图

A. 保持抛出点高度不变，减小初速度大小
B. 保持抛出点高度不变，增大初速度大小
C. 保持初速度大小不变，降低抛出点高度
D. 减小初速度大小，同时降低抛出点高度

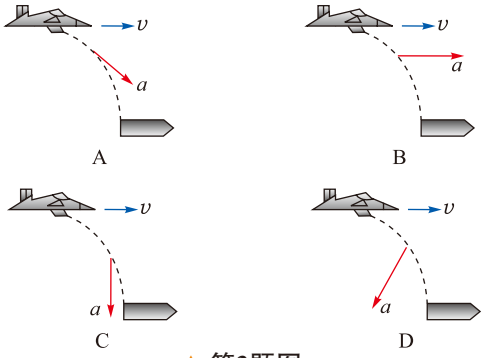
2. 各种大型的货运站中少不了悬臂式起重机。如图所示，某起重机的悬臂保持不动，可沿悬臂“行走”的天车有两个功能，一是吊着货物沿竖直方向运动，二是吊着货物沿悬臂水平方向运动。现天车吊着货物正在沿水平方向向右匀速行驶，同时又使货物竖直向上做匀减速运动。此时，我们站在地面上观察到货物运动的轨迹可能是图中的（　　）





▲ 第2题图

3. 飞机水平飞行时向下投弹，不计空气阻力，下列四幅图中正确表示炮弹加速度方向的是（　　）



▲ 第3题图

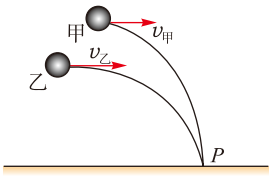
4. 如图所示，“套圈”是一项很受欢迎的小游戏。它的规则是：每次从同一位置水平抛出圆环，套住与圆环前端水平距离为 3 m 的 20 cm 高的小奖品，即为获胜。一身高 1.4 m 的儿童从距地面 1 m 高度处，水平抛出圆环。圆环半径为 10 cm，要想套住小奖品，他水平抛出的速度可能为（$g = 10\ \mathrm{m/s^2}$）（　　）

A. 7.4 m/s　　B. 7.6 m/s
C. 7.8 m/s　　D. 8.2 m/s



▲ 第4题图

5. 如图所示，将甲、乙两个小球分别从图示位置以初速度$v_{甲}$、$v_{乙}$水平抛出，结果同时落到 P 点。不计空气阻力，下列判断中正确的有（　　）



▲ 第5题图

A．它们的初速度关系是$v_{甲}>v_{乙}$

B．它们的初速度关系是$v_{甲}<v_{乙}$

C．它们一定是同时抛出

D．甲一定先抛出

6．河宽l=300 m，水速u =1 m/s，船在静水中的速度v = 3 m/s，欲分别按下列要求过河时，船头应与河岸成多大角度？过河时间是多少？

（1）以最短时间过河；

（2）以最小位移过河；

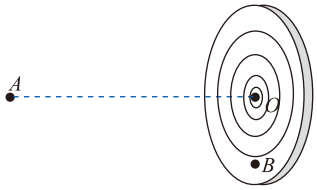
（3）到达正对岸上游100 m处。

7．如图所示，靶盘竖直放置，A、O两点等高且相距4 m，将质量为20 g的飞镖从A点沿AO方向抛出，经0.2 s落在靶心正下方的B点。不计空气阻力，重力加速度取g = 10 m/s^2，求：

（1）飞镖飞行中受到的合力；

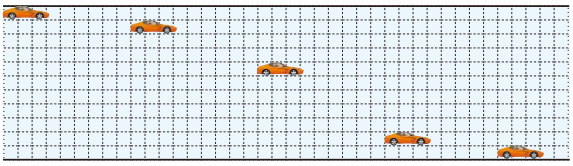
（2）飞镖从A点抛出时的速度；

（3）飞镖落点B与靶心O的距离。



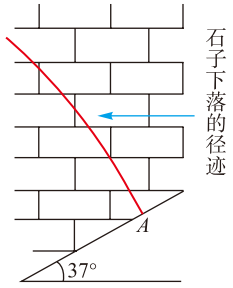
▲ 第7题图

8．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/s^2）



▲ 第8题图

9．某同学在某砖墙前的高处水平抛出一个石子，石子在空中运动的部分轨迹照片如图所示。从照片可看出石子恰好垂直打在一倾角为37° 的斜坡上的A点。已知每块砖的平均厚度为10 cm，抛出点到A点在竖直方向上刚好相距200块砖，取g =10 m/s^2，sin37° = 0.6，cos 37° = 0.8，求：



▲ 第9题图

（1）石子在空中运动的时间t；

（2）石子水平抛出的速度v_0。



第二章

匀速圆周运动

主题一　圆周运动及其基本特性

- 圆周运动
- 匀速圆周运动的向心力和向心加速度

主题二　圆周运动与现实生活

- 圆周运动的实例分析
- 圆周运动与人类文明（选学）

“飞车走壁”是观众喜爱的一项杂技表演。演员驾驶摩托车在口大底小的巨型木制“圆桶”内壁上运动。摩托车的运动有什么特征？它为什么能在内壁上运动？

这需要我们认识一种常见的曲线运动——圆周运动，并从动力学角度理解物体做圆周运动的条件。

匀速圆周运动是最简单的圆周运动。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。

1 圆周运动

形形色色的圆周运动

本章首页介绍的“飞车走壁”表演中，演员逐渐增大摩托车的速度，可从圆桶底部沿桶壁攀升，最后在同一水平面上紧贴圆桶运动，此时的运动轨迹是一个圆。物体的运动轨迹是圆的运动叫作**圆周运动** (circular motion)。这是一种常见的运动，如图 2-1-1 所示，从手表的指针到大型发电机的转子，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。

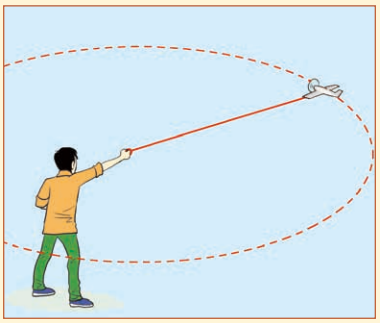
◎ **转动与圆周运动**

事实上，转动的物体上除轴外的任一质点都在绕轴做圆周运动。

观察思考



（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）电扇工作时，扇叶上的每个质点都在绕中心做圆周运动



（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？

2. 你观察过自行车吗？自行车行进时（图 2-1-2），有哪些部件绕轴转动？这些部件上的质点以什么为参考系做圆周运动？圆心在哪儿？



▲ **图2-1-2**　行进中的自行车

描述匀速圆周运动的物理量

在圆周运动中，最简单的是匀速圆周运动。

讨论交流

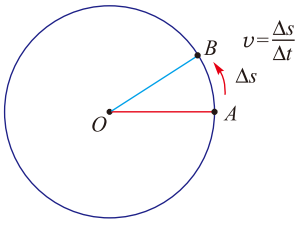
1. 什么是匀速圆周运动？

2. 有人说：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。你认为这个想法可行吗？

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，如果在任意相等时间内通过的圆弧长度都相等，这种运动就叫作**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 $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ 来描述匀速圆周运动的快慢，这个比就反映匀速圆周运动的**线速度**（linear velocity）的大小，用公式表示为

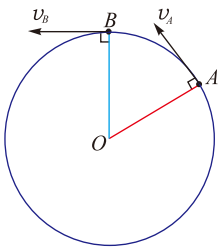
$$v=\frac{\Delta s}{\Delta t}$$



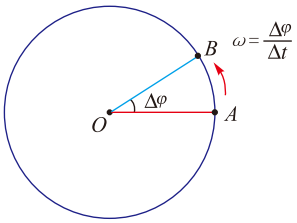
▲ **图2-1-3**　线速度的大小

在匀速圆周运动中，质点运动的线速度的大小是个常量，它与所取弧长的长短无关。由曲线运动的速度方向可知，质点在圆周运动中任一点的线速度方向就是圆周上该点的切线方向（图 2-1-4）。

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



▲ **图2-1-4**　匀速圆周运动线速度的方向



▲ **图2-1-5** 对角速度定义的说明

圆心角 φ 的大小可以利用弧长与半径的比来表示，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）。

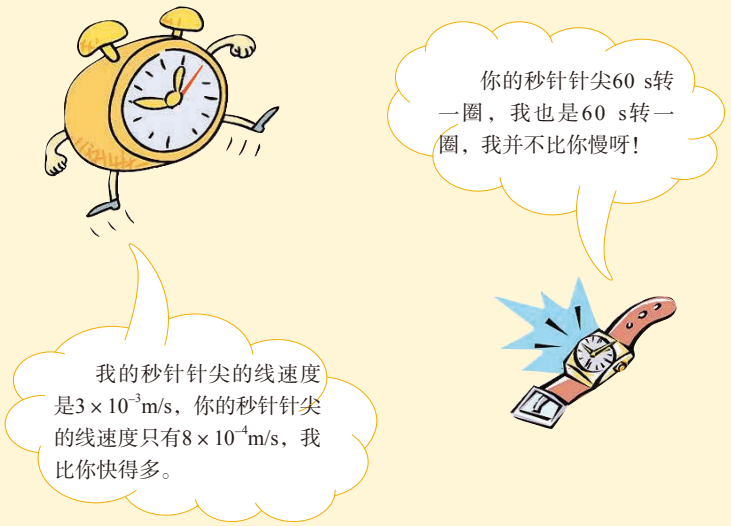
此，匀速圆周运动实际上是一种变速运动，这里所说的“匀速”只是速率不变的意思。

对于做匀速圆周运动的质点（图 2-1-5），连接质点和圆心的半径所转过的角度 $\Delta\varphi$ 跟所用时间 Δt 的比叫作匀速圆周运动的**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。

讨论交流



▲ **图2-1-6** “闹钟”与“手表”之争

“闹钟”与“手表”为什么会有如图 2-1-6 所示的快慢之争？提出你的看法，和同学进行讨论。

我们在《物理 必修 第一册》中已经学过，速度是描述运动快慢和方向的物理量。圆周运动的线速度就是速度，因此，“闹钟”的意见是正确的。角速度是描述物体（或物体的一部分）绕轴转动快慢的物理量。做匀速圆周运动的质点，也可以用角速度表示它绕圆心转动的快慢，但“转得快”与“运动得快”是两个不同的概念。

讨论交流

除了角速度以外，还可以怎样描述匀速圆周运动转动的快慢呢？

我们可以比较物体转过一圈所用时间的多少或比较物体在一段时间内转过的圈数。在物理学中，做匀速圆周运动的物体，运动一周所用的时间叫作**周期**（period），用符号 T 表示。周期也是描述匀速圆周运动转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。

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

技术中常用转速来描述物体绕轴转动的快慢。**转速**是指转动物体转过的圈数与所用时间的比，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

$$\omega = 2\pi n$$

由此，你能理解如图 2-1-7 所示的汽车转速表刻度值的含义吗？



▲ 图2-1-7　汽车转速表

线速度、角速度和周期之间的关系

设一质点沿半径为 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。对于非匀速圆周运动，角速度和线速度的大小都是变化的，但在任一时刻，角速度和线速度的瞬时值都满足这个关系。

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。

现在你能化解“闹钟”与“手表”关于秒针针尖运动的快慢之争了吗？

自我评价

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

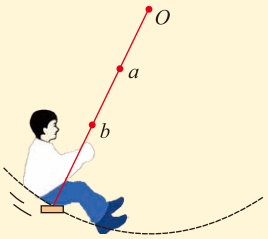
C. 角速度不变　　D. 周期不变

2. 地球绕太阳公转的运动可以近似地看作匀速圆周运动，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. 如图2-1-8所示，小强正在荡秋千。关于绳上a点和b点的线速度和角速度，下列关系正确的是（　　）

A. $v_a=v_b$　　B. $v_a>v_b$

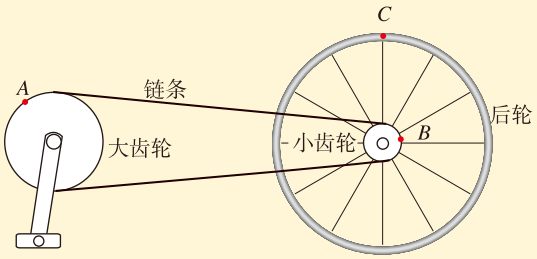
C. $\omega_a=\omega_b$　　D. $\omega_a<\omega_b$



▲ 图2-1-8

4. 如图2-1-9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。

5. 观察自行车，你能运用所学的圆周运动的知识提出什么样的问题？



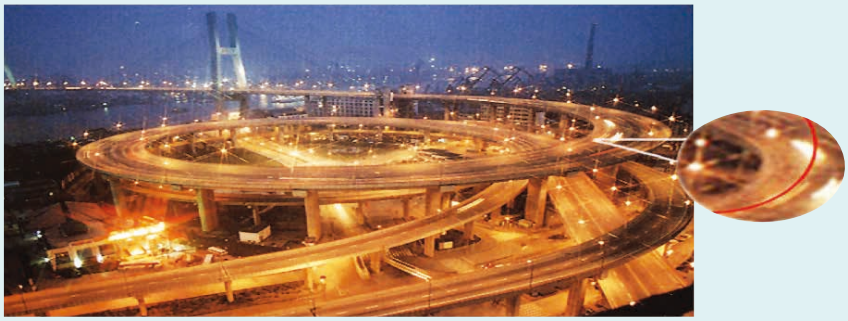
▲ 图2-1-9

发展空间

课外阅览

圆周运动与一般曲线运动的关系

如图 2-1-10 所示，车辆的运动轨迹通常不是圆周，而是比较复杂的曲线，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 2-1-10 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？

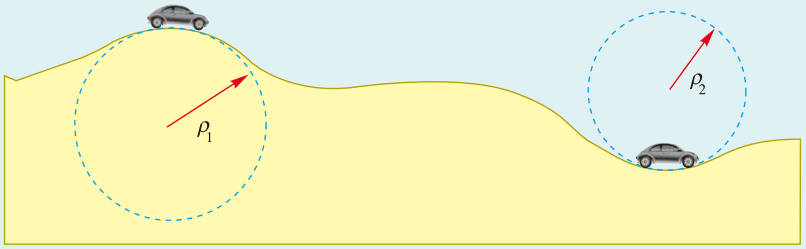


▲ **图2-1-10**　上海南浦大桥夜景。图中的一缕缕曲线是用照相机长时间曝光摄得的，显示的是车辆运动的径迹

设计师常用如图 2-1-11 所示的曲线板来画比较复杂的弧线。任何一条平滑的曲线都可以看作是由一系列不同半径的圆弧连接而成的，这些圆弧的半径叫作曲率半径，记作 ρ（图 2-1-12）。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2-1-11**　曲线板



▲ **图2-1-12**　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

2　匀速圆周运动的向心力和向心加速度

匀速圆周运动是变速运动。那么，它的受力情况和加速度是怎样的？

● 什么是向心力

在圆周运动这一特殊的曲线运动中，物体的受力有什么特点呢？本章首页图片的“飞车走壁”中，摩托车的受力比较复杂，我们通过下面这些简化的情形来研究做圆周运动的物体的受力情况。

活动 | 移动乒乓球

如图 2-2-1（a）所示，在桌上有一个倒扣着的玻璃杯，杯中有一个乒乓球，请你设法将它从一张课桌缓慢移到另一张课桌上。

（**要求**：使杯口始终朝下，手不能接触乒乓球，不能用其他器材。）

用如图 2-2-1（b）或（c）所示的玻璃杯能取得成功吗？

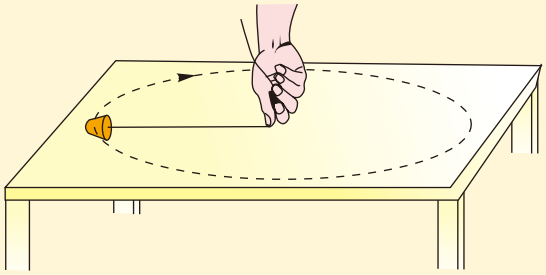


（a） （b） （c）

▲ 图2-2-1 移动乒乓球

活动 | 感受向心力

如图 2-2-2 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2-2-2 体验手拉绳的力

1. 拉力的方向是怎样的？
2. 减小旋转的速度，细绳的拉力怎样变化？
3. 增大旋转半径，拉力怎样变化？
4. 松手后，物体还能维持圆周运动吗？
5. 换一个质量较大的铁球进行实验，拉力怎样变化？

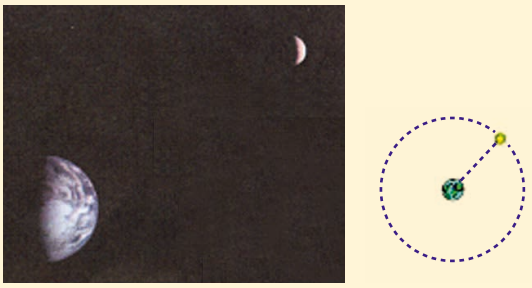
当你抡动细绳，使物体做匀速圆周运动时，作用在物体上的拉力总是沿绳子指向圆心。那么，做匀速圆周运动的物体，是否都受到指向圆心的力的作用呢？

观察思考

1. 如图 2-2-3（a）所示，月球绕地球做匀速圆周运动时，它受到了指向圆心的力的作用吗？

2. 如图 2-2-3（b）所示，“旋转秋千”做匀速圆周运动时，它受到了指向圆心的力的作用吗？它所受的作用力的合力指向圆心吗？

3. 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了速度的大小？其方向与线速度方向有什么关系？



（a）月球在地球引力作用下所做的运动，可视为匀速圆周运动



（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2-2-3**　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作**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。

讨论交流

请同学间相互交流，解释本节开始关于移动乒乓球的“活动”中看到的现象，并试着简要分析章首情景中“飞车走壁”的原理。

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”的活动表明，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。

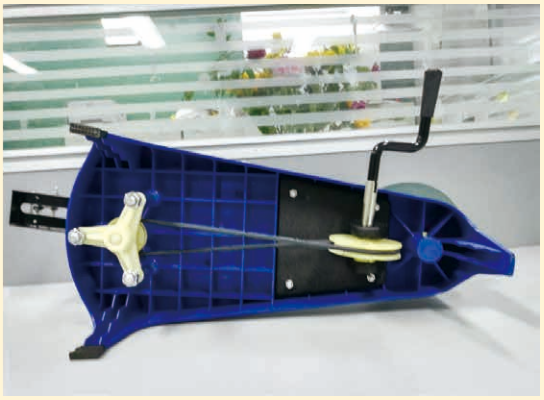
那么，做匀速圆周运动的物体所需向心力的大小与质量、角速度和半径之间有什么定量关系？

实验探究 | 探究向心力F的大小与质量m、角速度ω和半径r之间的关系

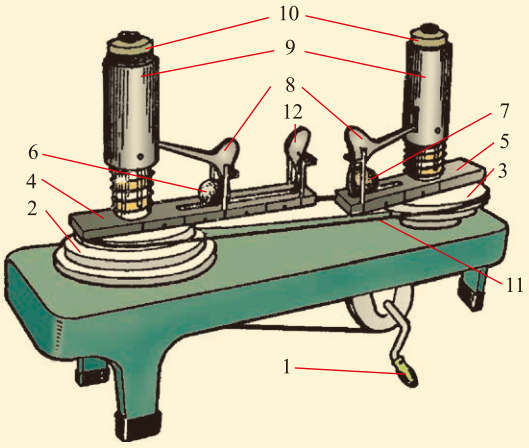
我们用如图 2-2-4 所示的实验装置来探究这个关系。请仔细观察实验仪器的结构，弄清它为什么能测定向心力 F 的大小与质量 m、角速度 ω 和半径 r 之间的关系。



（a）实物图（平视）



（b）实物图（底部）



（c）结构说明

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2-2-4** 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

这个实验装置的巧妙之处在于：

①通过皮带连接，可以使两个变速轮塔的转速按不同的实验目的进行变换（相同或不同）。

②两块长短不同的带槽金属板分别与不同轴固定连接，金属板随各自的轴同步转动。转动时，由于没有一个构件给槽内的球提供向心力，球就会出现向外运动的趋势，挤压挡板。

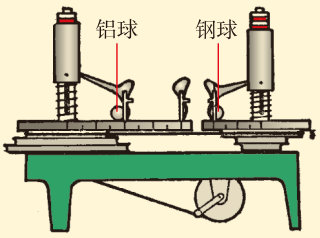
③通过横臂使弹簧测力筒上下移动，从标尺进行读数，可测量出两个球对挡板的压力大小。这个力与球做圆周运动所需的向心力大小相等，由此就测出了球做圆周运动的向心力。而球的质量 m 可以任意调换；角速度 ω 由手柄控制，可任意调节；半径 r 有多个挡位可供选择。

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。

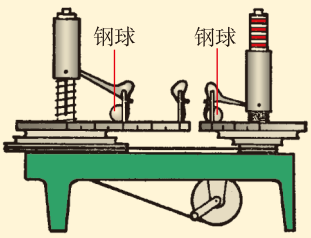
1. 把皮带放在皮带盘第一挡，此时转速比为 1 : 1。将质量不同的铝球和钢球分别放在长、短槽上半径相等的横臂挡板内侧，即保持 ω 和 r 相同。然后摇动手柄，记录实验数据，研究小球做圆周运动所需向心力 F 与质量 m 之间的关系。（图 2-2-5）

