

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

高级中学试验课本 物理

第一册 (修订本)



引 言

在初中我们学习了力的知识，知道力是改变物体运动状态的原因，那么，力的大小跟运动状态的变化有什么定量关系？

学习了闭合电路的一部分做切割磁感线运动时电路中要产生感应电流，这个感应电流的大小怎样来确定呢？

学习了一些光现象，然而光到底是什么？

知道原子是由原子核和核外电子所组成，可是电子是怎样发现的？原子的核式结构是怎样知道的？人类是怎样进入微观世界的？

上面只是举出几个例子。初中学过的物理知识是很浅易的，高中需要进一步学习物理知识。物理学是一门基础科学，它研究力现象、热现象、电磁现象、光现象、原子和原子核等方面的规律。小到原子和原子核的内部，大到天体和宇宙，都有物理学的足迹。高中进一步学习物理，将扩展我们的眼界，加深我们对自然界的认识。

物理知识来源于实践，特别是来源于观察和实验。要学会仔细地观察物理现象，分析和研究物理现象。要认真地做好实验，学会使用仪器，学会处理实验得来的数据，作出结论。要有意识地提高自己的观察实验能力。

物理概念和规律是从观察实验和大量事实中经过抽象、概括得来的，或者经过推理得来的。我们要重视知识得来的过程。不重视这个过程，头脑里只剩下一些干巴的条文和公式的堆积，就不可能想清其中的道理，对物理知识有确切的理解，而且思维能力也得不到训练。学习物理，要重在理解，要有意识地提高自己的科学思维能力。

物理学的知识有很广泛的应用，物理学的发展对整个科学技术的进步有巨大的作用。电子技术、原子能科学、空间科学、激光技术等现代科学技术，都是建立在物理学基础之上的。学习物理，要有应用意识，善于把知识应用到实际中去。要在知识的各种应用中，学会对具体问题进行分析，培养自己运用知识分析解决实际问题的能力。

新的一门课程高中物理现在开始了。物理世界等待着我们去探索。物理知识等待着我们去掌握，去应用。希望同学们努力钻研，勤于思考，把攀登科学作为一种志向，这样，将会对物理学产生浓厚兴趣，就一定会把这门课学好！

几何光学

光是一种重要的物理现象，我们能够看到外部世界丰富多采的景象，就是因为眼睛接收到了光。光与人类生活和社会实践有密切联系，据统计，人类通过感觉器官接收到的信息中，有 90%以上是通过眼睛得来的。

人类很早就开始了对光的观察研究，逐渐积累了丰富的知识。远在 2400 多年前，我国的墨翟（公元前 468 ~ 前 376）及其弟子们所著的《墨经》一书，就记载了光的直线传播、影的形成、光的反射、平面镜和球面镜成像等现象，可以说是世界上最早的光学著作。现在，光学已成为物理学的一个重要分支，并在实际中有广泛应用。

光学知识可分为两部分。一部分利用光线的概念研究光的传播规律，包括光的直线传播、光的反射和折射等，属于几何光学的范围。另一部分研究光的本性以及光和物质的相互作用等，属于物理光学的范围。现在学习几何光学的知识，在本书第二册介绍物理光学的知识。

第一章 光的反射和折射

一、光的直线传播

光源宇宙间的物体，有的是发光的，有的不发光的。我们把发光的物体叫做光源。太阳、电灯、点燃的蜡烛等，都是光源。

光具有能量，它可以使物体变热，使照相底片感光，使光电池供电。这时光能分别转化成内能、化学能、电能。光源发光要消耗其他形式的能量，把其他形式的能量转化成光能。电灯发光消耗电能，蜡烛发光消耗化学能，太阳发光消耗太阳内部的核能。

图 1-1 在这束阳光经过的地方有许多尘埃微粒，它们把光向各个方向散射出来，其中一部分进入我们的眼睛，我们看到的是许多微粒的亮点，它们显示出这束阳光沿直线传播。

光能包含在光束之中，光束射入人的眼睛，才引起人的视觉。我们能够看到光源，是因为它发出的光射入了眼睛。我们能够看到不发光的物体，是因为光源发出的光照射到它们，它们向四面八方漫反射的光射入了眼睛。

光的直线传播 光能够在其中传播的物质叫做介沿直线传播。质。在初中已经学过，在同一均匀介质中，光是沿直线传播的。在暗室的窗上开一个小孔，让一束阳光从小孔射入，可以看到这束阳光的传播路径是笔直的（图 1-1）。这是光沿直线传播的直接证据。自然界许多光现象，如影、日食、月食、小孔成像等，都是光沿直线传播产生的。

光沿直线传播，这使我们可以用光线来表示光的传播方向。沿光的传播方向作直线，并在直线上标以箭头表示光的传播方向，这样的直线叫做光线。

人眼在观察物体时，是根据刚要射入眼睛那部分光线的方向和光沿直线传播的经验，来判断物体位置的。图 1-2 表示人眼位于某一发散光束的范围内，其中一部分光线射入眼睛。把刚要射入眼睛的光线向反方向延长，我们看到在它们的交点处有发光点 S 存在。

图 1—2

利用光的直线传播判断发光点 S 的位置

思考与讨论

在图 1-1 所示的情况下，我们能看见穿过小孔的一束阳光，而宇航员看到的太空却是一片漆黑。为什么？

光线是个很有用的概念，有了它，就可以借助于几何学的方法研究光的传播。光线不是实际存在的东西，实际中并不能得到像几何线那样的光线。光线这个概念是一种科学的抽象，用来表示光的传播方向。

二、光的速度

光速 光从光源发出，以有限的速度向外传播。光传播得很快，在日常接触到的距离内，光从光源到达我们的眼睛所用的时间很短，凭感觉根本无法察觉出来，所以在历史上很长一段时间里，人们一直认为光的传播是不需要时间的。直到 17 世纪才发现光是以有限速度传播的，现在已经知道，光在真空中的传播速度为 30 万千米/秒，即光速

$$c=3.00 \times 10^8 \text{ 米/秒}$$

光速的测定 1607 年伽利略最早做了测定光速的尝试。让两个实验者在夜间每人各带一盏遮蔽着的灯，站在相距约 1.6 千米的两个山顶上。第一个实验者先打开灯，同时记下开灯的时间。第二个实验者看到传来的灯光后，立刻打开自己的灯。第一个实验者看到第二个实验者的灯光后，再立刻记下时间，然后根据记下的时间间隔和两山顶间的距离计算光的传播速度。这种测量光速的方法，原理虽然正确，却没有测出光的速度。这是因为光的速度很大，在相距约 1.6 千米的两山顶间来回一次，所用的时间大约只有十万分之一秒，这样短的时间，比实验者的反应时间短得多，即使有精密计时仪器也不能测出光速来，更不用说当时的原始计时装置了。

要测定光速，必须利用很大的距离，或者用精巧的办法准确地测量出很短的时间间隔。伽利略以后的学者们正是沿着这两个方向探求测定光速的方法的。

1676 年丹麦天文学家罗默（1644 ~ 1710）用天文观测的方法，发现光是以有限速度传播的。利用罗默观测到的数据可以计算出光速的大小。这种方法就属于利用大距离的方法。

为了在地面上不太长的距离内测定光速，科学家们设计了各种巧妙的实验方法，以便准确地测出很短的时间间隔。1849 年法国物理学家斐索（1819 ~ 1896）首先在地面上测出了光速，以后又有许多科学家采用了更精确的方法测定光速。下面简略地介绍美国物理学家迈克耳孙（1852 ~ 1931）的旋转棱镜法。

迈克耳孙选择了两个山峰，测出两山峰间的距离，在第一个山峰上安装一个强光源 S 和一个正八面棱镜 A（图 1-3）。光源 S 发出的光，经过狭缝射到八面镜 A 的面 1 上，反射后射到放置在另一个山峰上的凹镜 B 上，又反射到平面镜 M 上，经平面镜 M 反射后，再由凹镜 B 反射回第一个山峰。如果八面镜静止不动，反射回来的光就射到八面镜的另一个面 3 上，经面 3 反射后，通过望远镜 C 进入观察者的眼中，看到光源 S 的像。

图 1-3 迈克耳孙测定光速实验的示意图

如果使八面镜转动，那么光反射回来时，八面镜的面 3 已经偏离了原

来的取向，经面 3 反射后的光不再进入望远镜中，观察者就看不到光源 S 的像了。适当调节八面镜的转速，使反射回来的光到达八面镜时，八面镜恰好转过 $\frac{1}{8}$ 转，面 2 正好转到面 3 原来的位置，经面 2 反射后的光进入望远镜中，就可以重新看到 S 的像。根据八面镜转过 $\frac{1}{8}$ 转所用的时间和两山峰间的距离，就可以算出光在空气里的速度。迈克耳孙经过校正，得出光在真空中的速度 $c=299796 \pm 4$ 千米/秒。

光速是物理学中的一个基本常数，科学家们一直努力更精确地测定光速。1970 年以后，开始利用激光测量光速。激光测速法大大提高了测量的精确度。根据 1975 年第 15 届国际计量大会决议，真空中光速的最可靠值定为

$$c=299792458 \pm 1 \text{ 米/秒。}$$

在通常的计算中，可取 $c=3.00 \times 10^8$ 米/秒。

思考与讨论

你能不能设想一种在地面上实验室里测定光速的方法？说一说你的设计原理。看看课外读物，再和同学共同讨论一下，把你的设计完善起来。

图 1-4

练习一

(1) 复习初中学过的知识，举出几个应用光的直线传播解决实际问题的例子。

(2) 在图 1-4 中，S 是点光源，AB 是物体，E 是屏幕。试画出 AB 在屏幕上所成的影的范围。

(3) 在图 1-5 中，S 是点光源，E 是具有开口的屏，眼睛在屏右方的什么范围内能看到 S？画出光路图来表示。

图 1-5

(4) 月球直径对观察者眼睛所张的角度为 0.5° ，地球与月球间的距离为 3.8×10^5 千米。月球的直径约为多少千米？

(5) 现在需要知道学校里升国旗的旗杆的高度，你能否利用光的直线传播想出一种测量的办法来？

(6) 在迈克耳孙测定光速的一次实验中，测得两山峰间的距离为 35373.21 米，八面镜的最低旋转速度为 528 转/秒，此时从望远镜看到了光源 S 的像。试利用这些数据算出光在空气中的速度。

三、光的反射 平面镜

光的反射当光从一种介质射入另一种介质，例如从空气射入玻璃或水里时，在两种介质的界面上，一部分光被反射回原来的介质中。这种现象叫做光的反射。实验表明，光的反射遵循如下的规律：

反射光线跟入射光线和法线在同一平面上，反射光线和入射光线分别位于法线的两侧，反射角等于入射角（图 1-6）。

图 1-6 光的反射

这就是我们初中学过的光的反射定律。

根据光的反射定律，如果使光线逆着原来的反射光线射到界面上，反射光线就逆着原来的入射光线射出。就是说，在反射现象中光路是可逆的。

平面镜 日常生活中用的镜子，表面是平的，叫做平面镜。我们每天照镜子，从镜子里可以看到自己的像，平面镜是怎样成像的呢？

为了研究物体在平面镜中所成的像，先来研究物体上的一点 S 在镜中的像。

如图 1-7 所示， OO' 表示垂直于纸面的平面镜。点 S 表示物体上的一点。在 S 发出的射向平面镜的光束中，任取两条光线 SA 和 SB，这两条光线经平面镜反射后的反射光线为 AA' 和 BB' ，它们的反向延长线交于 S' 点。

图 1-7 点 S 在平面镜中所成的像

可以证明：从 S 发出的所有射向平面镜的光线经反射后，它们的反射光线的反向延长线都交于 S' 点，且 S' 点与镜面的距离 $S'C$ 等于 S 点与镜面的距离 SC。

你能不能根据光的反射定律和学过的几何知识，自己证明上述结论？

我们看到，反射后的光束是发散的，如同是从 S' 点发出的一样。人眼根据刚要射入眼睛那部分光线的方向和光沿直线传播的经验，看到 S' 处有一个发光点，这就是点 S 的像。因为 S' 处实际上不存在发光点，所以叫做虚像。点 S 和它的像点 S' 对镜面是对称的。

一个物体可以看成是由许多点组成的，这许多点的像点就组成了物体的虚像。物体上每一点的位置和它的像点的位置都是镜面对称的，因而像的大小也跟物体的大小相同（图 1-8）。

图 1-8 物体在平面镜中所成的像

练习二

(1) 如图 1-9 所示，一束光线 AC 射在平面镜 M 上。保持光线的方向不变，如果以 C 点为轴将平面镜 M 沿顺时针方向转动 5° ，反射光线向什么方向转动？反射光线与入射光线间的夹角变大还是变小？变化多少度？画出光路图。

图 1-9

(2) 平面镜作为一种光学元件，可用来改变光线的行进方向。你能不能举出应用的实例来？

(3) 一物体 AB 放在平面镜 M 前面 (图 1-10)。画出 AB 在平面镜 M 中所成的像。观察者在什么范围内才能看到整个物体 AB 的像？画出光路图来表示。

图 1—10

(4) 回答下面的问题：

a. 电影院的银幕为什么不用镜面？

b. 晚上在灯下读书，如果书的纸面很光滑，有时会看到纸面

上发出刺眼的光泽，感到很不舒服。为什么会出现这种现象？怎样消除它？

(5) 如图 1-11 所示，两个平面镜互相垂直，在跟这两个镜面垂直的平面内，有一条入射光线 AB，经两个镜面反射后，沿 CD 方向射出。试证明不论光线 AB 以多大的入射角射入，反射光线 CD 都平行于 AB 射出。

图 1-10

根据上面的现象，在六十年代，曾制作了由三块平面镜组成的反射器，由登月宇航员带到了月球上。这三块平面镜像房子里的墙角那样，彼此相交成直角，能把任何方向射到镜面上的光线逆着原方向反射回去。精确测出激光从地球射到这个反射器再返回地球的时间，再利用光速值就可以算出月球到地球的距离。

(6) 小张和小王面对着镜子，小张从镜子里能看到小王的眼睛，那么小王能不能从镜子里看到小张的眼睛？说明理由。

(7) 有的镜子照出的像会变形，这是什么原因？

图 1-11

四、光的折射

折射定律光从空气射到玻璃上，在界面上一部分光线发生反射，回到空气中；另一部分光线射入玻璃中，并改变了原来的传播方向(图 1-12)。光从一种介质射入另一种介质时，传播方向发生改变的现象，叫做光的折射。在图 1-12 中，入射光线和法线间的夹角 i 叫做入射角，折射光线和法线间的夹角 r 叫做折射角。

在初中已经学过，折射光线跟入射光线和法线在同一平面上，折射光线和入射光线分别位于法线的两侧。但是入射角跟折射角之间究竟有什么定量的关系呢？人类从积累入射角与折射角的数据到找出两者之间的定量关系，经历了一千多年的时间。直到 1621 年，荷兰数学家斯涅尔终于找到了入射角与折射角之间的规律：入射角的正弦跟折射角的正弦成正比。如果用 n 来表示这个比例常数，就有

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n. \quad (1)$$

这就是光的折射定律，也叫斯涅尔定律。

如果使光线逆着原来的折射光线射到界面上，折射光线就逆着原来的入射光线射出。如在图 1-12 中，如果入射光线在玻璃中沿着 BO 入射到界面上，折射光线就沿着 OA 在空气中传播。这就是说，在折射现象中光路也是可逆的。

公元 140 年，希腊天文学家托勒密曾经认为，入射角 i 与折射角 r 之间存在着简单的正比关系，并且用实验方法求出了光从空气射入水中时 $r=0.7i$ ，从空气射入玻璃时 $r=0.67i$ ，从水射入玻璃时 $r=0.88i$ 。但是，由此计算出来的折射角，只对比较小的入射角才大致与实验结果相符，当入射角增大时，就不符合了。下表列出的是光由空气射入玻璃时入射角与折射角的一组数值。从这些数据可以看出，入射角和折射角之间并不存在简单的正比关系。

入射角 i	折射角 r	i/r	$\sin i/\sin r$
10 °	6.7 °	1.50	1.49
20 °	13.3 °	1.50	1.49
30 °	19.6 °	1.53	1.49
40 °	25.2 °	1.59	1.51
50 °	30.7 °	1.63	1.50
60 °	35.1 °	1.71	1.51
70 °	38.6 °	1.81	1.50
80 °	40.6 °	1.97	1.51

为了研究折射角与入射角的定量关系，科学家作了多方面的尝试，直到 1621 年，斯涅尔终于找到了这个关系，这就是斯涅尔定律。

折射率 光从一种介质射入另一种介质时，虽然入射角的正弦跟折射角的正弦之比为一常数 n ，但是对不同的介质来说，这个常数 n 是不同的。

例如，光从空气射入玻璃时，这个常数约为 1.50；光从空气射入水中时，这个常数约为 1.33。可见这个常数 n 跟介质有关系，是一个反映介质的光学性质的物理量，我们把它叫做介质的折射率。

光在不同介质中的速度不同。理论和实验的研究都证明：某种介质的折射率，等于光在真空中的速度 c 跟光在这种介质中的速度 v 之比。

$$n = \frac{c}{v} \quad (2)$$

由于光在真空中的速度 c 大于光在任何介质中的速度 v ，所以任何介质的折射率 n 都大于 1。光从真空射入任何介质时， $\sin i$ 都大于 $\sin r$ ，即入射角大于折射角。

由于光在真空中的速度跟在空气中的速度相差很小，可以认为光从空气射入某种介质时的折射率就是那种介质的折射率。下表列出了几种介质的折射率：

几种介质的折射率

金刚石	2.42	岩盐	1.55
二硫化碳	1.63	酒精	1.36
玻璃	1.5 ~ 1.9	水	1.33
水晶	1.55	空气	1.00028

绝对折射率和相对折射率 在折射现象中，光通过两种介质，所以折射率与两种介质有关系。设光由介质 1 射入介质 2，这时的折射率确切地说应该叫做介质 2 对介质 1 的相对折射率，通常用 n_{21} 来表示。例如玻璃对空气的相对折射率是 1.50，水对空气的相对折射率是 1.33。因此，(1) 式应该确切地写成

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n_{21} \quad (3)$$

光从真空射入某种介质时的折射率，叫做该种介质的绝对折射率，也简称为某种介质的折射率。通常用 n 表示。前面课文中我们讲的某种介质的折射率，就是指这种介质的绝对折射率。

介质的折射率跟光在介质中的速度有关。设光在介质 1 中的速度为 v_1 ，在介质 2 中的速度为 v_2 ，介质 2 对介质 1 的相对折射率为 n_{21} ，介质 1 对介质 2 的相对折射率为 n_{12} ，则有

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2}, \quad n_{12} = \frac{v_2}{v_1}.$$

空气中的光速可以认为等于真空中的光速，因此空气的绝对折射率可以认为是 1，某种介质对空气的相对折射率可以认为等于这种介质的绝对折射率。

由折射率与光速的上述关系，可以求得绝对折射率和相对折射率的关系：

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{c/v_2}{c/v_1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{n_{12}}.$$

其中， n_1 和 n_2 是介质 1 和 2 的绝对折射率。

知道了绝对折射率和相对折射率的关系，(3)式可写成

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n_{21} = \frac{n_2}{n_1},$$

由此得 $n_1 \sin i = n_2 \sin r$ 。 (4)

根据(4)式可以知道，如果使光线逆着原来的折射光线由介质2射到界面上，即入射角为 r ，在介质1中光线将逆着原来的入射光线发生折射，即折射角等于 i 。就是说，在折射现象中光路也是可逆的。

图 1-13

由此，你能否判断，当光线由某种介质射入真空（或空气）时，折射角与入射角哪个大？

练习三

(1) 图 1-13 是光线由空气射入半圆形玻璃砖，再由玻璃砖射入空气中的光路图。O 点是半圆形玻璃砖的圆心。指出哪些情况是可能发生的，哪些情况是不可能发生的。

图 1—13

(2) 光线以 60° 的入射角从空气射入折射率 $n = \sqrt{3}$ 的玻璃中，折射角是多大？画出光路图。

(3) 光线从空气射入水中，要想使折射角等于 30° ，入射角应为多大？

图 1-14

(4) 根据水和岩盐的折射率，分别算出它们中的光速。水中的光速大约是真空中光速的几分之几？

(5) 图 1-14 是光线由空气射入某种介质时的折射情况。试由图中所给的数据求出这种介质的折射率和这种介质中的光速。

图 1—14

(6) 试证明由空气射入平行玻璃砖的光线从下表面射出后，在空气中的传播方向与入射方向平行，即图 1-15 中的 $O'B$ 与 AO 平行。

五、全反射

全反射 不同介质的折射率不同,我们把折射率小的介质叫做光疏介质,折射率大的介质叫做光密介质。光疏介质和光密介质是相对的,例如水、水晶和金刚石三种物质相比较,水晶对水来说是光密介质,对金刚石来说是光疏介质。根据折射定律可知,光线由光疏介质射入光密介质时(例如由空气射入水),折射角小于入射角;光线由光密介质射入光疏介质时(例如由水射入空气),折射角大于入射角。

既然光线由光密介质射入光疏介质时,折射角大于入射角,由此可以预料,当入射角增大到一定程度时,折射角就会增大到 90° 。如果入射角再增大,会出现什么情况呢?

让光线沿着半圆形玻璃砖的半径射到直边上,可以看到一部分光线从玻璃砖的直边上折射到空气中,一部分光线反射回玻璃砖内(图 1-16)。逐渐增大入射角,会看到折射光线离法线越来越远,而且越来越弱,反射光线却越来越强。当入射角增大到某一角度,使折射角达到 90° 时,折射光线完全消失,只剩下反射光线。这种现象叫做全反射。

折射角等于 90° 时的入射角,叫做临界角。当光线从光密介质射到它与光疏介质的界面上时,如果入射角等于或大于临界角,就发生全反射现象。

怎样求出光从折射率为 n 的某种介质射到空气(或真空)时的临界角 C 呢?由于临界角 C 是折射角等于 90° 时的入射角,根据折射定律可得

$$\frac{\sin 90^\circ}{\sin C} = \frac{1}{\sin C} = n,$$

因而
$$\sin C = \frac{1}{n}.$$

从折射率表中查出物质的折射率,就可以用上式求出光从这种介质射到空气(或真空)时的临界角。水的临界角为 48.7° ,各种玻璃的临界角为 $32^\circ \sim 42^\circ$,金刚石的临界角为 24.5° 。

全反射现象是自然界里常见的现象。例如,水中或玻璃中的气泡,看起来特别明亮,就是因为光线从水或玻璃射向气泡时,一部分光在界面上发生了全反射的缘故。

光导纤维 全反射现象的一个重要应用是用光导纤维来传送各种信号。为了说明光导纤维对光的传导作用,我们做下面的实验。照图 1-17 那样,在不透光的暗盒里安装一个电灯泡作光源,把一根弯曲的细玻璃棒(或有机玻璃棒)插进盒子里,让棒的一端面向光源,玻璃棒的下端就有明亮的光传出来。这是因为从玻璃棒的上端射进棒内的光线,在棒的内壁多次发生全反射,沿着锯齿形路线由棒的下端传了出来,玻璃棒就像一个能传光的管子一样。

实际用的光导纤维是非常细的特制玻璃丝,直径只有几微米到 100 微米左右,而且是由内芯和外套两层组成的,光线在内芯与外套的界面上发生全反射(图 1-18)。如果把光导纤维聚集成束,使其两端纤维排列的相

对位置相同，这样的纤维束就可以传送图像，如图 1-19 所示。医学上用光导纤维制成纤维镜（图 1-20），把探头送到人的食道、胃或十二指肠中去，光线通过传光束照明这些器官的内壁，再通过传像束把内部的病变情况传到目镜，进行观察。

图 1-19 用纤维束传送图像

光导纤维在现代科学技术中有重要的应用。就像无线电技术中把信号调制到无线电波上一样，把要传送的信号调制到光波上，让光载着信号沿光导纤维传送出去，就可以实现光纤通讯。光纤通讯能够同时传送大量信号，对信息的传输能力很大，这是它的突出优点。采用光纤通讯将会引起通讯技术的重大变革。光纤通讯在一些先进国家已进入实用阶段。我国的光纤通讯近十几年来也得到了很大的发展，自 80 年代初到现在已先后开通了数十条光纤通讯线路，光纤产业已初具规模，光纤应用正处于高速发展阶段。

· 阅读 ·

大气中的光现象（一）

——蒙气差

光由真空进入空气中时，传播方向只有微小的变化。虽然如此，有时仍然不能不考虑空气的折射效应。

图 1-21 表示来自一个遥远天体的光穿过地球大气层时被折射的情景。覆盖着地球表面的大气，越接近地表越稠密，折射率也越大。

我们可以把地球表面上的大气看作是由折射率不同的许多水平气层组成的，星光从一个气层进入下一个气层时，要折向法线方向。结果，我们看到的这颗星星的位置，比它的实际位置要高一些。这种效应越是接近地平线就越明显。我们看到的靠近地平线的星星的位置，要比它的实际位置高 $37'$ 。这种效应叫做蒙气差，是天文观测中必须考虑的。

图 1-21

太阳光在大气中也要发生折射。因此，当我们看到太阳从地平线上刚刚升起时，实际看到的是它处在地平线的下方时发出的光，只是由于空气的折射，才看到太阳处于地平线的上方。

大气中的光现象（二）

——海市蜃楼

夏天，在平静无风的海面上，向远方望去，有时能看到山峰、船舶、楼台、亭阁、集市、庙宇等出现在远方的空中。古人不明白产生这种景象的原因，对它作了不科学的解释，认为是海中蛟龙（即蜃）吐出的气结成的，因而叫做“海市蜃楼”，也叫蜃景。

海市蜃楼是光在密度分布不均匀的空气中传播时发生全反射而产生的。夏天，海面上的下层空气，温度比上层低，密度比上层大，折射率也比上层大。我们可以把海面上的空气看作是由折射率不同的许多水平气层组成的。远处的山峰、船舶、楼房、人等发出的光线射向空中时，由于不断被折射，越来越偏离法线方向，进入上层空气的入射角不断增大，以致发生全反射，光线反射回地面，人们逆着光线看去，就会看到远方的景物悬在空中（图 1-22）。

在沙漠里也会看到蜃景。太阳照到沙地上，接近沙面的热空气层比上层空气的密度小，折射率也小。从远处物体射向地面的光线，进入折射率小的热空气层时被折射，入射角逐渐增大，也可能发生全反射，人们逆着反射光线看去，就会看到远处物体的倒影（图 1-23），仿佛是从水面反射出来的一样。沙漠里的行人常被这种景象所迷惑，以为前方有水源而奔向前去，但总是可望而不可及。

在炎热夏天的柏油马路上，有时也能看到上述现象。光线被贴近路面的热空气全反射，从远处看去，路面显得格外明亮光滑，就像用水淋过一样。

图 1-23 沙漠的蜃景

练习四

(1) 光从光_____介质射入光_____介质时，可能发生全反射，发生全反射的条件是_____。

(2) 光由酒精和水晶射入空气时的临界角各是多大？

(3) 光在光疏介质里传播速度大，还是在光密介质里传播速度大？

(4) 光线从空气射入水中时，光线在水中的折射角最大为多少度？

(5) 图 1-24 中的 S 是一个水下的点光源。画出图中各条光线的折射光线和反射光线。

(6) 如果前题中的点光源 S 距离水面是 1.0 米，它发出的光会从水面上哪个区域射出来？这个区域是什么形状的，面积有多大？

(7) 在水中的鱼看来，水面上和岸上的所有景物，都出现在顶角是 97° 的倒立圆锥里（图 1-25）。原因是什么？（光由水射入空气时的临界角可视为 48.5° ）

图 1-25

六、棱 镜

常用的棱镜是横截面为三角形的三棱镜，通常简称为棱镜。棱镜可以改变光的传播方向，使光发生色散等。

通过棱镜的光线 如图 1-26 所示，通过做实验或做光路图可以知道，从玻璃棱镜的一个侧面 AB 射入的光，从另一个侧面 AC 射出后，射出的方向跟射入的方向相比，明显地向着棱镜的底面偏折。这是因为光在棱镜的两个侧面上发生折射，每次折射都使光线向底面偏折的缘故。偏折角度跟棱镜材料的折射率有关，折射率越大，偏折角度越大。

图 1-26 光线通过棱镜后向底面偏折

光的色散 在初中我们就知道，一束白光经过棱镜后会发色散，在光屏上形成一条彩色的光带，这条彩色的光带叫做光谱。光谱中红光在最上端（图 1-27），紫光在最下端，中间是橙、黄、绿、蓝等色光。这表明各种色光通过棱镜后的偏折角度不同。红光的偏折角度最小，紫光的偏折角度最大。

图 1-27 棱镜使白光发生色散

不同色光通过棱镜后的偏折角度不同，表明棱镜材料对不同色光的折射率不同。红光的偏折角度小，表示棱镜材料对红光的折射率小。紫光的偏折角度大，表示棱镜材料对紫光的折射率大。下表是实验测得的冕牌玻璃对各种色光的折射率。

色 光	紫	蓝	绿	黄	橙	红
折射率	1.532	1.528	1.519	1.517	1.514	1.513

图 1-28 全反射棱镜

我们知道，介质的折射率等于光在真空中的速度跟在这种介质中的速度之比。各种色光在真空中的速度是一样的，都等于 c ，它们在同一介质（例如玻璃）中的折射率不同，表明它们在同一介质中的速度不同。红光的折射率比其他色光小，表明红光在介质中的速度比其他色光大。

全反射棱镜 横截面是等腰直角三角形的棱镜叫全反射棱镜。图 1-28 中的等腰直角三角形 ABC 表示一个全反射棱镜的横截面，它的两个直角边 AB 和 BC 表示棱镜上两个互相垂直的镜面。如果光线垂直地射到 AB 面上，就会沿原来的方向射入棱镜，射到 AC 面上。由于入射角（ 45° ）大于光从玻璃射入空气的临界角（ 42° ），这条光线会在 AC 面上发生全反射，沿着垂直于 BC 的方向从棱镜射出（图 1-28 甲）。如果光线垂直地射到 AC 面上（图 1-28 乙），沿原方向射入棱镜后，在 AB、BC 两个面上都会发生全反射，最后沿着与入射时相反的方向从 AC 面上射出。在光学仪器里，常用全反射棱镜来改变光的传播方向。图 1-29 是全反射棱镜应用在潜望镜里的光路图。

初看起来，全反射棱镜仅仅相当于一个平面镜，使用全反射棱镜的地方完全可以由平面镜替代，但实际上却不是这样。一般的平面镜都是在玻

璃的后表面镀银而成，我们前面讨论平面镜成像时，都是只考虑这个银面的反射。实际上，平面镜的前表面即玻璃表面也反射光线，从发光点 S 发出的光线，要经过玻璃表面和银面多次反射，所以点 S 会生成多个像（图 1 - 30）。其中第一次被银面反射所生成的像（主像）最明亮，而其他的像则越来越暗，一般不会引人注意。但是对于精密的光学仪器，如照相机、望远镜、显微镜等，这些多余的像非除去不可，所以常用全反射棱镜。当然，如果在玻璃前表面镀银，不会产生多个像，但是前表面镀银，银面容易脱落。

练习五

(1) 说明图 1 - 26 中，光线通过棱镜的 AB 和 AC 两个侧面时，为什么都向底面偏折。如果这个棱镜的里面是空气，周围是水，当光线通过这个空气棱镜时，射出的光线是否还向底面偏折？画出这种情况下的光路图来。

(2) 在图 1 - 31 中，单色平行光束从左方射入每个方框，每个方框内放上什么光学元件才会产生图中的效果？出射光束的单箭头和双箭头分别对应于入射光束的两个边缘。

(3) 计算红光和紫光在冕牌玻璃中的传播速度。

(4) 光线通过棱镜时，偏折角度跟棱镜材料的折射率有关。设图 1 - 26 中光线对棱镜的侧面 AB 的入射角以及棱镜的顶角 A 的大小保持不变。试定性地讨论：棱镜材料的折射率越大，偏折角度也越大。

本章小结

这一章学习了光的传播的知识，包括光的直线传播、光的反射、光的折射和全反射。引入了光线的概念，使我们可以借助于几何学的方法研究光的传播。

(1) 人眼观察物体时，是根据什么来判断物体位置的？

(2) 光的反射定律的内容是什么？为什么在反射现象中光路是可逆的？

(3) 怎样求出物体在平面镜中像的位置？为什么说平面镜所成的像是虚像？

(4) 光的折射定律的内容是什么？为什么在折射现象中光路是可逆的？

(5) 什么是光密介质和光疏介质？光从光疏介质射入光密介质时，折射角比入射角大还是小？光从光密介质射入光疏介质时情况又怎样？

(6) 折射率和光速的关系是怎样的？

(7) 什么是全反射？什么是临界角？怎样求临界角？

(8) 棱镜的光学作用是什么？射向玻璃棱镜侧面的光线，通过棱镜后，为什么向底面偏折？什么现象表明在同一种介质中各种色光的折射率不同？紫光的折射率大，还是红光的折射率大？

习 题

A 组

(1) 为了使身高 1.8 米的人能从平面镜中看到自己的全身像，如果人和镜都是直立的，平面镜的长度至少应为多长？画出光路图并加以说明。

(2) 光线以某一入射角从空气射入折射率为 $\sqrt{3}$ 的玻璃中，折射光线与反射光线恰好垂直，则入射角等于 []

- A. 30° B. 45° C. 60°

(3) 已知水的折射率为 1.33，一条光线从水中射向空气，入射角为 i ，且 $1/\sin i = 1.22$ ，图 1 - 32 所示的四个光路图中，正确的是哪个图？

(4) 在白光通过玻璃棱镜发生色散的现象中，下列说法正确的是： []

- A. 红光的偏折最大，因为红光在玻璃中的传播速度比其他色光大。
B. 紫光的偏折最大，因为紫光在玻璃中的传播速度比其他色光小。
C. 红光的偏折最小，因为红光在玻璃中的折射率比其他色光大。
D. 紫光的偏折最小，因为紫光在玻璃中的折射率比其他色光小。

B 组

(1) 用下面的方法可以测量液体的折射率：取一个半径为 r 的软木塞，在它的圆心处插上一枚大头针，让软木塞浮在液面上（图 1 - 33）。调整大头针插入软木塞的深度，使它露在外面的长度为 h 。这时从液面上方的各个方向向液体中看，恰好看不到大头针。利用测得的数据 r 和 h 即可求出液体的折射率。

a. 写出用 r 和 h 求折射率的计算式。

b. 用这种方法实际做一下，求出水的折射率。

(2) 为了从坦克内部观察外界目标，在坦克壁上开一个长方形孔。假定坦克的壁厚为 20 厘米，孔的宽度为 12 厘米，孔内安装一块折射率 $n = 1.52$ 的玻璃，厚度与坦克的壁厚相同（图 1 - 34）。坦克内的人通过这块玻璃能看到的外界范围为多大角度？

(3) 图 1 - 35 是一个用折射率 $n = 2.4$ 的透明介质做成的四棱柱镜的横截面图。其中 $A = C = 90^\circ$ ， $B = 60^\circ$ 。现有一条光线从图中所示的位置垂直入射到棱镜的 AB 上，画出光路图，确定出射光线。注意：每个面的反射光线和折射光线都不能忽略。

第二章 透镜成像

很早以前人们就知道了放大镜及透镜的作用。今天，主要由透镜组成的简单光学仪器，如照相机、幻灯机、望远镜、显微镜等已广泛地深入到人们的生活、工作中。这一章我们学习透镜的成像规律及其应用。

一、透 镜

在初中我们已经学过，两个侧面都磨成球面（或者一面是球面，另一面是平面）的透明体叫做透镜。透镜通常是用玻璃磨成的，它是光学仪器中经常使用的基本元件。

透镜可以分为凸透镜和凹透镜两类，中间厚、边缘薄的叫凸透镜（图 2 - 1 甲）；中间薄、边缘厚的叫凹透镜（图 2 - 1 乙）。凸透镜对光线有会聚作用，因此也叫会聚透镜；凹透镜对光线有发散作用，因此也叫发散透镜。

凸透镜为什么能使光线会聚，凹透镜为什么能使光线发散呢？其原理可以用棱镜对光线的偏折作用来说明。如图 2 - 2 所示，透镜可以被看作是由许多个小三棱镜组成的，由光线经过棱镜后向底面偏折的知识可知，凸透镜使光线会聚，凹透镜使光线发散。

主轴和光心 透镜的两个球面都有自己的球心，如图 2 - 3 中的 C_1 、 C_2 所示。我们把通过两球心 C_1 、 C_2 的直线，叫做透镜的主光轴，简称主轴。

通常把厚度比球面的半径小得多的透镜，叫做薄透镜。我们在后面讨论的都是薄透镜。主轴跟透镜的两面各有一个交点，对于薄透镜来说，这两个交点可以看作是重合在一起的，这一点叫做透镜的光心，用 O 表示（图 2 - 3）。光心比较特殊，不仅平行于主轴的光线通过它以后方向不变，与光轴成一定角度的光线通过它以后方向也不变。这是因为透镜的中部可以看作是一小块平行玻璃板（图 2 - 4），与光轴成一定角度的光线通过这一小块平行玻璃板后，虽然与入射光线不在一条直线上，但与入射光线平行，产生一点侧向位移。对于薄透镜来说，这个侧向位移很小，可以忽略不计。因此，通过薄透镜光心的光线，传播方向不发生改变。这是光心的重要性质。

焦点和焦距 平行于主轴的光线，通过凸透镜后会聚于主轴上的一点（图 2 - 5 甲 F ），这个点叫做凸透镜的焦点。平行于主轴的光线通过凹透镜后变得发散（图 2 - 5 乙），这些发散光线看起来好像是从它们的反向延长线的交点 F 发出来的，点 F 也在主轴上，叫做凹透镜的焦点。凸透镜的焦点是实焦点，凹透镜的焦点是虚焦点。

从透镜的焦点到光心的距离，叫做透镜的焦距，用 f 表示。透镜的两侧各有一个焦点，只要透镜两侧的介质相同，两个焦点对光心是对称的，两个焦距相等。后面讨论的都是这种情况。

透镜成像规律 利用透镜可以使物体（发光体或被照明的物体）成像，这是透镜的一个重要应用。初中我们已经研究过凸透镜的成像规律，请你复习一下初中做过的实验（图 2 - 6）和学过的知识，将下表填写完整。

物距 (u)	像的性质		
	大小	正倒	虚实
$u > 2f$			
$u = 2f$			
$2f > u > f$			
$u < f$			

改用凹透镜做类似于初中做过的凸透镜成像实验，看看会有什么样的结论。实验后你会发现，无论物体距透镜多远，都不能在屏上得到实像，而只能通过透镜看到物体同侧有一个正立缩小的虚像。

所以，利用凸透镜既可以得到实像（ $u > f$ 时），也可以得到虚像（ $u < f$ 时）；利用凹透镜只能得到虚像。实像总是倒立的，与物体分别位于透镜的两侧；虚像总是正立的，与物体位于透镜的同侧。凸透镜得到的虚像总是放大的，凹透镜得到的虚像总是缩小的。

二、透镜成像作图法

透镜所成的像，既可以由实验得出，也可以用作图法求出。由于作图时我们考虑的只是入射光线和出射光线的方向，而无需考虑光线在透镜中是如何偏折的，所以，作图时我们无需将透镜的外形画出，只用一个符号简单地表示出透镜就可以了，一般都像图 2 - 7 那样用通过光心而跟主轴垂直的直线来表示薄透镜。

我们知道，一个发光点通过凸透镜所成的实像，是从这个发光点射向凸透镜的所有光线经凸透镜折射后的会聚点。所以我们只需找出其中两条光线的会聚点就可以确定像的位置。当发光点不在主轴上时，它射向凸透镜的光线中，下面三条特殊光线通过凸透镜后的折射光线的方向很容易确定：

- (1) 跟主轴平行的光线，折射后通过焦点；
- (2) 通过焦点的光线，折射后跟主轴平行；
- (3) 通过光心的光线经过透镜后方向不变。

作图时，应用上面三条光线中的任意两条，就可以确定不在主轴上的任一发光点的像。图 2 - 8 是用作图法求发光点 S 的像的光路图。

一个物体可以看作是由许多点组成的，每个点发出的光线通过透镜后都形成一个像点，所有的像点合在一起就是整个物体的像。实际作图时，只要求出物体上下两个端点的像，就可以求出物体的像，因为物体上其他各点的像都在这两个像点之间。

例如要作出物体 AB 由凸透镜所成的像（图 2 - 9），只要作出物体上两个端点 A 和 B 的像就行了。作 A 点的像时，可以用发自 A 点的两条光线，一条跟主轴平行，另一条通过光心，这两条光线通过透镜后的交点 A_1 就是 A 的像。同样可以作出 B 点的像 B_1 。物体上其他各点的像位于 A_1 和 B_1 之间。可见 A_1B_1 就是物体 AB 的像。 A_1B_1 是光线通过透镜后实际会聚而成的，所以是实像。

在图 2 - 9 所示的情形里，物体位于凸透镜 2 倍焦距以外的地方 ($u > 2f$)，所成的是倒立缩小的实像，像距大于焦距而小于 2 倍焦距 ($f < v < 2f$)。在图 2 - 9 里，如果 A_1B_1 是物体，根据光路的可逆性可以知道，AB 就是物体的像。在这种情形下，物距大于焦距而小于 2 倍焦距 ($f < u < 2f$)，像位于凸透镜 2 倍焦距以外的地方 ($v > 2f$)，是倒立放大的实像。这些都跟上节所说的实验结果相符。

物体位于凸透镜焦点以内时 ($u < f$)，像的作法如图 2 - 10 所示。在这种情况下，从物体的一个端点 A 发出的两条光线通过凸透镜以后并不交于一点，而它们的反方向延长线相交于 A_1 ，所以 A_1 是 A 点的虚像。同样， B_1 是 B 的虚像， A_1B_1 就是 AB 的虚像。从图中可以看出，物距小于焦距 ($u < f$) 时，从凸透镜得到的是正立放大的虚像。

凹透镜所成的像同样可以用作图法求出。在图 2 - 11 中 A_1B_1 就是物体

AB 的像。显然，所成的是正立缩小的虚像。

用作图法可以确定像的虚实、倒正、大小和位置。

从点光源 S 发出的发散光束经过光学元件（透镜）后，如果射出的光束是会聚光束，会聚点 S' 就是 S 的实像。实像可用光屏接收到，也可在某一范围内直接观察到。

从点光源 S 发出的发散光束经过光学元件（透镜、平面镜）后，如果射出的光束是发散光束，射出光线沿反向延长线的交点 S' 就是 S 的虚像，因为射出光线好像是从 S' 发出的一样。虚像可在某一范围内观察到，但不能用光屏接收到。

练习一

(1) 在图 2 - 12 中，画出光线通过透镜后的传播方向。

(2) 一个物体位于凸透镜前，在屏上得到倒立、放大的实像，这物体位于凸透镜前什么地方？如果看到在物体同侧有个像是正立、放大的，物体位于凸透镜前什么地方？这个像是实像还是虚像？

(3) 如图 2 - 13 所示，已知物体 AB 通过凸透镜后所成的实像 A'B'，试画出从 A、B 两点射向凸透镜的两条光线 AE、BD 经过凸透镜折射后的传播方向。

(4) 一物体位于凸透镜前 15 厘米，凸透镜的焦距为 10 厘米，用作图法求出像到凸透镜的距离。

(5) 焦距为 10 厘米的凹透镜前有一物体，物到镜的距离为 20 厘米，用作图法求像到镜的距离。

(6) 在图 2 - 14 中，OO' 为透镜的主轴，A'B' 为物体 AB 经透镜所成的像。这个透镜是什么透镜？试用作图法求出透镜和它的焦点的位置。

(7) 在图 2 - 9 所示的成像情况中，如果把凸透镜的下半部用遮光板遮住，那么，下列哪种说法正确？说明理由。

- A. 只在主轴上半部成半个实像。
- B. 只在主轴下半部成半个实像。
- C. 仍能成完整的实像，但所成的像变暗。
- D. 不能成像。

三、透镜公式

透镜公式透镜成像的位置，还可以用公式算出来。在图 2 - 15 中，AB 是物体， A_1B_1 是凸透镜所成的像。由于 COF 和 A_1B_1F 是两个相似三角形，所以

$$\frac{CO}{A_1B_1} = \frac{OF}{B_1F}.$$

ABO 和 A_1B_1O 也是相似三角形，所以

$$\frac{AB}{A_1B_1} = \frac{BO}{B_1O}.$$

因为 $CO = AB$ ，所以上面两个式子的左边相等，因而这两个式子的右边也相等：

$$\frac{OF}{B_1F} = \frac{BO}{B_1O}.$$

而 $OF = f$ ， $B_1F = v - f$ ， $BO = u$ ， $B_1O = v$ 。把这些值代入上式，就得到

$$\frac{f}{v - f} = \frac{u}{v}.$$

化简得

$$f? + fu = u?。$$

用 $u? f$ 除这个式子的两边，就得到凸透镜的公式：

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} + \frac{1}{f}.$$

在凸透镜公式里， u 和 f 的值总是正的，但 v 的值不一定是正的。当 $u < f$ 时， v 为负值。 v 的值是正的时候，像和物分别位于透镜的两侧，像是实像。 v 的值是负的时候，像和物在透镜的同侧，像是虚像。

用同样的方法可以证明，上面的公式也适用于凹透镜。应该注意的是，对于凹透镜，焦距应该取负值。由于物距 u 总是正的，因而 $\frac{1}{v} = \frac{1}{f} - \frac{1}{u}$ 总是负的，也就是 v 为负值，这表示凹透镜总是成虚像。

像的放大率 透镜所成的像跟物体相比，可以是放大或缩小的，也可以跟物体大小相等。为了说明像的放大情况，我们把像的长度 A_1B_1 跟物体的长度 AB 之比，叫做像的放大率，并且用 m 表示。即放大率

$$m = \frac{A_1B_1}{AB}.$$

从图 2 - 15 可知， $\frac{A_1B_1}{AB} = \frac{v}{u}$ ，所以

$$m = \frac{v}{u}.$$

即像的放大率等于像距与物距的比值。计算放大率时像距 v 取绝对值，放大率 m 总是正值。

测量凸透镜焦距的方法

一、平面镜辅助法

如果将物体放在凸透镜的焦点上，则从物体射出的光线通过透镜后便成为平行光线。这些平行光线射到一个平面镜上，然后按原路返回，则像成在物的位置上（图 2 - 16）。

实验时可用视差法确定像的位置。视差法是确定物或像的位置的一种常用的方法。如果两个物体距离眼睛远近不同，那么当眼睛左右移动时，两个物体会产生相对位移，这就叫做有视差；如果两个物体的位置重合，则无论眼睛怎样移动，两物体的位置都不会有相对位移，这叫做无视差。

准备好一个凸透镜、一个平面镜和一根铁钉，将铁钉插在软木或泡沫塑料上，并使钉尖朝上。实验时，应使作为物体的钉尖处在主轴上，平面镜镜面与主轴垂直，前后移动铁钉，直到所成的像与铁钉间无视差为止。此时铁钉与透镜间的距离即为透镜的焦距。

二、公式法

如图 2 - 17 所示，将物针置于透镜一侧，在透镜另一侧用辅助针由视差法确定像的位置，然后测出物距 u 和像距 v 。共测出几组 u 和 v 的数值，分别用公式 $f = uv / (u + v)$ 求出焦距，然后求出焦距的平均值，作为测量结果。

三、图象法

将实验测得的 u 和 v 数据做成 $u - v$ 曲线（图 2 - 18），它表示像距随物距变化的情况。通过原点做一条直角平分线，与曲线交于 A 点，在 A 点处， $u = v = 2f$ 。这样透镜的焦距就可以用图线量度出来。

练习二

(1) 凸透镜的焦距是 10 厘米，物体到透镜的距离是 12 厘米，光屏应当放在距物体多远的地方才能得到清晰的像？画出成像的光路图。

(2) 一支蜡烛距离凸透镜 24 厘米，在离凸透镜 12 厘米的屏上得到清晰的像，这个凸透镜的焦距是多少厘米？像是放大的还是缩小的？画出成像的光路图。

(3) 照相机是应用凸透镜成像的原理拍摄远处物体的缩小实像的（图 2 - 19）。身高 1.70 米的人，照得高 2.55 厘米的全身像，像的放大率是多大？照相时人距相机镜头的距离为 4.00 米，像距是多大？相机镜头的焦距有多大？

(4) 用焦距为 10 厘米的凸透镜作放大镜来看微小的物体，要想使像成在离镜 25 厘米的地方，镜到物的距离应为多少？这时看到的像放大了多少倍？

(5) 幻灯机是应用凸透镜在幕上得到幻灯片放大实像的装置。幻灯片

和物镜相距 20 厘米时，所得的像距物镜 6 米。现在要使像成在距物镜 12 米的幕上，应该怎样调节镜头？

(6) 物体位于离凹透镜 15 厘米处，凹透镜的焦距是 7.5 厘米，像距是多大？像的放大率是多大？

(7) 利用公式 $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$ 讨论：

a. 对于凸透镜，物距 u 在什么范围内变化时， v 为正值，成实像？在什么范围内变化时， v 为负值，成虚像？

b. 对于凹透镜， v 能否为正值？

*四、眼 睛

眼睛 每个人都有一双眼睛，这是人们观察世界的窗口。正是因为有了它，才使我们能欣赏到五彩斑斓的世界。不过，你是否知道眼睛观察到物体的原理呢？其实，它的作用相当于一个凸透镜。下面先让我们了解一下它的简单构造。

眼睛的主要构造如图 2 - 20 所示。最外层的无色透明部分叫做角膜，中间的透明囊状物叫做晶状体，晶状体和前面的角膜之间充满着无色透明的液体——水样液，晶状体和后面的视网膜之间充满着无色透明的胶状物质——玻璃体。角膜、水样液、晶状体和玻璃体都对光线产生折射，它们的共同作用相当于一个凸透镜，这个凸透镜的前焦点约在角膜前 1.5 厘米处，后焦点约在角膜后 2.0 厘米处。用眼睛观察的物体，距离都大于二倍焦距，所以从物体射进眼睛里的光线经过这个凸透镜折射后，在视网膜上形成倒立、缩小的实像，刺激分布在视网膜上的感光细胞，通过视神经传给大脑，产生视觉，于是我们就看到了物体。

另外，虹膜的中间还有一个很重要的小孔，叫瞳孔。瞳孔的大小可通过肌肉的伸缩自动改变，以控制进入眼睛内光的多少。光线强时，瞳孔变小，光线暗时，瞳孔变大。

眼睛的调节 眼睛要看到物体，必须使物体成像在视网膜上。视网膜的位置是固定不变的，而物体到眼睛的距离却远近不同，眼睛是怎样使远近不同的物体都在视网膜上成清晰的像呢？原来晶状体是有弹性的，它的弯曲程度可以靠周围的肌肉来调节。在观看远处物体时，由于周围肌肉的作用，晶状体的弯曲程度变小，晶状体变得扁平，眼睛的焦距变大；在观看近处物体时，由于周围肌肉的作用，晶状体的弯曲程度变大，晶状体变凸，眼睛的焦距变小。因此，无论是远处的物体还是近处的物体都能在视网膜上成清晰的像。可见，眼睛是一个精巧的变焦距系统，在物距改变时，它能靠改变晶状体的弯曲程度来改变焦距。眼睛的这种作用叫做眼睛的调节。

眼睛的调节是有限度的。晶状体变得最扁时能够看到的最远点，叫做眼睛的远点。正常眼睛的远点在无限远处。就是说，从无限远处的物体射入眼睛的平行光线，它们的像恰好能成在视网膜上。晶状体变得最凸时能看清的最近点，叫做眼睛的近点。正常眼睛的近点约在离眼睛 10 厘米的地方。所以靠眼睛的调节能看清的范围是从离眼睛 10 厘米到无限远处。在合适的照明情况下，正常的眼睛看距眼睛 25 厘米远的物体，不容易感到疲劳，因此把距眼睛 25 厘米的距离叫做明视距离。

视力缺陷及其矫正 有些人的视网膜距晶状体过远，或者晶状体比正常眼睛的凸一些，因此从无穷远处射来的平行光线不能会聚在视网膜上，而会聚在视网膜前（图 2 - 21 甲）。这种眼睛叫近视眼。近视眼的远点不在无穷远处，而在某个有限距离处，近视眼不但远点比正常眼近，近点也比正常眼近，其视力范围远比正常人的小。

既然近视眼过早地将光线会聚在视网膜前，那么可以采用在眼前放一焦距适当的凹透镜，使得光线在进入眼前先发散一下，然后通过眼睛使其

成像在视网膜上来加以矫正（图 2 - 21 乙）。

近视眼有些是天生的，但多数则是后天由于不注意用眼卫生而造成的。中小学生的眼睛尚处在发育阶段，易患近视眼病。近年来的调查数据表明，中小学生患近视眼病的比率始终居高不下，希望同学们充分注意。看书时要注意：眼睛与书的距离保持在 30 厘米左右；不在光线过强或过暗的地方看书；不在震动的车上看书；不躺着看书；看书一小时后要休息一会，防止眼睛过度疲劳。

有些人眼睛的视网膜距晶状体过近，或者晶状体比正常人眼睛的扁些，从无穷远处射来的平行光也不能会聚在视网膜上，而是会聚在视网膜后（图 2 - 22 甲）。这样的眼睛叫远视眼。远视眼的矫正方法当然应该是戴凸透镜做的眼镜（图 2 - 22 乙）。远视眼的近点比正常眼的近点远，其视力范围也比正常人的小。

视角 物体对眼的光心 O 所张的角，叫做视角。从图 2 - 23 中可以看出，物体在视网膜上所成的像的大小决定于视角，视角越大，所成的像越大，视网膜上受到刺激的感光细胞就越多，眼睛对物体看得就越清楚。同一个物体，离眼睛近时视角大，在视网膜上所成的像也大；离眼睛远时视角小，在视网膜上所成的像也小。这就是物体离眼睛近比离眼睛远时看得清楚的原因。人们在观察微小的物体时，总是把它放在离眼睛近的地方，以增大视角，使视网膜上成的像大些。

如果物体在视网膜上的像小到只落在一个感光细胞上，那么眼睛看到的就只是一个点。要使眼睛把物体上的两个点区分开，必须使这两个点在视网膜上的像落在不同的感光细胞上。这样，这两个点的视角就必须大于某一数值才行。根据实验知道，正常眼的这一数值约等于 1 分（1'）。大小为 0.1 毫米的物体，在离眼睛 25 厘米的明视距离处，所成的视角大约就是 1'。

把物体移得离眼睛近些可以增大视角，使眼睛看清物体，但是这种方法是有一定限度的，物体移到近点以后就不能再移近了。有些物体（例如天体）无法移近眼睛，不能用这种办法来增大视角。在这些情况下，为了看清物体，就需要借助于显微镜、望远镜等光学仪器。

*五、显微镜和望远镜

显微镜 观察细菌、动植物的组织、金属的结构等细微物体，要用显微镜。显微镜能把物体放大很多倍，下面我们来说明它的原理。

显微镜的主要部分是装在镜筒两端的两组透镜。每组透镜都相当于一个凸透镜。靠近被观察物体的一组透镜叫做物镜，靠近眼睛的一组透镜叫做目镜。物镜的焦距很短，目镜的焦距较长。

图 2 - 24 是显微镜的成像光路图。物镜 L_1 到被观察物 AB 的距离稍大于物镜的焦距 f_1 ，通过物镜得到放大的实像 $A'B'$ 。 $A'B'$ 对目镜 L_2 来说是物体，使 $A'B'$ 位于目镜的焦点 F_2 以内，这样通过目镜就得到 $A'B'$ 的放大的虚像 $A''B''$ ，从图上可以看出， $A''B''$ 的视角比眼睛直接看 AB 时视角大得多，所以用显微镜可以看清非常微小的物体。

人眼只能看清大小为 0.1 毫米左右的细节。光学显微镜的放大率为 1000 ~ 1500 倍左右，可使我们看清物体万分之一毫米左右的细微结构，大大提高了我们的观察能力。但是要观察物质更细微的构造，例如晶体的结构、分子、原子等，光学显微镜就无能为力了，必须用放大率更高的电子显微镜。

望远镜 观察远处的物体或天体要用望远镜。望远镜的构造有不同的型式，下面我们介绍开普勒望远镜和反射式望远镜。

开普勒望远镜是德国天文学家开普勒在 1611 年发明的，主要用来观察天体，所以叫做天文望远镜。它由两组透镜组成，每组透镜相当于一个凸透镜，其中对着远处物体的一组叫做物镜，对着眼睛的一组叫做目镜。但是跟显微镜相反，望远镜的物镜焦距较长，目镜焦距较短。

开普勒望远镜的原理如图 2 - 25 所示。从天体射来的平行光线，经过物镜 L_1 后，在焦点以外距焦点很近的地方成一倒立缩小的实像 $A'B'$ 。目镜 L_2 和物镜的焦点是重合的，所以实像 $A'B'$ 位于 L_2 和它的焦点之间距焦点很近的地方， L_2 以 $A'B'$ 为物体，形成放大的虚像 $A''B''$ 。这样，当我们对着目镜观察的时候，进入眼睛的光线就好像是从 $A''B''$ 射来的。 $A''B''$ 的视角大于直接用眼睛观察天体时的视角，因此从望远镜中看到的物体使人觉得离自己近了，看得清楚了。

望远镜的目镜越大，进入镜中的光就越多，所成的像就越明亮清晰。这对于观察传来的光很弱的遥远星体是很重要的。但是由于制造和安装的困难，透镜的直径很难大于 1 米，所以天文台用的大型望远镜多为反射式的。这种望远镜是牛顿在 1668 年发明的。反射式望远镜的原理如图 2 - 26 所示。它用一个很大的凹面镜代替物镜，从遥远天体射来的平行光线，经凹镜 C 反射后，向焦点会聚，但是在光线还没有会聚到焦点以前，就被平面镜 M 反射到目镜 O 中，形成实像。反射式望远镜的凹镜可以做得很大，能够集中较多的光，使成像明亮清晰。凹镜的口径越大，能够看到的宇宙范围也就越大。现在世界上已有口径为 5 米的反射式望远镜。

电子显微镜和射电望远镜

电子显微镜 电子显微镜是在本世纪三十年代出现的。它是类比于光学显微镜发展起来的。光学显微镜是用可见光照射被研究的物体，利用光学透镜使光线偏折而成像的；电子显微镜则是让电子束穿过被研究的物体，利用电磁透镜（实际上就是按一定要求分布的空间电场和磁场）使电子束偏转而成像的。图 2 - 27 是用磁场聚焦的电子显微镜的示意图，发射电子的阴极 K 相当于光学显微镜的光源。从阴极发射出来的电子，经过磁透镜 L_1 后变为平行的电子束， L_1 起会聚透镜的作用。电子束穿过被研究的物体 O，产生被研究物体的透射像。磁透镜 L_2 起物镜的作用，电子束通过它，放大成像 I_1 ， I_1 再经磁透镜 L_3 放大，第二次成像 I_2 。 I_2 被投射在荧光屏 S 上，可以用照相方法记录下来。

电子显微镜的放大率比光学显微镜的放大率高一千倍左右。电子显微镜能观察物质的精细结构，可以拍摄出物质的分子结构图，在现代科学技术中有重要的应用。

射电望远镜 太阳、恒星和宇宙空间的物质能发出无线电波，这种无线电波叫做射电辐射。观测射电辐射的强度，是天文学中研究天体和宇宙的一种重要方法。射电望远镜就是用来观测宇宙中射电辐射的仪器。

射电望远镜有各式各样的结构，图 2 - 28 所示的是常见的抛物面天线射电望远镜。它有一个很大的金属抛物面状天线，从宇宙空间射来的平行于抛物面轴的无线电波，被反射后集中到位于抛物面焦点处的小天线上，小天线接收到的无线电波能量通过传输线输送给接收机，接收机对电波能量进行测量，确定射电波的强度。

利用射电望远镜进行观测有许多优点。无线电波能穿过云雾和尘埃，因此用射电望远镜能不分晴雨昼夜连续进行观测；对于那些难以用光学望远镜观测的天体和宇宙空间，利用射电望远镜也可以进行研究。

本章小结

这一章我们主要学习了透镜的成像原理和规律，以及由透镜组成的几种光学仪器的原理和作用。很好地理解和掌握这些知识，对正确地理解生活中的其他光现象及更复杂一些的光学仪器的原理是很重要的。

(1) 如何解释凸透镜的会聚作用和凹透镜的发散作用？为什么可以认为通过薄透镜光心的光线传播方向不变？

(2) 凸透镜和凹透镜的成像规律是怎样的？凸透镜的三条特殊光线是哪三条？它们是如何得出的？凹透镜的三条特殊光线应该是怎样的？作图时为什么可以只用这些特殊光线？物体的像只是由这些特殊光线形成的吗？

(3) 凸透镜和凹透镜的成像公式一样吗？运用时应注意些什么？你会推导成像公式吗？

(4) 什么是像的放大率？写出放大率的公式。

* (5) 为什么正常眼睛不论观看远处物体还是观看近处物体，像都能成在视网膜上？近视眼看不清远处的物体，远视眼看不清近处的物体，这是为什么？它们各应如何矫正？

什么叫视角？视角的大小是由什么决定的？为什么观察同一物体时视角越大，看得越清楚。

* (6) 说明显微镜、开普勒望远镜、反射式望远镜的构造和作用。

习 题

A 组

(1) 回答下面的问题：

a. 用焦距为 10 厘米的放大镜观察物体，镜到物的距离最大不能超过多少？

b. 一幻灯机镜头的焦距为 8 厘米，镜头到幻灯片的距离只能在什么范围内变化？

c. 一照相机镜头的焦距为 7.5 厘米，镜头到底片的距离最短不能小于多少？

(2) 蜡烛到凸透镜的距离为 20 厘米，到光屏的距离为 40 厘米，这时在光屏上得到清晰的烛像。如果把凸透镜向光屏移动 5 厘米，光屏应向后移动多远才能再得到清晰的烛像？这时像的放大率是增大了，还是减小了？

(3) 当物体到凸透镜的距离为 36 厘米时，光屏上所成的像的高度为 10 厘米；当物体到凸透镜的距离变为 24 厘米时，光屏上像的高度变为 20 厘米。这个凸透镜的焦距是多大？

(4) 透镜焦距的倒数 $\frac{1}{f}$ 叫做透镜的焦度，焦度的单位叫做屈光度。

透镜的焦距为 1 米时，焦度为 1 屈光度。屈光度乘以 100，就是通常所说的眼镜的度数。某同学眼镜的近视度数是 250 度，他的眼镜是什么透镜？焦距是多大？

(5) 设物和光屏之间的距离为 L ，中间放一凸透镜，焦距为 f 。移动透镜的位置，使屏上能够两次出现清晰的像。

a. 试证明只有 $L > 4f$ 时，屏上才能两次出现清晰的像。

b. 设透镜的两个位置之间的距离为 d ，当满足上述 $L > 4f$ 条件时，试证明：

$$f = \frac{L^2 - d^2}{4L}.$$

提示：由 $u + v = L$ 和 $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$ 解出 u 和 v ，看一看在什么条件下

u 和 v 有实数解。

B 组

(1) 在图 2 - 29 中，单色平行光束从左方射入每个方框，方框内放什么光学元件（不一定只放一个元件）才会产生图中的效果？画出光学元件和光路图。注意：出射光束的单箭头和双箭头分别对应于入射光束的两个边缘。

(2) 图 2 - 30 中的 MN 是薄透镜的主轴，S 是发光点，S' 是发光点的像。

a. 用作图法求出薄透镜的位置，并标在图上。

b. 作光路图分别求出两个焦点的位置，标在图上。标明透镜的类别。

(3) 如图 2 - 31 所示，在凸透镜的主轴上有一发光点 S，你能不能用学过的知识求出像点 S'？作出求 S' 的光路图。物距和像距是否仍可用公式 $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$ 来计算？

(4) 把一个点光源放在焦距为 f 的凸透镜的焦点上，在透镜另一侧 2 倍焦距处放一个垂直于主轴的光屏，在光屏上可以看到一个光亮的圆。

a. 已知透镜的半径为 R，光亮圆的半径有多大？

b. 将点光源移至 4f 处，光亮圆的半径变为多大？

c. 将点光源移至 4f/3 处，光亮圆的半径又变为多大？

分别画出光路图。

(5) 试从透镜公式的高斯式 $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$ 推导出透镜公式的牛顿式

$$xx' = f^2,$$

其中 $x = u - f$ ， $x' = v - f$ 。

力 学

现在我们开始学习力学知识。力学所要解决的中心课题是力和运动的关系。第三章学习有关力的知识，第四章学习怎样描述物体的运动。有了这两章的知识准备，到第五章就可以学习力和运动的关系了。在第五章，我们将学到力学的基本规律——牛顿运动定律。此后，在牛顿运动定律的基础上，学习力学的两个重要概念——机械能和动量，学习有关机械能和动量的重要定律。

力学知识是物理学的基础。我们要学好力学知识，为学好高中物理课打下坚实的基础。

第三章 力

一、力

力是物体之间的相互作用 人们对力的认识，最初是从日常生活和生产劳动中得到的，是和人力相联系的。用手推动小车，提起重物，拉长或压缩弹簧，肌肉会感到紧张，我们就说，人对小车、重物、弹簧用了力。后来人们把力的概念加以扩展，把凡是能和人力起相同效果的作用都叫做力。机车牵引列车前进，机车对列车施加了力，同时列车对机车也施加了力。汽锤锻打工件，汽锤对工件施加了力，同时工件对汽锤也施加了力。这样，人们建立了如下的认识：力是物体之间的相互作用。

一个物体受到力的作用，一定有另一个物体施加这种作用。前者是受力物体，后者是施力物体。只要有力发生，就一定有受力物体和施力物体。有时为了方便，只说物体受到了力，而没有指明施力物体，但施力物体一定是存在的。其实，受力物体和施力物体只具有相对意义，因为力是物体之间的相互作用，施力物体也同时受到力的作用。在相互作用的物体中，把哪个物体作为受力物体，这要看我们把哪个物体作为受力的研究对象，通常就把这个研究对象作为受力物体。

举出几个实例，说明力是物体之间的相互作用。

力的作用效果 物体受到力的作用，会产生什么效果呢？

力可以改变物体的运动状态，也就是改变速度的大小和方向。原来静止的足球被踢出去，在力的作用下由静止变为运动。飞机起飞时，在牵引力的作用下速度越来越大。汽车刹车后，在阻力的作用下速度越来越小。这些都是力使物体的运动状态发生改变的实例。

力可以使物体发生形变。用力拉弹簧，弹簧就伸长。用力压弹簧，弹簧就缩短。用力拉开弓，弓就发生弯曲。物体的伸长、缩短、弯曲等等，总之物体的形状或体积的改变，叫做形变。上述例子就是力使物体发生形变的实例。

我们判断一个物体是否受力以及力的大小和方向，就是从力产生的效果来看的。

力的大小和方向 我们在初中学过，力的大小可以用弹簧秤来测量。在国际单位制中，力的单位是牛顿，简称牛，国际符号是 N。

力不但有大小，而且有方向，物体受到的重力是竖直向下的，物体在液体中受到的浮力是竖直向上的。力的方向不同，它的作用效果也不同。作用在运动物体上的力，如果方向与运动方向相同，将加快物体的运动；如果方向与运动方向相反，将阻碍物体的运动。可见，要把一个力完全表达出来，除了说明力的大小之外，还要指明力的方向。

力可以用一根带箭头的线段来表示。线段是按一定比例（标度）画出的，它的长短表示力的大小，它的指向表示力的方向，箭头或箭尾表示力的作用点，力的方向所沿的直线叫做力的作用线。这种表示力的方法，叫做力的图示。

图 3 - 1 中的力的图示表示作用在小车上的力为 100 牛，方向水平向

左。有时可画出力的示意图，即只在图中画出力的方向，表示物体受到这个方向的力。

力的平衡 力可以改变物体的运动状态，但是几个力同时作用在一个物体上，物体的运动状态也可以不发生改变。这时，这几个力的作用效果相互抵消，物体仍保持原来的运动状态，即保持静止或者做匀速直线运动。这种情形叫做力的平衡。

有两个力同时作用在一个物体上，如果这两个力大小相等，方向相反，且作用在同一直线上，物体将保持静止或者做匀速直线运动。这就是在初中学过的二力平衡。今后在分析某些问题时要常常用到二力平衡。至于多个力的平衡，将在第七章学习。

力的分类 自从我们学习物理以来，见过的力的名称已经不少了。各种力可以用两种不同的方法来分类。一种是根据力的性质来分类的，如重力、弹力、摩擦力、分子力、电磁力等等；另一种是根据力的效果来分类的，如拉力、压力、支持力、动力、阻力等等。效果不同的力，性质可能相同。例如，拉力、压力、支持力实际上都是弹力，只是效果不同。性质不同的力，效果可能相同。例如不论是什么性质的力，只要效果是加快物体的运动，就可以称它为动力；效果是阻碍物体的运动，就可以称它为阻力。今后我们还会遇到根据效果来命名的力的名称。

从力的性质来看，力学中经常遇到的有重力、弹力摩擦力。下面几节就分别介绍这三种力。

二、重 力

地球上一切物体都受到地球的吸引作用。这种由于地球的吸引而使物体受到的力叫做重力。

重力不但有大小，而且有方向。悬挂物体的绳子，静止时总是竖直下垂的。自由落向地面的物体，总是竖直下落的，可见重力的方向是竖直向下的。

重力的大小可以用弹簧秤称出（图 3 - 2）。这时物体对弹簧秤的拉力（图甲）或压力（图乙），大小等于物体受到的重力。把物体挂在绳上或放在水平支持物上，在静止的情况下，物体对竖直悬绳的拉力或对水平支持物的压力，大小等于物体受到的重力。

在已知物体质量的情况下，重力的大小可以根据初中学过的重力 G 跟质量 m 成正比的关系式 $G=mg$ 计算出来，式中 $g=9.8$ 牛 / 千克，表示质量是 1 千克的物体受到的重力是 9.8 牛。

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

质量均匀分布的物体（均匀物体），重心的位置只跟物体的形状有关。有规则形状的统一物体，它的重心就在几何中心上。例如，均匀直棒的重心在棒的中点，均匀球体的重心在球心，均匀圆柱的重心在轴线的中点（图 3 - 3）。

质量分布不均匀的物体，重心的位置除跟物体的形状有关外，还跟物体内部质量的分布有关。载重汽车的重心随着装货多少和装载位置而变化（图 3 - 4）。起重机的重心随着提升物的物重和高度而变化。

不但地球对它周围的物体有吸引作用，任何两个物体之间都存在这种吸引作用。物体之间的这种吸引作用普遍存在于宇宙万物之间，称为万有引力。重力就是地面附近的物体由于受到地球的万有引力而产生的。在第十一章我们将学习万有引力定律。

三、弹 力

被拉长或压缩的弹簧对跟它接触的小车发生力的作用，可以使小车运动起来（图 3 - 5）。被弯曲的细木棍或细竹竿对跟它接触的圆木发生力的作用，可以把圆木推开（图 3 - 6）。上面的例子说明，发生形变的物体，由于要恢复原状，对跟它接触的物体会产生力的作用，这种力叫弹力。

地球对物体产生重力，并不需要地球和物体直接接触。弹力则不同，弹力产生在直接接触并发生形变的物体之间。

不仅细木棍、弹簧等能发生形变，任何物体都能发生形变，不能发生形变的物体是不存在的，不过有的形变比较明显，直接可以看得见；有的形变极其微小，要用仪器才能显示出来。

图 3 - 7 是一种显示微小形变的装置，它可以把微小形变“放大”到可以直接看出来。在一张大桌子上放两个平面镜 M 和 N，让一束光线依次被这两面镜子反射，最后射到一个刻度尺上，形成一个光点。用力压桌面，镜子要向箭头所示的方向倾斜。由于两面镜子之间的距离较大，光点会在刻度尺上有明显的移动，而把桌面的形变显示出来。

放在水平桌面上的书，在重力作用下与桌面互相接触，使书和桌面同时发生微小的形变。书由于发生微小的形变，而对桌面产生垂直于桌面向下的弹力，这就是书对桌面的压力（图 3 - 8 左）。桌面由于发生微小的形变，而对书产生垂直于书面向上的弹力，这就是桌面对书的支持力（图 3 - 8 右）。

可见，通常所说的压力和支持力都是弹力，压力或支持力的方向总是垂直于支持面而指向被压或被支持的物体。

挂在电线下面的电灯，在重力作用下拉紧电线，使电灯和电线同时发生微小的形变。电灯由于发生微小的形变，而对电线产生向下的弹力，这就是电灯对电线的拉力（图 3 - 9 左）。电线由于发生微小的形变，而对电灯产生向上的弹力，这就是电线对电灯的拉力（3 - 9 右）。

可见，通常所说的拉力也是弹力，绳的拉力是绳对所拉物体的弹力，方向总是沿着绳而指向绳收缩的方向。

在水平桌面上有两个球，它们靠在一起，但不互相压挤，它们之间有弹力的作用吗？为什么？

· 小实验 ·

显示微小形变

用下面的简单装置也可以显示微小形变：找一个大玻璃瓶，装满水，塞上中间插有细管的瓶塞，用手按压玻璃瓶，细管中的水面就上升；松开

手，水面又降回原处。这说明玻璃瓶受到按压时发生形变。实际做一下这个实验。

练习一

(1) 停放在操场上的篮球，受到几个力的作用？施力物体各是什么物体？各是哪种性质的力？各力的方向是怎样的？画出物体受力的示意图。

(2) 有四位同学把斜面对重物的支持力（3牛），分别画成图 3 - 10 中的四种样子，哪个图画得对？

(3) 用一根绳子把一个小球挂在天花板上，小球受到几个力的作用？各是什么物体对它的作用？各是哪种性质的力？各力的方向是怎样的？画出小球受力的示意图。

(4) 用两根绳子把物体挂在天花板上（图 3 - 11），这个物体受到几个力的作用？各是什么物体对它的作用？各是哪种性质的力？各力的方向是怎样的？画出物体受力的示意图。

四、胡克定律

弹力的大小跟形变的大小有关系，形变越大，弹力也越大，形变消失，弹力就随着消失。对于拉伸形变（或压缩形变）来说，伸长（或缩短）的长度越大，产生的弹力就越大。例如弹簧伸长或缩短的长度越大，弹力就越大。物体发生弯曲时产生的形变叫做弯曲形变。对于弯曲形变来说，弯曲得越厉害，产生的弹力就越大。把弓拉得越满，箭就射出得越远。还有一种叫做扭转型变。在金属丝的下面挂一个横杆，用力扭这个横杆，金属丝就发生扭转型变（图 3 - 12）。放开手，发生扭转型变的金属丝产生的弹力会把横杆扭回来。金属丝的扭转角度越大，弹力就越大。

定量地研究各种形变中弹力和形变的关系比较复杂，我们经常遇到的是弹簧的拉伸形变（或压缩形变）。实验表明：弹簧弹力的大小 f 和弹簧伸长（或缩短）的长度 x 成正比。写成公式就是

$$f = kx .$$

其中 k 是比例常数，叫做弹簧的劲度系数，简称为劲度。劲度是一个有单位的量。在国际单位制中， f 的单位是牛， x 的单位是米， k 的单位是牛 / 米。不同的弹簧，劲度并不相同。劲度在数值上等于弹簧伸长（或缩短）单位长度时的弹力。对于直杆或线的拉伸形变（或压缩形变），也有上述正比关系。这个规律是英国科学家胡克发现的，叫做胡克定律。

胡克定律有它的适用范围。物体的形变过大，超出一定限度，上述正比关系将不再适用，这时即使撤去外力，物体也不能完全恢复原状。这个限度叫做弹性限度。胡克定律在弹性限度内适用。弹性限度内的形变叫做弹性形变。本书中提到的形变，除非特别指明，一般是指弹性形变。

练习二

(1) 把一个 2 牛重的物体挂在弹簧上，物体受到几个力的作用？各是哪种性质的力？各力的方向是怎样的？物体静止时受到的弹簧的弹力有多大？为什么？画出物体受力的图示。

(2) 一根弹簧的劲度是 100 牛 / 米，伸长的长度为 2 厘米时，弹簧的弹力有多大？另一根弹簧的劲度是 2000 牛 / 米，缩短的长度为 3 厘米时，弹簧的弹力有多大？

(3) 一根弹簧，不挂物体时长 15 厘米，挂上重 0.5 牛的物体时长 18 厘米。这根弹簧的劲度有多大？

五、摩擦力

滑动摩擦 摩擦力也是发生在两个互相接触的物体之间。当一个物体在另一个物体表面上做相对滑动的时候，要受到另一个物体阻碍相对滑动的力，这种力叫做滑动摩擦力。滑动摩擦力的方向总跟接触面相切，并且跟物体的相对运动的方向相反（图 3 - 13）。实验表明：滑动摩擦力跟压力成正比，也就是跟一个物体对另一个物体表面的垂直作用力成正比。用 f 表示滑动摩擦力的大小，用 N 表示压力的大小，那么

$$f = \mu N$$

其中 μ 是比例常数，叫做动摩擦因数，它的数值既跟相互接触的两个物体的材料有关，又跟接触面的情况（如粗糙程度）有关。在相同的压力下，动摩擦因数越大，滑动摩擦力就越大。动摩擦因数是两个力的比值，没有单位。

除了滑动摩擦，还有滚动摩擦。滚动摩擦是一个物体在另一个物体表面上滚动时产生的摩擦。滚动摩擦比滑动摩擦小得多，滚动轴承就是利用滚动摩擦小的事实制成的。

材 料	动摩擦因数
钢—钢	0.25
木—木	0.30
木—金属	0.20
皮革—铸铁	0.28
钢—冰	0.02
木头—冰	0.03
橡皮轮胎—路面（干）	0.71

静摩擦 滑动摩擦是一个物体在另一个物体表面上有相对运动的时候发生的。那么，互相接触的两个物体处于相对静止的时候，是不是也可以发生摩擦呢？我们用不大的水平力来推桌子，虽然桌子应该沿着力的方向运动，有相对于地板运动的趋势，但并没有把桌子推动，就是因为桌腿跟地板之间发生摩擦，这个摩擦力和推力都作用在桌子上，它们的大小相等，方向相反，彼此平衡，因此桌子保持不动。这时发生的摩擦叫静摩擦。静摩擦力的方向总跟接触面相切，并且跟物体相对运动趋势的方向相反。

逐渐增大对桌子的推力，如果推力还不够大，桌子仍旧保持不动，静摩擦力跟推力仍旧彼此平衡。可见静摩擦力随着推力的增大而增大。但是静摩擦力的增大有一个限度，静摩擦力的最大值叫做最大静摩擦力。推力超过最大静摩擦力，就可以把桌子推动了。最大静摩擦力等于使桌子开始运动所需的最小推力。最大静摩擦力跟两物体间的压力成正比，压力越大，最大静摩擦力也越大。

静摩擦力是很常见的。拿在手中的瓶子、毛笔不会滑落，就是静摩擦力作用的结果。能把线织成布，把布缝成衣服，也是靠纱线之间的静摩擦力的作用。静摩擦力在生产技术中的应用也很多。皮带运输机（图 3 - 14）是靠货物和传送皮带之间的静摩擦力，把货物送往别处的。

用向右的水平力推桌子，因静摩擦力的存在而没有推动桌子。桌子对地板的相对运动趋势的方向是怎样的？作用在桌腿上的静摩擦力的方向是怎样的？

· 阅读 ·

力的种类

在力学中经常遇到的有重力、弹力和摩擦力，在热学中要遇到分子力，在电学中要遇到电磁力。我们曾经提到，重力、弹力、分子力、电磁力等是属于不同性质的力。这种认识只是反映了人们对力的认识的一个阶段。随着科学的发展，人们对力的认识也进一步深化了，并认识到重力、弹力、摩擦力、分子力、电磁力等都可以归结为两种基本的相互作用，即万有引力和电磁力。

万有引力是由于物体具有质量而在物体之间产生的一种相互作用。这种力普遍存在于宇宙万物之间。在宇宙天体之间，在宏观物体之间，在原子、分子等微观粒子之间，都存在着这种相互作用。重力就是地面附近的物体由于受到地球的万有引力而产生的。

电磁力是存在于电荷之间的一种相互作用。静止电荷之间有电力，运动电荷之间除了电力外还有磁力。电力和磁力是有联系的，常常总称为电磁力。

我们知道，原子是由带正电的原子核和绕核旋转的带负电的电子组成的，分子是由原子组成的。原子核和电子之间，原子和原子之间，分子和分子之间，虽然也存在万有引力，但比起电磁力来要小得多，可不予考虑，起决定作用的是电磁力。这就是说，原子或分子本身能够形成，是由于电磁力的作用。分子之间的电磁力就构成了我们通常所说的分子力。

当我们使物体发生形变的时候，物体中原子或分子之间的距离发生改变，原子或分子之间的电磁力要反抗物体发生形变，这就形成了我们通常所说的弹力。

从原子或分子之间的电磁力来完满地解释摩擦力很复杂，至今还没有一种很好的理论，但是大家公认摩擦力说到底也还是电磁力的一种表现。

现代科学研究已深入到原子核内部，深入到研究质子、中子等微观粒子的相互作用。人们在这个领域又发现了两种基本的相互作用，分别叫做强相互作用和弱相互作用。这两种作用这里不再介绍。

现在，人类认识到在自然界中存在四种基本的相互作用：万有引力，电磁力，强相互作用，弱相互作用。小到比原子还小的粒子，大到宇宙天体，其间表现出很不相同的多种多样的相互作用，都可以用少数几种基本的相互作用来说明，这是物理学的巨大胜利。然而人类的认识是没有止境的。今天认为基本的相互作用有四种，明天会不会统一成更少的几种甚至一种相互作用呢？大物理学家、相对论的创立者爱因斯坦（1879~1955），晚年致力于这方面的工作，试图把万有引力和电磁力统一起来。现在有不少物理学家致力于这方面的研究，试图把四种相互作用统一起来，并且取得了进展，电磁相互作用和弱相互作用已经得到统一。这是物理学研究的前沿。物理学好象一座正在施工中的大厦，它已经建筑得很壮观了，但还

没有竣工，看来永远也不会竣工，更壮观的还在后面。现在的青年学生，将来就可能成为修建这座大厦的建筑师。

练习三

(1) 在东北的冬季伐木工作中，许多伐下的木料被装在雪橇上，用马拉着在冰道上运出去。一个有钢制滑板的雪橇，上面装着木料，共重 4.9×10^4 牛。在水平的冰道上，马要在水平方向用多大的力才能够拉着雪橇匀速前进？

(2) 用 20 牛的水平力拉着一块重 40 牛的砖，可以使砖在水平地面上匀速滑动。求砖和地面之间的动摩擦因数。

(3) 要使重 400 牛的桌子从原地移动，必须用至少 120 牛的水平推力。桌子从原地移动以后，为了使它继续做匀速运动，只要 100 牛的水平推力就行了。求最大静摩擦力和动摩擦因数。如果用 90 牛的水平推力推桌子，这时静摩擦力有多大？

(4) 请你设计一个测量纸跟桌面之间动摩擦因数的方法，并实际测一测。

六、力的合成

力的合成 在大多数实际问题里，物体往往不只受到一个力，而是同时受到几个力。一个物体受到几个力共同作用的时候，我们常常可以求出这样一个力，这个力产生的效果跟原来几个力共同产生的效果相同。一个力，如果它产生的效果跟几个力共同产生的效果相同，这个力就叫做那几个力的合力。求几个力的合力叫做力的合成。

几个力如果都作用在物体的同一点，或者它们的作用线相交于同一点，这几个力叫做共点力。我们先来研究两个共点力的合成。

图 3 - 15 甲表示橡皮条 GE 在力 F_1 和 F_2 的共同作用下，沿着直线 GC 伸长了 EO 这样的长度。图 3 - 15 乙表示撤去 F_1 和 F_2 ，用一个力 F 作用在橡皮条上，使橡皮条沿着相同的直线伸长相同的长度。力 F 对橡皮条产生的效果跟力 F_1 和 F_2 共同产生的效果相同，所以力 F 是力 F_1 和 F_2 的合力。

合力 F 跟力 F_1 和 F_2 有什么关系呢？在力 F_1 和 F_2 的方向上各作线段 OA 和 OB ，根据选定的标度，使它们的长度分别表示力 F_1 和 F_2 的大小（图 3 - 15 丙）。以 OA 和 OB 为邻边作平行四边形 $OACB$ 。量出这个平行四边形的对角线 OC 的长度，可以看出，根据同样的标度，合力 F 的大小和方向可以用对角线 OC 表示出来。

改变力 F_1 和 F_2 的大小和方向，重做上述实验，可以得到同样的结论。

可见，求两个互成角度的共点力的合力，可以用表示这两个力的线段为邻边作平行四边形，这两个邻边之间的对角线就表示合力的大小和方向。这叫做力的平行四边形定则。

如果有两个以上的共点力作用在物体上，我们也可以应用平行四边形定则求出它们的合力：先求出任意两个力的合力，再求出这个合力跟第三个力的合力，直到把所有的力都合成进去，最后得到的合力就是这些力的合力。

力的平行四边形可以用力的三角形来代替。在图 3 - 16 甲中 F 是共点力 F_1 和 F_2 的合力。如图 3 - 16 乙所示，从 O 点出发，把代表 F_1 和 F_2 的线段 OA 、 AC 首尾相接地画出来，连接 O 和 C ，从 O 指向 C 的线段就表示合力 F 的大小和方向。上述作图法叫做力的三角形法。作三角形 OBC （图 3 - 16 丙）同样可以求出 F_1 和 F_2 的合力 F 。用力的三角形法求合力，有时显得方便。

力的合成的计算 合力的大小和方向，还可以利用公式来计算。图 3 - 17 中的 OA 和 OB 分别表示力 F_1 和 F_2 ， OC 表示它们的合力 F ，力 F_1 和 F_2 的夹角为 θ 。

在三角形 OAC 中，根据余弦定理得到

$$F^2 = F_1^2 + F_2^2 - 2F_1F_2\cos(180^\circ - \theta)$$

$$= F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2\cos\theta.$$

所以合力的大小

$$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2 \cos \theta}. \quad (1)$$

合力的方向可以用合力跟原来任一个力的夹角表示出来。图中用 F 跟 F_1 的夹角 ϕ 来表示。利用直角三角形 ODC ，可以求出角 ϕ 的正切：

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{CD}{OD} = \frac{CD}{OA + AD} = \frac{F_2 \sin \theta}{F_1 + F_2 \cos \theta}. \quad (2)$$

讨论一下，力 F_1 和 F_2 的大小一定时，合力的大小跟这两个力的夹角 θ 的关系。什么情况下，合力最大？什么情况下合力最小？当 θ 由 0° 增大到 180° 的过程中，合力 F 的变化情况是怎样的？

练习四

(1) 两个力的合力总大于原来的每一个力，这话对吗？为什么？

(2) 有两个力 F_1 和 F_2 。用作图法求出当它们之间的夹角 $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$ 时的合力。研究你所作的图，能不能得到结论：夹角 θ 在 0° 到 180° 之间时， θ 越大，合力就越小。

(3) 用两根结实的绳子拉一辆陷在泥里的车，两条绳对车的拉力都是 2 000 牛，两绳互成 45° 角。用作图法求出合力的大小和方向，然后用公式来求。

(4) 两个力互成 30° 角，大小分别是 90 牛和 120 牛。用作图法求出合力的大小和方向，然后用公式来求。

(5) 2 牛和 10 牛的两个力，它们的合力能够等于 5 牛、10 牛、15 牛吗？

(6) 有大小分别为 4 牛、9 牛、11 牛的三个力，它们彼此之间的夹角可以变化，它们的合力的最大值是多少牛？最小值是多少牛？

七、力的分解

作用在物体上的一个力往往产生几个效果。拖拉机拉犁耕地，对犁的拉力 F 是斜向上方的，这个力产生两个效果：使犁克服泥土的阻力前进，同时把犁上提，这两个效果相当于两个力产生的（图 3 - 18）：一个水平的力 F_1 使犁前进，一个竖直向上的力 F_2 把犁上提。可见力 F 可以用两个力 F_1 和 F_2 来代替。几个力，如果它们产生的效果跟原来一个力产生的效果相同，这几个力就叫做原来那个力的分力。求一个已知力的分力叫做力的分解。

力的分解是力的合成的逆运算，同样遵守平行四边形定则。把一个已知力 F 作为平行四边形的对角线，那么，与已知力共点的两个邻边，就表示已知力的两个分力。在图 3 - 18 中， F_1 和 F_2 是 F 的两个分力。

我们知道，如果没有其他限制，对于同一条对角线，可以作出无数个不同的平行四边形（图 3 - 19），也就是说，同一个力 F 可以分解为无数对大小、方向不同的分力。一个已知力究竟该怎样分解呢？这要根据实际情况来决定，下面举两个实例。

（1）把一个物体放在斜面上，物体受到竖直向下的重力，但它并不能竖直下落，而要沿着斜面下滑，同时使斜面受到压力。这时重力产生两个效果：使物体沿斜面下滑以及使物体压紧斜面。因此重力 G 可以分解为这样两个力：平行于斜面使物体下滑的力 F_1 ，垂直于斜面使物体压紧斜面的力 F_2 （图 3 - 20）。

如果已知斜面的倾角 θ ，就可以求出分力 F_1 和 F_2 的大小。由于直角三角形 ABC 和 OQN 相似，所以

$$F_1 = G \sin \theta ,$$

$$F_2 = G \cos \theta 。$$

可以看出， F_1 和 F_2 的大小都和斜面的倾角有关。斜面的倾角增大时， F_1 增大， F_2 减小。车辆上桥时，力 F_1 阻碍车辆前进；车辆下桥时，力 F_2 使车辆运动加快。为了行车方便与安全，高大的桥要造很长的引桥，来减小桥面的坡度。

（2）放在水平面上的物体受到一个斜向上方的拉力 F 的作用，这个力与水平方向成 θ 角（图 3 - 21）。这个力产生两个效果：水平向前拉物体，同时竖直向上提物体。因此力 F 可以分解为沿水平方向的分力 F_1 和沿竖直方向的分力 F_2 。力 F_1 和 F_2 的大小为

$$F_1 = F \cos \theta ,$$

$$F_2 = F \sin \theta 。$$

练习五

(1) 在图 3 - 22 甲中已知力 F 和它的一个分力 F_2 ，在图 3 - 22 乙中已知力 F 和两个分力的方向，用作图法求出未知的分力。

(2) 一个物体的重量是 20 牛，把它放在一个斜面上，斜面长与斜面高之比是 5 : 3。把重力分解，求出平行于斜面使物体下滑的力和垂直于斜面使物体压紧斜面的力。

(3) 如图 3 - 23 所示，垂直作用在帆上的风力 $F=1.0 \times 10^4$ 牛。 F 沿着船身方向的分力 F_1 帆船前进，垂直于船身方向的分力 F_2 使船身侧倾，设 F 与船身方向成 45° 角。求力 F_1 是多大。

(4) 把竖直向下的 180 牛的力分解为两个分力，一个分力在水平方向上并等于 240 牛，求另一个分力的大小和方向。

八、矢量 同一直线上的矢量运算

矢量和标量 我们在初中学过的长度、质量、时间等等物理量，它们的大小可以用一个带有单位的数值来表示。例如说铅笔长 15 厘米，钢块的质量 50 千克等等。我们用 15 厘米就能完全描述这支铅笔的长度，用 50 千克就能完全描述这块钢的质量。力这个物理量却和上述物理量不同。力有大小，也可以用带有单位的数值来表示。例如说这个力是 10 牛，那个力是 6 牛。可是，这样并没有把一个力完全表达出来。要把一个力完全表达出来，除了说明它的大小，还要指明它的方向才行。

在物理学中，我们可以把物理量分为两类。一类叫做标量。标量只有大小，没有方向。长度、质量、时间、温度、功、能等，都是标量。另一类叫做矢量。矢量既有大小，又有方向。力是矢量，初中学过的速度也是矢量，以后还要学到其他矢量。

矢量可以用一根带箭头的线段来表示。前面讲的力的图示，其实就是力矢量的表示。速度矢量以及其他矢量都可以这样来表示。

认识到矢量和标量的不同，这是物理学研究中的一大进步。有了矢量的概念并且运用矢量的运算规则，我们就能很方便地研究和处理一些物理问题。

两个同类的标量，只要单位相同，它们的数值就可以用代数加法来运算。比如一个质量是 10 千克，另一个质量是 5 千克的物体，它们的总质量就是 15 千克。矢量则不能这样运算。一个物体受到两个力，一个是 10 牛，一个是 5 牛。这两个力共同作用所产生的效果不仅决定于它们的大小，而且决定于它们的方向。前面讲的力的合成就充分说明了这一点。力的合成要按照平行四边形定则来进行。平行四边形定则不仅适用于力的合成，对于别的矢量（如速度矢量）同样适用，它是矢量合成即矢量加法运算的普遍定则。

同一直线上的矢量运算 这一节以力矢量为例讲一讲同一直线上的矢量的运算，以备以后的应用。虽然是以力矢量为例来讲的，但对任何矢量都适用。

矢量既有大小，又有方向。如果被运算的矢量在一条直线上，那么，我们就可以用一个带有正负号的数值把矢量的大小和方向都表示出来。为此，我们沿着矢量所在的直线选定一个正方向（图 3 - 24），规定凡是方向跟正方向相同的矢量都取正值，凡是方向跟正方向相反的矢量都取负值，例如图中 $F_1=5$ 牛， $F_2=-5$ 牛， $F_3=7$ 牛， $F_4=-5$ 牛。这里，根据数值的正负号就可以知道力的方向；而力的大小等于它们的绝对值，分别是 5 牛，5 牛，7 牛，5 牛。

既然同一条直线上的矢量可以用带正负号的数值来表示，它们的运算就可以简化为代数运算。

(1) 如果两个矢量大小相等而且方向相同，如图 3—24 中的 F_2 和 F_4 ，我们就说这两个矢量相等，写成代数式就是

$$F_2 = F_4。$$

(2) 如果两个矢量大小相等而方向相反,如图 3 - 24 中的 F_1 和 F_2 , 由于它们只是符号相反,写成代数式就是

$$F_1 = -F_2。$$

(3) 如图 3 - 25 所示, 设有两个力 F_1 和 F_2 作用在一个物体上, 我们可以利用加法运算求出合力 F :

$$\begin{aligned} F &= F_1 + F_2 \\ &= 10 \text{ 牛} + (-6 \text{ 牛}) \\ &= 4 \text{ 牛。} \end{aligned}$$

这表示合力的大小是 4 牛, 结果是正值, 表示合力的方向与选定的正方向相同。即合力的方向跟两个力中较大的那个力的方向相同。

(4) 我们也可以利用减法运算求分力。如图 3 - 26 所示, 已知合力 F 和一个分力 F_1 , 那么, 另一个分力

$$\begin{aligned} F_2 &= F - F_1 \\ &= 8 \text{ 牛} - (-3 \text{ 牛}) \\ &= 11 \text{ 牛。} \end{aligned}$$

这表示 F_2 的大小是 11 牛, 方向与选定的正方向相同。

需要强调指出: 只有同一直线上的矢量, 它们的运算才可以像上述那样简化成代数运算。这是平行四边形定则在这种特殊情况下的运用。不在同一直线上的矢量, 它们的运算不能这样简化成代数运算, 仍必须按照平行四边形定则来进行。

还要指出的是: 这里用带有正负号的数值既表示出矢量的大小, 又表示出矢量的方向; 如果专指矢量的大小, 就要取绝对值, 即矢量的大小总是正值。本章前面各节中的公式, 如公式

$$f = kx,$$

$$f = ? \text{ N},$$

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

等等都是关于力矢量大小的公式。利用这些公式来计算, 其中的各力都取正值。

本章小结

本章学习了有关力的基本知识, 是学好力学的基础。一定要确切理解本章的内容, 今后才能学好其他力学知识。

(1) 什么是力? 从力的性质看, 力学中经常遇到的有哪几种力? 力可以用哪两种方法来分类?

(2) 重力是怎样产生的? 它的大小和方向是怎样的? 什么是物体的重心? 有规则形状的均匀物体, 重心的位置在什么地方?

(3) 弹力是在什么条件下产生的? 为什么说拉力、压力和支持力都是弹力? 它们的方向是怎样的?

(4) 胡克定律的内容是什么? 在什么条件下适用? 写出胡克定律的公式。

(5) 滑动摩擦力是在什么情况下产生的？它的方向是怎样的？怎样计算它的大小？写出计算公式。

(6) 静摩擦力是在什么情况下产生的？它的方向是怎样的？什么叫最大静摩擦力？

(7) 力的合成要按照什么定则来进行？这个定则的内容是什么？写出计算合力大小和方向的公式。

(8) 为什么力的分解和合成遵守相同的定则？一个力，如果知道它的一个分力的大小和方向，或者知道两个分力的方向，这个力的分解有没有确定的答案？

(9) 矢量和标量有什么不同？矢量加法要按照什么定则来运算？同一直线上的矢量是怎样运算的？

习 题

A 组

(1) 下述物体（箭、足球、木箱）各受哪几个力的作用？各是什么性质的力？力的方向如何？画出受力示意图。

- a. 竖直向上射出去的箭。
- b. 被足球运动员踢出后凌空飞行中的足球。
- c. 用水平绳拉着在光滑水平面上滑动的木箱。

(2) 一弹簧秤用绳 a 挂在天花板上，下端通过绳 b 挂一个砝码（图 3-27）。弹簧秤受几个力的作用？各是哪个物体对它的作用？各是什么性质的力？力的方向如何？画出物体受力示意图。

(3) 重 100 牛的木箱放在水平地面上，最少用 40 牛的水平推力才能推动它，当它在水平地面上运动时，用 38 牛的水平推力即可维持木箱做匀速运动。木箱与地面间的最大静摩擦力为_____牛；木箱与地面间的动摩擦因数为_____；当木箱静止时，用 20 牛的水平推力推它，则木箱受_____摩擦力，大小为_____牛；当用 80 牛的水平推力推木箱时，木箱受_____摩擦力，大小为_____牛；撤去推力，而木箱仍在运动时，木箱受_____摩擦力，大小为_____牛。

(4) 画出图 3-28 各图中物体 A 所受摩擦力的方向，并注明是静摩擦还是滑动摩擦。

- a. A 在拉力 F 作用下，静止于水平面上。
- b. A 向右滑动。
- c. A 静止于斜面上。
- d. A 在压力作用下静止于竖直墙面上。

(5) 一个物体受两个力 F_1 和 F_2 的作用，F 是 F_1 和 F_2 的合力，则以下说法正确的是：

- A. 力 F 跟 F_1 和 F_2 的共同作用是等效的。
- B. 物体受 F_1 、 F_2 和 F 三个力的作用。

C. 力 F 一定比 F_1 和 F_2 都大。

D. 力 F 随 F_1 与 F_2 之间夹角的增大而增大。

(6) 两个人共提一桶水，提绳间的夹角大些省力，还是小些省力？说明理由。用橡皮筋做个简单实验来证明你的结论。

(7) 如图 3-29 所示，为了防止电线杆倾倒，常在两侧对称地拉上钢绳。设两条钢绳间的夹角是 60° ，每条钢绳的拉力都是 300 牛，求两条钢绳作用在电线杆上的合力。

B 组

(1) 下列说法中正确的是：

A. 两个互相接触的物体之间一定有弹力作用。

B. 一个物体静止在另一个物体的表面上，它们之间一定不存在摩擦力的作用。

C. 两物体之间如果有弹力的作用，就一定有摩擦力的作用。

D. 两物体之间如果有摩擦力的作用，就一定有弹力的作用。

(2) 一根质量为 m 、长度为 l 的均匀长方体木料放在水平桌面上。木料与桌面间的动摩擦因数为 μ 。现用水平力 f 推木料，当木料经过图 3-30 所示的位置时，桌面对木料的滑动摩擦力等于_____。

(3) 图 3-31 表示用平行四边形法则求三个共点力 F_1 、 F_2 、 F_3 的合力 F 。先求出 F_1 和 F_2 的合力，再求出这个合力与 F_3 的合力 F 。改用三角形法求出这三个力的合力。改变求和的顺序，再分别用平行四边形法则和三角形法求出这三个力的合力。

(4) 20 牛、30 牛和 40 牛的三个力作用于物体的一点，它们之间的夹角都是 120° 。求合力的大小和方向。

(5) 有一根弹簧，受到 20 牛的拉力时长 10.5 厘米，再增加 60 牛的拉力，弹簧又伸长 1.5 厘米。求该弹簧的劲度和原长。

第四章 直线运动

在我们周围，到处都可以看到物体的运动。河水在奔流，鸟儿在飞翔，树叶在飘落，车辆在行驶，机器在运转……。自然界的一切物体都在不停地运动。通常我们认为不动的物体，比如高山、桥梁、房屋等等，也随着地球一起运动。太阳在银河系中也在不停地运动。放在桌上不动的课本，不但随着地球一起运动，内部的分子、原子也在不停地运动着。宇宙中的一切，大到天体，小到分子、原子都处在永恒的运动中。

物体相对于其他物体的位置变化，叫做机械运动，常简称为运动。

物体的运动是千差万别的，我们从哪里开始研究呢？这一章我们从最基本、最简单的直线运动入手，学会怎样描述运动。在学习过程中，我们可以体会到物理学研究问题的一些方法，这对今后的学习是十分重要和有益的。

一、机械运动

参考系 既然一切物体都在运动，我们观察和研究一个物体运动的时候，就必须选定某个另外的物体作为标准，参考这个标准来进行研究。例如，我们说房屋、树木是静止的，行驶的汽车是运动的，这是以地面作标准来说的。坐在行驶的火车车厢里的乘客，认为自己是静止的，在车厢里走动的乘务员是运动的，路旁的树木在向后倒退，这是以车厢作标准来说的。在描述一个物体的运动时，选来作为标准的另外的物体，叫做参考系。

同一个运动，如果以不同的物体作为参考系，观察的结果可能不同。坐在行驶的火车车厢里的乘客，如果以车厢作参考系，他是静止的；如果以地面作参考系，他是随同车厢一起运动的。从匀速航行的船的桅杆上落下一个物体，船上的观察者以船作参考系，看到这个物体是竖直下落的(图 4-1 甲)；岸上的观察者以地面作参考系，看到这个物体是沿着曲线下落的(图 4-1 乙)。

原则上说，研究一个物体的运动时，参考系是可以任意选取的。观察在河里游泳的人的运动，可以选取河岸作参考系，也可以选取在河上航行的船只作参考系。研究天体的运动，可以选取地球作参考系，也可以选取太阳作参考系。但是，实际选取参考系的时候，往往要考虑研究问题的方便，使对运动的描述尽可能简单。比如，研究太阳系中行星的运动，太阳是理想的参考系，研究地面上物体的运动，一般来说取地面或者其他相对于地面不动的物体作参考系比较方便。

平常我们说，太阳升起和落下，是用什么作参考系的？

质点 研究物体的运动，第一步是确定物体的位置。物体都有一定的大小和形状，物体的不同部分在空间的位置并不相同。在运动中，物体的各部分的位置变化一般来说也是各不相同的。所以，要详细描述物体的位置及其变化，并不是一件简单的事情。但是，在某些情况下，却可以不考虑物体的大小和形状，而使问题简化。一列火车从北京开往天津，当我们讨论火车的运行速度或运行时间这类问题时，由于列车的长度比北京一天津间的距离小得多，就可以不考虑列车的长度。射出的炮弹，落下的雨滴，当我们讨论它们的运动情况时，由于它们的大小比它们运动的空间范围小得多，就可以不考虑它们的大小和形状。在这些情况下，我们可以把物体看作一个有质量的点，或者说，可以用一个有质量的点来代替整个物体。用来代替物体的有质量的点叫做质点。

一个物体可否视为质点，这要看问题的具体情况而定。研究一列火车在两地间运行，如前所述，可以把列车视为质点。如果研究列车通过某一标志所用的时间，就必须考虑列车的长度，而不能把列车视为质点。研究地球的公转时，由于地球的直径(约 1.3×10^4 千米)比地球和太阳之间的距离(约 1.5×10^8 千米)小得多，因而可以忽略地球的大小和形状，把它当作质点。可是研究地球的自转时，我们却不能忽略地球的大小和形状，当然不能把地球当作质点了。

运动的质点通过的径迹，叫做质点运动的轨迹。铅笔尖在纸上划过后，

留下的痕迹就是铅笔尖的运动轨迹。质点运动的轨迹是直线的叫做直线运动，是曲线的叫做曲线运动。这一章研究直线运动。

自然界中任何一种事物及其运动变化，都是比较复杂的。研究问题，要暂时撇开起作用很小的次要因素，抓住主要因素。例如，如果物体的形状和大小在所研究的问题中起的作用很小，我们就可以暂时撇开它，而把物体看作是一个有质量的点，即质点。质点这个概念，以及前面讲过的光线的概念等，都是一种科学的抽象，一种理想化模型。

练习一

(1) 两辆在公路上直线行驶的汽车，它们的距离保持不变，试说明用什么物体作参考系，两辆汽车都是静止的，用什么物体作参考系，两辆汽车都是运动的。此时能否找到这样一个参考系，一辆汽车对它是静止的，另一辆汽车对它是运动的？为什么？

(2) 研究自行车轮绕车轴的运动，能不能把自行车当作质点？研究在马路上行驶的自行车的速度，能不能把自行车当作质点？

二、位置变动的描述 位移

研究物体的运动，就是要知道物体的位置怎样随时间而变动。这一节先介绍时间和时刻的概念，然后学习怎样描述位置的变动。

时间和时刻 比如上午 8 时开始上课，到 8 时 45 分下课，这里的 8 时和 8 时 45 分就是这一节课开始和结束的时刻，这两个时刻之间相隔 45 分钟，就是上课所经历的时间。

用时间轴上的点表示时刻，表示时刻的两点之间的距离就表示所经历的时间。图 4-2 就是将上午第一节和第二节课的上、下课的时刻标在时间轴上。时间轴上开始计时的时刻可以根据问题的需要任意确定。

时间的法定计量单位是秒、分、时。在实验室中常用停表来测量时间。在比较精确地研究物体的运动情况时，需要测量和记录很短的时间，在学校的实验室中常用打点计时器和频闪照相的方法来测量，我们在学生实验中就要练习使用打点计时器。

我国运动员王军霞在万米比赛中，以 29 分 31.78 秒的成绩打破了该项世界记录。

这个成绩的数据是时间还是时刻？

从北京开往天津的某次列车，每天 15 时 25 分开车，这指的是时间还是时刻？

位移 由北京去上海，你可以选择不同的交通路线，可以乘火车，也可以乘飞机，还可以先乘火车或汽车再换乘轮船，这些公路、铁路及空中或海上航线的长度都不相同，但是就位置的变动来说，你总是由初位置北京到达东南方向直线距离约 1080 千米的上海（图 4-3）。

在物理学中用一个叫做位移的物理量来表示质点的位置变动。设质点由初位置 A，经过一段时间运动到末位置 B，从初位置 A 指向末位置 B 的有向线段 AB，就可以用来表示质点在这段时间内发生的位移。有向线段的长度表示位移的大小，有向线段的方向表示位移的方向。位移既有大小，也有方向，所以它和力一样，也是矢量，通常用 s 表示位移。

位移和路程不同，路程是质点实际运动轨迹的长度。在图 4-3 中，质点的位移是有向线段 AB，而路程是曲线 ACB 或 ADB 的长度。路程只有大小没有方向，是标量。

城市内的出租汽车，司机是按位移还是按路程收费的？

在什么样的运动中位移的大小和路程总相等？

练习二

(1) 火车站服务处都有《旅客列车时刻表》出售，它为什么不叫做《时间表》？

(2) 田径场跑道周长是 400 米。一位运动员在进行 100 米短跑时，选用跑道的直道部分，他跑完全程的路程是多大？位移是多大？在进行 800 米跑时，他跑完全程的路程是多大？位移是多大？

(3) 一位同学沿着东西方向的马路向西走了 400 米，买了信封、信纸，

又向东走了 100 米来到邮局。他总共走了多少路程？位移是多大？位移的方向如何？

(4) 一辆汽车向东行驶了 40 千米，又向南行驶了 30 千米，求汽车位移的大小和方向。

三、位移和时间的关系

匀速直线运动 质点在运动过程中，它的位置随时间而不断变动，位移也随时间而不断改变。例如，我们研究一辆汽车在一段笔直公路上运动的情况，可以在公路旁每隔 100 米站一名拿着秒表的观测者，记下汽车到达每个观测者的时间（图 4-4）。测量的结果如下表所示。

时间（秒）	0	4.9	10.0	15.1	19.9
位移（米）	0	100	200	300	400

从这些数据我们看出，在误差允许的范围内，在相等的时间里汽车的位移是相等的。在每 5 秒的时间里位移都是 100 米，在每 10 秒的时间里位移都是 200 米，等等。

物体在一条直线上运动，如果在相等的时间里位移相等，这种运动就叫做**匀速直线运动**。

在匀速直线运动中，既然在相等的时间里位移相等，如果在时间 t 内的位移是 s ，在时间 $2t$ 内的位移就是 $2s$ ，在时间 $3t$ 内的位移就是 $3s$ 等等，即位移 s 跟发生这段位移所用的时间 t 成正比，位移 s 是时间 t 的正比函数。

我们还可以用图象来表示位移和时间的关系。在平面直角坐标系中，用纵轴表示位移 s ，用横轴表示时间 t ，根据上述汽车运动的数据，在坐标平面上标出表示 $(4.9, 100)$ 、 $(10.0, 200)$ 、 $(15.1, 300)$ 、 $(19.9, 400)$ 的点，可以看出各个点几乎都在一条通过原点的直线上（图 4-5）。画出这条直线，从学过的数学知识我们知道，这正是正比函数的图象。

这种图象叫做**位移-时间图象**（ $s-t$ 图象），有时简称位移图象。

变速直线运动 我们日常看到的直线运动，往往不是匀速直线运动。飞机起飞的时候，运动越来越快，在相等的时间里位移不相等。火车进站的时候，运动越来越慢，在相等的时间里位移也不相等。

物体在一条直线上运动，如果在相等的时间里位移不相等，这种运动就叫做**变速直线运动**。变速直线运动的位移图象不是直线，而是曲线。这一章我们着重研究变速直线运动。

在物理学中，物理量之间的关系可以用公式来表示，也可以用图象来表示。 $s-t$ 图就是一种图象表示。

图象可以一目了然地表示出物理量之间的变化情况，便于从总体上认识过程的特点。比如，由描述物体运动的 $s-t$ 图是不是一条直线，就可以判断该物体是不是做匀速直线运动。利用图象可以比较方便地处理实验（或观测）结果，找出事物的变化规律。图 4-5 就是由观测汽车运动的数据，找出汽车运动的规律的。

练习三

(1) 根据课文中给出的汽车运动的数据表，请你判断：汽车在每秒内

发生的位移是多大？这辆汽车继续匀速行驶，从计时开始经过 60 秒行驶的距离是多长？

(2) 图 4-6 是一架民航飞机的位移图象。从这个图象求出飞机在 30 分钟内的位移，以及飞行 700 千米所用的时间。

(3) 图 4-7 是一辆火车运动的位移图象。线段 OA 和 BC 表示火车做什么运动？线段 AB 与横轴平行，表示火车做什么运动？火车在 3 小时内的位移是多少？通过 80 千米用多长时间？

四、运动快慢的描述 速度

速度 不同的运动，快慢程度并不相同，有时相差很大。要比较物体运动的快慢，可以有两种办法。一种是在位移相同的情况下，比较所用时间的长短，时间短的，运动得快。比如在百米竞赛中，运动员甲用 10 秒跑完全程，运动员乙用 11 秒跑完全程，甲用的时间短，跑得快。另一种是在时间相同的情况下，比较位移的大小，位移大的，运动得快。汽车 A 在 2 小时内行驶 80 千米，汽车 B 在 2 小时内行驶 170 千米，汽车 B 运动得快。那么，运动员甲和汽车 A，哪个快呢？这就要找出统一的比较标准。如果我们算出它们各自在单位时间内（如每秒内）的位移，就便于比较了。运动员甲每秒内位移等于 $100 \text{ 米} / 10 \text{ 秒} = 10 \text{ 米} / \text{秒}$ 。汽车 A 每秒内位移等于 $80 \times 10^3 \text{ 米} / 2 \times 3600 \text{ 秒} = 11 \text{ 米} / \text{秒}$ 。可见，汽车 A 运动得快。这样，为了比较运动的快慢，我们引入速度的概念。

速度 是表示运动快慢的物理量，它等于位移 s 跟发生这段位移所用时间 t 的比值。用 v 表示速度，则有

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

在国际单位制中，速度的单位是米/秒，读作“米每秒”，符号是 m/s。常用的单位还有千米/时、厘米/秒等等。

速度不但有大小，而且有方向，是矢量。速度的大小在数值上等于单位时间内位移的大小，在直线运动中，速度的方向跟运动的方向相同。

在匀速直线运动中，位移 s 跟发生这段位移所用的时间 t 成正比，比值 $v = \frac{s}{t}$ 是恒定的。从学过的数学知识知道， $v = \frac{s}{t} = \text{tg} \theta$ ，其中 θ 为位移图象中直线的倾角（见图 4-5）， $\text{tg} \theta$ 为直线的斜率。这就是说，在匀速直线运动中，速度的大小在数值上等于位移图象中直线的斜率。在同一坐标平面上，直线的斜率越大，表示速度越大。

在变速直线运动中，比值 $\frac{s}{t}$ 不再是恒定的，而跟在哪一段时间内计算这个比值有关。图 4-8 是根据测量结果作出的某一变速直线运动的位移图象。在这个运动中，由时刻 $t_5 = 5$ 秒到时刻 $t_{10} = 10$ 秒这段时间 $t =$

$t_{10} - t_5 = 5$ 秒内，发生的位移 $s = (10.0 - 2.5) \text{ 米} = 7.5 \text{ 米}$ ，比值 $\frac{s}{t} = 1.5$

米/秒。它在数值上等于图 4-8 中割线 AB 的斜率。设想在这 5 秒时间内物体是匀速地通过这 7.5 米，这个匀速直线运动的速度就等于 1.5 米/秒。

比值 $\frac{s}{t}$ 这时表示的是这 5 秒内平均的快慢程度，叫做平均速度，通常用 \bar{v} 来表示。

同样，我们可以算出上述运动中，由时刻 $t_5 = 5$ 秒到时刻 $t_8 = 8$ 秒这 3 秒时间内物体的平均速度 $\bar{v} = 1.2 \text{ 米} / \text{秒}$ ，由时刻 $t_5 = 5$ 秒到时刻 $t_6 = 6$ 秒这 1 秒时间内的平均速度 $\bar{v} = 1.1 \text{ 米} / \text{秒}$ 。它们在数值上分别等于相应割线的斜率。

瞬时速度 用设想的匀速直线运动代替实际的变速直线运动，这样求得平均速度只能粗略地描述这段时间内物体做变速直线运动的快慢。但

是，时间取得越短，割线越靠近曲线，设想的匀速运动就越接近实际的变速运动，求得的平均速度就能越精确地描述变速运动的快慢。

图 4-9 是图 4-8 中一部分的放大图。我们看到，在由时刻 $t_5=5.0$ 秒到 $t_{5.1}=5.1$ 秒这段短时间内，设想的匀速运动已经相当接近实际的变速运动，

这段时间内的平均速度 $\bar{v} = (2.6 - 2.5) \text{ 米} / 0.1 \text{ 秒} = 1.0 \text{ 米} / \text{秒}$ 。这个平均速度已经可以相当精确地描述物体经过 $t = 5$ 秒这一时刻的快慢。实际上，当时间足够短时，测量仪器就分辨不出变速运动和匀速运动的差别，即使再缩短时间，测得的平均速度也不会有什么变化，这个平均速度就可以用来表示物体经过某一时刻的速度。

物体经过某一时刻（或某一位置）的速度，叫做瞬时速度。

随着所取时间的缩短，图 4-9 中过 A 点的割线越来越接近过 A 点的切线（你自己用直尺在图上比比看）。物体经过 $t = 5.0$ 秒这一时刻的瞬时速度的大小在数值上等于过 A 点的切线的斜率。瞬时速度的大小叫做瞬时速率，有时简称速率。

技术上通常用速度计来测瞬时速度，图 4-10 表示汽车中的速度计。指针所指的数值，就是某时刻汽车的瞬时速率。乘汽车的时候，注意一下司机面前的速度计就会看到，指针所指的数值随着行驶快慢的变化而改变。

子弹以 900 米 / 秒的速度从枪筒射出，这里指的是平均速度还是瞬时速度？汽车在北京长安街上行驶，有时快，有时慢，20 分钟行驶了 18 千米，汽车的行驶速度是 54 千米 / 时，这里指的是什么速度？

· 小实验 ·

模拟打点计时器

你左手拿着一块表，右手拿着一支彩色画笔，当你的同伴沿着直线牵动一条纸带，使纸带在你的笔下向前移动的时候，每隔 1 秒你用彩色画笔在纸带上点一个点。你还可以练习在每秒内用彩色画笔在纸带上均匀地点上两个点。这样，就做成了一台“打点计时器”（图 4-11）。

想一想，彩色画笔点出的两个相邻的点表示多长的时间？纸带上两个点之间的距离跟牵动纸带的快慢有什么关系？牵动纸带的快慢不均匀，对相邻两点所表示的时间有影响吗？

用这台“打点计时器”，测量你的同伴步行时或其他物体运动时的平均速度。

练习四

(1) 两根路灯杆相距 50 米，一辆汽车用 4 秒时间驶过这两杆之间，据此可以算出汽车在这段时间内的_____速度为_____千米/时。如果离其中一根灯杆 0.60 米处有一站牌，汽车驶过站牌与这根灯杆之间只用了 0.05 秒，则我们可以认为汽车通过站牌时的_____速度为_____米/秒。

(2) 图 4-12 是两个匀速直线运动的位移图象。哪条直线的斜率 $\tan \theta$ 大? 各是多大? 哪条直线所表示的运动的的速度大? 各是多大?

(3) 一辆汽车, 起初以 30 千米/时的速度匀速行驶了 30 千米, 然后又以 60 千米/时的速度匀速行驶了 30 千米。一位同学认为这辆汽车在这 60 千米中的平均速度是 $\frac{1}{2} (30 + 60)$ 千米 / 时 = 45 千米 / 时。这个结果对不对?

(4) 骑自行车的人沿着坡路下行, 在第 1 秒内通过 1 米, 在第 2 秒内通过 3 米, 在第 3 秒内通过 5 米, 在第 4 秒内通过 7 米。求最初两秒内、最后两秒内以及全部运动时间内的平均速度。

(5) 用飞机进行航空测量, 飞机离地高度保持 500 米, 巡航速度为 400 千米时, 飞机上测量仪器可在 120° 视角范围内测量 (图 4-13)。飞机每小时测量的覆盖面积是多大?

(6) 雨滴受风的影响斜向东降落, 设雨滴运动方向跟竖直方向成 30° 角, 速度的大小是 5 米/秒。选择适当标度, 作出雨滴的速度矢量的图示。

五、速度和时间的关系

匀速直线运动的速度是恒定的，不随时间而改变。如果我们在平面直角坐标系中用纵轴表示速度，横轴表示时间，做出它的速度-时间图象($v-t$ 图象，简称速度图象)，可以看出它是与横轴平行的直线(图 4-14)。

变速直线运动的瞬时速度随着时间而改变。如果坐在汽车驾驶员旁边，在汽车做变速运动的时候，注视速度计，记下间隔相等的各时刻的速度值，根据记录的数据就可以做出汽车的速度图象。下面是一次观测的数据，以及由这些数据作出的速度图象。

时 刻 (秒)	速度 (千米 / 时)
0	20
5	31
10	40
15	49

从数据可以看出，在误差允许的范围内，汽车每隔 5 秒钟，速度增加 10 千米/时，即在相等的时间内，速度的改变是相等的。它的速度图象是一条倾斜的直线(图 4-15)。

在变速直线运动中，如果在相等的时间内速度的改变相等，这种运动就叫做匀变速直线运动。

上述汽车的运动是匀变速直线运动，它的速度随着时间而均匀增加，通常叫做匀加速直线运动。图 4-16 所示的运动，也是匀变速直线运动，它的速度随时间而均匀减小，通常叫做匀减速直线运动。

常见的变速直线运动，速度不一定是均匀改变的，是非匀变速直线运动，它的速度图线不是直线，而是曲线(图 4-17)。可是，不少变速运动很接近于匀变速运动，可以当作匀变速运动来处理。例如，发射炮弹时炮弹在炮筒里的运动，火车、汽车等交通工具在开动后或停止前的一段时间内的运动，石块从不太高的地方下落的运动，石块被竖直向上抛出后向上的运动等，都可以看作匀变速直线运动。

图 4-17 一般变速直线运动的速度图象。这个图象表示一辆汽车从静止开始做加速运动。在 0~1 秒的时间之内，曲线与直线非常接近，可以看作匀加速直线运动。在 1~8 秒的时间内汽车做非匀变速直线运动。8 秒后汽车做什么运动？

练习五

(1) 有两个物体，从同一点开始向相同方向做匀速直线运动，速度分别是 3 米/秒和 5 米/秒，画出它们的位移图象和速度图象，并根据这两种图象分别求出它们在 5 秒内的位移。

(2) 图 4-18 所示的几个速度图象分别描述的是什么运动？

(3) 图 4-19 是一个物体运动的速度图象。请你根据此图说出物体在这 1 分钟内各阶段的运动情况。

(4) 图 4-20 是一个物体运动的位移图象，请你根据此图说出物体在这 1 分钟内各阶段的运动情况。

六、速度改变快慢的描述 加速度

不同的变速运动，速度改变的快慢是不同的。火车进站时速度减小得很慢，在较长时间内速度改变不多；汽车在急刹车时速度减小得很快，在很短时间内，速度改变很大。怎样描述速度改变的快慢呢？运动员投出铅球时，铅球的速度可以在 0.2 秒内由零增加到 17 米/秒，它每秒速度的增加等于 $\frac{(17-0)\text{米/秒}}{0.2\text{秒}} = 85\text{米/秒}^2$ 。迫击炮射击时，炮弹在炮筒中的速度

在 0.005 秒内就可以由零增加到 250 米/秒，每秒速度的增加等于 $\frac{(250-0)\text{米/秒}}{0.005\text{秒}} = 5 \times 10^4 \text{米/秒}^2$ 。可见，炮弹的速度改变比铅球的速度改

变要快得多。为了描述速度改变的快慢，我们引入加速度的概念。

加速度是表示速度改变快慢的物理量，它等于速度的改变跟发生这一改变所用时间的比值。用 v_0 表示物体开始时刻的速度（初速度），用 v_t 表示经过一段时间 t 的速度（末速度），速度的改变量 $\Delta v = v_t - v_0$ 。用 a 表示加速度，那么

$$a = \frac{v_t - v_0}{t}$$

在国际单位制中，加速度的单位是米/秒²，读作“米每二次方秒”，符号是 m/s²。常用的单位还有厘米/秒²。

加速度不但有大小，而且有方向，也是矢量。加速度的大小在数值上等于单位时间内速度的改变量。加速度的方向始终跟速度的改变量的方向一致（图 4-21）。在变速直线运动中，速度的方向始终在一条直线上，取初速度 v_0 的方向为正方向，如果速度增大，末速度 v_t 大于初速度 v_0 ，速度的改变量 $\Delta v = v_t - v_0 > 0$ ，加速度是正值，这里加速度的方向跟初速度 v_0 的方向相同（图 4-21 甲）；如果速度减小， $\Delta v = v_t - v_0 < 0$ ，加速度是负值，这时加速度的方向跟初速度 v_0 的方向相反（图 4-21 乙）。

在匀变速直线运动中，速度是均匀变化的，比值 $\frac{v_t - v_0}{t}$ 是恒定的，加速度的大小不变，方向也不变，因此，匀变速直线运动是加速度不变的运动。

物体运动的加速度（米/秒²）

炮弹在炮筒内	5×10^5	竞赛汽车（加速）	4.5
跳伞者着陆	-24.5	汽车（加速）可达	2
喷气式飞机着陆	-5 ~ -8	无轨电车（加速）可达	1.8
汽车急刹车	-4 ~ -6	旅客列车（加速）可达	0.35

匀变速运动的速度图象是一条倾斜的直线，它的斜率在数值上等于加速度的大小。图 4-15 所示的运动， $v_0 = 20$ 千米/时 = 5.6 米/秒，加速度 $a = 0.56$ 米/秒²。在图 4-16 所示的运动中， $v_0 = 5$ 米/秒，加速度 $a = -1$ 米/秒²。在同一坐标平面上，直线的斜率越大，表示加速度越大。

加速度为零的运动是什么运动？

有人说：速度越大，加速度也越大。这话对吗？举几个例子说明你的看法。

对非匀变速直线运动来说，比值 $\frac{v_t - v_0}{t}$ 不是恒定的。类似于平均速度和瞬时速度的概念，需要引入平均加速度和瞬时加速度的概念。对此，我们就不讨论了。

速度等于位移和时间的比值，因而速度是位置对时间的变化率。加速度等于速度的变化和时间的比值，因而加速度是速度对时间的变化率。所谓某一个量对时间的变化率，是指单位时间内该量变化的数值。变化率表示变化的快慢，不表示变化的大小。

速度大，加速度不一定也大。比如匀速飞行的高空侦察机，尽管它的速度能够接近 1000 米/秒，但它的加速度为零。相反，速度小，加速度也可以很大。比如枪筒里的子弹，在扣动扳机火药刚刚爆发的时刻，尽管子弹的速度接近于零，但它的加速度可以达到 4×10^5 米/秒²。

练习六

(1) 速度为 18 米/秒的火车，制动后 15 秒停止运动。求火车的加速度。

(2) 枪筒内的子弹在某一时刻的速度是 100 米/秒，经过 0.0015 秒速度增加到 700 米/秒。求子弹的加速度。

(3) 汽车的加速性能是反映汽车质量的重要标志。汽车从一定的初速度 v_0 加速到一定的末速度 v_t ，用的时间越少，表明它的加速性能越好。下表是三种型号汽车的加速性能的实验数据，求它们的加速度。

汽车型号	初速度 v_t (千米/时)	末速度 v_0 (千米/时)	时间 t (秒)	加速度 a (米/秒 ²)
某型号高级轿车	20	50	7	
某型号 4 吨载重汽车	20	50	38	
某型号 8 吨载重汽车	20	50	50	

(4) 图 4-22 中的直线 和 分别表示两个匀加速直线运动的速度图象。它们的初速度各是多大？它们哪个的加速度大？经过多长时间它们的速度相同？

七、匀变速直线运动的规律

速度和时间的关系前面我们已经用速度图象表示出速度和时间的关系，引入了加速度这个物理量，这种关系就可以用公式来表示。匀变速直线运动的加速度是恒定的，由加速度公式 $a = \frac{v_t - v_0}{t}$ 得到

$$v_t = v_0 + at. \quad (1)$$

这是匀变速直线运动的速度公式，它表示出了匀变速直线运动的速度和时间的关系。 v_t 是 t 的一次函数，从学过的数学知识知道，它的函数图象是倾斜的直线，这正是前面学过的匀变速运动的速度图象。直线在纵轴上的截距等于 v_0 ，直线的斜率等于加速度的大小。

位移和时间的关系 匀速直线运动的位移可以用位移公式 $s = v t$ 求出，也可以利用速度图象求出。设某一匀速运动的速度 $v = 3$ 米/秒，在 $t = 5$ 秒内发生的位移 $s = v t = 15$ 米。位移的数值等于图 4-23 中画有斜线的长方形的“面积”，即等于线段 OB 的“长度”（3 米/秒）乘以线段 OA 的“长度”（5 秒）。

我们也可以利用速度图线来求做匀变速直线运动的物体在时间 t 内的位移。设想把时间 t 分成许多小的时间间隔，在每一个小的时间间隔内物体都做匀速运动，而从一个时间间隔到下一个时间间隔，速度跳跃性地增加。也就是用图 4-24 甲中折线 AA' BB' CC'所表示的设想的运动，代替由直线 AP 所表示的真实的匀变速运动。这种设想的运动，每一个小的时间间隔内的位移，数值上等于相应时间间隔的图线下方的一条矩形的面积；在时间 t 内的位移，在数值上等于折线下方画有斜线部分的面积。时间间隔分得越细，设想的运动就越接近真实的运动（图 4-24 乙）。当时间间隔分割得足够小时，折线趋近于直线 AP，设想的运动就代表了真实的运动。由此可以求出匀变速运动在时间 t 内的位移，它在数值上等于直线 AP 下方的梯形 OAPQ 的面积（图 4-24 丙）。这个面积 $S = S_1 + S_2 = OA \times OQ$

$$+ \frac{1}{2} AR \times RP = v_0 t + \frac{1}{2} at^2. \text{ 即位移}$$

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} at^2. \quad (2)$$

这就是匀变速直线运动的位移公式，它表示出匀变速直线运动的位移和时间的关系。

上述推理中，以及前面讲瞬时速度时，都用到无限分割逐渐逼近的方法，这是高等数学的基本思想之一，我们要注意领会。

位移和速度的关系 由（1）（2）两式消去 t ，得到

$$v_t^2 - v_0^2 = 2as. \quad (3)$$

在有些问题中，没有给出或者不涉及时间 t ，应用（3）式求解比较方便。

【例题】一个滑雪的人，从 85 米长的山坡上匀变速滑下，初速度是 1.8 米/秒，末速度是 5.0 米/秒，他通过这段山坡需要多长时间？

分析和解答已知三个物理量： $v_0 = 1.8$ 米/秒， $v_t = 5.0$ 米/秒， $s = 85$ 米。单独用（1）式或（2）式都不能求得未知量 t ，需用（1）（2）两式联立求解。（1）（2）两式中共有五个量，已知其中三个量，可求得另外两个未知量 a 和 t 。本题不要求解出 a ，消去 a ，解出 t ，即可求得答案。

由（1）式可得 $at = v_t - v_0$ ，代入（2）式中得

$$\begin{aligned} s &= v_0 t + \frac{1}{2}(v_t - v_0)t \\ &= \frac{1}{2}(v_0 + v_t)t. \end{aligned} \quad (4)$$

解出 t ，代入数值得到

$$t = \frac{2s}{v_0 + v_t} = 25 \text{秒}.$$

设一个做匀变速直线运动的物体在时间 t 内的位移为 s ，那么，在这段时间内的平均速度 $\bar{v} = s/t$ 。将（4）式代入可得

$$\bar{v} = \frac{1}{2}(v_0 + v_t).$$

上式表示：在匀变速直线运动中，某段时间内的平均速度等于这段时间的初速度和末速度的平均值。要注意这个结论只适用于匀变速直线运动。

我们要善于应用学过的数学知识处理物理问题，有意识地培养这方面的能力。在用代数知识求解未知量时，一般可先进行文字运算，得出用已知量表达未知量的关系式，然后进行数值计算。这样能够清楚地看出未知量与已知量的关系，进行数值计算也往往比较简便。

练习七

（1）机车原来的速度是 36 千米/时，在一段下坡路上加速度为 0.20 米/秒²。机车行驶到下坡末端，速度增加到 54 千米/时。求机车通过这段下坡路所用的时间。

（2）一辆做匀变速运动的汽车，初速度是 34 千米/时，4.0 秒末速度变为 42 千米/时。如果保持加速度不变，6.0 秒末、7.0 秒末的速度是多大？

（3）匀变速运动的加速度是 -4.0 米/秒²。在某一时刻，速度为 20 米/秒。试求这一时刻后 4.0 秒末和 5.0 秒末的速度。

（4）钢球在斜槽上做初速度为零的匀变速运动，开始运动后 0.2 秒内通过的路程是 3.0 厘米，1 秒内通过的路程是多少？如果斜面长 1.5 米，钢球由斜面顶端滚到底端需要多长时间？

（5）飞机着陆后做匀变速运动，速度逐渐减小。已知初速度是 60 米/秒，加速度的大小是 6.0 米/秒²，求飞机着陆后 5.0 秒内通过的路程。

（6）一辆汽车原来匀速行驶，然后以 1.0 米/秒² 的加速度加快行驶，经 12 秒行驶了 180 米。汽车开始加速时的速度是多大？

（7）以 18 米/秒的速度行驶的汽车，制动后在 3.0 秒内前进 36 米，求汽车的加速度。

(8) 飞机着陆后做匀减速运动，初速度是 60 米/秒，加速度是 6.0 米/秒²。飞机着陆后要滑行多远才能停下来？

(9) 一辆卡车，它急刹车时的加速度的大小是 5.0 米/秒²。如果要求它在急刹车后 22.5 米内必须停下，它的行驶速度不能超过多少千米/时？

(10) 从长 3.0 米的斜面顶端由静止滚下来的小球，末速度是 2.5 米/秒，求小球滚动所用的时间。

八、自由落体运动

自由落体运动 物体下落的运动是一种常见的运动。挂在线上的重物，如果把线剪断，它就在重力的作用下沿着竖直方向下落。从手中释放的石块，在重力的作用下也沿着竖直方向下落。显然，物体下落的运动是直线运动。

不同物体下落的快慢是否相同呢？

在同一高度同时释放面积相等的一金属片和一张纸片，可以看到金属片比纸片下落得快。从这里似乎可以得到结论：物体下落的快慢是由它们所受重力的大小决定的，物体越重，下落得越快。16世纪以前，许多学者就是这样看的。其实，这个结论是错误的，它没有考虑空气阻力的影响。纸片比金属片轻，空气阻力对它的影响比较大，所以才下落得慢。把纸片团成一个小纸团，再让它和金属片同时下落，由于纸团受到的空气阻力要比纸片受到的空气阻力小得多，纸团和金属片几乎是同时落地的。

拿一个长约 1.5 米，一端封闭，另一端有开关的玻璃筒（图 4-25），把形状和质量都不同的一些物体，如金属片、小羽毛、小软木塞、小玻璃球等，放到这个玻璃筒里。如果玻璃筒里有空气，把玻璃筒倒立过来以后，这些物体下落的快慢不同。如果把玻璃筒里的空气抽出去，再把玻璃筒倒立过来，这些物体下落的快慢就相同了。