2. 把皮带放在皮带盘第二挡（第三挡），此时转速比为 1 : 2（1 : 3）；将质量相同的钢球分别放在长、短槽上半径相等的横臂挡板内侧，即保持 m 和 r 相同。然后摇动手柄，记录实验数据，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。（图 2-2-6）

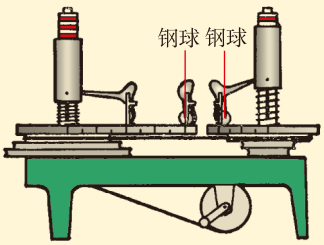
3. 把皮带放在皮带盘第一挡，此时转速比为 1 : 1；将长槽上的钢球由第一挡板内侧移到第二挡板，此时两个质量相同的钢球相对转轴的半径之比为 2 : 1。然后摇动手柄，记录实验数据，研究小球做圆周运动所需向心力 F 与半径 r 之间的关系。（图 2-2-7）



▲ **图2-2-5**　研究向心力与质量之间的关系



▲ **图2-2-6**　研究向心力与角速度之间的关系



▲ **图2-2-7**　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、角速度和运动半径之间有什么关系？

精确的实验表明：做匀速圆周运动所需向心力的大小，跟转动半径 r 成正比，跟角速度 ω 的平方成正比，跟物体的质量 m 成正比。用公式表示为

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

由于 $v = r\omega$，可得

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

因为向心力的方向总与物体的速度方向垂直，所以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？

这两个表达式并不矛盾。在角速度 ω 不变时，向心力 F 的大小与半径 r 成正比；当线速度 v 的大小不变时，向心力 F 的大小与半径 r 成反比。

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

F 和向心加速度 a 的大小不变，但向心力 F 和向心加速度 a 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。

讨论交流

向心力和向心加速度的公式是从匀速圆周运动得出的，它是否也适用于一般的圆周运动呢？

当线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时刻的向心力和向心加速度的大小，必须用质点在该时刻的瞬时速度值。

此外，还有一点要特别注意：对于做匀速圆周运动的物体，其向心加速度就是它的加速度，所受到的向心力就是它受到的合力；而对于做非匀速圆周运动的物体，它在某一时刻的向心加速度只是它的加速度的一个分量（另一个分量沿切线方向，称为切向加速度），它受到的向心力也只是它受到的合力中指向圆心方向的一个分力（另一个分力沿切线方向）。

例题示范

问题　“神舟五号”飞船（图2-2-8）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，地球半径为6.37×10^3 km，试求飞船在圆形转道上运行时的向心加速度及其所受的向心力。



▲ **图2-2-8**　“神舟五号”飞船

分析 已知飞船运动的周期，可由公式$\omega = \frac{2\pi}{T}$求出角速度；结合飞船距地面的高度和地球半径，可求飞船的轨道半径；再根据公式$a = \omega^2 r$可求向心加速度；最后根据牛顿第二定律求出向心力。

解 由已知数据可算出飞船的角速度

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{90 \times 60}\ \text{rad/s} \approx 1.16 \times 10^{-3}\ \text{rad/s}$$

飞船向心加速度的大小

$$a = \omega^2 r = (1.16 \times 10^{-3})^2 \times (6370 + 343) \times 10^3\ \text{m/s}^2$$
$$\approx 9.03\ \text{m/s}^2$$

飞船所受的向心力

$$F = m\omega^2 r = 8000 \times (1.16 \times 10^{-3})^2 \times (6370 + 343) \times 10^3\ \text{N}$$
$$\approx 7.23 \times 10^4\ \text{N}$$

拓展 在本题中，还可以用哪些方法求向心力？

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

自我评价

1. 在某旋转餐厅（图 2-2-9），餐桌离转轴中心约 20 m，转动一周的时间约 1h，请估算，就餐的顾客随餐厅旋转所需的向心力大约是多少？它与重力的比是多少？为什么感觉不到向心力的作用？



▲ 图2-2-9 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 0.2m 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。

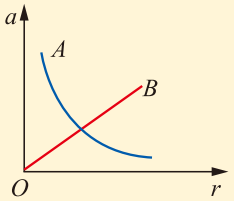
4. 如图 2-2-10 所示是 A、B 两物体做匀速圆周运动的向心加速度 a 的大小随半径 r 变化的图像，其中 A 为反比例函数图像的一个分支，由图可知（　　）

A. A 物体运动的线速度大小不变

B. A 物体运动的角速度不变

C. B 物体运动的角速度不变

D. B 物体运动的线速度大小不变



▲ 图2-2-10

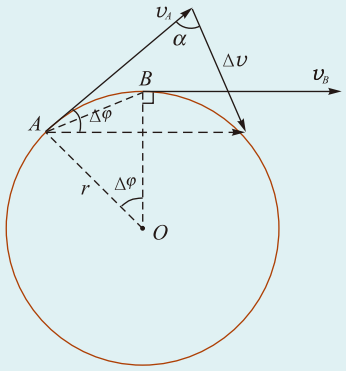
发展空间

课外阅览

利用加速度定义求向心加速度

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，使起点 B 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2-2-11所示。



▲ **图2-2-11**　匀速圆周运动中速度和加速度的关系

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：$\dfrac{\Delta v}{v}=\dfrac{\Delta l}{r}$，所以有 $\dfrac{\Delta v}{\Delta t}=\dfrac{v}{r}\cdot\dfrac{\Delta l}{\Delta t}$。

用 Δs 表示弧 AB 的长度。当 $\Delta t\to 0$ 时，$B\to A$，弦长 $\Delta l\to$ 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 v 的大小。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。

变速圆周运动的加速度

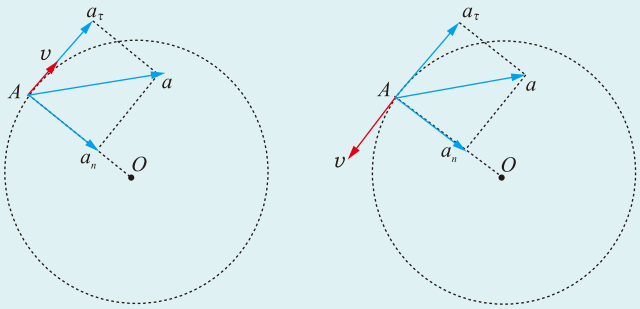
如果物体做变速圆周运动，那么加速度的方向还指向圆心吗？

答案是：当物体做变速圆周运动时，物体的加速度 a 不指向圆心，而与速度成某一个角度。我们把加速度沿速度方向和垂直于速度的方向（即半径方向）进行分解，其中沿速度方向的分量 a_τ 称为切向加速度，它反映速度大小变化的快慢。若 a_τ 与速度方向一致，则表示速度在增大，反之，则表示速度在减小。垂直于速度方向的分量 a_n 仍称为向心加速度（或称法向加速度），它只改变速度的方向而不改变速度的大小。

如图 2-2-12（a）所示，物体的加速度 a 沿切线方向的分量 a_τ 与速度 v 同向，物体做加

速圆周运动。

如图 2-2-12（b）所示，物体的加速度 a 沿切线方向的分量 a_τ 与速度 v 反向，物体做减速圆周运动。



（a）加速圆周运动　　（b）减速圆周运动

▲ **图2-2-12**　变速圆周运动的加速度方向

❸ 圆周运动的实例分析

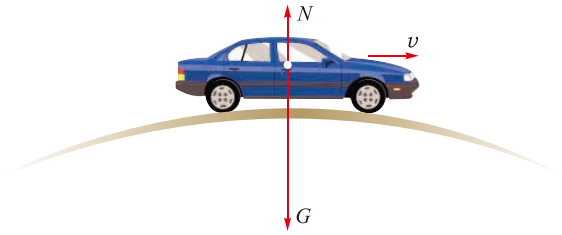
在现实生活中，圆周运动随处可见。有的物体真正沿圆周做周期性运动；也有的物体做一般的曲线运动，其中的很多小段都可以看作圆周运动的一部分。

对于这些圆周运动，按速率是否变化可分为匀速圆周运动和非匀速圆周运动两大类；按运动轨迹所处的平面划分，常见的有水平面内的圆周运动、竖直面内的圆周运动以及倾斜面内的圆周运动。本节我们将讨论几个简单的圆周运动实例。

● 汽车通过拱形桥

汽车通过拱形桥时的运动可看作圆周运动的一部分，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，把它抽象成质点模型。分析汽车所受的力，求得桥对汽车的支持力 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所需的向心力。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' 小于汽车所受的重力 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？

讨论交流

公路在通过小型水库的泄洪闸的下游时，常常要修建凹形桥，也叫“过水路面”。如图 2-3-2 所示，汽车通过凹形桥的最低点时，汽车对桥的压力比汽车所受的重力大还是小？汽车的速度越大，汽车对桥面的压力越大还是越小？



▲ **图2-3-2**　汽车通过凹形桥

“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，如图 2-3-3 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？

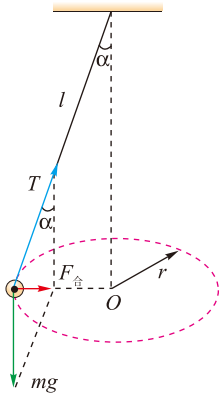
例如：“旋转秋千”中的缆绳跟中心轴的夹角与哪些因素有关？

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，与如下的情形类似：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，这种装置叫作圆锥摆。小球做匀速圆周运动的向心力是其所受的重力 mg 与悬线拉力 T 的合力 $F_{合}$ 提供的，如图 2-3-4 所示。



▲ 图2-3-3 “旋转秋千”



▲ 图2-3-4 圆锥摆

$F_{合}$ 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

解决匀速圆周运动问题的关键是分析什么力提供了向心力。

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l\cos\alpha}}$$

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？

火车转弯

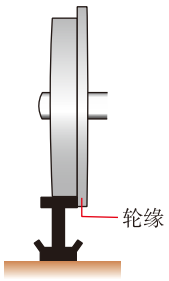
讨论交流

火车在水平面内以恒定的速率转弯时，可以把它视为匀速圆周运动，其向心加速度指向圆心，它所需的向心力由谁提供呢？

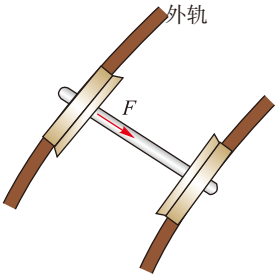
假定你是一个铁路设计的工程师，你打算用什么方法为火车转弯提供向心力？与你的同学交流并评价各自的方法。

观察火车的车轮，可以发现，车轮内侧有突出的轮缘（图 2-3-5），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 2-3-6 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。

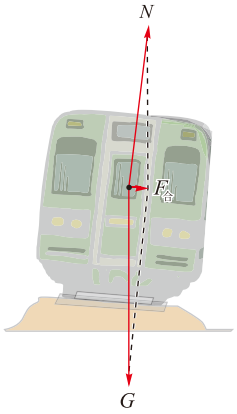
在通常的设计中，设计师总使转弯处的外轨略高于内轨（图 2-3-7），火车转弯时铁轨对火车的支持力 N 的方向不再是竖直的，而是斜向弯道的内侧，它与重力 G 的合力为火车转弯提供了一部分向心力。这就减轻了轮缘与外轨的挤压。在修筑铁路时，要根据弯道的半径和设计的行驶速度，确定内外轨的高度差，使火车转弯时所需的向心力几乎完全由重力 G 和支持力 N 的合力来提供。



▲ 图2-3-5 火车车轮内侧有突出的轮缘



▲ 图2-3-6 火车转弯时，由外轨对轮缘的弹力提供向心力

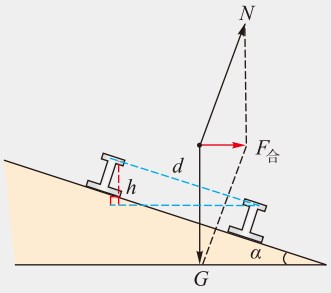


▲ 图2-3-7 火车转弯时，由重力和支持力的合力提供向心力

例题示范

问题 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？

分析 若火车转弯时内外轨均不受轮缘的挤压，则火车所需的向心力由火车所受的重力和轨道对火车支持力的合力提供（图2-3-8）。根据图中的几何关系，可以求出支持力与竖直方向的夹角。



▲ 图2-3-8 倾斜的铁路路基

解 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

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

解得

$$\tan\alpha = \frac{v^2}{gR}$$

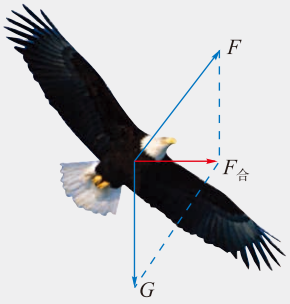
由于轨道平面和水平面间的夹角一般较小，可以近似地认为

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

代入上式，得

$$h = \frac{v^2 d}{Rg} = \frac{20^2 \times 1.435}{300 \times 9.8}\ \text{m} \approx 0.195\ \text{m}$$

拓展　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，也是依靠倾斜翼面来获得所需要的向心力。鸟或飞机在空中飞翔，受到垂直于翼面的作用力——升力，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2-3-9，图2-3-10）。



▲ **图2-3-9**　鹰盘旋时受到的力



▲ **图2-3-10**　飞机的盘旋

离心运动

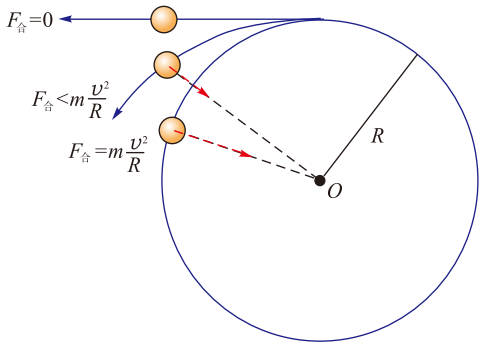
活动

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 2-3-11），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2-3-11**　小小甩干机

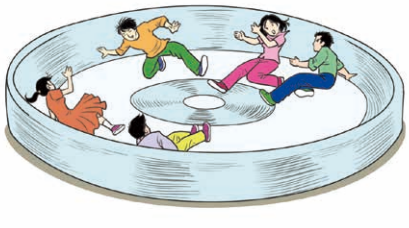
在做圆周运动时，由于合外力提供的向心力消失或不足，以致物体沿圆周运动的切线方向飞出或远离圆心而去的运动叫作**离心运动**，如图 2-3-12、图 2-3-13 所示。



▲ **图2-3-12** 离心运动

离心运动有许多重要的应用，利用离心运动的机械叫作离心机械。

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 2-3-14），衣服就被甩干了。

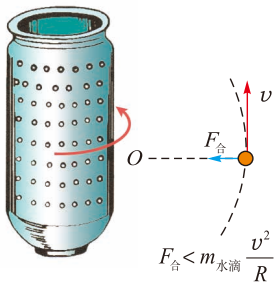


（a）在游乐园里玩“魔盘”游戏的人，会被抛到盘的边缘地带



（b）当拉力突然消失时，链球做离心运动，沿切线方向飞出

▲ **图2-3-13** 离心运动



▲ **图2-3-14** 洗衣机脱水的原理



▲ **图2-3-15** 低温离心机

离心机是科研、生产中重要的实验装置，它可以把一些混合物中不同的成分分离开。在医学领域，常将血液放入低温离心机（图 2-3-15）内，离心机高速转动时，血液中的红细胞所受合力不足以提供向心力而做离心运动，沉积于窗口底部，从而实现血液中不同成分的分离。

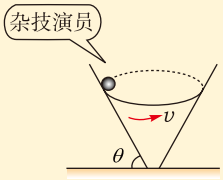
离心运动在生产和生活中广泛存在，但它并不总是有利的，有时会造成危害（图 2-3-16），对圆周运动进行受力分析，能帮助我们找到有效的控制方法。



▲ **图2-3-16**　在道路转弯的地方，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

自我评价

1. 本章首页图中呈现的“飞车走壁”情景可简化成如图 2-3-17 所示的情形，若不考虑摩托车动力及一切阻力，人和摩托车（看成一个质点）在某一水平面内做匀速圆周运动，则这时人和摩托车受到的力有（　　）



▲ **图2-3-17**

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

2. 如图 2-3-18 所示，洗衣机脱水筒在转动时，衣物贴靠在匀速转动的圆筒内壁上而不掉下来，则衣物（　　）



▲ **图2-3-18**

A. 受到重力、弹力、静摩擦力和离心力四个力的作用

B. 所需的向心力由重力提供

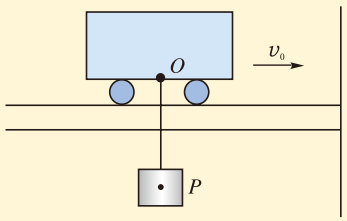
C. 所需的向心力由弹力提供

D. 转速越快，弹力越大，摩擦力也越大

3. 飞机俯冲时，在最低点附近做半径为 200 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）

4. 在高速公路的拐弯处，路面都筑成外高内低的形状，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（即垂直于行驶方向）摩擦力等于零，则 θ 应为多大？

5. 如图 2-3-19 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 3 t，行车以 3 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大？（$g = 10$ m/s^2）



▲ **图2-3-19**　行车

发展空间

实验室

大家都看过杂技演员表演的“水流星”（图2-3-20）。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？自己动手做一个“水流星”，感受一下。



▲ **图2-3-20** 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。

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。我们的祖先很早就在生产和生活中利用物体的转动了。在人类发展的历程中，圆周运动的应用对社会进步起到了十分重要的推动作用。



▲ **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特点（图 2-4-2），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，车轮第一次把圆周运动和直线运动联系起来，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，这是一项伟大的发明（图 2-4-3）。



▲ **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

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。



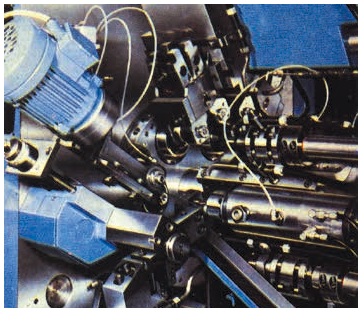
▲ **图2-4-4**　“吱吱”鸣唱了千年的水车

圆周运动与工业技术

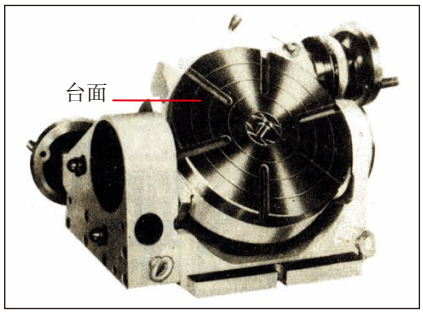
圆周运动的应用解决了蒸汽机技术中近一个世纪的困惑，没有圆周运动的应用，蒸汽机（图 2-4-5）就只能停留在往复运动状态，不能成为原动力，人类社会就不会有工业革命。在工业化过程中首先是机械化的实现，没有圆周运动的基础理论就不可能设计和制造出齿轮和轴的机构，没有齿轮和轴就不可能有各种大型的、精密的、专用的或通用的机器（图 2-4-6 至图 2-4-9），不可能有金属切削机床、矿山机械、化工机械、能源机械、交通机械、仪器仪表和医疗卫生器械，也不可能有发电机、电动机。离开齿轮和轴的传动链，任何一部机器都会变成一堆废铁。可以说，没有圆周运动就没有机械化和工业化。即使在信息技术、数字技术越来越发达的当代，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



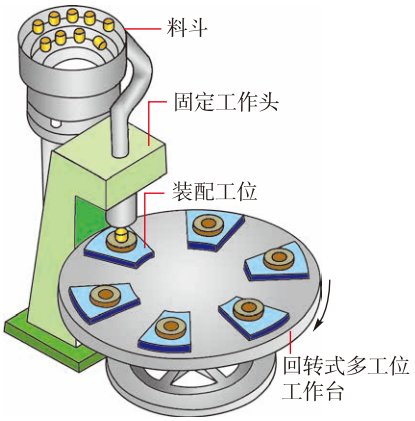
▲ **图2-4-5** 瓦特（James Watt）改进后的蒸汽机



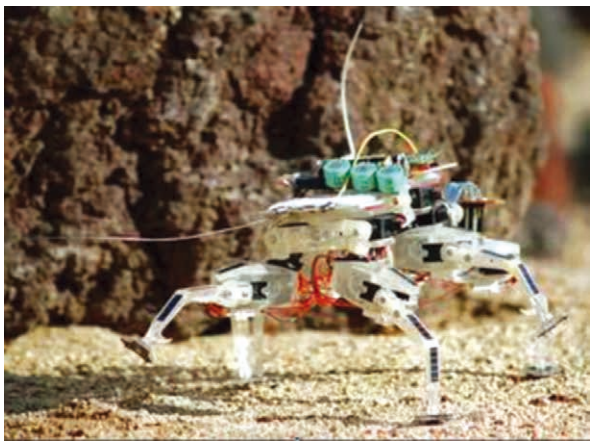
▲ **图2-4-6** 在一台多轴自动车床上可以同时从几个方向对工件实现多种工艺的切削加工，既提高效率，又提高精度



▲ **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



▲ **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** 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

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，它们大都利用了圆周运动。



▲ **图2-4-10**　世界上第一台回旋加速器

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仪（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。



▲ **图2-4-11**　运载火箭中的陀螺仪

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，而且要在真空中运行。



▲ **图2-4-12**　用超速离心机提取DNA分子

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城市的结构设计中，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