物体只在重力作用下从静止开始下落的运动，叫做自由落体运动。这种运动只有在没有空气的空间里才能发生。在有空气的空间里，如果空气阻力的作用比较小，可以忽略不计，物体的下落也可以看做自由落体运动。

图 4-26 是自由落体（小球）的频闪照相的照片，照片上相邻的像是相隔同样的时间拍摄的。从照片上可以看出，在相等的时间间隔里，小球下落的位移越来越大，表明小球的速度越来越大，即小球是在做加速运动。

伽利略仔细研究过物体下落的运动以后指出：自由落体运动是初速度为零的匀加速运动。

自由落体加速度 在同一地点，从同一高度同时下落的物体同时到达地面。这就是说，这些初速度为零的匀加速运动，在相同的时间里发生了相等的位移，所以它们的加速度必定相同。

在同一地点，一切物体在自由落体运动中的加速度都相同。这个加速度叫做自由落体加速度，也叫做重力加速度，通常用 g 来表示。

重力加速度 g 的方向总是竖直向下的，它的大小可以用实验的方法来测定。

重力加速度的数值 (米/秒²)

标准值： $g = 9.80665$ 米/秒²

地 点	纬 度	重力加速度
赤 道	0 °	9.780
广 州	23 ° 06	9.788
武 汉	30 ° 33	9.794
上 海	31 ° 12	9.794
东 京	35 ° 43	9.798
北 京	39 ° 56	9.801
纽 约	40 ° 40	9.803
莫 斯 科	55 ° 45	9.816
北 极	90 °	9.832

精确的实验发现，在地球上不同的地方， g 的大小是不同的。在赤道 $g = 9.780$ 米/秒²，在北京 $g = 9.801$ 米/秒²。在通常的计算中，可以把 g 取做 9.8 米/秒²。在粗略的计算中，还可以把 g 取做 10 米/秒²。

由于自由落体运动是初速度为零的匀加速运动，所以匀变速运动的基本公式以及它们的推论都适用于自由落体运动，只要把这些公式中的 v_0 取作零，并且用 g 来代替加速度 a 就行了。

· 小实验 ·

测定反应时间

战士、司机、飞行员、运动员都需要反应灵敏，当发现某种情况时，能及时采取相应行动，战胜对手，或避免危险。人从发现情况到采取相应行动经过的时间叫反应时间。这里向你介绍一种测定反应时间的方法。

请一位同学用两个手指捏住木尺顶端（图 4-27），你用一只手在木尺下部作握住木尺的准备，但手的任何部位都不要碰到木尺。当看到那位同学放开手时，你立即握住木尺。测出木尺降落的高度，根据自由落体运动的知识，可以算出你的反应时间。

练习八

(1) 为了测出井口到井里水面的深度，让一个小石块从井口落下，经过 2.0 秒后听到石块落到水面的声音。求井口到水面的大约深度（不考虑声音传播所用的时间）。

(2) 一个自由下落的物体，到达地面的速度是 39.2 米/秒。这个物体是从多高落下的？落到地面用了多长时间？

(3) 一个物体从 22.5 米高的地方下落，到达地面时的速度是多大？下落最后 1 秒内的位移是多大？

(4) 上页右侧这则剪报（1991 年 5 月 11 日《北京晚报》），报导了一位青年奋勇接住一个从 15 层高楼窗口跌出的孩子的动人事迹。设每层楼

高度是 2.8 米，这位青年从他所在的地方冲到楼窗下需要的时间是 1.3 秒，请你估算一下他要接住孩子，至多允许他有多长的反应时间？

九、专题 研究自由落体运动

一、伽利略的研究

巧妙的推理 古代的学者们认为,物体下落的快慢是由它们所受重力的大小决定的,物体越重,下落得越快。生活在公元前四世纪的希腊哲学家亚里士多德最早阐述了这种看法。亚里士多德的论断影响深远,在其后两千多年的时间里,人们一直信奉他的学说。

但是这种从表面上的观察得出的结论实际上是错误的。伟大的物理学家伽利略(图 4-28)用简单明了的科学推理,巧妙地揭示了亚里士多德的理论内部包含的矛盾。他在 1638 年写的《两种新科学的对话》一书中指出:根据亚里士多德的论断,一块大石头的下落速度要比一块小石头的下落速度大。假定大石头的下落速度为 8,小石头的下落速度为 4,当我们将两块石头拴在一起时,下落快的会被下落慢的拖着而减慢,下落慢的会被下落快的拖着而加快,结果整个系统的下落速度应该小于 8。但是两块石头拴在一起,加起来比大石头还要重,因此重物比轻物体的下落速度要小。这样,就从重物比轻物体下落得快的假设,推出了重物比轻物体下落得慢的结论。亚里士多德的理论陷入了自相矛盾的境地。伽利略由此推断重物不会比轻物体下落得快。

提出假说 伽利略认为,自由落体是一种最简单的变速运动。他设想,最简单的变速运动的速度应该是均匀变化的。但是,速度的变化怎样才算均匀呢?他考虑了两种可能:一种是速度的变化对时间来说是均匀的,即经过相等的时间,速度的变化相等;另一种是速度的变化对位移来说是均匀的,即经过相等的位移,速度的变化相等。伽利略假设第一种方式最简单,并把这种运动叫做匀变速运动。

数学推理 在伽利略的时代,技术不够发达,通过直接测定瞬时速度来验证一个物体是否做匀变速运动,是不可能的。但是,伽利略应用数学推理得出结论:做初速度为零的匀变速运动的物体通过的位移与所用时间的平方成正比,即 $s \propto t^2$ 。这样,只要测出做变速运动的物体通过不同位移所用的时间,就可以验证这个物体是否在做匀变速运动。

伽利略是怎样推出 $s \propto t^2$ 的呢?他的思路大致如下:先由平均速度 $\bar{v} = \frac{s}{t}$ 得出 $s = \bar{v}t$ 。他推断初速度为零、末速度为 v 的匀变速运动的平均速度 $\bar{v} = \frac{1}{2}v$, 然后应用这个关系得出 $s = \frac{1}{2}vt$ 。再应用 $a = \frac{v}{t}$ 从上式消去 v , 就导出 $s = \frac{1}{2}at^2$, 即 $s \propto t^2$ 。

实验验证 自由落体下落的时间太短,当时用实验直接验证自由落体是匀加速运动仍有困难,伽利略采用了间接验证的方法。他让一个铜球从阻力很小的斜面上滚下,做了上百次的实验。小球在斜面上运动的加速度要比它竖直下落时的加速度小得多,所以时间容易测量些。

实验结果表明,光滑斜面的倾角保持不变,从不同位置让小球滚下(图 4-29),小球通过的位移跟所用时间的平方之比是不变的,即

$\frac{s_1}{t_1^2} = \frac{s_2}{t_2^2} = \frac{s_3}{t_3^2} = \dots\dots$ 。由此证明了小球沿光滑斜面向下的运动是匀变速直

线运动。换用不同质量的小球重复上述实验，位移跟所用时间平方的比值仍不变，这说明不同质量的小球沿同一倾角的斜面所做的匀变速直线运动的情况是相同的。

不断增大斜面的倾角，重复上述实验，得出 s/t^2 的值随斜面倾角的增加而增大。这说明小球做匀变速运动的加速度随斜面倾角的增大而变大。

合理外推 伽利略将上述结果做了合理的外推，把结论外推到斜面倾角增大到 90° 的情况，这时小球将自由下落，成为自由落体。伽利略认为，这时小球仍然会保持匀变速运动的性质。这种从斜面运动到落体运动的外推，是很巧妙的。不过，用外推法得出的结论，并不一定都是正确的。现代物理研究中也常用外推法，但用这种方法得到的结论都要经过实验的验证才能得到承认。

伽利略对自由落体的研究，开创了研究自然规律的科学方法，这就是抽象思维、数学推导和科学实验相结合的方法。这种方法对于后来的科学研究具有重大的启蒙作用，至今仍不失为重要的科学方法之一。

有可能的话，你不妨重复一下伽利略做过的斜面实验。这里的关键是准确测量时间，你有什么好方法吗？

今天，距离伽利略的时代已有三百多年了。伽利略无法直接用实验来证实的结论，我们已经可以直接用实验来证实了。

二、用频闪照相研究

在介绍这种方法之前，我们要运用已经学过的匀变速运动的规律推出一个结论：

以加速度 a 做匀变速运动的物体，在各个连续相等的时间 t 内的位移分别是 s_1 、 s_2 、 s_3 、 s_4 …… s_n ，则

$$s = s_2 - s_1 = s_3 - s_2 = \dots\dots = s_n - s_{n-1} = at^2。$$

请你自己推证一下。

证明过后，请看图 4-26，它是每隔相等的时间拍摄一次而得到的自由落体的照片。由这张照片可以测出小球在各个连续相等时间里的位移，小球最初几个位置比较密集，测量起来误差比较大，可以从某个稍大些的位置间隔开始测量（想一想怎样才能测得更准确一些）。自由落体的速度是连续变化的，根据测量结果，在误差范围之内，如果各相邻的位移之差都相等，就可以验证自由落体运动是匀加速运动了。

如果再记下每次拍摄的时间间隔，根据上面推出的结论，还可以从测量的结果算出重力加速度的大小。当然，这并不十分精确。

间隔编号	间隔的长度 s (厘米)	后一间隔的长度减去前一间隔的长度 s (厘米)
1	7.70	
2	8.75	
3	9.80	
4	10.85	
5	11.99	
6	13.09	
7	14.18	
8	15.22	
9	16.31	
10	17.45	
11	18.52	

上面是一组测量的数据，时间间隔是 $1/30$ 秒，第一列是间隔编号，第二列是间隔的长度，即小球在各个 $1/30$ 秒内的位移，第三列数据请你自己计算一下。由这些数据你能得出自由落体运动是匀变速直线运动的结论吗？由这些数据算出的重力加速度的数值是多大？

上面介绍了用频闪照相研究自由落体运动的原理，如果有条件，希望你实际做一做，定会有所收获。

本章小结

这一章我们学习了描述物体运动的几个物理量即位移、速度和加速度，以及匀变速直线运动的规律。还学习了用图象来描述物体的运动，认识了位移图象和速度图象。同一概念和规律可以有不同的表达方式——文字表述，公式表达，图象表达。对不同的表达方式要有统一的理解。

在学习物理知识的同时，还应当十分注意学习物理学研究问题的思想和方法，在一定意义上说，后一点甚至是更重要的。在总结知识的同时，也要注意对方法的总结和积累。伟大的物理学家伽利略的研究方法对于后来的科学研究具有重大的启蒙作用，至今仍然有效。

(1) 什么叫参考系？研究物体的运动，为什么一定要选定参考系？

(2) 什么情况下可以把物体看成质点，什么情况下不能？举例说明。除了质点这一理想化模型，你还学过什么理想化模型？

(3) 物理学中用什么物理量描述质点的位置变动？什么是位移，怎样表示位移？位移和路程有什么区别？在什么情况下位移的大小等于路程？

(4) 从位移和时间的关系来看，直线运动可以分成哪两类运动？什么叫匀速直线运动，什么叫变速直线运动？

(5) 物理学中用什么物理量描述运动的快慢？什么是变速直线运动的平均速度和瞬时速度？为什么测量平均速度的时间足够短，得出的平均速度就可以看作是瞬时速度？

(6) 瞬时速度恒定的直线运动是什么运动？瞬时速度随时间而改变的直线运动是什么运动？从速度改变和时间的关系来看，可以把变速直线运

动分成哪两类运动？什么叫匀变速直线运动？

(7) 物理学中用什么物理量描述速度改变的快慢？什么是加速度？加速度跟速度、速度改变量的区别和联系是怎样的？举出具体例子来说明。

加速度恒定的直线运动是什么运动？

(8) 匀变速直线运动的速度公式和位移公式是什么？除了这两个基本公式，还常用什么公式？它们是怎样从基本公式推导出来的？

已知物体的初位置和初速度，又知道加速度，能不能确定做匀变速直线运动的物体在任一时刻的位置和速度？

(9) 我们是用什么方法推导出匀变速直线运动位移公式的？学习了这一推导，你有什么体会？自己独立推导一下。

(10) 什么是位移图象？匀速直线运动的位移图象是一条什么图线？从位移图象你能获得哪些信息？自己总结一下。

什么是速度图象？匀速直线运动和匀变速直线运动的速度图象各是一条什么样的图线？从速度图象你能获得哪些信息？自己总结一下。

(11) 什么是自由落体运动？它的特点是什么？它的加速度 g 是多大，方向如何？怎样求出自由落体运动的下落速度和下落距离？

(12) 伽利略是怎样研究自由落体运动的？你从中有何体会？你自己设计一种研究自由落体运动的实验，并且实际做一做。

习 题

A 组

(1) 关于质点，下列各说法是否正确？

- A. 质点一定是一个很小的物体。
- B. 质点一定是一个小球。
- C. 只有小物体才能被看做是质点。
- D. 无论大物体还是小物体，在机械运动中一律看作质点。

(2) 关于位移和路程，下列 4 位同学的说法是否正确？

同学甲：位移和路程在大小上总相等，只是位移有方向，是矢量，路程无方向，是标量。

同学乙：位移用来描述直线运动，路程用来描述曲线运动。

同学丙：位移是矢量，它取决于物体的始末位置；路程是标量，它取决于物体实际通过的路线。

同学丁：其实，位移和路程是一回事。

(3) 一位同学根据车轮通过两段铁轨交接处时发出的响声来估测火车的速度。他从车轮的某一次响声开始计时，并同时数车轮响声的次数，他在 45 秒内共听到 63 次响声。已知每段铁轨长 12.5 米。根据这些数据，你能估测出火车的速度是多少千米/时吗？(这也是铁路员工常用来估测火车在这种铁轨上行驶速度的一种方法。)

(4) 图 4-30 是两辆汽车由同一地点到达同一目的地的 $s-t$ 图象。试回答下列问题：

- a. 两辆车是否同时出发，同时到达？

b. 哪辆车在中途停了一段时间？

c. 两辆车各做什么样的运动？

(5) 关于速度和加速度的关系，以下说法正确的是什么？

A. 物体在某时刻的速度为零，则加速度也一定为零。

B. 物体的速度越大，则加速度也越大。

C. 物体的速度变化越大，则加速度越大。

D. 物体加速度的方向，就是物体速度的方向。

E. 物体加速度的方向，就是物体速度改变量的方向。

(6) 一辆汽车，以 36 千米/时的速度匀速行驶 10 秒，然后以 1.0 米/秒²的加速度匀加速行驶 10 秒，汽车在这 20 秒内的位移多大？平均速度多大？汽车在加速的 10 秒内平均速度多大？

(7) 一辆汽车沿直路从甲站开往乙站，起动时加速度为 2 米/秒²，加速行驶 5 秒，后匀速行驶 2 分钟，然后刹车，滑行 50 米，正好到达乙站。求甲、乙两站的距离和汽车从甲站到乙站所用的时间。

(8) 图 4 - 31 为某汽车直线运动的 图线。从图中可以看出汽车的初速度、末速度各是多大？汽车在 50 秒内各段时间的运动情况如何？汽车在前 10 秒内的位移是多大？在 50 秒时间内总位移是多大？

(9) 在研究匀变速直线运动规律的实验中，小车拖着纸带运动，50 次/秒的打点计时器打出的纸带如图 4 - 32 所示。选出 A、B、C、D、E 共 5 个记数点，每相邻两点间还有 4 个实验点（图中未画出）。以 A 为起点量出到各点的位移也标在图上。求：

a. AE 段的平均速度 \bar{v} 。

b. C 点的瞬时速度 v_c 。

c. 小车运动的加速度 a 。

(10) 一空罐头盒从某楼层自由落下，所用时间为 2.0 秒。求罐头盒到达地面的速度以及该楼层的高度。（ g 取 10 米/秒²）

B 组

(1) 关于速度和加速度的关系，以下说法正确的是什么？

A. 物体的速度不变，则加速度为零。

B. 物体的速度增加，则加速度一定增加。

C. 物体的加速度减小，则速度一定减小。

D. 物体运动时，可以速度改变而加速度不变。

E. 物体运动时，可以加速度改变而速度不变。

(2) 以 10 米/秒的速度行驶的汽车，紧急刹车后加速度的大小是 6.0 米/秒²，求刹车后 4.0 秒内的位移。想一想答案是否合理，为什么？

(3) 子弹在射中墙壁时的速度是 400 米/秒，射进墙壁的深度是 20 厘米，子弹在墙壁内的运动可以当作匀减速运动。求子弹在墙壁内的运动时间和加速度。

(4) 由于扳道工的失误，有两列同样的客车各以 72 千米/时的速度在同一条铁路上面对面地向对方驶去。已知这种列车刹车时能产生的最大加速度为 -0.4 米/秒²，为了避免这场车祸的发生，双方司机至少要在两列

车相距多远时同时刹车？

(5) 物体沿直线从 A 到 B 做匀变速运动 (图 4-33)。已知它在 A 点速度为 v_A ，到 B 点速度为 v_B ，C 点是物体在这段时间的中间时刻到达的点，D 点是 AB 间的中点，求 v_C 和 v_D 。

(6) 甲乙两物体同时同地出发沿同向运动，它们的速度图线如图 4-34 所示。两物体何时、何地相遇？

(7) 一个物体从 45 米高的地方自由落下。在下落的最后 1 秒内的位移是多大？

(8) 已知一物体做匀加速运动，加速度为 a 。试证明在一段时间 t 内的平均速度等于该段时间中点 $\frac{t}{2}$ 时刻的瞬时速度。

提示：该段时间 t 内物体发生的位移 $s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$ ，该段时间内的平均速度 $\bar{v} = \frac{s}{t}$ 。

(9) 一个物体从塔顶上下落，在到达地面前最后 1 秒内的位移是整个位移的 $\frac{9}{25}$ 。求塔高。

提示：整个位移 $s = \frac{1}{2} g t^2$ 。物体下落后 $t - 1$ 秒内的位移是 $s' = \frac{1}{2} g (t - 1)^2$ 。最后 1 秒内的位移是 $s - s'$ 。

第五章 牛顿运动定律

前一章学习了怎样描述物体的运动，但是没有进一步讨论物体为什么做这种或那种运动。要讨论这个问题，必须知道运动和力的关系。在力学中，只研究物体怎样运动而不涉及运动和力的关系的分科，叫做运动学；研究运动和力的关系的分科，叫做动力学。

动力学的知识在生产和科学研究中是很重要的。设计各种机器，控制交通工具的速度，研究天体的运动，计算人造卫星的轨道等等，都离不开动力学的知识。

动力学的奠基人是英国科学家牛顿。牛顿在 1687 年出版了他的名著《自然哲学的数学原理》。在这部著作中，牛顿提出了三条运动定律，这三条定律总称为牛顿运动定律，是整个动力学的基础。这一章学习的就是牛顿运动定律。

图 5-1 是牛顿和他写的著名的《自然哲学的数学原理》一书的扉页。我们即将学习的运动定律在此书中首次发表。

一、牛顿第一定律

历史的回顾 远在两千多年以前,人们已经提出了运动和力的关系问题。可是直到伽利略和牛顿(1643~1727)时代,才对这个问题给出了正确的答案。

在17世纪以前,人们普遍认为力是维持物体运动的原因。用力推车,车子才前进,停止用力,车子就要停下来。古希腊的哲学家亚里士多德(公元前384~前322)根据这类经验事实得出结论说:必须有力作用在物体上,物体才能运动,没有力的作用,物体就要静止下来。

在亚里士多德以后的两千年内,动力学一直没有多大进展,直到17世纪,意大利的著名物理学家伽利略才根据实验指出,在水平面上运动的物体所以会停下来,是因为受到摩擦阻力的缘故。设想没有摩擦,一旦物体具有某一速度,物体将保持这个速度继续运动下去。

我们可以用实验近似地验证上述结论。把物体放在一个水平导轨上,并设法使物体和导轨之间形成气层,物体沿这种气垫导轨运动时摩擦很小,推动一下物体,可以看到物体沿气垫导轨的运动很接近匀速直线运动。

伽利略还根据下面的理想实验进行推论。如图5-2甲所示,让小球沿一个斜面从静止滚下来,小球将滚上另一个斜面。如果没有摩擦,小球将上升到原来的高度。他推论说,如果减小第二个斜面的倾角(图5-2乙),小球在这个斜面上达到原来的高度就要通过更长的路程。继续减小第二个斜面的倾角,使它最终成为水平面(图5-2丙),小球就再也达不到原来的高度,而要沿着水平面以恒定速度持续运动下去。

伽利略的理想实验,虽然是想象中的实验,但它是建立在可靠的事实基础之上的。伽利略把经验事实和抽象思维结合起来,这正是他的工作的卓越之处。由于伽利略细心地研究了理想实验,才使他对动力学作出了重大贡献。这类理想实验以可靠的事实为基础,经过抽象思维,抓住主要因素,忽略次要因素,从而更深刻地揭示了自然规律。这种把可靠的事实和深刻的理论思维结合起来的理想实验,是科学研究中的一种重要方法。

与伽利略同时代的法国科学家笛卡儿(1596~1650)进一步补充和完善了伽利略的论点,他认为:如果没有其他原因,运动的物体将继续以同一速度沿着一条直线运动,既不会停下来,也不会偏离原来的方向。笛卡儿为发展动力学又迈出了重要一步。

牛顿第一定律 牛顿在伽利略等人的研究基础上,并根据他自己的研究,系统地总结了力学的知识,提出了三条运动定律,其中第一条定律的内容是:

一切物体总保持匀速直线运动状态或静止状态,直到有外力迫使它改变这种状态为止。

这就是牛顿第一定律。物体的这种保持原来的匀速直线运动状态或静止状态的性质叫做惯性。牛顿第一定律又叫做惯性定律。

当汽车突然开动的时候,汽车里的乘客会向后面倾倒(图5-3甲)。这是因为汽车已经开始前进,乘客的下半身随车前进,而上半身由于惯性还要保持静止状态的缘故。当汽车突然停止的时候,汽车里的乘客会向前

面倾倒（图 5-3 乙）。这是因为汽车已经停止，乘客的下半身随车停止，而上半身由于惯性还要以原来速度前进的缘故。一切物体都具有惯性。惯性是物体的固有性质，物体的运动并不需要力来维持。

被踢出的冰块，在摩擦力可以忽略的冰面上匀速滑动，冰块受不受向前的作用力？

任何物体都和周围的物体有相互作用，不受外力作用的物体是不存在的，所以牛顿第一定律所描述的物体不受外力的状态是一种理想的状态。这种理想化状态虽然不能实现，但牛顿第一定律却正确揭示了运动和力的关系：力不是维持物体速度的原因，而是改变物体速度的原因。这就使人们的认识走上正确道路，为力学的发展奠定了坚实的基础。

· 阅读 ·

爱因斯坦谈伽利略的贡献

有一个基本问题，几千年来都因为它太复杂而含糊不清，这就是运动的问题。……设想有一个静止的物体，没有任何运动。要改变这样一个物体的位置，必须使它受力，如推它，提它，或由其他的物体如马、蒸汽机作用于它。我们的直觉认为运动是与推、提、拉等动作相连的。多次的经验使我们进一步深信，要使一个物体运动得愈快，必须用更大的力推它。结论好像是很自然的：对一个物体的作用愈强，它的速度就愈大。一辆四匹马驾的车比一辆两匹马驾的车运动得快一些。这样，直觉告诉我们，速率主要是跟作用有关。

……

伽利略的发现以及他所应用的科学的推理方法是人类思想史上最伟大的成就之一，而且标志着物理学的真正开端。这个发现告诉我们，根据直接观察所得出的直觉的结论不是常常可靠的，因为它们有时会引到错误的线索上去。

但是直觉错在哪里呢？说一辆四匹马驾的车比一辆两匹马驾的车走得快些难道还会有错吗？

……

假如有人推着一辆小车在平路上行走，然后突然停止推那辆小车。小车不会立刻静止，它还会继续运动一段很短的距离。我们问：怎样才能增加这段距离呢？这有许多办法，例如在车轮上涂油，把路修得很平滑等。车轮转动得愈容易、路愈平滑，车便可以继续运动得愈远。但是在车轮上涂油和把路修平有什么作用呢？只有一种作用：外部的影响减小了，即车轮里以及车轮与路之间的那种所谓摩擦力的影响减小了。……假想路是绝对平滑的，而车轮也毫无摩擦，那么就没有什么东西阻止小车，而它就会永远运动下去。这个结论是从一个理想实验中得来的，而这个实验实际上是永远无法做到的，因为不可能把所有的外界影响都消除掉。这个理想实验指出了真正建立运动的力学基础的线索。

比较一下对待这个问题的两种方法，我们可以说，根据直觉的观念是

这样的：作用愈大，速度便愈大，因此速度本身表明着有没有外力作用于物体之上。伽利略所发现的新线索是：一个物体，假如既没有人去推它、拉它，也没有人用旁的方法去作用于它，或者简单些说，假如没有外力作用于它，此物体将均匀地运动，即沿一直线永远以同样速度运动下去。因此，速度本身并不表明有没有外力作用于物体上。伽利略这个正确的结论隔了一代以后由牛顿把它写成惯性定律。

……

人的思维创造出一直在改变的一个宇宙图景。伽利略对科学的贡献就在于毁灭直觉的观点而用新的观点来代替它。这就是伽利略的发现的重大意义。

——摘自 A·爱因斯坦，L·英费尔德著：《物理学的进化》。这里的标题是编者加的。

练习一

(1) 一个球以 20 厘米/秒的速度运动着，如果受到的外力等于零，5 秒钟后它的速度将是多大？

(2) 一列匀速行驶的火车，在车厢的水平桌面上放着一个小球。当火车突然加速时，车厢里的人会看到小球运动吗？如果会看到，小球是向哪个方向动？当火车突然减速时，又会看到什么现象？

(3) 回答下列问题：

a. 运动员冲到终点后，为什么不能马上停住还要向前跑一段距离？

b. 在自行车紧急刹车后，轮子不转了，车子为什么还会向前滑动？

c. 锤头松动的时候，为什么把锤子倒立，把锤柄末端向石头上磕一磕，锤头就安牢了？

d. 地球从西向东转，为什么我们向上跳起来以后还落到原地，而不落到原地的西边？

(4) 我国公安交通管理部门规定，从 1993 年 7 月 1 日起，在各种小轿车前排乘坐的人（包括司机）必须系好安全带。为什么要这样规定？请从物理学的角度定性地加以说明。

(5) 请分别举出几个利用惯性和防止惯性不利影响的实例。你能不能把惯性应用到某一实际问题中去？

二、加速度和力的关系

力是使物体产生加速度的原因 牛顿第一定律告诉我们，物体如果没有受到外力作用，它的速度的大小和方向都保持不变，我们就说，物体的运动状态没有发生改变。如果物体的速度发生了变化，无论是速度大小改变，方向改变，或是大小、方向都改变，物体的运动状态就发生了改变。怎样才能使物体的运动状态发生改变呢？

列车出站时，由于受到机车牵引力的作用，由静止开始运动，并且速度不断增大；列车进站时，由于受到阻力的作用，速度不断减小，最后停下来。抛出的手榴弹，射出的炮弹，由于受到重力的作用，速度的大小和方向都不断的炮弹，由于受到重力的作用，速度的大小和方向都不断改变而做曲线运动。可见，物体的运动状态发生改变，一定是受到外力作用的结果，力是物体运动状态发生改变的原因。物体的运动状态发生改变时，速度的大小和方向发生改变，有了加速度。由此得到结论：力是使物体产生加速度的原因。

加速度和力的关系 既然力是产生加速度的原因，那么，加速度和力存在着什么关系呢？

取两个质量相同的小车，放在光滑的平面上（图 5-4）。小车的前端各系上细绳，绳的另一端跨过定滑轮各挂一个小盘，盘里分别放着数目不等的砝码，使两辆小车在不同的拉力下做匀加速运动。小车所受的水平拉力 F 的大小可以认为等于砝码（包括砝码盘）所受重力的大小。小车的后端也分别系上细绳，用一只夹子夹住这两根细绳，以同时控制两辆小车，使它们同时开始运动和停止运动。

利用这一装置，我们来研究质量相同的小车在不同的恒定拉力作用下，它们的加速度是怎样的。打开夹子，让两辆小车同时从静止开始做匀加速运动。小车走过一段距离以后，关上夹子，让它们同时停下来。在打开和关闭夹子这段时间里，两辆小车发生的位移不同，所受拉力大的那辆小车，

位移大。从公式 $s = \frac{1}{2}at^2$ 知道，在时间相同的情况下，位移和加速度成正比，比较小车的位移就可以比较它们的加速度。实验的结果是，小车的位移与它们所受的拉力成正比。研究表明：对质量相同的物体来说，物体的加速度跟作用在它上面的力成正比。用数学公式表示就是

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{F_1}{F_2} \quad \text{或者} \quad a \propto F。$$

一个物体受到 4 牛的力，产生的加速度是 2 米/秒²。要使它产生 3 米/秒² 的加速度，需要施加多大的力？

这个结论告诉我们，要使物体在短时间内得到很大的速度，即加速度很大，就必须提供很大的作用力。比如，竞赛用的小汽车，要求在起动后几秒钟内速度由零达到 60 米/秒以上，它们都装备功率很大的发动机，以提供大的牵引力。巨型喷气客机要求在起动后短时间内速度达到 800 ~ 900 千米/时，它们起飞的推力需达到几十万牛。

三、加速度和质量的关系

加速度和质量的关系 物体运动状态的改变，不但跟物体所受的外力有关，而且跟物体本身的性质有关。一辆空车和一辆装满货物的车，在相同牵引力的作用下，空车用较短的时间可以达到某一速度，装满货物的车要较长的时间才能达到相同的速度。空车的质量小，产生的加速度大；装满货物的车质量大，产生的加速度小。那么，外力一定时，加速度和质量又存在着什么关系呢？

还用上一节的实验装置，这次在两个盘里放上相同数目的砝码，使两辆小车所受的拉力相同，而在一辆小车上加放砝码以增大它的质量。重做上面的实验，我们看到，在相同的时间里，质量小的那辆小车的位移大。测出位移和质量，我们发现，小车通过的位移与它们的质量成反比。研究表明：在相同的力作用下，加速度跟质量成反比。用数学公式表示就是

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1} \quad \text{或者} \quad a \propto \frac{1}{m}。$$

甲、乙两辆实验小车，在同样的外力作用下，甲车产生的加速度是 1.5 米/秒^2 ，乙车产生的加速度是 4.5 米/秒^2 。甲车的质量 $m_{\text{甲}}$ 是乙车的质量 $m_{\text{乙}}$ 的几倍？

质量是物体惯性大小的量度 在相同的力作用下，质量不同的物体，产生的加速度不同，这说明，质量不同的物体，运动状态的改变的难易程度并不相同，或者说它们的惯性的大小并不相同。在外力相同的情况下，质量大的物体得到的加速度小，它的运动状态难改变，惯性大；质量小的物体得到的加速度大，它的运动状态容易改变，惯性小。这样，我们看到质量在动力学中所起的作用：质量越大，物体的惯性就越大。质量是物体惯性大小的量度。

惯性的大小在实际中是经常要加以考虑的。当我们要求物体的运动状态容易改变时，应该尽可能减小物体的质量。歼击机的质量比运输机、轰炸机小得多，在战斗前还要抛掉副油箱（图 5-5），以进一步减小质量，就是为了提高歼击机的灵活性。相反，当我们要求物体的运动状态不易改变时，应该尽可能增大物体的质量。电动抽水站的电动机和水泵都固定在很重的机座上，就是要增大它们的质量，以尽量减小它们的振动或避免因意外的碰撞而移动。

思考与讨论

有同学说：“力使物体的运动状态发生了改变，可见，力的作用使物体失去了惯性。”你怎样看这个问题？

四、牛顿第二定律

根据上面的研究，我们对力、质量和加速度的关系得到下述结论：

物体的加速度跟作用力成正比，跟物体的质量成反比。这就是牛顿第二定律。

加速度和力都是矢量，它们都是有方向的。牛顿第二定律不但确定了加速度和力的大小之间的关系，还确定了它们的方向之间的关系：加速度的方向跟引起这个加速度的力的方向相同。

牛顿第二定律也可以用数学公式来表示，这就是

$$a = \frac{F}{m},$$

或者

$$F = ma.$$

上式可改写成等式 $F=ka$ 。式中的 k 是比例常数。如果公式中的物理量选择合适的单位，可以使 $k=1$ ，从而使公式简化。我们在前面已经讲过，在国际单位制中力的单位是牛顿。其实，牛顿这个单位就是根据牛顿第二定律定义的：使质量是 1 千克的物体产生 1 米/秒²加速度的力，叫做 1 牛顿。即

$$1 \text{ 牛} = 1 \text{ 千克} \cdot \text{米/秒}^2.$$

可见，如果都用国际制的单位，则上式中的 $k=1$ ，上式简化成

$$F = ma.$$

这就是牛顿第二定律的公式。

如果物体只受重力 G 作用，产生的加速度就是重力加速度 g 。请你证明 $g=9.8$ 牛/千克 $=9.8$ 米/秒²。

上面讲的是物体受到一个力作用的情况。物体受到几个力作用时，牛顿第二定律公式中的 F 表示外力的合力。牛顿第二定律的更一般的表述是：

物体的加速度跟所受的外力的合力成正比，跟物体的质量成反比，加速度的方向跟合外力的方向相同。写成公式就是

$$F_{\text{合}} = ma.$$

牛顿第二定律说明：只有物体受到外力作用，物体才具有加速度。外力恒定不变时，加速度也恒定不变；外力随着时间改变的时候，加速度也随着时间改变。在某一时刻，外力停止作用，加速度随即消失，物体由于具有惯性，将保持该时刻的运动状态不再改变。

质量是 2.0 千克的物体，受到互成 90° 角的两个力的作用，这两个力都是 14 牛，这个物体产生的加速度的大小和方向各如何？

当物体受到几个力作用时，每个力各自独立地使物体产生一个加速度，就如同其他力不存在一样。物体受几个力共同作用时产生的加速度，等于每个力单独作用时产生的加速度的矢量和（图 5-6）。这叫做力的独立作用原理。

根据这个原理，我们用牛顿第二定律处理物体在一个平面内运动的问题时，可以把物体所受的各力分解在两个相互垂直的方向上，在这两个方向上分别列出牛顿第二定

律方程，这样会给问题的解决带来方便。

练习二

(1) 下面的哪些说法不对，为什么不对？

A. 物体受到的合外力越大，加速度越大。

B. 物体受到的合外力越大，速度越大。

C. 物体速度越小，表示所受合外力越小。

D. 物体在外力作用下做加速直线运动，当合外力逐渐减小时，物体的速度逐渐减小。

(2) 一个物体在两个彼此平衡的力作用下处于静止状态。现将其中一个力逐渐减小到零，而保持另一个力不变，这个物体的加速度和速度的大小如何变化？如果再将这个力恢复，这个物体的加速度和速度的大小又如何变化？

(3) 从牛顿第二定律知道，无论怎样小的力都可以使物体产生加速度，可是我们用力提一个很重的物体时，却提不动它。这跟牛顿第二定律有无矛盾？为什么？

(4) 北京地区的重力加速度 $g=9.801$ 米/秒²，广州地区的重力加速度 $g=9.788$ 米/秒²，试求质量为 1.000 千克的物体，在北京和广州所受的重力各是多少牛。

(5) 质量是 1.0 千克的物体受到互成 120° 角的两个力的作用，这两个力都是 10 牛，这个物体产生的加速度是多大？

五、牛顿第三定律

力是物体间的相互作用 力是物体对物体的作用，只要有力发生，就一定要有受力物体和施力物体。施力物体是不是也要受到受力物体给予它的力呢？力是物体间的单方面作用，还是物体间的相互作用？

用手拉弹簧，手的肌肉收缩发生形变，同时弹簧也发生形变，这时不但弹簧受到手的拉力，手也受到弹簧的拉力。坐在椅子上用力推桌子，会感到桌子也在推我们，我们的身体要向后移。在平静的水面上，在一只船上用力推另一只船，另一只船也要推前一只船，两只船将同时向相反方向运动（图 5-7）。在水面上放两个软木塞，一个软木塞上放一个小磁铁，另一个软木塞上放一个小铁条（图 5-8）。可以看到，由于小磁铁和小铁条相互吸引，两个软木塞相向运动起来。地球和地面上物体之间的作用也是相互的，地面上的物体受到地球的吸引（重力），地球也受到地面上的物体的吸引。

观察和实验表明，两个物体之间的作用总是相互的。一个物体对另一个物体有力的作用，后一个物体一定同时对前一个物体有力的作用，力是物体与物体间的相互作用。物体间相互作用的这一对力，常常叫做作用力和反作用力。把相互作用的两个力分成为作用力和反作用力并不是绝对的。我们可以把其中一个力叫做作用力，另一个力就叫做反作用力。

有人说“施力物体同时也一定是受力物体”，这话正确吗？举例来回答。

牛顿第三定律 作用力和反作用力之间存在什么样的关系呢？

把两个弹簧秤 A 和 B 联结在一起（图 5-9）。用手拉弹簧秤 A，可以看到两个弹簧秤的指针同时移动。弹簧秤 B 的示数指出弹簧秤 A 对它的作用力 F 的大小，而弹簧秤 A 的示数指出弹簧秤 B 对它的反作用力 F' 的大小。可以看出，两个弹簧秤的示数是相等的。改变手拉弹簧的力，弹簧秤的示数也随着改变，但两个示数总相等。这说明作用力和反作用力大小相等，方向相反。

两个物体之间的作用力和反作用力总是大小相等，方向相反，作用在一条直线上。这就是牛顿第三定律。

牛顿第三定律在生活和生产中应用很广泛。人走路时用脚蹬地，脚对地面施加一个作用力，地面同时给脚一个反作用力，使人前进。轮船的螺旋桨旋转时，用力向后推水，水同时给螺旋桨一个反作用力，推动轮船前进。汽车的发动机驱动后轮转动，由于轮胎和地面间有摩擦，车轮向后推地面，地面给车轮一个向前的反作用力，使汽车前进。汽车的牵引力就是这样产生的。如果把后轮架空，不让它跟地面接触，这时让发动机驱动后轮转动，由于车轮不推地面，地面也不产生向前推车的力，汽车就不能前进。

地球的质量大约是 6×10^{24} 千克，某人的质量是 60 千克。地球对人的引力跟人对地球的引力相比，哪个力大？为什么？

练习三

(1) 用牛顿第三定律判断下列说法是否正确：

A. 人走路时，地对脚的力大于脚蹬地的力，所以人才往前走。

B. 只有你站在地上不动，你对地面压力和地面对你的支持力，才是大小相等方向相反的。

C. 物体 A 静止在物体 B 上，A 的质量是 B 质量的 100 倍，所以 A 作用于 B 的力大于 B 作用于 A 的力。

D. 以卵击石，石头没损伤而鸡蛋破了，这是因为石头对鸡蛋的作用力大于鸡蛋对石头的作用力。

(2) 在水平桌面上静止的物体受到两个力的作用。这两个力的反作用力各作用在什么物体上？在这四个力中，哪两个力是作用力和反作用力？哪两个力是相互平衡的力？

(3) 挂在竖直悬绳（或弹簧）上的物体受到两个力的作用。这两个力的反作用力各作用在什么物体上？在这四个力中，哪两个力是作用力和反作用力？哪两个力是相互平衡的力？

(4) 一个物体静止地放在水平支持物上，试证明物体对支持面的压力的大小等于物体所受重力的大小。证明的依据是什么？

(5) 把一个物体挂在弹簧秤上并保持静止，试证明物体对弹簧秤的拉力的大小等于物体所受重力的大小。证明的依据是什么？

(6) 有人认为，既然作用力和反作用力总是大小相等，方向相反，作用在一条直线上，这两个力就是相互平衡的力。这种说法对不对？如果不对，错在哪里？说明理由。

六、力学单位制

单位制 用公式 $v = \frac{s}{t}$ 来求速度，如果位移用米作单位，时间用秒作单位，求出的速度一定要用米/秒作单位。同样，用公式 $F=ma$ 来求力，如果质量用千克作单位，加速度用米/秒²作单位，求出的力一定要用牛顿作单位。

可见物理公式在确定物理量的数量关系的同时，也确定了物理量的单位关系。因此，我们可以选定几个物理量的单位作为基本单位，根据物理公式中其他物理量和这几个物理量的关系，推导出其他物理量的单位。例如选定位移的单位（米）和时间的单位（秒），利用公式 $v = \frac{s}{t}$ 可以推导出速度的单位（米/秒），再利用公式 $a = \frac{v_t - v_0}{t}$ 可以推导出加速度的单位（米/秒²）。如果再选定质量的单位（千克），利用公式 $F=ma$ 就可以推导出力的单位（千克·米/秒²，即牛顿）。这些推导出来的单位叫做导出单位。基本单位和导出单位一起组成了单位制。

在力学中，选定长度、质量和时间这三个物理量的单位作为基本单位，就可以导出其余的物理量的单位。选定这三个物理量的不同单位，可以组成不同的力学单位制。在国际单位制中，取米（长度单位）、千克（质量单位）、秒（时间单位）作为基本单位，本书基本采用这种单位制。

在力学单位制中，还有使用厘米·克·秒制的。这种单位制取厘米（长度单位）、克（质量单位）、秒（时间单位）作为基本单位。在这种单位制中，速度的单位是厘米/秒，加速度的单位是厘米/秒²，力的单位叫做达因。1达因=1克·厘米/秒²。

单位制在物理计算中的作用 掌握单位制的知识对于物理计算是很重要的。计算的时候，如果所有的已知量都用同一种单位制的单位来表示，只要正确地应用物理公式，计算的结果就总是用这个单位制中的单位来表示的。

现在用国际单位制计算一个题目：一个原来静止的物体，质量是7千克，在14牛的力作用下，物体的加速度和5秒末的速度各是多大？

利用公式 $F=ma$ 求出 a ，再用公式 $v_t=at$ 求出 v_t ：

$$a = \frac{F}{m} = \frac{14\text{牛}}{7\text{千克}} = \frac{14\text{千克} \cdot \text{米} / \text{秒}^2}{7\text{千克}} = 2\text{米} / \text{秒}^2,$$

$$v_t = at = 2\text{米} / \text{秒}^2 \times 5\text{秒} = 10\text{米} / \text{秒}。$$

我们看到，题中的已知量都用国际制单位来表示，得到的结果也是用国际制单位来表示的。既然如此，在统一已知量的单位制后，在计算过程中就不必一一写出各个量的单位，只在数字后面写出正确单位就可以了。如上面的计算可写成：

$$a = \frac{F}{m} = \frac{14}{7} \text{米} / \text{秒}^2 = 2\text{米} / \text{秒}^2。$$

$$v_t = at = 2 \times 5\text{米} / \text{秒} = 10\text{米} / \text{秒}。$$

练习四

(1) 一个原来静止的物体，质量是 600 克，在 0.2 牛的力作用下，1 秒内发生的位移是多少米？

(2) 一个质量是 100 克的运动物体，初速度是 1.0 米/秒，在 2.0 牛、方向跟速度方向相同的力作用下，3.0 秒末的速度是多大？

(3) 一辆速度为 4.0 米/秒的自行车，在水平公路上匀减速地滑行 40 米然后停止。如果自行车和人的总质量是 100 千克，自行车受到的阻力是多大？

(4) 一辆质量为 1.0 吨的汽车，经过 10 秒由静止匀加速到 108 千米/时，汽车受到的合外力是多少牛？

(5) 一辆质量是 2.0 吨的货车，在水平公路上以 15 米/秒的速度行驶。司机突然紧急刹车，使货车匀减速停下来。从刹车开始到停下来，驶过的路程是 15 米。求货车所受的制动力。

(6) 一个原来静止的物体，质量是 2.0 千克，在两个大小都是 50 牛且互成 60° 角的力作用下，3.0 秒末物体的速度是多大？3.0 秒内物体发生的位移又是多大？

· 阅读 ·

牛顿运动定律的适用范围

自从 17 世纪以来，以牛顿定律为基础的经典力学不断发展，取得了巨大的成就。经典力学在科学研究和生产技术中有广泛的应用。经典力学和天文学相结合，建立了天体力学。经典力学和工程实际相结合，建立了各种应用力学，如水力学、材料力学、结构力学等等。从行星的运动到地面上各种物体的运动；从大气的流动到地壳的变动；从设计各种机械到拦河筑坝、修建桥梁和高楼大厦；从人力车、马车的运动到汽车、火车、飞机等现代交通工具的运动；从抛出石块到发射导弹、人造卫星和航天飞机——所有这些关于宏观物体的运动问题，都服从经典力学的规律。

但是，牛顿定律和一切物理定律一样，也有它的适用范围。

处理宏观物体的低速运动（远小于光速）问题，经典力学是完全适用的。20 世纪初，著名物理学家爱因斯坦（1879~1955）建立了狭义相对论，它指出，处理接近于光速的高速运动问题，必须用相对论力学，经典力学是相对论力学在低速时良好的近似。

经典力学一般也不适用于微观粒子。19 世纪末和 20 世纪初以来，人们对物质世界的研究深入到原子内部，发现电子、质子、中子等微观粒子的运动规律一般不能用牛顿运动定律来说明。20 世纪初期，人们建立了量子力学，用来描述微观粒子的规律性。

相对论和量子力学的出现，说明人类对自然界的认识更加深入和扩展。这并不表示经典力学失去意义，而是使人们认识到经典力学有它的适用范围。经典力学只适用于解决宏观物体的低速运动问题，不能用来处理高速运动问题；经典力学只适用于宏观物体，一般不适用于微观粒子。这就是牛顿定律的适用范围。

本章小结

这一章学习了牛顿的三条运动定律，它们是力学的基础，一定要反复思考，深入地、确切地理解本章所学内容。

(1) 亚里士多德对力和运动的关系是怎样认识的？他的观点为什么是错误的？

(2) 牛顿第一定律的内容是什么？伽利略的理想实验有什么重要意义？为什么说牛顿第一定律正确地揭示了运动和力的关系？

(3) 牛顿第二定律的内容是什么？写出它的公式。当有几个力作用在物体上时，公式中的 F 表示的是什么？

(4) 学过牛顿第一和第二定律后，你对力的概念有什么进一步认识？为什么说质量是物体惯性大小的量度？

(5) 牛顿第三定律的内容是什么？为什么说作用力和反作用力不能互相平衡？

(6) 单位制在物理计算中有什么作用？

(7) 牛顿运动定律的适用范围是什么？

习 题

A 组

(1) 下列说法中正确的是：

- A. 自由下落的物体没有惯性。
- B. 竖直向上抛出的物体没有惯性。
- C. 汽车行驶时没有惯性，刹车时有惯性。
- D. 上述物体在任何情况下都有惯性。

(2) 关于惯性的大小，下列说法中正确的是：

- A. 两个质量相同的物体，在阻力相同的情况下，速度大的不容易停下来，所以速度大的物体惯性大。
- B. 上面两个物体既然质量相同，那么惯性就一定相同。
- C. 推动地面上静止的物体比维持这个物体做匀速运动所需的力大，所以静止的物体惯性大。
- D. 在月球上举重比在地球上容易，所以同一个物体在月球上比在地球上惯性小。

(3) 关于物体运动状态与所受外力的关系，下列说法中正确的是：

- A. 物体受到恒定外力作用时，它的运动状态一定不变。
- B. 物体受到的合外力不为零时，一定做变速运动。
- C. 物体受到的合外力为零时，一定处于静止状态。
- D. 物体的运动方向就是物体受到的合外力的方向。

(4) 5.0×10^{-4} 千克的雨滴，在无风的天气在空气中竖直落下，由于受到空气阻力，最后它达到一个恒定的收尾速度。达到收尾速度时雨滴受到的空气阻力是多大？

(5) 汽车满载时总质量是 4.0×10^3 千克，牵引力是 4.8×10^3 牛。从

静止开始运动，经过 10 秒前进了 40 米。求汽车受到的阻力。

(6) 一个质量为 2 千克的物体，在几个恒力作用下处于静止状态。现在撤掉一个大小为 2 牛、方向竖直向上的恒力，设其他力仍保持不变，物体将如何运动？

(7) 已知一质量为 4000 千克的歼击机，平时在空中飞行时可能达到的最大加速度为 10 米/秒^2 。求此机战斗时抛掉质量为 1000 千克的副油箱时，可能达到的最大加速度。（设飞机的牵引力和空气阻力不变）

(8) 关于作用力和反作用力，下列说法中正确的是：

A. 一个作用力和它的反作用力的合力为零。

B. 地球对重物的作用力比重物对地球的作用力大。

C. 两个物体处于静止状态时，相互间的作用力和反作用力的大小才相等。

D. 作用力和反作用力同时产生，同时消失。

(9) 地面上质量是 1.0 千克的石块受到的重力是多大？重力的反作用力多大？地球在这个反作用力作用下，将以多大的加速度向石块运动（地球的质量是 6.0×10^{24} 千克）？如果地球以这样大小的加速度开始运动，需要多长时间位移才能达到 1.0 厘米？

B 组

(1) 一个在光滑水平面上运动的物体，如果在运动方向上受到一个逐渐减小的力作用，它将做什么运动？当这个力减小到零时，物体做什么运动？

(2) 从正在加速上升的气球上掉下一个物体，该物体刚离开气球时的速度和加速度应是什么（空气阻力不计）

(3) 如图 5-10 所示，向正东方向匀速运动的质点 A 受到三个力的作用，已知其中的两个力是 F_1 和 F_2 ，请画出第三个 F_3 。

(4) 一位宇航员的质量是 75 千克，假如他到了月球、火星、木星上，他受到的重力各为多少牛？月球、火星、木星上的重力加速度分别是 1.7 米/秒^2 、 3.6 米/秒^2 和 26 米/秒^2 。

(5) 质量为 m (千克) 的物体，在一水平力 F (牛) 作用下，在光滑的水平面上从静止开始向前运动，经 t_1 (秒) 后撤去外力，再经 t_2 (秒)，物体共向前运动了多少路程？

(6) 一位工人沿水平方向推一质量为 45 千克的运料车，所用的推力为 90 牛，此时运料车的加速度是 1.8 米/秒^2 。当这位工人不再推车时，车的加速度是多大？

(7) 在光滑水平面上，一个质量为 200 克的物体在 1.0 牛的水平力作用下由静止开始做匀加速直线运动。2.0 秒后将此力换为相反方向的 1.0 牛的力，再过 2.0 秒将力的方向再反过来……这样，物体受到的力的大小虽然不变，方向却每过 2.0 秒改变一次。求经过半分钟物体的位移。

第六章 物体在重力作用下的运动

我们生活在地球上，经常遇到物体在重力作用下的运动，自由落体运动是物体在重力作用下最简单的运动。把物体以某一初速度沿竖直方向向上抛出去，物体先上升，然后下落，整个运动与自由落体不同，但轨迹仍是直线。把物体水平或者斜向上方抛出去，物体运动的轨迹是一条抛物线。同是在重力作用下运动，情况不同，有时做直线运动，有时做曲线运动。

物体在什么条件下做直线运动，在什么条件下做曲线运动？怎样描述和研究曲线运动？怎样研究竖直向上抛出的物体的运动？又怎样研究水平或斜向上方抛出的物体的运动？这些就是本章要讲的内容。

一、竖直抛体运动

我们知道，物体受到重力 G 作用时，产生的加速度就是重力加速度 g 。重力加速度 g 的方向是竖直向下的。在重力作用下，如果让物体从静止开始运动，它将沿竖直向下的方向做初速度为零的匀加速直线运动，这就是第四章讲过的自由落体运动。

如果将物体沿竖直方向抛出，即物体在竖直方向有一初速度 v_0 ，这时重力的方向与初速度的方向在同一直线上，重力的作用只改变速度的大小，不改变速度的方向（图 6-1），物体将在竖直方向上做匀变速直线运动，这就是竖直抛体运动。竖直抛体运动有两种：竖直下抛运动，竖直上抛运动。这一节着重讲竖直上抛运动。

竖直下抛运动 将物体以某一初速度沿着竖直方向向下抛出，物体只在重力作用下所做的运动，叫做竖直下抛运动。跟自由落体的情况相同，竖直下抛的物体只受重力的作用，它的加速度仍是重力加速度 g 。所不同的是，这时物体的运动具有初速度 v_0 ，并且 v_0 的方向与 g 的方向相同。物体做初速度不为零的匀加速直线运动。根据匀变速直线运动的一般公式，可以写出它的速度和位移公式，请你自己将它们写出来：

$$v = \underline{\hspace{2cm}},$$
$$s = \underline{\hspace{2cm}}。$$

根据上面两式就可以知道竖直下抛物体在任一时刻的速度和位置，也就是知道了它的运动情况。

竖直上抛运动 将物体以某一初速度沿着竖直方向向上抛出去，物体只在重力作用下所做的运动，叫做竖直上抛运动。竖直上抛的物体和自由落体一样，都是只在重力作用下运动的，它们的加速度都是重力加速度 g 。所不同的是，竖直上抛物体有竖直向上的初速度。

竖直上抛的物体在上升过程中，运动方向与加速度方向相反，速度越来越小，物体做匀减速运动。当速度减小到零的时候，物体上升到最大高度。然后由这个高度下落，做自由落体运动，运动方向与加速度方向相同，速度越来越大。因此，整个竖直上抛运动可以分成上升和下落两个过程，上升过程是初速度不为零的匀减速运动，下落过程是初速度为零的匀加速运动，这两个过程的加速度都是重力加速度 g 。对于竖直上抛运动的问题，可以分别就这两个过程进行计算。

我们来看一个例子：竖直上抛物体的初速度是 42 米/秒，物体上升的最大高度是多少？上升到最大高度用多长时间？由最大高度落回原地的速度是多大？用了多长时间？

(1) 在上升过程中，物体做匀减速直线运动。取 v_0 方向为正方向。加速度是重力加速度 g ，方向竖直向下，所以取负值， $a = -g = -9.8$ 米/秒²（图 6-2）。已知初速度 $v_0 = 42$ 米/秒，物体上升至最大高度时 $v_t = 0$ 。因此，利用公式 $v_t^2 - v_0^2 = 2as$ ，就可以求出最大高度

$$s = -\frac{v_0^2}{2a} = \frac{v_0^2}{2g} = \frac{42^2}{2 \times 9.8}$$
$$= 90 \text{ 米。}$$

上升到最大高度所用的时间 t_1 ，可以利用公式 $v_t = v_0 + at$ 求出。当 $t = t_1$ 时， $v_t = 0$ ，由此得到

$$t_1 = -\frac{v_0}{a} = \frac{v_0}{g} = \frac{42}{9.8} \text{ 秒} \\ = 4.3 \text{ 秒。}$$

(2) 在下落过程中，物体做初速度为零的匀加速直线运动。取运动方向即竖直向下的方向为正方向。加速度是重力加速度 g ，方向竖直向下，取正值，即 $a = g = 9.8 \text{ 米/秒}^2$ 。从最高点落回原地的位移大小已由上升过程求出： $s = 90 \text{ 米}$ 。落回原地的速度 v_t 可用公式 $v_t^2 = 2as$ 求出：

$$v_t = \sqrt{2as} = \sqrt{2gs} \\ = \sqrt{2 \times 9.8 \times 90} \text{ 米/秒} \\ = 42 \text{ 米/秒。}$$

落回原地所用的时间 t_2 ，可用公式 $v_t = at$ 求出：

$$t_2 = \frac{v_t}{a} = \frac{v_t}{g} = \frac{42}{9.8} \text{ 秒} \\ = 4.3 \text{ 秒。}$$

比较 t_1 和 t_2 可知，物体上升到最大高度所用的时间跟物体由这个高度落回原地所用的时间相等。比较 v_0 和 v_t 可知，物体落回原地的速度跟抛出时的初速度大小相等，但方向相反。

思考与讨论

取物体上升过程中通过的某一点，物体由这一点上升到最大高度所用的时间，跟物体由最大高度落到这一点所用的时间，二者是否相等？物体上升时通过这一点的速度，跟下落时通过这一点的速度，二者的大小是否相等？实际计算一下。

无论是自由落体运动，竖直下抛运动，还是竖直上抛运动，它们的运动规律都是具体运用牛顿运动定律和匀变速直线运动的一般公式而得到的。我们要学会把一般规律运用到具体情况中。

练习一

(1) 竖直向上射出的箭，初速度是 35 米/秒 ，上升的最大高度是多大？从射出到落回原地一共用多长时间？落回原地的速度是多大？（空气阻力不计）

(2) 用一只停表可以大致测出玩具手枪子弹射出的速度。让子弹从枪口竖直向上射出，用停表测出子弹从射出枪口到落回原地经过的时间，即可求出子弹射出的速度。实际做一下，并求出结果来。

(3) 竖直向上抛出的物体，初速度是 30 米/秒 ，经过 2.0 秒 、 3.0 秒 、 4.0 秒 ，物体的位移分别是多大？通过的路程分别是多长？各秒末的速度分别是多大？（ g 取 10 米/秒^2 ，不计空气阻力）

(4) 以 42 米/秒 的初速度竖直向上抛出一个球，球的质量为 0.5 千克 ，

设运动过程中受到一个恒定的阻力，大小为 0.7 牛，它上升的最大高度是多大？上升到最大高度用多长时间？由最大高度落回原地时的速度是多大？用了多长时间？把算出的结果和课文中题目的结果比较一下。

二、曲线运动

曲线运动的速度方向如果不是将物体竖直抛出，而是水平抛出或斜着抛出，物体将沿曲线运动（图 6-3）。曲线运动与直线运动的明显区别是它的速度方向是时刻改变的。怎样确定做曲线运动的物体在任意时刻的速度呢？

图 6-4 表示质点做曲线运动的轨迹，在时刻 t 质点运动到位置 A，经过时间 Δt ，运动到位置 B，有向线段 AB 表示位移，大小等于 AB 的长度

s ，方向由 A 指向 B。 $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ 表示质点在这段时间内的平均速度的大小，平均速度的方向由 A 指向 B，即在割线的方向上。当时间 Δt 足够短，或者说 Δt 趋近于零时，割线 AB 趋近于过 A 点的曲线的切线。可见，质点在 A 点的瞬时速度的方向在过 A 点的切线方向上。

观察某些现象也可以证实上述结论。在砂轮上磨刀具（图 6-5），可以看到，刀具与砂轮接触处有火星沿砂轮的切线飞出。这些火星是刀具与砂轮磨出的炽热的微粒，它们被分离出来时，由于惯性而以分离时具有的速度做直线运动，因此，火星飞出的方向就表示砂轮上跟刀具接触处的速度方向。让撑开的带有水的伞绕着柄旋转，也可以看到水滴是沿着伞边各点所画圆周的切线飞出的。

曲线运动中速度的方向是时刻改变的，质点在某一点（或某一时刻）的瞬时速度的方向在曲线的这一点的切线上。

我们知道，速度是个矢量，既有大小，又有方向，不论速度的大小是否改变，只要速度的方向发生改变，就表示速度矢量发生了变化，也就是具有加速度。曲线运动中速度的方向时刻在改变，所以曲线运动是变速运动。

物体做曲线运动的条件 物体在什么情况下才做曲线运动呢？这个问题可以根据牛顿第二定律来说明。如果合外力的方向跟物体速度的方向在同一条直线上，产生的加速度的方向也在这条直线上，这时只改变速度的大小，不改变速度的方向，物体就做直线运动。如果合外力的方向跟速度的方向不在一条直线上，而是成一角度，那么一般说来，合外力就不但改变速度的大小，而且改变速度的方向，物体就做曲线运动，水平抛出的石子，由于所受的重力跟速度的方向不在一条直线上，所以石子做曲线运动。一个在水平桌面上做直线运动的钢珠，如果从侧向给它一个作用力，它的速度方向就会改变。不断对钢珠施加侧向的作用力，例如在钢珠运动的路线旁边放一根条形磁铁，钢珠就不断偏离原来的速度方向，做曲线运动（图 6-6）。

可见，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。

运动物体的加速度方向跟它所受合外力的方向相同。所以，做曲线运动的物体，它的加速度的方向跟它的速度方向也不在同一直线上。

举出两个实例，说明物体做曲线运动的条件。

练习二

(1) 画出沿曲线 ABCDE 运动的物体在 A、B、C、D、E 各点的速度方向 (图 6-7)。

(2) 汽车以恒定的速率绕圆形广场行驶一周用 2 分钟的时间。汽车每行驶半周, 速度方向改变多少度? 汽车每行驶 10 秒速度改变多少度? 画出汽车在相隔 10 秒的两个位置处的速度矢量。

(3) 某人骑着自行车以恒定的速率驶过一段弯路, 自行车运动的速度是否发生变化? 为什么?

三、运动的合成和分解

运动的合成和分解 作为研究曲线运动的准备,我们讨论一下运动的合成和分解。

轮船渡河的运动可以看作是由两个运动组成的。假如河水不流动,轮船在静水中沿 AB 方向行驶,经过一段时间轮船将从 A 点运动到 B 点(图 6 - 8)。假如轮船没有开动,河水把轮船冲向下游,经过相同一段时间,轮船将从 A 点运动到 A' 点。现在轮船在流动的河水中行驶,它同时参与上述两个运动,经过这段时间将从 A 点运动到 B' 点。轮船从 A 点到 B' 点的运动,就是上述两个分运动的合运动。

已知分运动的情况,可以知道合运动的情况。已知分运动在某段时间内发生的位移,应用平行四边形定则就可以求出合运动在这段时间内的位移。已知分运动在某一时刻的速度和加速度,应用平行四边形定则就可以求出合运动在那一时刻的速度和加速度。例如,知道了轮船在静水中的速度 v_1 ,以及河水流动的速度 v_2 ,就可以求出轮船合运动的速度 v (图 6 - 9)。已知分运动求合运动,叫做运动的合成。

反过来,已知合运动的情况,也可以求出分运动的情况。已知合运动求分运动,叫做运动的分解。例如,飞机以 300 千米/时的速度斜向上飞行,方向与水平面成 30° 角。飞机斜向上飞行的运动可以看作是它在水平方向和竖直方向两个分运动的合运动。如图 6 - 10 把合运动的速度 v 分解成水平方向和竖直方向的分速度 v_x 和 v_y ,它们就是这两个分运动的速度。

$$v_x = v \cos 30^\circ = 260 \text{ 千米/时},$$

$$v_y = v \sin 30^\circ = 150 \text{ 千米/时}.$$

在图 6 - 8 轮船渡河的例子中,设轮船在 AB 方向是匀速行驶的,河水在 AA' 方向是匀速流动的,轮船的两个分运动的速度矢量都是恒定的,轮船的合运动的速度矢量也是恒定的,所以合运动是匀速直线运动。但一般来说,两个直线运动的合运动,并不一定都是直线运动。如果图 6 - 8 中的轮船在 AB 方向是加速行驶的,河水在 AA' 方向的流动是匀速的,轮船的合运动就不是直线运动,而是曲线运动了(图 6 - 11)。

作为特例,当两个分运动在同一直线上的时候,如果两个分运动的方向相同,合位移的大小等于两个分位移的大小之和,方向跟分位移方向相同;如果两个分运动的方向相反,合位移的大小等于两个分位移的大小之差,方向跟数值大的那个分位移的方向相同。速度、加速度的情况与上述位移的情况是相同的。

一个初速度为 v_0 的匀加速直线运动,可以看作是在同一直线上的两个直线运动的合运动:一个是速度为 v_0 的匀速直线运动,另一个是初速度为零的匀加速直线运动。合运动的位移 s 是这两个分运动的位移 $s_1 = v_0 t$ 和 $s_2 = \frac{1}{2} at^2$ 之和,即 $s = s_1 + s_2 = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$ 。合运动的速度 v 是这两个分运动的速度 $v_1 = v_0$ 和 $v_2 = at$ 之和,即 $v = v_1 + v_2 = v_0 + at$ 。

一些常见的曲线运动往往可以分解为两个方向上的直线运动,分别研究这两个方向上的受力情况和运动情况,就可以知道曲线运动的规律。这是研究曲线运动的基本方法。下面我们将用这种方法来研究曲线运动。

练习三

(1) 在由西向东行驶的炮艇上发炮,射击南岸或北岸上的目标。要击中目标,射击方向应该直接对准目标,还是应该偏东一些或偏西一些?

(2) 炮筒与水平方向成 60° 角,炮弹从炮口射出时的速度是 800 米/秒。这个速度在竖直方向和水平方向的分速度各是多大?

(3) 降落伞在下落一定时间以后的运动是匀速的。没风的时候某跳伞员着地的速度是 5.0 米/秒。现在有正西风,风速大小是 4.0 米/秒,跳伞员将以多大的速度着地?这个速度的方向怎样?

(4) 小汽艇在静水中的航行速度是 12 千米/时,当它在流速是 2 千米/时的河水中向着垂直于河岸的方向航行时,合速度的大小和方向怎样?

四、平抛物体的运动

平抛物体的运动 将物体用一定的初速度沿水平方向抛出,物体只受到跟它的速度方向不在同一直线上的重力作用而做曲线运动,这种运动叫做平抛运动。打一下桌上的小球,使它以一定的水平速度离开桌面,观察小球离开桌面后的运动,我们就可以看到平抛运动的轨迹(图6-12)。

平抛运动可以分解为水平方向和竖直方向上的两个分运动。在水平方向(也就是在初速度方向)上物体不受力,物体由于惯性而做匀速直线运动,速度等于平抛物体的初速度。在竖直方向上,物体受到重力的作用,并且初速度为零,物体做自由落体运动。情况是不是这样呢?我们来看下面的实验。

如图6-13所示,用小锤打击弹性金属片,A球就向水平方向飞出,做平抛运动。同时B球也被松开,做自由落体运动。实验表明,越用力打击金属片,A球的水平速度也越大,它在落地前飞出的水平距离就越远。但是,无论A球的初速度大小如何,它总是与B球同时落地。这说明平抛运动在竖直方向上是自由落体运动,水平方向速度的大小并不影响平抛物体在竖直方向的运动。

我们还可以用频闪照相的方法更精细地研究平抛运动。图6-14是一幅平抛物体与自由落体对比的频闪照片。可以看出,尽管两个球在水平方向上的运动不同,但它们在竖直方向上的运动是相同的,即经过相等的时间,落到相同的高度。仔细测量平抛出去的球在相等时间里前进的水平距离,可以证明平抛运动的水平分运动是匀速的。

平抛运动可以分解为水平方向和竖直方向的两个分运动,这两个分运动可以看作是独立进行的,彼此互不影响。其实,任何一个运动都可以看作是几个独立进行的分运动的合运动。这叫做运动的独立性原理。

这个原理与前面提到的力的独立作用原理是完全一致的。正是依据这两个原理,我们才可以把一个复杂的运动分解为几个独立的分运动,单独对它们进行研究。

平抛运动的公式 既然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,我们就可以分别算出平抛物体在任一时刻 t 的位置坐标 x 和 y 。取水平方向为 x 轴,正方向与初速度 v_0 的方向相同;取竖直方向为 y 轴,正方向向下;取抛出点为坐标原点。加速度方向与 y 轴正方向相同,所以是正值,即 $a = g$ 。物体在任何时刻 t 的位置坐标可以由下面的公式求出:

$$\begin{aligned}x &= v_0 t, \\y &= \frac{1}{2} g t^2.\end{aligned}$$

根据这两个公式求出任一时刻物体的位置,用平滑曲线把这些位置连起来,就得到平抛运动的轨迹,这个轨迹是一条抛物线。

想一想,怎样求出平抛物体在任一时刻的速度的大小和方向。

在处理平抛运动问题时，我们要善于从运动分解的观点进行分析。举一个例子：飞机在高出地面 0.81 千米的高度，以 2.5×10^2 千米/时的速度水平飞行。为了使飞机上投下的炸弹落在指定的轰炸目标上，应该在离轰炸目标的水平距离多远的地方投弹？

从水平飞行的飞机上落下的炸弹，在离开飞机时具有与飞机相同的水平速度，因而炸弹做平抛运动。炸弹同时参与两个分运动：竖直方向的自由落体运动，水平方向的匀速运动。轰炸目标在地面上，炸弹落到地面所经过的时间 t 是由竖直方向的运动决定的，在这段时间 t 内，如果炸弹在水平方向通过的距离等于飞机投弹时离目标的水平距离，即命中目标（图 6 - 15）。

由 $y = \frac{1}{2}gt^2$ 可求出时间 t ：

$$t = \sqrt{\frac{2y}{g}}$$

在这段时间内，炸弹水平通过的距离为

$$x = v_0 t = v_0 \sqrt{\frac{2y}{g}}$$

代入已知的数值得

$$x = 0.90 \text{ 千米。}$$

即飞机应在离轰炸目标水平距离是 0.90 千米的地方投弹。

· 小实验 ·

用尺测量玩具手枪子弹射出的速度

根据平抛运动的知识，用尺可以简便地测出玩具手枪子弹射出的速度。让子弹从高度为 h 的地方水平射出，用卷尺量出子弹落地处到射出处的水平距离 l 和高度 h 。如果子弹射出的速度是 v_0 ，那么，

$$h = \frac{1}{2}gt^2, \quad l = v_0 t.$$

由上面二式消去 t ，得到子弹射出的速度：

$$v = l \sqrt{\frac{g}{2h}}$$

练习四

(1) 两位同学各画了一幅图，图中都用箭头标明了平抛物体在它的运动轨迹上 A、B、C 三点的加速度方向，如图 6 - 16 所示。你认为哪幅图画得正确？为什么？

(2) 从同一高度以不同的速度同时水平抛出两个质量不同的石子，下

面的说法哪个对？

- A. 速度大的先着地。
- B. 质量大的先着地。
- C. 两个物体同时着地。
- D. 题中未给出具体数据，因而无法判断。

(3) 下面的说法哪个正确？

A. 从同一高度，以不同的速度同时水平抛出两个物体，它们一定同时着地，但抛出的水平距离一定不同。

B. 从不同高度，以相同的速度同时水平抛出两个物体，它们一定不能同时着地，抛出的水平距离也一定不同。

C. 从不同高度，以不同的速度同时水平抛出两个物体，它们一定不能同时着地，抛出的水平距离也一定不同。

(4) 从 1.6 米高的地方用玩具手枪水平射出一颗子弹。初速度是 35 米/秒，求这颗子弹飞行的水平距离。

(5) 用枪水平地射击一个靶子(图 6 - 17)。设想子弹从枪口水平射出的瞬间，靶子从静止开始自由下落，子弹能射中靶子吗？为什么？

图 6 - 17 靶子下落和子弹射出枪口正好同时，子弹能射中靶子吗？

(6) 在桌面上放一个小球，给小球一个水平的冲击力，使小球沿桌面滚动，并从桌面边缘水平抛出。要想测得水平抛出时的速度，应该取得什么数据？实际做一下，并求出小球抛出时的速度。

*五、斜抛物体的运动

斜抛物体的轨迹 向斜上方抛出的物体,只受到跟它的速度方向不在同一直线上的重力作用而做曲线运动,这种运动叫做斜抛运动。投出的标枪和手榴弹,大炮发射的炮弹,它们的运动都是斜抛运动。做斜抛运动的物体,先是沿着曲线上升,升到最高点后,又沿着曲线下降。图 6 - 18 中的曲线 OAB 就是斜抛物体的运动轨迹,这个轨迹也是一条抛物线。

斜抛运动可以分解成这样两个方向上的分运动:一个沿着初速度的方向,在这个方向上物体做匀速直线运动,速度等于斜抛物体的初速度 v_0 ;另一个沿着竖直方向,在这个方向上物体受重力作用,做自由落体运动(图 6 - 19)。

但是,这样来分解不便于计算,因而通常还是在水平和竖直两个方向上分解(图 6 - 20),以便于利用直角坐标系进行计算。我们把初速度 v_0 分解为水平方向的分速度 $v_x = v_0 \cos\theta$ 和竖直方向的分速度 $v_y = v_0 \sin\theta$ 。在水平方向上,物体不受力,做匀速直线运动,速度等于 v_x ;在竖直方向上做竖直上抛运动,初速度等于 v_y 。把图 6 - 21 的频闪照片里斜抛小球的位置跟左边和下边的两幅对照图比较,就可以看出斜抛运动是上述两个分运动的合运动。

图 6 - 20 斜抛运动初速度的分解

图 6 - 21 斜抛物体的频闪照片。右侧是竖直分运动的对照图,下侧是水平分运动的对照图。

射程与射高 在斜抛运动中,从物体被抛出的地点到落地点的水平距离 X (图 6 - 18),叫做射程。物体到达的最大高度 Y 叫做射高。斜抛物体的射程与射高跟哪些因素有关呢?

用图 6 - 22 所示的装置来做实验,可以看到,在喷水嘴方向不变(即抛射角不变)时,随着容器中水面的降低,喷出的水流速度减小,它的射程也减小,射高也随着降低。

如果在喷水过程中保持容器内水面的高度不变,喷出的水流速度也就不变。改变喷水嘴的方向,可以看到,在抛射角小的时候,射程随着角的增大而增大,当抛射角达到 45° 时,射程最大;继续增大抛射角,射程反而减小。但是,水流的射高一直是随着抛射角的增大而增大的(图 6 - 23)。

图 6 - 23 射程、射高跟抛射角的关系

上面的讨论中我们没有考虑空气的阻力。实际上,抛体运动总要受到空气阻力的影响。在初速度比较小时,空气阻力可以不计,但是在初速度很大时(例如射出的炮弹),空气阻力的影响是很明显的。图 6 - 24 中的虚线是在理想的没有空气的空间中炮弹飞行的轨迹;实线是以相同的初速

度和抛射角射出的炮弹在空中飞行的轨迹，这种曲线叫做弹道曲线。可以看出，弹道曲线跟抛物线实际上有很大差别。用 20° 角射出的初速度是 600 米/秒的炮弹，假如没有空气阻力，射程可以达到 24 千米，由于空气阻力的影响，实际射程只有 7 千米，射高也减小了。

本章小结

本章研究了物体在重力作用下的各种运动：自由落体运动，抛体运动（竖直上抛、竖直下抛、平抛、斜抛）。平抛和斜抛是曲线运动，研究曲线运动的基本方法是运动的合成和分解。

(1) 一个物体在力的作用下，什么条件做直线运动，什么条件做曲线运动？

(2) 什么叫运动的合成？什么叫运动的分解？怎样进行运动的合成和分解？

(3) 竖直上抛运动和竖直下抛运动，可以看作是同一直线上的哪两个运动的合运动？

已知竖直上抛物体的初速度，怎样计算物体上升的最大高度，以及上升到最大高度所用的时间？怎样计算由最大高度落回原地时的速度，以及落回原地所用的时间？

(4) 平抛运动可以看成是哪两个运动的合运动？它的运动轨迹是什么曲线？怎样确定平抛运动在某一时刻的位置和速度？

(5) 水平抛出的物体，它在空中飞行的时间是由什么决定的，跟抛出时的初速度有没有关系？它飞行的水平距离是由什么决定的，跟抛出时的高度有没有关系，是怎样的关系？

* (6) 斜抛运动可以看作是哪两个运动的合运动？它的轨迹是什么曲线？初速度的大小一定时，在什么情况下，射程最大？

* (7) 平抛运动和竖直上抛运动是否可以看作是斜抛运动的特殊情况？

(8) 只受到重力作用的物体，可以做自由落体运动，也可以做各种抛体运动。物体做上述各种不同的运动，是由什么条件造成的？你能对此做个比较和总结吗？

(9) 只知道物体的受力情况，能不能完全知道物体的运动情况？也就是说，能不能知道物体在任一时刻的位置和速度，从而也知道物体运动的轨迹？如果说不能，那还需要知道什么条件？

习 题

A 组

(1) 将两个质量不同的物体同时竖直向上抛出，则下列说法中正确的是：

- A. 质量大的物体先着地。
- B. 质量小的物体先着地。
- C. 同时着地。

D. 条件不足, 无法判断。

(2) 竖直上抛的物体, 抛出 4 秒后落回原地, 求该物体上升的最大高度。

(3) 已知竖直上抛物体的初速度为 v_0 , 则物体上升到 $\frac{H}{2}$ 高度 (H 为上升的最大高度) 所用时间的表达式是什么?

(4) 汽艇在静水中的速度是 10 千米/时, 渡河时向着垂直于河岸的方向匀速行驶。现在河水的流速是 3 千米/时, 河宽 500 米, 汽艇驶到对岸需要多长时间? 汽艇在河水中实际行驶的距离是多大? 如果河水的流速是 2 千米/时, 或 4 千米/时, 汽艇驶到对岸需要的时间又分别是多长?

(5) 有一个在水平面上做匀速运动的小车, 小车里的人拿着一个小球, 放开手, 小球下落。在车里的人看来, 小球做什么运动? 在车外停在路边的人看来, 小球做什么运动?

B 组

(1) 橡皮球从 8.1 米的高处自由下落, 着地以后竖直向上跳起。它上跳的初速度等于着地时速度的 $\frac{2}{3}$ 。球能跳起多高? 从开始降落到第二次着地, 共用多长时间? (不计球与地面碰撞的时间)

(2) 在 490 米的高空, 以 240 米/秒的速度水平飞行的轰炸机, 追击一鱼雷艇, 该艇正以 25 米/秒的速度与飞机同方向行驶。试问, 飞机应在鱼雷艇后面多远处投下炸弹, 才能击中该艇?

(3) 以初速度 v_0 水平抛出一个物体, 经过时间 t , 速度的大小为 v_t , 经过时间 $2t$, 速度大小的表达式正确的是:

A. $v_0 + 2gt$.

B. $v_t + gt$.

C. $\sqrt{v_0^2 + (2gt)^2}$.

D. $\sqrt{v_0^2 + 3(gt)^2}$.

(4) 一架飞机水平地匀速飞行。从飞机上每隔 1 秒钟释放一个铁球, 先后共释放 4 个。如果不计空气阻力, 则 4 个球

A. 在空中任何时刻总是排成抛物线; 它们的落地点是等间距的。

B. 在空中任何时刻总是排成抛物线; 它们的落地点是不等间距的。

C. 在空中任何时刻总在飞机正下方排成竖直的直线; 它们的落地点是等间距的。

D. 在空中任何时刻总在飞机正下方排成竖直的直线; 它们的落地点是不等间距的。

(5) 在水平路上骑摩托车的人, 遇到一个壕沟 (图 6 - 25), 摩托车的速度至少要多大, 才能越过这个壕沟? (g 取 10 米/秒²)

(6) 跳台滑雪是勇敢者的运动。它是利用山势特别建造的跳台所进行的。运动员着专用滑雪板, 不带雪杖, 在助滑路上取得高速后起跳, 在空

中飞行一段距离后着陆。这项运动极为壮观。设一位运动员由 a 点沿水平方向跃起，到 b 点着陆（图 6 - 26）。测得 ab 间距离 $l=40$ 米，山坡倾角 $=30^\circ$ 。试计算运动员起跳的速度和他在空中飞行的时间。（不计空气阻力，g 取 10 米/秒²）

第七章 动力学的基本问题

关于力和运动的关系，主要有两类基本问题，一是已知受力情况求运动情况，一是已知运动情况求受力情况。这一章处理这两类基本问题。

在这一章的学习中要注意体会应用牛顿运动定律解决力学问题的基本方法，提高综合运用物理知识分析解决力学问题的能力。

一、物体受力分析

分析物体受力情况对解决力学问题十分重要，下面举两个例子来分析。

【例 1】一个在水平桌面上运动的木块，运动越来越慢，最后停下来。木块受到几个力的作用？

木块受到重力 G 和桌面支持力 N 的作用，它们都在竖直方向上，重力 G 的方向竖直向下，支持力 N 的方向竖直向上。木块在水平桌面上运动，在竖直方向没有运动，即在竖直方向没有加速度，由牛顿第二定律可知， G 和 N 的合力为零，即 G 和 N 是作用在木块上的相互平衡的两个力，它们大小相等方向相反。

设木块水平向右运动。木块的运动越来越慢，说明木块的加速度是水平向左的，由牛顿第二定律可知，木块受到水平向左的作用力，它就是木块所受的滑动摩擦力 f ，方向与木块相对于桌面的运动方向相反，阻碍木块相对于水平桌面的运动。

木块的受力图如图 7 - 1 所示。

【例 2】一个物体沿着倾角为 θ 的光滑斜面下滑，受到几个力的作用？合力的大小和方向是怎样的？

物体受到重力 G 和斜面支持力 N 的作用，重力 G 的方向竖直向下，支持力的方向垂直于斜面并指向被支持的物体。受力图如图 7 - 2 所示。

现在把重力 G 分解为两个分力：平行于斜面的分力

$F_1 = G\sin\theta$ ，垂直于斜面的分力 $F_2 = G\cos\theta$ 。物体沿着斜面运动，在垂直于斜面的方向运动情况没有变化，所以垂直于斜面方向的两个力 N 和 F_2 互相平衡，它们的大小相等，即 $N = G\cos\theta$ 。因此，物体所受合力的大小等于 F_1 ，方向平行于斜面向下。

有人可能认为，物体既然沿着斜面下滑，它一定还受到另外一个沿斜面向下的“下滑力”的作用。这种看法是不对的。力是物体对物体的作用，不能离开物体而独立存在。物体所受重力 G 和支持力 N 分别是由地球和斜面施加给它的，周围再没有别的物体对它施加力的作用，因而另外再附加一个“下滑力”便是多余的了。实际上，正是合力 F_1 使物体沿斜面加速下滑的。

我们看到，放在光滑斜面上的物体，所受的合力等于重力的一个分力 $G\sin\theta$ 。如果斜面不是光滑的，或者物体还受到别的力，合力将不再等于重力的一个分力。

分析物体的受力情况，先要明确研究对象，即明确要分析哪个物体的受力情况。然后设想把研究对象从周围物体中隔离出来，分析周围有哪些物体对它施加力的作用，各是什么性质的力，力的大小和方向怎样，并把它们一一画在受力图上。这种分析力的方法通常叫做隔离法。用隔离法分析力，不要马虎从事，随意丢掉任何一个力，也不要无中生有，脱离开力是物体对物体的作用而凭空想出某个多余的力。

物体的受力情况往往比较复杂，为了使问题简化，可以暂且略去某些

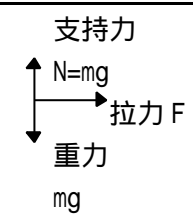
次要因素。例如物体在光滑平面上运动时，可以略去滑动摩擦力。物体的横截面积较小且运动速度不大时，可以不考虑空气阻力。根据所提问题的情况，略去某些次要因素，这在物理学上是一种常用的研究方法，我们应该逐步学会根据具体情况自己判断哪些次要因素可以忽略不计。

练习一

在下列各题中，如果知道力的大小和方向，则要求按一定标度画出力的图示。如果其中有大小未知的力，则要求作出半定量分析，明确未知力比有关的已知力是大还是小，并画出力的示意图。

(1) 雨滴下落的速度较大，空气阻力不能忽略不计。无风的时候雨滴匀速竖直下落，雨滴受到几个力的作用？设雨滴的重量是 0.001 牛，画出雨滴受力的图示。

(2) 一辆小车，质量为 m ，初速度的大小为 v_0 ，分析下列各种情况下小车的受力情况和运动情况，并用图或文字填好下表。

	用水平绳拉着在光滑水平面上向右运动	沿着有摩擦的斜面下滑	冲上光滑斜面而上滑
受力情况	支持力  重力 mg		
加速度	大小： $a = F/m$ 方向：水平向右		
速度	$v_0 \rightarrow v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow$		
运动情况	水平向右的匀加速运动		

(3) 用水平绳拉着木块在水平面上运动，木块的质量是 0.5 千克，绳的拉力是 10 牛，动摩擦因数是 0.3。

- 木块受几个力？各力的大小和方向是怎样的？
- 画出木块受力的图示。
- 木块做什么运动？木块的加速度的大小和方向怎样？

(4) 在水平地面上有一只木箱，用斜向右上方的力 F 拉木箱（图 7 - 3），使它在水平地面上做加速运动。

- 木箱受到几个力的作用？各力的方向怎样？
- 比较各力的大小，画出受力示意图。

(5) 图 7 - 4 是一架天平的示意图。用水平外力 F 推游码 P 匀速向右运动时，游码受到哪几个力的作用？天平横梁受游码对它的什么力的作用？分别画出受力示意图。

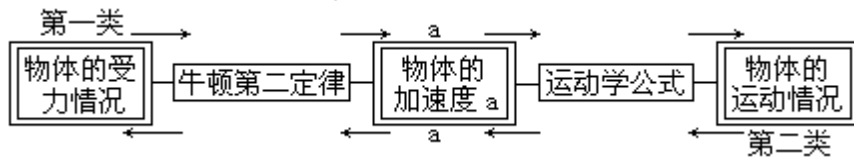
二、动力学的两类基本问题

关于力和运动的关系，有两类基本问题需要处理：

第一类是已知物体的受力情况，要求确定物体的运动情况。根据牛顿第二定律，已知物体的受力情况可以求出物体的加速度，再知道物体的初始条件（初位置和初速度），根据运动学公式就可以求出物体在任意时刻的位置和速度，也就是确定了物体的运动情况。

第二类是已知物体的运动情况，要求推断或者求出物体所受的未知力。已知物体的运动情况，由运动学公式可以求出加速度，再根据牛顿第二定律就可以确定物体所受的合外力，从而求出未知的力。

求解这两类问题的思路，可用下面的框图来表示。



解决动力学问题，首先要确定研究对象，把研究对象的受力情况和运动情况弄清楚，而不应急于找公式进行计算。先作必要的定性分析和半定量分析，如分析物体受几个力，哪个力大和哪个力小，物体做什么运动，运动速度是增大还是减小等，弄清所给问题的物理情景，然后再着手定量计算。

【例题 1】一只装有工件的木箱，原来是静止的，质量 $m=40$ 千克，现以 200 牛的斜向右下方的力 F 推木箱， F 的方向与水平面成 $\theta = 30^\circ$ 角，使木箱沿水平地面运动。木箱与地面间的动摩擦因数 $\mu = 0.30$ ，求木箱在 0.5 秒末的速度和 0.5 秒内发生的位移。

分析和解答 这是已知受力情况求运动情况的问题。

研究对象显然是木箱。木箱受四个力作用：重力 $G=mg$ ，支持力 N ，推力 F ，滑动摩擦力 f （图 7-5）。

在这几个力的作用下，木箱沿水平地面运动。欲求速度和位移，需先求加速度 a 。木箱在垂直于地面的方向上，运动状态没有改变，即没有加速度。我们可以分别在水平和竖直两个方向上应用牛顿第二定律求解。

把力沿水平和竖直两个方向分解，力 F 在水平方向的分力 $F_1 = F \cos \theta$ ，在竖直方向的分力 $F_2 = F \sin \theta$ 。设木箱在水平方向的加速度为 a ，取水平向右的 x 方向为正方向，水平方向的合外力为 $F_x = F_1 - f = F \cos \theta - f$ ，根据牛顿第二定律有

$$F_x = F \cos \theta - f = ma, \quad (1)$$

其中 $f = \mu N$ 。 (2)

在竖直方向加速度为零，根据牛顿第二定律可知，在竖直方向的合外力 $F_y = 0$ 。取竖直向上的 y 方向为正方向，则有

$$N - G - F_2 = N - mg - F \sin \theta = 0. \quad (3)$$

由以上三式可求得加速度 a

$$a = \frac{F\cos\theta - f}{m} \dots\dots\dots \text{由(1)式得}$$

$$= \frac{F\cos\theta - \mu N}{m} \dots\dots\dots \text{由(2)式得}$$

$$= \frac{F\cos\theta - \mu(F\sin\theta + mg)}{m} \dots\dots\dots \text{由(3)式得}$$

代入已知数值得 $a=0.64$ 米/秒²。

木箱的初速度为零，0.5秒末的速度为
 $v_1=at=0.32$ 米/秒。

木箱经 0.5 秒发生的位移为

$$s = \frac{1}{2}at^2 = 0.08 \text{米。}$$

a 和 v_1 都是正值，表示它们的方向都是水平向右的。 s 为正值，表示木箱水平向有加速移动。

【例题 2】一个滑雪的人以 $v_0=1.0$ 米/秒的初速度沿山坡滑下，山坡的倾角是 30° ，5 秒内滑下的路程为 62 米。求滑雪板和雪地间的动摩擦因数 μ 。

分析和解答 我们知道，滑动摩擦力 $f = \mu N$ ，其中 N 等于滑雪板跟山坡之间的垂直作用力。如果能求得 f 和 N ，即可求出动摩擦因数 μ 。因此，本题是已知运动情况求力的问题。

研究对象显然是滑雪者，滑雪者受到三个力的作用：重力 $G=mg$ ，山坡的支持力 N ，滑动摩擦力 f （图 7-6）。在这三个力的作用下，滑雪者沿山坡滑下。设滑雪者沿山坡运动的加速度为 a ，取与山坡平行向下的 x

方向为正方向，由公式 $s = v_0t + \frac{1}{2}at^2$ 可求得这个加速度

$$a = \frac{2(s - v_0t)}{t^2}, \quad (1)$$

已知 $s=62$ 米， $v_0=1.0$ 米/秒（注意：这两个量都取正值），代入上式得 $a = 4.56$ 米/秒²。

现分别在沿山坡和垂直于山坡这两个方向上应用牛顿第二定律求解。将重力 G 沿这两个方向分解：重力沿山坡方向的分力 $F_1 = mg\sin\theta$ ，垂直于山坡方向的分力 $F_2 = mg\cos\theta$ 。沿山坡方向的合外力 $F_x = F_1 - f = mg\sin\theta - f$ ，根据牛顿第二定律有

$$F_x = mg\sin\theta - f = ma. \quad (2)$$

在垂直于山坡的方向，滑雪者的加速度为零，根据牛顿第二定律可知在此方向的合外力 $F_y=0$ 。取垂直于山坡向上的 y 方向为正方向，则有

$$N - F_2 = N - mg\cos\theta = 0. \quad (3)$$

由(2)式可求得 $f = mg\sin\theta - ma$ ，由(3)式可求得 $N = mg\cos\theta$ 。因此，动摩擦因数

$$\mu = \frac{f}{N} = \frac{mg\sin\theta - ma}{mg\cos\theta} = \frac{g\sin\theta - a}{g\cos\theta}.$$

代入 a 、 g 和 θ 的数值得 $\mu = 0.04$ 。

根据牛顿定律从物体的受力情况确定运动情况，在实际中有重要作用。例如，指挥宇宙飞船飞行的科学工作者，他们知道飞船的受力情况，也知道飞船的初速度和初位置，因而，他们能够确定飞船在任意时刻的位置和速度。他们解决问题的思路跟我们这里讲的是一样的，只是计算相当复杂，要用电子计算机进行。

在一些实际问题中，常常需要根据牛顿运动定律从物体的运动情况来确定力。例如，知道了列车的运动情况，根据牛顿运动定律就可以确定机车对列车的牵引力。又如，根据天文观测知道了月球的运动情况，就可以知道地球对月球的引力的情况，牛顿当初就探讨过这个问题，并进而发现了万有引力定律。

在动力学问题中，如果知道物体的受力情况和加速度，也可以测出物体的质量，就是说，质量可以用动力学的方法来测定。下面是用动力学的方法测定质量的一个有趣的题目，希望同学们好好研究一下。

1966年曾在地球的上空完成了以牛顿第二定律为基础的测定质量的实验。实验时，用双子星号宇宙飞船 m_1 去接触正在轨道上运行的火箭组 m_2 ，接触以后，开动飞船尾部的推进器，使飞船和火箭组共同加速（图 7-7）。推进器的平均推力 F 等于 895 牛，推进器开动 7.0 秒，测出飞船和火箭组的速度改变是 0.91 米/秒。已知双子星号宇宙飞船的质量 $m_1 = 3400$ 千克。求火箭组的质量 m_2 是多大。

推进器的推力使宇宙飞船和火箭组产生的加速度

$$a = \frac{0.91 \text{米/秒}}{7.0 \text{秒}} = 0.13 \text{米/秒}^2.$$

根据牛顿第二定律 $F=ma=(m_1+m_2)a$ 得

$$m_2 = \frac{F}{a} - m_1 = \frac{895}{0.13} \text{千克} - 3400 \text{千克} = 3500 \text{千克}.$$

实际上，火箭组的质量已经被独立地测出。实验的目的是要发展一种技术，找出轨道中另一个国家的人造卫星的未知质量。事先已测出火箭组的质量为 3660 千克，因而实验误差在 5% 以内——正好在预期的误差范围之内。

应用牛顿第二定律和运动学公式解题时，先要确定作为研究对象的物体，分析它的受力情况和运动情况，把题中所给的物理情景弄清楚，再应用牛顿第二定律和运动学公式列出方程，求解未知量。这里，正确分析物体受力情况和运动情况是解题的关键。

练习二

(1) 在汽车中的悬线上挂一个小球。实验表明，当汽车做匀变速运动时，悬线将不在竖直方向，而与竖直方向成某一固定的角度（图 7-8）。已知小球的质量是 30 克，汽车的加速度为 5.0米/秒^2 ，求悬线对小球的拉力的大小和方向。

请同学们依次考虑并回答下列各问：

- a. 应该取哪个物体作为研究对象？说明理由。
- b. 研究对象做什么运动？加速度的大小和方向如何？
- c. 研究对象受几个力的作用？哪个力是已知的，哪个力是未知的？
- d. 研究对象所受各力的合力的大小和方向如何？
- e. 画出研究对象的受力示意图。

(2) 一物体的质量是 10 千克，在 40 牛的水平向右的拉力作用下沿水平桌面从静止开始运动，物体和桌面的动摩擦因数为 0.20，物体受几个力的作用？画出力的图示。物体做什么运动？加速度有多大，方向如何？

如果在物体运动后的第 5 秒末把水平拉力撤除，物体又做什么运动？加速度有多大，方向如何？算一算，物体从开始运动直到停止，一共走了多远？

(3) 质量为 10 千克的物体沿长 5 米、高 2.5 米的斜面由静止开始滑下，物体和斜面间的动摩擦因数为 0.30。物体受几个力的作用？画出力的图示。物体做什么运动？加速度有多大，方向如何？物体从斜面顶端滑到底端需要多长时间？

(4) 一个质量是 10 克的物体沿着光滑的斜面由静止开始滑下（不计摩擦），开始滑下时的竖直高度是 10 厘米，斜面的倾角是 30° 。这个物体滑到斜面末端时的速度是多大？

另一个质量是 20 克的物体也沿着光滑的斜面由静止开始滑下，开始滑下时的竖直高度相同，斜面的倾角是 45° 。这个物体滑到斜面末端时的速度是多大？

写出速度 v 的表达式，并说明物体滑到斜面末端时的速度 v 只跟开始滑下时的竖直高度 h 、重力加速度 g 有关，跟物体的质量 m 、斜面的倾角 θ 无关。

(5) 质量是 20 吨的车厢在平直铁路上前进，加速度是 0.2 米/秒^2 ，运动的阻力是它所受重力的 0.02 倍，牵引力是多少牛？

(6) 列车在平直铁路上行驶，在 50 秒内速度由 32 千米/时增加到 54 千米/时，列车的质量是 1.0×10^3 吨，机车对列车的牵引力是 1.5×10^5 牛。求列车在运动中所受的阻力。

(7) 质量是 2.75 吨的载重汽车，在 2900 牛的牵引力作用下开上一个山坡。沿山坡每前进 1 米升高 0.05 米。汽车由静止开始前进 100 米时速度达到 36 千米/时。汽车受几个力的作用？画出力的图示。汽车做什么运动？加速度有多大，方向如何？求汽车在前进中所受的摩擦阻力。

(8) 用弹簧秤拉着一个物体在水平面上做匀速运动，弹簧秤的示数是 0.40 牛。然后用弹簧秤拉着这个物体在这个水平面上做匀变速运动，测得加速度是 0.85 米/秒^2 ，弹簧秤的示数是 2.10 牛。这个物体的质量是多大？

三、连接体问题

在实际问题中，还常常碰到连接体的运动，即几个物体连在一起，在外力作用下的运动。若干节车厢连成的列车在机车牵引下的运动，就是连接体的运动。

【例题 1】一辆汽车拉着一辆拖车在平直道路上行驶，汽车的牵引力是 $F = 8970$ 牛。汽车和拖车的质量分别是 $m_1 = 5000$ 千克和 $m_2 = 2500$ 千克，所受的阻力分别是 $f_1 = 980$ 牛和 $f_2 = 490$ 牛，求它们的加速度以及汽车与拖车之间的拉力。

分析和解答 汽车和拖车一起前进，它们有相同的加速度。为了求出这个加速度，可以把汽车和拖车作为一个整体来分析。这个整体所受的重力和支持力平衡，可不予考虑。这个整体可以认为受到三个力的作用：牵引力 F 、阻力 f_1 和 f_2 (图 7-9 甲)。

取汽车前进的方向为正方向。设汽车和拖车整体的加速度为 a ，根据牛顿第二定律得

$$F - f_1 - f_2 = (m_1 + m_2) a。$$

由此得

$$a = \frac{F - f_1 - f_2}{m_1 + m_2}。$$

代入数值得 $a = 1.0$ 米/秒²。

为了求出汽车和拖车之间的拉力，则需要把汽车和拖车分别作为研究对象，分析它们的受力情况，再根据牛顿定律求出拉力。汽车所受的力有：牵引力 F 、阻力 f_1 和拖车对它的拉力 T (图 7-9 乙)。拖车所受的力有：汽车对它的拉力 T 和阻力 f_2 (图 7-9 丙)。

根据牛顿第二定律分别对汽车和拖车列出方程

$$\text{汽车} \quad F - T - f_1 = m_1 a。 \quad (1)$$

$$\text{拖车} \quad T - f_2 = m_2 a。$$

T 和 T' 是一对作用力和反作用力，大小相等，则对拖车可以写成

$$T - f_2 = m_2 a。 \quad (2)$$

把 a 的数值代入 (1) 式或者 (2) 式，都可以求出 T 。代入 (2) 式求 T 比较简便些，现将 a 代入 (2) 式，得

$$T = f_2 + m_2 a = 2990 \text{ 牛。}$$

把 (1) 式和 (2) 式联立求解，也可以分别解出 T 和 a 。同学们可以自己解一解。

在连接体的问题中，如果不要求知道运动物体之间的相互作用力，并且它们具有大小和方向都相同的加速度，就可以将它们看成一个整体进行分析；如果需要知道运动物体之间的相互作用力，就需要把各个物体分别作为研究对象，单独考虑它们各自的受力情况和运动情况，并分别列出方程求解。

【例题 2】在光滑的水平面上有一辆质量为 M 的静止的小车 A，上面放着质量为 m 的物体 B (图 7-10 甲)，用水平向右的力 F 拉小车，使 A、B

保持相对静止并一同向右做加速运动。使物体 B 向右做加速运动的力有多大，方向如何，是怎样提供的？

分析和解答 A、B 两物体在竖直方向上的运动状态没有变化，我们只考虑水平方向的受力和运动情况。

小车 A 和物体 B 相对静止，它们作为整体只受到向右的作用力 F，产生向右的加速度 a。根据牛顿第二定律有

$$a = \frac{F}{M+m} \quad (1)$$

物体 B 并没有受到力 F 的作用，但它与小车 A 相对静止，即 B 也与 A 有相同的加速度 a，方向向右。根据牛顿第二定律，B 也必定受到向右的作用力。而在水平方向使 B 产生加速度的力只能是 A 对 B 的静摩擦力 f，方向向右（图 7-10 乙）。

为什么小车 A 对 B 有向右的静摩擦力呢？现在设想 A 和 B 之间没有静摩擦力，小车 A 在力 F 作用下向右做加速运动，而物体 B 由于惯性却保持静止，它将相对于 A 向左运动。可见，B 相对于 A 有向左运动的趋势，它要受到与相对运动趋势方向相反的静摩擦力，即方向向右的静摩擦力 f（图 7-10 乙）。

根据牛顿第二定律，对物体 B 有

$$f = ma \quad (2)$$

将 (1) 式代入 (2) 式得 $f = \frac{m}{M+m}F$ 。

思考与讨论

在例题 2 中，小车 A 相对于物体 B 的相对运动趋势的方向是怎样的？小车 A 所受静摩擦力的方向是怎样的？

有人认为静摩擦力总是阻碍物体的运动，这种看法对不对？说明理由。

练习三

(1) 本节例题 2 中的小车 A 和物体 B 如果相对静止以速度 v 一起向右匀速运动，它们之间的相互作用是怎样的？如果后来小车 A 受到向左的推力 F 而减速运动，并且 A、B 仍保持相对静止，它们之间的相互作用又是怎样的？

(2) 在光滑的水平面上有两个彼此接触的物体 A 和 B，它们的质量分别是 $m_A = 40$ 千克， $m_B = 60$ 千克，用水平向左的力 $F = 20$ 牛作用在物体 B 上（图 7-11），求它们的加速度和 A、B 之间的相互作用力。如果改用 20 牛的水平向右的力推 A，它们的加速度是多大？A、B 之间的相互作用力又是多大？

(3) 用水平推力 $F = 60$ 牛在水平直路上推一辆质量为 $M = 40$ 千克的平板车，车上放一质量为 $m = 20$ 千克的木箱，前进中车子受到的阻力为 $T = 12$ 牛。木箱在车上没有滑动，求木箱受到的静摩擦力。

(4) 在得出牛顿第二定律的实验中，我们曾说由于小车的质量 M 比砝码的质量 m 大得多，即 $M \gg m$ ，因而可以认为小车所受的拉力近似等于砝码所受的重力。请给予证明。（提示：小车和砝码是连接体，它们加速度的

大小相同)

四、超重和失重

自从人造地球卫星和宇宙飞船发射成功以来，人们经常谈到超重和失重，究竟什么是超重和失重呢？我们看一个例子：升降机以 0.5 米/秒^2 的加速度匀加速上升，站在升降机里的人质量是 60 千克 ，人对升降机地板的压力是多大？如果照图 7-12 那样，人站在升降机里的测力计上，测力计的示数是多少？

人和升降机以共同的加速度上升，因而人的加速度是已知的，题中又给出了人的质量，为了能够应用牛顿第二定律，应该把人隔离开来作为研究对象。

人在升降机中受到两个力：重力 G 和地板的支持力 N 。升降机地板对人的支持力和人对升降机地板的压力是一对作用力和反作用力，根据牛顿第三定律，只要求出前者就可以知道后者。

人在 G 和 N 的合力作用下，以 0.5 米/秒^2 的加速度竖直向上运动。取竖直向上为正方向，根据牛顿第二定律得

$$N - G = ma。$$

由此可得 $N = G + ma = m(g + a)。$

代入数值得 $N = 618 \text{ 牛}。$

根据牛顿第三定律，人对地板的压力的方向也是 618 牛 ，方向与地板对人的支持力的方向相反，即竖直向下。测力计的示数表示的是测力计受到的压力，所以测力计的示数就是 618 牛 。

可见，升降机加速上升的时候，人对升降机地板的压力比人实际受到的重力要大。物体对支持物的压力（或对悬挂物的拉力）大于物体所受重力的情况称为超重现象。

升降机加速下降的时候，人对升降机地板的压力比人受到的重力小。物体对支持物的压力（或对悬挂物的拉力）小于物体所受重力的情况称为失重现象。这一点，同学们可以自己分析一下。

当升降机带着人和测力计一起以重力加速度 g 加速下降时，测力计的示数为零，就好像人完全没有受到重力一样。物体对支持物的压力（或对悬挂物的拉力）等于零的这种状态，叫做完全失重状态。

应当指出，物体处于超重或失重状态时，地球作用于物体的重力始终存在，大小也没有发生变化，只是物体对支持物的压力（或对悬挂物的拉力）发生了变化，看起来好像物重有所增大或减小。

· 小实验 ·

观察失重现象

找一个用过的易拉罐、金属罐头盒或塑料瓶，在靠近底部的侧面打一个洞，用手指按住洞，在里面装上水。移开手指，水就从洞中射出来（图 7-13 甲）。这是为什么？如果放开手，让罐子自由落下，在下落过程中，水将不再从洞中射出（图 7-13 乙）。实际做一做，观察所发生的现象。怎样解释这一现象？

失重和开发宇宙

人造地球卫星、宇宙飞船、航天飞机进入轨道后，其中的人和物将处于失重状态。人造地球卫星、宇宙飞船、航天飞机等航天器进入轨道后，可以认为是绕地球做圆周运动，做圆周运动的物体，速度方向是时刻改变的，因而具有加速度，它的大小等于卫星所在位置重力加速度的大小。这跟在以重力加速度下降的升降机中发生的情况类似，航天器中的人和物都处于完全失重状态。

你能够想象出完全失重的条件下会发生什么现象吗？你设想地球上一旦重力消失，会发生什么现象，在宇宙飞船中就会发生什么现象。物体将飘在空中，液滴绝对呈球形，气泡在液体中将不上浮。宇航员站着睡觉和躺着睡觉一样舒服，走路务必小心，稍有不慎，将会“上不着天，下不着地”（图 7-14）。食物要做成块状或牙膏似的糊状，以免食物的碎渣“飘浮”在空中进入人的眼睛、鼻孔……。你还可以继续发挥你的想象力，举出更多的现象来。

你还可以再想一想，人类能够利用失重的条件做些什么吗？下面举几个事例，将会帮助你思考。这里所举的事例，还没有完全实现，但科学家们正在努力探索，也许不久的将来就会实现。

在失重条件下，融化了的金属的液滴，形状绝对呈球形，冷却后可以成为理想的滚珠。而在地面上，用现代技术制成的滚珠，并不绝对呈球形，这是造成轴承磨损的重要原因之一。

玻璃纤维（一种很细的玻璃丝，直径为几十微米）是现代光纤通信的主要部件。在地面上，不可能制造很长的玻璃纤维，因为没等到液态的玻璃丝凝固，由于它受到重力，将被拉成小段。而在太空的轨道上，将可以制造出几百米长的玻璃纤维。

在太空的轨道上，可以制成一种新的泡沫材料——泡沫金属。在失重条件下，在液态的金属中通以气体，气泡将不“上浮”，也不“下沉”，均匀地分布在液态金属中，凝固后就成为泡沫金属，这样可以制成轻得像软木塞似的泡沫钢，用它做机翼，又轻又结实。

同样的道理，在失重条件下，混合物可以均匀地混合，由此可以制成地面上不能得到的特种合金。

电子工业、化学工业、核工业等部门，对高纯度材料的需要不断增加，其纯度要求为“6个9”至“8个9”，即99.9999%~99.999999%。在地面上，冶炼金属需在容器内进行，总会有一些容器的微量元素掺入到被冶炼的金属中。而在太空中的“悬浮冶炼”，是在失重条件下进行的，不需要用容器，消除了容器对材料的污染，可获得纯度极高的产品。

在电子技术中所用的晶体，在地面上生长时，由于受重力的影响，晶体的大小受到限制，而且要受到容器的污染，在失重条件下，晶体的生长是均匀的，生长出来的晶体也要大得多。在不久的将来，如能在太空建立起工厂，生产出砷化镓的纯晶体，它要比现有的硅晶体优越得多，将会引起电子技术的重大突破。

在太空失重的条件下，会生产出地面上难以生产的一系列产品。建立

空间工厂，已经不再是幻想。科学家们要在太空中做各种实验，青年学生也可以提出自己的太空试验设想，展开你想象的翅膀，为宇宙开发贡献一份力量吧！

练习四

(1) 如图 7-15 所示，一架电梯匀减速向上运动，请在 7-15 中标出加速度方向。图 7-16 中哪个图正确表示了作用在电梯上的力的情况？(T 为钢索拉力，G 为重力)

(2) 某钢绳所能承受的最大拉力是 4.0×10^4 牛，如果用这条钢绳使 3.5×10^3 千克的货物匀加速上升，在 0.50 秒内发生的速度改变不能超过多大？(g 取 10 米/秒^2)

(3) 弹簧秤的秤钩上挂一个 14 千克的物体，在下列各种情况下，弹簧秤的读数是多大？

- a. 以 0.28 米/秒^2 的加速度竖直加速上升。
- b. 以 0.10 米/秒^2 的加速度竖直减速上升。
- c. 以 0.10 米/秒^2 的加速度竖直加速下降。
- d. 以 0.28 米/秒^2 的加速度竖直减速下降。

(4) 升降机以 0.30 米/秒^2 的加速度竖直加速上升，站在升降机里的重 600 牛的人对升降机地板的压力是多大？如果升降机以相同大小的加速度减速上升，人对地板的压力又是多大？(g 取 10 米/秒^2)

本章小结

这一章主要学习了如何应用牛顿运动定律求解动力学问题。我们要注意总结解决动力学问题的基本方法，努力提高综合运用物理知识分析、解决问题的能力。

(1) 动力学有哪两类基本问题？怎样综合运用牛顿运动定律和运动学的知识解决这两类问题？

解决动力学问题的基本思路和一般步骤是怎样的？根据你自己的体会总结一下。

(2) 怎样对物体进行受力分析？要注意什么？你自己总结一下。

(3) 在解连接体问题时，在什么情况下，可以把它们作为一个整体进行分析？在什么情况下，需要把连接体中的各个物体隔离出来，单独作为研究对象来分析？

(4) 什么叫超重、失重和完全失重？物体处于超重和失重状态时，地球对物体的重力是否仍然存在，大小是否发生变化？

(5) 物体对水平面的压力(或水平面对物体的支持力)是否总等于物体所受的重力？压力作为未知量时，要根据什么规律来确定它？在什么条件下压力和重力大小相等？

竖直悬绳对物体的拉力是否总等于物体所受的重力？拉力作为未知量时，要根据什么规律来确定它？在什么条件下拉力和重力大小相等？

(6) 你会不会在互相垂直的两个方向上分别应用牛顿第二定律求解问

题？你对此有什么体会？

习 题

A 组

(1) 一辆原来静止的马车，马用力拉它，有人说马无论如何也拉不动车，因为马用力拉车，车也用力拉马，这两个力总是大小相等，方向相反，彼此平衡的，车仍应停在原地不动。这个说法的错误在哪里？

(2) 质量为 10 千克的物体，沿倾角为 30° 的斜面由静止匀加速下滑，物体和斜面间的动摩擦因数为 0.25。在 2.0 秒内物体从斜面顶端下滑到底端。物体的加速度是多大？斜面有多长？(g 取 10 米/秒^2)

(3) 质量是 m 的物体 A，沿倾角为 θ 的斜面匀速下滑。物体与斜面间的动摩擦因数是多大？如果用平行于斜面的力 F 拉物体 A 沿斜面匀速上滑，那么，拉力 F 是多大？

(4) 一块重 75 牛的木块，在 5.0 牛的拉力作用下，在冰面上匀速前进。此拉力的方向斜向上方，跟水平方向间的夹角是 60° ，木块在水平方向受到的拉力有多大？木块受到冰面的支持力有多大？木块跟冰面间的动摩擦因数是多大？

(5) 有的汽车司机在汽车内他的前方悬吊一个小工艺品，我们用它可以估计汽车的加速度。现在汽车正在匀加速行驶，质量为 0.20 千克的小工艺品偏离竖直位置是 15° 。求：

a. 小工艺品受到的合外力。

b. 汽车的加速度。

(6) 汽车刹车后，停止转动的轮胎在地面上发生滑动，汽车在滑动摩擦力的作用下停止前进。一辆汽车以 54 千米/时的速度在水平公路上行驶，发现前面 30 米处有意外情况，于是司机紧急刹车，这会不会发生事故？

计算时需考虑到，司机从发现情况到肌肉动作操纵制动器，要有一个短的时间——反应时间。设反应时间为 0.6 秒，轮胎与路面间的动摩擦因数 $\mu = 0.7$ ，g 取 10 米/秒^2 。

B 组

(1) 一个木箱沿着一个粗糙斜面匀加速下滑，初速度是零，经过 5.0 秒的时间，滑下的路程是 10 米，斜面的倾角是 30° ，求木箱和粗糙斜面间的动摩擦因数。(g 取 10 米/秒^2)

(2) 光滑平面上并靠着 A、B 两物体(图 7-17)，它们的质量分别是 m_A 和 m_B 。求在下列两种情况下 A、B 间相互作用力之比。

a. 用水平力 F_1 向右推 A，使 A、B 一起运动。

b. 用与 F_1 相同大小的力 F_2 向左推 B，使 A、B 一起运动。

(3) 一位工人用 196 牛的力 F 推一个原来静止的重 490 牛的煤箱(图 7-18)，煤箱与地面的动摩擦因数是 0.20。求煤箱的加速度和第 2 秒末的速度。

(4) A、B 两个物体用细绳连接在一起，用竖直向上的力 F 将它们提起 (图 7-19)。细绳能承受的最大拉力为 100 牛，两个物体的质量分别为 $m_A=4$ 千克， $m_B=8$ 千克，要使绳子在提起物体时不被拉断，拉力 F 应在多大范围内？(取 $g=10$ 米/秒²) (5) 如图 7-20 所示，物体甲、乙质量均为 m ，弹簧和悬线的质量可以忽略不计。当悬线被烧断的瞬间，甲、乙的加速度数值应是下列哪一种情况：

- A. 甲是 0，乙是 g 。
- B. 甲是 g ，乙是 g 。
- C. 甲是 0，乙是 0。
- D. 甲是 $g/2$ ，乙是 g 。

(6) 如图 7-21 在粗糙的水平面上放一个三角形木块 a ，若物体 b 在 a 的斜面上匀速下滑，则

- A. a 保持静止，而且没有相对于水平面运动的趋势。
- B. a 保持静止，但有相对于水平面向右运动的趋势。
- C. a 保持静止，但有相对于水平面向左运动的趋势。
- D. 因未给出所需数据，无法对 a 是否运动或有无运动趋势作出判断。

第八章 物体的平衡

一个物体在共点力的作用下，如果保持静止或者做匀速直线运动，我们就说这个物体处于平衡状态。一个有固定转动轴的物体，在力的作用下，如果保持静止或者做匀速转动，这个物体也处于平衡状态。

要使物体保持平衡状态，作用在物体上的力必须满足一定的条件，这个条件叫做平衡条件。

研究物体的平衡很有实际意义。工程技术上的很多物体，如桥梁、起重机、建筑物等，都需要保持平衡状态。在设计桥梁、起重机、建筑物时，必须分析它们各部分的受力情况，然后根据平衡条件进行计算，以便确定几何尺寸或选择合适的材料。

一、力的平衡

受共点力作用的物体，在什么条件下才能保持平衡呢？

从牛顿第二定律知道，当物体所受合外力为零时，加速度为零，物体将保持静止或者做匀速直线运动。因此，在共点力作用下物体的平衡条件是合力为零。即 $F_{\text{合}} = 0$ 。

作用在物体上几个力的合力为零，这种情形叫做力的平衡。物体受到两个共点力的时候，只有这两个力大小相等，方向相反，且作用在同一直线上，合力才为零。这就是前面提到的二力平衡。

在共点力作用下物体的平衡条件在实际中有广泛应用，下面分析两个具体例子。

【例题 1】沿光滑的墙壁用网兜把一只足球挂在 A 点（图 8-1 甲），足球的质量为 m ，网兜的质量不计。足球与墙壁的接触点为 B，悬绳与墙壁的夹角为 α 。求悬绳对球的拉力和墙壁对球的支持力。

分析和解答 取足球作为研究对象，分析它受到哪些力的作用。如图 8-1 乙所示，它共受到三个力的作用：重力 $G = mg$ ，悬绳的拉力 T ，墙壁的支持力 N 。

足球是静止的，它所受的各力的合力为零。所以， T 和 mg 的合力 F 与 N 大小相等、方向相反。由力的三角形可得

$$N = mgtg\alpha, \quad T = \frac{mg}{\cos\alpha}.$$

【例题 2】物体 A 在水平力 $F = 400$ 牛的作用下，静止在倾角 $\theta = 37^\circ$ 的斜面上（图 8-2 甲）。物体 A 受的重力 $G = 500$ 牛，求物体 A 所受静摩擦力和斜面的支持力。

分析和解答 解决力的平衡问题，跟解决动力学问题一样，首先要对研究对象进行受力分析。作为研究对象的物体 A 受到四个力的作用：重力 G ，水平力 F ，斜面的支持力 N ，静摩擦力 f 。 G 和 F 的大小和方向是已知的。 N 的方向是已知的，大小是未知的。 f 不但大小是未知的，方向也不能事先确定，即不能确定它的方向是沿着斜面向上还是向下。在这种情况下，我们可以假定 f 具有某一方向，然后根据解得的结果判断 f 的实际方向。现假定 f 的方向是沿着斜面向上的。物体 A 的受力示意图如图 8-2 乙所示。

现分别在沿斜面和垂直于斜面这两个方向上应用平衡条件求解。由平衡条件可知，在这两个方向上的合力 F_x 和 F_y 应分别等于零，即

$$F_x = f + F\cos\theta - G\sin\theta = 0, \quad (1)$$

$$F_y = N - F\sin\theta - G\cos\theta = 0. \quad (2)$$

由 (2) 式可解得

$$N = G\cos\theta + F\sin\theta = 640 \text{ 牛}.$$

由 (1) 式可解得

$$f = G\sin\theta - F\cos\theta = -19 \text{ 牛}.$$

f 是负值，这表示 f 的方向与假定的方向相反，是沿着斜面向下的。

练习一

(1) 用垂直于墙面的力把一个质量为 m 的物体紧压在墙面上不动(图 8-3), 这时物体受到几个力的作用? 物体和墙面间的摩擦力有多大? 画出物体的受力图。

(2) 如图 8-4 所示, 用一根绳子 a 把物体挂起来, 再用另一根水平的绳子 b 把物体拉向一旁固定起来。这个物体受到几个力的作用? 画出物体的受力图。

如果物体所受的重力是 40 牛, 绳子 a 与竖直方向的夹角 $\theta = 30^\circ$, 绳子 a 和 b 对物体的拉力分别是多大?

(3) 把物体放在光滑的斜面上, 并用弹簧把它拉住, 如图 8-5 所示。物体受到几个力的作用? 画出受力图。设物体的质量为 m , 斜面的倾角为 θ , 弹簧对物体的拉力是多大?

(4) 一个物体静止在倾角 $\theta = 15^\circ$ 的斜面上, 物体的质量 $m = 10$ 千克。物体对斜面的压力有多大? 物体所受静摩擦力的方向是怎样的? 静摩擦力有多大?

(5) 如图 8-6 所示, 物体在五个共点力的作用下保持平衡。如果撤去力 f_5 , 而保持其余四个力不变, 这四个力的合力的大小和方向是怎样的?

(6) 已知二力平衡的条件为 $F_{\text{合}} = 0$, 你能不能由此推导出三个共点力的平衡条件? 怎样推导?

提示: 先求出三个力中任意两个力的合力。

二、力矩 力矩的平衡

力矩 力可以使物体转动。物体转动时，它的各点都做圆周运动，圆周的中心在同一直线上，这条直线叫做转动轴。门、砂轮、机器的飞轮、电动机的转子等，都是有固定转动轴的物体，初中讲过的各种杠杆也属于有固定转动轴的物体，它们都能绕转动轴发生转动。

力越大，力对物体的转动作用就越大，但是力对物体的转动作用，不仅跟力的大小有关，而且跟力和转动轴之间的距离有关。在离转动轴不远的地方推门，用比较大的力才能把门推开；在离转动轴较远的地方推门，用比较小的力就能把门推开。用手直接拧螺帽，不能把它拧紧；用扳手来拧，就容易拧紧了。可见，力越大，力和转动轴之间的距离越大，力的转动作用就越大。

力和转动轴之间的距离，即从转动轴到力的作用线的距离，叫做力臂。图 8-7 表示有两个力 F_1 和 F_2 作用在杠杆上，杠杆的转动轴在 O 点垂直于纸面， L_1 是 F_1 对转动轴的力臂， L_2 是 F_2 对转动轴的力臂。力 F 和力臂 L 的乘积叫做力对转动轴的力矩。用 M 表示力矩，则有

$$M = FL。$$

力对物体的转动作用决定于力矩的大小，力矩越大，力对物体的转动作用越大。

力矩的单位是由力和力臂的单位决定的。在国际单位制中，力矩的单位是牛米，符号是 $N \cdot m$ 。

力矩的平衡 力矩可以使物体向不同的方向转动。如图 8-7 中力 F_1 的力矩 M_1 使杠杆向逆时针方向转动，力 F_2 的力矩 M_2 使杠杆向顺时针方向转动。如果这两个力矩的大小相等，杠杆将保持平衡，这是我们在初中学过的杠杆平衡条件，是力矩平衡的最简单的情形。

实验表明（图 8-8），如果有多个力矩作用在有固定转动轴的物体上，当所有向顺时针方向转动的力矩之和等于所有向逆时针方向转动的力矩之和时，物体将保持平衡。

如果把向逆时针方向转动的力矩定为正力矩，向顺时针方向转动的力矩定为负力矩，则上述结果可表述为，所有力矩的代数和为零时，物体将保持平衡。

有固定转动轴的物体的平衡条件是力矩的代数和等于零。即

$$M_1 + M_2 + M_3 + \dots = 0，$$

或者

$$M_{\text{合}} = 0。$$

【例题】如图 8-9 所示，一根均匀直棒 OA 可绕轴 O 转动，用水平力 $F = 10$ 牛作用在棒的 A 端时，直棒静止在与竖直方向成 30° 角的位置。直棒有多重？

分析和解答 直棒是有固定转动轴的物体。使它发生转动的力矩有两个，一个是水平力 F 对轴 O 的力矩 M_1 ，另一个是直棒所受重力 G 对轴 O 的力矩 M_2 。 M_1 是使直棒向逆时针方向转动的正力矩， M_2 是使直棒向顺时针方向转动的负力矩。均匀直棒的重心在直棒的中点 C。设直棒的长度为

$$l，M_1 = F_1 \cos 30^\circ，M_2 = G \frac{l}{2} \sin 30^\circ。$$

由力矩的平衡条件 $M_{\text{合}} = 0$ 有

$$M_1 - M_2 = Fl\cos 30^\circ - G\frac{l}{2}\sin 30^\circ = 0。$$

解出 G 并代入数值，得

$$G = \frac{2F\cos 30^\circ}{\sin 30^\circ} = 34.6\text{牛}。$$

思考与讨论

在图 8-9 中，如果用水平力 F 使直棒与竖直方向的夹角缓慢地增大，重力 G 对轴 O 的力矩如何变化？水平力 F 对轴 O 的力矩如何变化？水平力 F 的大小如何变化？

说明：所谓“缓慢地增大”，是指在增大过程中总保持力矩的平衡。

练习二

(1) 当我们开关门窗时，如果力的作用线通过转动轴，不论用多大的力也不能把门窗打开或者关上。为什么？

(2) 图 8-10 中的 OAB 是一个弯成直角的杆，可绕通过 O 点垂直于纸面的轴转动。杆的 OA 段长 30 厘米， AB 段长 40 厘米。现用 $F = 10$ 牛的力作用在杆 OAB 上，要使力 F 对轴 O 的力矩最大， F 应怎样作用在杆上？画出示意图，并求出此最大力矩。

(3) 一辆汽车重 1.2×10^4 牛。使它的前轮压在地秤上（图 8-11），测得的重量为 6.7×10^3 牛，汽车前后轮之间的距离是 2.7 米。求汽车重心的位置。

(4) 一根木料，抬起它的右端要用 480 牛竖直向上的力，抬起它的左端要用 650 牛竖直向上的力。这根木料有多重？

本章小结

- (1) 在共点力作用下物体的平衡条件是什么？
- (2) 什么叫力矩？力对物体的转动作用决定于什么？
- (3) 有固定转动轴的物体的平衡条件是什么？

习 题

(1) 如图 8-12，把一个球放在 AB 和 CD 两光滑板之间，保持静止。 AB 板是固定的， CD 板与 AB 板活动连接， CD 板可绕通过 D 点的轴转动。？角缓慢地由 0° 增大到 90° 的过程中， AB 板和 CD 板对球的支持力的大小各怎样变化？

(2) 两根长度相等的轻绳，下端挂一质量为 m 的物体，上端分别固定在水平天花板上的 M 点和 N 点， MN 两点间的距离为 l ，如图 8-13 所示。已知两绳所能经受的最大拉力均为 T ，则每根绳的长度不得短于_____。

(3) 在图 8-14 中，物体 B 放在物体 A 上，两物体通过定滑轮由绳连接。 A 的质量 $m_A = 2$ 千克， B 的质量 $m_B = 1$ 千克。 A 与 B 之间、 A 与水平地

面之间的动摩擦因数都是 $\mu = 0.2$ 。水平力 F 为多大时，物体 A 向左做匀速直线运动？

* (4) 图 8-15 中的 BO 是一根横梁，一端安在轴 B 上，另一端用钢绳 AO 拉着。在 O 点挂一重物，重量是 240 牛。横梁是均匀的，它的重量是 80 牛。求钢绳对横梁的拉力。

* (5) 图 8-16 是一台起重机的示意图。机身和平衡体的重量 $G_1 = 4.2 \times 10^5$ 牛，起重杆的重量 $G_2 = 2.0 \times 10^4$ 牛。其他数据如图中所示。起重机至多能提起多重的货物？

提示：这时起重机以 O 为转动轴而保持平衡。

第九章 动 量

垒球场上，击球员挥动球棒，将迎面飞来的垒球击了出去。从原则上说，应用牛顿运动定律可以解决这类问题。但是，球棒击球的力是随时间而变化的，而且变化的规律比较难以确定，因此，直接应用牛顿运动定律就发生了困难。

物理学家在研究碰撞和冲击一类问题时，引入了动量的概念，在牛顿运动定律的基础上确定了与动量有关的规律，发现了动量守恒定律。于是，上面提到的那类问题，也就能够解决了。动量的概念及有关的规律，在实际中有广泛的应用，这一章就来学习这方面的知识。

一、动 量

在日常生活中我们有这样的经验，同一辆汽车，行驶速度越大，造成的撞车事故越严重。两辆不同的汽车，比如大卡车和小汽车，行驶速度相同，大卡车造成的撞车事故严重。可见，当我们考虑运动物体的作用效果时，既要考虑物体的运动速度，也要考虑物体的质量。

在物理学中，运动物体的质量和速度的乘积叫做动量。动量通常用字母 P 表示，即

$$P = m\vec{v}。$$

在国际单位制中， m 的单位是千克， \vec{v} 的单位是米/秒，所以动量 P 的单位是千克·米/秒，符号是 $\text{kg} \cdot \text{m/s}$ 。

动量是矢量，它的方向跟速度的方向相同。

动量既然是矢量，它的运算要服从矢量运算规则，即按照平行四边形定则来进行。如果物体的运动在同一条直线上，即动量矢量在同一条直线上，在选定一个正方向之后，动量矢量的运算就简化成代数运算。

一个质量是 0.1 千克的钢球以 6.0 米/秒的速度水平向右运动，碰到一个坚硬的障碍物后被弹回，沿同一直线以 6.0 米/秒的速度向左运动（图 9-1）。如果取水平向右为正方向，则碰撞前钢球的速度 $\vec{v} = 6.0$ 米/秒，钢球的动量 $P = m\vec{v} = 0.6$ 千克·米/秒；碰撞后的速度 $\vec{v}' = -6.0$ 米/秒，动量 $P' = m\vec{v}' = -0.6$ 千克·米/秒。

碰撞前后钢球的动量发生了变化，动量的变化 ΔP 等于碰撞后的动量 P' 减去碰撞前的动量 P ，即 $\Delta P = P' - P$ 。代入数值即可求得动量的变化为

$$\Delta P = P' - P = (-0.6 \text{ 千克} \cdot \text{米/秒}) - (0.6 \text{ 千克} \cdot \text{米/秒}) = -1.2 \text{ 千克} \cdot \text{米/秒}。$$

动量变化 ΔP 也是矢量，求得的数值是负的，这表示 ΔP 的方向水平向左，与所取的正方向相反（图 9-1）。

如图 9-2 所示，一个质量是 0.2 千克的钢球，以 2.0 米/秒的速度斜射到坚硬的大理石板上，入射的角度是 45° ，碰撞后被斜着弹出，弹出的角度也是 45° ，速度仍为 2.0 米/秒。你能不能用作图法求出钢球动量变化的大小和方向？

练习一

(1) 质量是 25 千克以 0.5 米/秒的速度步行的小孩，质量是 0.02 千克以 800 米/秒的速度飞行的子弹，哪个动量大？

(2) 质量为 8 克的玻璃球以 3 米/秒的速度水平向左运动，碰到一个物体后弹回，以 2 米/秒的速度沿同一直线向右运动。玻璃球的动量变化是多大？方向如何？画出矢量图。

(3) 一个质量是 0.05 千克的网球，以水平速度 $\vec{v} = 20$ 米/秒飞向球拍，被球拍打击后，网球反向水平飞回，飞回时的速度大小也是 20 米/秒。设网球被打击前的动量为 P ，被打击后的动量为 P' ，取网球被打击后飞回的方向为正方向，关于网球的动量变化 ΔP ，下列计算式中正确的是：

$$A. \Delta P = P' - P = (1 \text{ 千克} \cdot \text{米/秒}) - (-1 \text{ 千克} \cdot \text{米/秒}) = 2 \text{ 千克} \cdot \text{米/秒}。$$

$$B. P-P = (-1 \text{ 千克} \cdot \text{米/秒}) - (1 \text{ 千克} \cdot \text{米/秒}) = -2 \text{ 千克} \cdot \text{米/秒} .$$

$$C. p - p = -1 \text{ 千克} \cdot \text{米/秒} - (1 \text{ 千克} \cdot \text{米/秒}) = -2 \text{ 千克} \cdot \text{米/秒} .$$

$$D. p-p = (1 \text{ 千克} \cdot \text{米/秒}) - (1 \text{ 千克} \cdot \text{米/秒}) = 0 .$$

二、动量定理

动量定理 一辆行驶的汽车，具有一定的动量。关闭发动机后，要使汽车停下来，也就是使它的动量变为零，可以有不同的办法。用急刹车的办法，汽车受的阻力大，在短时间内就可以停下来。用滑行的办法，汽车受的阻力小，要滑行较长的时间才能停下来。可见，物体动量的变化，跟物体所受力的大小、作用时间的长短有关。现在我们来定量地研究这种关系。

设一个质量为 m 的物体，初速度为 v_0 ，初动量为 $P_0 = mv_0$ ，在合外力 F 的作用下，经过一段时间 t ，速度变为 v ，末动量为 $P = mv$ （图 9-3 甲）。在力 F 作用下产生的加速度为 $a = (v - v_0) / t$ ，由牛顿第二定律 $F = ma = (mv - mv_0) / t$ 可得

$$Ft = mv - mv_0,$$

即 $Ft = p - p_0$ 。

上式告诉我们，要使动量发生相同的变化，可以用较大的力作用较短的时间，也可以用较小的力作用较长的时间。只要力和力的作用时间的乘积 Ft 相同，动量变化就相同。在物理学中，力和力的作用时间的乘积叫做力的冲量。

冲量也是矢量，它的方向与动量变化 $P - P_0$ 的方向相同（图 9-3 乙）。如果在作用时间内力的方向不变，冲量的方向就是力的方向。冲量的大小也可以由 $F-t$ 图象求出。物体受到恒力作用时， $F-t$ 图象是一条平行于横轴的直线（图 9-3 丙），冲量的大小在数值上等于图中画有斜线的长方形的“面积”。

冲量的单位是牛·秒，符号是 $N \cdot s$ 。由于 $1 \text{ 牛顿} = 1 \text{ 千克} \cdot \text{米} / \text{秒}^2$ ，所以 $1 \text{ 牛顿} \cdot \text{秒} = 1 \text{ 千克} \cdot \text{米} / \text{秒}$ ，即冲量和动量的单位实际上是相同的。

上面推导出的表达式 $Ft = P - P_0$ 表明：物体所受合外力的冲量等于物体的动量变化。这个结论叫做动量定理。

图 8-1 中钢球所受冲量的大小和方向是怎样的？

图 8-2 中钢球所受冲量的大小和方向是怎样的？

变力的冲量 一个质量为 0.18 千克 的垒球，以水平速度 $v_0 = 25 \text{ 米} / \text{秒}$ 飞向球棒（图 9-4）。被球棒打击后，垒球反向水平飞回，速度的大小为 $45 \text{ 米} / \text{秒}$ 。设球棒与垒球的作用时间是 0.01 秒 ，球棒对垒球的作用力有多大？

需要注意的是，球棒对垒球的作用力是变力。在这个很短的作用时间内，力的大小急剧地增大，然后又急剧地减小为零，其变化情况如图 9-5 中的曲线所示。在冲击、碰撞这类现象中，相互作用的时间很短，力的变化情况都具有这个特点。具有这种特点的力，通常叫作冲击力。

在这种情况下，冲量的大小在数值上等于图 9-5 中曲线下方面画有斜线那部分的“面积”。现在设想有一个恒力，它在冲击、碰撞中与变力等效，即它的冲量与变力的冲量相等。在 $F-t$ 图中，这个恒力用一条平行于横轴的直线来表示，且直线下方打网纹那部分的面积等于画有斜线那部分的面

积。这个恒力等于变力在作用时间内的平均值。

可以证明，动量定理不仅适用于恒力，也适用于变力。对于变力的情况，动量定理中的 F 应当理解为变力在作用时间内的平均值。这样，应用动量定理就可以求出上述球棒击球的平均力。

图 9-4 所示的情形，球棒对垒球的冲量有多大？方向如何？球棒击球的平均作用力有多大？方向如何？

应用举例 正因为动量定理适用于变力，而在实际中又常常遇到变力，所以动量定理有广泛的应用。

用铁锤钉钉子，铁锤受到钉子的冲量作用，在很短的时间内动量变为零。由动量定理知道，铁锤受到很大的冲力，同时钉子受到的反作用冲力也很大，于是钉子被钉进去。铁锤的质量越大，打到钉子上的速度越大，即铁锤的动量越大，钉子受到的冲力就越大。用冲床冲压钢板，冲头的动量在短时间内变为零，钢板受到很大的冲力，于是钢板被冲断。在上述例子中，作用时间很短，得到很大的作用力，而被人们所利用。