▲ **图2-4-14** 游乐园中的圆周运动



▲ **图2-4-15** 花样滑冰的优美舞姿

电视塔和高层建筑往往利用自己的高空优势设计旋转餐厅，顾客静坐转椅，品茶饮酒、会客交友的同时，还可以环视全城美景，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（图2-4-14），为人们提供了节假日和业余生活的文化享受。

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赏心悦目的旋转（图 2-4-15），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。

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（图 2-4-16）。



▲ **图2-4-16** 应用圆周运动的玩具

发展空间

物理在线

车轮与人类历史的发展

车轮产生于人类搬运物体的劳动实践中，它是人类历史上最重要的发明之一。从现有的文献记载上看，人类使用车轮已有近 6000 年历史。可以说，人类的发展离不开车轮，车轮的发展从另一个侧面反映了人类的进步。



▲ 图2-4-17　车轮的发展

在石器时代，人类难以将木头加工成合适的圆柱形，更不必说复杂到带辐条的轮子了。所以，车轮的出现只能是青铜时代以后的事。

5500 多年前，生活在美索不达米亚平原的苏美尔人首先发明了车轮。最原始的车轮是圆木片。

中国古人关于轮子的运用是超前的。计里鼓车发明于东汉时期，是中国古代用于计算道路里程的车辆，又称“司里车”“大章车”。计里鼓车上有两个木人，车行一里就击一次鼓。这是近代里程表、减速器的先驱，是科学技术史上的一项重大成就。

木制车轮没有减震功能，但在没有技术突破的年代，它被人们沿用了几千年。1493—1496 年，哥伦布第二次探索新大陆时，在西印度群岛中的海地岛发现橡胶，并将它带回了欧洲。若干年以后，橡胶得到了广泛的应用，车轮也逐渐由木制变成了由硬橡胶制造。1845 年，第一条充气轮胎诞生，让人们告别了颠簸的时代。

未来，随着科技的进步，车轮还有广阔的发展空间，无气轮胎、胎压自控轮胎都可能出现在我们的生活中。而有朝一日，车轮会不会完成它几千年承载人类文明前行的使命，告别我们呢？请通过查询互联网，了解可能到来的无车轮时代。

反思·小结·交流

• 学后反思

1. 圆周运动的典型特点是什么？根据这一特点，我们又引入了哪些物理量来描述圆周运动？
2. 做匀速圆周运动的物体，受力有什么特征？

• 自主小结

1. 准确描述圆周运动的线速度、角速度、周期、频率、向心力、向心加速度等概念。
2. 在具体问题中，向心力的来源有哪些？请举出一些例子。
3. 什么是离心运动？说说它有哪些应用和危害。

• 相互交流

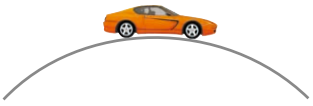
1. 通过本章学习，说说如何分析圆周运动。
2. 说说人类关于圆周运动的认识和应用在社会进步中所起的作用。

本章复习题

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行驶时，其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进行比较，看看在什么样的路面上行驶，车对路面的压力较大。（g 取 10 m/s^2）



▲ 第3题图

4. 某同学在轻杆 OA 的 A 端固定一个可视为质点的重物，轻杆以 O 点为圆心在竖直平面内做圆周运动。则下列说法正确的是（　　）

A. 在最高点，杆对重物的作用力可能向上，也可能向下

B. 在最低点，杆对重物的作用力可能向上，也可能向下

C. 在最高点，速度越大，杆对重物的作用力一定越小

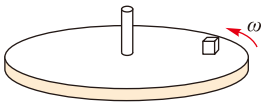
D. 在最低点，速度越大，杆对重物的作用力越大

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. 如图所示，在以角速度 ω = 2 rad/s 匀速转动的水平圆盘上，放一质量 m = 5 kg 的滑块，滑块离转轴的距离 r = 0.2 m，滑块跟随圆盘一起做匀速圆周运动（二者未发生相对滑动）。

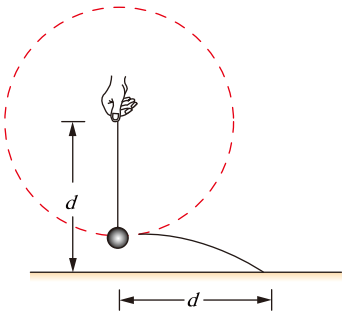
（1）求滑块运动的线速度大小；

（2）求滑块受到的摩擦力的大小。



▲ 第6题图

7. 小明站在水平地面上，手握不可伸长的轻绳一端，绳的另一端系有质量为 m 的小球，甩动手腕，使球在竖直平面内做圆周运动。当小球某次运动到最低点时，绳突然断掉，小球飞行水平距离 d 后落地，如图所示。已知握绳的手离地面高度为 d，手与小球之间的绳长为 $\frac{3}{4}d$，重力加速度为 g，忽略手的运动半径和空气阻力。求：



▲ 第7题图

（1）绳断时小球的速度大小 v_1 和小球落地时的速度大小 v_2；

（2）小球在运动过程中，细绳受到的最大拉力。



翟志刚——中国第一位在太空行走的宇航员

第三章

万有引力定律

主题一　天体运动及探因

- 天体运动
- 万有引力定律

主题二　万有引力定律的应用

- 预言未知星体　计算天体质量
- 人造卫星　宇宙速度
- 太空探索（选学）

牛顿发现的万有引力定律揭示了天体运行的规律与地面上物体运动的规律具有内在的一致性，成功地实现了天上的力学与地上的力学的统一。在这一理论指导下，人类迈向了太空。牛顿建立的力学理论显示出无穷的魅力。

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。

中国古代对宇宙的认识

中国古代宇宙理论产生于周代至晋代，形成的所谓“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。

浑天说始于战国时期，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。”这是宇宙理论中，从感性认识到理性认识的一次飞跃，是人类认识宇宙历史的一个重要里程碑。



▲ **图3-1-2** 中国古代著名的天文仪器——浑天仪

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。

浑天仪（图 3-1-2）是西汉时期落下闳制造的用于测量天体位置的仪器，是我国古代天文学领域的一项杰出成就。在欧洲，一直到 16 世纪左右，才出现与我国的浑天仪同等水平的仪器。

地心说与日心说

讨论交流

地球上的人们总感觉其他天体在环绕地球运动。然而，运动是相对的，就像我们在行驶的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？如果其他天体和地球都在运动，它们的运动会有什么特点呢？

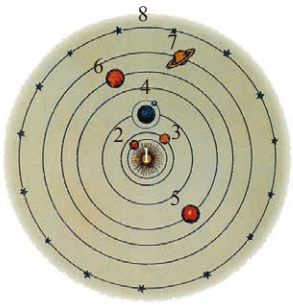
早期，人类只是对一些直观的自然现象（如太阳、月亮的东升西落）加以简单的解释。公元 150 年前后，古希腊学者托勒密（Cloudius Ptolemy，约 90 —168）在他的著作《天文学大成》中构建了地心宇宙体系。他认为地球位于宇宙的中心，是静止不动的，其他天体围绕地球转动。

波兰天文学家哥白尼（图 3-1-3）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 3-1-4）。

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和科学上的革命。



▲ **图3-1-3**　哥白尼（Nicolaus Copernicus，1473 —1543）



▲ **图3-1-4**　哥白尼的日心系

《天球运行论》的出版，标志着科学开始从各种传统观念的束缚中和宗教神学的桎梏下解放出来。哥白尼开辟了科学的新时代，使古代科学走向了以牛顿力学为代表的近代科学。

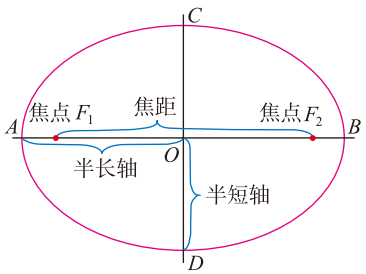
开普勒行星运动定律

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

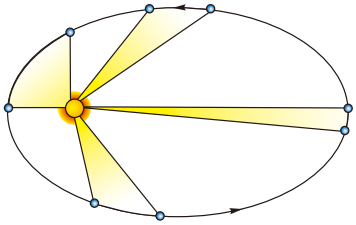
开普勒（图 3-1-5）是德国天文学家，第谷是他的导师。在研究第谷的观测资料时，他运用行星绕太阳做匀速圆周运动的模型算出了火星运行轨道数据，发现与第谷的观测数据之间有一个不大的偏差，开普勒坚信他导师的观测数据是不会出错的，从而断然放弃了圆轨道，而用椭圆轨道进行计算，结果偏差消除了。1609 年开普勒的《新



▲ **图 3-1-5**　开普勒（Johannes Kepler，1571—1630）



▲ **图 3-1-6** 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



▲ **图3-1-7** 开普勒第二定律图示

天文学》出版，在此书中他发表了行星运动第一定律、第二定律。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。

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 3-1-6）。

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 3-1-7 中，阴影部分的面积相同，可知行星越接近太阳，运动越快；越远离太阳，运动越慢。

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。

自我评价

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个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	1.50×10^{11}	3.16×10^{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

物理在线

通过查阅图书或浏览互联网，查找太阳系各行星（包括地球）的卫星的相关信息（包括文字、数据、动画、图片等）。它们的运动遵循开普勒定律吗？

2 万有引力定律

苹果落地引发的思考

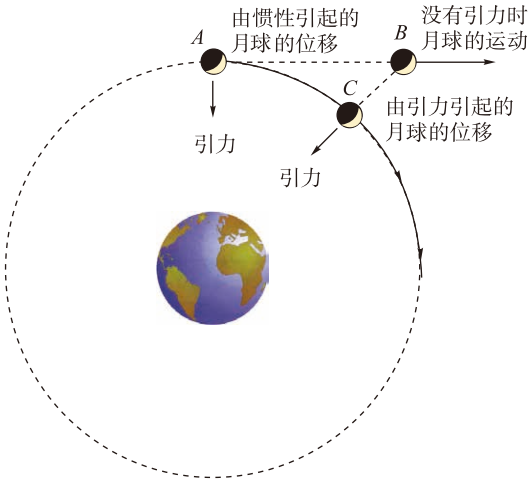
讨论交流

1. 为什么苹果从树上落向地面而不飞向天空？

2. 在地面附近，物体都受到重力作用，即受到地球的吸引力，那么月球受到地球的吸引力吗？

3. 如果月球受到地球的吸引力，为什么月球不会落到地球的表面，而是环绕地球运动？

4. 在浩瀚宇宙中，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？

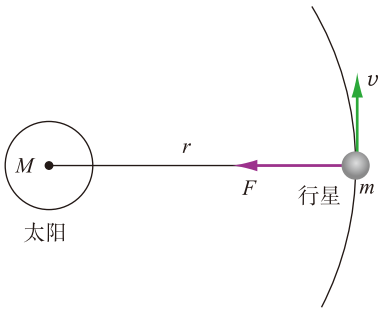


▲ **图3-2-1** 一个指向地心的力使月球维持在它的轨道上

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（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。

万有引力定律的建立

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的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证明了这个问题，还进一步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。



▲ **图3-2-2** 行星绕太阳运动

下面我们用所学知识，推导万有引力定律。

如图 3-2-2 所示，为了使问题简化，我们把行星的运动当作匀速圆周运动，则有

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

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'。设想 F' 与 F 遵守相同的规律，则 F' 也应与太阳的质量 M 成正比，即

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

又 F' 与 F 大小相等，因此

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

写成等式 $F = G\frac{Mm}{r^2}$，式中的 G 为比例系数，与太阳、行星都无关。

> 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

理论探究 | 月–地检验

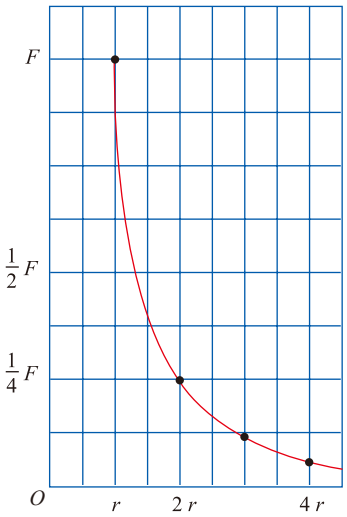
如何验证地面上物体所受的重力与地球吸引月球、太阳吸引行星的力是同一性质的力？

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，则 $F_{地对物} = \frac{GMm_{物}}{R^2}$，$F_{地对月} = \frac{GMm_{月}}{r^2}$。又已知月心到地心的距离 r 是地球半径 R 的 60 倍，根据牛顿第二定律 $F = ma$，月球绕地球做近似圆周运动的向心加速度与地面重力加速度的比值应为

$$\frac{a}{g} = \frac{\frac{F_{地对月}}{m_{月}}}{\frac{F_{地对物}}{m_{物}}} = \frac{\frac{GM}{r^2}}{\frac{GM}{R^2}} = \frac{R^2}{r^2} = \frac{1}{3600}$$

月球的轨道半径 $r = 384403\ \text{km}$，公转周期 $T = 27.32\text{d}$，月球绕地球运动的实际向心加速度 $a = \frac{4\pi^2 r}{T^2} = \frac{4\times 3.14^2 \times 384403\times 10^3}{(27.32\times 24\times 3600)^2}\ \text{m/s}^2 \approx 2.7\times 10^{-3}\ \text{m/s}^2$。

所以 $\frac{a}{g} = \frac{2.7\times 10^{-3}}{9.8} \approx \frac{1}{3600}$，显然假设成立。



▲ **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

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

牛顿得到太阳与行星之间作用力的规律后，还研究了其他不同物体之间的引力，并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（图 3-2-3）。

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。

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："如果说我比别人看得更远些，那是因为我站在巨人的肩膀上。"

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、月亮和行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，引力依然巨大。

自我评价

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. $\approx 9.5\times10^{15}$ 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，飞行器到地心的距离与到月心的距离之比为多少？

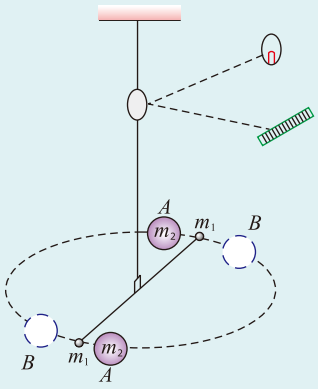
4. 查阅有关资料，计算一个 60 kg 的人站在赤道上受到的重力与万有引力的数量关系。

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，固定小球的轻杆会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。卡文迪许通过测量扭秤的偏转角度，得到了 G 值。



▲ **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 $G=6.745\times10^{-11}\ \mathrm{N\cdot m^2/kg^2}$。这个测量值与现代更精确的测量结果很接近。

3 预言未知星体 计算天体质量

天体之间的相互作用力，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。



▲ **图3-3-1** 哈雷彗星1986年4月临近地球时的照片

预言彗星回归

在牛顿之前，彗星的出现被看作一种神秘的现象，牛顿却断言，行星的运动规律同样适用于彗星。哈雷（Edmond Halley，1656—1742）根据牛顿的引力理论，对1682年出现的大彗星（后来被命名为哈雷彗星）的轨道运动进行了计算，指出它与1531年、1607年出现的彗星是同一颗彗星，并预言它将于1758年再次出现。

1743年，克雷洛（Clairault. A.C.，1713—1765）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（图3-3-1），它的下次来访将是在2062年。

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年至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。

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的物体受到的重力等于地球对物体的万有引力：$mg = G\dfrac{Mm}{R^2}$，那么就可以计算地球的质量 $M = \dfrac{gR^2}{G}$。

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 | 估测地球的平均密度

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作匀速圆周运动，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。若我们知道引力常量 $G = 6.67 \times 10^{-11}\ \mathrm{N \cdot m^2/kg^2}$，卫星绕地球的周期 $T = 5400\ \mathrm{s}$，如何估测地球的平均密度？

自我评价

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. 2016 年 12 月 22 日，我国首颗二氧化碳探测卫星发射成功，卫星在离地面高 h 的圆轨道上绕地球运动。地球的质量为 M、半径为 R，卫星的质量为 m，则卫星受到地球的引力为（　　）

A. $G\dfrac{mM}{R}$　　B. $G\dfrac{mM}{R+h}$　　C. $G\dfrac{mM}{R^2}$　　D. $G\dfrac{mM}{(R+h)^2}$

3. 我国卫星移动通信系统首发星，被誉为“中国版海事卫星”的“天通一号”01 星，于 2016 年 8 月 6 日在西昌卫星发射中心顺利升空并进入距离地面约 36000 km 的地球同步轨道。这标志着我国迈入了卫星移动通信的“手机时代”。根据这一信息以及必要的常识，尚不能确定该卫星的（　　）

A. 质量　　B. 轨道半径　　C. 运行速率　　D. 运行周期

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）

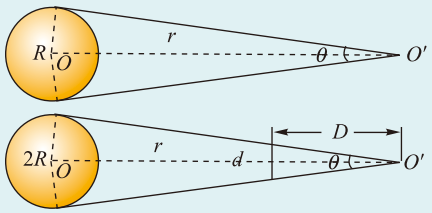
发展空间

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。根据相似三角形的关系可以近似得

$$\frac{R}{r}=\frac{d/2}{D}$$



▲ 图3-3-2　观测太阳时的几何关系

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。

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

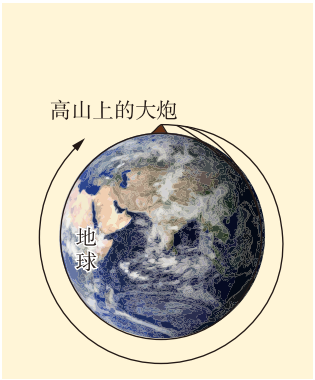
4　人造卫星　宇宙速度

从幻想到现实——人造卫星

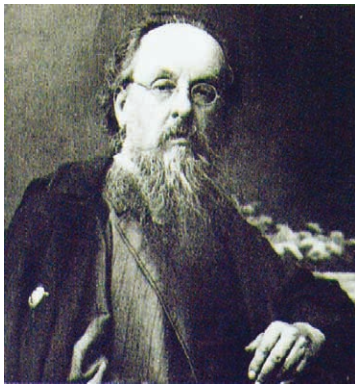
基于对抛体运动规律的认识，牛顿在《自然哲学的数学原理》一书中作出了下面的推论：“如果在高山顶上架起一门大炮，用炮火的推力把一铅质的炮弹平射出去，铅弹在落到地面以前，就会沿着曲线飞过 2 英里的距离。假设没有空气阻力，发射炮弹的速度增加一倍，它飞行的距离也差不多会增加一倍；如果炮弹的速度增加十倍，它飞行的距离差不多会增加十倍。加快速度，我们可以使炮弹落到更远的地方，甚至绕地球飞行……”（图 3-4-1）

1895 年，俄国宇航先驱齐奥尔科夫斯基（图 3-4-2）率先提出了制造并发射人造地球卫星的设想。

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

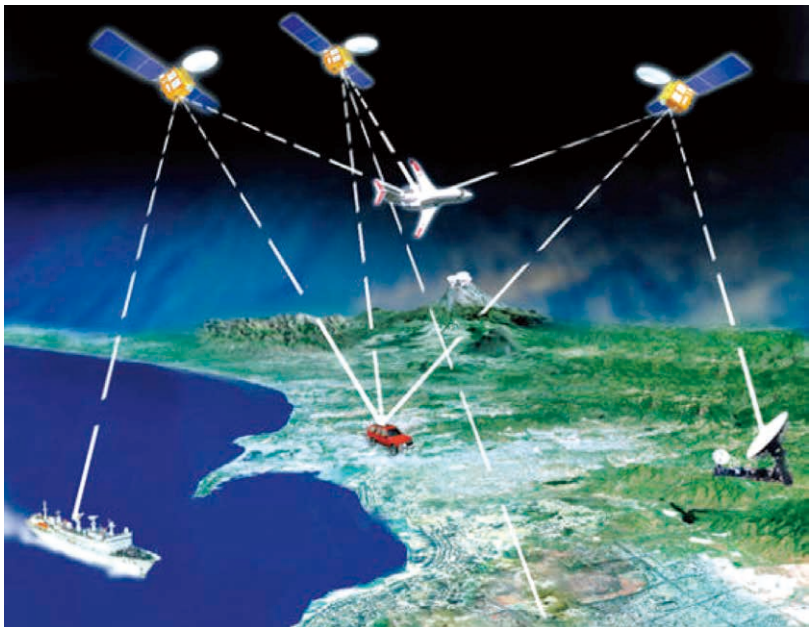


▲ **图3-4-1**　牛顿的设想



▲ **图 3-4-2**　齐奥尔科夫斯基（K.E. Tsiolkovsky，1857—1935）

1957 年 10 月 4 日，苏联将第一颗人造卫星送入环绕地球的轨道。今天，地球周围运行着上千颗人造卫星，它们在为地面上的我们提供着通信、气象、侦察、导航（图 3-4-3）等服务。



▲ **图3-4-3** 北斗卫星导航系统（BeiDou Navigation Satellite System，BDS）是中国自行研制的全球卫星导航系统

宇宙速度



▲ **图3-4-4** 用三级火箭发射卫星

从地球表面发射人造地球卫星，一般使用三级火箭，如图 3-4-4 所示。使卫星能环绕地球运行所需的最小速度叫作**第一宇宙速度**（first cosmic velocity）。