相反，有时需要延长作用时间，以减小力的作用。在轮渡的码头上装有橡皮轮胎，轮船停靠码头时靠到橡皮轮胎处，轮胎发生形变，作为缓冲装置，延长了作用时间，可以减小轮船停靠时所受的力。火车车厢两端也有缓冲装置，以减小车厢之间相互作用的冲力。在日常生活中也有这种事例。我们接迎面飞来的篮球时，两臂要向前伸出迎球，手接触到球以后，两臂随球后引至胸前把球接住，以延长篮球与手的接触时间，减小篮球对手的冲力（图 9-6）。

你还能举出应用动量定理的一些实际事例吗？对周围事物多注意观察，勤于思考，你一定会收获。

· 小实验 ·

缓冲装置的模拟

一条细线悬挂着一个重物。把重物拿到一定的高度，然后释放，重物可以把细线拉断。如果在细线上端拴一段皮筋，再从同样的高度释放重物，细线就不会被拉断了（图 9-7）。做做看，想想这是什么道理。根据同样的道理起重机的吊钩上都装有缓冲弹簧。

练习二

(1) 跳远时，为什么跳在砂坑里比跳在混凝土路面上安全？钉钉子时，为什么要用铁锤而不用橡皮锤？

(2) 质量为 4 千克的铅球和质量为 0.1 千克的皮球以相同的速度运动着，要使它们在相同的时间内停下来，作用在铅球上的力和作用在皮球上的力哪个大？为什么？

(3) 5 千克的物体以 10 米/秒的速度作直线运动，受到大小等于 60

千克·米/秒的反向冲量的作用，物体的速度变为多大？方向如何？画出动量和冲量的矢量图。

(4) 质量是 2.5×10^6 千克的列车在平直的铁路上运行，受到一个不断增大的牵引力的作用，在 35 秒内速度由 10 米/秒增加到 24 米/秒，列车所受的冲量有多大？这个时间内的平均牵引力有多大？

(5) 一个质量是 65 千克的人从墙上跳下，以 7 米/秒的速度着地，与地面接触后 0.01 秒停了下来。地面对他的平均作用力是多大？如果他着地时弯曲双腿，用了 1 秒钟才停下来，地面对他的平均作用力又是多大？

(6) 如图 9-8 所示，用 0.5 千克的铁锤把钉子钉进木头里去，打击时铁锤的速度 $v = 4.0$ 米/秒。如果打击后铁锤的速度变为零，打击的作用时间是 0.01 秒，那么，

a. 不计铁锤受的重力，铁锤钉钉子的平均作用力是多大？

b. 考虑铁锤受的重力，铁锤钉钉子的平均作用力又是多大？

c. 根据计算结果分析，在计算铁锤钉钉子的平均作用力时，对本题所给的情况来说，是否可以不计铁锤受的重力。

三、动量守恒定律

动量定理研究了一个物体受力作用一段时间后，物体的动量怎样变化。物体相互作用时，情况又怎样呢？有两位同学，原来静止在滑冰场上（图 9-9），不论谁推谁一下，两个人都会向相反的方向滑去，他们的动量都发生了变化。两个人本来都没有动量，现在都有了动量，他们的动量变化服从什么规律呢？现在来探讨这个规律。

图 9-10 表示在水平桌面上匀速运动的两个球，质量分别是 m_1 和 m_2 ，沿着同一直线向相同的方向运动，运动的速度分别是 v_1 和 v_2 ，而且 $v_2 > v_1$ ，它们的总动量（两个物体的动量的矢量和） $P = p_1 + p_2 = m_1 v_1 + m_2 v_2$ 。经过一定时间后，第二个球将追上第一个球，发生碰撞。碰撞后的速度分别是 v_1' 和 v_2' ，此时它们的总动量 $P' = p_1' + p_2' = m_1 v_1' + m_2 v_2'$ 。这两个球碰撞后的总动量 P' 与碰撞前的总动量 P 有什么关系呢？

设碰撞过程中第一个球和第二个球受到的平均作用力分别是 F_1 和 F_2 ，力的作用时间是 t 。根据动量定理，第一个球受到的冲量是 $F_1 t = m_1 v_1' - m_1 v_1$ ，第二个球受到的冲量是 $F_2 t = m_2 v_2' - m_2 v_2$ （图 9-11）。根据牛顿第三定律， F_1 和 F_2 大小相等，方向相反。所以 $F_1 t = -F_2 t$ ，即

$$m_1 v_1' - m_1 v_1 = - (m_2 v_2' - m_2 v_2) .$$

由此得

$$m_1 v_1' + m_2 v_2' = m_1 v_1 + m_2 v_2 ,$$

或者

$$p_1 + p_2 = p_1' + p_2' ,$$

$$p = p' .$$

现在我们讨论一下上式的适用条件。有相互作用的一组物体通常称为系统。图 9-10 中的两球在碰撞过程中就组成一个最简单的系统。系统中的每个物体既可以受到来自系统内部其他物体的作用力，也可以受到系统外部其他物体的作用力，前者叫做内力，后者叫做外力。图 9-10 中两球碰撞时的相互作用力就是内力。除了内力，两球都受到外力，即受到重力和支持力，但它们彼此平衡，因而两球所组成的系统所受的外力之和为零。系统不受外力，或者所受外力之和为零，是我们得出上式的前提条件。

系统不受外力或者所受外力之和为零，这个系统的总动量保持不变。这个结论叫做动量守恒定律。

动量守恒定律不仅适用于正碰即两物体碰撞前后在同一直线上运动的情形，也适用于斜碰即碰撞前后不在同一直线上运动的情形（本书只涉及正碰）。不仅适用于碰撞，也适用于任何形式的相互作用。不仅适用于两个物体组成的系统，也适用于多个物体组成的系统。

动量守恒定律是自然界普遍适用的基本规律之一，它比牛顿运动定律的适用范围要广泛得多。牛顿运动定律只适用于解决物体的低速运动问题，动量守恒定律不但能解决低速问题，而且能用来处理接近于光速的运动问题；牛顿定律适用于行星、卫星、交通工具以及其他宏观物体的相互作用，动量守恒定律不但适用于宏观物体，而且适用于电子、中子、质子等微观粒子的相互作用。小到微观粒子，大到天体系统，无论相互作用的是什么力，即使对相互作用力的情况还了解得不太清楚，动量守恒定律都是适用的。

思考与讨论

在图 9-12 所示的装置中，木块 B 与水平桌面间的接触是光滑的，子弹 A 沿水平方向射入木块后留在木块内，将弹簧压缩到最短。

现将子弹、木块和弹簧合在一起作为研究对象（系统），此系统从子弹开始射入木块到弹簧压缩至最短的整个过程中，动量是否守恒？说明理由。

· 阅读 ·

动量守恒定律的发现

动量守恒定律是最早发现的一条守恒定律，它渊源于十六、十七世纪西欧的哲学家们对宇宙运动的哲学思考。

观察周围运动着的物体，我们看到它们中的大多数终归会停下来。跳动的皮球，飞行的子弹，走动的时钟，运转的机器，它们都会停下来。看来宇宙间运动的总量似乎在减少。整个宇宙是不是也像一架机器那样，总有一天会停下来呢？但是，千百年来对天体运动的观测，并没有发现宇宙运动有减少的迹象。生活在十六、十七世纪的许多哲学家认为，宇宙间运动的总量是不会减少的，只要能找到一个合适的物理量来量度运动，就会看到运动的总量是守恒的。这个合适的物理量到底是什么呢？

法国哲学家兼数学家、物理学家笛卡儿提出，质量和速率的乘积是一个合适的物理量。可是后来，荷兰数学家、物理学家惠更斯（1629~1695）在研究碰撞问题时发现：按照笛卡儿的定义，两个物体运动的总量在碰撞前后不一定守恒。

牛顿在总结这些人工作的基础上，把笛卡儿的定义作了重要的修改，即不用质量和速率的乘积，而用质量和速度的乘积，这样就找到了量度运动的合适的物理量。牛顿把它叫做“运动量”，就是我们现在说的动量。

练习三

(1) 甲、乙两名同学静止在光滑的冰面上，突然甲推了乙一下，结果两人各向相反的方向滑去，甲推乙前，他们的总动量为零，推乙后，他们各自都有了动量，总动量还等于零吗？为什么？

(2) 两个磁性很强的磁铁，各放在一辆小车上，小车能在水平桌面上无摩擦地运动，磁铁的同性磁极相对。推动小车一下，使它们相互接近，两个小车没有碰上就分开了，两辆小车相互作用前后，它们的总动量守恒吗？为什么？

(3) 在光滑的水平桌面上有一辆小平板车，一个木块贴着平板车的上表面，以水平速度 v_0 射到平板车上，最后平板车和木块以共同的速度 v 运动（图 9-13），木块射入平板车前后，平板车和木块的总动量守恒吗？为什么？

(4) 在光滑的水平桌面上有两个小球 A 和 B，它们的质量分别是 $m_A=2.0$ 千克， $m_B=4.0$ 千克。

a. 如果小球 A 和 B 沿同一直线向相同的方向运动（图 9-14 甲），运

动速度的大小分别是? $v_A=4.0$ 米/秒, $v_B=2.0$ 米/秒, 它们碰撞前的总动量是多大? 方向如何?

b. 如果小球 A 和 B 沿同一直线相向运动 (图 9-14 乙), 运动速度的大小还是? $v_A=4.0$ 米/秒, $v_B=2.0$ 米/秒, 它们碰撞前的总动量又是多大? 方向如何?

c. 假设无法知道小球 A 和 B 碰撞后的速度大小和方向, 你能确定它们碰撞后总动量的大小和方向吗? 说明你的根据。

四、动量守恒定律的应用

动量守恒定律的重要应用之一是用来研究碰撞现象，提到碰撞，往往会联想起交通事故，人被车撞了，两辆车相撞等。物理学里研究的碰撞，范围要广得多，不仅包括普通大小的物体，如汽车与汽车、球与球之间碰撞，也包括分子与分子、原子与原子以及质子、中子等微观粒子的碰撞。

前面说过，在碰撞现象中，互相作用的时间很短，在此短时间内，相互作用力先急剧增大然后急剧减小，平均作用力很大，把相互碰撞的物体作为一个系统来看待，外力通常远小于碰撞物体之间的内力，可以忽略，而认为碰撞过程中动量守恒。

【例题 1】甲、乙两球相撞，已经测出它们碰撞前的速度 $v_{甲}$ 、 $v_{乙}$ 和碰撞后的速度 $v'_{甲}$ 、 $v'_{乙}$ 。求两球质量之比。

分析和解答 研究对象是甲、乙两球组成的系统。碰撞前的速度是指开始发生相互作用那一时刻的速度，而不是指未发生碰撞之前某一时刻的速度；碰撞后的速度是指相互作用结束那一时刻的速度，而不是指发生碰撞之后某一时刻的速度。分析物理现象不但要明确研究对象，而且要明确研究的是哪一段过程。碰撞过程的初状态是开始发生相互作用时的状态，末状态是相互作用结束时的状态。

设甲、乙两球的质量分别为 $m_{甲}$ 和 $m_{乙}$ ，那么，它们碰撞前的总动量是 $m_{甲}v_{甲} + m_{乙}v_{乙}$ ，碰撞后的总动量是 $m_{甲}v'_{甲} + m_{乙}v'_{乙}$ 。根据动量守恒定律可得

$$m_{甲}v_{甲} + m_{乙}v_{乙} = m_{甲}v'_{甲} + m_{乙}v'_{乙}.$$

所以
$$\frac{m_{甲}}{m_{乙}} = \frac{v'_{乙} - v_{乙}}{v_{甲} - v'_{甲}}.$$

这给我们提供了一种比较或测量质量的方法，如果相撞的是两个微观粒子，测出它们碰撞前后的速度，我们就可以求出它们的质量之比。如果其中一个粒子的质量是已知的，还可以求出另一个粒子的质量。

思考与讨论

在水平面上有一静止的木块，质量为 M ，一质量为 m 的子弹以速度 v_0 水平地射入木块，并停在木块中与木块一起在水平面上开始运动，最后在摩擦力的作用下停下来。

在子弹与木块相互作用的过程中，可以认为动量守恒吗？初状态的总动量是多大？末状态的总动量是多大？末状态的速度是多大？

动量守恒定律不仅应用于碰撞，它在实际中有广泛的应用，可以解决许多直接应用牛顿运动定律难以解决的问题。

【例题 2】一枚质量为 m 的手榴弹，在空中某点运动速度的大小为 v_0 ，方向如图 9-15 所示。手榴弹在该点突然炸裂成两块，质量 m_1 的一块以速度 v_1 沿 v_0 的反方向飞去，求另一块炸裂后的速度 v_2 。

分析和解答 爆炸前，可认为手榴弹是由质量为 m_1 和 $(m - m_1)$ 的两块弹片组成的。手榴弹爆炸的过程，可看作是这两块弹片相互作用的过程。这两块弹片组成的系统是我们的研究对象。它们在爆炸的过程中都受到重

力作用，所受的外力之和不为零。但是，两块弹片所受的爆炸力远大于它们受到的重力，重力对它们动量的变化影响很小，可以忽略不计。所以，可以认为系统所受的外力之和为零，满足动量守恒定律的适用条件。

两块弹片在炸开前（初状态）的总动量是 mv ，炸开后（末状态）的总动量为 $m_1v_1 + (m - m_1)v_2$ 。根据动量守恒定律可得

$$mv = m_1v_1 + (m - m_1)v_2$$

所以

$$v_2 = \frac{mv - m_1v_1}{m - m_1}$$

取手榴弹爆炸前的速度 v 的方向为正方向， v 为正值，而 v_1 与 v 的方向相反， v_1 为负值，从上式得知 v_2 应为正值，这表示质量为 $(m - m_1)$ 的那块弹片沿与 v 相同的方向飞去。

在碰撞、爆炸这类问题中，相互作用的力是变力，此变力随时间变化的规律又难以确定，因而无法直接应用牛顿运动定律求解。即使作为恒力来处理，直接应用牛顿运动定律，也需要求出加速度，确定过程的细节，才能解决问题。而应用动量守恒定律，只需考虑过程的初末状态，无需考虑过程的细节，这正是应用动量守恒定律解决问题的优点所在。

练习四

(1) 在列车编组站里，一辆 10^5 千克的货车在平直轨道上以 2.0 米/秒的速度运动，碰上一辆不动的 1.5×10^5 千克的货车后，它们接合在一起并一同向前运动，求它们共同前进的速度。

(2) 甲、乙两物体沿同一直线相向运动，甲物体速度的大小是 6.0 米/秒，乙物体速度的大小是 2.0 米/秒。碰撞后，甲、乙两物体都沿各自原方向的反方向运动，速度的大小都是 4.0 米/秒。求甲、乙两物体的质量之比。

(3) 如图 9-16 所示，在水平桌面上有两辆小车 A 和 B，质量分别是 0.5 千克和 0.2 千克。这两辆小车分别靠在一根被压缩的轻弹簧的两端，并用细线拴在一起。烧断细线后，这两辆小车在弹簧的弹力作用下分开，小车 A 以 0.8 米/秒的速度向左运动，小车 B 的速度是多大？方向如何？

(4) 一名质量是 80 千克的宇航员，到宇宙飞船外面去做实验。他相对于宇宙飞船是静止的。实验结束后，他把背着的一只质量是 10 千克的空氧气筒，以相对于宇宙飞船为 2.0 米/秒的速度扔掉。求宇航员由此得到的相对于宇宙飞船的速度。

(5) 一辆质量是 60 千克的小车，以 2.0 米/秒的速度在水平的轨道上运动，原在车上的一个质量是 40 千克的男孩，以相对于地面为 3.0 米/秒的水平速度从小车的后面跳下。男孩跳下车后，小车的速度是多大？

(6) 质量为 10 克、速度为 300 米/秒的子弹，打进质量为 24 克静止在光滑水平面上的木块中，并留在木块里。子弹进入木块后，木块运动的速度是多大？如果子弹把木块打穿，穿过木块后子弹的速度为 100 米/秒，这时木块的速度是多大？

五、反冲运动及其应用

发射炮弹的时候，炮弹向前飞去，根据动量守恒定律炮身要向后退。炮身的这种后退运动叫做反冲运动。对于大炮射击来说，反冲运动是不利的，为了使大炮回到原来的位置和重新瞄准要花不少时间。现代的大炮都安装使大炮发射后能自动迅速复位的装置。人们还发明了无后坐力炮，这种炮在发射时，火药气体从炮身后面的特殊开口喷出，炮身可以稳定不动。

反冲运动并不是在任何情况下都是不利的，在科学技术中，反冲运动也有许多重要应用。

反击式水轮机就是反冲运动的一项重要应用。反击式水轮机是大型水力发电站用得最多的一类水轮机，它是靠水流的反冲作用旋转的。照图 9-17 那样，在漏斗上接一段橡皮管，橡皮管下端安一个弯曲的玻璃管。在漏斗中装水，当水从玻璃弯管流出时，水流的反冲作用就使玻璃弯管向水流的反方向发生反冲运动。如果照图 9-18 那样，把几个弯管装在可以旋转的盛水容器上，当水从这些弯管流出时，容器就旋转，这实际上是个反击式水轮机的模型。实际水轮机的形状与这个模型完全不同，但也是利用高速水流的反冲作用来旋转的。图 9-19 是一种反击式水轮机的转轮。我国在 80 年代生产的这种水轮机，功率最大的达 32 万千瓦，转轮直径为 6.0 米，质量为 150 吨。

喷气式飞机和火箭也是反冲运动的重要应用。它们都是靠喷出气流的反冲作用获得巨大速度的。现代的喷气式飞机，靠连续不断地向后喷出气体，飞行速度能超过 2000 米/秒。

我国早在宋代就发明了火箭（图 9-20）。在箭上扎一个火药筒，火药筒前端是封闭的，当火药点燃生成的气体以很大速度向后喷出时，火箭就向前做反冲运动。

现代的火箭，原理同古代的相同，但构造复杂得多。现代火箭主要用来发射探测仪器、常规弹头或核弹头、人造地球卫星或宇宙飞船，即作为运载工具。由于用途不同，火箭的大小和复杂程度相差很大。小的如步兵用的反坦克导弹的火箭，连同弹头总共不过十几千克，长度只有 1 米左右。大的如把宇宙飞船送到月球去的火箭，共有三级，总高度超过 100 米，发射时包括燃料的质量达 3000 吨。

火箭技术与科学技术和国防现代化都有很大关系，是现代的一门重要的尖端技术。我国自 1970 年 4 月 24 日发射第一颗人造地球卫星以来，火箭技术不断取得新的成就。1981 年 9 月 20 日，我国成功地用一枚运载火箭发射了三颗卫星，成为世界上掌握一箭多星发射技术的少数几个国家之一。1990 年 4 月 7 日，我国自行研制的“长征三号”运载火箭首次为国外用户成功地发射了美国制造的“亚洲一号”卫星，标志着我国火箭技术不仅进入成熟和实用阶段，而且也开始步入国际市场。1990 年 7 月 16 日，我国又将自己研制的大推力运载火箭——“长征二号”捆绑式运载火箭发射试验成功，表明我国已经具有了发射重型卫星的能力。我国的火箭技术经过几十年的发展，已经跨入世界先进行列，但是我们还要进一步提高火箭技术。我们相信，在同学们中，一定会有人在这一重要领域中为祖国作出卓越贡献。

漫谈火箭

火箭起源于中国，是我国古代劳动人民的重大发明之一。现代的火箭，原理同古代的相同，只是构造复杂得多。现代火箭主要由壳体和燃料两大部分组成，壳体是圆筒形的，前端是封闭的尖端，后端有尾喷管。燃料燃烧时产生的高温高压气体以很大的速度从尾部向后喷出，火箭就向前飞去。

火箭向前飞行所能达到的最大速度，也就是燃料烧尽时火箭获得的最终速度。它跟什么因素有关系呢？根据动量守恒定律，理论上的计算表明，最终速度主要取决于两个条件，一个是喷气速度，一个是质量比，即火箭开始飞行时的质量与燃料烧尽时的质量之比。喷气速度越大，质量比越大，火箭的最终速度也越大。为了提高喷气速度，需要使用高质量的燃料，目前常用的液体燃料是液氢，用液氧做氧化剂。质量比与火箭的结构和材料有关系，现代火箭能达到的质量比不超过 10。在现代技术条件下，一级火箭的最终速度还达不到发射人造卫星所需要的速度。要发射卫星，现在都用多级火箭。

多级火箭是由单级火箭组成的(图 9-21)。发射时先点燃第一级火箭，它的燃料用完以后空壳就自动脱离，以后下一级火箭开始工作。多级火箭在工作中及时把对后面航行没有用的空壳抛掉使火箭的总质量减少，因此能够达到很高的速度，可以用来发射人造卫星、宇宙飞船或洲际导弹等。当然，火箭的级数也不是越多越好，因为级数越多，火箭的构造也越复杂，工作的可靠性也就越差。目前，多级火箭一般都是三级的。

自从 1926 年第一枚液体燃料的现代火箭试飞成功以来，利用液体燃料或固体燃料的化学能作能源的火箭一直占有重要的地位。目前，科学家们在研制用电能或太阳能作能源的电火箭、太阳能火箭等。但是，无论哪一种火箭，都将向可靠性高、经济性好和多次使用的方向发展。

本章小结

学习物理要重在理解。要理解概念和规律的确切含义以及规律的适用条件。要理清知识的来龙去脉，知道知识是怎样得来的，知道怎样正确地运用。不能只是记住概念和规律的表达，而应当领悟其中的道理。

自己独立地进行小结，可以加深对知识的理解。

这一章学习了动量和冲量的概念，并在牛顿运动定律的基础上得出了动量定理和动量守恒定律，可用来解决直接应用牛顿运动定律难以处理的问题。

(1) 什么叫动量？动量的方向是怎样的？怎样进行有关动量的运算？运算中要注意什么？

(2) 什么叫冲量？冲量的方向与动量变化的方向有什么关系？在恒力的情况下，冲量的方向是什么？

(3) 动量定理的内容是什么？怎样推导出来的？你自己推导一遍。在

变力的情况下，怎样理解动量定理？举出几个应用动量定理的实例。

(4) 动量守恒定律的内容是什么？怎样推导出来的？你自己推导一遍。

(5) 动量守恒定律在什么条件下成立？它的适用范围是怎样的？在碰撞和爆炸一类问题中，常有外力的作用，为什么可认为动量守恒？

(6) 应用动量守恒定律解决问题的一般步骤是什么？有什么值得注意的地方？应用动量守恒定律解决问题有什么优点？你自己总结一下。

(7) 什么叫反冲运动？举出几个应用反冲运动的实例。

习 题

A 组

(1) 10 千克的物体以 10 米/秒的速度作直线运动，在受到一个恒力作用 4.0 秒后，反向运动，速度的大小变为 2.0 米/秒。物体受到的冲量是多大？方向如何？物体受到的恒力是多大？方向如何？

(2) 质量相同的两个球 A 和 B，从同一高度自由落下，A 球落在泥地上，停止运动，B 球落在钢板上，向上弹起。A 球所受泥地的冲量跟 B 球所受钢板的冲量相比，哪个大？为什么？

(3) 两物体质量不同，但初动量相同，它们都在水平地面上由于摩擦力的作用而停止运动，它们跟地面间的动摩擦因数也相同。比较它们滑行的时间，则

- A. 质量大的物体滑行时间长。
- B. 质量小的物体滑行时间长。
- C. 滑行时间一样长。
- D. 条件不足，无法判断。

(4) 在地面上以 8.0 米/秒的初速度竖直上抛一个石子，石子的质量是 0.2 千克。那么，

a. 经过 0.4 秒，石子动量的变化是多大？石子的末动量是多大？方向如何？

b. 经过 1.0 秒，石子动量的变化是多大？石子的末动量是多大？方向如何？(g 取 10 米/秒²)

(5) 在前面第四章练习八第(4)题曾引用一则新闻报导。请你估算一下，这位幸免于难的小男孩受到的合外力的冲量是多大？假设小男孩跟他的救命恩人之间的相互作用时间是 0.50 秒，孩子受到的平均冲力是多大？假如小男孩直接落到地面上，在 0.01 秒内他的速度变为零，他受到的平均冲力又是多大？

提示：通常情况下，4 岁孩子的质量约 14~16 千克，每一层楼房的高度约 2.7~3.0 米。g 取 10 米/秒²。

(6) 在光滑的水平面上有一辆平板车。一个人站在这辆平板车上，用一个大锤敲打车的左端(图 9-22)。在锤的连续敲打下，这辆平板车能持续地向右驶去吗？为什么？

B 组

(1) 质量为 m 的物体放在水平面上，用水平力拉它从静止开始运动，物体与水平面的动摩擦因数为 μ 。这个拉力作用了时间 t 后撤去，物体在摩擦力作用下继续向前滑行了时间 t 后停止。求拉力的大小。

(2) 在光滑平面上，有两个小球 A、B 沿同一直线运动。A 的质量为 1 千克，速度大小为 6 米/秒，B 的质量为 2 千克，速度大小为 3 米/秒。求下列各种情况下相碰后的速度。

a. A、B 都向右运动，相碰后粘在一起。

b. A 向右运动，B 向左运动，相碰后粘在一起。

c. A、B 都向右运动，相碰后 A 仍向右，速度大小为 2 米/秒。

d. A 向右运动，B 向左运动，碰后 A 向左，速度大小为 4 米/秒。

(3) 一个质量 $M=0.20$ 千克的小球放在高度 $h=5.0$ 米的直杆顶端（图 9-23）。一颗质量 $m=0.01$ 千克的子弹以 $v_0=5.0 \times 10^2$ 米/秒的速度沿水平方向击中小球，并穿过球心，小球落地处离杆的距离 $s=20$ 米。求子弹落地处离杆的距离。（ g 取 10 米/秒²）

(4) 甲、乙两个小孩各乘一辆冰车在水平冰面上游戏。甲和他的冰车的质量共为 $M=30$ 千克，乙和他的冰车的质量也是 30 千克。游戏时，甲推着一个质量为 $m=15$ 千克的箱子，和他一起以大小为 $v_0=2.0$ 米/秒的速度滑行，乙以同样大小的速度迎面滑来（图 9-24）。为了避免相撞，甲突然将箱子沿冰面推给乙，箱子滑到乙处时乙迅速把它抓住。若不计冰面的摩擦力，求甲至少要以多大的速度（相对于地面）将箱子推出，才能避免与乙相撞。

提示：要想甲和乙刚好能避免相碰，则要求甲推出箱子后的速度与乙抓住箱子后的速度相等。

* (5) 一只质量是 100 千克的小船，载着两名游泳的人，他们的质量分别为 40 千克和 60 千克。最初小船浮在静止的水面上不动。后来这两名游泳者分别从船头和船尾同时跳入水中，而且他们离开船时相对于水的速度都在水平方向上，大小都是 3.0 米/秒。求他们离开船后小船相对于水的速度。

第十章 机械能

我们在初中已经学过关于能量的初步知识，知道自然界存在各种不同形式的能量——机械能（动能和势能）、内能、电能、核能等等，还知道各种不同形式的能量可以互相转化，而且在转化中守恒。但是，并没有定量地研究能量及其相互转化。

我们在初中还学过与能量有密切联系的一个物理量——功。在各种不同形式的能量相互转化的过程中，功扮演着一个重要角色。做功的过程，就是能量转化的过程。举重运动员把重物举起来，对重物做了功，重物的重力势能增加，同时消耗了运动员体内的化学能。举起重物做了多少功，就有多少化学能转化成重力势能。这样，我们通过做功的多少，就可以定量研究能量及其转化了。

在这一章，我们先讲功，然后定量地讨论动能、势能及其相互转化。

一、功

功 功这个概念是人们广泛使用各种机械时在力学中出现的。从人的劳动到各种机械的工作，它们有一个共同的特点：有力作用在物体上，而且物体在力的作用下发生一段位移。引入功的概念，就是为了反映这个共同的特点。

一个物体受到力的作用，如果在力的方向上发生一段位移，物理学中就说这个力对物体做了功。人推车前进，车在人的推力下发生一段位移，推力对车做了功。起重机提起货物，货物在起重机钢绳的拉力下发生一段位移，拉力对货物做了功。机车牵引列车前进，列车在机车的牵引力下发生位移，牵引力对列车做了功。力和物体在力的方向上发生的位移，是做功的两个不可缺少的因素。

举重运动员把重物举起后，停一段时间，此时运动员对重物的支持力 N 做功没有？一个人用力推一个笨重的物体，但没有推动，此时人的推力 F 对物体做功没有？

功的公式 功的大小是由力的大小和物体在力的方向上的位移的大小确定的。力越大，位移越大，功就越大。我们在初中学过，如果力的方向跟物体运动的方向一致（图 10 - 1），功就等于力的大小和位移的大小的乘积。用 F 表示力的大小，用 s 表示位移的大小，用 W 表示力所做的功，那么，

$$W = Fs .$$

当力的方向跟运动方向成某一角度 时（图 10-2），怎样来计算这个力所做的功呢？我们把力 F 分解成两个分力：跟位移方向一致的分力 F_1 ，跟位移方向垂直的分力 F_2 。设物体在力 F 作用下发生的位移的大小是 s ，力 F_1 所做的功等于 F_1s 。力 F_2 的方向跟位移的方向垂直，在 F_2 的方向上没有发生位移，力 F_2 所做的功等于零。因此，力 F 对物体所做的功就等于 F_1s ，而 $F_1 = F\cos\theta$ ，所以

$$W = Fscos\theta .$$

这就是说，力对物体所做的功，等于力的大小、位移的大小、力和位移的夹角的余弦三者的乘积。

功是由力的大小和位移的大小确定的，它没有方向，是一个标量。在国际单位制中，功的单位是焦耳，简称焦，符号是 J。1 焦耳是 1 牛的力使物体在力的方向上发生 1 米位移所做的功。

$$1 \text{ 焦} = 1 \text{ 牛} \times 1 \text{ 米} = 1 \text{ 牛} \cdot \text{米} .$$

正功和负功 现在，我们讨论一下功的公式 $W = Fscos\theta$ 。

当 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 时， $\cos\theta = 0$ ， $W = 0$ 。这表示力的方向与位移的方向垂直，物体在力的方向没有发生位移，力不做功（图 10 - 3）。

甲：小球在水平桌面滚动时，重力 G 和支持力 N 都与位移方向垂直，不做功。

乙：物体沿固定的斜面滑下，支持力 N 与位移方向垂直，不做功。

图 10-3 力不做功

当 $a < \frac{\pi}{2}$ 时, $\cos\alpha > 0$, $W > 0$, 这表示力对物体做正功 (图 10-4)。

甲: 人推车前进时, $a < \frac{\pi}{2}$, 人的推力 F 对小车做正功。

乙: 物体在重力 G 作用下竖直下落时, $a=0$, 重力 G 对物体做正功。

图 10 - 4 力对物体做正功

当 $\frac{\pi}{2} < a$ 时, $\cos\alpha < 0$, $W < 0$, 这表示力对物体做负功 (图 10 - 5)。

甲、乙: 人用力阻碍车前进时, $a > \frac{\pi}{2}$ (甲), $a = \pi$ (乙), 人的推力对车做负功。

丙: 上抛物体在向上运动时, $a = \pi$ 重力对物体做负功。图 10 - 5 力对物体做负功

图 10-5 力对物体做负功

一个力对物体做了负功, 往往说成物体克服这个力做了功 (取绝对值)。这两种说法, 在意义上是完全等同的。比如, 上抛物体向上运动时, 重力做了 -6 焦的功, 往往就说物体克服重力做了 6 焦的功。

思考与讨论

一辆平板车停放在水平路面上, 车上放着一个空箱子。突然使车向前行驶, 箱子会相对于平板向后滑动, 箱子在平板上滑动的过程中, 滑动摩擦力对箱子做正功还是做负功? 滑动摩擦力对平板车做正功还是做负功?

当物体在 n 个力的共同作用下发生一段位移时, 这 n 个力所做的总功等于各个力分别对物体所做的功的代数和。如图 10 - 6 所示, 在水平面上运动的物体受四个力的作用: 拉力 F , 滑动摩擦力 f 、重力 G 、支持力 N (G 和 N 在图中未画出)。重力和支持力不做功, 因而外力所做的总功 W 等于拉力 F 和滑动摩擦力 f 所做的功的代数和:

$$W = Fscos\alpha - fs。$$

如果作用力是恒定的, 即力的大小和方向都不变, 且受力物体向着确定方向做直线运动, 公式 $W=Fscos\alpha$ 中 F 和 α 都保持不变, 已知直线运动的路程 (位移大小) s , 由此公式即可直接算出力 F 对物体所做的功。如果作用力是变力, 即力的大小和 (或) 方向是变化的, 或者物体做曲线运动, 这时力 F 的大小是随时间变化的, 力 F 的方向和运动方向 (即位移 s 的方向) 的夹角也会随时间而变化, 便不能直接由公式 $W=Fscos\alpha$ 算出功。这种情况又怎样计算功呢? 在高中阶段, 限于数学准备不足, 不要求由功的定义直接作这种计算。不过了解一下计算思路, 对学习还是有益的。

图 10 - 7 表示一个物体在变力 F 作用下做曲线运动, 由 O 点运动到 O' 点, 怎样计算变力在这个过程中所做的功? 我们可以把曲线分成很多小

段，如图中的 AB 段和 CD 段，每小段都足够短，可以看成直线。这就是说，物体由 A 点运动到 B 点（或者由 C 点运动到 D 点），可看作是沿直线进行的，位移的大小等于 AB 段（或 CD 段）的长度 s_1 （或 s_2 ）。每小段都足够短，物体通过每小段的时间也足够短，在这足够短的时间里，力的变化很小，可以认为力是恒定的。设物体通过 AB 段时变力的大小为 F_1 ，力 F_1 与 AB 段位移之间的夹角为 θ_1 ，则物体通过 AB 段时力 F_1 所做的功为 $W_{AB}=F_1s_1\cos\theta_1$ （图 10 - 8）。同样可以求出物体通过各小段时变力 F 所做的功，如通过 CD 段时所做的功 $W_{CD}=F_2s_2\cos\theta_2$ 等等。把物体通过所有小段时所做的功加在一起，就是变力 F 在整个过程中所做的功。

练习一

（1）在水平道路上匀速前进的汽车受到哪些力作用？其中哪些力做功，哪个力做正功哪些力没有做功？哪个力做负功？

（2）图 10 - 9 表示物体在力 F 作用下在水平面上发生一段位移，试分别计算这三种情况下力 F 对物体所做的功。设在这三种情况下力 F 和位移 s 的大小都相同： $F=10$ 牛， $s=1$ 米。角 θ 的大小如图注中所示。

（3）用起重机把重物从地面匀速地提到 5 米高的地方，重物所受的重力是 2×10^4 牛，钢绳的拉力做多少功？重力做多少功？重物克服重力做的功是多少？

（4）一个物体，所受重力是 10 牛，在水平拉力的作用下，一次在光滑水平面上移动了 0.5 米的距离，另一次在粗糙水平面上移动了相同的距离。粗糙面和物体间的动摩擦因数是 0.2。两次所受的拉力都是 15 牛。在这两种情况下，拉力所做的功是否相同？

（5）一位同学沿倾角为 θ 的斜面向上推一个质量为 m 的空木箱，推上的距离为 s ，推力 F 为斜面平行。木箱受几个力？各力对木箱做功的情况怎样？总功的表达式是怎样的？请完成下述要求。

- 画出题中所述物理情景的示意图。
- 画出木箱的受力图。
- 写出各个力做功的表达式。
- 写出各力做功的代数和即总功表达式。
- 写出合力的表达式。
- 写出合力做功的表达式并与总功的表达式加以比较。

二、功率

不同物体做相同的功，所用的时间往往不同，也就是说，做功的快慢并不相同。一台起重机能在1分钟内把1吨的货物提到预定的高度，而另一台起重机只用30秒就可以做相同的功，第二台起重机比第一台做功快一倍。

在物理学中，做功的快慢用功率来表示。功跟完成这些功所用时间的比值，叫做功率。如果用 W 表示功， t 表示完成这些功所用的时间， P 表示功率，那么

$$P = \frac{W}{t}。$$

在国际单位制中，功率的单位是瓦特，简称瓦，符号是 W 。1瓦=1焦/秒。瓦这个单位比较小，技术上常用千瓦做功率的单位__

$$1 \text{ 千瓦} = 1000 \text{ 瓦}。$$

功率也可以用力 and 速度来表示。在作用力方向和位移方向相同的情况下， $W = Fs$ ，把此式代入功率的公式可得 $P = \frac{Fs}{t}$ ，而 $\frac{s}{t} = v$ ，所以

$$P = Fv。$$

这就是说，力 F 的功率等于力 F 和物体运动速度 v 的乘积。受到力 F 作用的物体做变速运动时，上式中的 v 表示变速运动在时间 t 的平均速度， P 表示力 F 在这段时间 t 内的平均功率。如果时间 t 取得足够小，上式中的 v 表示某一时刻的瞬时速度， P 表示该时刻的瞬时功率。

从公式 $P = Fv$ 可以看出，汽车、火车等交通工具，当发动机的输出功率一定时，牵引力与运动速度成反比，即要增大牵引力就要减小速度。所以，汽车上坡的时候，司机常用换挡的办法减小速度来得到较大的牵引力。保持速度不变时，牵引力与功率成正比。汽车上坡时要保持速度不变，必须加大油门，增大输出功率来得到较大的牵引力。保持牵引力不变时，功率与速度成正比。起重机在竖直方向匀速吊起某一重物时，牵引力与重物所受重力大小相等，发动机输出的功率越大，起吊的速度就越大。

【例题】卡车在水平公路上行驶，发动机的输出功率为66千瓦，卡车所受阻力随行驶速度而增大，在这个输出功率下卡车以最大速度行驶时的阻力为 3.0×10^3 牛。求此最大速度。

分析和解答 卡车在水平方向受到两个力：牵引力 F 和阻力 f 。阻力随速度的增大而增大。设发动机输出功率为 P ，卡车行驶速度为 v ，那么 $P = Fv$ 。卡车刚开动时行驶速度较小，牵引力较大。因行驶速度较小，阻力也较小，这时 $F > f$ ，卡车加速行驶。随着速度 v 的增大，阻力 f 增大，而 F 减小。当达到 $F = f$ 时，卡车的速度不再增加，以最大速度 v_m 匀速行驶。这时发动机的输出功率 $P = Fv_m = fv_m$ 。所以

$$v_m = \frac{P}{f}。$$

代入数值得 $v_m = 22$ 米/秒。

从这个例子可以知道，飞机、轮船、火车、汽车等交通工具匀速行驶的最大速度是受发动机的输出功率限制的，要提高这个最大速度，必须提高发动机的输出功率。

练习二

(1) 一台抽水机每秒钟能把 30 千克的水抽到 10 米高的水塔上去。抽水机的输出功率是多大？半小时能做多少功？

(2) 汽车牵引着高射炮以 36 千米/时的速度匀速前进。汽车发动机的输出功率是 60 千瓦，求汽车和高射炮在前进中所受的阻力。

(3) 一台柴油机装在汽车上，汽车匀速行驶的速度可达 90 千米/时；装在汽船上，汽船匀速行驶的速度可达 20 千米/时。汽车和汽船哪个受的阻力大？二者的阻力之比是多少？

(4) 一台电动机的额定功率是 10 千瓦，用这台电动机匀速提升 2.7×10^3 千克的货物，最大速度是多大？不计空气阻力。

三、动能 动能定理

我们在初中学过，物体由于运动而具有的能叫做动能。物体的动能跟物体的速度和质量都有关系，速度越大，质量越大，动能也越大。怎样定量地来表示动能呢？

动能定理 一架飞机在牵引力的作用下（暂不计阻力），在起飞跑道上加速运动，速度越来越大，表示其动能越来越大。牵引力做多少功，飞机的动能就增加多少，同时就有多少发动机燃汽的内能转化为飞机的动能。现在，我们根据功和能的这种关系来定量地确定物体的动能。

设一个物体质量为 m ，初速度为 v_1 ，在与运动方向相同的恒力 F 的作用下，发生一段位移 s ，速度增加到 v_2 （图 10 - 10）。在这一过程中，外力 F 所做的功 $W=Fs$ 。根据牛顿第二定律有 $F=ma$ ，又根据匀变速运动公式 $v_2^2 - v_1^2 = 2as$ 得 $s = (v_2^2 - v_1^2) / 2a$ 。所以，

$$\begin{aligned}Fs &= ma \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a} \\ &= \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2.\end{aligned}\quad (1)$$

从上式我们看到，力 F 所做的功等于 $\frac{1}{2}mv^2$ 这个量的变化，在物理学中就用 $\frac{1}{2}mv^2$ 这个量表示物体的动能，通常用 E_k 来表示，即

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2。$$

上式表示 物体的动能等于它的质量跟它的速度二次方的乘积的一半。动能和功一样，也是标量。它的单位和功的单位相同，在国际单位制中都是焦耳。这是因为 $1 \text{ 千克} \cdot \text{米}^2 / \text{秒}^2 = 1 \text{ 牛} \cdot \text{米} = 1 \text{ 焦}$ 。

我国发射的第一颗人造地球卫星的质量是 173 千克，轨道速度是 7.2 千米/时，它的动能有多大？

这样，(1) 式就可以写成

$$W = E_{k2} - E_{k1}, \quad (2)$$

其中 E_{k2} 表示末动能 $\frac{1}{2}mv_2^2$ ， E_{k1} 表示初动能 $\frac{1}{2}mv_1^2$ 。

运动员用力把铅球投出去，使铅球由静止而获得 300 焦耳的动能，运动员对铅球做了多少功？

上面我们设外力方向与运动方向相同，导出了关系式 $E = E_{k2} - E_{k1}$ ，这时外力做正功，动能增加。外力方向与运动方向相反时，上式同样适用，这时外力所做的功是负值，动能的变化也是负值。我们知道，外力对物体做负功，往往说成物体克服这个力做了功。因此，对这种情形，也可以说物体克服阻力所做的功等于动能的减少。例如在水平粗糙平面上运动的小

车，在摩擦力的作用下速度减小，这时动能的减少就等于它克服摩擦力所做的功。也就是说，克服摩擦力做了多少功，就有多少动能转化为等量的内能。

上述结论是假定物体只受一个力而推导出来的。如果物体不只受到一个力，而是受到几个力，上述结论仍旧正确。只是外力所做的功是指各个力所做的功的代数和，即外力所做的总功。外力对物体所做的总功等于物体动能的变化。这个结论叫做动能定理。这里所说的外力，既可以是重力、弹力、摩擦力，也可以是任何其他的力。

上面是在物体受恒定外力且做直线运动的情况下得出(2)式的。可以证明，当外力是变力，物体做曲线运动时，(2)式也是正确的。这时(2)式中的W为变力所做的功。总之，不论外力是否为恒力，也不论物体是否做直线运动，外力所做的功，总等于末动能 E_{k2} 与初动能 E_{k1} 之差。正因为如此，所以动能定理有广泛的应用，经常被用来解决有关的力学问题。

【例题】一架喷气式飞机的质量 $m = 5.0 \times 10^3$ 千克，起飞过程中滑跑的距离 $s = 5.3 \times 10^2$ 米，起飞速度 $v = 60$ 米/秒，在此过程中受到的阻力是飞机重的 $k=0.02$ 倍。求起飞过程中的牵引力。

分析和解答 我们从能量的角度分析这个问题。

飞机原来是静止的，初动能 $E_{k1}=0$ 。飞机在水平方向受到的外力是牵引力 F 和阻力 f ，在外力作用下飞机在跑道上滑跑一段距离 s ，外力对飞机做功，飞机的动能增加，速度最后达到起飞速度 v ，飞机的末动能

$$E_{k2} = \frac{1}{2}mv^2。外力所做的总功等于 $Fs - fs$ 。$$

根据动能定理可得

$$Fs - fs = \frac{1}{2}mv^2，$$

其中 $f=kmg$ 。

$$\begin{aligned} \text{由此得} \quad F &= \frac{mv^2}{2s} + f \\ &= \frac{mv^2}{2s} + kmg。 \end{aligned}$$

将已知数据代入，得

$$F = 1.8 \times 10^4 \text{ 牛。}$$

从例题可以看出，利用动能定理来解决力学问题，要明确物体的初动能和末动能，要分析物体的受力情况，并据此列出各个力所做的功，然后才可以利用动能定理来求解。

动能定理对于解决力学问题是很有用的。由于动能定理不涉及物体运动过程中的加速度和时间，因此应用它来处理问题往往比较方便。

本题也可以用牛顿第二定律和匀变速直线运动的公式求解，会得到相同的结果。当你用牛顿第二定律和匀变速直线运动公式求解时，无形中作了这样一个假定，即牵引力是恒力。而动能定理的表达式对变力也适用，即使牵引力不是恒力，也可以应用动能定理，这时求得的力 F 是变力对路程的平均值。知道了这一点，你就会体会到为什么动能定理有广泛的应用了。

练习三

(1) 改变汽车的质量和速度, 都能使汽车的动能发生变化。在下列几种情况下, 汽车的动能各是原来的几倍?

- a. 质量不变, 速度增大到原来的 2 倍。
- b. 速度不变, 质量增大到原来的 2 倍。
- c. 质量减半, 速度增大到原来的 4 倍。
- d. 速度减半, 质量增大到原来的 4 倍。

(2) 质量 10 克、以 0.80 千米/秒的速度飞行的子弹, 质量 60 千克、以 10 米/秒的速度奔跑的运动员, 哪一个动能大?

(3) 以大小相同的速度分别向竖直和水平方向抛出两个质量相等的物体, 抛出时两个物体的动能是否相等? 动量是否相等?

(4) 把一辆汽车的速度从 10 千米/时加快到 20 千米/时, 跟把这辆汽车的速度从 50 千米/时加快到 60 千米/时相比, 哪种情况下要做较多的功? 想想看, 这是为什么?

(5) 在光滑水平面上的物体受到沿着平面的两个力 F_1 和 F_2 的作用(图 10-11)。在下列情况下, 从静止开始移动 2 米时, 物体获得的动能各是多大?

- a. $F_1=10$ 牛, $F_2=0$ 。
- b. $F_1=0$, $F_2=10$ 牛。
- c. $F_1=F_2=5$ 牛。

(6) 质量是 2.0 克的子弹, 以 300 米/秒的速度水平射入厚度是 5 厘米的木板(图 10-12), 射穿后的速度是 100 米/秒。子弹受到的平均阻力是多大?

(7) 一个 30 牛的力水平地作用在 2.0 千克的物体上, 使它在无摩擦的水平面上在力的方向上移动了 3.0 米的距离。画出物体受力的图示, 说明哪个力做功, 哪个力不做功。

后来, 这个力变到 15 牛, 又使物体在力的方向上移动了 2.0 米, 物体增加的动能总共是多少?

四、重力势能

我们在初中学过，物体由于被举高而具有的能叫做重力势能。重力势能跟物体的质量和高度都有关系。质量越大，高度越大，重力势能也越大。怎样定量地表示重力势能呢？

重力势能 把一个物体举高，要克服重力做功，同时，物体的重力势能增加。一个物体从高处下落，重力做功，同时，重力势能减小。可见，重力势能跟重力做功有密切联系。

设一个质量为 m 的物体从高度为 h_1 的 A 点自由下落到高度为 h_2 的 B 点（图 10 - 13）。重力所做的功为

$$W_G = mgh_1 - mgh_2 \quad (1)$$

我们看到 W_G 等于 mgh 这个量的变化，物理学中就用 mgh 这个物理量表示物体的重力势能，通常用 E_p 来表示，即

$$E_p = mgh。$$

物体的重力势能等于物体所受的重力和它的高度的乘积。重力势能也是标量。它的单位也和功的单位相同，在国际单位制中都是焦耳：1 千克·米/秒²·米=1 牛·米=1 焦耳。

体积相同的铝球和铅球，处在同一高度的地方，哪一个重力势能大？

这样，（1）式就可以写成

$$W_G = E_{p1} - E_{p2} \quad (2)$$

其中 $E_{p1} = mgh_1$ 表示初位置的重力势能， $E_{p2} = mgh_2$ 表示末位置的重力势能。当物体由高处运动到低处时，重力做正功， $W_G > 0$ ， $E_{p1} > E_{p2}$ 。这表示，重力做正功时，重力势能减少，减少的重力势能等于重力所做的功。当物体由低处运动到高处时，重力做负功， $W_G < 0$ ， $E_{p1} < E_{p2}$ 。这表示，克服重力做功（重力做负功）时，重力势能增加，增加的重力势能等于克服重力所做的功。

重力势能是不是只能跟动能相互转化？用手托着一个物体，把物体匀速举高，是什么形式的能转化成重力势能？雨滴在天空中匀速下落，重力势能转化成什么形式的能？

重力势能的相对性 我们说物体具有重力势能 mgh ，这总是相对于某一个水平面来说的，这个水平面的高度取作零，重力势能也是零。这个水平面叫做参考平面。通常选择地面作为参考平面。实际上，选择哪一个水平面作为参考平面，可视研究问题的方便而定。例如研究物体沿斜面的运动，选择通过斜面下端的水平面作为参考平面就比较方便。

选择不同的参考平面，物体重力势能的数值是不同的，但这并不影响我们研究问题。我们研究有关重力势能的问题，有确定意义的总是重力势能的差值，而这个差值并不因选择不同的参考平面而有所不同。

对选定的参考平面而言，在参考平面上方的物体，高度是正值，重力势能也是正值；在参考平面下方的物体，高度是负值，重力势能也是负值。

例如，取实验桌的表面作为参考平面（图 10 - 14），在斜面顶端的物体具有正的重力势能 mgh_1 ，在地面上的物体具有负的重力势能 $-mgh_2$ 。说物体具有负的重力势能，只是表示物体在该位置所具有的重力势能比它在参考平面上具有的重力势能要少。这跟用正负温度来表示温度的高低是一样的。关于负的势能我们在今后的学习中将会碰到。

重力做功的特点 在上面的讨论中，物体是沿着直线路径由初位置到达末位置的。可以证明：重力所做的功只跟初位置的高度 h_1 和末位置的高度 h_2 有关，而跟物体运动的路径无关。这就是说，只要起点和终点的位置相同，不论物体沿着什么路径由起点到达终点，沿着直线路径也好，沿着曲线路径也好，重力所做的功都是相同的，且等于物体重力势能的变化。

正因为重力做功具有这个特点，物理学中才能够引入重力势能的概念。设物体在地面上的重力势能为零，如果重力做功与路径有关，即沿着不同路径把物体移至高度为 h 处，克服重力所做的功并不相同，那么，我们将不能说高度为 h 处的物体具有确定的重力势能 mgh 了。

势能也叫位能，是由相互作用的物体的相对位置所决定的。重力势能与重力做功相关，并由地球和地面上物体的相对位置所决定。弹性势能跟发生弹性形变的物体各部分之间的弹力作用相关，并由各部分的相对位置所决定。今后我们还将学到，分子之间由于相互作用而具有能，这种能由分子之间的相对位置决定，叫做分子势能。电荷之间由于电力的相互作用而具有能，这种能由电荷之间的相对位置所决定，叫做电势能。弹力、分子力、电力所做的功也具有与路径无关的特点。

设一个质量是 m 的物体，从原来高度是 h_1 的 A 点自由下落到高度是 h_2 的 B 点，再水平移到 C 点（图 10 - 15）。物体水平移动中重力并不做功，所以在整个过程中重力对物体所做的功就等于物体由 A 点自由下落到 B 点中重力所做的功：

$$W_G = mgh_1 - mgh_2$$

如果让这个物体沿着斜面滑下（图 10 - 16），从原来高度是 h_1 的 A 点滑到高度是 h_2 的 C 点，物体沿斜面滑下的距离是 s ，重力所做功是

$$W_G = mgs \sin\theta = mgh_1 - mgh_2$$

现在我们来看这个物体沿着任一路径 AC 从原来高度是 h_1 的 A 点运动到高度是 h_2 的 C 点，重力所做的功是多少（图 10 - 17）。我们把路径 AC 分成许多很短的间隔 $AA_1, A_1A_2, A_2A_3, \dots$ 使每个间隔都相当于一个斜面。设每个小斜面的高度是 h_1, h_2, h_3, \dots 物体通过每个小斜面时重力所做的功是 $mg h_1, mg h_2, mg h_3, \dots$ 物体通过路径 AC 时重力所做的功等于重力在每个小斜面上所做的功的代数和，即

$$\begin{aligned} W_G &= mg h_1 + mg h_2 + mg h_3 + \dots \\ &= mgh \\ &= mgh_1 - mgh_2 \end{aligned}$$

我们看到，重力对物体所做的功只跟起点 A 和终点 C 的位置有关，而跟物体运动的路径无关，也就是说，只要起点和终点的位置相同，不论物体沿着什么路径运动，重力所做的功都相同。

摩擦力做功与路径有没有关系？举例说明。

练习四

(1) 质量是 2 千克的物体位于 0.8 米的桌面上，这个物体具有多少重力势能？

(2) 质量是 50 千克的人，沿着长 150 米，倾角为 30° 的坡路走上土丘时，重力对他所做的功是多少？他克服重力所做的功是多少？他的重力势能增加了多少？

(3) 图 10 - 18 是几个斜面，它们的高度相同，而倾角不同。让质量相同的物体沿斜面由静止从顶端运动到底端。试根据功的公式来计算沿不同斜面重力所做的功，证明这个功跟斜面的倾角无关。如果不计摩擦和空气阻力，物体到达斜面底端的速度是多大？

(4) 一只 100 克的球从 1.8 米的高处落到一个水平板上又弹回到 1.25 米的高度。求在整个过程中重力对球所做的功。球的重力势能变化了多少？

(5) 图 10 - 19 表示一个斜抛物体的运动，物体的质量为 m 。

a. 当物体由抛出位置 1 运动到最高位置 2 时，重力所做的功是多少？物体克服重力所做的功是多少？物体的重力势能增加了多少？

b. 由位置 2 运动到跟位置 1 在同一水平面上的位置 3 时，重力所做的功是多少？物体的重力势能减少了多少？

c. 由位置 1 运动到位置 3 时，重力所做的功是多少？物体的重力势能变化了多少？

d. 如果不计空气阻力，物体在位置 1 的速度 v_1 和在位置 3 的速度 v_3 ，大小是否相同？

五、机械能守恒定律

我们在初中学过，重力势能和动能之间可以发生相互转化。物体自由下落时，速度越来越大，表示物体的动能增加；同时，高度越来越小，表示重力势能减小。这时，重力势能转化成动能。在竖直上抛物体的上升运动中，速度越来越小，表示物体的动能减小；同时，高度越来越大，表示重力势能增加。这时，动能转化为重力势能。这一节，我们定量地研究这种转化。

自由落体运动中能的转化 如图 10 - 20 所示，设一个质量为 m 的物体，从高度是 h_1 的 A 点（初位置）自由下落到高度是 h_2 的 B 点（末位置），初位置的速度为 v_1 ，末位置的速度为 v_2 。在自由落体运动中，物体只受重力 $G=mg$ 的作用，重力做正功。设重力所做的功为 W_G ，则由动能定理可得

$$W_G = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2. \quad (1)$$

(1) 式表示，重力所做的功等于动能的增加。另一方面，我们由重力做功与重力势能的关系知道，

$$W_G = mgh_1 - mgh_2. \quad (2)$$

(2) 式表示重力所做的功等于重力势能的减少。可见，在自由落体运动中，重力做了多少功，就有多少重力势能转化为等量的动能。

竖直上抛运动上升过程中能的转化 上升过程中，物体只受重力的作用。设物体由初位置 A 上升到末位置 B，在此过程中重力做负功（图 10 - 21）。由动能定理可得

$$W_G = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2. \quad (1)'$$

(1)' 式中 W_G 为负值，这表示克服重力所做的功等于动能的减少。由重力做功与重力势能的关系知道，

$$W_G = mgh_1 - mgh_2. \quad (2)'$$

(2)' 式表示，克服重力所做的功等于重力势能的增加。可见，在竖直上抛运动上升过程中，克服重力做了多少功，就有多少动能转化成等量的重力势能。

结论 由 (1) 式和 (2) 式，或者由 (1)' 式和 (2)' 式，我们得到

$$\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = mgh_1 - mgh_2,$$

移项后得到

$$\frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2 = \frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1. \quad (3)$$

上式表示，在自由落体运动或竖直上抛运动上升过程中，动能和重力势能相互转化，但在运动的任何时刻，动能和重力势能之和，也就是总的机械能，保持不变。

上述结论不仅对自由落体运动和竖直上抛运动是正确的，可以证明，在只有重力做功的情形下，不论物体做直线运动还是曲线运动，它总是正

确的。所谓只有重力做功，是指：物体只受重力，不受其他的力，如自由落体运动和各种抛体运动的情形；或者除重力而外还受其他的力，但其他力并不做功，物体沿光滑斜面运动就属于这种情形。

在只有重力做功的情形下，物体的动能和重力势能发生相互转化，但机械能的总量保持不变。这个结论叫做机械能守恒定律，它是力学中一条重要规律，又是更普遍的能的转化和守恒定律的一个特例。

不仅重力势能和动能可以互相转化，弹性势能和动能也可以互相转化。放开一个被压缩的弹簧，它可以把一个跟它接触的小球弹出去，这时弹力做功，弹簧的弹性势能减少，转化为小球的动能。放开被拉开的弓，把箭射出去，这时弓的弹性势能减少，转化为箭的动能。在弹性势能跟动能的相互转化中，如果只有弹力做功，动能和弹性势能之和，即总的机械能，也保持不变。

练习五

(1) 在下面列举的各个实例中，除 a 外都不计空气阻力，哪些情况机械能是守恒的？说明理由。

a. 跳伞员带着张开的降落伞在空气中匀速下落。

b. 抛出的手榴弹或标枪做斜抛运动。

c. 拉着一个物体沿着光滑的斜面匀速上升（图 10 - 22 甲）。

d. 在光滑水平面上运动的小球，碰到弹簧上，把弹簧压缩后又被弹簧弹回来（图 10 - 22 乙）。

(2) 做下面的实验。把物体拴在细线上悬挂起来，做成一个单摆（图 10 - 23）。把物体从平衡位置 O 拉到 B，放手后观察物体的来回摆动。把铅笔放在位置 1 和 2，可以看到物体仍然要升到跟 B 同样高的 C_1 和 C_2 。解释这个现象。

六、机械能守恒定律的应用

解决某些力学问题，从能量的观点来分析，应用机械能守恒定律来求解，往往带来方便。应用机械能守恒定律来解决力学问题，也要先分析物体的受力情况。在动能和重力势能的相互转化中，如果只有重力做功，其他力不做功，就可以应用机械能守恒定律。

【例题 1】物体从 1 米高、2 米长的光滑斜面顶端开始无摩擦地滑下(图 10 - 24)，到达斜面底端时的速度是多大？(空气阻力不计)

分析和解答 斜面是光滑的，没有摩擦，又不计空气阻力，斜面对物体的支持力与物体的运动方向垂直，不对物体做功，因而物体在下滑过程中只有重力做功，机械能是守恒的。

题中没有给出物体的质量，但可以设物体的质量为 m 。物体在开始下滑时， $E_{p1} = mgh$ ， $E_{k1} = 0$ ，初状态的机械能 $E_1 = E_{p1} + E_{k1} = mgh$ ；到达斜面

底端时物体的速度是 u ， $E_{p2} = 0$ ， $E_{k2} = \frac{1}{2}mv^2$ ，末状态的机械能 $E_2 = E_{p2}$

$+ E_{k2} = \frac{1}{2}mv^2$ 。

根据机械能守恒定律 $E_2 = E_1$ 有

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

由此可得 $\frac{1}{2}mv^2 = mgh$ 。

$$v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 9.8 \times 1} \text{米 / 秒} = 4.4 \text{米 / 秒}。$$

这个问题，应用牛顿运动定律和运动学公式求解，也可以得到同样的结果。但是应用机械能守恒定律，在解决问题的思路和步骤上都要简单得多。

机械能守恒定律，是应用牛顿运动定律推得的。然而在有些情况下，直接应用牛顿运动定律讨论问题，要涉及变化相当复杂的合外力，这时机械能守恒定律的优点就更明显了。在上述例子里，如果把斜面换成光滑的曲面(图 10 - 25)，同样可以应用机械能守恒定律求解，而直接应用牛顿运动定律，由于物体在曲面上受的合外力是时刻变化的，处理起来就困难得多。我们来看下面一个例题。

【例题 2】一个摆长是 l 的单摆，最大偏角是？。求单摆在最低位置的速度(图 10 - 26)。

分析和解答 这个问题直接用牛顿第二定律和运动学的知识来处理，需要用高等数学。现在用机械能守恒定律来处理。

摆锤受到两个力：重力和悬线的拉力。悬线的拉力始终垂直于摆锤的运动方向，不做功，所以单摆的机械能守恒。

选择摆锤在最低点时所在的水平面作参考平面。摆锤在最高点时为初状态，这时摆锤的动能 $E_{k1} = 0$ ，重力势能 $E_{p1} = mg(l - l\cos\theta)$ ，机械能 $E_1 = mg(l - l\cos\theta)$ 。摆锤在最低点时为末状态，这时摆锤的动能 $E_{k2} =$

$\frac{1}{2}mv^2$ ，重力势能 $E_{p2} = 0$ ，机械能 $E_2 = \frac{1}{2}mv^2$ 。根据机械能守恒定律

$E_2 = E_1$ 有

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

由此得

$$\frac{1}{2}mv^2 = mg(1 - \cos\theta),$$
$$v = \sqrt{2gl(1 - \cos\theta)}.$$

由这两个例子可以看出，应用机械能守恒定律，允许我们只讨论运动的初状态和末状态，而不必考虑这两个状态之间过程的细节，可以避免直接应用牛顿定律遇到的困难，也简化了解决问题的步骤。在这一点上，机械能守恒定律跟我们学过的动量守恒定律是相同的。

守恒定律不仅给处理问题带来方便，而且有更深刻的意义。自然界千变万化，但是人们发现有些物理量在一定条件下是守恒的，可以用这些“守恒量”来表示物理世界变化的规律，这就是守恒定律。机械能守恒定律以及上一章学过的动量守恒定律就是其中的两个。正因为自然界存在着“守恒量”，而且某些守恒定律的适用范围很广泛，所以在物理学中寻求“守恒量”已经成为物理学研究工作的一个重要方面。我们学习物理，也要学会运用守恒的观点来处理问题。

练习六

(1) 蒸汽打桩机的重锤的质量是 250 千克，把它提升到离地面 25 米高处，然后让它自由落下。计算：

- 重锤在最高点的动能、重力势能和机械能。
- 重锤下落 10 米时的重力势能、动能和速度。
- 重锤落到地面时的重力势能、动能和速度。

(2) 把一块质量是 3.0 千克的石头，从 20 米高的山崖上以 30° 角、5.0 米/秒的速度朝斜上方抛出（图 10 - 27），求石头落地时速度的大小。（空气阻力不计）

讨论一下：石头落地时速度的大小与下列哪些量有关系？与哪些量没有关系？为什么？

- 石块的质量。
- 石块抛出时的速度大小。
- 石块抛出时的速度方向（抛射角）。
- 石块抛出时的高度。

(3) 在本节例题 2 中，是选择摆锤的最低点所在的水平面为参考平面的，现在选择图 10 - 26 中 B 点所在的水平面作参考平面。

- 摆球在 B 点时重力势能 $E_{p1} =$ _____，动能 $E_{k1} =$ _____，机械能 $E_1 =$ _____。
- 在最低点 O 时重力势能 $E_{p2} =$ _____，动能 $E_{k2} =$ _____，机械能 $E_2 =$ _____。
- 由 $E_1 = E_2$ ，求出 $\theta =$ _____。
- 与例题 2 的结论相同吗？你由此能作出什么结论？

(4) 一个物体从距地面 40 米的高处自由落下，经过几秒钟后，该物体的动能和重力势能相等？（g 取 10 米/秒²）

(5) 有一种地下铁道，站台建得高些，电车进站时要上坡，出站时要下坡（图 10 - 28）。设站台高度 $h=2$ 米，进站的列车到达 A 点时的速度为 25.2 千米/时，此后随即切断电动机的电源，列车能不能冲到站台上？如果能冲上，在站台上的速度是多大？（不考虑摩擦阻力， g 取 10 米/秒²）

七、功是能量转化的量度

做功的过程就是能量转化的过程，做了多少功，就有多少能量发生了转化。

只有重力做功时，重力势能和动能发生相互转化。重力做了多少功，就有多少重力势能和动能发生转化，而总的机械能保持不变。如果除了重力，还有其他力做功，物体的动能和重力势能之和，即物体的机械能，就要发生变化。

列车在机车的牵引下匀速上坡，列车的动能虽然没有改变，但重力势能越来越大，机械能不断增加。列车机械能的增加，是因为牵引力对它做了功，牵引力做了多少功，列车的机械能就增加多少。在这个过程中，机车的热机消耗了内能。牵引力做了多少功，就有多少内能转化成等量的列车的机械能。

起重机加速提升重物，重物的动能和重力势能都越来越大，机械能不断增加。重物机械能的增加，是因为钢索的拉力对它做了功。在这个过程中，带动钢索的电动机消耗了电能。钢索的拉力做了多少功，就有多少电能转化成等量的重物的机械能。

跳伞运动员在张开降落伞后匀速下降，动能没有变化，重力势能越来越小，他的机械能不断减小。跳伞运动员机械能的减少，是因为他克服空气阻力做了功。在这个过程中，因摩擦生热而增加了内能。克服空气阻力做了多少功，就有多少机械能转化成等量的内能。

子弹射入墙壁，最后停止在墙里，子弹的机械能减少。子弹机械能的减少，是因为它克服摩擦力做了功，克服摩擦力做了多少功，就有多少机械能转化成等量的内能。

能量既不能凭空产生，也不能无影无踪地消失，不同形式的能量在相互转化中保持守恒。做功的过程，就是能量转化的过程。在机械能（动能和重力势能）守恒的运动中，重力做了多少功，就有多少重力势能和动能发生转化。在机械能（动能和重力势能）不守恒的运动中，重力而外的其他力做了多少功，就有多少机械能和其他形式的能发生转化。因此，功是能量转化的量度。

你能举出实例说明本节的中心论点吗？

练习七

(1) 两个儿童分别从同样高度、不同长度的两个滑梯上滑下，谁滑到底端时的速度大？他们各自的机械能守恒吗？如果不守恒，机械能哪里去了？试就摩擦阻力可以忽略和不能忽略的两种情况进行分析（假定这两个儿童与滑梯间的摩擦系数相同）。

(2) 一台起重机加速提升货物，将 200 千克的货物由地面提升到 10 米高处，钢索对重物的牵引力是 2.5×10^3 牛。

a. 在这一过程中，合力对重物做了多少功（不计空气阻力）？重物的动能增加了多少焦？

b. 在这一过程中，重力做了多少功？是正功还是负功？重力势能改变

了多少，是增加还是减少？

c. 在这一过程中，机械能是否守恒？

d. 牵引力(除重力而外的力)做了多少功？机械能改变了多少？是增加还是减少？

(3) 上题中如果起重机钢索是由电动机带动的，电动机输出的能量有80%用来提升重物(做有用功)，那么，提升这个重物要用多长时间？在这一过程中，至少要消耗多少电能？电动机的平均输出功率是多少千瓦？

(4) 图 10 - 29 表现了撑杆跳运动的几个阶段：助跑、撑杆起跳、越横杆，试定性说明撑杆跳运动员在这几个阶段中能量的转化情况。

本章小结

这一章我们在初中的基础上进一步讨论了功、能量以及功和能量的关系，学习了动能定理和机械能守恒定律，学习了如何从能量的转化和守恒的观点处理问题。

(1) 做功的两个不可缺少的因素是什么？计算功的公式是什么？在什么情况下做正功，在什么情况下做负功？

(2) 什么是功率？计算功率的公式是怎样的？

(3) 什么是动能？它与哪些因素有关？动能定理的内容是什么？在处理力学问题时，什么情况下，应用动能定理比应用牛顿定律及运动学公式方便？

(4) 什么是重力势能？重力势能的改变跟重力做功有什么关系？什么是弹性势能？

(5) 在什么条件下机械能守恒定律(不包括弹性势能，下同)成立？为什么用机械能守恒定律来处理问题有时十分简便？举例说明。

(6) 如果物体只受到重力的作用(各种抛体运动)，在重力做正功的过程中，能量的转化情况是怎样的？在重力做负功的过程中，能量的转化情况又是怎样的？

如果除了重力做功，还有其他力对物体做功，这时重力势能跟重力做功的关系是怎样的？例如，一个物体在重力和空气阻力的作用下，竖直加速下落，由 A 点下落到另一点 B，重力对物体做了 10 焦耳的功，这时重力势能减少多少焦耳？减少的重力势能转化成了什么能量？

(7) 功是能量的转化的量度，应当怎样理解这一论断？试举出几个实例来说明。

习 题

A 组

(1) 一物体在相同的水平恒力作用下，分别沿粗糙的水平地面和光滑的水平地面在力的方向上移动了相同的距离。设该恒力在 2 个水平面上做的功分别为 W_1 和 W_2 ，那么下列说法中正确的是哪个？

A. $W_1 = W_2$.

B. $W_1 > W_2$.

C. 无法确定。

(2) 用起重机将质量为 m 的物体匀速地吊起一段距离，那么作用在物体上的各力的做功情况应该是下列说法的哪一种？

A. 重力做正功，拉力做负功，合力做功为零。

B. 重力做负功，拉力做正功，合力做正功。

C. 重力做负功，拉力做正功，合力做功为零。

D. 重力不做功，拉力做正功，合力做正功。

(3) 当重力对物体做正功时，物体的重力势能和动能可能的变化情况，下面哪个说法对？

A. 重力势能一定增加，动能一定减小。

B. 重力势能一定减小，动能一定增加。

C. 重力势能一定减小，动能不一定增加。

D. 重力势能不一定减小，动能一定增加。

(4) 一个原来静止的物体，在力 F 的作用下，沿着力的方向移动一段距离 s ，得到速度 v 。如果移动的距离不变，力 F 增大到 n 倍，得到的速度也增大到 n 倍。这话对吗？速度应该增大到多少倍？

(5) 在水平面上有两个质量不同而具有相同动能的物体，它们在阻力作用下最后停下来，设它们所受的阻力相等。这两个物体停止前经过的距离是否相同？停下来所用的时间是否相同？

(6) 以下说法是否正确？说明理由。

A. 一个物体做匀速运动时，它的机械能一定守恒。

B. 一个物体所受的合外力不等于零时，它的机械能可能守恒。

C. 一个物体所受的合外力为零时，它的机械能一定守恒。

(7) 质量为 1000 千克的汽车以 10 米/秒的速度在倾角为 15° 的斜坡上匀速向上行驶。求：

a. 1 秒内汽车的重力势能增加了多少；

b. 1 秒内汽车牵引力所做的功。（假设克服摩擦力所做的功可以忽略不计）

(8) 竖直向上抛出质量为 100 克的石块，石块上升时空气阻力可以忽略不计，石块离手时的速度是 9.8 米/秒。求：

a. 石块离手时的动能；

b. 石块能够上升的最大高度；

c. 石块上升到最大高度时的重力势能。

B 组

(1) 一颗子弹以 700 米/秒的速度打穿第一块木板后，速度减低到 500 米/秒。如果让它继续打穿第二块同样的木板，它的速度将变为多大？它能否再打穿第三块同样的木板？

(2) 雪橇在重力作用下，从静止开始，沿一个倾角 5° 的冰坡下滑 100 米，然后又沿相同倾角的冰坡上升，前进了 60 米才停下来。求雪橇与冰面之间的动摩擦因数。

(3) 一辆 5 吨的载重汽车开上一个坡路，坡路长 $S = 100$ 米，坡顶和

坡底的高度差 $h = 10$ 米。汽车上坡前的速度是 10 米/秒，上到坡顶时减为 5.0 米/秒。汽车受到的摩擦阻力是车重的 0.05 倍。求汽车的牵引力。取 $g = 10$ 米/秒²。

讨论：在这个题目里，汽车的牵引力做多少功？汽车增加的机械能是多少？其中动能和重力势能各是多少？克服摩擦而转化成的内能是多少？

(4) 质量为 m 的物体，在距地面 h 高处以 $\frac{g}{3}$ 的加速度由静止竖直下落到地面。下列说法中哪些是正确的？

A. 物体的重力势能减少 $\frac{1}{3}mgh$ 。

B. 物体的机械能减少 $\frac{2}{3}mgh$ 。

C. 物体的动能增加 $\frac{1}{3}mgh$ 。

D. 重力做功 mgh 。

(5) 以 10 米/秒的初速度竖直向上抛出一个质量为 0.5 千克的物体，物体上升的最大高度为 4 米。设阻力的大小恒定，求上升过程中空气阻力对物体做的功和小球落回抛出点的动能。整个过程中有多少机械能转化为内能？

(6) 某海湾共占面积 1.0×10^7 米²，涨潮时水深 20 米，此时关上水坝闸门，可使水位保持 20 米不变。退潮时，坝外水位降至 18 米。假如利用此水坝建水力发电站，重力势能转变为电能的效率是 10%，每天有两次涨潮。该电站一天能发出多少电能？

第十一章 匀速圆周运动 万有引力定律

我们已经学过在平衡力作用下的匀速直线运动，在大小和方向都不变的恒力作用下的变速运动。从这一章开始我们学习在变力作用下的运动。这一章学习匀速圆周运动——在大小不变而方向改变的变力作用下的运动。下一章学习简谐振动——在大小和方向都改变的变力作用下的运动。这两种运动是在变力作用下的最基本的周期性运动。

通过这两章的学习，你将进一步认识到牛顿运动定律对不同的机械运动是普遍适用的，并将体会到研究不同的运动要注意它们的特点。

一、匀速圆周运动

物体沿圆周运动是一种常见的曲线运动，在圆周运动中，最简单的是匀速圆周运动。

质点沿圆周运动，如果在相等的时间里通过的圆弧长度相等，这种运动就叫做匀速圆周运动。例如，砂轮上某一点的运动，洗衣机脱水筒上某一点的运动，电风扇叶片上某一点的运动，都可以看作匀速圆周运动。地球和各个行星绕太阳公转的轨道是椭圆，它们跟圆近似，在初步研究中，也可以认为行星以太阳为圆心做匀速圆周运动。

怎样描述匀速圆周运动的快慢呢？

线速度 匀速圆周运动的快慢，可以用线速度来描述。根据匀速圆周运动的定义，物体运动的时间 t 增大几倍，通过的弧长 s 也增大几倍，对某一确定的匀速圆周运动来说， s 与 t 的比值不变。这个比值越大，单位时间内通过的弧长越长，表示运动得越快。这个比值称为匀速圆周运动的线速度的大小，用符号 v 表示，则有

$$v = \frac{s}{t}。$$

线速度是相对于下面就要讲到的角速度而命名的，其实它就是物体做圆周运动的瞬时速度。线速度是矢量，不仅有大小，而且有方向。在匀速圆周运动中，物体在各个时刻的线速度的大小都相同，并由上式来确定。而线速度的方向是时刻改变的，在圆周上某一点的线速度的方向就在圆周该点的切线方向上（图 11 - 1）。

对某一确定的匀速圆周运动来说，虽然线速度的方向不断变化，但是线速度的大小保持不变。所以匀速圆周运动是线速度大小不变的圆周运动。

角速度 匀速圆周运动的快慢也可以用角速度来描述。物体在圆周上运动得越快，连接运动物体和圆心的半径在同样的时间内转过的角度就越大。所以匀速圆周运动的快慢也可以用半径转过的角度跟所用时间 t 的比值来描述（图 11 - 2）。这个比值叫做匀速圆周运动的角速度，用符号 ω 来表示，则有

$$\omega = \frac{\phi}{t}。$$

我们知道，圆心角 ϕ 与弧长 s 成正比，所以对某一确定的匀速圆周运动来说， ω 与 t 的比值是恒定不变的。匀速圆周运动也是角速度不变的圆周运动。

角速度的单位由角度和时间的单位决定。在国际单位制中，角速度的单位是弧度/秒，符号是 rad/s。

周期 做匀速圆周运动的物体运动一周所用的时间叫做周期。周期用符号 T 表示。周期也是描述匀速圆周运动快慢的物理量，周期长说明物体运动得慢，周期短说明物体运动得快。

实际中也常用转数来描述匀速圆周运动的快慢。所谓转数，是指每分钟转过的圈数，常用符号 n 来表示。转数的单位为转/分。

半径 10 厘米的砂轮，每 0.2 秒转一圈。砂轮边缘上某一质点，它做匀速圆周运

动的线速度的大小是多大？角速度是多大？砂轮上离转轴不同距离的质点，它们做匀速圆周运动的线速度是否相同？角速度是否相同？周期是否相同？

线速度、角速度、周期间的关系 线速度、角速度和周期都可以用来描述匀速圆周运动的快慢，它们之间的关系是怎样的呢？

设物体沿半径为 r 的圆周做匀速圆周运动，则一个周期 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

$$v = \frac{2\pi r}{T}, \quad (1)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}. \quad (2)$$

由 (1) 式和 (2) 式可得

$$v = r\omega. \quad (3)$$

由以上三式可以看出描述匀速圆周运动快慢的三个物理量之间的关系。(3) 式表示，在匀速圆周运动中，线速度的大小等于角速度的大小与半径的乘积。当半径一定时，线速度与角速度成正比；当角速度一定时，线速度与半径成正比。

质点做匀速圆周运动时，瞬时速度的大小虽然不变，瞬时速度的方向却是时刻改变的，因此它跟一般的曲线运动一样，是一种变速运动。匀速圆周运动一词中的“匀速”，只是速率不变的意思。

练习一

(1) 对于做匀速圆周运动的物体，下面哪些说法是对的？哪些说法是错的？

- 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) 月球绕地球公转的轨迹接近于圆形，它的轨道半径是 3.84×10^5 千米，公转周期是 27.3 天。月球绕地球公转的速度是多少千米/秒？

(3) 地球自转的角速度是多大？

(4) 走时准确的大钟和小钟，它们分针针尖上一质点做匀速圆周运动的周期、角速度都一样吗？线速度的大小呢？

(5) 电唱机转盘的转数 (转/分) 有 $16\frac{2}{3}$ 、 $33\frac{1}{3}$ 、45 和 78 四档。

求每一档的周期和角速度。

二、向心力 向心加速度

向心力 我们在第五章学过，物体做曲线运动时，必定受到与速度方向不在同一直线上的合外力的作用。匀速圆周运动是曲线运动，做匀速圆周运动的物体必定也受到与速度方向不在同一直线上的合外力的作用。这个合外力是怎样的呢？

先来看合外力的方向。如图 11-3 所示，在光滑水平桌面的 O 点固定一根钉子，把绳的一端套在钉子上，另一端系一个小球，使小球在桌面上做匀速圆周运动。小球之所以能绕着 O 点做匀速圆周运动，是因为绳对小球始终有一个拉力 f ，这个拉力的方向虽然不断变化，但总是沿半径指向圆心，所以叫做向心力。做匀速圆周运动的物体，始终受到向心力的作用。如果将钉子拔掉，向心力消失，小球就沿着圆周的切线飞出（图 11-4）。

向心力指向圆心，而物体运动的方向沿切线方向，所以向心力的方向总与物体运动的方向垂直。物体在运动方向上不受力，在这个方向上没有加速度，速度大小不会改变。所以向心力的作用只是改变速度的方向。

向心力的大小与哪些因素有关呢？具体的关系又是什么呢？让我们来做定性的实验。

用手握住系有小球的细绳，转动绳子使小球在光滑的水平桌面上做圆周运动。这时可以感觉到绳对手有拉力，这个拉力的大小等于小球所受向心力的大小。保持半径 r 不变，增大角速度 ω ，可以感觉到绳对手的拉力增大；保持角速度 ω 不变，增大半径 r ，也可以感觉到绳对手的拉力增大。换用另外一个质量大的小球，跟原来那个小球相比，在角速度 ω 和半径 r 相同时，同样可以感觉到绳对手的拉力增大。这表明，向心力的大小跟物体的质量 m 、圆周半径 r 和角速度 ω 都有关系。

可以证明，匀速圆周运动所需的向心力大小为

$$F = m\omega^2 r \quad (1)$$

在许多情况下，需要知道线速度的大小与向心力的关系。这个关系可以用线速度与角速度的关系求出来。将 $\omega = \frac{v}{r}$ 代入 (1) 式，得

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

向心加速度 做圆周运动的物体，在向心力 F 的作用下，必然要产生一个加速度，这个加速度的方向与向心力的方向相同，总指向圆心，叫做向心加速度。根据牛顿第二定律 $F=ma$ ，由 (1) 式和 (2) 式可得向心加速度 a 的大小为

$$a = \omega^2 r, \quad (3)$$

或

$$a = \frac{v^2}{r} \quad (4)$$

对于某一确定的匀速圆周运动来说， m 以及 r 、 ω 、 v 都是不变的，所以向心力和向心加速度的大小不变，但向心力和向心加速度的方向却时刻在改变。匀速圆周运动是瞬时加速度矢量的方向不断改变的变速运动。

向心力和向心加速度的公式虽然是从匀速圆周运动得出的，但也适用于变速圆周运动，即线速度（或角速度）的大小时刻改变的圆周运动。在

变速圆周运动中，向心力和向心加速度的大小是随着线速度（或角速度）的大小而变化的。利用上面的公式求质点在圆周上某一点的向心力和向心加速度的大小，必须用该点的瞬时速度值。

思考与讨论

一个圆盘可绕通过圆盘中心 O 且垂直于盘面的竖直轴转动。在圆盘上放置一个小木块 A ，它随圆盘一起运动——做匀速圆周运动（图 11 - 5）。木块受几个力的作用？各是什么性质的力？方向如何？

· 小实验 ·

研究向心力

在尼龙绳的一端拴一个橡皮塞，绳的另一端穿过圆珠笔杆拴在测力计上，测力计的下端固定，握住笔杆抡动橡皮塞，使它做匀速圆周运动（图 11 - 6）。这时，尼龙绳的拉力是使橡皮塞做圆周运动的向心力（重力的方向几乎跟绳的拉力方向垂直，可以略去不计），这个向心力的大小可以从测力计上读出。

使橡皮塞的角速度 增大或减小，看看向心力是变大，还是变小。改变半径 r ，尽量使角速度保持不变，看看向心力怎样变化。换个橡皮塞，即改变橡皮塞的质量 m ，而保持半径 r 和角速度 不变，看看向心力怎样变化。

*三、向心加速度公式的推导

如图 11 - 7 甲所示，设质点沿半径为 r 的圆周做匀速圆周运动，在某时刻 t 位于 A 点，速度为 v_A ，经过很短的时间 Δt ，运动到 B 点，速度为 v_B 。把速度矢量 v_A 和 v_B 的始端移至一点，根据三角形法求出速度矢量的改变量 Δv ，如图 11 - 7 乙所示。

比值 $\Delta v / \Delta t$ 是质点在 Δt 时间内的平均加速度，方向与 Δv 的方向相同。当 Δt 足够短，或者说 Δt 趋近于零时， $\Delta v / \Delta t$ 就表示出质点在 A 点的瞬时加速度。在图 11 - 7 乙所示矢量三角形中， v_A 和 v_B 的大小相等，当 Δt 趋近于零时， Δv 也趋近于零， Δv 的方向趋近于跟 v_A 垂直而指向圆心。这就是说，做匀速圆周运动的质点在任一点的瞬时加速度，方向都沿半径指向圆心。

图 11 - 7 乙中的矢量三角形与图 11 - 7 甲的三角形 OAB 是相似形。用 Δv 表示 v_A 和 v_B 的大小，用 Δs 表示弦 AB 的长度，则有

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta s}{r} \text{ 或 } \Delta v = \Delta s \frac{v}{r}.$$

用 Δt 除上式得

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \cdot \frac{v}{r}.$$

当 Δt 趋近于零时， $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ 表示向心加速度 a 的大小， $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ 表示线速度的大小 v ，于是得到

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

这就是向心加速度的公式。再由 $F = ma$ 就可以得出上一节中的向心加速度和向心力的公式。

练习二

(1) 一个 3.0 千克的物体在半径为 2.0 米的圆周上以 4.0 米/秒的速度运动，所需向心力多大？向心加速度多大？

(2) 地球绕太阳公转的运动可以近似地看做匀速圆周运动，地球距太阳约 1.5×10^8 千米，地球公转时的向心加速度为多大？

(3) 图 11 - 8 所示的皮带传动装置中，主动轮的半径 r_1 大于从动轮的半径 r_2 。轮缘上的 A 点和 B 点的向心加速度哪一个大？为什么？A 点和 r_1 的中点 C 的向心加速度哪一个大？为什么？

(4) 从 $a = rw^2$ 看， a 跟 r 成正比，从 $a = \frac{v^2}{r}$ 看， a 跟 r 成反比。如果有人问你：“向心加速度的大小跟半径成正比，还是成反比？”应该怎样回答？

(5) 线的一端拴一个重物，手执线的另一端使重物做匀速圆周运动，当转数相同时，线长易断，还是线短易断？

(6) 如图 11 - 9 所示，被一细绳系住的小球，质量为 50 克，小球在

水平面内做匀速圆周运动，半径 $r=0.2$ 米，小球转数为 120 转/分。求小球受到的向心力的大小，并回答这一向心力是由什么力提供的。

(7) 向心力对做匀速圆周运动的物体是否做功？为什么？试从功的定义以及功能关系两方面加以说明。

四、匀速圆周运动的实例分析

研究匀速圆周运动的问题，需要分析运动物体的受力情况，弄清楚向心力的来源，这是解决问题的关键。有的同学认为，做匀速圆周运动的物体除了受到另外物体的作用，还要受到一个向心力的作用。这是不对的。向心力是按效果命名的力，任何一个力或几个力的合力，只要它的作用效果是使物体产生向心加速度，它就是物体所受的向心力。下面分析两个具体例子。

火车转弯 在平直轨道上匀速行驶的火车，所受的合外力等于零。在火车转弯时，是什么力做为向心力呢？原来，火车的车轮上有凸出的轮缘（图 11 - 10），如果转弯处内外轨一样高，外侧车轮的轮缘挤压外轨，使外轨发生弹性形变，外轨对轮缘的弹力就是使火车转弯的向心力（图 11 - 11）。火车的质量很大，靠这种办法得到向心力，轮缘与外轨间的相互作用力要很大，铁轨很容易受到损坏。

如果在转弯处使外轨略高于内轨，火车驶过转弯处时，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 F 指向圆心，成为使火车转弯的力。这就减轻了轮缘与外轨的挤压。在修筑铁路时，要根据转弯处轨道的半径和规定的行驶速度，适当选择内外轨的高度差，使转弯时所需的向心力完全由重力 G 和支持力 N 的合力 F 来提供（图 11 - 12）。这样，外轨就不受轮缘的挤压了。

铁路转弯处的圆弧半径是 300 米，轨距是 1435 毫米，规定火车通过这里的速度是 72 千米/时，内外轨的高度差应该是多大，才能使外轨不受轮缘的挤压？

杂技节目“水流星” 许多同学都看过杂技演员表演的“水流星”。一根绳子系着盛水的杯子，演员抡起绳子，杯子就做圆周运动，而且水不从杯里洒出。甚至杯子在竖直面内运动到最高点时，已经杯口朝下，水也不会从杯里洒出来。为什么杯子运动到最高点时，水不会下流呢？

如图 11 - 13 所示，当杯子以速度 v 转过竖直圆周的最高点时，杯中的水做圆周运动所需的向心力，方向是向下的，大小是 $F = m \frac{v^2}{r}$ ，式中的 m 是水的质量， r 是圆周运动的半径。这个向心力的来源是什么呢？

当杯子在竖直圆周最高点的速度 u 满足 $m \frac{u^2}{r} = G = mg$ 这个关系时，即 $u = \sqrt{gr}$ 时，所需向心力 $F = G$ 。这时，水做圆周运动的向心力完全是由它所受的重力 G 提供的。 $u = \sqrt{gr}$ 是杯子能达到竖直圆周最高点的最小速度。这是因为，当 $u < \sqrt{gr}$ 时， $m \frac{u^2}{r} < mg$ ，即所需向心力 $F < G$ 。这样，杯子将不能达到最高点，水流星的表演将不会成功。

杯子在竖直圆周最高点的速度 u ，一般说来是相当大的。当 $u > \sqrt{gr}$ 时， $m \frac{u^2}{r} > mg$ ，即所需向心力 $F > G$ ，重力 G 就不足以提供水做圆周运

动所需的向心力了。这时杯中的水有远离圆心的趋势，向上压紧杯底，对杯底施加一个向上的压力 N' ，根据牛顿第三定律，杯底对水施加一个向下的压力 N （图 11 - 13 下图）。向心力的不足部分，就由这个向下的压力 N 来补足，水做圆周运动所需的向心力 F 就是重力 G 和向下压力 N 的合力。

思考与讨论

要使小球滑到圆形轨道顶端不掉下来（图 11 - 14），小球在轨道顶端的最小速度应当是多大？已知轨道半径为 R 。

练习三

（1）在光滑水平桌面上做匀速圆周运动的小球受几个力的作用？有人说它受 4 个力：重力、支持力、绳的拉力和向心力。这种分析对吗？为什么？

（2）如果表演“水流星”节目时，杯子沿半径是 0.8 米的圆周运动，杯子运动到圆周最高点的最小速度是多大？

（3）飞机做俯冲运动时，在最低点附近做半径是 180 米的圆周运动（图 11 - 15）。如果飞行员的体重（质量）是 70 千克，飞机经过最低点 P 时的速度是 360 千米/时，求这时飞行员对座位的压力。

提示：飞行员和飞机一起做圆周运动时受到两个力：重力和座位对他的支持力。

（4）现在有一种叫做“魔盘”的娱乐设施（图 11 - 16）。“魔盘”转动很慢时，盘上的人都可以随盘一起转动而不至于被甩开。当盘的转速逐渐增大时，盘上的人便逐渐向边缘滑去，离转轴中心越远的人这种滑动的趋势越厉害。设“魔盘”转数为 6.0 转/分，一个体重为 30 千克的小孩坐在距轴心 1.0 米处（盘半径大于 1 米）随盘一起转动（没有滑动），求小孩受到的向心力，并回答这个向心力是由什么力提供的。

五、离心现象及其应用

离心运动 做圆周运动的物体，由于本身的惯性，总是有沿着圆周切线飞去的倾向，其所以没有飞去，是因为向心力不断地把物体从圆周运动的切线拉到圆周上来，使它同圆心的距离保持不变。一旦向心力突然消失，例如图 11 - 4 中的细绳突然断了，物体就沿切线飞去，离圆心越来越远。

除了向心力突然消失这种情况外，在合外力不足以提供物体做圆周运动所需的向心力 ($F=mr\omega^2$) 时，物体也会逐渐远离圆心。这时，合外力虽然把物体拉离开切线，但还不能把它拉到圆周上来，物体就如图 11 - 17 所示那样，沿着切线和圆周之间的某条曲线运动，离圆心越来越远。

做匀速圆周运动的物体，在合外力突然消失或者不足以提供圆周运动所需的向心力的情况下，做逐渐远离圆心的运动，这种运动叫做离心运动。

离心机械 利用离心运动的机械叫做离心机械。离心机械的种类很多，下面介绍两种常见的离心机械：离心干燥器和离心转速计。

离心干燥器是用来甩掉附着在物体上的水分的装置，在纺织厂里普遍利用它来使棉纱、毛线或纺织品干燥。

离心干燥器的主要部分是一个圆筒状金属网笼（图 11 - 18），湿的物体就放在网笼里面。当网笼转动得相当快时，水滴跟物体的附着力小于水滴做圆周运动需要的向心力，水滴就离开物体，穿过网孔，飞到网笼外面。洗衣机里的脱水筒（图 11 - 19），也是利用这个道理，把洗过的湿衣服甩干的。

离心转速计是用来测量机器转速的一种仪器，它的构造如图 11 - 20 所示。在转速计的转轴 OO' 上的 E 处安装着一根轻的金属棒，棒的两端有两个重球 m_1 和 m_2 ，金属棒可以绕 E 点转动。弹簧 L_1 和 L_2 用来把金属棒拉向转轴。滑套 K 可以沿转轴上下移动。把转速计的转轴 OO' 跟机器的转轴连接在一起，当机器的轴转动时， OO' 随着转动，重球 m_1 和 m_2 跟着做圆周运动，所受的向心力是由弹簧的拉力提供的。轴转动得越快，重球做圆周运动的半径就越大。滑套 K 在轴上就上升得越高，同时带动指针偏转，从刻度盘上就可以读出机器的转速。

请你分析一下，为什么轴转动得越快，重球做圆周运动的半径就越大。

一些有害的离心运动 离心运动有时会造成危害，需要设法防止，汽车转弯的地方不允许超过规定的速度，以免由于离心运动造成交通事故。高速转动的砂轮、飞轮，都不得超过允许的最大转速，如果转速过高，砂轮、飞轮内部的相互作用力小于需要的向心力，离心运动会使它们破裂，甚至酿成事故。飞机俯冲拉起时，由于离心运动会造成飞行员大脑贫血，四肢沉重，这种现象叫做过荷。过荷太大时，飞行员会暂时失明，甚至晕厥，飞行员可以通过加强训练来提高自己的抗荷能力。图 11 - 21 是离心试验器的原理图，它用来研究过荷对人体的影响，测验人的抗荷能力。

图 11-21 离心试验器

六、万有引力定律

万有引力定律 行星绕太阳运行的椭圆轨道与圆轨道近似,可以认为行星都以太阳为圆心做匀速圆周运动。行星做匀速圆周运动的向心力是由什么力来提供的呢?17世纪的科学家们对此提出了各种不同的看法,有人认为行星绕太阳运动是因为受到了太阳的引力,并猜想引力的大小跟行星到太阳的距离的平方成反比。

牛顿系统地研究了这个问题,研究结果表明,太阳对行星的引力,行星对卫星的引力,以及地球对地面上物体的引力,都遵循相同的规律,是同一性质的力。牛顿并把自己的研究成果作了推广,认为宇宙万物之间都存在这种引力,在1687年正式发表了万有引力定律:

任何两个物体都是相互吸引的,引力的大小跟两个物体的质量的乘积成正比,跟它们的距离平方成反比。

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

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}。$$

上式中如果质量的单位用千克,距离的单位用米,力的单位用牛,则测定结果表明 $G=6.67 \times 10^{-11}$ 牛·米²/千克²。 G 是适用于任何两个物体的普适常量,叫做引力常量,它在数值上等于两个质量都是1千克的物体相距1米时的相互作用力。

万有引力定律中两个物体的距离,对于相距很远可以看作是质点的物体,是指两个质点间的距离,对于均匀的球体,是指两个球心间的距离。

万有引力定律的发现,是17世纪自然科学最伟大的成果。它把地面上物体运动的规律与天体运动的规律统一起来,对以后物理学和天文学的发展有着深远的影响。它第一次揭示了自然界中一种基本的相互作用的规律,在人类认识自然的历史上树立了一个里程碑。

天体质量的计算 两个通常物体之间的万有引力非常微小,我们察觉不到它,可不予考虑。但是在天体系统中,由于天体的质量很大,万有引力就起着决定性的作用。因此,万有引力定律在天文学中有重要应用,对天文学的发展起了很大的推动作用。

应用万有引力定律,可以计算太阳和行星的质量。行星围绕太阳的运动可以近似地看作匀速圆周运动。设 M 是太阳的质量, m 是它的某个行星的质量, r 是这个行星的轨道半径, T 是这个行星绕太阳公转的周期。这个行星做圆周运动的向心力是

$$mr\omega^2 = \frac{4\pi^2 rm}{T^2}。$$

这个向心力是由太阳对行星的万有引力提供的,所以

$$G \frac{Mm}{r^2} = \frac{4\pi^2 rm}{T^2}。$$

由此可得

$$M = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2}。$$

如果能观测到 r 和 T , 就可以算出 M 的大校例如, 地球绕太阳公转的轨道半径 $r=1.49 \times 10^{11}$ 米, 公转周期 $T=3.16 \times 10^7$ 秒, 太阳的质量

$$M = \frac{4 \times 3.14^2 \times (1.49 \times 10^{11})^3}{6.67 \times 10^{-11} \times (3.16 \times 10^7)^2} \text{ 千克}$$
$$= 1.96 \times 10^{30} \text{ 千克。}$$

同样, 根据月球绕地球运行的轨道半径和周期, 可以算出地球的质量约为 6.0×10^{24} 千克。其他行星的质量, 也可以用这种方法计算出来。

· 阅读 ·

海王星和冥王星的发现

万有引力定律揭示了天体运动的规律, 它的发现推动了天文学的发展。海王星的发现就是一个应用万有引力定律取得重大成就的例子。

在 18 世纪, 人们已经知道太阳系有七颗行星, 其中 1781 年发现的第七颗行星——天王星的运行轨道, 总是偏离根据万有引力定律计算出来的轨道。当时有人推测, 在天王星外面可能还有一颗未发现的行星, 它同天王星之间的引力作用引起了天王星轨道的偏离。英国的亚当斯和法国的勒维列都利用万有引力定律各自独立计算出这颗行星的轨道。1846 年 9 月 23 日晚, 德国的加勒在勒维列指示他去观察的位置附近发现了这颗行星。这件事轰动了天文学界, 人们没有想到居然能从理论上计算出一颗未知行星的位置! 后来, 天文学家就把这个太阳系的第八颗行星叫做海王星。

应用同样的方法, 在 1930 年 3 月 14 日, 发现了太阳系的第九颗行星——冥王星。

海王星和冥王星的发现, 进一步证明了万有引力定律的正确, 显示了它对研究天体运动的重要意义。

练习四

(1) 两艘轮船, 质量都是 1.0×10^4 吨, 相距 10 千米, 它们之间的引力是多大? 将这个力与轮船所受的重力比较, 看看相差多少倍。

算了这道题, 你就会明白, 为什么通常两个物体之间的万有引力可不予考虑。

(2) 太阳的质量为 2.0×10^{30} 千克, 地球的质量为 6.0×10^{24} 千克, 太阳和地球的平均距离为 1.5×10^{11} 米, 太阳和地球间的万有引力是多大? 将这个力与上述轮船所受的重力比较, 看看相差多少倍。

算了这道题, 你就会明白, 为什么在天体系统中万有引力起决定性的作用。

(3) 利用本章练习一第 (2) 题中给出的数据, 求出月球绕地球做匀速圆周运动的向心加速度 $a_{\text{月}} = \underline{\hspace{2cm}}$ 米/秒²。已知地球表面附近的重力加速度 $g = 9.8$ 米/秒², 求出 $g/a_{\text{月}} = \underline{\hspace{2cm}}$ 。已知月球到地球的距离 $r_{\text{月地}}$ 约为地球半径 R 的 60 倍, 即 $r_{\text{月地}} = 60R$ 。由这些数据你能得出什么结论? 说明理由。

(4) 应用人造地球卫星可以测定地球的质量。我国 1970 年 4 月 24 日发射的第一颗人造地球卫星，周期是 114 分，卫星轨道的平均半径为 7782 千米，试计算地球的质量。

(5) 登月密封舱在离月球表面 112 千米的高空沿圆形轨道运行，周期是 120.5 分，月球的半径是 1740 千米，试根据这些数据计算月球的质量。

七、人造地球卫星 宇宙速度

地球对周围的物体都有吸引作用，因而抛出的物体要落回地面。抛出的初速度越大，物体就抛得越远。牛顿曾设想过，从高山上用不同的水平速度抛出物体，速度一次比一次大，落地点也一次比一次离山脚更远。当速度足够大时，物体就永远不会落到地面上来，它将环绕地球运转，成为一颗人造地球卫星。图 11 - 22 是牛顿在他的著作中绘的一幅原理图。

既然物体的发射速度足够大时它才能环绕地球运转，成为一颗人造地球卫星，那么，这个速度至少需要多大呢？

设人造卫星的质量为 m ，在高空沿圆轨道运转，轨道半径（即离地心的距离）为 r ，运行速度为 v 。设地球的质量为 M 。人造卫星做匀速圆周运动所需的向心力是地球对它的引力，所以有

$$G \frac{Mm}{r^2} = \frac{mv^2}{r},$$

由此得到
$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}。$$

在地面附近运转的卫星，可认为 r 近似等于地球的半径 R 。运行速度 $v = \sqrt{GM/R}$ 。而 $GM/R^2 = g$ ，所以

$$v = \sqrt{gR}。$$

将 $g = 9.8 \times 10^{-3}$ 千米/秒² 和 $R = 6.4 \times 10^3$ 千米代入上式，得到 $v = 7.9$ 千米/秒。这就是人造地球卫星在地面附近环绕地球做匀速圆周运动必须具有的速度，叫做第一宇宙速度。

人造卫星进入地面附近的轨道的速度，如果大于 7.9 千米/秒，而小于 11.2 千米/秒，卫星绕地球运动的轨道将不是圆，而是椭圆（图 11 - 23）。当速度等于或者大于 11.2 千米/秒的时候，物体就可以挣脱地球引力的束缚，成为绕太阳运动的人造行星，或飞到其他行星上去。11.2 千米/秒这个速度叫做第二宇宙速度。

达到第二宇宙速度的物体还受着太阳引力的束缚。要想使物体挣脱太阳引力的束缚，飞到太阳系以外的宇宙空间去，必须使它的速度等于或大于 16.7 千米/秒，这个速度叫做第三宇宙速度。

· 阅读 ·

人造卫星的应用和航天技术的发展

人造卫星的应用 人造卫星有着广泛的应用。在科学研究、无线电通讯、电视转播、军事侦察、资源调查、气象预报、估计粮食产量、发现农作物病虫害等方面，都可以应用人造卫星。应用人造卫星有什么好处呢？从下面几个例子里可以多少了解一些。

进行社会主义建设，首先要把资源的情况摸清楚，这就要进行资源调查。靠人工进行资源调查，速度慢、效率低。如果用资源卫星，一天绕地

球十几圈，用来普查森林，很快就能查完，而且可以监视各种变化，及时设法处理。在卫星上安装勘察矿产资源的遥感设备，还可以勘察地下的铁、钴、镍、铜、石油等多种矿藏。

电视通讯是关系到千家万户的事情，但是靠中继站转播，每隔 50 千米就要建设一个中继站，要耗费大量人力物力。如果用与地球自转周期相同的同步通讯卫星转播，像我们这样幅员广阔的国家，只要有一颗卫星，就连边远地区也可以收看到首都或者其他城市的电视节目。

航天技术的发展 目前，世界上航天技术有了很大发展，已经能发射围绕地球运行的空间站，把装有复杂、精密仪器设备的现代化实验室，送到宇宙空间中去，进行各种在地面上不能进行的物理、化学、生物、医学实验，还可以把航天器送往其他行星，发回科学情报。1981 年，又制成了航天飞机，它除了进行各种科学考察外，还可以在空间发射和收回卫星，并能返回地面，多次重复使用。

我国自 1956 年建立了专门的航天研究机构到现在，航天事业有了迅速的发展。1964 年 6 月，自行研制的运载火箭腾空而起。1970 年 4 月 24 日，我国第一颗人造地球卫星一次发射成功。至今已发射了科学实验卫星、资源勘测卫星、通讯卫星、气象卫星等不同类型的人造地球卫星。我国已经掌握了使卫星返回地面的回收技术、用一枚火箭把多颗卫星送入轨道的“一箭多星”等世界尖端技术。

练习五

(1) 海王星的质量是地球的 17 倍，半径是地球的 4 倍。环绕海王星表面附近飞行的宇宙飞船，运行速度有多大？

(2) 有人根据公式 $v = \sqrt{GM/r}$ 说：人造地球卫星的轨道半径增大到 2 倍，卫星的运行速度也应增大到 2 倍。但由公式 $v = \sqrt{GM/r}$ 可知，轨道半径增大时，运行速度是减小的。应当怎样正确理解这个问题？

(3) 甲同学根据公式 $F = m\omega^2/r$ 说，当人造卫星轨道半径 r 增大到 2 倍时，它所需要的向心力减小为原来的 1/2。

乙同学认为卫星运动所需的向心力是由地球的引力提供的，由公式 $F = GMm/r^2$ 可知， r 增大到 2 倍时，向心力减小为原来的 1/4。

哪位同学说得对？说错的，错在哪里？说明理由。

(4) 一颗人造地球卫星在离地面 700 千米的高空做匀速圆周运动，试计算此卫星的周期。

(5) 能否发射一颗周期是 80 分钟的人造地球卫星？说明理由。

(6) 同步卫星位于赤道上方，相对于地面静止不动。求同步卫星的周期、离地面的高度和运行速度。

本章小结

匀速圆周运动是在大小不变而方向总指向圆心的向心力作用下的周期性运动。根据牛顿运动定律可知，在匀速圆周运动中由向心力引起的向心加速度的大小不变，方向总指向圆心。向心力的方向总与运动方向垂直，不改变线速度的大小，只改变线速度的方向。

行星和卫星的轨道可近似地看作圆周轨道，它们做匀速圆周运动的向心力是由万有引力提供的。万有引力在天体系统中起决定性的作用。万有引力定律的发现是 17 世纪自然科学最伟大的成果。

(1) 什么叫匀速圆周运动？描述匀速圆周运动快慢的物理量有哪些？它们的含义各是什么？它们之间有什么关系？

(2) 为什么做匀速圆周运动的物体需要一个向心力？向心力的作用是什么？分析做匀速圆周运动的物体的受力情况时，应当注意什么？有人认为，做匀速圆周运动的物体除了受到另外物体对它的作用力，还受到一个向心力的作用。这样来分析，为什么不对？

复习课文中讲过的和自己做过的分析向心力的实例，并加以总结。

(3) 向心力和向心加速度跟哪些因素有关？写出向心力和向心加速度的不同的形式的公式，说明它们的确切含义和它们之间的关系。

(4) 什么叫离心运动？举出几个应用的实例。

(5) 万有引力定律的内容是什么？写出它的公式。

(6) 太阳、行星等天体的质量是怎样计算的？推导一下计算的过程。

(7) 怎样计算第一宇宙速度？推导一下计算的过程。什么是第二宇宙速度和第三宇宙速度？

习 题

A 组

(1) 匀速圆周运动的向心力可以

- A. 使线速度的大小发生变化。
- B. 使线速度的方向发生变化。
- C. 使角速度发生变化。
- D. 使圆周运动的半径发生变化。

(2) 下列说法哪个正确？

- A. 曲线运动中，速度不变。
- B. 曲线运动中，速度改变。
- C. 曲线运动中，速度有可能改变，也可能不变。

(3) 太阳的质量是 1.98×10^{30} 千克，它离开银河系中心大约 3 万光年（1 光年 = 9.46×10^{12} 千米），它以 250 千米/秒的速率绕着银河系中心转动。计算太阳绕银河系中心转动的向心力。

(4) 甲乙两球都做匀速圆周运动，甲球的质量是乙球的 3 倍，甲球在半径是 25 厘米的圆周上运动，乙球在半径是 16 厘米的圆周上运动。在一分钟内，甲球转了 30 次，乙球转了 75 次，试比较两球所受的向心力。

(5) 金星的半径是地球的 0.95，质量是地球的 0.82，金星表面的重力加速度是_____米/秒²，金星的第一宇宙速度是_____千米/秒。

(6) 人造地球卫星由于大气阻力的作用，轨道半径逐渐变小，它的线速度将逐渐变_____，周期将逐渐变_____。

(7) 有两颗人造地球卫星，它们质量之比是 $m_1 : m_2 = 1 : 2$ ，运行速度之比是 $v_1 : v_2 = 1 : 2$ 。

- a. 它们周期之比 $T_1 : T_2 =$ _____。
- b. 它们轨道半径之比 $r_1 : r_2 =$ _____。
- c. 向心加速度之比 $a_1 : a_2 =$ _____。
- d. 所受向心力之比 $F_1 : F_2 =$ _____。

B 组

(1) 如图 11 - 24 所示，质量为 800 千克的小汽车驶过一半径为 50 米的圆形拱桥，当它到达桥顶时，速度为 5 米/秒。求此时车对桥的压力。求出压力后，与它在水平公路上行驶时做一比较，看看在什么样的路面上行驶，车对路面的压力大。

(2) 30 厘米长的绳的下端拴着一个小球，小球受到一个水平冲力的作用，在竖直面内做圆周运动。如果小球通过圆周的最高点时绳刚好没有发生形变，小球在圆周最高点的速度有多大？

(3) 已知赤道半径是 6.4×10^3 千米，求赤道上的物体由于地球自转产生的向心加速度。北京地区的纬度约为 40 度，在北京地区的物体由于地球自转产生的向心加速度又是多大？

(4) 行星的平均密度是 ρ ，靠近行星表面的卫星运转周期是 T ，试证明： T^2 是一个常量，即对任何行星都相同。

(5) 一艘宇宙飞船进入靠近某行星表面的圆形轨道，宇航员能不能仅用一只表通过测定时间来测定该行星的平均密度？说明理由。

(6) 用火箭把宇航员送到月球上，如果他已知月球的半径，他用一个弹簧秤和一个已知质量的砝码，能否测出月球的质量？应该怎样测定？

第十二章 简谐运动

前一章学习了在大小不变而方向改变的向心力作用下的匀速圆周运动，现在来学习在大小和方向都改变的回复力作用下的运动——机械振动。

拉一下挂在弹簧下端的重锤，放开手，重锤就以原来静止的位置为中心上下做往复运动。物体（或物体的一部分）在某一中心位置两侧所做的往复运动叫做机械振动，常简称为振动。

振动现象在自然界是广泛存在的。钟摆的摆动，水上浮标的上下浮动，担物行走时扁担的颤动，树梢在微风中的摇摆，都是振动现象。一切发声的物体都在振动。地震是我们脚下大地的剧烈振动。

研究振动也要从最简单、最基本的振动着手，这种振动叫做简谐运动。这一章主要学习简谐运动。

一、简谐运动

如图 12 - 1 所示，把一个有小孔的小球和弹簧连在一起，穿在水平杆上，弹簧左端固定，小球可以在杆上滑动。杆非常光滑，小球在杆上滑动时的摩擦力可忽略不计。弹簧的质量比小球的质量小得多，也可忽略。这样就成了一个弹簧振子。

振子静止在 O 点时，弹簧没有形变，对振子没有弹力的作用，O 点就是振子的平衡位置。把振子拉到平衡位置右方的位置 A，再放开，振子就以 O 点为中心位置在水平杆上 A 和 A' 之间不停地做往复运动，且距离 OA 等于 OA'。振子的往复运动具有重复性，或者说周期性。振子由 A 点出发，经 O 点运动到 A'，再由 A' 经 O 点回到 A 点，完成一次全振动。此后振子不停地重复这种运动，且完成一次全振动所用的时间相同。弹簧振子的这种振动是简谐运动的典型实例。

弹簧振子为什么会振动呢？把振子拉向右方的时候，弹簧被拉伸，产生了一个使振子回到平衡位置的力。放开振子，它就在这个力的作用下向左做加速运动。随着振子离平衡位置越来越近，弹力越来越小，加速度也越来越小。在这个过程中，加速度与速度方向相同，所以速度越来越大（但速度增加得越来越慢）。

当振子回到平衡位置的时候，弹簧的形变消失，振子不再受到弹簧的弹力，加速度等于零，它的速度不再增大，振子达到最大速度。由于惯性，它不会在平衡位置上停下来，而继续向左运动。

振子在越过平衡位置向左运动的过程中要压缩弹簧，被压缩的弹簧就产生一个阻碍振子运动且越来越大的力，使振子做减速运动。当振子运动到位置 A' 时，它的速度减为零。在压缩弹簧的弹力作用下，振子又向右做加速运动，并越过平衡位置，回到 A 点。

振子在振动过程中，所受重力和杆的支持力互相平衡，对振子的振动没有影响。使振子发生振动的只有弹簧的弹力，这个力的方向跟振子偏离平衡位置的位移方向相反，总是指向平衡位置，它的作用是使振子能返回平衡位置，所以叫做回复力。根据胡克定律，在弹簧发生弹性形变时，弹簧振子的回复力 F 跟位移 x 成正比，它们之间的关系可以用下式来表示：

$$F = - kx。$$

式中的 k 是比例常数，对于弹簧振子来说，它就是弹簧的劲度。式中的负号，表示回复力跟振子的位移方向相反。

像弹簧振子那样，物体在跟位移大小成正比，并且总是指向平衡位置的回复力作用下的振动，叫做简谐运动。简谐运动是最简单、最基本的机械振动。音叉和一端固定的簧片（图 12 - 2），它们的振动都是简谐运动。

根据牛顿第二定律，做简谐运动物体的加速度，大小也跟物体对平衡位置的位移大小成正比，方向也是指向物体的平衡位置。

练习一

(1) 图 12 - 1 中的弹簧振子，在由 A 到 O 的过程中和由 O 到 A' 的过

程中，振子的运动情况分别是下列说法中的哪一个？

- A. 匀加速运动。
- B. 加速度不断减小的加速运动。
- C. 加速度不断增大的加速运动。
- D. 加速度不断减小的减速运动。
- E. 加速度不断增大的减速运动。

(2) 分析图 12 - 1 中的弹簧振子在一次全振动过程中的位移回复力、加速度、速度如何变化，并填入下表中。指出振子的速度加速度、回复力最大和为零的位置。

振子的运动	A 0	0 A	A 0	0 A
对平衡位置的位移，方向怎样？ 大小如何变化？				
回复力的方向怎样？ 大小如何变化？				
加速度的方向怎样？ 大小如何变化？				
速度的方向怎样？ 大小如何变化？				

(3) 设图 12 - 1 所示弹簧振子小球的质量为 m ，试证明弹簧振子的加速度可用下式表示：

$$a = -\frac{k}{m}x_0$$

这表示弹簧振子的加速度的大小与振子离开平衡位置的位移成正比，方向与此位移的方向相反。

二、振幅、周期和频率

各种不同的机械运动，都需要用位移、速度、加速度等物理量来描述。但不同的运动有自己的特点，需要引入新的物理量来表示这种特点。例如描述圆周运动，就引入了角速度、周期、转数等物理量。研究振动也需要引入新的物理量，这就是振动的振幅、周期和频率。

振动物体总是在一定范围内运动的。振动物体离开平衡位置的最大距离，叫做振动的振幅。它是表示振动强弱的物理量。在图 12 - 1 中，OA 或 OA' 的大小就是振子的振幅。

做简谐运动的物体完成一次全振动所需的时间是一定的，这个时间叫做振动的周期。

单位时间内完成的全振动的次数，叫做振动的频率。在国际单位制中，频率的单位是赫兹，简称赫，符号是 Hz。1 赫 = 1 秒⁻¹。1 秒钟振动 n 次，频率就是 n 赫。

周期和频率都是表示振动快慢的物理量。如果用 T (秒) 表示周期，用 f (赫) 表示频率，则有

$$f = \frac{1}{T} \text{ 或 } T = \frac{1}{f}。$$

简谐运动的频率 (或周期) 与振幅没有关系。观察弹簧振子的振动可以发现，对于同一个振子，振动的振幅可以改变，振动的频率却是不变的。可见，物体的振动频率是由振动物体本身的性质决定的，与振幅的大小无关，所以又叫做固有频率。振动的周期叫做固有周期。

练习二

(1) 图 12 - 1 中的弹簧振子，振幅是 2 厘米，完成一次全振动，小球通过的路程是多少厘米？

(2) 做简谐运动的某物体，全振动 30 次用了 24 秒，求它的振动周期和频率。

(3) 弹簧振子的振幅增大到原来的 2 倍时，下列说法中正确的是：

A . 周期增大到原来的 2 倍。

B . 周期减小到原来的 $\frac{1}{2}$ 。

C . 周期不变。

三、单摆

单摆 在细线的一端拴上一个小球，另一端固定在悬点上，如果线的伸缩和质量可以忽略，球的直径比线长短得多，这样的装置就叫做单摆。单摆是实际摆的一种理想化物理模型。

拉开摆球，使它偏离平衡位置，然后把它放开，摆球就在重力 G 和线的拉力 T 的作用下，沿着以平衡位置 O 为中点的一段圆弧 AA' 做往复运动，这就是单摆的振动（图 12 - 3）。

摆球静止时，摆线竖直下垂，摆球所受重力 $G = mg$ 与摆线对它的拉力 T 平衡， O 点是单摆的平衡位置。摆球离开 O 点运动到某点 A 时，重力 G 和拉力 T 不再平衡。重力 G 沿摆线方向的分力 F_1 与拉力 T 的合力，是使摆球沿圆弧运动的向心力。当摆角很小时，圆弧可近似看作直线，而认为摆球沿直线做往复运动。因此我们不考虑这个向心力。重力沿圆弧切线方向的分力 F_2 提供了使摆球振动的回复力。

这个分力 $F = mgsin\theta$ 。摆角很小时， $\sin\theta \approx \frac{x}{l}$ ，其中 l 为摆长， x 为离开平衡位置的位移。单摆的回复力为

$$F = -\frac{mg}{l}x。$$

式中负号表示力 F 与位移 x 的方向相反。由于 m 、 g 、 l 都有一定的数值， mg/l 可以用一个常数 k 来表示，上式可写成

$$F = -kx。$$

可见，在摆角很小的情况下，单摆所受回复力跟位移成正比而方向相反，单摆做简谐运动。

单摆振动的周期 取一个长约 1 米的单摆，在偏角小于 5° 的情况下，测出它振动一定次数（例如 50 次）所用的时间，然后在更小的偏角下测定振动相同次数所用的时间。结果发现，两次所用的时间是相同的。这就是说，振幅虽然改变了，单摆做简谐运动的周期却没有改变。事实上，只要保持足够小的偏角，无论怎样改变单摆的振幅，周期都是不变的。单摆做简谐运动的周期跟振幅没有关系。单摆的这种性质叫做单摆的等时性，是伽利略首先发现的。

取两个大小相同、质量不等的摆球，拴在两条等长的细线上，制成两个等长的单摆，可以看到它们的周期是相同的。这表明：单摆做简谐运动的周期跟摆球的质量没有关系。

取不同长度的单摆测定它们的周期，我们发现，摆长越长，周期也就越长。

荷兰物理学家惠更斯（1629 ~ 1695）研究了单摆的振动，发现单摆做简谐运动的周期跟摆长的平方根成正比，跟重力加速度的平方根成反比，跟振幅、摆球的质量无关，并且确定了如下的单摆振动周期的公式：

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}。$$

式中的 T 是单摆的周期， l 是摆长， g 是重力加速度。

摆在实际中很有用。惠更斯在 1656 年首先利用摆等时性发明了带摆的

计时器（1657 年获得专利权）。摆周期可以通过改变摆长来调节，计时很方便。

单摆的振动周期和摆长很容易用实验办法准确地测出来，所以，利用单摆可以准确地测定各地的重力加速度。

思考与讨论

如图 12 - 4 所示，在弹簧下端挂一个重物，弹簧的劲度为 k ，重物的质量为 m 。重物在平衡位置时，弹簧的弹力与重力平衡，重物停在平衡位置。让重物在竖直方向离开平衡位置，放开手，重物就以平衡位置为中心上下振动。请你分析一下重物所受的回复力，并证明重物做简谐运动。

· 小实验 ·

秒 摆

通常把周期是 2 秒的单摆叫做秒摆。取重力加速度 $g = 9.80 \text{ 米/秒}^2$ ，计算一下秒摆的长度，再根据计算结果自制一个秒摆，测一下它的周期是不是 2 秒。

增大或减小摆的振幅（偏角不超过 5° ），看看它对单摆的周期是否有影响。

改变摆球的质量，看看它对摆的周期是否有影响。

练习三

（1）一个单摆原来的周期等于 2 秒，在下列情况下，周期有无变化？如有变化，变为多少？

- 摆长减为原长的四分之一。
- 摆球的质量减为原来的四分之一。
- 振幅减为原来的四分之一。
- 重力加速度减为原来的四分之一。

（2）单摆的摆长是 30 厘米，重力加速度 $g = 9.81 \text{ 米/秒}^2$ ，求摆的周期。

（3）长 24.8 厘米的单摆，120 次全振动所需的时间是 120 秒，求重力加速度。

（4）北京的重力加速度是 9.8012 米/秒^2 ，北京的秒摆摆长是多少？

（5）一座摆钟走得慢了，要把它调准，应该怎样改变它的摆长？为什么？

四、简谐运动的图象

物体的运动情况可以用公式来表示，也可以用图象来表示。简谐运动的位移图象是怎样的呢？

简谐运动的图象可以利用图 12 - 5 所示的装置来演示。把漏斗吊在支架上，下方放一块硬纸板，纸板上画一条直线 OO' 。先使漏斗静止不动，使 OO' 恰好在漏斗的正下方。在漏斗里装满细砂，让它摆动，同时沿着跟摆动垂直的方向匀速拉动硬纸板。因为每一时刻都从漏斗漏出细砂，所以落在硬纸板上的细砂就记录下各个时刻摆的位置。不断漏下的细砂在硬纸板上显示出一条曲线，这条曲线就是以横轴 OO' 表示时间 t ，以纵轴表示对平衡位置的位移 x 的振动图象。可以看到，摆的振动图象是正弦或余弦曲线。实际上，所有简谐运动的图象都是正弦或余弦曲线（图 12 - 6）。

振动图象表示出振子的位移随时间变化的规律，它可以告诉我们任一时刻振子对平衡位置的位移，还可以表示出振幅和周期。曲线的最大值等于振幅，相邻两个正（或负）的最大值之间的间隔等于周期。

跟研究其他现象一样，研究振动也要从最简单最基本的振动着手，这就是简谐运动。这里再一次遇到理想化的方法。这是研究物理问题经常采用的方法，这样做可以使复杂问题变得简单，便于人们深入探讨，然后再把暂时被抛开的因素和其他因素考虑进去，逐步由简单到复杂。

研究简谐运动具有很大的实际意义和理论意义。许多复杂的振动在振幅小的情况下可以近似地看作是简谐运动。一切复杂的振动都可以看作是若干振幅、频率不同的简谐运动合成的。

图 12 - 7 下方所表示的振动就是复杂的非简谐运动，振动虽然也具有周期性，但振动图象不是正弦或余弦曲线。它是由图中上方所示的两个简谐运动合成的。

练习四

（1）一个如图 12 - 1 所示的弹簧振子，振幅为 3 厘米，周期为 2 秒。取水平向右的方向为振子离开平衡位置的位移的正方向，振子向右运动到最大距离 A 点时开始计时。用适当的标度画出弹簧振子的振动图象。

（2）一个如图 12 - 3 所示的单摆，振幅为 5 厘米，周期为 1 秒。取水平向左的方向为摆球离开平衡位置的位移的正方向，摆球向左运动通过平衡位置时开始计时。用适当标度画出单摆的振动图象。

五、简谐运动的能量 阻尼振动

简谐运动的能量 弹簧振子和单摆,在振动过程中动能和势能不断转化。在平衡位置动能最大,势能最小;在位移最大时势能最大,动能为零;在任意时刻势能和动能的和,就是振动物体的总机械能。这个能量跟振动的振幅有关,振幅越大,振动的能量越大。弹簧振子和单摆是在弹力或重力作用下振动的,如果不考虑摩擦和空气阻力,在振动过程中就只有动能和势能的相互转化。这就是说,简谐运动的机械能是守恒的。

分析弹簧振子(图 12 - 1)和单摆(图 12 - 3)在振动中能量的转化情况,填好下表(填写增多、减少、不变):

振子的运动		A 0	0 A	A 0	0 A
能量的变化	动能				
	势能				
	总能				

阻尼振动 简谐运动是一种理想化的振动,一旦供给振动系统一定的能量来使它开始振动,由于机械能守恒,它就要以一定的振幅永不停息地振动下去。可是实际上振动系统不可避免地要受到摩擦和其他阻力,即受到阻尼作用。振动系统克服阻尼作用做功,系统的机械能就要损耗,机械能将随着时间逐渐减少,振动的振幅也逐渐减小。待到机械能耗尽之时,振动就停下来了。这种振幅逐渐减小的振动叫做阻尼振动。图 12 - 8 是阻尼振动的图象。

振动系统受到的阻尼越大,振幅减小得越快,振动停下来也越快。阻尼过大将不能产生振动。阻尼越小,振幅减小得越慢。在阻尼很小时,在一段不太长的时间内看不出振幅有明显的减小,就可以把振动系统当作简谐振动来处理。前面关于简谐振动的演示就属于这种情形。

六、受迫振动 共振

受迫振动 像弹簧振子和单摆那样，在外力使它们偏离平衡位置后，它们就在系统内部的弹力或重力作用下振动起来，而不再需要其他外力推动，这种振动叫做自由振动。由于阻力不可避免，实际的自由振动必然是阻尼振动，最终要停下来。怎样才能得到持续的周期性振动呢？

得到持续的周期性振动的最简单的方法，是用周期性外力作用于振动物体。这种周期性的外力叫做驱动力。物体在周期性驱动力作用下的振动叫做受迫振动。跳板在人走过时发生的振动，机器底座在机器运转时发生的振动，都是受迫振动的实例。

受迫振动的频率跟什么有关系呢？我们用图 12 - 9 所示的装置来研究这个问题。匀速地转动把手，把手就给弹簧振子以驱动力，使振子做受迫振动。这个驱动力的周期跟把手转动的周期是相同的。用不同的转速匀速转动把手，可以看到，振子做受迫振动的周期总等于驱动力的周期。所以，物体做受迫振动的频率等于驱动力的频率，而跟物体的固有频率没有关系。

共振 物体的固有频率对受迫振动是否毫无影响呢？我们用图 12 - 10 所示的装置研究这个问题。

在一根张紧的绳上挂几个摆，其中 A、B、G 的摆长相等。当 A 摆动的时候，A 的振动通过张紧的绳给其余各摆施加周期性的驱动力，使其余各摆做受迫振动。驱动力的频率等于 A 摆的频率，决定于它的摆长。其他各摆的固有频率，也都决定于自己的摆长。可以发现，固有频率跟驱动力频率相等的 B、G，振幅最大，固有频率跟驱动力频率相差最大的 D、E，振幅最小。

图 12 - 11 的曲线表示出了受迫振动的振幅 A 跟驱动力频率 f 的关系：驱动力的频率 f 等于振动物体的固有频率 $f_{固}$ 时，振幅最大；驱动力的频率 f 跟固有频率 $f_{固}$ 相差越大，振幅越小。

当驱动力的频率跟物体的固有频率相等的时候，受迫振动的振幅最大，这种现象叫做共振。

共振的应用和防止 共振现象有许多应用。例如，装在同一支架上的许多不同长度的钢片，可以用来制成测量各种发动机转速的转速计。使转速计与开动着的机器紧密接触，发动机的转动就引起转速计轻微振动。这时，转速计中只有固有频率与发动机的转数一致的那个钢片，才有显著的振幅。从刻度上读出这条钢片的固有频率，就可以知道机器每分钟的转数。

共振筛（图 12 - 12）也是利用共振规律的机械。把筛子用四根弹簧支承起来，就成为共振筛。共振筛的筛架上安装一个偏心轮，偏心轮轴上另装有皮带轮，与动力相连。偏心轮在皮带轮的带动下发生转动时，筛子受到一个周期性的驱动力，做受迫振动。适当调整偏心轮的转速，使驱动力的频率接近共振筛的固有频率，筛子就发生共振，达到较大振幅，提高了筛除杂物的效率。

在某些情况下，共振现象可能造成损害。例如，当军队或火车过桥的

时候，整齐的步伐或车轮对铁轨接头处的撞击，都会产生周期性的驱动力。如果它的频率接近于桥梁的固有频率，就可能使桥梁的振幅增大到使桥梁断裂的程度。因此，部队过桥要用便步，以便不产生周期性的驱动力。火车过桥要慢开，使驱动力的频率远小于桥的固有频率。

轮船航行的时候，也会受到周期性的波浪的冲击而左右摇摆。如果波浪冲击力的频率跟轮船摇摆的固有频率相同，就会发生共振，能使轮船倾覆。这时可以改变轮船的航向和速率，使波浪冲击的频率远离轮船的固有频率。

机器在工作中由于零部件的运动（如活塞的运动和轴的转动）也会产生周期性的驱动力。如果驱动力的频率接近机器本身或支持物的固有频率，就会发生共振，使机器或支持物受到损坏。为了避免这种情况，要采取特殊的措施，如控制机器的转速，使驱动力不与机器的固有频率一致。同样的道理，厂房建筑的固有频率也不能处在机器所引起的振动频率范围之内。

总之，在需要利用共振的时候，应该使驱动力的频率接近于或等于振动物体的固有频率。在需要防止共振危害的时候，要想办法使驱动力频率和固有频率不相等，而且相差得越多越好。

练习五

(1) 仿照图 12 - 9 所示的研究共振现象的装置，自己利用手边的材料来做实验，观察受迫振动的振幅跟驱动力频率之间的关系。

(2) 汽车的车身是装在弹簧上的，如果它的固有周期是 1.5 秒，汽车在一条起伏不平的路上行驶，路上各凸起处相隔的距离都大约是 8 米，那么汽车以多大的速度行驶时车身的起伏振动最激烈？

本章小结

简谐运动是在大小和方向都改变的回复力作用下的周期性运动，它的加速度矢量和速度矢量是时刻改变的。简谐运动有自己的特点，需要引入振幅、周期和频率等物理量来描述这种特点。

回复力是根据力的效果命名的。单摆、水平弹簧振子、竖直弹簧振子的回复力，各是由什么力提供的？

(1) 什么叫机械振动？什么叫简谐运动？以水平弹簧振子为例，从受力和运动两方面说明简谐运动的特点。再从能量的观点说明简谐运动中机械能的相互转化。

(2) 什么叫振动的振幅？什么叫振动的周期和频率？周期和频率有什么关系？

什么叫固有频率？固有频率和振幅的大小有没有关系？

(3) 什么是单摆？在什么情况下单摆做简谐运动？单摆的周期与什么因素有关，与什么因素无关？写出单摆的周期公式。

(4) 简谐运动的振动图象（位移-时间图象）是什么函数曲线？从振动图象中你能得知有关简谐运动的什么信息？

(5) 什么叫阻尼振动？什么叫受迫振动？受迫振动的频率等于什么？

在什么情况下发生共振？举出应用和防止共振的几个实例。

我们已经学过了各种不同的运动：直线运动，抛体运动，匀速圆周运动，简谐运动等。物体做什么运动，是由所受合外力和初始条件决定的。你自己系统地总结一下，比如按不同标准分一分类，讨论一下产生这些运动的条件，想一想处理这些运动问题的方法和思路等。经过自己独立思考，进行比较分类，归纳总结，以求融会贯通，才能切实掌握知识，提高运用知识解决问题的能力。

习 题

(1) 做简谐运动的质点通过平衡位置时，在下列物理量中具有最大值的物理量和具有零值的物理量各是哪些？

- A. 加速度。
- B. 位移。
- C. 速度。
- D. 回复力。

(2) 某一弹簧振子的周期是 0.2 秒，它在 1 秒内通过 40 厘米的路程，它的振幅是多大？

(3) 关于简谐运动，以下说法中正确的是：

- A. 回复力总指向平衡位置。
- B. 加速度和速度的方向总跟位移的方向相反。
- C. 越接近平衡位置，加速度越小。
- D. 速度方向有时与位移方向相同，有时相反。
- E. 回复力方向总跟位移方向相反。

(4) 图 12 - 13 是弹簧振子的振动图线，试回答下列问题：

- a. 振动的振幅、周期、频率各是多大？
- b. 如果从 0 点算起，到图线上哪一点为止振子完成了一次全振动？从 A 点算起呢？
- c. 图线上 A、B、C、D、E、F、G、H 各点中，哪些点表示振子的动能最大？哪些点表示势能最大？

(5) 使悬挂在长绳上的小球偏离平衡位置一个很小的角度，然后放开它；使另一个小球以初速度为零从长绳的悬挂点自由落下。如果两球同时开始运动，哪一个球先到达第一个球的平衡位置？

(6) 一位物理学家通过电视机观看宇航员登月球的情况。他发现在发射到月球上的一个仪器舱旁边悬挂着一个重物，在那里摆动。悬挂重物的绳长跟宇航员的身高相仿。这位物理学家看了看自己的手表，测了一下时间，于是他估测出月球表面上的自由落体加速度的数值。他是怎么估测的？

(7) 用密度计测液体的密度，密度计竖直地浮在液体中(图 12 - 14)。如果把密度计稍微往上提起，放开手，它就沿竖直方向上下振动起来。密度计的振动是简谐运动吗？为什么？不考虑液体的阻力。

热 学

热学是物理学的一部分，它研究热现象的规律。热现象跟力学现象不同，描述热现象的一个基本概念是温度。温度发生变化的时候，物体的许多性质都发生变化。物体的温度升高，它的体积要膨胀。在 1 标准大气压下，水在 0 以下是固体（冰），在 0 以上才是液体。一段橡皮管冷却到 - 100 以下会变得像玻璃一样地易碎，轻轻打一下就碎裂成许多小块。凡是跟温度有关的现象都叫做热现象。

热学知识在实际中有重要的应用。各种热机和致冷设备的研制，化工、冶金、气象的研究，都离不开热学知识。

研究热现象有两种不同的方法。一种是从宏观的观点来研究，总结了宏观热现象的规律，引入了与热现象相关的内能的概念，并把内能跟其他形式的能量联系起来，建立了能量守恒定律。另一种是从物质微观结构的观点来研究，建立了分子动理论，说明热现象是大量分子无规则运动的表现。这两种方法相辅相成，使人们对热现象的研究越来越深入。

第十三章 分子动理论基础

分子动理论的基本内容是：物体是由大量分子组成的，分子永不停息地做无规则运动，分子之间存在着相互作用的引力和斥力。用分子动理论可以说明很多热现象和物质的性质。人们首先研究了气体，建立了气体分子动理论，说明了气体的宏观性质。随后又用分子动理论研究了液体和固体，也获得很大成果。

一、物质是由大量分子组成的

自古以来，人们就不断地探索物质组成的秘密。早在古希腊的时候，就有人提出物质的微粒结构的思想。两千多年以前，古希腊的著名思想家德谟克利特说过，万物都是由极小的微粒构成的，并把这种微粒叫做原子。这种古代原子学说虽然没有实验根据，却包含着原子理论的萌芽。