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能量更多，所以发射更困难。

对于靠近地面运行的人造卫星，可以认为此时的轨道半径 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。

活动

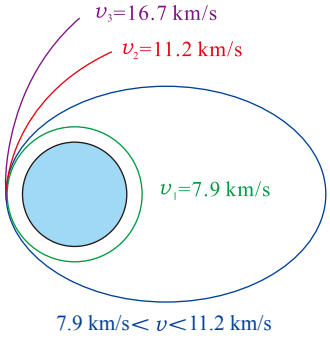
在地球表面附近，重力近似等于万有引力。请用所学知识推导第一宇宙速度与地球表面附近重力加速度（g）、地球半径（R）之间的关系。

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作**第二宇宙速度**（second cosmic velocity）。第二宇宙速度的大小为 11.2 km/s（图 3-4-5）。

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。

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。要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，叫作**第三宇宙速度**（third cosmic velocity）。第三宇宙速度的大小为 16.7km/s。

对于椭圆而言，偏心率等于两焦点的距离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。



▲ 图3-4-5　三个宇宙速度

自我评价

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$\frac{1}{2}$；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$\frac{1}{4}$。哪位同学的看法对？错了的同学错在哪里？说明理由。

4. 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$\frac{1}{2}$，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$\frac{1}{4}$

B. 卫星的角速度减小到原来的$\frac{1}{2}$

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。

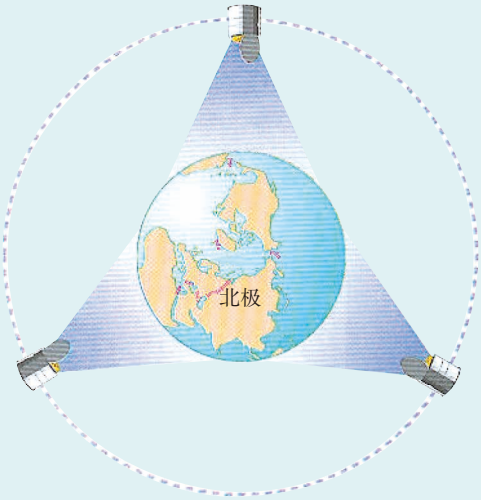
地球同步轨道卫星是保持在地球赤道的地面上空、运行周期与地球自转周期相等的人造地球卫星（图 3-4-6）。

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 42000 km，离地高度约为 35840 km。由于卫星运行周期与地球自转周期相同，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。

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 36000 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 200 ~ 300 km 的圆形轨道上，这条轨道叫作停泊轨道。当卫星穿过赤道平面时，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 36000 km 处，并经过赤道平面，这条轨道叫作转移轨道。当卫星到达远地点时，再启动卫星上的发动机，使之加速并调整方向，进入同步轨道，也叫作静止轨道。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。



▲ **图3-4-6**　用三颗同步卫星就可以基本实现全球通信

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、宇航员太空行走及登月计划的资料。

5　太空探索（选学）

世界航天发展史

1895 年，俄国宇航先驱齐奥尔科夫斯基发表的题为《天地幻想和全球引力效应》的论文中关于制造人造地球卫星的设想，开启了现代人类探索太空的伟大征程。

1957 年 10 月 4 日，苏联将第一颗人造卫星送入环绕



▲ **图 3-5-1** 这是我个人的一小步，却是人类迈出的一大步。——阿姆斯特朗

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，被相继发射送入轨道，运行于距地面几百至几万千米的太空中，为地面上的人们提供多个领域的服务。

1969 年 7 月 16 日，美国发射“阿波罗 11 号”载人飞船，第一次把人送上月球。航天员阿姆斯特朗将左脚踏到月球表面，成为世界上第一个踏上月球的人（图 3-5-1）。

今天，人类探索太空的足迹已延伸到太阳系的边缘。

我国航天事业取得的成就



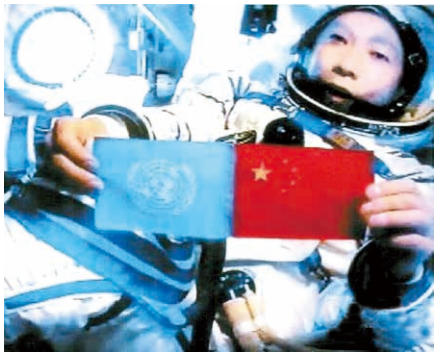
▲ **图3-5-2** 位于西昌卫星发射中心的“万户飞天”雕像

中华民族探索太空的步伐也从未停止。明朝初年，一位名叫陶成道的万户官，就曾尝试利用火箭实现人们的飞天梦想（图 3-5-2）。陶成道设想利用火箭的推力起飞，但不幸火箭爆炸，他为此献出了生命。

2003 年 10 月 15 日，中国第一艘载人飞船“神舟五号”（图 3-5-3）成功发射，中国首位航天员杨利伟成为浩瀚太空的第一位中国访客（图 3-5-4）。2008 年 9 月 25 日，中国第三艘载人飞船“神舟七号”成功发射，三名航天员翟志刚、刘伯明、景海鹏顺利升空。27 日，翟志刚在刘伯明的辅助下，进行了 19 min35 s 的出舱活动。中国随之成为世界上第三个掌握空间出舱活动技术的国家。



▲ **图3-5-3** “神舟五号”载人飞船



▲ **图3-5-4** 杨利伟在太空



▲ **图3-5-5** 王亚平在“天宫一号”上进行太空授课

与此同时，中国的空间站计划和“嫦娥工程”也稳步推进。“天宫一号”（图 3-5-5）是中国首个目标飞行器和空间实验室，于 2011 年 9 月 29 日在酒泉卫星发射中心发射。在轨期间，它先后完成与“神舟八号”“神舟九号”和“神舟十号”飞船的对接任务，这标志着中国已经初

步拥有建立空间站的能力。此后，在 2016 年 9 月，中国成功发射“天宫二号”（图 3-5-6），并计划于 2020 年前后建立中国首个长期性太空空间站。

在中国的神话故事里，嫦娥长居月球，登陆月球是中国人的美丽梦想，中国的登月工程因此得名。“嫦娥一号”是我国首颗绕月探测卫星，于 2007 年 10 月 24 日成功发射升空，而“嫦娥三号”则携带“玉兔号”月球车顺利登陆月球（图 3-5-7）。中国人的登月梦想正一步步变成现实。



▲ **图3-5-6**　中国“天宫二号”空间实验室



▲ **图3-5-7**　“玉兔号”月球车登陆月球

展望未来

随着社会的进步，人类已经掌握了越来越丰富的航天技术。虽然还没有完善的理论支撑我们进行更远的太空探索以及星际航行，但是敢于探索征服太阳系的人类已经在向更远的星际进发。2016 年 1 月 11 日，中国政府正式批复首次火星探测任务，我国的火星探测工程正式立项。北京时间 2021 年 5 月 22 日，我国第一辆火星车“祝融号”在火星表面成功着陆。截至 2022 年 5 月 5 日，“祝融号”在火星表面工作 347 个火星日，累计行驶 1921m，运行正常（图 3-5-8）。



▲ **图3-5-8**　火星车“祝融号”

反思·小结·交流

- **学后反思**

1. 开普勒行星运动定律的发现在科学思想上的重大意义是什么？
2. 卡文迪许测定引力常量的实验和牛顿地-月检验中，都蕴含了什么科学思维？

• **自主小结**

1．准确表述开普勒三定律、万有引力定律。

2．说说利用万有引力定律测算天体质量、预言未知天体、发射人造地球卫星等方面的原理。

3．什么是第一宇宙速度、第二宇宙速度和第三宇宙速度？

• **相互交流**

1．说说卡文迪许测定引力常量实验的巧妙之处。

2．谈谈万有引力定律在天文学上和宇宙航行中的广泛应用。

本章复习题

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. $\frac{F}{2}$　　B. $\frac{F}{3}$　　C. $\frac{F}{4}$　　D. $\frac{F}{9}$

2．质量分别为 m_1 和 m_2 的两个物体相距 r，它们之间的万有引力大小为 $F=G\frac{m_1m_2}{r^2}$，若 $m_1>m_2$，则关于 m_1 和 m_2 之间万有引力的说法正确的是（　　）

A．m_1、m_2 之间的万有引力总是大小相等、方向相反，是一对平衡力

B．m_1、m_2 之间的距离 r 趋于零时，万有引力趋于无穷大

C．m_1 受到的万有引力比 m_2 受到的万有引力大

D．式中 G 为引力常量，它的数值是由实验得出的

3．2005 年，我国成功发射了“神舟六号”载人飞船。飞船入轨后，环绕地球飞行 77 圈，历时 115 个小时。2016 年 3 月 30 日，我国在西昌卫星发射中心用“长征三号”甲运载火箭，成功发射第 22 颗地球同步轨道卫星——北斗导航卫星。假设飞船和该卫星都做圆周运动，那么飞船和卫星在各自轨道上运行时（　　）

A．飞船运动速度比卫星小

B．飞船运动的加速度比卫星小

C．飞船离地面的高度比卫星小

D．飞船运行的角速度比卫星小

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 的轨道上绕该行星运行，运行的周期是 T。已知引力常量为 G，求这颗行星的质量 m。

6．某中子星的质量约为 3.0×10^{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 $\frac{1}{4}$，月球表面重力加速度约为地球表面重力加速度的 $\frac{1}{6}$。经过推理，他认定该消息是一则假新闻，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．随着科技的进步，探索太空已由遥不可及的幻想变成可能。假设你是一名宇宙学家，即将登陆一颗未知星球。你通过测量哪些物理量可以获知该星球的质量？



第四章

机械能及其守恒定律

主题一　功和功率

- 功
- 功率

主题二　动能和势能

- 动能　动能定理
- 势能

主题三　机械能守恒定律

- 机械能守恒定律
- 实验：验证机械能守恒定律

宇宙间形式多样的能量，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，时刻呈现出欣欣向荣的新景象。

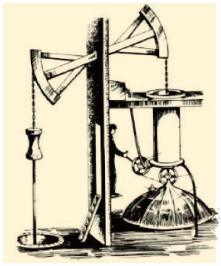
本章，我们来研究与机械运动有关的能量——机械能。

1 功

蒸汽机的发明、改良和广泛使用是第一次工业革命开始的标志。早期的蒸汽机仅用于矿井抽水、提煤等。随着技术的改进，蒸汽机被人们作为推进动力，由此研制出蒸汽机船和蒸汽机车；同时，蒸汽机也被用作工厂开动机器的动力。当时，大家用“干活多少”来比较这些蒸汽机的“能力”。

功的概念的起源

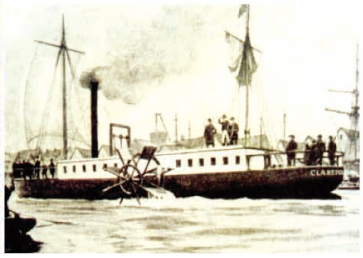
观察图4-1-1中的四张图片，我们不难发现，当时人们使用蒸汽机的主要目的有两个：提升重物和推动物体。



（a）纽可门蒸汽机提水



（b）瓦特双动式蒸汽机从矿井中提煤



（c）富尔顿制造的“克莱蒙特”号汽船



（d）史蒂芬孙制造的蒸汽机车

▲ 图4-1-1

讨论交流

在燃烧同样多的燃料的情况下，讨论以下几个问题：

1. 竖直提升重物时，怎样比较蒸汽机“能力”的大小？
2. 水平推动物体时，怎样比较蒸汽机“能力”的大小？
3. 衡量蒸汽机“能力”大小的因素是什么？
4. 如何方便地定量比较蒸汽机“能力”的大小？

竖直提升重物时，提升相同的物体，提升的高度越高，蒸汽机的“能力”越大；提升相同的高度，提升的物体越重，蒸汽机的“能力”越大。类似地，水平推动物体

时，大小相同的力作用在物体上，物体移动的距离越远，蒸汽机的“能力”越大；移动相同的距离，作用在物体上的力越大，蒸汽机的“能力”越大。综合以上分析可见，衡量蒸汽机“能力”大小的因素是：蒸汽机对物体施加力的大小和物体在这个力的作用下移动距离的远近。

工业革命早期，当时的工程师们需要有一个比较蒸汽机“能力”的标准。在实践之中，工程师们逐渐认同用机器举起的物体的重量与高度的乘积来量度机器的输出。科学家对一般意义上的机器进行了研究，并提出了功的概念。

在物理学中，人们这样规定：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）。

讨论交流

1. 在图 4-1-2 所示的过程中，力对货物、握力器、汽车以及水桶的做功情况是怎样的？

2. 你认为力对物体做功的必要因素是什么？



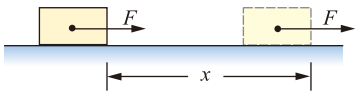
（a）货物在起重机的作用下升高了　（b）握力器在压力下发生形变　（c）人未能推动汽车　（d）水桶沿水平方向匀速前进

▲ 图4-1-2

功的计算

如图 4-1-3 所示，当力的方向与物体位移的方向一致时，物体在力 F 作用下发生的位移是 x，力对物体所做的功 W 可用以下公式来计算

$$W = Fx$$



▲ **图4-1-3**　如果力的方向与位移的方向一致，功等于力的大小与位移大小之积

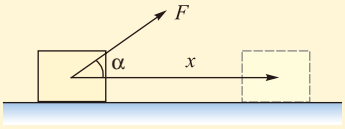
许多情况下，力的方向与物体位移的方向并不一致，而是存在一定夹角。如图4-1-4所示，人斜向上拉行李箱，而行李箱沿水平路面运动，这种情况下，对箱子的拉力所做的功该怎样计算呢？



◀ **图4-1-4**　斜向上拉行李箱

活动

1. 如图4-1-5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对物体所做的功？

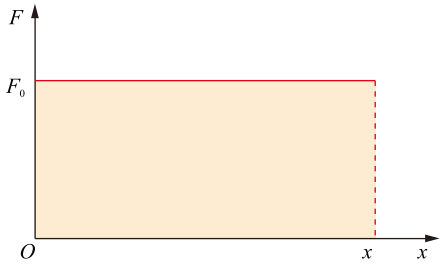


▲ **图4-1-5** 力与位移存在夹角的情况

2. 如果通过力的分解来解决这个问题，你会将力F分解到哪两个方向？说出你这样进行分解的理由。

3. 按照你认为可行的方式进行分解，在图4-1-5上作出力的分解示意图，并由此推导出功的计算公式。

当力F的方向与物体位移x的方向成某一夹角α时，可以把力F分解到平行于位移和垂直于位移这两个方向上。跟位移方向平行（一致）的分力为$F_0 = F\cos\alpha$，该分力所做的功$F_0x = Fx\cos\alpha$（图4-1-6）；垂直于位移方向的分力为$F\sin\alpha$，该分力没有对物体做功。因此，图4-1-5中恒力F对物体所做的功W，实际上就等于沿物体位移方向的分力所做的功。



▲ **图4-1-6** 功对应着矩形的“面积”

与物体位移成一定夹角的力对物体做的功，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。

功的正负

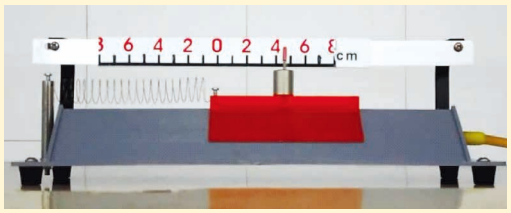
功是标量，没有方向，但有正负之分。由功的计算公式可知，功随 α 的变化可能出现以下几种情况：

当 $0 \leqslant \alpha < 90°$ 时，$\cos\alpha > 0$，$W > 0$，表示力对物体做正功；当 $\alpha = 90°$ 时，$\cos\alpha = 0$，$W = 0$，表示力对物体不做功；当 $90° < \alpha \leqslant 180°$ 时，$\cos\alpha < 0$，$W < 0$，表示力对物体做负功。

讨论交流

如图4-1-7所示，滑块在弹簧的作用下沿水平气垫导轨做往复运动。

1. 滑块受到几个力的作用？请判断各个力对滑块做功的正负。
2. 你认为功的正负有什么物理意义？



▲ 图4-1-7　滑块沿水平方向做往复运动

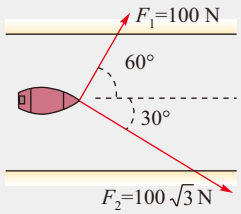
某个力对物体做负功，通常也说成“物体克服某个力做功（取绝对值）”。比如，在图 4-1-7 所示的过程中，空气阻力对滑块做负功，可以说成“滑块克服空气阻力做功”。再比如，滑块从平衡位置“0”（弹簧处于原长）运动到最右端的过程中，弹簧的拉力对滑块做负功，可以说成“滑块克服弹簧的拉力做功”。

例题示范

问题　甲、乙两人在小河的两岸同时用绳拉小船，使小船在河的中间沿直线行驶，甲、乙的拉力分别为 F_1=100 N 和 F_2=100 $\sqrt{3}$ N，其方向如图 4-1-8 所示。在小船行驶 80 m 的过程中，求：

（1）两个拉力 F_1 和 F_2 的合力以及该合力所做的功。

（2）两个拉力 F_1 和 F_2 分别做的功以及它们的代数和。

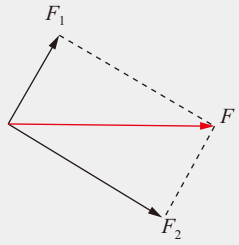


▲ 图4-1-8

分析 F_1 和 F_2 的合力根据力的平行四边形定则可求，根据功的计算公式即可求得合力所做的功以及两个拉力 F_1 和 F_2 做的功。

解 （1）作 F_1 和 F_2 的矢量合成图，如图 4-1-9 所示，则合力 $F=\dfrac{F_1}{\cos 60^\circ}=200\ \mathrm{N}$，方向沿河中心线方向；

$W_{合}=F\cdot x=200\times 80\ \mathrm{J}=16000\ \mathrm{J}$



▲ 图4-1-9 F_1和F_2的合力

（2）分别求 F_1 和 F_2 做的功：

$W_1=F_1\cdot x\cdot\cos 60^\circ=100\times 80\times 0.5\ \mathrm{J}=4000\ \mathrm{J}$

$W_2=F_2\cdot x\cdot\cos 30^\circ=100\sqrt{3}\times 80\times\dfrac{\sqrt{3}}{2}\ \mathrm{J}=12000\ \mathrm{J}$

$W_1+W_2=16000\ \mathrm{J}$

拓展 （1）功是标量，没有方向，求几个力的总功，就等于这几个力所做的功的代数和。

（2）$W=F\cdot x\cdot\cos\alpha$ 只适用于 F 是恒力的情况。若 F 是变力，应把整个过程分成若干小段，使每小段都是恒力或者可以认为是恒力，分别计算各小段力所做的功，然后把它们加起来（求代数和）。

◎ **合力的功**

当物体同时受到几个力的作用时，所有这些力对物体所做的功的代数和等于这些力的合力对此物体所做的功。

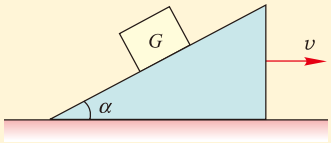
自我评价

1. 如图 4-1-10 所示，一个质量 $m=60\ \mathrm{kg}$ 的滑雪运动员从斜坡上高 $h=10\ \mathrm{m}$ 的某一位置自由滑下。如果运动员在下滑的过程中受到的阻力 $f=50\ \mathrm{N}$，斜坡的倾角 $\theta=30^\circ$，运动员滑至坡底的过程中，所受的几个力做的功各是多少？这几个力的合力所做的功是多少？这几个力所做的总功是多少？取 $g=10\ \mathrm{m/s^2}$。

2. 如图 4-1-11 所示，重为 G 的物体静止在倾角为 α 的粗糙斜面上，现使斜面及物体一起向右做匀速直线运动，位移为 x，求在这个过程中：



▲ 图4-1-10　滑雪运动



▲ 图4-1-11　斜面与物体一起向右做匀速直线运动

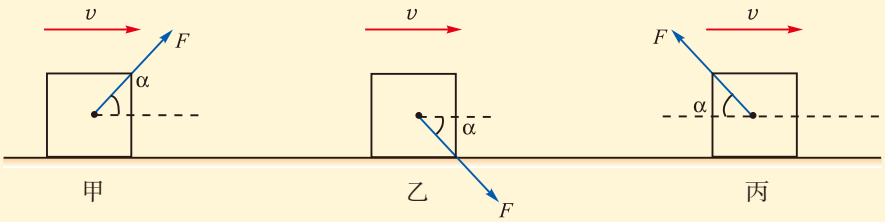
（1）重力对物体所做的功；

（2）弹力对物体所做的功；

（3）摩擦力对物体所做的功；

（4）合力对物体所做的功。

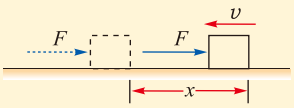
3. 如图 4-1-12 所示，甲、乙、丙三个物体分别在大小相等、方向不同的力 F 的作用下，向右移动相等的位移 x，关于 F 对甲、乙、丙做功的大小 W_1、W_2、W_3 判断正确的是（　　）



▲ 图4-1-12

A. $W_1 > W_2 > W_3$　　B. $W_1 = W_2 > W_3$　　C. $W_1 = W_2 = W_3$　　D. $W_1 < W_2 < W_3$

4. 如图 4-1-13 所示，一物块沿水平地面向左运动，水平恒力的大小为 F，物块与地面间的摩擦力大小为 f，在物块向左运动位移大小为 x 的过程中，水平恒力 F 做的功为（　　）



▲ 图4-1-13

A. Fx

B. $-Fx$

C. $-fx$

D. $(F-f)x$

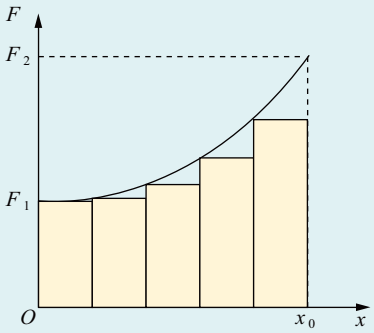
5. 以一定的初速度竖直上抛一个质量为 m 的小球，小球上升的最大高度为 h，空气阻力大小恒为 f，则从抛出至回到抛出点的过程中，重力和空气阻力分别对小球做了多少功？比较“重力所做的功”与“空气阻力所做的功”，你有什么发现？

发展空间

课外阅览

用图像法求变力所做的功

图 4-1-6 告诉我们，功对应着图像中的矩形面积。如果 F-x 图像是一条曲线，如图 4-1-14 所示，表示沿位移方向的力的大小随位移不断变化。那么，这样的力所做的功是多少呢？



▲ 图4-1-14 F-x图像及力所做的功

对于这种情况，我们可以这样处理：在曲线下方作阶梯形折线，则折线下方每个小矩形“面积”分别表示相应恒力做的功。当阶梯折线越分越密时，这些小矩形的总面积越趋近于曲线与两坐标轴所围成的曲边梯形的“面积”。可见，曲线与坐标轴所围成的曲边梯形的“面积”在数值上等于变力所做的功。

2 功 率

大家都有这样的体会：快速爬楼会比慢步上楼更容易使人气喘吁吁。这两种情况下，人克服重力做相同的功，但快速爬楼（图 4-2-1）所用时间比慢步上楼要少，这说明在快速爬楼的过程中，人体克服重力做功更快，对人体的心肺负担更重。那么，用什么物理量来描述做功的快慢呢？



▲ 图 4-2-1 上楼

功率的含义

不同的力做相同的功，所用时间不一定相同。用时少，表示做功快；用时多，表示做功慢。在相同时间内，不同的力做的功也不一定相同。做功多，表示做功快；做功少，表示做功慢。

那么，不同的力在不同的时间内做不同的功，又该如何比较它们做功的快慢呢？在物理学中，我们用功率 P 来表示做功快慢。力对物体所做的功 W 与做功所用时间 t 的比叫作**功率**（power），即

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

在国际单位制中，功率的单位是瓦特（watt），简称瓦，符号是W。1 s内完成1 J的功，功率就是1 W。

$$1\ \mathrm{W}=1\ \mathrm{J/s}$$

瓦这个单位比较小，技术上常用千瓦（kW）作功率的单位，1 kW = 1000 W。

功率有瞬时功率与平均功率的区别。一般来说，一段时间内做功的快慢并不是保持不变的，这一段时间内做的总功 W 与这段时间 t 的比，就是这段时间内的平均功率。只有在所取的时间非常短的情况下，$\frac{W}{t}$ 才可以认为是该时刻的瞬时功率。

必修第一册 · 第一章第 3 节“平均速度”和“瞬时速度”。

额定功率

在初中物理中，我们学习过以白炽灯为代表的用电器的额定功率，那是指在额定电压下工作时用电器消耗的电功率（即在数值上等于每秒钟消耗的电能）。

内燃机等动力机械也有额定功率，这是各种机械可以长时间正常工作允许输出的最大功率，实际输出功率往往小于这个数值。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，司机通过增大供油量可以使实际输出的功率大于额定功率（图 4-2-2），不过这对发动机有损害，只能工作很短时间，而且要尽量避免。实际运行的



▲ **图4-2-2**　爬坡的汽车

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。

电动机既是用电器，也是动力机械。它作为用电器工作时，要消耗电功率，这称为输入功率；而它作为动力机械带动其他机械工作时，要输出功率。显然，输出功率一定小于输入功率。电动机的工作情况比较复杂，除了输入电压对它的工作有非常大的影响以外，负载（即它带动的其他机械）的情况对它的输入功率及输出功率也有很大的影响。我们今后所说的电动机的额定功率是指它作为动力机械的输出功率。

如图 4-2-3 所示，是常见的一些交通工具中的动力机械以及人、牲畜的输出功率。



（a）人长时间做功，功率约为 70 W



（b）马长时间做功，功率约为 450 W



（c）电瓶车的额定功率约为 450 W



（d）客车发动机的额定功率约为 100 kW



（e）小轿车发动机的额定功率约为 120 kW



（f）动车机车的额定功率约为 5000 kW

▲ 图4-2-3

输出功率、作用力和速度之间的关系

汽车上坡时，司机常常会将汽车挡位换成低速挡并加大油门，这是为什么呢？

当作用力的方向与物体位移的方向相同时，力对物体所做的功 $W = Fx$。将此式代入 $P = \frac{W}{t}$ 中，结合 $v = \frac{x}{t}$，可得到功率 P 与力 F、物体运动速度 v 的关系式

$$P = Fv$$

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

$$P = Fv\cos\alpha$$

在上式中，当物体做变速运动时，若 v 为某一时刻的瞬时速度，则 P 表示该时刻的瞬时功率；若 F 为恒力，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。

讨论交流

你能解释汽车上坡时，司机为什么常会用“换挡”的办法来减小速度吗？

小轿车行驶时受到的阻力要比一般的大卡车小得多，但为什么有的小轿车的发动机的功率反而比大卡车大呢？

实际上，飞机、动车、汽车、轮船等交通工具的最大行驶速度受到自身发动机额定功率 P 和运动中自身受到的阻力 f 两个因素的共同制约。其中，阻力既有摩擦阻力，也包括空气阻力，而且空气阻力会随着运动速度的增大而增大。因此，要提高各种交通工具的最大行驶速度，就要考虑减小运动阻力和提高发动机的额定功率。

有关资料证实：高铁行驶的速度超过270 km/h时，牵引力所做的功90%以上用于克服空气阻力做功；速度超过300 km/h时，则95%以上的牵引力所做的功用于克服空气阻力做功，因此，在实际运行中要考虑选择合理的速度。

例题示范

问题　一汽车的额定功率是120 kW，从车站开出后加速行驶，在水平路面上行驶途中受到的阻力可视为保持不变，大小为1600 N，求该汽车在水平路面上行驶的最大速度。

分析　根据功率、力和速度三者之间的关系，结合牛顿运动定律分析可知，在输出功率保持额定功率的条件下，在水平路面上匀速行驶时，汽车的速度最大。

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 $F = \dfrac{P}{v}$。根据牛顿第二定律可知，汽车的加速度为

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

汽车启动时，通过加大油门可以使功率P逐渐增大，但功率的增大不能超出额定功率过多。当汽车保持额定功率行驶时，加速度a将随着速度的增大而减小（此时速度仍然在增大）；当速度增至$v_{max} = \dfrac{P}{f}$时，加速度将减至零；此后，汽车的速度将不再增大。所以

$$v_{max}=\frac{P}{f}=\frac{120\times10^3}{1600}\text{ m/s}=75\text{ m/s}$$

可见，汽车在平直公路上做匀速运动时，它的动力全部用于克服阻力做功。

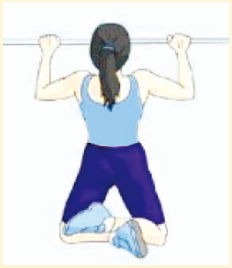
拓展 若该车的质量m = 1400 kg，从静止开始以a = 1 m/s^{2}的加速度做匀加速启动，这个过程能维持多长时间？

根据关系式$P = Fv$和牛顿第二定律$F - f = ma$可得匀加速运动的最大速度为$v=\frac{P}{F}=\frac{P}{f+ma}=\frac{120\times10^3}{1600+1400\times1}\text{ m/s}=40\text{ m/s}$，所以匀加速运动的时间为

$$t=\frac{v}{a}=\frac{40}{1}\text{s}=40\text{ s}。$$

活动 | 估测“引体向上”的平均功率

如图4-2-4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4-2-4 引体向上

自我评价

1. 在同样的路面上，汽车空载时的最大行驶速度为什么比满载时的最大行驶速度大一些？

2. 质量为 2 kg 的小球从高空下落，5s 落地。则该小球下落 1 s 末时的重力做功的功率是多少？下落前 3 s 内重力做功的功率又是多少？（忽略空气阻力，g = 10 m/s^2）

3. 一台电动机以大小为 1.2×10^{4}N 的向上的力，在 15 s 内将一部电梯匀速升高了 9 m，该电动机的功率是多少？（g = 10 m/s^2）

4. 汽车以 108 km/h 的速率在水平路面上匀速行驶。如果该汽车受到的阻力为 800 N，那么该汽车发动机的输出功率是多少？

发展空间

物理在线

人体的功率

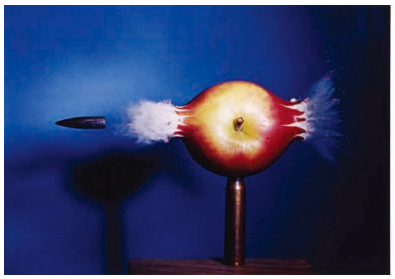
如果把人体视为动力机械，那么它也和内燃机一样有各项指标，如平均功率、瞬时功率、额定功率等。在图 4-2-3（a）中，我们知道了人长时间做功的功率；在前面的“活动：估测‘引体向上’的平均功率”中，我们对人体功率有了进一步认识。

然而，人类总在不断挑战自身肌体的极限，你知道人体最大的输出功率是多少吗？专业运动员和普通人的差距是多大？请进行测算，并查询互联网进行了解。

3　动能　动能定理

动能　动能定理

我们在初中物理课程中学过，功和能是两个联系密切的物理量，一个物体能够对其他物体做功，我们就说这个物体具有**能量**（energy）。如高速运动的子弹能击穿苹果（图 4-3-1），海啸（高速运动的海水）能掀翻汽车、摧毁房屋（图 4-3-2），风（高速运动的空气）能推动叶片转动（图 4-3-3），这些都说明运动的物体可以做功，具有能量。物体由于运动而具有的能量叫作**动能**（kinetic energy）。



▲ **图4-3-1**　子弹击穿苹果



▲ **图4-3-2**　海啸掀翻汽车、摧毁房屋



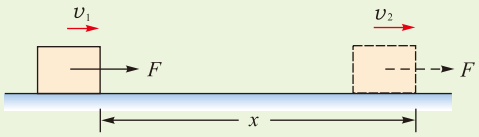
▲ **图4-3-3**　风推动叶片转动

我们已经知道，物体的质量越大，速度越大，它的动能就越大，那么物体的动能与其质量和速度的大小有怎样

的定量关系呢？我们可以通过牛顿运动定律和运动学的知识来研究这个问题。

理论探究

如图4-3-4所示，在光滑的水平面上，一个质量为m的物体在恒定拉力F的作用下发生一段位移x，速度由v_1增大到v_2。在此过程中，物体运动的速度v_1、v_2跟拉力F、位移x之间有什么关系呢？



▲ 图4-3-4 做功与动能的变化

根据牛顿第二定律

$$F = ma$$

由匀变速直线运动公式 $v_2^2 - v_1^2 = 2ax$，有

$$x = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a}$$

由此可得

$$Fx = ma \cdot \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a}$$

由于

$$W = Fx$$

于是有

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

还可以从理论上证明，物体在变力作用下做曲线运动时，上面的关系式仍然成立。分析上述的等式，可以发现：

①等式左边的W是这段过程中外力对物体所做的功；

②等式右边是两项之差，这两项都只与物体的质量以及这段过程始、末状态的速度有关，即只与物体的运动状态有关，它表征物体的一种能量。物理学中把 $\frac{1}{2}mv^2$ 叫作物体的动能，用E_k表示，即

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

物体的动能等于物体的质量与速度大小的二次方乘积的一半。动能是标量，在国际单位制中，它的单位是焦耳，这是因为

$$1\ \text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2=1\text{N}\cdot\text{m}=1\ \text{J}$$

有了动能的表达式后，外力对物体做功与物体动能变化的关系可以写为

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

式中W表示外力对物体所做的功，E_{k2}和E_{k1}分别表示物体的末动能和初动能，即$E_{k2}=\frac{1}{2}mv_2^2$，$E_{k1}=\frac{1}{2}mv_1^2$。该式称为**动能定理**，也可写成

$$W=\Delta E_k$$

讨论交流

动能定理$W=\Delta E_k$中的W应理解为$W_{总}$，这里的“总”字是指：

①如果这个过程中有多个力对物体做功，指的是这些力所做的功的总和；

②一个过程中如果做功的力是变力，应把整个过程分成若干小段，使得每一小段的力可以认为是恒力，分别求出这些小段中力所做的功，再求它们的总和。

请与同学交流你对$W_{总}$的理解。

例题示范

问题1　滑沙运动是继滑冰、滑水、滑雪和滑草之后又一新兴运动，它使户外运动爱好者在运动的同时又能领略到沙漠的绮丽风光。如图4-3-5所示，人坐在滑沙板上从沙坡斜面的顶端由静止沿直线下滑，设下滑时受到的恒定阻力是重力的0.3倍，沙坡长度L为100 m，斜面倾角θ为30°，重力加速度g取10 m/s^2，求人滑到斜面底端时的速度大小。



▲ **图4-3-5**　滑沙运动

分析　研究对象是人和滑沙板，它们的质量m未知。在应用动能定理求解时，对人和滑沙板做功的力只有重力和摩擦阻力，它们与质量m都有确定的数值关系，而动能中同样涉及质量m，两边可以消去，因此可以求出人和滑沙板滑到斜面底端时的速度大小。

解　人和滑沙板受到重力、支持力和阻力的作用，重力做功为$mgL\sin\alpha$，支持力不做功，阻力做功为$-0.3\,mgL$，初动能为$E_{k1}=0$。应用动能定理

$$W_G + W_f = E_{k2} - E_{k1}$$

$$mgL\sin\theta - 0.3mgL = \frac{1}{2}mv^2 - 0$$

代入数值后，得 $v = 20\ \text{m/s}$

拓展 请试用牛顿第二定律和匀变速直线运动公式进行解答，和上述解法进行比较，看一看哪种解法更合理、更简便。

问题2 如图4-3-6所示，C919客机（COMAC C919）是我国首款按照最新国际适航标准研制的干线民用飞机。某型号的C919客机最大起飞质量为7.25×10^4kg，起飞时先从静止开始滑行，当滑行1200 m时，达到起飞速度288 km/h。在此过程中如果飞机受到的阻力是飞机重量的0.02倍。求此过程中飞机发动机的牵引力所做的功W。（g=10 m/s^2）



▲ **图4-3-6** C919客机

分析 本题已知飞机滑行过程的初、末速度，可以知道它在滑行过程中增加的动能，因此应用动能定理求出合力所做的功，进而求出飞机发动机牵引力所做的功。

解 飞机的初动能$E_{k1}=0$，末动能$E_{k2}=\frac{1}{2}mv_2^2$，阻力做功为$W_f=-fx=-0.02\,mgl$，应用动能定理，有

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

$$W = 0.02mgl + \frac{1}{2}mv_2^2$$

代入数值后，得

$$W \approx 2.50\times10^8\text{J}$$

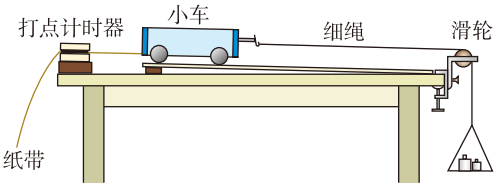
飞机滑行时除了受地面阻力外，还受到空气阻力，空气阻力随速度的增加而增加。本题中的“阻力”是变化的阻力在这段位移中的平均值。

拓展 本题中的牵引力是恒力还是变力？如果是变力，理论上可以用牛顿运动定律与运动学知识求解，但目前我们的数学知识不够，而且比较烦琐。动能定理不涉及物体运动过程中的加速度和时间问题，因此用它解决问题就比较方便。

动能定理的实验证明

通过理论推导得出的结论，还要经过实验的证明和实践的检验。下面是两种实验验证动能定理的方案。

方案 1　借用“探究 a 与 F、m 之间的关系”的实验装置进行实验，如图 4-3-7 所示。把滑轮下挂的砝码及砝码盘所受的总重力视为对小车的拉力，测量拉力 F 与小车质量 m，通过分析纸带上的点迹，计算小车在打下各计数点时的瞬时速度，进而计算出小车在各计数点间运动的过程中拉力 F 对它做的功 W 以及该过程中增加的动能，如果二者在误差允许的范围内相等，则验证了在这个过程中外力对小车做的功等于它的动能的增量。



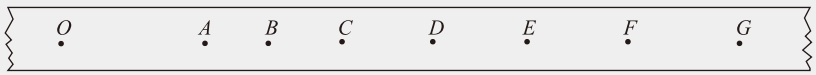
▲ **图4-3-7**　验证动能定理的实验装置

如果在小车经过的路径上的某两个位置固定两个光电门，在小车上固定一个挡光片，就可以测量出小车通过这两个光电门时的瞬时速度，再量出这两个光电门间的距离，不用打点计时器和纸带，同样可以验证动能定理。

方案2　使用数据实时采集系统进行验证。在小车上固定一个无线力传感器以及位移传感器的发射器，在它的对面固定位移传感器的接收器，并连接到计算机上。位移传感器可以连续测量多组小车位置的数据，并由计算机计算出小车经过各点时的瞬时速度的值。力传感器则可以测量各时刻小车受到的拉力，数据实时采集系统把它们都采集后传给计算机，输入相应的公式即可计算得出各段时间内拉力所做的功W以及相应时间段的始末速度，从而验证这个过程中动能定理是否成立。

例题示范

问题 如图 4-3-8 所示是上述方案 1 中验证动能定理的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 15.50cm、21.60cm、28.61cm、36.70cm、45.75cm、55.75cm、66.77cm，相邻计数点间的时间间隔为 0.1 s，小车所受拉力 F 为 0.2 N，小车的质量 m 为 200g。在从 O 到 F 的运动过程中，拉力 F 所做的功与小车动能增加量各是多少？可以说这个过程的数据与动能定理相符吗？



▲ **图4-3-8** 实验打出的纸带

分析 拉力F所做的功等于力F与O、F间位移的乘积。由于O为起点，初速度为零，经过F点时的动能即为这个过程中动能的增量，而它等于质量m与经过F点时的速度v_F的二次方的乘积的一半，即$\Delta E_k=\frac{1}{2}mv_F^2$。

解 拉力F所做的功$W=F\cdot\overline{OF}=0.2\times0.5575\text{J}=0.1115\text{J}$

小车动能的增量

$$\Delta E_k=\frac{1}{2}mv_F^2=\frac{1}{2}\times0.2\times\left(\frac{\overline{EG}}{2T}\right)^2=\frac{1}{2}\times0.2\times\left(\frac{0.6677-0.4575}{2\times0.1}\right)^2\text{J}\approx0.11\text{J}$$

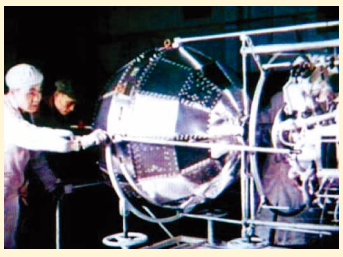
二者相比较，在误差允许的范围内相等，因此可以说这个实验的结果与动能定理是相符的。

拓展 实验所得的结果，拉力所做的功W稍大于小车增加的动能ΔE_k，这是合理的。因为在运动过程中，除了拉力做功以外，还存在着阻力（包括摩擦阻力以及空气阻力等）做负功，我们只计算了拉力做的功，而忽略了阻力做的功，因此造成了这种误差。

自我评价

1. 1970 年 4 月 24 日，我国第一颗人造卫星——“东方红 1 号”发射成功，如图 4-3-9 所示。这颗卫星的质量为 173 kg，设卫星以第一宇宙速度 7.9 km/s 进入太空，则它进入太空时的动能是多少？

2. 一颗质量为 0.01 kg 的子弹以 600 m/s 的速度垂直射穿一块厚度为 1 cm 的固定木板，已知子弹穿过木板后的速度为 400 m/s，求木板对子弹的阻力所做的功。



▲ **图4-3-9** 东方红1号

3. 2012 年 11 月，歼 -15 舰载机在“辽宁号”航母上首降成功，某歼 -15 舰载机质量为 2.5×10^4 kg，着舰速度为 40 m/s，飞机着舰后所受空气和甲板平均阻力为 2×10^4 N，航空母舰静止在水中不动。求：

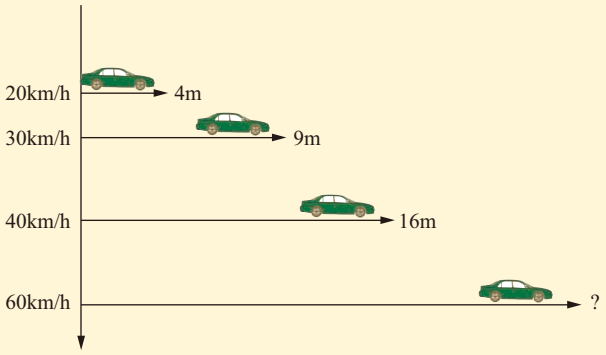
（1）飞机着舰后，如果仅受空气和甲板阻力作用，航母甲板至少多长才能保证飞机不滑到海里？

（2）为了让飞机在航母的跑道上停下来，甲板上设置了阻拦索让飞机减速；同时考虑到飞机尾钩挂索失败需要复飞的情况，飞机着舰时不关闭发动机。如图 4-3-10 所示为飞机尾钩钩住阻拦索后某时刻的情景，此时发动机的推力大小恒为 2×10^5 N，空气和甲板阻力保持不变，飞机滑行 100 m 停下，则阻拦索对飞机做的功是多少？



▲ 图4-3-10

4. 汽车具有良好的制动性能，在紧急情况下，可以化险为夷。在一次汽车制动性能的测试中，司机踩下刹车踏板，使汽车在阻力作用下逐渐停止运动。如图 4-3-11 所示，记录的是汽车以不同速率行驶时，制动后所通过的距离。请根据图中的数据，分析以下问题：



▲ 图4-3-11

（1）为什么汽车的速率越大，制动的距离也越大？

（2）汽车上有 2 名乘客，再做同样的测试，制动距离会变化吗？试分析原因。

（3）如果汽车（没有乘客）在以 60 km/h 的速率开始制动，那么制动的距离是多少？说明你分析的依据和过程。

发展空间

实验室

除了教科书中提供的方案外，验证动能定理的方案还有哪些？请自选器材，设计实验，验证动能定理。

4 势 能

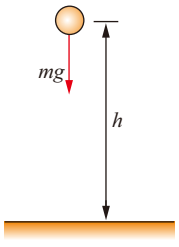
珠穆朗玛峰是世界最高峰，被称为“世界屋脊”。山峰顶部终年被冰雪覆盖，地形陡峭险峻，是世界登山运动爱好者瞩目和向往的地方。然而雪崩暴发时，积雪将以排山倒海之势，摧毁沿途的一切，如图4-4-1所示。



▲ **图4-4-1** 珠穆朗玛峰的雪崩灾难

这是因为位于高处的积雪蕴含着巨大的能量，当它顺着山体滑落时，这种能量就会释放出来。在物理学中，物体由于位于高处而具有的能量叫作**重力势能**（gravitational potential energy）。

在初中我们学过，重力势能的大小跟物体的质量和所处的高度有关。物体的质量越大、高度越高，物体的重力势能就越大（图4-4-2）。那么，物体的重力势能跟物体的质量和高度到底是怎样的定量关系呢？我们仍从功能关系出发进行讨论。



▲ **图4-4-2** 举高的物体具有重力势能

重力做功的特点

观察思考

如图4-4-3所示，设想你要从天桥桥面到地面，可以有不同的选择：或是沿楼梯走下来，或是乘坐自动扶梯，或是坐垂直电梯下到地面再走一段平路。请问，沿这三种不同的路径下桥，重力所做的功相等吗?重力做功与物体运动的路径有关吗?