科学技术发展到今天，原子的存在早已被证实。而且原子也不是不可再分的。原子能够结合成分子，分子是具有各种物质的化学性质的最小粒子。

分子的大小 组成物质的分子是很小的，不但肉眼不能直接看到它们，就是用光学显微镜也看不到它们。怎样能知道它们的大小呢？

一种粗略测定分子大小的方法是油膜法。把油滴滴到水面上，油在水面上散开，形成单分子油膜（图 13 - 1）。如果把分子看成球形，单分子油膜的厚度就可以认为等于油分子的直径。事先测出油滴的体积，再测出油膜的面积，就可以算出油分子的直径。测定结果表明，分子直径的数量级是 10^{-10} 米。

现在有了能放大 200 万倍的离子显微镜，用它可以看到钨针针尖上原子分布的图样（图 13 - 2），并且可以测出钨原子间的距离大约是 2×10^{-10} 米。设想钨原子是一个挨着一个排列的，可以认为钨原子间的距离 2×10^{-10} 米就是钨原子的直径。

物理学中有各种不同的方法测定分子的大小。用不同方法测出的分子大小并不完全相同，但数量级是相符的。测定结果表明，除了一些有机物质的大分子外，一般分子直径的数量级都是 10^{-10} 米。例如水分子直径约为 4×10^{-10} 米，氢分子的直径约为 2.3×10^{-10} 米。

把分子看作小球，是分子动理论中对分子的简化模型。实际上，分子有它复杂的内部结构，并不真是小球。因此，说分子的直径有多大，一般知道数量级已经可以了，它提供了关于分子大小的一个数量观念，使我们了解分子是多么微小。

阿伏加德罗常数 我们在化学课中学过，1 摩的任何物质含有的微粒数相同，这个数叫阿伏加德罗常数。

知道分子的大小，不难粗略算出阿伏加德罗常数。例如水的摩尔体积是 1.8×10^{-5} 米³/摩。每个水分子的直径是 4.0×10^{-10} 米，体积约为

$\frac{\pi}{6} (4.0 \times 10^{-10})^3 = 3.0 \times 10^{-29}$ 米³。设想水分子是一个挨一个排列的，

可以算出 1 摩水中所含的水分子数：

$$N = \frac{1.8 \times 10^{-5} \text{ 米}^3 / \text{摩}}{3.0 \times 10^{-29} \text{ 米}^3} = 6.0 \times 10^{23} \text{ 摩}^{-1}。$$

早期测定阿伏加德罗常数的一种方法，就是利用油膜法测出分子直径，得出这个常数的。

阿伏加德罗常数是一个基本常数。科学工作者不断地用各种方法测量它，以期得到更精确的数值。1986 年用 X 射线法测得的数值是 $N = 6.0221367 \times 10^{23} \text{ 摩}^{-1}$ 。通常可取 $N = 6.02 \times 10^{23} \text{ 摩}^{-1}$ 。在粗略的计算中可取 $N = 6.0 \times 10^{23}$

摩⁻¹。

阿伏加德罗常数是个十分巨大的数字。因此，一般物体中的分子数目都是大得惊人的。例如，1 厘米³水中含有的分子数约为 3.3×10^{22} 个。假如全世界 45 亿人不分男女老少都来数这些分子，每人每秒数一个，也需要将近 23 万年的时间才能数完。把 1 克酒精倒入容积为 100 亿立方米的水库中，酒精分子均匀分布在水中以后，每 1 厘米³水中的酒精分子数，仍然在 100 万个以上。

分子的质量 根据阿伏加德罗常数，很容易算出分子的质量。例如，水的摩尔质量是 1.8×10^{-2} 千克/摩，1 摩水中含有 6.0×10^{23} 个分子，所以水分子的质量是

$$m_{\text{水}} = \frac{1.8 \times 10^{-2} \text{ 千克} \cdot \text{摩}^{-1}}{6.0 \times 10^{23} \text{ 摩}^{-1}} = 3.0 \times 10^{-26} \text{ 千克}。$$

可见水分子质量是很小的。除了包含几千个原子的有机物大分子外，一般分子的质量都是很小的。用同样的方法可以算出氧分子的质量是 5.3×10^{-26} 千克，氢分子的质量是 3.35×10^{-27} 千克。

阿伏加德罗常数是微观世界的一个重要常数，用分子动理论定量地研究热现象经常要用到它，它是联系微观世界和宏观世界的桥梁。从上面讲的可以看出，阿伏加德罗常数把摩尔质量或摩尔体积这种宏观物理量跟分子质量或分子大小这种微观物理量联系起来来了。

· 阅读 ·

离子显微镜

离子显微镜由半径约为 10 厘米的球形玻璃容器和一根钨针组成，钨针的针尖放在容器的中心（图 13 - 3）。针尖的表面可以看作是半径非常小的球面，近代金属加工技术可以做到使这个半径约为 5×10^{-6} 厘米。在球形容器的内表面涂上一薄层导电物质，像电视荧光屏那样，在快速粒子打击下可以发光。在导电层和针尖之间加上高电压，使导电层带负电，针尖带正电。

在球形容器中充满低压的氦气。当无规则运动的氦原子与针尖上的钨原子碰撞时，由于氦原子失去电子成为正离子，氦离子在电力作用下就离开针尖，以很大速度沿着球半径运动，打到球形容器的内表面上使之发光。这样，就出现了钨针针尖上原子分布的图样（图 13 - 2）。

图 13 - 4 中弧长 ab 表示相邻两个钨原子间的距离，弧长 AB 表示它们在球形容器内表面上的像之间的距离。因为 $AB=Ra$ ， $ab=ra$ ，所以放大倍

$$\text{数 } K = \frac{AB}{ab} = \frac{R}{r} = \frac{10 \text{ 厘米}}{5 \times 10^{-6} \text{ 厘米}} = 2 \times 10^6，\text{ 即放大二百万倍。已知放大倍}$$

数，测出弧长 AB ，就可以求出原子间的距离 ab 。设想钨原子是一个挨一个排列的，可以认为距离 ab 等于钨原子的直径。测定结果表明，钨原子的直径是 2×10^{-10} 米。

练习一

(1) 把体积为 1 毫米^3 的石油滴在水面上，石油在水面上形成面积为 3 米^2 的单分子油膜。试估算石油分子的直径。

(2) 设想把分子一个挨一个地排起来，要多少个分子才能排满 1 米的长度？

(3) 10 克氧中含有多少个氧分子？

(4) 已经测得一个碳原子的质量是 1.995×10^{-26} 千克，求阿伏加德罗常数。

(5) 已知金刚石的密度是 3500 千克/米^3 。有一小块金刚石，体积是 $5.7 \times 10^{-8} \text{ 米}^3$ 。这块金刚石中含有多少个碳原子？设想金刚石中碳原子是紧密地堆在一起的，估算碳原子的直径。

二、分子的热运动

物体里的分子永不停息地做无规则运动，这个结论也是在实验事实的基础上得到的。我们在初中学过的扩散现象表明分子在不停地运动。现在再讲一种现象，它可以更明显地证实分子的无规则运动。这种现象叫做布朗运动。

布朗运动 1827年英国植物学家布朗用显微镜观察悬浮在水中的花粉，发现花粉颗粒不停地做无规则的运动。这种运动后来叫做布朗运动。不只是花粉，对于液体中各种不同的悬浮微粒，都可以观察到布朗运动。取一滴稀释了的墨汁放在显微镜下观察（图 13 - 5），可以看到小碳粒在做无规则的布朗运动。图 13 - 6 是在观察中记录的做布朗运动的微粒的运动路线。这个图只画出了每隔 30 秒观察到的微粒的位置，用直线把它们依次连接起来。实际上，就是在短短的 30 秒内，小颗粒的运动也是极不规则的。

布朗运动是怎样产生的呢？起初，人们认为是由外界影响如震动、液体的对流等引起的。但实验表明，在尽量排除外界影响的情况下，布朗运动仍然存在。只要微粒足够小，在任何液体中都可以观察到布朗运动。布朗运动决不会停止，可以连续观察许多天甚至几个月，也看不到这种运动会停下来。可见布朗运动的原因不在外界，而在液体内部。

在显微镜下看起来是连成一片的液体，实际上是由许许多多做不规则运动的分子组成的。悬浮在液体中的微粒不断地受到液体分子的撞击，图 13 - 7 描绘了一个微粒受到液体分子撞击的情景。当微粒足够小时，它受到的来自各个方向的液体分子的撞击作用是不平衡的。在某一瞬间，微粒在某个方向受到的撞击作用强，致使微粒发生运动。在下一瞬间，微粒在另一方向受到的撞击作用强，致使微粒又在别的方向发生运动。这样，就引起了微粒的无规则的布朗运动。

悬浮在液体中的颗粒越小，在某一瞬间跟它相撞的分子数越少，撞击作用的不平衡性就表现得越明显，因而布朗运动越明显。悬浮在液体中的颗粒越大，在某一瞬间跟它相撞的分子数越多，撞击作用的不平衡性就表现得越不明显，以至可以认为撞击作用相互平衡，因而布朗运动越不明显以至观察不到。

可见，液体分子永不停息的无规则运动是产生布朗运动的原因。分子的运动我们是看不见的。做布朗运动的微粒是由成千上万个分子组成的，微粒的布朗运动并不是分子的运动。但是微粒的布朗运动的无规则性，却反映了液体内部分子运动的无规则性。

思考与讨论

图 13 - 6 中所示的不同小颗粒的布朗运动的情况并不相同，人们由此考虑到布朗运动不可能是由外界影响引起的。为什么？找几位同学一起讨论一下，并说明你的理由。

热运动 实验表明，布朗运动随着温度的升高而愈加激烈。在扩散现象中，温度越高，扩散进行得越快。这表示分子的无规则运动跟温度有关

系，温度越高，分子的无规则运动越激烈。正因为分子的无规则运动跟温度有关系，所以通常把分子的这种运动叫做热运动。

练习二

(1) 有人说布朗运动就是分子的运动。这种说法对吗？为什么？

(2) 为什么悬浮在液体中的颗粒越小，它的布朗运动越明显？为什么悬浮在液体中的颗粒越大，它的布朗运动越不明显以至观察不到？

(3) 为什么说布朗运动的无规则性反映了液体内部分子运动的无规则性？设想液体内部分子的运动是有规则的，比如在任何时刻所有分子都向着某个方向运动，还能不能产生布朗运动？

三、分子间的相互作用力

布朗运动和扩散现象不但说明分子不停地做无规则运动，同时也说明分子间是有空隙的，否则分子便不能运动了。气体容易被压缩，水和酒精混合后的体积小于两者原来体积之和，说明气体分子之间、液体分子之间都有空隙。有人曾用两万标准大气压的压强压缩钢筒中的油，发现油可以透过筒壁逸出，说明钢的分子之间也有空隙。前面讲述分子的大小时，认为固体分子和液体分子是一个挨一个排列的，那只是为估算分子直径的数量级而作的设想。

分子间虽然有空隙，大量分子却能聚集在一起形成固体或液体，说明分子之间存在着引力。用力拉伸物体，物体内部要产生反抗拉伸的弹力，就是因为分子间存在着引力。把两块纯净的铅压紧，由于分子间的引力，两块铅就合在一起，甚至下面吊一个重物也不能把它们拉开。把两块光学玻璃的表面磨得很光滑又相吻合，把表面处理干净，施加一定的压力可以把它们粘合在一起，这也是利用了分子间的引力。

分子间有引力，而分子间又有空隙，没有紧紧吸在一起，这说明分子间还存在着斥力。用力压缩物体，物体内部要产生反抗压缩的弹力，就是分子间的斥力的表现。

研究表明，分子间同时存在着引力和斥力，它们的大小都跟分子间的距离有关。图 13 - 8 中的两条虚线分别表示两个分子间的引力和斥力随距离变化的情形，实线表示引力和斥力的合力即实际表现出来的分子间的作用力随距离变化的情形。

我们看到，引力和斥力都随着距离的增大而减小。当两分子间的距离等于 r_0 时，分子间的引力和斥力相互平衡，分子间的作用力为零。 r_0 的数量级约为 10^{-10} 米。相当于距离为 r_0 的位置叫做平衡位置（图 13 - 9 甲）。

当分子间的距离小于 r_0 时，引力和斥力虽然都随着距离的减小而增大，但是斥力增大得更快，因而分子间的作用力表现为斥力（图 13 - 9 乙）。

当分子间的距离大于 r_0 时，引力和斥力虽然都随着距离的增大而减小，但是斥力减小得更快，因而分子间的作用力表现为引力（图 13 - 9 丙），它随着距离的增大迅速减小，当分子间的距离的数量级大于 10^{-9} 米时，已经变得十分微弱，可以忽略不计了。

分子是由原子组成的，原子内部有带正电的原子核和带负电的电子。分子间这样复杂的作用力就是由这些带电粒子的相互作用引起的。

分子不停地做无规则运动，它们之间又存在相互作用力。分子力的作用使分子聚集在一起，分子的无规则运动将使它们分散开来。由大量分子组成的物体可以处于气、液、固三种不同的物质状态，正是由这两种相反的因素决定的。

在固体中，分子力的作用比较强大，绝大多数分子被束缚在平衡位置附近做微小的振动。温度升高，分子的无规则运动加剧，加剧到一定程度，分子力的作用已经不能把分子束缚在固定的平衡位置附近，但分子还不能

分散远离，于是物体表现为液体状态。温度再升高，分子的无规则运动更加剧，到一定限度，分子分散远离，分子力的作用很微弱，分子可以到处移动，物体就表现为气体状态。

思考与讨论

当分子中心间的距离小于 r_0 时，分子间的作用力表现为斥力，它随着距离的减小而很快地增大。分子间作用力的这一特点，可以借助于下述模型想象出来。设想分子为弹性钢球，当两个钢球相撞时，它们都发生微小的形变，因而在它们之间产生相互排斥的弹力，如同分子间的作用力表现为斥力一样。钢球发生微小形变就可以产生很大的弹力，所以这个弹力随着钢球中心间距离的减小而很快地增大。利用这一模型可以粗略地估计出分子直径的数量级为 10^{-10} 米。这是怎样估计的？

练习三

(1) 什么事例说明分子间有引力？什么事例说明分子间有斥力？

(2) 当分子间的距离大于 r_0 时，随着距离的增大，引力和斥力哪个减小得快？当分子间的距离小于 r_0 时，随着距离的减小，引力和斥力哪个增加得快？

(3) 物体为什么能够被压缩，但又不能无限地被压缩？

(4) 把一块洗净的玻璃板吊在橡皮筋的下端，使玻璃板水平地接触水面（图 13 - 10）。如果你想使玻璃板离开水面，用手向上拉橡皮筋，拉动玻璃板的力是否大于玻璃板受的重力？动手试一试，并解释为什么。

*四、晶体和非晶体

固体可以分成晶体和非晶体两类。在常见的固体中，石英、云母、明矾、食盐、硫酸铜等都是晶体；玻璃、蜂蜡、松香、沥青、橡胶等都是非晶体。晶体和非晶体在外形上和物理性质上都有很大区别。

晶体都具有规则的几何形状。例如，食盐的晶体呈立方体形（图 13 - 11 甲），明矾的晶体是八面体（图 13 - 11 乙），石英的晶体（透明的石英晶体叫水晶）中间是一个六面棱柱，两端是六面棱锥（图 13 - 11 丙）。冬季的雪花，是水蒸气在空气中冻结时形成的冰的晶体，它们的形状虽然不同，但都是六角形的规则图案（图 13 - 12）。非晶体则没有规则的几何形状。

晶体和非晶体除了外形上的差别外，在物理性质上也有所不同。

取一张云母薄片，在上面涂一层很薄的石蜡，然后用烧热的钢针去接触云母片，接触点周围的石蜡就熔化了，而熔化了的石蜡成椭圆形（图 13 - 13）。如果用玻璃片做同样的实验，熔化了的石蜡成圆形（图 13 - 14）。这表明在云母晶体里各个方向上的导热性能不同，在非晶体玻璃里各个方向上的导热性能是相同的。晶体在不同的方向上不仅导热性能不同，机械强度和导电性能等其他物理性质也不同。也就是说，晶体内部的物理性质与方向有关，这种特性叫做各向异性。非晶体的各种物理性质在各个方向上都相同，所以是各向同性的。

晶体可以分为单晶体和多晶体。如果整个物体就是一个晶体，这样的物体就叫做单晶体。上面说的晶体就是指单晶体。单晶体是科学技术上的重要原材料，制造各种晶体管就要用纯度很高的单晶硅或单晶锗。

如果整个物体是由许多杂乱无章地排列着的小晶体（晶粒）组成的，这样的物体就叫做多晶体。平常见到的各种金属材料就是多晶体。把纯铁做成的样品放在显微镜下观察，可以看到它是由许许多多晶粒组成的。晶粒有大有小，最小的只有 10^{-5} 厘米那样大，最大的也超不过 10^{-3} 厘米。每个晶粒都是一个小单晶体，具有各向异性。晶粒在多晶体里杂乱无章地排列着，所以多晶体没有规则的几何形状，也不显示各向异性，它在不同方向上的物理性质是相同的，即各向同性。

为什么晶体和非晶体会会有这些差异呢？这要从晶体的微观结构中去寻找答案，人们很早就开始了这方面的探索。

* 五、空间点阵

19 世纪中叶，人们根据晶体外形的规则性和各向异性提出了一种假说，认为晶体内部的微粒是有规则排列着的。从 1912 年开始的应用 X 射线对晶体结构进行的研究，证实了这种假说的正确。现在，人们用电子显微镜对晶体内部结构进行直接观察和照相，进一步证实了这种假说的正确。

组成晶体的物质微粒（分子、原子或离子）依照一定的规律在空间中排成整齐的行列，构成所谓空间点阵。晶体中物质微粒的相互作用很强，微粒的热运动不足以克服它们的相互作用而远离，因而形成了可用空间点阵来描述的晶体结构。微粒的热运动表现为在一定的平衡位置附近不停地做微小的振动。

图 13 - 15 是食盐的晶体结构示意图。食盐的晶体是由钠离子 Na^+ 和氯离子 Cl^- 组成的，它们等距离地交错地排列在三组相互垂直的平行线上，因而食盐具有正立方体的外形。

晶体外形的规则性可以用物质微粒的规则排列来解释。同样，晶体的各向异性也是由晶体的内部结构决定的。

图 13 - 16 表示在一个平面上晶体物质微粒的排列情况。从图上可以看出，在沿不同方向所画的等长直线 AB、AC、AD 上，物质微粒的数目不同。直线 AB 上物质微粒较多，直线 AD 上较少，直线 AC 上更少。正因为在不同方向上物质微粒的排列情况不同，才引起晶体在不同方向上物理性质的不同。

有的物质能够生成种类不同的几种晶体，是因为它们的物质微粒能够形成不同的晶体结构。例如，碳原子如果按图 13 - 17 那样排列，就成为石墨，按图 13 - 18 那样排列，就成为金刚石。石墨是层状结构，层与层之间距离较大，作用力较弱，沿着这个方向容易把石墨一层层地剥下。金刚石中碳原子间的作用力很强，所以金刚石有很大的硬度。金刚石和石墨，除了力学性质不同外，其他物理性质上也有很大差异。金刚石的密度大，石墨的密度小；金刚石不能导电，石墨能导电。不只是碳元素能组成不同的晶体，其他元素也有这种情况。

思考与讨论

食盐的摩尔质量 $M=58.5$ 克/摩，食盐的密度 $\rho=2.2$ 克/厘米³，阿伏加德罗常数 $N=6.0 \times 10^{23}$ 摩⁻¹。试估算食盐晶体中两个相距最近的离子中心间的距离。

* 六、液体的微观结构

液体的性质介于气体和固体之间。液体一方面象固体，具有一定的体积，不易压缩；另一方面又象气体，没有一定的形状，具有流动性。液体汽化时体积改变上千倍，凝固时体积改变不过百分之十。液体更接近于固体。

跟固体一样，液体中的分子也是密集在一起的，因而液体具有一定的体积，不易压缩。液体分子在很小的区域内作有规则的排列，这种区域是由分子暂时形成的，边界和大小随时改变，有时瓦解，有时又重新形成。液体由大量这种暂时形成的小区域构成，这种小区域杂乱无章地分布着，因而液体表现出各向同性。

液体分子间的距离小，相互作用力还很大，液体分子的热运动与固体类似，主要表现为在平衡位置附近做微小的振动。跟固体不同的是，液体分子没有长期固定的平衡位置，在一个平衡位置附近振动一小段时间以后，又转到另一个平衡位置附近去振动，即液体分子可以在液体中移动。这就是液体具有流动性的原因。

非晶体的微观结构跟液体非常类似，可以看作是粘滞性极大的液体。所以严格说来只有晶体才能叫做真正的固体。

· 阅读 ·

液 晶

某些有机化合物（现已发现有几千种）具有一种特殊的物质状态，叫做液晶。液晶一方面象液体，具有流动性；另一方面又象晶体，它的分子在某个特定方向上排列比较整齐。液晶是介于液体和固体之间的过渡状态，微观结构也介于固液之间。

液晶是不稳定的，外界影响的微小变动都会引起液晶分子排列的变化，改变它的光学性质。有一种液晶，在外加电压的影响下，会由透明状态变成混浊状态，不再透明。去掉电压，又恢复透明。利用这一性质，可以制成显示元件。在两电极间将液晶涂成文字或数码，加上适当电压，透明的液晶变得混浊了，文字或数码就显示出来了。这种显示元件用于电子手表、电子计算器、微电脑以及其他仪器中。

还有一种液晶，具有灵敏的温度效应，温度改变时会改变颜色。只要温度升高 1°C ，液晶就会按红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫的顺序改变颜色；温度降低，又按相反顺序改变颜色。液晶的这种性质，可以用来探测温度。例如在医学上可用来检查肿瘤。在皮肤表面涂上一层液晶，由于肿瘤部分的温度与周围正常组织的温度不一样，液晶会显示出不同的颜色。利用这种液晶还可以检查电路中的短路点，把液晶涂在印刷线路板上，由于短路处温度升高，这个地方液晶显示的颜色就与其他地方不同。

液晶早在 19 世纪 80 年代就被发现，然而长时期没有引起人们的注意，因为没有发现它有什么实际用途。直到电子技术和其他一些技术迅速发展起来以后，人们对于液晶的研究才有了重要的进展，使液晶在电子工业、航空工业、生物、医学等领域内获得了广泛的应用。随着科学技术的发展，

液晶的实际应用有着广阔的前途。

* 七、液体的表面张力

把一根棉线的两端系在铁丝环上（棉线不要张紧），然后把环浸入肥皂水里，再拿出来，环上就布满了肥皂水的薄膜。这时薄膜上的棉线是松弛的（图 13 - 19 甲）。如果用热针刺破棉线左侧的薄膜，右侧薄膜就会收缩，使棉线向右弯成弧形（图 13 - 19 乙）；如果刺破棉线右侧的薄膜，左侧的薄膜就会收缩，使棉线向左弯成弧形（图 13 - 19 丙）。

把一个棉线圈系在铁丝环上，使环上布满肥皂水的薄膜，这时膜上的棉线圈是松弛的（图 13 - 20 甲）。如果刺破棉线圈里的那部分薄膜，棉线圈外的薄膜就会收缩，使棉线圈张紧成圆形（图 13-20 乙）。

这些实验表明：液体的表面就好象张紧的橡皮膜一样，具有收缩的趋势。

为什么液体表面具有收缩的趋势呢？原来液体跟气体接触的表面形成一个薄层，叫做表面层（图 13 - 21）。表面层里的情况跟液体内部有所不同。研究表明，表面层里的分子要比液体内部稀疏些，也就是分子间的距离要比液体内部大些。在液体内部分子间既存在着引力，又存在着斥力。引力和斥力的数量级相同，在通常的条件下可以认为它们的大小是相等的。在表面层里分子间的距离大，引力和斥力都减小，但斥力减小得更快，所以分子间的相互作用表现为引力。如果在液面上划一条分界线 MN（图 13 - 22），把液面分为（1）和（2）两部分，那么，由于表面层中分子间的引力，液面（1）对液面（2）有引力 f_1 的作用，液面（2）对液面（1）有引力 f_2 的作用， f_1 和 f_2 大小相等方向相反。像这种液面各部分间相互吸引的力，叫做表面张力。液体的表面张力使液面具有收缩的趋势。

表面张力是跟液面相切的。如果液面是平面，表面张力就在这个平面上；如果液面是曲面，表面张力就在这个曲面的切面上。作用在任何一部分液面上的表面张力，总是跟这部分液面的分界线垂直。

由于液体的表面张力，有些小昆虫可以在水面上跑来跑去或者停留在水面上，不致于陷入水里。在液体的压强不大的情况下，表面张力使液体流不过网眼很密的筛子。在体积相等的各种形状的物体中，球形物体的表面积最小。所以荷叶上的小水滴、草叶上的露珠，因表面张力使液面收缩而呈球形。在水平的玻璃板上，较大的水银滴的形状是扁平的，是因为液滴所受重力的影响不能忽视的缘故。

· 小实验 ·

缝衣针浮在水面上

把一根缝衣针放在一张棉纸上，用纸托着缝衣针一同放在水面上。棉纸湿透后沉入水底，缝衣针会浮在水面上。用手指向下按缝衣针的一端，缝衣针就沉到水底。做这个实验。你能说明缝衣针起初被水的表面托住是什么原因吗？

练习四

(1) 把玻璃管的断裂口放在火焰上烧熔，它的尖端就变圆。这是什么缘故？

(2) 在处于失重状态的宇宙飞船中，一大滴水银会呈什么形状？为什么？

(3) 把熔化的铅一滴一滴地滴入水中，凝固后可以得到球形的小铅弹。为什么？

*八、浸润和不浸润

在洁净的玻璃板上放一滴水银，它能够在玻璃板上滚来滚去，而不附着在上面。把一块洁净的玻璃片浸入水银里再取出来，玻璃上也不附着水银。这种现象叫做不浸润。对玻璃来说，水银是不浸润液体。

在洁净的玻璃板上放一滴水，它要附着在玻璃板上形成薄层。把一块洁净的玻璃片浸入水里再取出来，玻璃片的表面是带有一层水的。这种现象叫做浸润。对玻璃来说，水是浸润液体。

同一种液体，对一些固体来说是浸润的，对另一些固体来说是不浸润的。水能浸润玻璃，但不能浸润石蜡。水银不能浸润玻璃，但能浸润锌。

把浸润液体装在容器里，例如把水装在玻璃容器里，由于水浸润玻璃，器壁附近的液面向上弯曲（图 13 - 23）。把不浸润液体装在容器里，例如把水银装在玻璃容器里，由于水银不浸润玻璃，器壁附近的液面向下弯曲（图 13 - 24）。在内径较小的容器里，这种现象更显著，液面形成凹形或凸形的弯月面。

浸润和不浸润现象是分子力作用的表现。当液体与固体接触时，在接触处形成一个液体薄层，叫做附着层。附着层里的分子既受到固体分子的吸引，又受到液体内部分子的吸引。如果受到的固体分子的吸引比较弱，附着层里的分子就比液体内部稀疏，在附着层里就出现跟表面张力相似的收缩力，这时跟固体接触的液体表面有缩小的趋势，形成不浸润现象。相反，如果受到的固体分子的吸引相当强，附着层里的分子就比液体内部更密，在附着层里就出现液体相互排斥的力，这时跟固体接触的液体表面有扩展的趋势，形成浸润现象。

浸润现象和不浸润现象在日常生活中是常见的。我们用的毛巾都是用能被水浸润的针织物做成的。能够用墨水在纸上写字，是因为所用的纸被墨水浸润。脱脂棉脱脂的目的，在于使它从不能被水浸润变为可以被水浸润，以便吸取药水。各种游禽都会用嘴把由体内分泌出来的油脂涂在自己的羽毛上，使羽毛不被水浸润，从而有助于它们浮在水面上。

*九、毛细现象

把几根内径不同的细玻璃管插入水中，可以看到管里的水面比容器里的水面高。管的内径越小，管里的水面越高（图 13 - 25）。如果把这些细玻璃管插入水银中，发生的现象正好相反，管里的水银面比容器里的水银面低。管的内径越小，管里的水银面越低（图 13 - 26）。

浸润液体在细管里上升的现象和不浸润液体在细管里下降的现象，叫做毛细现象。发生毛细现象的管叫做毛细管。

浸润液体为什么能在毛细管里上升呢？原来，浸润液体跟毛细管内壁接触时，引起液面的弯曲，使液面变大。而表面张力的收缩作用要使液面减小，于是管内液体随着上升，以减小液面。直到表面张力向上的拉引作用和管内升高的液柱的重量达到平衡时，管内液体停止上升，稳定在一定的高度。利用类似的分析，也可以解释不浸润液体在毛细管里下降的现象。

纸张、棉花、毛巾、粉笔、木材、土壤、砖块等物体，内部有许多细小的孔道，起着毛细管作用。毛巾吸汗，砖块吸水，粉笔吸墨水，都是常见的毛细现象。

毛细现象在农业生产上有非常重要的意义。土壤里有很多毛细管，地下的水分可以沿着它们上升到地面。如果要保存地下的水分来供植物的根吸收，就要把地面的土壤锄松，破坏这些土壤里的毛细管。相反，如果想把地下的水分引上来，就不仅要保持土壤里的毛细管，而且还要使它们变得更细，这时就要用滚子压紧土壤。

植物的导管是植物体内的极细的毛细管，它能把土壤里的水分吸上来，并从根部输送到枝叶。

在有些情况下，要防止毛细现象。例如，在建筑房屋的时候，在砌砖的地基上铺有油毡防潮层，以防止土壤中的水分由于毛细管的作用沿砖墙上升。

本章小结

本章学习了分子动理论的基本内容，学习了固体和液体的微观结构以及液体的表面张力等现象。分子动理论是建立在一定实验基础上的，学习分子动理论要注意它的实验基础。用分子动理论可以说明很多热现象和物质的性质，我们要熟悉对宏观现象进行微观解释。

(1) 分子动理论的基本内容是什么？

(2) 测定分子的大小和阿伏加德罗常数有什么方法？

(3) 有什么现象说明分子永不停息地做无规则运动？什么叫布朗运动？布朗运动是怎样产生的？为什么把大量分子的无规则运动叫做热运动？

(4) 什么事实可以说明分子间存在着引力和斥力？仔细研究图 13 - 8，说明分子间作用力的特点。

* (5) 晶体和非晶体在外形和物理性质上有什么区别？

什么叫空间点阵？怎样从微观上解释晶体具有规则的外形和各向异性？

* (6) 液体的微观结构是怎样的？

什么叫表面张力？为什么液体表面具有收缩趋势？怎样从微观上解释表面张力？

什么叫浸润，什么叫不浸润？怎样从微观上解释浸润现象和不浸润现象？

什么叫毛细现象？为什么会发生毛细现象？

第十四章 内能 能量守恒定律

一、物体的内能

分子的动能 温度 既然组成物体的分子不停地做无规则运动，那么，像一切运动着的物体一样，做热运动的分子也具有动能。

物体里分子运动的速率是不同的，有的大，有的小，各个分子的动能并不相同。在热现象的研究中，我们所关心的不是物体里每个分子的动能，而是所有分子的动能的平均值。这个平均值叫做分子热运动的平均动能。

温度升高，物体分子的热运动加剧，分子热运动的平均动能也增加。温度越高，分子热运动的平均动能越大。温度越低，分子热运动的平均动能越小。从分子动理论的观点看来，温度是物体分子热运动的平均动能的标志。这样，分子动理论使我们懂得了温度的微观含义。

分子势能 分子间存在相互作用力，分子间具有由它们的相对位置决定的势能，这就是分子势能。

分子间的距离大于 r_0 （见图 13 - 8）的时候，分子间的相互作用表现为引力，要增大分子间的距离必须克服引力做功，因此分子势能随着分子间的距离的增大而增大。这种情形同弹簧被拉长时弹性势能的变化相似。分子间的距离小于 r_0 的时候，分子间的相互作用表现为斥力，要减小分子间的距离必须克服斥力做功，因此分子势能随着分子间的距离减小而增大。这种情形同弹簧被压缩时弹性势能的变化相似。

物体的体积发生变化时，分子间的距离发生变化，分子势能随着发生变化。可见分子势能跟物体的体积有关系。

物体的内能 物体中所有分子的热运动的动能和分子势能的总和，叫做物体的内能。一切物体都是由不停地做无规则热运动并且相互作用着的分子组成的，因此任何物体都具有内能。

由于分子热运动的平均动能跟温度有关系，分子势能跟体积有关系，因此物体的内能跟物体的温度和体积有关系，温度升高时，分子的动能增加，因而物体的内能增加。体积变化时，分子势能发生变化，因而物体的内能发生变化。

练习一

(1) 壶里的水被加热而温度升高，水的内能怎样改变？液体的热膨胀很小，可不予考虑。

(2) 一根烧红了的铁棍逐渐冷却下来，铁棍的内能怎样改变？固体的热膨胀很小，可不予考虑。

(3) 设想我们对固体进行压缩。当分子间的距离小于 r_0 时，随着固体被压缩，分子势能怎样改变？

(4) 一颗炮弹在高空中以某一速度飞行。由于炮弹中所有分子都具有这一速度，所以分子具有动能。又由于所有分子都在高处，所以分子具有势能。所有分子的上述动能和势能的总和就是炮弹的内能。上述说法正确不正确？为什么？

二、改变内能的两种方式

在热学研究所涉及的总是内能的变化。什么物理过程可以改变物体的内能呢？

做功可以改变物体的内能。用锯条锯木头，我们克服摩擦力做功，锯条和木头的温度升高，内能增加。这类所谓摩擦生热的现象，是大家都知道的。子弹射进木块中，子弹克服摩擦力做功，子弹和木块的温度升高，内能增加。用搅拌器在水中搅拌做功，可以使水的温度升高，内能增加。

气体被压缩或膨胀时做功，气体的内能就发生变化。在一个厚壁玻璃筒里放一块棉花，迅速压下活塞，对筒内空气做功，空气的内能增加，温度升高，可以使棉花燃烧起来（图 14 - 1）。柴油机就是利用这个道理来点火，使喷入气缸内的雾状柴油燃烧的。热机气缸内高温高压的气体膨胀时对外做功，气体的温度降低，内能减少。热机就是利用这个道理做功的。

图 14—1

做功并不是改变物体内能的唯一方式，灼热的火炉使它上面和周围的物体温度升高，这些物体的内能增加。放在室内的一杯热水不断散热，温度降低，内能减少。在这样的过程中，物体的内能改变了，但是并没有做功。这种没有做功而使物体内能改变的物理过程叫做热传递。

可见，能够改变物体内能的物理过程有两种：做功和热传递。

复习初中学过的有关知识，你再举出几个实例，说明做功可以改变物体的内能。

做功使物体的内能发生变化的时候，内能的变化就用功的数值来量度。外界对物体做多少功，物体的内能就增加多少；物体对外界做多少功，物体的内能就减少多少。

热传递使物体的内能发生变化的时候，内能的变化是用热量来量度的。外界传递给物体多少热量，或者说物体吸收了多少热量，物体的内能就增加多少；物体传递给外界多少热量，或者说物体放出了多少热量，物体的内能就减少多少。

一杯水可以用热传递的方式传给它一定的热量，使它从某一温度升高到另一温度；也可以用做功的方式，比如用搅拌器在水中搅拌，使它升高同样的温度。两种方式不同，得到的结果却相同。除非事先知道，我们将无法区别是哪种方式使这杯水的内能增加的。可见，做功和热传递对改变物体的内能是等效的。

· 阅读 ·

热功当量

既然做功和热传递对改变物体内能是等效的，功和热量之间就应该有确定的数量关系。在物理学的发展史上，曾规定热量的单位是卡，使 1 克水的温度升高 1 所需的热量就是 1 卡。如果功和热量之间有确定的数量

关系，1 卡的热量相当于多少焦耳的功？相当于单位热量的功的数值叫做热功当量。历史上第一个用实验测定热功当量的人是英国物理学家焦耳。他用不同的方法测定热功当量，下面介绍其中最著名的一种（图 14 - 2）。

量热器里装着水。重物 P 和 P' 下落时带动量热器中的轴转动，轴上的叶片就带动周围的水随着转动。量热器内壁上也固定着叶片，它们的作用是阻碍水的运动，增大摩擦。叶片搅动水做功，使水的内能增加，温度由 t_1 升高到 t_2 。已知每个重物的质量 M 和落下的高度 h，可以算出这个功： $W=2Mgh$ 。假定水的内能的增加不是由于做功而是由于热传递的结果，也可以算出使水的温度由 t_1 升高到 t_2 所需的热量： $Q=(m_1c_1+m_2c_2)(t_2-t_1)$ ，其中 m_1 、 m_2 、 c_1 、 c_2 分别表示水和量热器的质量和比热。这样，就可以求出热功当量： $J=W/Q$ 。

这个实验，焦耳做过多次，测得的热功当量的数值相同。他又用水银代替水，重做上述实验，也得到相同的结果。他还用其他方法来测定，结果仍然相同。焦耳同时代的和以后的许多科学家用不同的方法来测定，结果都相同。热功当量的数值通常可取为

$$J=4.2 \text{ 焦/卡。}$$

热功当量的数值的确定，证明功和热量之间存在着确定的数量关系，即 1 卡=4.2 焦，或者 1 焦=0.24 卡。这进一步定量地证明做功和热传递对改变物体的内能是等效的。因此，功、热量和能量使用相同的单位，是很自然也很合理的，现在国际单位制中规定它们统一用焦耳作单位。

练习二

(1) 锅炉中盛有 1500 千克的水，由 20 加热到 100，水的内能增加多少焦？水的比热 $c=4.2 \times 10^3$ 焦/(千克·)。

(2) 一个物体的内能增加了 20 焦。如果物体跟周围环境不发生热交换，周围环境需要对物体做多少焦的功？如果周围环境对物体没有做功，需要传给物体多少焦的热量？

(3) 设想在测定热功当量的不同实验中得到的结果并不相同，还能不能得到结论说：做功和热传递对改变物体的内能是等效的？讨论一下这个问题。

三、能量守恒定律

热力学第一定律 现在我们来研究功、热量跟内能变化之间的定量关系。

一个物体，如果它跟外界不发生热交换，也就是它既没有吸收也没有放出热量，那么，外界对它做多少功，它的内能就增加多少。设外界对物体所做的功为 W ，内能的增加为 E ，那么， $W = E$ 。在物体对外界做功的情况下，上式同样适用。这时 W 为负值，内能的增加 E 也是负值，表示内能减少。

如果外界既没有对物体做功，物体也没有对外界做功，那么物体吸收了多少热量，它的内能就增加多少。设物体吸收的热量为 Q ，内能的增加为 E ，那么， $Q = E$ 。在物体放出热量的情况下，上式同样适用。这时 Q 为负值，内能的增加 E 也是负值，表示内能减少。

在一般情况下，如果物体跟外界同时发生做功和热传递的过程，那么，外界对物体所做的功 W 加上物体从外界吸收的热量 Q ，等于物体内能的增加 E 。即

$$W + Q = E。$$

上式所表示的功、热量跟内能变化之间的定量关系，在物理学中叫做**热力学第一定律**。

一定量的气体从外界吸收了 2.6×10^5 焦耳的热量，内能增加了 4.2×10^5 焦耳。气体对外界做了功，还是外界对气体做了功？做多少焦耳的功？

能量守恒定律 我们知道，功是能量转化的量度。做功使内能发生变化时，其他形式的能和内能发生相互转化。在摩擦生热的现象中，克服摩擦力做多少功，就有多少机械能转化成等量的内能。在图 14 - 1 所示的压缩气体做功的过程中，做多少功，就有多少机械能转化成等量的内能。气体膨胀做功的时候，做多少功，就有多少内能转化成等量的机械能。热传递使内能发生变化时，内能在物体之间发生转移，一个物体从外界吸收了多少热量，就有多少内能从外界转移给这个物体。热力学第一定律表示，做功和热传递提供给一个物体多少能量，物体的内能就增加多少，能量在转化或转移中守恒。

不但机械能，其他形式的能也可以和内能相互转化。通过电流的导线变热，电能转化成内能。燃料燃烧生热，化学能转化成内能。炽热的灯丝发光，内能转化成光能。实验证明，在这些转化中能量都是守恒的。

大量的事实证明：各种形式的能都可以相互转化，并且在转化中守恒。

能量既不会凭空产生，也不会凭空消失，它只能从一种形式转化为别的形式，或者从一个物体转移到别的物体。这就是**能量守恒定律**。

永动机不可能制成 历史上有不少人希望设计一种机器，这种机器不消耗任何能量，却可以源源不断地对外做功。这种机器被称为永动机。虽然经过多次尝试，作了各种努力，但永动机无一例外地归于失败。人类通过不断实践和研究，逐渐认识到：任何机器对外界做功，都要消耗能量。不消耗能量，机器是无法做功的。能量守恒定律的发现使人们进一步认识到：任何一部机器，只能使能量从一种形式转化为另一种形式，而不能无

中生有地创造能量。人类利用自然，必须遵循自然规律。人类要设法找出合理利用能源的途径，并减少机器运转过程中不必要的能量损耗，而不是去研制永远无法实现的永动机。

· 阅读 ·

能量守恒定律的建立

能量守恒定律是建立在自然科学发展的基础上的。从 16 世纪到 18 世纪，经过伽利略、牛顿、惠更斯、莱布尼兹以及伯努利等许多物理学家的认真研究，使力学得到了较大的发展。机械能的转化和守恒的初步思想，在这一时期已经萌芽。

18 世纪末和 19 世纪初，各种自然现象之间的联系相继被发现。伦福德、戴维的摩擦生热实验否定了“热质说”，把物体的内能的变化与机械运动联系起来。1800 年发明伏打电池之后不久，又发现了电流的热效应、磁效应和其他一些电磁现象。这个时期，电流的化学效应也被发现，并被用来进行电镀。在生物学界，证明了动物维持体温和进行机械活动的能量跟它摄取的食物化学能有关。自然科学的这些成就，为建立能的转化和守恒定律作了必要的准备。

能量守恒定律的最后确定，是在 19 世纪中叶由迈尔、焦耳和亥姆霍兹等人完成的。

英国物理学家焦耳一生致力于实验研究。从 1840 年到 1878 年的将近 40 年的时间里，他研究了电流的热效应，压缩空气的温度升高以及电、化学和机械作用之间的联系。他做了 400 多次实验，用各种方法测定了热功当量，为能量守恒定律的发现奠定了坚实的实验基础。

德国医生迈尔是从生理学开始对能量进行研究的。1842 年，他从“无中生有，有不变无”的哲学观念出发，表达了能量转化和守恒的思想。他分析了 25 种能量的转化和守恒的现象，成为世界上首先阐述能量守恒思想的人。

在 1847 年，当焦耳宣布他的能量观点的时候，德国学者亥姆霍兹在柏林也宣读了同样课题的论文。在这篇论文中，他分析了化学能、机械能、电磁能、光能等不同形式能量的转化和守恒，并且把这个结果跟永动机不可能制造成功联系起来。他认为不可能无中生有地创造一个永久的推动力，机器只能转化能量，不能创造和消灭能量。亥姆霍兹在论文里对能量守恒定律作了清晰、全面而且概括的论述，使这一定律为人们广泛接受。

在 19 世纪中叶，还有一些人也致力于能量守恒的研究。他们从不同的角度出发，彼此独立地进行研究，却几乎同时发现了这一伟大的定律。因此，能量守恒定律的发现是科学发展的必然结果。恩格斯曾经把这一定律称为“伟大的运动基本定律”，认为它是 19 世纪自然科学的三大发现之一。

练习三

(1) 做功和热传递对改变物体的内能虽然等效，但从能量转化的观点

来看是有区别的。这种区别是什么？

(2) 用活塞压缩气缸里的空气，对空气做了 900 焦的功，同时气缸向外散热 210 焦。空气的内能改变了多少？

(3) 空气压缩机在一次压缩中，活塞对空气做了 2×10^5 焦的功，同时空气的内能增加 1.5×10^5 焦。这时空气向外界传递的热量是多少？

(4) 如果用 Q 表示物体吸收的能量，用 W 表示物体对外界所做的功，热力学第一定律也可以表达为下式：

$$Q = E + W。$$

怎样解释这个表达式的物理意义？试根据课文中的表达式推导出这个表达式。

(5) 试说明下列现象中能量是怎样转化的：

a. 在水平公路上行驶的汽车，发动机熄火之后，速度越来越小，最后停止。

b. 在阻尼振动中，单摆的振幅越来越小，最后停下来。

c. 火药爆炸产生燃气，子弹在燃气的推动下从枪膛发射出去，射穿一块钢板，速度减小。

d. 用柴油机带动发电机发电，供给电动水泵抽水，把水从低处抽到高处。

e. 在图 14 - 2 所示的焦耳测定热功当量的实验中，什么形式的能量转化成了水的内能？

本章小结

这一章学习了内能的概念，以及热力学第一定律和能量守恒定律。能量守恒定律是自然界的一条基本定律，我们要学习从能量转化和守恒的观点解释现象，处理问题。

(1) 从分子动理论的观点看来，温度标志着什么？什么是分子的动能？什么是分子势能？什么是物体的内能？物体的内能跟什么有关系？

(2) 改变物体的内能有哪两种方式？从能量转化的观点来看，它们有什么区别？

(3) 热力学第一定律的内容是什么？写出它的数学表达式。

(4) 能量守恒定律的内容是什么？举出若干实例来说明。

(5) 你是否善于从能量转化和守恒的观点解释现象，处理问题？自己总结一下这方面的经验。

习 题

(1) 取一个横截面积是 3 分米^2 的不高的圆筒，筒内装水 0.6 千克，用来测量射到地面的太阳能。在太阳光垂直照射 2 分钟后，水的温度升高了 1°C 。

a. 计算在阳光直射下，地球表面每平方厘米每分钟获得的能量。

b. 已知射到大气顶层的太阳能只有 45% 到达地面，另外 55% 被大气吸收和反射，而未到达地面。你能由此估算出太阳辐射的功率吗？需要什么数据，自己去查找。

实验测得的太阳辐射功率为 3.86×10^{26} 焦/秒。看看你估算的结果与这个结果在数量级上是否相符。

(2) 从 20 米高处落下的水，如果水的热能的 20% 用来使水的温度升高，水落下后的温度升高多少摄氏度？

(3) 用铁锤打击铁钉，设打击时有 80% 的机械能转化为内能，其中 50% 用来使铁钉的温度升高。打击 20 次后，铁钉的温度升高多少摄氏度？已知铁锤的质量为 1.2 千克，铁锤打击铁钉时的速度为 10 米/秒，铁钉的质量为 40 克，铁的比热为 5.0×10^2 焦/(千克·)。

(4) 在光滑的桌面上放着一个木块，铅弹从水平方向射中木块，把木块打落在地面上，落地点与桌边的水平距离为 0.4 米。铅弹射中木块后留在木块中。设增加的内能有 60% 使铅弹的温度升高，铅弹的温度升高多少摄氏度？已知桌面高为 0.8 米，木块的质量为 2 千克，铅弹的质量为 10 克，比热为 1.3×10^2 焦/(千克·)。取 $g=10$ 米/秒²。

(5) 有一台直流电动机，在 $U=220$ 伏的电压下工作，输入电流 $I=35$ 安。用它匀速提升质量 $m=1400$ 千克的货物，在 $t=2$ 秒内将货物提升的高度 $h=1$ 米。

a. 设电动机输出的能量全部用来提升货物，在这 2 秒内电机导线产生的热量是多少焦？ g 取 10 米/秒²。

b. 这台电动机的效率有多大？

c. 这台电动机导线的电阻有多大？

这个题目，要综合运用初中学过的电学知识，请先复习一下有关欧姆定律、电功率、焦耳定律的知识。

第十五章 气 体

一、气体的状态和状态参量

研究物理学问题，经常要用一些物理量来描述研究对象。问题不同，所用的物理量也不同。在力学中用位移、速度等物理量来描述物体的运动。现在研究气体的热学性质，要用体积、压强、温度等物理量来描述气体的状态。描述气体状态的这几个物理量叫做气体的状态参量。

温度 温度是表示物体冷热程度的物理量。从分子动理论的观点来看，温度标志着物体内部分子无规则运动的剧烈程度。温度越高，物体内部分子的热运动越剧烈。我们在初中学过摄氏温标，用摄氏温标表示的温度叫做摄氏温度，用 t 表示。它的单位是摄氏度，符号是 $^{\circ}\text{C}$ 。在国际单位制中，以热力学温标表示温度，这种温标将在第三节介绍。

体积 气体分子可以自由移动，因而气体总要充满整个容器。气体的体积就是指气体所充满的容器的容积。在国际单位制中，体积的单位有米³、分米³、厘米³等。日常生活和生产中还常用升作单位，升的符号是 L。1 升=10⁻³米³=1 分米³。

压强 气体对器壁有压力，这是气体分子频繁地碰撞器壁而产生的。用打气筒把空气打到自行车的车胎里去，会把车胎胀得很硬，就是因为空气对车胎有压力而造成的。气体作用在器壁单位面积上的压力叫做气体的压强。在国际单位制中，压强的单位是帕斯卡，简称帕，符号是 Pa。1 帕=1 牛/米²。

在图 15 - 1 中，容器内的气体被活塞封闭着，当活塞静止不动时，容器内的气体对活塞的压力跟大气压对活塞的压力平衡，容器内气体的压强 p 等于大气压 p_0 ，即 $p=p_0$ 。

图 15—1

在图 15 - 2 中，用长为 h 的一小段水银柱把气体封闭在玻璃管里。玻璃管水平放置时（图甲），被封闭的气体的压强 p_1 等于大气压 p_0 ，即 $p_1 = p_0$ 。玻璃管开口向上竖直放置时（图乙），气体的压强 p_2 等于大气压 p_0 加上这小段水银柱产生的压强 p_h ，即 $p_2=p_0 + p_h$ 。玻璃管开口向下竖直放置时（图丙），气体的压强 p_3 加上这小段水银柱产生的压强 p_h 等于大气压 p_0 ，即 $p_3 + p_h=p_0$ ，由此得到 $p_3=p_0 - p_h$ 。

举出气体对器壁有压力作用的几个实例。

一定质量的气体，它的温度、体积和压强这三个量的变化是互相关联的。把一定质量的气体压缩到钢筒里，气体的体积缩小，同时压强增大，温度上升。燃气在气缸里工作的时候，体积膨胀，同时压强减小，温度降低。对于一定质量的气体来说，如果温度、体积和压强这三个量都不改变，我们就说气体处于一定的状态中。如果三个量中有两个发生了改变，或者三个都发生了改变，我们就说气体的状态发生了改变。

一定质量的气体的状态发生变化时，这三个物理量的变化遵循什么规律呢？下面就来研究这个问题。

举出气体状态发生改变的几个实例。

在物理学中，当需要研究两个以上物理量间的关系时，往往先分别研究其中两个量间的关系（保持其他量不变），然后综合起来得出所要研究的那几个物理量之间的关系。这一章中，我们用实验方法先研究一定质量的气体在分别保持温度、体积不变时，其他两个量的变化规律，然后确定三个状态参量的变化规律。

练习一

(1) 在图 15 - 2 中，水银柱的长度为 20 厘米，大气压为 760 毫米汞柱。玻璃管开口向上竖直放置时，被封闭的气体的压强等于多少毫米汞柱，多少帕？开口向下竖直放置时，等于多少毫米汞柱，多少帕？

(2) 图 15 - 3 是测量气体压强的水银压强计，两端开口的 U 形管内装入水银，A 管跟容器连接。已知大气压 p_0 和两管中水银面的高度差，就可以知道容器中气体的压强。大气压为 1.013×10^5 帕，图甲和图乙中的 h 都是 10 厘米，分别求出这两种情形中气体的压强是多少帕。

图 15—3

(3) 在图 15 - 4 所示的几种情形中，被封闭的气体 A 的压强分别是多少帕？大气压为 1.013×10^5 帕。

二、等温变化 玻意耳定律

气体在温度保持不变的情况下发生的状态变化，叫做等温变化。这一节我们研究在等温变化中，一定质量的气体的压强随着它的体积而变化的规律。

在图 15 - 2 中，把玻璃管开口向下竖直放置时，气体的压强减小，气体的体积增大。把打气筒的出口堵住，往下压打气筒的活塞，会感到越往下压越费劲。这表示气体的体积减小，气体的压强增大。气体的压强和体积之间有什么定量关系呢？

实验 实验装置如图 15 - 5 所示，玻璃管 A 和 B 由一条橡皮管连接，A 管上端有一个阀门 a，B 管上端是开口的，研究对象是 A 管中水银柱上方封闭着的那部分气体。初状态如甲图所示。提起玻璃管 B 时，气体的体积减小，压强增大（乙图）。放低玻璃管 B，气体的体积增大，压强减小（丙图）。从竖直板上的刻度读出 A 管内气柱的长度，可以求得气体的体积。从两管水银面的高度差和大气压，可以求得气体的压强。

下表是用图 15 - 5 所示的装置（或其他装置，参见本书学生实验）测得的若干组压强和体积的数据。每组数据表示气体处于相应的某一状态。

气体：空气

压强 P ($\times 10^5$ 帕)	1.68	1.26	1.01	0.84	0.78
体积 V ($\times 10^{-5}$ 米 ³)	1.20	1.60	2.00	2.40	2.60

在平面直角坐标系中，用纵轴表示压强 p ，用横轴表示体积 V ，根据上述数据可在坐标平面上用若干个点分别表示出气体的各个状态。多测出若干组压强和体积的数据，在坐标平面上可以得到更多的点。由这些点连成的平滑曲线（图 15 - 6），叫做气体的等温线。

根据我们关于图线的知识，会想到图 15 - 6 所示的 P 和 V 之间可能存在反比关系。让我们来试探一下 p 和 V 是否真有反比关系。为此，根据上表中 V 的数据算出 $1/V$ 的数据，得到下表。在 $p-1/V$ 坐标平面上用若干点表示出下表的数据，并将这些点用线连起来，我们看到，它是通过坐标原点的一条直线（图 15—7）。这说明 p 和 V 确是成反比的。

气体：空气

压强 p ($\times 10^5$ 帕)	1.68	1.26	1.01	0.84	0.78
$1/V$ ($\times 10^4$ 米 ⁻³)	8.33	6.25	5.00	4.17	3.85

结论 在不同的温度下做实验，或者换用其他气体做实验，都得到相同的结论，即在温度不变时，压强 p 与体积 V 成反比。一定质量的某种气体保持温度不变，设初状态时的压强和体积为 p_1 和 V_1 ，末状态时的压强和体积为 p_2 和 V_2 ，则有

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}$$

或者

$$p_1V_1 = p_2V_2,$$
$$pV=C \text{ (常量)}。$$

一定质量的某种气体，在温度保持不变时，它的压强跟体积成反比，或者说，压强跟体积的乘积保持不变。这个结论是英国科学家玻意耳（1627～1691）和法国科学家马略特（1620～1684）各自独立发现的，叫做玻意耳定律。

图 15 - 6 所示的等温线实际上就是反比函数 $p=C/V$ 的图象。实验表明，对一定质量的某种气体，温度越高，常量 C 的数值越大。图 15 - 8 表示一定质量的某种气体在不同温度下的几条等温线。

从图 15 - 8 所示的几条等温线你能得到哪些信息？对一定质量的某种气体，保持体积不变，温度升高时，压强是增大还是减小？保持压强不变，温度升高时，体积是增大还是减小？

练习二

(1) 把打气筒的出口堵住，往下压打气筒的活塞，你会感到越往下压越费劲，怎样解释这种现象？

(2) 一定质量的某种气体的体积为 20 升时，压强为 1.0×10^5 帕。当气体发生等温变化，体积减小到 16 升时，压强为多大？

(3) 某容器的容积是 10 升，里面所盛气体的压强为 2.0×10^6 帕。保持温度不变，把这些气体装在另一个容器里，气体的压强变为 1.0×10^5 帕，这个容器的容积是多大？

(4) 在下端封闭的竖直玻璃管里有一段 4 厘米长的水银柱，水银柱的下面封闭着长 60 厘米的空气柱，玻璃管的横截面积是 0.1 厘米^2 。在温度不变时，如果再向管里装入 27.2 克的水银，待平衡时，封闭在水银柱下面的空气柱有多高？已知大气压 $p_0=760$ 毫米汞柱。水银的密度 $\rho=13.6 \times 10^3$ 千克/米³。

(5) 在图 15 - 2 中，水银柱的长度为 20 厘米，大气压为 760 毫米汞柱。玻璃管是粗细均匀的。玻璃管开口向上竖直放置时，被封闭的气体柱长 15 厘米，当开口向下竖直放置时，被封闭的气体柱的长度是多少？（保持温度不变）

三、等容变化 查理定律

气体在体积保持不变的情况下发生的状态变化，叫做等容变化。这一节我们研究在等容变化中，一定质量的气体的压强随温度而变化的规律。

炎热的夏天，打足了气的自行车轮胎在日光的曝晒下，有时会胀破。这是因为轮胎中的气体在曝晒下温度升高，气体的压强增大而造成的。气体的压强和温度之间有什么定量关系呢？

实验 实验装置如图 15 - 9 所示。研究对象是封闭在烧瓶中的那部分气体。初状态如甲图所示。然后把烧瓶先后放在冰水混合物和热水中（乙图和丙图），经过一段时间，烧瓶中气体的温度变得与冰水混合物或热水的温度相同，用温度计测得的温度就表示气体的温度。同时调节水银压强计的右管 A，使左管的水银面保持原来的位置，即保持烧瓶中气体的体积不变。从压强计两管中水银面的高度差和大气压，可以求得气体的压强。改变热水的温度，可以测得若干组压强和温度的数据。处理这些数据就可以确定压强和温度的定量关系。

结论 1787 年法国科学家查理（1746 ~ 1823）通过实验研究发现，不论什么气体，都遵从下述规律：

一定质量的某种气体，在保持体积不变的情况下，温度每升高（或降低） 1°C ，增加（或减小）的压强等于它在 0°C 时压强的 $\frac{1}{273}$ 。

这个规律叫做查理定律。

设 0°C 时的压强为 p_0 ， $t^{\circ}\text{C}$ 时的压强为 p ，由查理定律可得

$$\frac{p - p_0}{t} = \frac{p_0}{273},$$

或者

$$p = p_0 \left(1 + \frac{t}{273} \right). \quad (1)$$

查理定律表明，压强是温度（摄氏温度）的一次函数，它的 $p-t$ 图象是一条倾斜的直线，叫做等容线，如图 15-10 的上图所示。等容线在纵轴上的截距等于 0°C 时的压强 p_0 。当 $t = -273^{\circ}\text{C}$ 时， $p = 0$ ，可见等容线的延长线通过横轴上的一点 D，D 点所表示的温度为 $t = -273^{\circ}\text{C}$ 。不论什么气体，也不论 0°C 时的压强是多大，等容线的延长线都通过这一点。

热力学温标 现在我们定义一个新的温标，用这种温标表示的温度，每一度的大小与摄氏温度相同，但把 -273°C 作为零度。这种温标是英国科学家威廉·汤姆孙（开尔文）（1824 ~ 1907）创立的，叫做热力学温标（或绝对温标），用热力学温标表示的温度，叫做热力学温度（或绝对温度）。热力学温度的零度是 -273.15°C ，叫做绝对零度，通常取绝对零度为 -273°C 。

热力学温度是国际单位制中七个基本量之一，用符号 T 表示。它的单位是开尔文，简称开，符号是 K。热力学温度 T 与摄氏温度 t 的关系是

$$T = t + 273. \quad (2)$$

利用热力学温标，可以使查理定律的表述简化。设一定质量的气体，

在体积不变的情况下，温度为 t_1 时的压强为 p_1 ，温度为 t_2 时的压强为 p_2 ，那么

$$p_1 = p_0 \left(1 + \frac{t_1}{273}\right) = p_0 \cdot \frac{273 + t_1}{273},$$
$$p_2 = p_0 \left(1 + \frac{t_2}{273}\right) = p_0 \cdot \frac{273 + t_2}{273}.$$

式中 p_0 表示气体在 0°C 时的压强，把以上两式相除，得到

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{273 + t_1}{273 + t_2},$$

用 T_1 和 T_2 分别代换 $(273 + t_1)$ 和 $(273 + t_2)$ 就得到

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (3)$$

这个结论，我们从图 15-10 的下图可以清楚地看出来。这样，查理定律可以表述为：一定质量的某种气体，在体积不变的情况下，它的压强跟热力学温度成正比。

上面是把查理定律“外推”到零压强而引入热力学温标的。这一“外推”可以这样来理解。随着温度的降低，气体分子热运动减弱，分子对器壁的撞击作用也减弱，因而压强减小。由此推想，在某一个温度下，气体压强变为零，这个温度就是绝对零度。实际上，在达到绝对零度之前，任何气体都已液化甚至变为固体，查理定律早已不适用了。虽然如此，由“外推”得到的绝对零度仍具有物理意义，它是低温的极限，能够无限接近，但不可能达到。

练习三

(1) 乒乓球挤瘪后，放在热水里泡一会，会重新鼓起来。解释这个现象。

(2) 封闭在容器中的气体，当温度升高时，下面哪个说法是正确的(容器的膨胀忽略不计)：

- A. 密度和压强均增大。
- B. 密度增大，压强不变。
- C. 密度不变，压强增大。

(3) 一定质量的氢气在 0°C 时的压强是 9×10^4 帕，保持氢气的体积不变，它在 30°C 时的压强是多大？

(4) 一定质量的某种气体在 20°C 时的压强是 1.0×10^5 帕。保持体积不变，温度升高到 50°C 时，压强是多少帕？温度降低到 -7°C 时，压强是多少帕？

(5) 一个密闭容器里的气体， 0°C 时压强是 8×10^4 帕。给容器加热，气体的压强为 1.0×10^5 帕时温度升高到多少度？(容器的膨胀忽略不计)

四、理想气体状态方程

这一节根据上面得出的两个实验定律确定气体的压强、体积和温度这三个状态参量的关系。

根据玻意耳定律知道，一定质量的某种气体，在温度不变时，压强跟体积成反比，即

$$p \propto \frac{1}{V}.$$

根据查理定律知道，一定质量的某种气体，在体积不变时，压强跟热力学温度成正比，即

$$p \propto T.$$

综合起来，我们得到结论：一定质量的某种气体，压强跟体积成反比，跟热力学温度成正比，即

$$p \propto \frac{T}{V}, \quad p = C \frac{T}{V}.$$

或者写成

$$\frac{pV}{T} = C \text{ (恒量)}. \quad (1)$$

玻意耳定律和查理定律实际上是在压强不太大、温度不太低的条件下总结出来的。在这种条件下，不论什么气体都近似地符合这两个实验定律。

(1) 式是从上述两个实验定律推导出来的，因此，也只有在这种条件下，不论什么气体才近似地符合(1)式。尽管如此，为了研究的方便，可以设想出一种气体，能够严格地遵守(1)式，这样的气体叫做理想气体。(1)式表示一定质量的某种理想气体处于某一状态时，三个状态参量必须满足的关系，叫做一定质量的理想气体的状态方程。

(1) 式中的恒量 C 与气体的种类和质量有关，对不同的气体，即使质量 m 相同，恒量 C 也不同。能不能找出对所有气体都适用的状态方程呢？

我们把(1)式用于1摩尔的气体。这是因为，在标准状态下，即 $p_0=1$ 标准大气压， $T_0=273$ 开，1摩的任何气体的体积都是 $V_0=22.4$ 升。由此可以求得一个适用于1摩的任何气体的常量，叫做气体常量。它通常用 R 来表示，即

$$R = \frac{p_0 V_0}{T_0}.$$

R 的数值跟 p 、 V 、 T 的单位有关。在国际单位制中， $p_0=1.013 \times 10^5$ 帕 $=1.013 \times 10^5$ 牛/米²， $V_0=22.4 \times 10^{-3}$ 米³/摩， $T_0=273$ 开，代入上式得到

$$\begin{aligned} R &= \frac{1.013 \times 10^5 \text{ 牛/米}^2 \times 22.4 \times 10^{-3} \text{ 米}^3 / \text{摩}}{273 \text{ 开}} \\ &= 8.31 \text{ 焦 / (摩} \cdot \text{开)}. \end{aligned}$$

对于1摩的理想气体，因为 $\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0} = R$ ，所以

$$pV = RT. \quad (2)$$

这就是1摩的理想气体的状态方程。

气体常量是热学中又一个重要常数。不仅在研究气体的热学性质中，

而且在研究其他热现象中，它与阿伏加德罗常数共同起着重要作用。

知道了 1 摩的理想气体状态方程，就不难得到对任何质量的气体都适用的状态方程。

现在设有质量为 m 千克的某种理想气体，它的摩尔质量为 M 千克/摩，它的摩尔数 $n=m/M$ 摩。既然 1 摩的理想气体在标准状态下占有体积 V_0 ($=22.4$ 升)， n 摩的理想气体在标准状态下占有的体积应为 $V_0=nV_0$ 。由理想气体的状态方程可得：

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0'}{T_0} = n \frac{p_0 V_0}{T_0} = nR.$$

由此得到 $pV = nRT,$

或 $pV = \frac{m}{M} RT. \quad (3)$

这就是任意质量的理想气体的状态方程，又叫做克拉珀龙方程。

气体在压强保持不变的情况下发生的状态变化，叫做等压变化。法国科学家盖·吕萨克研究了多种气体的热膨胀，得出一个实验定律：一定质量的气体，在压强不变的情况下，它的体积跟热力学温标成正比。这个定律叫做盖·吕萨克定律。试根据理想气体状态方程导出这个结论。

理想气体是不存在的，它是实际气体在一定程度上的近似，是一种理想化的物理模型。有许多实际气体，特别是那些不易液化的气体，如氢气、氧气、氮气、空气、氦气等，在通常的温度和压强下，它们的性质很近似于理想气体，可以把它们当作理想气体来处理。这样处理的结果，误差很小。

但是，当压强很大、温度很低时，由理想气体状态方程得出的结果就和实际测量的结果有很大的差别。例如，一定质量的氦气，当压强为 1×10^5 帕时，体积为 1 米^3 ；压强增大到 500×10^5 帕时，它的体积就不是 $(1/500) \text{ 米}^3$ ，而是 $(1.36/500) \text{ 米}^3$ ；压强增大到 1000×10^5 帕时，体积变为 $(2.0685/1000) \text{ 米}^3$ 。可见，压强越大，偏离就越大。这时可以在理想气体状态方程的基础上进行一些修正，得出更接近于实际的气态方程。

练习四

(1) 试证明：玻意耳定律和查理定律的公式都可以作为特殊情形从理想气体状态方程推导出来。

(2) 一定质量的空气，27 时的体积为 $1.0 \times 10^{-2} \text{ 米}^3$ ，在压强不变的情况下，温度升高 100 时体积是多大？

(3) 在温度等于 50 ，压强等于 1.0×10^5 帕时，内燃机气缸里混合气体的体积是 0.93 升。移动活塞，将混合气体的体积压缩到 0.155 升，压强增大到 1.2×10^6 帕，这时混合气体的温度升高到多少度？

(4) 在容积为 20 升的圆筒内装有氧气，温度是 17 时，它的压强是 1.0×10^7 帕。在标准状态下 这些氧气的体积是多大？取 1 标准大气压= 1.0×10^5 帕。

(5) 对一定质量的某种气体来说，能否做到：

- A . 保持压强和温度不变而改变它的体积。
- B . 保持温度和体积不变而改变它的压强。
- C . 保持体积和压强不变而改变它的温度。

(6) 理想气体的状态方程可写成 $pV/T = C$ (恒量)。对于这个恒量 C , 下面哪种说法正确, 哪种说法错误, 并说明理由。

- A . 对质量相同的任何气体, C 都相同。
- B . 对质量不同的同种气体, C 都相同。
- C . 对摩尔数不同的同种气体, C 都相同。
- D . 对摩尔数相同的任何气体, C 都相同。

(7) 一个容器内装有氧气 100 克, 压强为 1.0×10^6 帕, 温度为 47°C , 容器的容积是多少米³ ?