▲ **图4-4-3**　沿不同的路径下天桥

活动

如图 4-4-4 所示，设质量为 m 的物体，从高度为 h_1 的位置 A 沿三种不同的路径运动到高度为 h_2 的位置 B。

路径 1：沿竖直方向到与 B 高度相同的 C 点，再沿水平方向移到 B；

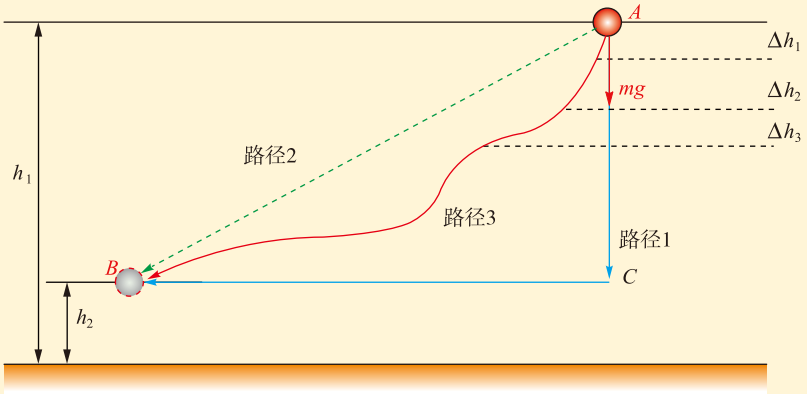
路径 2：沿倾斜的直线运动到 B；

路径 3：沿图中曲线运动到 B。

请分别计算这三种情况下重力对物体所做的功。

（**提示**：对于路径 3 中的曲线，我们可以将其分割成一个个小段进行分析，而每一小段曲线都可以近似看作一段倾斜的直线。）

通过比较，你能得出什么结论?



▲ **图4-4-4**　研究重力做功是否与路径有关

物体沿上述三条路径从 A 移到 B，重力对物体所做的功

$$W_{重力A\to B} = mg \cdot \Delta h = mgh_1 - mgh_2$$

由此可以得出结论：重力对物体所做的功与物体的运

动路径无关，仅由物体的质量和初、末两个位置的高度差决定。

重力势能

我们继续分析上面的式子：等式右边的两项分别是物体所受的重力mg与它所处的位置高度h的乘积，它正是由物体的位置决定的一种能量，称为**重力势能**，常用E_p表示，即$E_{p1}=mgh_1$，$E_{p2}=mgh_2$。重力势能是标量，在国际单位制中的单位是焦耳，简称焦，符号为J。

$$1\ \text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{m}=1\ \text{N}\cdot\text{m}=1\ \text{J}$$

要注意的是，h_1与h_2都是相对于$h=0$的平面而言的，在这个平面处，物体的重力势能等于零，称为零势能面。零势能面原则上是可以任意选取的，因此一个物体的势能的数值是相对的（相对于零势能面）。

可以发现，重力所做的功等于物体重力势能的减少量，$W_G=E_{p1}-E_{p2}$。重力势能的变化量ΔE_p与零势能面的选取无关。

当物体由高处运动到低处时，重力做正功，重力势能减少，也就是$W_G>0$，$E_{p1}>E_{p2}$，重力势能减少的数量等于重力所做的功；当物体由低处运动到高处时，重力做负功，重力势能增加，也就是$W_G<0$，$E_{p1}<E_{p2}$，重力势能增加的数量等于物体克服重力所做的功。

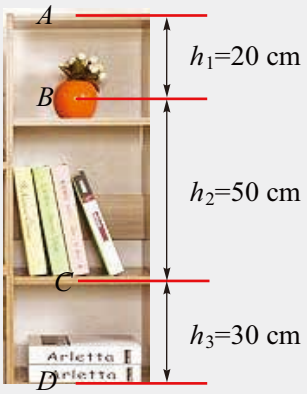
例题示范

问题 如图 4-4-5 所示，花盆位于图中的 B 点，它的质量为 200 g，重力加速度 g 取 10 m/s^2。

（1）图中花盆相对于 A、C、D 各点的重力势能各是多少？

（2）将花盆（重心位置）从 B 位置移动到 C 位置或 A 位置，花盆所受的重力做多少功？

分析 花盆相对于 A 点的重力势能，就是以 A 点处为重力势能的零点，花盆位于 A 点的下方，其高度值取负值。若以 C 或 D 点为势能零点，则 B 点相对于它们的高度



▲ **图4-4-5** 花盆的重力势能是相对的

值取正值。

花盆从 B 移动到 C 点处或 A 点处重力所做的功，等于该过程中重力势能的减少量，而重力势能的减少量与势能零点的选取无关，因此我们可以取 B 点的重力势能为势能零点，从而计算会简单些。

解　（1）相对于 A 点的重力势能为 $E_{p1}=mgh_{B\text{对}A}=0.2\times10\times(-0.2)\text{J}=-0.4\text{J}$

相对于 C 点的重力势能为 $E_{p2}=mgh_{B\text{对}C}=0.2\times10\times0.5\text{J}=1.0\text{J}$

相对于 D 点的重力势能为 $E_{p3}=mgh_{B\text{对}D}=0.2\times10\times0.8\text{J}=1.6\text{J}$

（2）选取 B 点为势能零点，则从 B 移动到 C 点处重力势能的减少量

$$E_{pB}-E_{pC}=0-mg\cdot h_{C\text{对}B}=0-0.2\times10\times(-0.5)\text{J}=1.0\text{J}$$

从 B 移动到 A 点处重力势能的减少量

$$E_{pB}-E_{pA}=0-mg\cdot h_{A\text{对}B}=0-0.2\times10\times0.2\text{J}=-0.4\text{J}$$

即从 B 移动到 C 点处重力做功 1.0 J，从 B 移动到 A 点处重力做功 -0.4 J。

拓展　（1）物理量的变化量，又称为“增量”，指的是末态减去初态，例如动能的变化量，常写作 $\Delta E_k=E_{k2}-E_{k1}$。同样，重力势能的变化量是 $\Delta E_p=E_{p2}-E_{p1}$。重力做功与重力势能变化的关系是：重力所做的功等于重力势能的减少，即 $W_{\text{重力}}=E_{p1}-E_{p2}=-(E_{p2}-E_{p1})=-\Delta E_p$。

（2）物体在某一过程中重力势能的变化量是比物体在某一位置时的重力势能更有意义的物理量，因为它与重力做功直接联系着。在求某个过程中重力势能的变化时，由于重力势能的变化量与选择的势能零点无关，因此可以根据实际情况，以计算上最简单为原则选定合适的位置作为零势能点。

> 重力做的功等于重力势能的减少量，这与有没有其他外力对物体做功无关。

弹性势能

如图4-4-6所示，射箭比赛中，运动员的手一松开，拉满弦的弯弓在往回收缩时就把箭射出去。可见，发生弹性形变的物体在恢复原状的过程中能够做功，说明它具有能量。在物理学中，把物体由于发生弹性形变而具有的能量叫作**弹性势能**（elastic potential energy）。



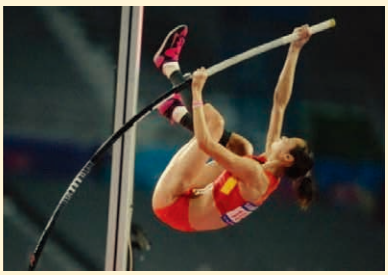
▲ **图4-4-6**　弯弓搭箭

观察思考

如图4-4-7所示是物体具有或利用弹性势能的情形。你还能再列举出物体具有弹性势能的一些例子吗？你认为弹性势能的大小与什么因素有关？



（a）蹦床



（b）撑竿跳



（c）弹簧拉力器

▲ 图4-4-7

在物理学中，我们还会遇到分子势能、电势能等概念，但只有重力势能和弹性势能属于机械能的范畴。

一个物体的形变量越大，弹性势能越大。重力势能和弹性势能是**势能**的两种不同类型。

势能是系统所共有的

讨论交流

重力是如何产生的？若地球消失，物体的重力势能还存在吗？

弹力是如何产生的？单独一个物体能发生弹性形变而具有弹性势能吗？

重力是由于地球的吸引而产生的，它是地球与物体组成的系统的内力。研究重力做功，本应既考虑重力对物体所做的功，也考虑它的反作用力，即对地球的引力所做的功，但由于地球与地面上的物体相比较，质量可以看作无穷大，地球的位移完全可以忽略，因此不必考虑物体吸引地球的力对地球运动的影响，只需考虑重力对物体的影响，这就是我们常常说“物体的重力势能”的原因。但这只是一种通俗的说法，实际上，重力势能是地球和受重力作用的物体组成的系统所共有的，不是地球上的物体单独具有的。这一点从重力势能的表达式$E_p = mgh$可以看得很

清楚：m是物体的质量，g是重力加速度，它是由于地球的吸引而产生的，h则是物体相对于地球表面上某一平面（零势能面）的高度。如果没有地球，就没有g，也谈不上h了。

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。

自我评价

1. 关于重力势能的几种理解，正确的是（　　）

A. 放在地面上的物体，它的重力势能一定等于零

B. 重力势能的变化量与参考平面的选取无关

C. 重力势能减小时，重力对物体做正功

D. 物体与零势能面的距离越大，它的重力势能也越大

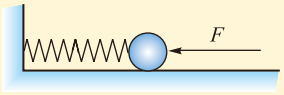
2. 如图 4-4-8 所示，一轻弹簧左端固定，右端连接一物体，物体放在光滑的水平面上。现对物体施加一作用力 F，使物体处于静止状态。然后撤去 F，物体将向右运动。则物体从静止开始向右运动一直到速度再次为零的过程中，下列说法正确的是（　　）

A. 弹簧的弹性势能逐渐减少

B. 弹簧的弹性势能逐渐增加

C. 弹簧的弹性势能先减少后增加

D. 弹簧的弹性势能先增加后减少



▲ 图4-4-8

3. 如图 4-4-9 所示，利用现代科技可以实现磁悬浮。若磁悬浮列车的质量为 20 t，因磁场间的相互作用，列车浮起的高度为 10 mm，则列车浮起过程中克服重力所做的功是多少？重力势能增加了多少？

4. 如图 4-4-10 所示，假设某跳高运动员质量为 60 kg、身高为 1.8 m，在某次背越式跳高中跳过 2.1 m 高的横杆而平落在垫子上，落垫时运动员的重心离地高度为 60 cm。取 $g = 10\ \mathrm{m/s^2}$，试估算：

（1）上升阶段运动员至少要克服重力做多少功？

（2）下降阶段重力做了多少功？



▲ 图4-4-9　磁悬浮列车



▲ 图4-4-10　背越式跳高

发展空间

走向社会

估算建造明长城人工墙体所消耗的能量

长城是世界上最伟大的军事防御工程，也是古代中国建筑工程的奇迹。从战国时期到明朝，长城的修建历时2000余年。历经战争、自然灾害等因素的摧残，长城大部分已经被破坏，现存的长城遗迹主要为明朝所建的明长城。2009年结束的明长城资源调查工作所获数据显示，河北、北京、天津境内现存明长城广泛分布于三省（直辖市）境内的66个县（市、区）。其中构成明长城主干的墙体主线东起秦皇岛市山海关区，西行穿越38个县（市、区）到达晋、冀交界的太行山东麓。明长城总长度为8851.8 km，其中人工墙体为6259.6 km，天然段2232.5 km，壕堑359.7 km。

若把长城的城墙、烽火台、城台等看成是等高的，取长城的平均高度为7.8 m，平均宽度为6.5 m。制造长城的材料有青砖、石块、土坯等，我们可以把长城看成是密度为2500 kg/m^{3}的巨大石块。你能根据以上数据估算建造明长城人工墙体所消耗的能量吗？

假设共有1000名劳动者参与修建工作，每名劳动者每天消耗150 kcal（1J＝0.24 cal）的能量来建造明长城，且每个劳动者每年工作360天，则大约需要多少年才能把明长城建好？

5 机械能守恒定律

我们在初中已经知道，动能和势能（包括重力势能和弹性势能）统称为**机械能**（mechanical energy）。动能和势能是可以相互转化的，如果只有它们相互转化，尽管各自的大小会变化，但机械能的总和不变，即机械能守恒。

那么，在什么条件下才只有动能和势能的相互转化呢？或者说，在什么条件下机械能守恒？

动能和势能的相互转化

动能和势能的相互转化是日常生活中常见的现象。

重力势能可以与动能相互转化。如图4-5-1所示的是小朋友们正在荡秋千的情景：下降过程中重力做正功，他们的重力势能减少，而他们的速度逐渐变大，动能增加

了，这时重力势能转化成动能。当他们上升时，一个逆向的能量转化过程就开始了：重力做负功，他们的重力势能增加，动能减少，这时动能转化成重力势能。

弹性势能可以与动能相互转化。如图4-5-2所示的是运动员在比赛中奋力回球的瞬间：网球触拍减速时，克服网线弹力做功，网线的弹性势能增大，网球的动能减少，这时动能转化为弹性势能。当网球反弹加速时，网线弹力对网球做正功，网线的弹性势能减少，网球的动能增大，这时弹性势能转化为动能。

如图4-5-3所示的是一位勇敢者正在挑战蹦极运动。他的动能、重力势能和弹性绳的弹性势能之间也会发生相互转化。



▲ **图4-5-1**　小朋友们在荡秋千



▲ **图4-5-2**　运动员奋力击球



▲ **图4-5-3**　勇敢者挑战蹦极运动

讨论交流

1. 动能和势能之间的转化与力做的功之间有什么关系？
2. 生活中还有哪些动能和势能相互转化的现象？请举例说明。

从上述实例我们看到，动能和势能之间的转化是通过重力或弹力做功来实现的。重力或弹力做正功的过程就是势能减少的过程，但减少的势能是否一定转化为动能呢？这是我们要讨论研究的问题。

机械能守恒定律

功与能量的转化密切相关，我们从力做功的角度分析能量转化过程中的定量关系。

理论探究

我们学习过重力做功与重力势能变化的关系，也学过合力做功与物体动能变化的关系，这两个关系用公式表示分别是：

$$W_{重力} = -\Delta E_p = E_{p1} - E_{p2} \quad ①$$

$$W_{合力} = \Delta E_k = E_{k2} - E_{k1} \quad ②$$

如果只有重力对物体做功，根据①式，其重力势能减少，减少量等于重力所做的功；而这个重力所做的功，就是合力对物体所做的功，根据②式，这个功的数值就等于物体增加的动能，即

$$-\Delta E_p = \Delta E_k \quad ③$$

将③式改写成$E_{p1} - E_{p2} = E_{k2} - E_{k1}$，并移项整理，得

$$E_{p1} + E_{k1} = E_{p2} + E_{k2} \quad ④$$

③式表明，系统势能的减少等于动能的增加；④式则表明，系统不同时刻的动能与势能之和，即总机械能保持不变。这说明，在只有重力做功的过程中，系统的机械能守恒。

由于我们没有学习弹性势能的表达式，因此这里不作理论推导。

只有弹力做功的过程与此类似，系统的动能与弹性势能之间相互转化而总机械能守恒。

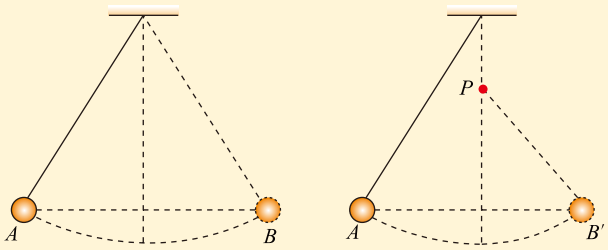
在只有重力或弹力做功的系统内，动能和势能会发生相互转化，但总机械能保持不变，这就是**机械能守恒定律**（law of conservation of mechanical energy）。它是普遍的能量守恒定律在力学范围内的一种特殊情况，系统机械能的减少或增加，并不意味着能量的消失或创生。从更普遍的范围考察发现，能量既不能创生，也不能消失，只能从一种形式转化为另一种形式，或从一个物体转移到另一个物体，在这些过程中能量的总量保持不变。

关于机械能转化与守恒的实验观察

让我们观察几个关于机械能转化与守恒的实验，并思考相关的问题。

观察思考

1. 将小钢球用长约1.5 m的细线悬挂在黑板前方，如图4-5-4所示。将小球拉至细线与竖直方向约成30° 角的A位置，并在黑板上画一条与A位置等高的水平线。在A位置由静止释放小球，让它在竖直平面内摆动。观察发现，小球可以摆到跟释放点A等高的B位置。用一根笔芯抵在悬挂点正下方的某点P处，挡住细线，再进行观察，发现小球能摆到与A点近似等高的B'处。



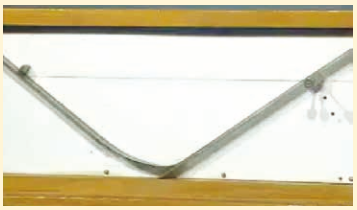
▲ **图4-5-4**　摆球在做往复运动

根据观察到的实验现象思考：

（1）在这个过程中，小球受到哪几个力的作用？它们中哪些力做功？哪些力不做功？

（2）小球在摆动过程中总能回到原来的高度，好像“记得”自己原来的高度，从能量的角度看，这个现象说明了什么？

2. 如图4-5-5所示为伽利略斜面实验装置，小钢球在左侧倾斜轨道某一位置由静止释放后，会沿着轨道来回运动。请注意观察：小钢球能否回到原来释放点的高度？分析其中的原因。



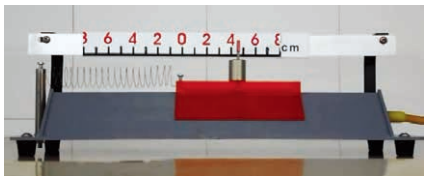
▲ **图4-5-5**　钢球沿轨道往复运动

在摆球实验中，由于细线是不可伸长的，因此细线对小球的拉力与小球的运动方向垂直，拉力不做功。忽略空气阻力的影响，只有重力对小球做功，机械能守恒，因此小球能回到原来的高度。但仔细观察，会发现小球回来的高度与原来的高度总差上一点，这又是为什么？

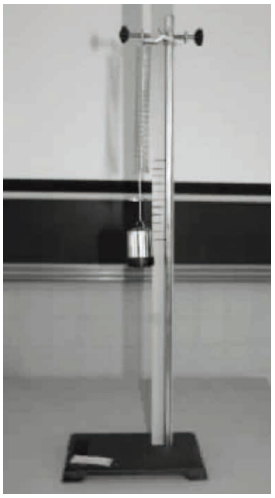
小球在摆动过程中，如果细线的伸长不能忽略，它对小球的拉力还不做功吗？

在如图 4-5-4 所示的实验中，将小钢球换成乒乓球，会产生怎样的现象？先动手做一做，再将观察到的现象与小钢球的摆动现象作比较，想一想其中的原因。

比较上述三个实验现象，我们不难发现，“只有重力做功”是系统机械能守恒的必要条件。当摩擦力或空气阻



▲ 图4-5-6 滑块沿水平方向做往复运动



▲ 图4-5-7 重物挂在弹簧下沿竖直方向做往复运动

力做功不能忽略时，重力势能就不能全部转化成动能，或者动能就不能全部转化成重力势能。

如图 4-5-6 所示，滑块在弹簧的作用下沿水平气垫导轨做往复运动。仔细观察滑块的运动过程，思考以下问题：

（1）滑块受到几个力的作用？各个力做功的情况是怎样的？

（2）有哪些形式的能量参与转化？如何转化？转化过程中，弹簧和滑块组成的系统机械能守恒吗？

如图 4-5-7 所示，弹簧下端悬挂的钩码在竖直方向上做往复运动。你认为运动过程中，弹簧与钩码组成的系统的机械能守恒吗？为什么？

机械能守恒定律的应用

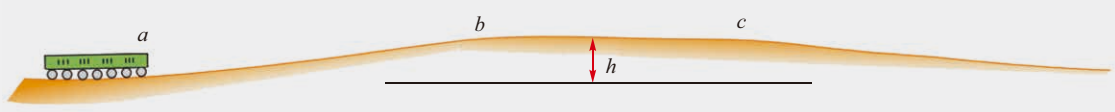
机械能守恒定律是力学中的一条重要规律，利用这一规律，可以方便地解决生活和生产中的许多问题。

例题示范

问题 如图 4-5-8 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/s^2）



▲ 图4-5-8 电车进站

分析 电车进站和出站的过程中，已经切断电源，即不再受到发动机的动力，据题意也不考虑所受的摩擦阻力，则这个过程中只有重力做功，满足机械能守恒的条件，可以应用机械能守恒定律解决问题。

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

根据机械能守恒定律，这些动能全部转化为势能，有

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

$$h' = \frac{v_1^2}{2g} = \frac{7^2}{2\times 10}\ \text{m} = 2.45\ \text{m}$$

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　　$v_2 = \sqrt{v_1^2 - 2gh} = \sqrt{7^2 - 2\times 10\times 2}\ \text{m/s} = 3\ \text{m/s}$

电车到达 b 点时的速度是 3 m/s。

拓展　（1）从能量转化的角度分析解决这类问题的优点是不需要考虑变化过程中的细节，从而使问题的解决变得简单。

（2）如果不选取 a 点所在的水平面为重力势能的参考平面，可否利用机械能守恒定律解答本题？请试一试。

自我评价

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. 做匀变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. “神舟”载人飞船在发射至返回的过程中，以下哪些阶段中返回舱（与地球组成的系统）的机械能是守恒的（　　）

A. 飞船升空的阶段

B. 飞船绕地球在椭圆轨道上的运行阶段

C. 返回舱在大气层以外向着地球做无动力飞行的阶段

D. 降落伞张开后，返回舱下降的阶段

3. 从高楼的窗户随意向外丢东西是很危险的。若某人从十楼的窗户以 8 m/s 的速度向外抛出一个苹果，你能估算出苹果落地时的动能吗（空气阻力不计）？你认为还需要知道哪些物理量？你估计这些物理量应该是多大？苹果落地时的动能与苹果抛出时的初速度方向有关吗？

4. 以 20 m/s 的速度将一物体从地面竖直上抛，若忽略空气阻力，g 取 10 m/s^2，求：

（1）物体上升的最大高度；

（2）以水平地面为零势能面，物体在上升过程中重力势能和动能相等的位置距离地面多高？

5. 质量为 30 kg 的小孩荡秋千，运动过程中偏离竖直方向的最大角度为 60°，则每根秋千绳承受的最大拉力为多少？（不计空气阻力）

发展空间

实验室

粗测圆珠笔中弹簧的弹性势能

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4-5-9所示，将笔向下按压，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，粗测压笔尾部的小帽时其内部弹簧弹性势能的增加量。



▲ **图4-5-9** 尾部装有弹簧的圆珠笔

6 实验：验证机械能守恒定律

机械能守恒定律是力学中的一条重要规律。我们可以通过实验来研究物体自由下落过程中动能与势能的变化，从而验证机械能守恒定律。

1. 实验目的

验证只有重力做功时，系统的机械能守恒。

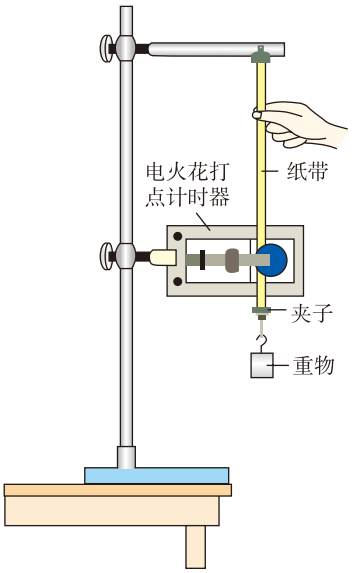
2. 实验装置

如图4-6-1所示。

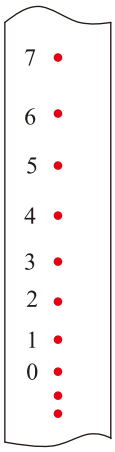
3. 实验原理

在重物自由下落的过程中，如果它受到的空气阻力和纸带受到的摩擦力可以忽略不计，则机械能守恒，即

系统机械能的总量保持不变。以重物下落过程中的某一点A为参考，设重物的质量为m，利用纸带可以测出重物对应于A点的速度v_A，再测出重物由A点下落Δh后经过B点的速度v_B。在误差允许范围内，若等式$\frac{1}{2}mv_B^2-\frac{1}{2}mv_A^2=mg\Delta h$成立，则机械能守恒定律得到验证。



▲ **图4-6-1**　验证机械能守恒定律的装置



▲ **图4-6-2**　在纸带上选取若干个点

4. 实验操作

按图4-6-1所示的装置装配好实验器材。先接通电源，后释放纸带，让重物自由下落。打点计时器在纸带上打下一系列点，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 4-6-2）选定两个计数点，测出它们之间的距离和重物在各点的速度。设计实验数据表格，并将测量和计算的数据记录在表格中，验证这一过程中机械能是否守恒。

讨论交流

在完成验证机械能守恒定律的实验后，请思考以下问题并与同学讨论：

（1）重物下落时，除了重力外还会受到哪些力？怎样减少这些力对实验的影响？

（2）实验时，是否必须测量重物的质量？为什么？

（3）重物下落过程中各点的瞬时速度应该如何计算？

5. 实验分析

经过分析可以知道：

重物下落时，除了受到重力以外，还受到空气阻力，同时纸带受到摩擦阻力。因此可以选密度大、体积小的物体来减小阻力的影响。

由于我们要验证的是动能的增加量与重力势能的减少量相等，其表达式为$\frac{1}{2}mv_B^2-\frac{1}{2}mv_A^2=mg\Delta h$，表达式两边都含

有物体的质量，所以只需要验证表达式$\frac{1}{2}v_B^2-\frac{1}{2}v_A^2=g\Delta h$即可。

而我们通常利用“中间时刻的瞬时速度等于这段时间的平均速度”的方式计算瞬时速度，在本实验中这个方式可靠吗？请想想其中的原因。

自我评价

1. 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、竖直向下抛出和水平抛出，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

2. 在“验证机械能守恒定律”的实验中，下列说法正确的是（　　）

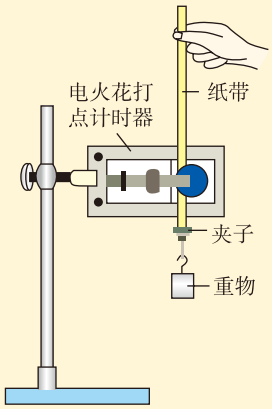
A. 必须要用天平称出重锤的质量

B. 实验时，当松开纸带让重锤下落的同时，立即接通电源

C. 开始时用手提着纸带比用夹子夹着纸带效果更好

D. 实验结果应该是动能的增加量略小于重力势能的减小量

3. 如图 4-6-3 所示是用落体法验证机械能守恒定律的实验装置示意图。现有的器材为：带铁夹的铁架台、电火花打点计时器、纸带、带铁夹的重物、天平。回答下列问题：



▲ 图4-6-3

（1）为完成此实验，除了以上的器材，还需要的器材有下面的哪些？

A. 毫米刻度尺

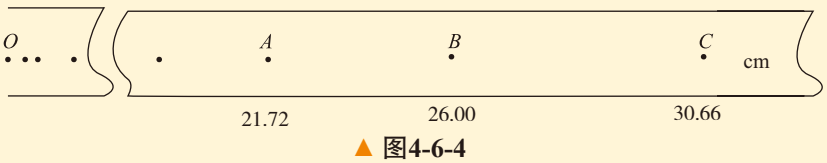
B. 秒表

C. 0 ~ 12 V 的交流电源

D. 0 ~ 12 V 的直流电源

（2）在实验中打点计时器所接交流电频率为 50 Hz，当地重力加速度 $g = 9.8\ \mathrm{m/s^2}$，实验选用的重物质量 $m = 1\ \mathrm{kg}$，纸带上打点计时器打下的连续计数点 A、B、C 到打下第一点 O 的距离如图 4-6-4 所示。则从打下 O 点至 B 点的过程中，重物重力势能的减少量 ΔE_p 及动能的增加量 ΔE_k 各是多少？（计算结果均保留 3 位有效数字）

（3）通过计算发现，ΔE_k 与 ΔE_p 相比较，哪一个较大？为什么？



▲ 图4-6-4

发展空间

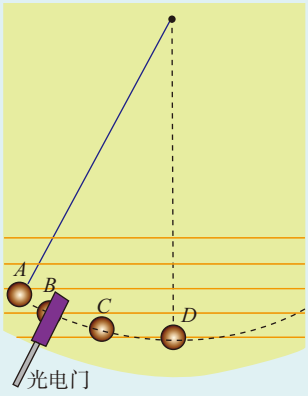
实验室

用数字化仪器验证机械能守恒

实验装置如图4-6-5所示。由于摆线的拉力始终与小球运动的方向垂直，不做功，因此在忽略空气阻力的条件下，实验中只有重力对摆球做功。

实验中，每次将球从同一位置由静止释放，将数字化仪器装置中的光电门先后放在A、B、C、D各点，测出摆球经过各点时的遮光时间，利用摆球的直径大小，就可以计算出摆球经过A、B、C、D各点时的速度。再用刻度尺分别测出A、B、C各点相对D点的高度。

运用所得数据，可以验证摆球的机械能是否守恒。



▲ 图4-6-5

反思·小结·交流

• 学后反思

1. 相对于初中物理，高中阶段对“功”的概念有了哪些更深入的理解？
2. 如何理论推导动能定理？
3. 实验探究合力的功与动能关系的基本方法是什么？还可以有哪些简易的方法？
4. 说说运用动能定理与牛顿运动定律解决问题各自的优点和不足。
5. 重力做功的特点是什么？重力做功与重力势能变化的关系是什么？
6. 摩擦阻力、空气阻力做功有什么特点？
7. 机械能守恒的条件是什么？

• 自主小结

1. 准确表述功、功率、动能、势能、机械能等概念。
2. 理解动能定理，明确运用动能定理解决问题的基本思路。
3. 理解机械能守恒定律，明确运用机械能守恒定律解决问题的基本思路。

• 相互交流

1. 从“功”的概念的起源谈谈物理学与技术之间的关系。
2. 通过本章学习，说说从“能量”角度思考运动问题通常用到哪些思维方法。

本章复习题

1. 篮球运动员的定点跳投动作可分解如下：静止在地面上的运动员先屈腿下蹲，然后突然蹬地，重心上升双脚离开地面，离地后重心继续上升，到达最高点后投出篮球。已知某运动员的质量为m，双脚离开地面时的速度为v，从下蹲到最高点的过程中重心上升的高度为h，下列说法正确的是（　　）

A．从下蹲到离开地面，地面对运动员做的功为mgh

B．从下蹲到离开地面，地面对运动员做的功为零

C．从下蹲到离开地面，运动员的机械能增加了$mgh+\frac{1}{2}mv^2$

D．从下蹲到最高点，运动员先超重后失重

2. 作为高一学生的你参加引体向上体能测试，在20 s内完成10次标准动作，每次引体向上的高度约为50 cm，则此过程中你克服重力做功的平均功率最接近于（　　）

A．0　　B．150 W

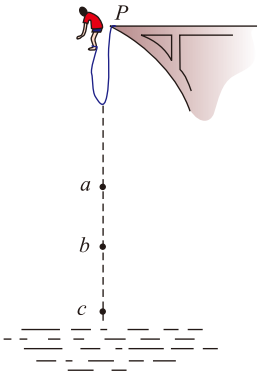
C．300 W　　D．450 W

3. 某同学身高1.80 m，在运动会上他参加跳高比赛，起跳后身体横着越过了1.80 m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

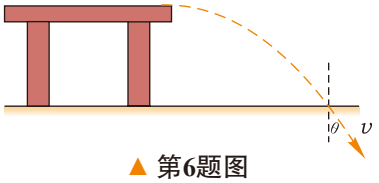
4. “蹦极”是一种很有挑战性的运动。如图所示，某人身系弹性绳从高空P处自由下落，做蹦极运动，图中a是弹性绳原长的位置，c是人所到达的最低点，b是人悬空静止时的平衡位置，不计空气阻力，则人到达_____点时动能最大，人到达_____点时弹性绳的弹性势能最大。



▲ 第4题图

5. 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？

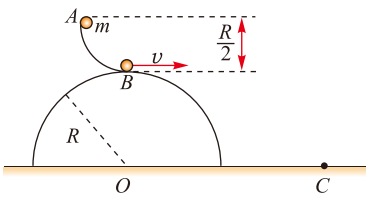
6. 如图所示，张明同学在做值日擦桌面时，不慎将桌面上的橡皮扫出桌面，已知橡皮落地时的速度方向与竖直方向的夹角为θ。若不计空气阻力，取地面处为重力势能参考平面，橡皮被扫出桌面时的动能与它的重力势能之比等于多少？



▲ 第6题图

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. 如图所示，光滑半球的半径为R，球心为O，固定在水平面上，其上方有一个光滑曲面轨道AB，高度为$\frac{R}{2}$。轨道底端水平并与半球顶端相切。半径可不计、质量为m的小球由A点静止滑下，最后从B点离开，首次落在水平面上的C点。重力加速度为g，求：（1）OC之间的距离；（2）小球运动到C点的速率。



▲ 第8题图



第五章

经典力学的局限性与相对论初步

- 经典力学的成就与局限性
- 相对论时空观简介
- 宇宙的起源和演化

经典力学在描述世界的运动时，认为时间、空间与物质及其运动完全无关，未来与过去一样，都是确定的，宇宙就像一座巨大的钟表。但世界真是这样的吗？

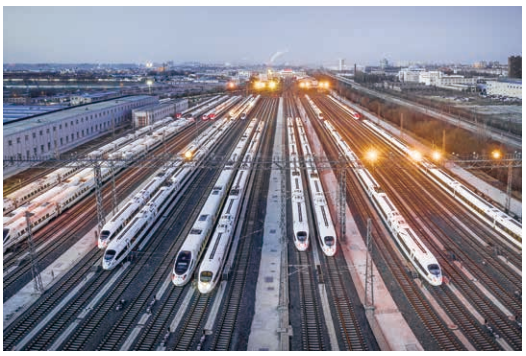
1905年，爱因斯坦创立了狭义相对论。相对论和量子论一道引发了20世纪物理学的革命。我们将在本章中了解相对论的一些基础知识。

1 经典力学的成就与局限性

这是一个技术飞速发展的伟大时代。科学家、技术专家和工程师们联手，打造出许多气势恢宏的“超级工程”（图5-1-1），“可上九天揽月，可下五洋捉鳖”成为现实。你知道这些使梦想成真的现代技术的理论基础是什么吗？



（a）上海长兴岛造船基地



（b）中国高铁彰显“中国速度”



（c）港珠澳大桥



（d）中国载人航天工程

▲图5-1-1 “超级工程”

经典力学的成就

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，以此为基础的经典力学体系只用几个基本的概念和原理就可以解释行星和卫星的轨道、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

显示出理论的正确性，体现了它的巨大魅力。

经典力学思想方法的影响远远超出了物理学与天文学的范畴。不仅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。经典力学对社会和文化发展的影响巨大而深远。

经典力学促进了技术层面的巨大创新，200 多年前，蒸汽机的发明和改进，推动了第一次工业革命，使人类由农业文明走向工业文明。机械制造、土木建筑、交通运输……不计其数的技术领域，均以经典力学为理论基础。今天，我们借以翱翔太空、探索宇宙的航空航天技术，更离不开经典力学的支撑。

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。经典力学是从宏观的、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？

讨论交流

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。这与你的生活经验相符吗？

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 1500%，即相差 15 倍，经典力学完全不适用了。在后面的学习中我们将会知道，时间与空间是相关的，它们的关系将在物体运动速度接近

光速时显现出来。

观测数据表明，牛顿运动定律和万有引力定律，对于受到很强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。

经典力学给出的是一幅机械运动的图景，其中的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 $\Delta E \to 0$。对机械运动来说，只要能知道初始条件，就可以准确地确定其以往和未来的运动状态。然而在微观领域，即对尺度在 10^{-10}m 以内的微观粒子（质子、中子、电子等）来说，它们丰富多彩的运动充满了不确定性和离散性，此时经典力学也不适用。

因此，经典力学只适用于宏观（线度 $>10^{-10}$m）、低速（$v \ll c$）、弱引力场（例如地球附近）的范围。超出以上范围，经典力学不再适用，要由相对论、量子论等来取代。

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。

自我评价

1.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做比较。在比较中你得到什么结论？

2.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？

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是非常先进的，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。由牛顿亲手建立起来的经典力学体系，成为唯物主义自然观的重要自然科学基础之一。

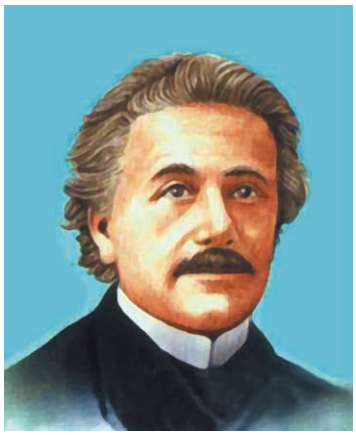
牛顿重大科学成就的取得和他创立并应用了独到的科学方法分不开。这些重要的科学方法包括分析与综合。分析的方法在于将实验与归纳、演绎结合，发现物理定律。综合方法则包括两个方面：一是根据已发现的一般定律，运用公理法并将数学和演绎法相结合，建立数

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，他始终如一的求真风范，坚韧不拔的探索毅力，大胆质疑的批判精神，严谨求实的科学态度，成为此后科学工作者的光辉典范。

2　相对论时空观简介

牛顿力学建立后，关于电磁现象和光现象的研究也不断获得了巨大的发展。19 世纪 60 年代，麦克斯韦建立了将电磁现象和光现象统一起来的电磁场理论。按照麦克斯韦电磁场理论，真空中的光速是一个常量，在不同惯性参考系中应当有相同的值，这与经典力学相矛盾。爱因斯坦（图 5-2-1）对此进行了深入研究，并提出了两个基本假设：一是对不同的惯性系，物理规律（包括力学的和电磁学的）都是一样的；二是光在真空中运动的速度在任何惯性系中测得的数值都是相同的。在这两个基本假设的基础上，爱因斯坦于 1905 年创立了狭义相对论。



▲ **图5-2-1**　爱因斯坦（Albert Einstein，1879—1955）

狭义相对论

1. 同时的相对性

据爱因斯坦回忆，他从 16 岁起就开始思考时间的概念了，经过 10 年，他首先得出“同时是相对的”这样的结论。

所谓“同时是相对的”，是指相隔一定距离发生的两件事，在一个参考系中观测是同时发生的，在相对于此参考系运动的另一个参考系中观测就可能不是同时，而是一先一后发生的。但在经典力学中由于时间的测量与参考系无关，两个事件的发生是同时还是不同时，也就与参考系无关了，即同时是绝对的。

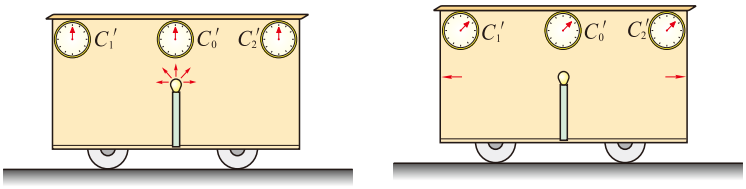
同时为什么是相对的？请思考下面的理想实验。

理想实验不一定真正摆出仪器实际去做，它是依据已知的可靠的科学规律进行合理的推理，来看某种现象会不会发生，某种思想会不会产生矛盾。在现代物理学的发展中，理想实验也起了很大的作用。

理论探究

假设一列火车在平直的轨道上以很高的速度 u 匀速驶过站台，在车厢的正中放有一个闪光灯。现在使该灯发出一次闪光向周围传播。闪光照到车厢的前壁和后壁，是两个事件。小丽和她的静止在火车参考系中的小伙伴们在车上观测，小明和他的静止在站台参考系中的小伙伴们在站台上观测，他们认为这两个事件是同时发生的吗？即闪光是同时到达前后壁的吗？

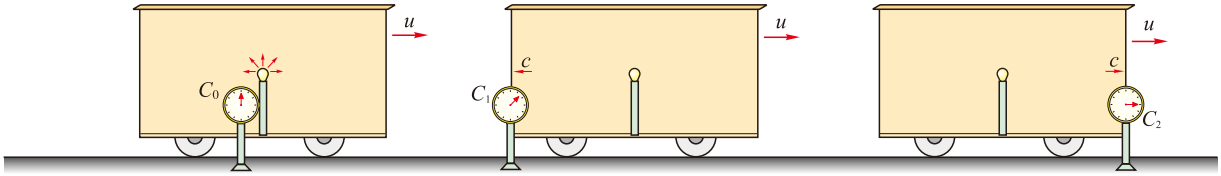
小丽用车厢内同步的（即对准了的）钟 C_0'、C_1' 和 C_2' 测量，由于车厢是惯性系，光的速率向前和向后一样，而且经过的距离相同，所得的结果一定是光到达前壁和到达后壁这两个事件同时发生（图 5-2-2）。



（a）光发出　　（b）光同时到达前后壁

▲ **图5-2-2**　在车厢内观测

小明以站台为参考系，用安装在站台上的同步钟 C_0、C_1 和 C_2 测量，结果又如何呢？由于地面是惯性系，闪光向前和向后传播的速率是相同的，都等于在车厢中的速率，但是向前传播的光从发出到到达车厢前壁的时间内，前壁已向前走了一段距离；而向后传播的光从发出到到达后壁的时间内，后壁已迎着光线走了一段距离。向前的光传播的距离要大于向后的光传播的距离，所以光先到达后壁而后到达前壁。在站台上观测这同样的两件事，不是同时发生的（图 5-2-3）！

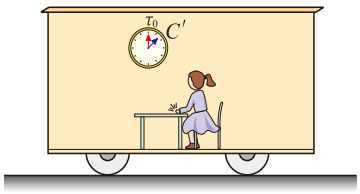


（a）光发出　　（b）光先到达后壁　　（c）光后到达前壁

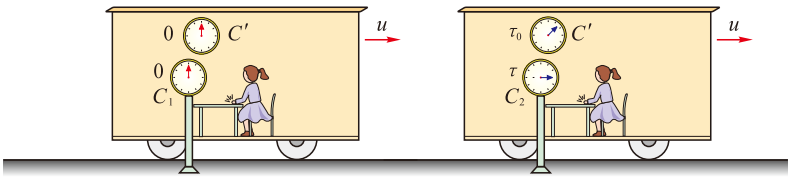
▲ **图5-2-3**　在站台上观测

2. 运动时钟变慢

设在以速率 u 相对于站台运行的车厢中，小丽坐在一张小桌旁，车厢壁挂有一只钟 C'。现在小丽拍了两下桌子。这两次拍桌子，或者用相对论的术语叫作两个事件之间的时间间隔，可直接由钟 C' 读出数值，记作 τ_0，称为这两次拍桌子之间的**固有时**（proper time）（图 5-2-4）。在站台上观测，则需要用安装在站台上的两只同步的钟。这是因为从站台参考系来看，小丽是在不同地点各拍一下桌子的（图 5-2-5）。这两只钟给出的小丽两次拍桌子之间的时间间隔记作 τ。由狭义相对论可以导出狭义相对论的时间变换公式



▲ **图5-2-4**　在车厢内观测



（a）拍第一下　　（b）拍第二下

▲ **图5-2-5**　在站台上观测

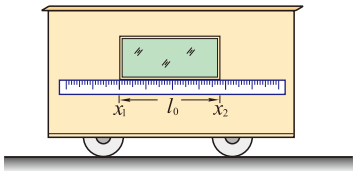
$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1-\dfrac{u^2}{c^2}}}$$

这一公式表示：同样的两件事，在它们发生于同一地点的参考系内所经历的时间最短；在其他参考系内观测，这段时间要长些。这一现象称为时间的相对性，也称为“动钟变慢”。

3. 长度的相对性

我们借助长度的测量来讨论相对论空间概念。仍旧考虑那节以极高速度 u 开过站台的车厢。现在要测量车厢上一扇窗户的水平宽度。在车厢内测量，用一根长尺沿窗户的水平棱放置，记下这棱的两端的位置读数 x_1 和 x_2，然后相减，求出 $l_0 = x_2 - x_1$ 即得。我们称其为**固有长度**（proper length），或称为静长（图 5-2-6）。

注意，由于窗户相对于车厢是静止的，这一结果跟何时记下 x_1 和 x_2 以及先记谁后记谁没有关系。

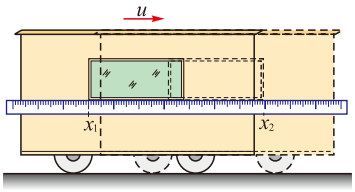


▲ **图5-2-6**　在车厢内测量车窗的宽度

讨论交流

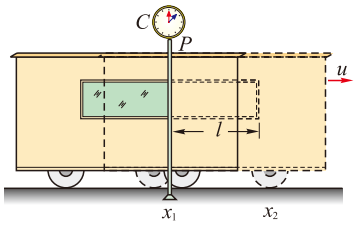
设想一下，小明在站台上仍拿一根长尺，想测量同一窗户的水平宽度，他该怎么测呢？

在站台上，将一根长尺平行于窗户的水平棱放置，记下棱两端的位置读数 x_1 和 x_2。这时，在什么时刻记下 x_1 和 x_2 就很关键了。由于从站台上看来窗户在运动，如果先记下棱后端的 x_1，过一会儿再记下其前端位置 x_2，两者的差 x_2-x_1 显然不再是窗户的水平宽度（图 5-2-7）。先记下 x_2 再记下 x_1 也不行。只有同时记下棱两端的位置，这样得到的 x_2-x_1 才能作为运动的窗户的宽度。也就是说，对一个运动的物体，要测定它沿运动方向上的长度，是和同时的概念紧密联系的。



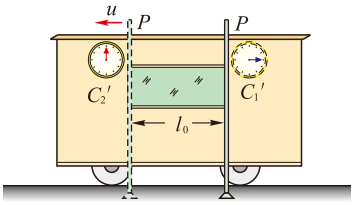
▲ **图5-2-7** 在车站上先记下x_1，过一会儿再记下x_2，这“一会儿”工夫，窗户发生了移动，x_2-x_1不再对应窗户的水平宽度

我们进行如下推导：在站台上立一柱 P，以 τ_0 表示在站台上观察到窗户的前后端依次通过 P 柱的时间间隔，由于车厢的速率为 u，则在站台上测得的窗户的宽度，也就是窗户前后端相隔的距离，应为 $l=u\tau_0$（图 5-2-8）。



▲ **图5-2-8** 在站台上观测，虚线表示车厢后来的位置

现在，我们换一个角度，从车厢内向外看，这时站台（包括立柱 P）是以速率 u 向后运动的。以 τ 表示立柱依次通过窗户前后端的时间间隔。由于在车厢参考系内窗户的宽度为固有长度 l_0，所以有 $l_0=u\tau$（图 5-2-9）。注意，τ 和



▲ 图5-2-9　在车厢内观测，虚线表示立柱后来的位置

τ_0 是不相同的。由于窗户前后端分别与立柱 P 相遇这两个事件在站台参考系内是在同一地点发生的，所以 τ_0 是这两个事件之间的固有时。利用时间变换公式可以得到

$$l = u\tau_0 = u\tau\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}$$

即

$$l = l_0\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}$$

这就是狭义相对论的长度变换公式。它说明，一根尺子（上面的例子中是窗户的水平棱）在运动时的长度总要比它静止时的长度小（$\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}<1$）。这一现象常通俗地称为“动尺收缩”。

4. 相对论质量和能量

在经典物理中，质量和能量是分别独立量度的。而狭义相对论中，物体的质量 m 与它所具有的能量 E 存在确定的关系，二者的关系就是著名的质能方程

$$E = mc^2$$

其中 c 是光在真空中的速率。

上述关系式中的质量 m 是经过狭义相对论“改造”过的质量，它不是一个不变的量。它和物体的运动速率 v 有以下的关系：

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

此式中 m_0 是 $v = 0$ 时物体的质量，称为静质量，它是不变的量。

5. 相对论时空观

狭义相对论的时间变换公式和长度变换公式说明，同一段时间或长度在不同的惯性系内测得的结果是不一样的。这就是说，时间和空间的量度是与物体的运动有关的，是相对的。运动物体的长度测量建立在必须同时进行观测的基础上，说明时间和空间的量度又是相互紧密联系的。这种对时间和空间量度的相对性和相互联系的认识是相对论时空观的主要支点。它是对牛顿力学经典时空观的革命性变革，并已成为现代物理学，特别是高速运动物理学的基础。

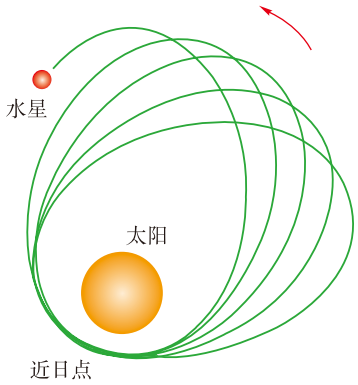
另外，也要看到，经典时空观是相对论时空观的特殊表现。在低速范围内，在广泛的技术领域，建立在经典时空观的基础上的牛顿运动定律仍然成立。探索太空的宇宙航行能够实现就是明证。

广义相对论点滴

爱因斯坦有一个基本思想：自然界遵循的规律是统一的。根据这一思想，在建立狭义相对论后，经过 10 年的刻苦研究，他提出了两个基本假设：广义相对性原理和等效原理，并在此基础上建立了广义相对论。目前，广义相对论已被包括如下列举的大量实验所支持。

1. 引力作用使光波发生频移，从引力势能低处发出的光波在引力势能高处接收到时其频率变低，发生“红移”；相反，从引力势能高处向引力势能低处发射光波，接收到的频率变高，发生“蓝移”。这已被地面上精密的实验证实。

2. 水星绕太阳运动的轨道与根据牛顿万有引力定律计算所得的不一致，这是一个在天文学史上长达百年的困惑。人们曾经怀疑可能在水星轨道内有一颗小行星，由于它的存在造成水星轨道的异常，然而始终未找到。爱因斯坦用新建立的引力场方程取代了经典的万有引力定律，计算结果和实际观测符合得很好（图 5-2-10），解决了天文学上的百年疑难。



▲ **图5-2-10**　水星运动轨道

3. 当两个天体相互绕转时，会向外界辐射出引力波。2015 年 9 月 14 日，引力波探测器 LIGO 首次探测到引力波信号；2016 年 6 月 16 日凌晨，分别位于美国华盛顿州汉福德和路易斯安那州利文斯顿的两台引力波探测器又同时探测到了一个引力波信号（图 5-2-11）。引力波的发现证实了广义相对论，并打开一扇前所未有的窥探宇宙的新窗口（图 5-2-12）。



（a）汉福德的LIGO引力波探测器



（b）利文斯顿的LIGO引力波探测器

▲ **图5-2-11**　LIGO实验室运作两个相距3000千米的探测器



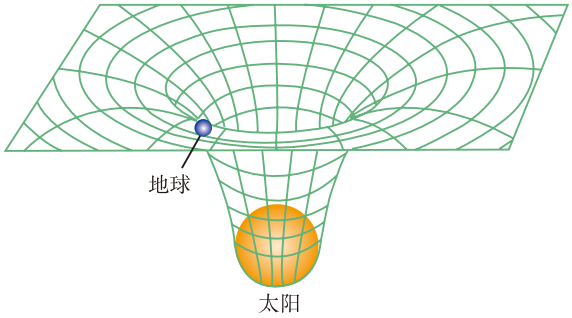
▲ **图5-2-12**　关于双黑洞碰撞产生引力波的模拟情景

100 多年前人们发现并掌握了电磁波，使得社会发生了一次技术革命，由此人类的生活发生了极其巨大的变化。那么，引力波的发现会给我们带来什么呢？让我们拭目以待吧！

广义相对论指出了时间和空间的量度与物体间的引力有关，因而与它们的质量有关。物体因具有质量而使其周围的时间和空间发生了“弯曲”。虽然这种弯曲是我们人体器官感觉不到的，但可以通过各种方法间接地加以确定，而引力正是这种“时空弯曲”的表现。“弯曲”的程度越高，对应的引力也就越强（图 5-2-13）。这种“弯曲”，用我们现在数学课中学习的欧几里得几何学已无法描述，而要运用一种新的几何学。因此，广义相对论也可以看作是一种关于引力的几何理论，它是数学与物理相结合的典范。

◎ **非欧几里得几何学**

在这种几何学中，一个三角形的内角之和不等于 180°，圆周长不等于 $2\pi r$，等等。



▲ **图5-2-13** 时空“弯曲”

在广义相对论中，时空观念比狭义相对论更推进了一步。时间、空间不仅是相对的，组成一个密切联系、不可分割的整体，并且不能脱离整个物质世界而单独存在。

人类对客观世界的认识是不断扩展和深化的，不论多么伟大的人物都只能跑好这场超级马拉松接力中的一棒，经典时空观和相对论时空观就是其中的两棒。现在这根接力棒就要传递到今天的青少年手中了。同学们，也许你们还不能充分理解上面所介绍的全部内容，但一定要立下志愿，接好下一棒，为祖国争光，为推动科学和社会的进步而努力。

3　宇宙的起源和演化

在日常生活中，除重力外，与物体质量相关的引力没有任何明显的效果。在微观领域，引力更是完全可以忽略。但是在宇宙范围内，由于星体的质量巨大，时空弯曲就十分明显，而必须用广义相对论加以研究。实际的观测和理论研究（结合关于微观粒子的理论）已经产生了一些惊人的成果，其中之一是宇宙演化的膨胀理论，即宇宙大爆炸理论。

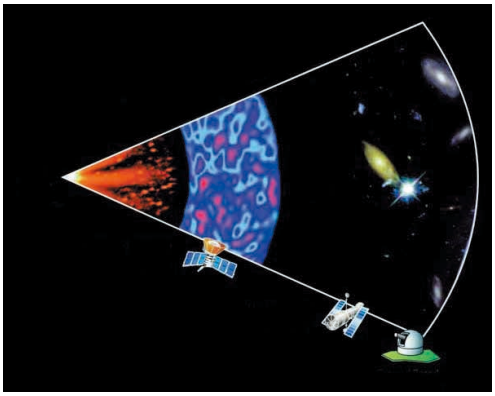
宇宙的起源

20 世纪 20 年代，天文观测已发现远处的许多星系正在离开我们向远处退行，而且越远的星系退行的速率越大。这一结果使得天文学家推论出宇宙是在膨胀着的。20 世纪 40 年代末，物理学家伽莫夫（图 5-3-1）把宇宙膨胀与粒子反应理论结合起来，提出宇宙大爆炸假说。后来，许多科学家通过理论分析及计算把这一思想具体化，描绘了大爆炸以后宇宙发展的概况。这一发展的梗概如下：

宇宙起始于一次大爆炸（图 5-3-2），那时它的温度极高，密度极大，时间从此开始，空间从此扩大。



▲ 图 5-3-1　伽莫夫（G.Gamov，1904—1968）



▲ 图5-3-2　“宇宙大爆炸”

K 是热力学温度的单位，它的数值等于摄氏温度的数值加上 273.15。

10^{-43}s 时，宇宙的密度是 10^{93} kg/m^3，温度是 10^{32}K。宇宙是混沌一团。

10^{-35}s 时，宇宙发生一次暴涨，直径在 10^{-32}s 内膨胀了 10^{50} 倍，温度降到 10^{27}K。宇宙中出现了各种各样的粒子，包括光子，它们不断通过相互作用而相互转化。

10^{-6}s 时，温度降到 10^{13}K，出现了电子、正电子。

1min 时，温度为 10^{9}K，质子和中子结合成氦核。

约 100 万年时，温度降到 3000 K，开始出现各种原子。存留的光子不再和粒子相互转化而在宇宙中到处游逛，使宇宙成为透明的。

约 10 亿年时，开始形成恒星和星系。

约 100 亿年时，出现我们的银河系、太阳和行星。

约 120 亿年时，地球上出现了生命。

约 137 亿年时出现了人类，百万年后出现了现代文明。宇宙温度降到了约 3K。

至今宇宙的年龄估计为 137 亿年。膨胀速率按最大速率光速计，现今宇宙的“直径”约为 137 亿光年，即约为 1.3×10^{23}km。

上述理论已经得到了一些实际观测的证实。除了远处星体的退行外，最有说服力的证据是宇宙背景辐射的发现。宇宙背景辐射就是在大爆炸后约 100 万年时存留到今天的热辐射。1964 年，科学家果然发现了这种存在于太空中的辐射。1989 年发射的专用卫星更精确地测得了这种辐射。测得宇宙背景辐射温度为 2.735K，与理论符合得相当完美。

宇宙的未来

宇宙会永远膨胀下去吗？这个问题现在还没有一个肯定的答案。由于宇宙间天体、星际物质等的引力作用，可能会使得这种膨胀减缓，甚至到一定时期重新收缩。除了发光的星系外，目前还很不清楚的“暗物质”“暗能量”以及未知的物质间的相互作用，都可能影响宇宙的膨胀（图 5-3-3）。天文学家们已发现，至少在现阶段，宇

宙总体上还是在加速膨胀。是什么力量推动了膨胀的加速？这种加速是暂时的还是长久的？宇宙究竟有什么样的发展“前途”？眼前对这些问题的回答都还是“不知道”。大爆炸理论能够解释很多客观事实，代表人类当前在相对论、量子力学和粒子物理基础上对宇宙的认识水平，是一种相对真理。但也必须认识到，它还没有完全成熟，今后无论在理论方面还是实验、观测方面都还有无数的工作需要我们大家去做。作为一种理论模型，大爆炸理论也必然会不断受到检验、修正和补充，也不能排除需要作重大修改的可能性。



▲ **图 5-3-3**　“悟空号”暗物质粒子探测卫星

活动

你听说过白矮星、中子星、黑洞这些名词吗？请查阅资料，了解典型的恒星演化过程。

发展空间

走向社会

阅读相关科普读物或观看有关宇宙起源的科教片，了解宇宙的演化与发展。

反思·小结·交流

• 学后反思

1. 经典力学取得的巨大成就和遇到的困难是什么？
2. 爱因斯坦在什么背景下创立了狭义相对论？

• 自主小结

1. 简要描述长度收缩效应和时间延缓效应。
2. 简要描述“时空弯曲”。

• 相互交流

1. 简要谈谈经典时空观和相对论时空观的区别。
2. 宇宙起源的典型学说是什么？恒星演化的典型模型是什么？

本章复习题

1. 在地球上观测到一次月食的时间是3h35min41s。在月球上的人认为这次月食经过了多少时间？月球绕地球运行的速率按870m/s计。

2. 一飞船以0.95c的速率飞过地球上空时，在地球上测得它的长度是18m。求此飞船的固有长度。

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 71

第三宇宙速度 third cosmic velocity 71

第一宇宙速度 first cosmic velocity 70

动能 kinetic energy 89

G

功 work 79

功率 power 85

固有长度 proper length 119

固有时 proper time 119

J

机械能 mechanical energy 102

机械能守恒定律 law of conservation of mechanical energy 104

角速度 angular velocity 30

N

能量 energy 89

P

平抛运动 motion of body projected horizontally 11

Q

曲线运动 curvilinear motion 2

T

弹性势能 elastic potential energy 99

W

万有引力定律 law of universal gravitation 64

X

线速度 linear velocity 29

向心加速度 centripetal acceleration 38

向心力 centripetal force 35

斜抛运动 motion of body projected obliquely 20

Y

引力常量 gravitational constant 64

圆周运动 circular motion 28

匀速圆周运动 uniform circular motion 29

Z

重力势能 gravitational potential energy 96

周期 period 31

后　记

为全面落实立德树人根本任务，着力发展学生的核心素养，根据《普通高中课程方案（2017 年版）》的精神，我们按照《普通高中物理课程标准（2017 年版）》对高中物理教科书进行了全面修订。

本书在修订过程中，保留了原教科书的部分内容，并得到了许多专家、学者和老师的指导与帮助。张三慧、周彩莺、郑青岳、叶兵、杨震云等同志参与了原教科书的编写；李刚、郑世彬等同志为本书的修订进行了前期的研究；张增常等同志审阅了本书修订稿的部分章节；在复审阶段，沈祖荣、彭才军、冯劲松、张生文、付涛等同志对教科书进行了审读和试教，并提出了宝贵意见。在此，我们对所有关心、支持本书编写与修订的专家、学者和老师表示衷心的感谢。

本书选用了一些图片和文字资料，对相关作者和出版社，我们一并表示诚挚的谢意。

编者

2019 年 2 月

出 版 人　李　东
责任编辑　莫永超
版式设计　李勤学　郝晓红
责任校对　贾静芳
责任印制　叶小峰

普通高中教科书

物理　必修　第二册

WULI　BIXIU

教育科学出版社出版发行
(北京·朝阳区安慧北里安园甲9号)
邮编：100101
市场部电话：010-64989009　010-64891796（传真）
编辑部电话：010-64989537　010-64989519（传真）
编辑部邮箱：wuli@esph.com.cn
网址：http：//www.esph.com.cn
各地新华书店经销
广西广大印务有限责任公司印装
开本：890毫米×1240毫米　1/16　印张：8.5
2019年8月第1版　　2022年12月第7次印刷

ISBN 978-7-5191-1967-6
定价：9.75元
如有印装质量问题，请到所购图书销售部门联系调换。