(8) 1 克的气体, 温度为 27°C 、压强为 8.0×10^4 帕时, 体积为 5 升。2 克的同种气体, 温度为 127°C 、压强为 6.0×10^4 帕时, 体积是多少升?

五、理想气体状态方程的应用

在通常的温度和压强下，气体的性质很近似于理想气体，可以作为理想气体来处理。因此理想气体状态方程有广泛的应用。

【例题 1】容积为 30 升的容器内装有氢气，假定在使用过程中，温度保持 27℃ 不变，当容器内压强由 4.9×10^6 帕降为 9.8×10^5 帕时，容器里剩下的氢气是原来的百分之多少？共用掉多少千克的氢气？

分析和解答 取原来装在容器内的氢气作为研究对象（图 15-11）。初状态 A 的状态参量是： $p_1=4.9 \times 10^6$ 帕， $T_1=(27+273)$ 开=300 开， $V_1=30$ 升= 30×10^{-3} 米³。依题意，可以设想作为研究对象的氢气发生等温膨胀，有一部分氢气跑出容器，直到压强降低至 $p_2=9.8 \times 10^5$ 帕为止。末状态 B 的状态参量是： $p_2=9.8 \times 10^5$ 帕， $T_2=T_1=300$ 开， V_2 为待求量。作为研究对象的氢气，在末状态时有一部分在容器外（也就是用掉的氢气），有一部分仍留在容器中。求出 V_2 ，就可以解决题中要求解答的问题了。

由一定质量的理想气体状态方程可知 $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$ ，由此可得

$$V_2 = \frac{p_1 V_1}{T_2} = \frac{4.9 \times 10^6 \times 30 \times 10^{-3}}{9.8 \times 10^5} \text{米}^3 \\ = 1.5 \times 10^{-1} \text{米}^3.$$

这时容器里剩下 $V_1 = 30 \times 10^{-3}$ 米³ 的氢气，所以剩下的氢气是原来氢气的

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{30 \times 10^{-3}}{1.5 \times 10^{-1}} = 0.2 = 20\%。用掉的氢气是原来的 80\%。$$

要知道用掉多少千克的氢气，必须知道初状态时氢气的质量 m 。由克

拉珀龙方程 $p_1 V_1 = \frac{m}{M} RT_1$ 可求出 m ($M = 2 \times 10^{-3}$ 千克 / 摩)：

$$m = \frac{p_1 V_1 M}{RT_1} = \frac{4.9 \times 10^6 \times 30 \times 10^{-3} \times 2 \times 10^{-3}}{8.31 \times 300} \text{千克} = 1.18 \times 10^{-1} \text{千克}。$$

用掉氢气的质量

$$m = 1.18 \times 10^{-1} \times 80\% \text{千克} = 9.4 \times 10^{-2} \text{千克}。$$

这个例题直接用克拉珀龙方程计算要简便些。研究对象为容器内的氢气，但初末状态的质量不同，因此不妨把质量也看作状态参量。初状态的参量为 p_1 、 T_1 、 V_1 、 m_1 。末状态的参量为 p_2 、 $T_2 (=T_1)$ 、 $V_2 (=V_1)$ 、 m_2 。而 $m = m_1 - m_2$ 。你来解一下，并把两种解法加以比较。

【例题 2】如图 15-12 所示，容积为 V_1 和 V_2 的两个玻璃泡，用一根容积可以忽略的细管连通起来，其中充满空气，压强为 p ，温度为 T （室温）。现将大玻璃泡浸在沸水中，使泡中空气的温度升至 T_1 ；将小玻璃泡浸在冰水混合物中，使泡中空气的温度降至 T_2 。此时整个容器内空气的压强 p 是多大？

分析和解答 先要把发生的物理过程弄清楚，这是解决物理问题的关键所在。两玻璃泡分别浸在沸水和冰水混合物中以后，大玻璃泡中空气的

温度升高，体积膨胀，小玻璃泡中空气的温度降低，体积收缩，致使有一部分空气由大玻璃泡进入小玻璃泡中。直到大玻璃泡中空气的温度升至 T_1 ，小玻璃泡中空气的温度降至 T_2 ，而且两泡中空气的压强相等时，即等于 p 时，两泡中的空气都达到平衡。

根据上述分析，我们取图 15-13 中画斜线和未画斜线两部分空气分别作为研究对象。

对画斜线部分的空气，初状态的参量是 p 、 T 、 $V_1 - V$ ，末状态的参量是 p 、 T_1 、 V_1 。由理想气体状态方程可得

$$\frac{p(V_1 - V)}{T} = \frac{p'V_1}{T_1} \quad (1)$$

对未画斜线部分的空气，初状态的参量是 p 、 T 、 $V_2 + V$ ，末状态的参量是 p 、 T_2 、 V_2 。由理想气体状态方程可得

$$\frac{p(V_2 + V)}{T} = \frac{p'V_2}{T_2} \quad (2)$$

由 (1) (2) 两式即可解出 p 。另一未知量 V 也可同时解出。请同学们自己解出。

应用理想气体状态方程处理问题，先要明确研究对象是哪部分气体，分析气体的状态发生了什么变化，明确它的初状态和末状态，然后列出状态方程求解。计算时

要注意物理量的单位。T 的单位必须采用热力学温度。根据 $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$ 解题时，

公式两边的 p 和 V 的单位必须统一。根据 $pV = nRT$ 解题时， R 的单位要与 p 、 V 的单位相适应。

练习五

(1) 某个容器的容积是 5 升，里面所装气体的压强是 1.0×10^6 帕。如果温度保持不变，把容器的开关打开以后，这些气体会有多大体积？容器里剩下的气体是原来的百分之几？设外界压强为 1.0×10^5 帕。

(2) 在上题里，打开容器的开关以后，气体的密度怎样改变？设上题里容器里剩下的气体的密度是 ρ_2 ，原来容器里气体的密度是 ρ_1 ，密度之比 ρ_2/ρ_1 是多大？

(3) 容积是 10 升的钢筒里盛有 9.0×10^6 帕、 -13°C 的氧气，求钢筒中氧气的质量。

(4) 有 0.612 克的某种氮氧化合物，在 293K 和 1 标准大气压时体积为 480 厘米³。这是一种什么气体？写出它的分子式。

(5) 给汽车轮胎打气，使胎内空气达到所需的压强，冬天和夏天打入胎内的空气质量是否相同？冬天还是夏天打入的空气质量多？

(6) 有两种不同种类的气体，它们的温度和体积都相同。下面的哪些说法是正确的：

- A. 如果它们的质量相同，它们的压强也相同。
- B. 虽然它们的质量相同，它们的压强并不相同。

- C . 如果它们的摩尔数相同，它们的压强也相同。
- D . 虽然它们的摩尔数相同，它们的压强并不相同。

六、气体分子运动的特点

分子间的距离 较大气体很容易被压缩,说明气体分子间的距离比较大。气体凝结成液体时,体积要缩小上千倍,而液体不容易被压缩,可以认为其中的分子几乎是紧密排列的,可见气体分子之间的距离大约是分子直径的 $\sqrt[3]{1000}$ 倍,即10倍。由于气体分子间的距离比较大,所以在处理某些问题时可以把气体分子看作是没有大小的质点。也是由于气体分子间的距离比较大,分子间的相互作用力十分微弱,所以通常可以认为,气体分子除了相互碰撞或者跟器壁碰撞外不受力的作用,可以在空间里自由移动。由此可以说明:气体能充满它所能达到的空间,既没有一定的体积,也没有一定的形状。

分子间的碰撞频繁 比起固体和液体来,气体中的分子是比较稀疏的,但是单位体积中的分子数还相当大。在标准状态下,1厘米³气体中仍含有 2.7×10^{19} 个分子。大量分子永不停息地运动,分子之间不断地发生碰撞。在标准状态下,一个空气分子在1秒内与其他空气分子的碰撞竟达65亿次之多。频繁的碰撞使得每个分子的速度的大小和方向频繁地改变。设想我们追随某个气体分子的运动(图15-14),我们将看到这个分子的运动是忽左忽右,忽前忽后,时快时慢,运动轨迹是一条极不规则的折线。频繁的碰撞造成气体分子做杂乱无章的热运动。

分子沿各方向运动的机会均等 气体分子做杂乱无章的热运动,就某一个分子来说,它在某一时刻的速度具有怎样的大小和方向,完全是偶然的。但是,对大量分子的整体来说,分子的运动却表现出一定的规律。先来讨论分子运动的方向,正因为大量分子的运动十分混乱,在某一时刻向任一个方向运动的分子都有,因而可以想见,在任一时刻分子沿各方向运动的机会是均等的,没有任何一个方向,沿着它运动的分子的数目更多。设想真有这么一个方向,那么,由于气体分子的频繁碰撞,分子的运动越来越混乱,这个方向也不会存在了。这就是说,气体分子沿各个方向运动的数目应该是相等的。

这里所说的数目相等,是对大量分子用统计方法得到的一个统计平均数,与实际数目会有微小的出入。分子数越多,这种用统计方法得到的结果跟实际情况越符合。用分子动理论的观点研究热现象,涉及的总是大量分子,统计方法非常有用。

分子速率按一定规律分布 大量分子做无规则运动,速率有的大,有的小,但分子的速率却按照一定的规律分布。

研究表明,气体的大多数分子,速率都在某个数值附近,离开这个数值越远,分子数越少,表现出“中间多,两头少”的分布规律。下表是氧气分子速率的分布情况。我们看到,在0时速率在300~400米/秒这一速率区间的分子数最多,速率大于400米/秒和小于300米/秒的分子数依次递减,速率很大和很小的分子实际上很少。温度升高时,这种“中间多,两头少”的分布规律虽然不变,可是与分子数的最大值相对应的速率区间却移向速率大的一方,也就是说,温度升高时,速率小的分子数减少,速率大的分子数增加。这种速率分布规律是一种统计规律。

既然在一定温度下,某种气体的分子速率分布是确定的,我们就可以求出在这个温度下该种气体分子的平均速率,即所有分子的速率的平均

值。温度升高时，速率大的分子数增加，分子的平均速率增大。

氧气分子的速率分布

按速率大小划分的区间（米/秒）	各速率区间的分子数占总分子数的百分率（%）	
	0	100
100 以下	1.4	0.7
100 ~ 200	8.1	5.4
200 ~ 300	17.0	11.9
300 ~ 400	21.4	17.4
400 ~ 500	20.4	18.6
500 ~ 600	15.1	16.7
600 ~ 700	9.2	12.9
700 ~ 800	4.5	7.9
800 ~ 900	2.0	4.6
900 以上	0.9	3.9

七、气体实验定律的微观解释

从气体分子动理论的观点看来，气体压强是大量的气体分子频繁地碰撞器壁而产生的。雨滴打在雨伞上，使伞面受到冲力。单个雨滴对伞面的冲力是短暂的，但大量密集的雨滴接连不断地打在伞面上，对伞面就形成一个持续的均匀的压力。同样，单个分子碰撞器壁的冲力是短暂的，但是大量分子频繁地碰撞器壁，就对器壁产生持续的均匀的压力。气体分子的平均速率越大，气体分子越密，即单位体积内分子数越多，对单位面积器壁产生的压力就越大，气体的压强就越大。

一定质量的气体，温度保持不变时，分子的总数和分子的平均速率都保持不变。在这种情况下，气体的体积减小到原来体积的几分之一，单位体积内的分子数就增大到原来的几倍，气体的压强就增大到几倍。气体体积增大时，情况恰好相反。所以气体的压强与体积成反比。这就是玻意耳定律。

用气体分子运动论也可以解释查理定律。一定质量的气体，体积保持不变而温度升高时，分子的平均速率增大，因而气体的压强增大。温度降低时，情况恰好相反。

怎样解释盖·吕萨克定律呢？从气体分子动理论可以说明：一定质量的气体温度升高时，要保持压强不变，只有让气体的体积增大才行。这时，一方面由于温度升高，分子的平均速率增大，使压强有增大的倾向；另一方面，由于体积增大，单位体积内的分子数减少，使压强有减小的倾向。当体积增大到一定程度时，这两种倾向抵消，所以压强保持不变。

气体分子动理论不仅能够解释上述气体实验定律，而且能够解释气体的其他一些性质，如气体的比热、扩散、热传导等。气体分子动理论是热学和分子物理学的重要组成部分，它使人们对气体的研究从宏观领域进入微观领域，扩展和加深了人们对气体性质的认识。

下面我们从气体分子动理论的观点推导压强的基本公式。

设想有一个向右运动的分子与器壁发生碰撞（图 15-15），碰撞前的动量是 $m\vec{v}$ ，其中 v 是分子的速率。碰撞后向左运动，速率是 v ，动量是 $-m\vec{v}$ 。这个分子碰撞前后的动量变化是 $-m\vec{v} - m\vec{v}$ 。设气体分子与器壁发生碰撞时没有能量损失，分子碰撞前后的速率相等，即 $v = v$ ，因而动量变化是 $-2m\vec{v}$ 。从动量定理知道，这个动量变化 $-2m\vec{v}$ 等于器壁对分子的冲量。从牛顿第三定律知道，这时分子对器壁也有一个大小相等方向相反的冲量。可见气体分子每碰撞一次器壁，就给器壁 $2m\vec{v}$ 的冲量。

现在的问题是：容器中有大量分子，它们的速度的大小和方向又不断地在改变。怎样才能算出大量分子碰撞器壁时对器壁产生的总冲量呢？我们知道，气体分子做无规则运动，它们沿各个方向运动的机会是均等的，也就是说，在上下、前后、左右各个方向中没有哪个方向的运动占优势。因此可以认为各有 $1/6$ 的分子向着上下前后左右这六个方向运动。气体分子速度的大小也不相同，但可以认为所有分子都以平均速率 \bar{v} 向着各个方向运动。这样就可以算出大量分子碰撞器壁时的总冲量了。

如图 15-16 所示，在气体内部设想一个柱体，底面积为单位面积，高

为平均速率 \bar{v} 的数值。在单位时间内，这个柱体中向右运动的分子都会运动到器壁而发生碰撞。设气体单位体积中的分子数为 n_0 ，则在这个柱体中有 $\frac{1}{6}n_0v$ 个向右运动的分子。因此，单位时间内有 $\frac{1}{6}n_0v$ 个分子与器壁发生碰撞，而每碰撞一次给器壁的冲量是 $2mv$ ，所以单位时间内分子给单位面积器壁的总冲量是 $\frac{1}{6}n_0v \times 2mv = \frac{1}{3}n_0mv^2$ 。单位时间内分子给器壁的就等于器壁所受的平均压力 f （图 15-17），单位面积器壁所受的平均压力就等于气体的压强 p 。可见，

$$p = \frac{1}{3}n_0mv^2.$$

这就是气体压强的基本公式。

从这个公式可以知道，单位体积内的分子数越多，气体的平均速率越大，气体的压强越大。

八、理想气体的内能

理想气体的内能 从气体分子动理论的观点看来，所谓理想气体，是指分子间没有相互作用和分子可以看成没有大小的质点的气体。这就是理想气体的微观模型。一定质量的气体，温度越高，压强越小，因而气体越稀薄，气体分子间的距离越大，就越接近于理想气体。

理想气体的分子之间既然没有相互作用，就不存在分子势能。因此，理想气体的内能就是气体所有分子热运动的动能的总合。分子的动能跟气体的温度有关，分子势能跟气体的体积有关。现在不存在分子势能，因而一定质量的理想气体的内能只跟温度有关，跟体积无关。这就是说，只要温度保持不变，气体的体积增大一些或者减小一些，不仅分子动能保持不变，分子势能仍旧不存在，因此理想气体的内能保持不变。

等温过程中的功、热量和内能 设一定质量的理想气体在温度不变的情况下发生膨胀，由初状态 A 变到末状态 B (图 15-18)。由于温度保持不变，所以气体的内能不变，即 $E=0$ 。气体发生膨胀时对外做功， W 为负值，即 $W < 0$ 。从热力学第一定律 $W + Q = E = 0$ 知道， Q 应为正值，即 $Q > 0$ ，而且 W 和 Q 的绝对值相等。可见，在等温膨胀的过程中，气体要从外界吸收热量，吸收的热量并没有增加气体的内能，而全部用来对外做功。可以证明，做功的多少在数值上等于 p - V 图中等温线下方画有斜线那部分的面积。

等容过程中的功、热量和内能 在体积不变的情况下，对一定质量的理想气体加热，使它的温度升高，压强增大，由初状态 A 变到末状态 B (图 15-19)。末状态的温度比初状态高，内能增加，即 $E > 0$ 。气体的体积不变，外界既没有对气体做功，气体也没有对外界做功，所以 $W=0$ 。根据热力学第一定律得到 $Q = E$ 。可见，在等容变化中，如果气体从外界吸收热量，这个热量就全部用来增加气体的内能。

等压过程中的功、热量和内能 在压强不变的情况下，对一定质量的理想气体加热，使它的温度升高，体积增大，由初状态 A 变到末状态 B (图 15-20)。末状态的温度比初状态高，内能增加，即 $E > 0$ 。气体膨胀对外做功， $W < 0$ 。从热力学第一定律 $W + Q = E > 0$ 知道，这时气体吸收的热量 Q 的绝对值大于 W 的绝对值。这就是说，在等压膨胀的过程中，气体从外界吸收的热量，一部分用来增加气体的内能，一部分用来对外做功。可以证明，做功的多少在数值上等于 p - V 图中等压线下方画有斜线那部分的面积。

绝热过程中的功、热量和内能 物体在状态的变化过程中如果跟外界没有热交换，这种变化就叫做绝热变化。绝热变化的特点是： $Q=0$ 。用绝热良好的材料把容器包起来，让气体发生膨胀或者对气体进行压缩，这时的变化就可以看作绝热变化。气体的膨胀或压缩进行得很迅速，从初状态到末状态所用的时间很短，气体来不及跟外界发生热交换，这种迅速的变化也可以看作绝热变化。例如热机气缸内气体膨胀做功，过程进行得很迅速，就可以看作绝热变化。在绝热压缩的过程中，外界对气体所做的功

完全用来增加气体的内能，使气体的温度升高。在绝热膨胀的过程中，气体对外界做功完全靠气体内能的减少，因而气体的温度降低（图 15-21）。可以证明，做功的多少在数值上等于绝热线下方有斜线那部分的面积。

练习六

（1）一定质量的理想气体在温度不变的情况下被压缩，气体的内能是否改变？外界对气体是否做功？气体从外界吸热还是向外界放热？功和热量有什么关系？

（2）一定质量的理想气体在体积不变的情况下压强减小，这时外界对气体是否做功？气体的内能是否改变，怎样改变？气体放出的热量跟内能的改变有什么关系？

（3）一定质量的理想气体在压强不变的情况下体积减小，外界对气体是否做功？气体的内能是否改变，怎样改变？气体放热还是吸热？这个热量跟内能的改变有什么关系？

（4）如图 15-20 所示，一定质量的理想气体发生等压变化，体积由 V_1 增大到 V_2 ，体积变化为 $\Delta V = V_2 - V_1$ ，设气体压强为 p 。

a. 气体对活塞的压力有多大？设活塞面积为 S 。

b. 设活塞移动的距离为 l ，气体压力所做的功为多大？

c. 试证明在此过程中气体对外所做的功 $W = p \Delta V$ ？。

本章小结

这一章主要学习理想气体状态方程及其应用。理想气体是一种理想化的模型，在通常的温度和压强下，许多实际气体可以作为理想气体来处理，因而理想气体状态方程有广泛的应用。

应用理想气体状态方程处理问题，首先必须弄清作为研究对象的气体处于什么状态，发生了什么过程，这是解决问题的关键所在。希望你自己总结一下用理想气体状态方程解题的思路、步骤以及要注意的问题。

图线可以表达出气体所处的状态和所发生的过程。 p - V 图、 p - T 图或 T - T 图上的一点表示气体处于某一状态，图上的线表示气体缓慢地发生变化时，由某一状态经过中间各个状态到另一状态的变化过程。要注意学会用图线来处理问题。

（1）我们学过了哪几个描述气体的状态参量？它们的单位各有哪些？单位之间的换算关系各是什么？

（2）什么叫等温变化？玻意耳定律的内容是什么？写出它的表达式。在 p - V 图上画出表示某一等温过程的图线。

（3）什么叫等容变化？查理定律的内容是什么？写出它的表达式。在 p - T 图上画出表示某一等容过程的图线。

（4）什么叫等压变化？盖·吕萨克定律的内容是什么？写出它的表达式。在 V - T 图上画出表示某一等压过程的图线。

（5）写出任意质量的理想气体的状态方程即克拉珀龙方程，并作为特例，推出 1 摩的理想气体的状态方程，以及上述三个气体实验定律的表达

式。

(6) 气体分子运动的特点是什么？从分子动理论的观点看来，气体压强是怎样产生的？它的大小是由什么决定的？

(7) 用气体分子动理论对三个气体实验定律作出微观解释。

(8) 理想气体的微观模型是怎样的？为什么理想气体的内能只跟温度有关，而跟体积无关？

(9) 试分别说明理想气体在等温、等容、等压、绝热过程中内能变化的情形。

习 题

A 组

(1) 现在我们用另一种方法估算一下气体分子间的距离与分子直径的关系。在标准状态下，1 摩的气体占有 22.4 升的体积。我们设想其中的每个分子都位于一个小立方体的中心。这个小立方体的边长是多少？分子直径的数量级为 10^{-10} 米。把小立方体的边长跟分子直径相比较，结果怎样？

(2) 下面几种说法，哪个正确，哪个错误，并说明理由。

A. 有两个相同的容器，内装同种气体，它们的压强相同，因而它们的温度一定相同。

B. 有两个相同的容器，内装质量不同的不同气体，它们的压强不同，因而它们的温度一定不同。

C. 有两个相同的容器，内装摩尔数相同的气体，它们的压强相同，因而它们的温度一定相同。

(3) 一定质量的理想气体，处在某一初始状态。现在要使气体的温度经过状态变化后回到初始状态的温度，用下列哪些过程可能实现？说明理由，并在 p - V 图上画出你认为可能实现的过程。

A. 先保持压强不变而使它的体积膨胀，接着保持体积不变而减小压强。

B. 先保持压强不变而使它的体积减小，接着保持体积不变而减小压强。

C. 先保持体积不变而增大压强，接着保持压强不变而使它的体积膨胀。

D. 先保持体积不变而减小压强，接着保持压强不变而使它的体积膨胀。

(4) 盖·吕萨克定律如果用摄氏温标 t 来表示，可以写成下式：

$$V_t = V_0 (1 + t/273)。$$

其中 V_0 和 V_t 分别表示气体在 0 和 t 时的体积。试推导出上式。

(5) 在密闭圆筒的中央有一个活塞（图 15-22），活塞两边封闭着两部分气体，它们的压强都是 1.0×10^5 帕。现在用力把活塞向右移动，使活塞右边气体的体积为原来的一半，那么活塞两边气体的压强差是多大？假定气体的温度不变。

(6) 一个瓶子里装有某种气体，瓶上有一个小孔跟外面大气相通。原来瓶里气体的温度为 15°C 。如果把它加热到 207°C ，瓶里保留的气体的质

量是原来质量的几分之几？

(7) 贮气筒内装有压缩气体，温度是 27°C ，压强是 40×10^5 帕。如果从筒内放出一半质量的气体，并使筒内剩余的气体的温度降到 12°C ，这些剩余气体的压强是多大？

(8) 一个足球的容积是 2.5 升。用打气筒给这个足球打气，每打一次就把 1.0×10^5 帕的空气打进去 125 厘米^3 。如果足球在打气前内部没有空气，打了 40 次以后，足球内部空气的压强有多大？假定空气的温度不变。

(9) 图 15-23 所示 p-T 图上的图线 abc 表示一定质量的理想气体的状态变化过程，此过程在 p-V 图上的图线应为图 15-24 中的哪个图？

B 组

(1) 当温度为 27°C 、压强为 2.0×10^5 帕时，32 克氧气的体积是多大？密度是多大？另有 48 克氧气，温度和压强跟上述数值相同，氧气的密度又是多大？

(2) 试根据克拉珀龙方程推导出用压强和温度来表示的气体密度的表达式。

(3) 水银气压计中混入了一个空气泡，上升到水银柱的上方，使水银柱上方不再是真空，因而气压计的读数比实际的大气压小些。当实际大气压为 768 毫米汞柱时，气压计的读数只有 750 毫米汞柱，此时管中水银面到管顶的距离为 80 毫米。当气压计读数为 740 毫米汞柱时，实际大气压为多少毫米汞柱？设温度保持不变。

(4) 在湖面下 50 米深处（温度为 4°C ）有一个体积为 10 厘米^3 的气泡升到湖面上来，湖面的温度为 17°C ，求它升到湖面时的体积。大气压为 1.0×10^5 帕。

(5) 有两个容积相等的容器，里面盛有同种气体，用一段水平细玻璃管（容积可不计）把它们连结起来。在细玻璃管的正中央有一段水银柱，当一个容器中气体的温度是 0°C ，另一个容器中气体的温度是 20°C 时，水银柱保持静止。如果使两容器中气体的温度都升高 10°C ，管中的水银柱会不会移动？如果移动的话，向哪个方向移动？说明理由。

(6) 一个容器，如果其中气体十分稀薄，通常就说这个容器为“真空”。有一个容积为 10 厘米^3 的电子管，在温度为 300K 时用真空泵把它抽成真空，使管内气体压强为 6.5×10^{-4} 帕。这时管内有多少个气体分子？

(7) 氧气瓶的容积是 32 升，其中氧气的压强是 1.3×10^7 帕。规定瓶内氧气压强降到 1.0×10^6 帕时就要重新充氧。有一个车间，每天需用 1.0×10^5 帕的氧气 400 升。这瓶氧气能用几天？假定温度保持不变。

(8) 如图 15-25 所示，气缸 A 和容器 B 由一细管经阀门 K 相联。A 和 B 的壁都是透热的。A 放在 27°C 、 1.0×10^5 帕的大气中，B 浸在 127°C 的恒温槽内。开始时 K 是关断的，B 内没有气体，容积 $V_B = 2.4$ 升；A 内装有气体，体积 $V_A = 4.8$ 升。打开 K，使气体由 A 流入 B，等到活塞 D 停止移动时，A 内气体的体积是多大？假设活塞 D 与气缸壁之间没有摩擦，细管的容积忽略不计。

(9) 对一定质量的理想气体，在下列各种过程中，可能发生的过程是哪些？说明理由。

- A. 气体膨胀对外做功，温度升高。
- B. 气体吸热，温度降低。
- C. 气体放热，压强增大。
- D. 气体放热，温度不变。

(10) 图 15-26 中的直线 AB 为一定质量的理想气体等容过程的 $p-t$ 图线，原点 O 处的压强 $p=0$ ，温度 $t=0$ 。现先使该气体从状态 A 出发，经过一等温膨胀过程，体积变为原来的 2 倍，然后经过一等容过程，温度逐渐升高，达到某一状态 F。此时状态 F 的压强等于状态 B 的压强。试用作图法，在所给的 $p-t$ 图上，画出表示状态 F 的点。

* 第十六章 饱和汽和未饱和汽

固体、液体和气体是通常存在的三种物质状态。在一定条件下，这三种物质状态可以相互转化，即发生物态变化，在初中我们学过一些物态变化的知识，这一章复习这方面的知识，同时学习一些新知识。

一、物态变化

熔化和凝固 物质从固态变成液态叫做熔化,从液态变成固态叫做凝固。晶体物质和非晶体物质在熔化和凝固时情况是不同的。晶体有一定的熔化温度——熔点,非晶体没有一定的熔点。物质在熔化时要吸收热量,在凝固时要放出热量。

在晶体中,微粒排列成有规则的空间点阵,维持这种规则排列的是微粒之间的相互作用;微粒的热运动不足以克服这种相互作用,微粒一般只能在平衡位置附近做无规则的振动。给晶体加热时,晶体从外界得到能量,微粒的热运动加剧。达到一定的温度时,一部分微粒具有了足够的动能,能够克服微粒间的作用力,离开平衡位置。这时晶体的点阵结构被破坏,晶体开始熔化。在熔化过程中,外界供给晶体的能量,全部用来破坏晶体的点阵结构,增加分子间的势能,所以温度不发生变化。凝固时,情况正好相反。微粒排列成点阵结构时,微粒间的势能减小,因此虽然放出能量,温度却保持不变,直到全部凝固成晶体。

非晶体的微观结构本来就跟液体类似,非晶体在熔化过程中不必为破坏点阵结构而消耗能量,所以温度不停地上升。

汽化和液化 物质从液态变成气态叫做汽化,从气态变成液态叫做液化。汽化有两种方式:蒸发和沸腾。蒸发是在液体表面进行的汽化现象,沸腾是在液体表面和液体内部同时发生的汽化现象。增大气体的压强和降低气体的温度,可以使气体液化。物质在汽化时要吸收热量,液化时要放出热量。

液体中分子热运动的平均动能跟温度有关,但在任何温度下,总有一部分分子的动能比平均动能大。那些处在液体表面层附近的动能足够大的分子,能够挣脱周围分子的引力,飞出液面,形成蒸气(也常叫做汽),这就是蒸发。

液体温度越高,分子的平均动能就越大,具有足够大的动能因而能够飞出液面的分子也就越多。所以,温度越高,蒸发得越快。

液体的表面积越大,处在表面层中的分子就越多,能够从液面飞出的分子也就越多。所以,表面积越大,蒸发得越快。

飞出液面的分子如果停留在液面附近,由于分子的热运动,有的分子会撞到液面,被液体分子重新拉回到液体中去,这样蒸发就变慢了。如果设法把液面上形成的蒸气吹散,使汽分子不能回到液体中去,蒸发就可以加快。所以,蒸发的快慢还跟液面上气体流动的快慢有关系。气体流动得越快,蒸发得也越快。

在蒸发过程中,从液体中飞出的是动能较大的分子,这些分子飞出后,留在液体中的分子的平均动能减小,液体的温度要降低,因而液体蒸发有致冷作用。

二、饱和汽与饱和汽压

饱和汽与未饱和汽 装在敞口容器里的液体,蒸发出来的汽分子能够分散到周围空间里去,所以过一段时间液体会全部蒸发完。盛在密闭容器里的液体,即使过很长时间,也不会蒸发完,这是什么原因呢?

原来在容器中的液面上同时进行着两种相反的过程:一方面分子从液面飞出来,另一方面液面上的汽分子又撞到液面上,会回到液体中去(图 16-1)。在密闭的容器中,随着液体的不断蒸发,液面上汽的密度不断增大,回到液体中的分子数也逐渐增多。最后,当汽的密度增大到一定程度时,就会达到这样的状态:在单位时间内回到液体中的分子数等于从液面飞出去分子数。这时汽的密度不再增大,液体不再减少,液体和汽之间达到了平衡状态,这种平衡叫做动态平衡。跟液体处于动态平衡的汽叫做饱和汽,没有达到饱和状态的汽叫做未饱和汽。在一定温度下,饱和汽的密度是一定的,未饱和汽的密度小于饱和汽的密度。

饱和汽压 某种液体的饱和汽所具有的压强,叫做这种液体的饱和汽压。

实验表明,在相同的温度下,不同液体的饱和汽压一般是不同的。挥发性大的液体,饱和汽压大。例如,20℃时,乙醚的饱和汽压为 5.87×10^4 帕,水为 2.34×10^3 帕。水银的饱和汽压很小,20℃时仅为 1.60×10^{-1} 帕,所以水银气压计水银柱上方的空间可以认为是真空。

实验表明,饱和汽压随温度的升高而增大。这是由两方面的原因引起的。一个原因是温度升高时,液体里能量较大的分子增多,单位时间内从液面飞出的分子也增多,致使饱和汽的密度增大,因而压强增大。另一个原因是温度升高时,汽分子热运动的平均速率增大,这也使得压强增大。

饱和汽压跟体积的关系 现在我们用实验来研究饱和汽压跟体积的关系。象图 16-2 那样,把水银倒在一个深的容器里,再把装满水银的玻璃管倒立在这个容器中。向玻璃管里移入一些乙醚,使乙醚蒸发后水银面上还留有少量液态乙醚。这时管内乙醚的饱和汽压等于 $p_0 - p_h$ (图 16-2 甲),其中 p_0 是大气压强。

现在把管子往上提高一些,使水银面上乙醚汽的体积增大(图 16-2 乙)。可以看到,水银面上的液态乙醚减少了,但是管里水银柱的高度还跟原来一样。这表明,在温度不变的情况下,体积增大时饱和汽压不改变。

把提高的管子放下一些,使乙醚汽的体积减小(图 16-2 丙)。这时水银面上的液态乙醚增多,但是管中水银柱的高度仍保持不变。这表明,在温度不变的情况下,体积减小时饱和汽压也不改变。

实验表明,在温度不变的情况下,饱和汽的压强不随体积而变化。这可作如下的解释:当体积增大时,容器中汽的密度减小,原来的饱和汽变成了未饱和汽,于是液体继续蒸发,直到未饱和汽成为饱和汽为止;由于温度没有改变,饱和汽的密度跟原来的一样,汽分子热运动的平均速率也跟原来一样,所以压强不改变。体积减小时,容器中汽的密度增大,回到液体中的分子数多于从液面飞出的分子数,于是一部分汽变成液体,直到汽的密度减小到等于该温度下饱和汽的密度为止;由于温度跟原来相同,饱和汽的密度不变,汽分子热运动的平均速率也跟原来相同,所以压强也不改变。

饱和汽的压强只与温度有关，与体积没有关系，因此，第十五章讲的理想气体定律对饱和汽完全不适用，而未饱和汽近似地遵守理想气体定律。

三、把未饱和汽变为饱和汽

把未饱和汽变为饱和汽的方法 在一定温度下，饱和汽的密度大于未饱和汽的密度。在保持温度不变的情况下，用增大压强的办法来减小未饱和汽的体积，增大它的密度，直到增至等于该温度下饱和汽的密度时，未饱和汽就成了饱和汽。这时进一步减小汽的体积，就能使饱和汽凝结成液体。

饱和汽的密度还跟温度有关系。温度高时，饱和汽的密度大；温度低时，饱和汽的密度小。在较高温度下由于密度小而未达到饱和的未饱和汽，在保持体积不变的情况下，降低它的温度，直到降至未饱和汽的密度等于该温度下饱和汽的密度时，未饱和汽就成了饱和汽。如果继续降低温度，饱和汽就会凝结成液体。

临界温度 利用增大压强和降低温度的方法可以把未饱和汽变成饱和汽，从而使它变为液体。用这种方法是否能使所有的气体液化呢？

19世纪法拉第和其他一些科学家们在这方面进行了大量的工作。他们运用增大压强和冷却的办法，把许多气体都液化了，其中有氨、氯、二氧化硫、氯化氢、硫化氢、二氧化碳等。但研究发现，有几种气体，例如氧、氢、氮等，一直不能被液化。当时便以为这些气体是不能液化的所谓“永久气体”。

后来，进一步的研究表明，各种气体都有一个特殊的温度，在这个温度以上，无论怎样增大压强也不能使气体液化。这个温度叫做**临界温度**。氧、氢、氮等气体所以没有被液化，就是因为它们的临界温度很低，当时的低温技术尚未获得这样低的温度。于是科学家们更努力提高低温技术，结果在20世纪初，所有的气体都被液化了。最后一个被液化的气体是氦，它于1908年被液化，后来，在高于25个大气压的压强下还被凝固成了固态。

一些物质的临界温度

物质	临界温度 ()	物质	临界温度 ()
氦	-268	氨	132
氢	-240	氯	144
氮	-147	乙醚	194
氧	-119	酒精	243
二氧化碳	31	水	374

从上表可以看出，二氧化碳、氨、氯等气体的临界温度较高都在室温以上，所以容易液化。而氧、氮、氢、氦的临界温度很低，所以较难液化。

四、空气的湿度

泼在地上的水和江河湖海里的水都在蒸发，动植物的表皮和动物的呼吸也在不断地散发出水蒸气，所以我们周围的空气总含有水蒸气。一定体积的空气中含的水蒸气越多，空气就越潮湿；含的水蒸气越少，空气就越干燥。空气的干湿程度跟我们的生活和生产有密切的关系。空气太潮湿，我们会感到气闷，东西容易发霉；空气太干燥，我们的口腔和鼻腔会感到干燥难受，植物容易枯萎。在某些生产部门以及贮藏物品和保存名贵书画等艺术品的地方，如纺织厂、博物馆等，都要求空气保持适当的湿度。

空气的湿度可以用空气中所含水蒸气的密度，即单位体积的空气中所含水蒸气的质量来表示。由于直接测量空气中水蒸气的密度比较困难，而水蒸气的压强随水蒸气密度的增大而增大，所以通常用空气中水蒸气的压强来表示空气的湿度。空气中所含水蒸气的压强叫做空气的绝对湿度。例如，空气里水蒸气的压强是 2.0×10^3 帕，空气的绝对湿度就是 2.0×10^3 帕。

空气湿度对蒸发的快慢、植物的枯萎、动物的感觉的影响不是由空气的绝对湿度来决定，而是跟空气中的水蒸气离饱和状态的远近有关系。饱和水蒸气的压强随温度的升高而增大，所以在空气的绝对湿度一定的情况下，气温高时，水蒸气离饱和状态远；气温低时，水蒸气离饱和状态近。例如空气的绝对湿度是 1.1×10^3 帕，在气温是 20 时，水蒸气离饱和状态较远（20 时水的饱和汽压是 2.3×10^3 帕），我们就感到空气比较干燥；在气温是 10 时，水蒸气接近饱和（10 时水的饱和汽压是 1.2×10^3 帕），我们就感到空气很潮湿。为了表示空气中水蒸气离饱和状态的远近，物理学中引入了相对湿度的概念。

某温度时空气的绝对湿度跟同一温度下水的饱和汽压的百分比，叫做这时空气的相对湿度。

如果用 p 表示某温度时空气的绝对湿度，用 p_s 表示同一温度下水的饱和汽压，用 B 表示相对湿度，那么

$$B = \frac{p}{p_s} \times 100\%.$$

不同温度下水的饱和汽压（单位：帕）

不同温度下水的饱和汽压（单位：帕）

t	P_s	t	P_s	t	P_s	t	P_s
-15	1.92×10^2	3	7.58×10^2	21	2.486×10^3	39	6.990×10^3
-14	2.08×10^2	4	8.13×10^2	22	2.643×10^3	40	7.374×10^3
-13	2.25×10^2	5	8.72×10^2	23	2.809×10^3	41	7.777×10^3
-12	2.44×10^2	6	9.34×10^2	24	2.983×10^3	42	8.198×10^3
-11	2.65×10^2	7	1.001×10^3	25	3.167×10^3	43	8.638×10^3
-10	2.87×10^2	8	1.073×10^3	26	3.361×10^3	44	9.099×10^3
-9	3.11×10^2	9	1.148×10^3	27	3.564×10^3	45	9.582×10^3
-8	3.35×10^2	10	1.228×10^3	28	3.779×10^3	50	1.233×10^4
-7	3.63×10^2	11	1.312×10^3	29	4.004×10^3	60	1.991×10^4
-6	3.91×10^2	12	1.402×10^3	30	4.242×10^3	70	3.115×10^4
-5	4.21×10^2	13	1.497×10^3	31	4.992×10^3	80	4.733×10^4
-4	4.55×10^2	14	1.598×10^3	32	4.753×10^3	90	7.009×10^4
-3	4.89×10^2	15	1.705×10^3	33	5.032×10^3	100	1.013×10^5
-2	5.28×10^2	16	1.817×10^3	34	5.319×10^3	150	4.759×10^5
-1	5.68×10^2	17	1.937×10^3	35	5.623×10^3	200	1.554×10^5
0	6.11×10^2	18	2.064×10^3	36	5.940×10^3	250	3.975×10^5
1	6.57×10^2	19	2.197×10^3	37	6.274×10^3	300	8.589×10^5
2	7.05×10^2	20	2.338×10^3	38	6.625×10^3	350	1.653×10^5

如果气温为 20 时绝对湿度 $p=1.1 \times 10^3$ 帕，因为 20 时水的饱和汽压 $p_s=2.3 \times 10^3$ 帕，所以空气的相对湿度

$$B = \frac{1.1 \times 10^3}{2.3 \times 10^3} \times 100\% = 48\%。$$

不同温度下水的饱和汽压可以从上页的表得到。这样，知道了空气的绝对湿度，利用上面的公式就可以求出空气的相对湿度。反过来，如果知道了某一温度下的相对湿度，也可以算出绝对湿度。

在绝对湿度一定的情况下，气温降低时，相对湿度将增大。因此，在夏季有时感到白天比较干燥，夜晚比较湿润。

在住人的房间里，相对湿度为 60 ~ 70% 比较适宜。水稻在抽穗扬花期，最适宜的相对湿度是 70 ~ 80%。

练习一

- (1) 在潮湿的天气里，洗了的衣服不容易晾干。为什么？
- (2) 在绝对湿度相同的情况下，夏天和冬天的相对湿度哪个大？为什么？
- (3) 当空气的绝对湿度是 1200 帕，气温是 15 时，空气的相对湿度是多大？
- (4) 教室里空气的相对湿度是 60% ，室温是 18 ，绝对湿度是多大？

五、露点 湿度计

露点 气温逐渐降低时，空气里的未饱和水蒸气将逐渐接近饱和。当气温降低到某一温度时，水蒸气达到饱和状态，这时将有水蒸气凝结成水，在物体表面上形成一层细小的露滴。

使空气里的水蒸气刚好达到饱和时的温度，称为露点。

空气中含的水蒸气多，气温只要少许降低一点，就达到露点，水蒸气就达到饱和；反之，空气中含的水蒸气少，气温要降低较多，才能达到露点，水蒸气才达到饱和。因此，根据露点和气温的差值，可以大致判断出空气中水蒸气的饱和程度，从而判断出相对湿度的大小。

露点可以用图 16-3 所示的装置来测定。玻璃杯里装入乙醚，杯盖上分别插入温度计 A 和两根弯曲的玻璃管 B、C。管 C 的一端插在乙醚中，另一端连接打气球。管 B 是出气用的。用打气球向乙醚里打气，乙醚就迅速蒸发，使杯子和周围空气的温度降低。当降低到某一温度时，杯子周围空气中的水蒸气达到饱和，杯壁上就出现一层露珠，这时温度计指示的温度就是露点。在这个装置中如果用表面光亮的金属杯代替玻璃杯，更容易观察到露珠的出现，效果会更好。

测出了露点，从水的饱和汽压表中查出露点时的饱和汽压，这个饱和汽压就是空气在原来温度时的绝对湿度。知道了绝对湿度，再查出原来温度下的饱和汽压，就可以求出相对湿度。

湿度计 既然测出露点就能求出空气的绝对湿度和相对湿度，所以测定露点的仪器就是一种湿度计。这种湿度计叫做露点湿度计。

还有两种常用的湿度计。一种叫做干湿泡湿度计（图 16-4）。它由两支完全相同的温度计组成。温度计 A 叫做干泡温度计，用来测量空气的温度；温度计 B 叫做湿泡温度计，它的水银泡上包着棉纱，棉纱的下端浸在水中。由于水的蒸发，温度计 B 指示的温度总是低于 A 的。A、B 的温度差叫做干湿泡温度差。空气的相对湿度越小，即空气越干燥，湿泡温度计 B 上的水蒸发得越快，B 的温度就降得越低，两支温度计的温度差就越大；空气的相对湿度越大，即空气越潮湿，温度计 B 上的水蒸发得就越慢，A、B 的温度差就越小。所以，干湿泡温度差的大小跟空气的相对湿度有直接关系。把不同温度时相应于不同的干湿泡温度差的相对湿度计算出来，绘制成表或画成曲线，根据干湿泡湿度计上 A、B 两支温度计的读数，从表或曲线上很快就可以得出空气的相对湿度。

另一种常用的湿度计叫做毛发湿度计（图 16-5）。它是利用人的头发在脱脂以后，其长度会随着空气的相对湿度而变化制成的。毛发湿度计由一根或一束脱脂的毛发、指针和刻度盘组成。空气的相对湿度增大时，毛发伸长；相对湿度减小时，毛发缩短。毛发长度的变化控制指针的偏转，从刻度盘上就可以直接读出相对湿度。

三种湿度计各有不同的优缺点。露点湿度计测量准确，但是结构比较复杂，测出露点后要进行查表、计算等，使用起来不太方便。干湿泡湿度计使用比较方便，也比较准确，所以生活中大都使用这种湿度计。毛发湿度计结构简单，不易损坏，可以直接读数，还可以和自动记录装置联合使用，缺点是不太准确，要经常进行校准。

练习二

(1) 在北方，冬天戴着眼镜从寒冷的室外进入温暖的室内时，镜片上常出现一层细小的露珠。这是为什么？

(2) 如果干湿泡湿度计上两支温度计的指示数字相同，这时空气的相对湿度是多大？

(3) 空气的温度是 20°C ，露点是 12°C ，这时的绝对湿度和相对湿度是多大？

(4) 空气的温度是 25°C ，相对湿度是 50%，气温降低到多少摄氏度时，才会有露出现？

本章小结

(1) 晶体和非晶体在熔化和凝固时有什么不同？怎样从它们的微观结构来说明这种不同？

(2) 什么是蒸发？怎样用分子动理论的观点来解释影响蒸发快慢的各种因素？蒸发为什么能致冷？

(3) 什么叫饱和汽？什么叫未饱和汽？饱和汽压跟温度有什么关系？跟体积有什么关系？怎样解释这种关系？

怎样把未饱和汽变为饱和汽，从而使气体液化？什么叫做气体的临界温度？

(4) 什么叫做空气的绝对湿度和相对湿度？在绝对湿度保持不变的情况下，气温不同时相对湿度是否相同？为什么？

(5) 什么叫做露点？测出露点，怎样求出空气的绝对湿度和相对湿度？

干湿泡湿度计和毛发湿度计各是利用什么现象制做的？

学生实验

物理学是一门以实验为基础的科学，可以说，离开了科学实验就不会有物理学。实验是研究物理学的一种基本方法。在中学物理中做好实验可以帮助我们理论联系实际，加深对物理概念和规律的理解；培养观察物理现象和分析物理问题的能力；锻炼动手能力；并体会和学习通过实验研究物理问题的基本方法。

通过实验，应当初步具备的实验能力主要是：学会正确使用仪器进行观察、测量和读数，会分析实验数据并得出正确结论，了解误差概念，会写简明的实验报告。

误差和有效数字

做物理实验，不仅要观察物理现象，还要找到现象中的数量关系，这就需要知道有关物理量的数值。

要知道物理量的数值，必须进行测量。测量的结果不可能是绝对精确的。例如，用刻度尺来量长度，用天平来称质量，用温度计来测温度，用电流表或电压表来测电流或电压，测量出来的数值跟被测物理量的真实值都不能完全一致，测出的数值与真实值的差异叫做误差。从来源看，误差可以分成系统误差和偶然误差两种。

系统误差是由于仪器本身不精确、或实验方法粗略、或实验原理不完善而产生的。例如，天平的两臂不严格相等或砝码不准，做热学实验时没有考虑散热损失等，都会产生系统误差。系统误差的特点是在多次重做同一实验时，误差总是同样地偏大或偏小，不会出现这几次偏大另几次偏小的情况。要减小系统误差，必须校准测量仪器，改进实验方法，设计在原理上更为完善的实验。

偶然误差是由各种偶然因素对实验者、测量仪器、被测物理量的影响而产生的。例如，用有毫米刻度的尺量物体的长度，毫米以下的数值只能用眼睛来估计，各次测量的结果就不一致，有时偏大，有时偏小。偶然误差总是有时偏大，有时偏小，并且偏大和偏小的机会相同。因此，可以多进行几次测量，几次测得的数值的平均值比一次测得的数值更接近于真实值。

测量既然总有误差，测得的数值就只能是近似数。例如，用毫米刻度的尺量出书本的长度是 184.2 毫米，最末一位数字 2 是估计出来的，是不可靠数字，但是仍然有意义，仍要写出来。这种带有一位不可靠数字的近似数字，叫做有效数字。

在有效数字中，数 2.7、2.70、2.700 的含义是不同的，它们分别代表二位、三位、四位有效数字。数 2.7 表示最末一位数字 7 是不可靠的，而数 2.70 和 2.700 则表示最末一位数字 0 是不可靠的。因此，小数最后的零是有意义的，不能随便舍去或添加。但是，小数的第一个非零数字前面的零是用来表示小数点位置的，不是有效数字。例如，0.92、0.085、0.0063 都是两位有效数字。大的数目，例如，36500 千米，如果这五个数字不全是有效数字，就不要这样写，可以写成有一位整数的小数和 10 的乘方的积的形式，如果是三位有效数字，就写成 3.65×10^4 千米。

在学生实验中，测量时要按照有效数字的规则来读数。在处理实验数据进行加减乘除运算时，本来也应该按照有效数字的规则来运算，但由于这些规则比较复杂，中学阶段将不作要求，运算结果一般取两位或三位数字就可以了。

实验过程

一般地说，实验过程主要包括：实验前的准备，实验时的操作、观测和记录，数据的分析与处理。

1. 实验前的准备

实验前需做好的准备有：（1）明确实验目的，弄清实验原理；（2）了解所用仪器的性能，弄清楚实验时如何正确操作及注意事项，明确实验步骤；（3）设计好记录数据的表格。

实验前的准备是保证实验得以正确进行和取得较大收获的重要前提。只有实验前做好准备，才能自觉地、有目的地做好实验反之，实验前不做好必要的准备，实验时只是按照拟定的实验步骤盲目地操作，观察时不知道把注意力集中到重要的现象上，记录数据时不知道记下这些数据干什么，这种实验即使做了，也不会有多大收益。

2. 实验时的操作、观测和记录

做好实验前的准备后，就可以按实验步骤进行操作和观测。

操作中，要按照要求正确地使用仪器。观测要精神集中，避免出现错误。要仔细地记录必要的的数据，并注意标明单位。数据要记录在事先设计好的表格中，不要随便乱记。原始数据记录得零乱，整理时就容易出现错误。观测和记录要尊重客观事实，绝不能乱凑数据。在实验中要培养实事求是的科学态度。

实验中要手脑并用，多动手，努力培养自己的实验技能。要爱护仪器，遵守实验规则。

3. 数据的分析与处理

实验后要对所得到的数据进行分析、处理，作出合理的结论。要学会写简明的实验报告。实验报告应该自己独立写出，不要只按照现成的格式填写。高中物理实验报告的写法，除了像初中学过的一样，包括实验目的、器材、步骤等之外，还可根据不同的情况写出简要的原理和误差分析等。实验报告不要格式化，要根据实际情况有所侧重。

分析和处理实验数据，是一项很重要的实验能力。如果不善于分析、处理实验数据，即使准确地记录了应该记录的数据，也不会得到正确的结论。

下面我们以一个实例来练习一下数据的分析和处理

练习分析实验数据

这个实验是要研究水从容器底部的排水孔流出时，对一定深度的水来说，排尽水的时间 t 与孔直径 d 的关系。取四个同样大小的圆柱形容器，容器的底部各有一个排水孔，排水孔的直径分别是 1.5 厘米、2.0 厘米、3.0 厘米、5.0 厘米。容器里都放入 30 厘米深的水，打开排水孔让水流出，用秒表测量水完全流出所需的时间 t 。将测得的数据填入下表第二列中。第三列中的数据是水深为 10 厘米时排尽水的时间。

	水深 h (厘米)	30.0	10.0
排尽水的时间 t (秒)	直径 d (厘米)		
	1.5	73.0	43.5
	2.0	41.2	23.7
	3.0	18.4	10.5
	5.0	6.8	3.9

从上表所列的数据可以看出，对一定深度的水，孔径越大，排尽水的时间越短。但是还看不出它们之间的定量关系。为了分析实验数据，常常利用图象，因为图象很直观，能为我们寻求物理量之间的定量关系提供线索。

现在来做排尽水的时间 t 和排水孔直径 d 的图象。用横坐标表示自变量 d ，用纵坐标表示因变量 t 。取表中水深 30 厘米时 t 与 d 的对应数据，在坐标平面上画出相应的点，把点用平滑曲线连接起来。

从这条曲线还不能明确看出 t 和 d 之间是什么定量关系。但从图线的走向，大致可以设想 t 可能跟圆孔面积 S 有较为简单的关系。圆面积 $S = \pi d^2 / 4$ ，即 S 与 d^2 成正比。因此，为了检验这一设想，可以画出 t 与 $\frac{1}{d^2}$ 的图象。算出 $\frac{1}{d^2}$ 的数值，并将 d 、 t 和 $\frac{1}{d^2}$ 的数据填入下表。

d (厘米)	1/d ² (1/厘米 ²)	t (秒)
1.5	0.44	73.0
2.0	0.25	41.2
3.0	0.11	18.4
5.0	0.04	6.8

用横坐标表示 $\frac{1}{d^2}$ ，纵坐标表示 t ，做出 $t - \frac{1}{d^2}$ 的图象。这个图象是不是一条直线？我们的设想正确吗？写出你的结论以及 t 与 d 的关系式。

用同样方法画出水深为 10 厘米时的 $t - \frac{1}{d^2}$ 图象，验证你的结论。

一、游标卡尺的使用

游标卡尺

在这个实验里我们要了解游标卡尺的构造原理，并练习使用它测量长度。游标卡尺是比较精密的测量长度的仪器，常用的游标卡尺有三种，测量可以分别准确到 0.1 毫米、0.05 毫米和 0.02 毫米。下面先介绍可以准确到 0.1 毫米的游标卡尺。

游标卡尺的构造如图实-1 所示。它的主要部分是一条主尺 a 和一条可以沿着主尺滑动的游标尺 b。左测脚固定在主尺 a 上并与主尺垂直；右测脚与左测脚平行，固定在游标尺 b 上，可以随同游标尺一起沿主尺滑动。利用上面的一对测脚可量槽的宽度和管的内径，利用下面的一对测脚可量零件的厚度和管的外径，利用固定在游标尺 b 上的窄片 c 可量槽和筒的深度。一般游标卡尺最多可以测量十几个厘米的长度。

主尺的最小分度是 1 毫米。游标尺上有 10 个小的等分刻度，它们的总长等于 9 毫米。因此游标尺的每一分度与主尺的最小分度相差 0.1 毫米。当左、右测脚合在一起，游标的零刻线与主尺的零刻线重合时，只有游标的第十条刻线与主尺的 9 毫米的刻线重合，其余刻线都不重合。游标的第一条刻线在主尺的 1 毫米刻线左边 0.1 毫米处，游标的第二条刻线在主尺的 2 毫米刻线左边 0.2 毫米处，等等（图实-2）。

在两测脚间放一张厚 0.1 毫米的纸片，游标尺就向右移动 0.1 毫米，这时它的第一条刻线与主尺的 1 毫米刻线重合，其余刻线都与主尺上的刻线不重合。同样，在两测脚间放一张 0.5 毫米的薄片，游标的第五条刻线将与主尺的 5 毫米刻线重合，其余刻线都与主尺上的刻线不重合。所以，被测薄片的厚度不超过 1 毫米时，游标的第几条刻线与主尺的某一刻线重合，就表示薄片的厚度是零点几毫米。

在测量大于 1 毫米的长度时，整的毫米数由主尺上读出，十分之几毫米从游标上读出。例如，图实-3 所示的被测的长度就是 2.37 厘米。这样，我们读出的十分之几毫米是直接测出的，而不是估计出的。因此，用这种游标卡尺测长度可以准确到 0.1 毫米。

常用的游标卡尺还有别的刻度方法，但使用原理跟上面讲的完全相同。有的游标尺上有 20 个小的等分刻度，它们的总长度为 19 毫米，它的每一分度与主尺的最小分度 1 毫米相差 0.05 毫米。使用时，整的毫米数由主尺上读出，再看游标的第几条刻线与主尺某一刻线重合，毫米以下的长度就是二十分之几毫米。用这种游标卡尺测长度可以准确到 0.05 毫米。还有一种游标尺上有 50 个小的等分刻度，它们的总长度为 49 毫米，它的每一分度与主尺的最小分度 1 毫米相差 0.02 毫米。你能说明这种游标卡尺的使用方法吗？用它测长度可以准确到多少？

实 验

现在我们用游标卡尺来测量金属管的长度、内径和外径，然后算出它的体积。

测长度时量四次（每次测量后让金属管绕轴转过 45° 再测量下一次），求出它们的平均值。测内径和外径时，先在管的一端量出两个互相垂直的内外径，再在管的另一端量出两个互相垂直的内外径，然后分别求出内径和外径的平均值，最后算出金属管的体积。

思 考

有一游标卡尺，主尺的最小分度是 1 毫米，游标上有 20 个小的等分刻度，用它测量一工件的长度，如图实-4 所示。这个工件的长度是_____毫米。

二、螺旋测微器的使用

螺旋测微器

螺旋测微器（又叫千分尺）是比游标卡尺更精密的测长度的工具。用它测长度可以准确到 0.01 毫米。在这个实验里，我们要了解螺旋测微器的构造原理，并练习使用它来测量长度。

我们知道，螺栓在螺母中旋转一周，螺栓便沿旋转轴线方向前进或后退一个螺距的距离。我们可以做出一种螺旋，它的螺距很短，例如等于 0.5 毫米，但是螺栓的圆周很长，例如等于 100 毫米。这样，螺栓沿轴线方向只移动 0.01 毫米，它圆周上的点便移动了 100 毫米。因此，沿轴线方向移动的、不便测量的微小距离，就能用圆周上的点移动的较大距离表示出来。螺旋测微器就是利用这个原理做成的。

图实-5 所示的是常用的螺旋测微器。它的小砧 A 和固定刻度 S 固定在框架 F 上。旋钮 K、微调旋钮 K' 和可动刻度 H、测微螺杆 P 连在一起，通过精密螺纹套在 S 上。

精密螺纹的螺距是 0.5 毫米，即旋钮每转一周，测微螺杆 P 前进或后退 0.5 毫米。可动刻度分成 50 等分，每一等分表示 0.01 毫米，这样每转两周，转过 100 等分时，前进或后退的距离正好是 1 毫米。

当 A 和 P 并拢时，如果可动刻度 H 的零点恰好跟固定刻度 S 的零点重合，旋出测微螺杆 P，并使 A 和 P 的面正好接触待测长度的两端，那么 P 向右移动的距离就是所测的长度。这个距离的整的毫米数由固定刻度 S 上读出，小数部分则由可动刻度 H 上读出。

在读数的时候，要注意固定刻度尺上表示半毫米的刻线是否已经露出。例如图实-6 所示的读数是 6.727 毫米（别忘了还应估计一位读数），而不是 6.227 毫米。旧式的螺旋测微器上没有表示半毫米的刻度线，读数时更应特别小心。

用螺旋测微器一般最多能测几个厘米的长度。

螺旋测微器是一种精密的量具，使用时在测微螺杆 P 快靠近被测物体时，应停止使用旋钮 K，改用微调旋钮 K'，避免在 P 和被测物体间产生过大的压力，这样既可以使测量结果精确，又可以保护螺旋测微器。

实 验

现在用螺旋测微器来测量金属管的外径、金属丝的直径和金属板的厚度。上述的外径、直径和厚度都要在不同位置上各测四次，然后分别求出它们的平均值。

三、测定玻璃的折射率

当光线以一定的入射角穿过两面平行的玻璃板时，传播方向不变，但是出射光线跟入射光线相比，有一定的侧移。由图实-7可知，只要能找出跟入射光线AO对应的出射光线O'B，就能够求出折射光线OO'和折射角r，再根据折射定律，就可以求出玻璃的折射率了。

照图实-7那样，在白纸上画一条直线aa'作为界面，过aa'上的一点O画出界面的法线NN'，并画一条线段AO作为入射光线。然后把长方形玻璃砖放在白纸上，使它的长边跟aa'对齐，画出玻璃砖的另一边bb'。在线段AO上竖直地插上两枚大头针P₁、P₂，透过玻璃砖观察大头针P₁、P₂的像。调整视线的方向，直到P₁的像被P₂挡住。再在观察的这一侧插两枚大头针P₃、P₄，使P₃挡住P₁和P₂，P₄挡住P₁、P₂和P₃。记下P₃、P₄的位置。

移去大头针和玻璃砖，过P₃、P₄引直线O'B，交bb'交于O'，直线O'B就代表沿AO方向入射的光线透过玻璃砖后的传播方向。连接OO'，OO'就是折射光线的方向。入射角*i*=∠AON，折射角*r*=∠O'ON。

用量角器量出入射角和折射角，从三角函数表查出它们的正弦值，把这些数据记入自己设计的表格里。

用上面的方法分别求出入射角是15°、30°、45°、60°、75°时的折射角，并把入射角和折射角的正弦值也记在表格里。

算出不同入射角时 $\frac{\sin i}{\sin r}$ 的值，比较一下，看它们是否接近于一个常数。求出几次实验中测得的 $\frac{\sin i}{\sin r}$ 的平均值，就是玻璃的折射率*n*。

思考

1. 为什么说直线O'B就代表了沿AO方向入射的光线透过玻璃砖后的传播方向？

2. 请你自己另外设计一个测玻璃折射率（或水的折射率）的实验。

四、测量凸透镜的焦距

测量凸透镜的焦距有许多种不同的方法，在这个实验里我们用下面两种方法来测量。

(1) 应用凸透镜成像公式求焦距。

把带底座的小灯泡放在桌子的一头，白纸屏放在桌子的另一头，透镜放在灯和屏之间。接通电路，移动透镜，直到在屏上获得灯丝的清晰的像为止。测出由灯到透镜和由透镜到屏的距离 u 和 v 。填入预先设计好的表格里。

改变物距和像距，按上述方法再做几次实验。应用公式 $\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$ 算出每次的 f 值，再算出几次的平均值 f ，得出的 f 值即为此透镜的焦距。

(2) 应用公式 $f = \frac{L^2 - d^2}{4L}$ 求焦距（见第二章习题A组第5题）。

把小灯泡和纸屏固定，让它们之间的距离 L 足够大 ($L > 4f$)。在灯和屏之间移动透镜，在屏上能两次成像。测出透镜在两次成像时位置之间的距离 d 。把 L 和 d 的值填入表格。改变 L 的数值，重做几次实验。应用

公式 $f = \frac{L^2 - d^2}{4L}$ 求出各次实验所得的焦距 f ，并算出它们的平均值。

有光具座的学校，最好用光具座进行本实验。

思 考

此实验中作为发光物的灯丝一般不在同一个平面上，所以不易较准确地判断像的位置。

你有什么办法来解决这个问题吗？

五、互成角度的两个共点力的合成

两个互成角度的共点力，可以用平行四边形定则求出它们的合力。现在用实验来验证平行四边形定则。

在桌上平放一块方木板，在方木板上铺一张白纸，把橡皮条的一端固定在板上的 A 点，用两条细绳结在橡皮条的另一端，通过细绳用两个弹簧秤互成角度拉橡皮条，使橡皮条伸长，结点到达某一位置 O (图实-8)。

记下两个弹簧秤的读数以及结点的位置。描下两条细绳的方向。在纸上按比例做出两个力 F_1 和 F_2 的图示。用平行四边形定则求出合力 F 。

只用一个弹簧秤，通过细绳把橡皮条的结点拉到同样位置 O。记下弹簧秤的读数和细绳的方向。按同样比例做出这个力 F 的图示。比较力 F 与用平行四边形定则求得的合力 F ，可以看出，它们在实验误差范围内是相等的。

改变两个分力的大小和夹角，再做两次实验。

从实验结果可以得到什么结论？

思 考

有兴趣的同学还可以利用上面的器材再做一个实验。先用两个弹簧秤一起把橡皮条的结点拉到位置 O。用手指按住结点，使它不能活动。再改变一个弹簧秤的方位，使这个弹簧秤的拉力的大小和方向都跟原来的不同。固定这个弹簧秤的位置，松开结点，于是结点便离开原来的地方。试着改变另一个弹簧秤的方位，来改变拉力的大小和方向，总可以找到一个适当的方位（并且是唯一的），使结点回到原来的地方。两个弹簧秤后来的拉力的合力跟它们原来的拉力的合力有什么关系？学过力的分解以后，说明为什么另一个弹簧秤的方位是唯一的。

六、练习使用打点计时器

电磁打点计时器

电磁打点计时器是一种使用交流电源的计时仪器，它的工作电压是4~6伏。电源频率是50赫时，它每隔0.02秒打一次点。

打点计时器的构造如图实-9所示，在胶木底板上装有电源接线柱1和线圈2。通电以前，先把纸带9穿过限位孔6，再把套在定位轴8上的复写纸片7压在纸带上。接通电源时，在通电线圈和永久磁铁4的作用下，振片3便振动起来。位于振片一端的振针5就跟着上下振动起来。这时，如果纸带运动，振针就在纸带上打出一系列的小点。

打点计时器打点的时间间隔是0.02秒，因此，打在纸带上的点，记录了纸带运动的时间。把纸带跟运动物体连接在一起的时候，纸带上的点子就相应地表示出运动物体在不同时刻的位置。研究纸带上的点子之间的间隔，就可以了解运动物体在不同时间里发生的位移和速度的大小及其变化，从而了解物体运动的情况。

实 验

把打点计时器固定在桌子上，让纸带穿过两个限位孔，压在复写纸的下面。把打点计时器的两个接线柱接到6伏的低压交流电源上。用手水平地拉动纸带，使它在水平方向运动，纸带上就打下一列小点。

取下纸带，从能分得清的某个点数起，数一数纸带上共有多少个点？打下这些点，纸带的运动时间 t 是多少？打下这些点，纸带通过的距离 s 是多少？用直尺量出这个距离。利用公式 $\bar{v} = \frac{s}{t}$ 算出纸带在这段时间内的平均速度。

在纸带上找出连续的6个点，分别标上记号A, B, C, D, E, F。用直尺量出相邻的两个点间的距离 S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 ，把数据填入下表。根据这些数据，判断纸带的这段运动是匀速运动还是变速运动，并说明理由。

A 和 B 的距离 S_1 (米)	B 和 C 的距离 S_2 (米)	C 和 D 的距离 S_3 (米)	D 和 E 的距离 S_4 (米)	E 和 F 的距离 S_5 (米)

思 考

电磁打点计时器工作电源的频率是50赫时，计时器每隔0.02秒打一次点。如果电源频率变低，打点计时器每打点一次的时间间隔是大于0.02秒，还是小于0.02秒？

七、测定匀变速直线运动的加速度

实验原理

设物体做匀加速直线运动，加速度是 a ，在各个连续相等的时间 T 里的位移分别是 s_1, s_2, s_3, \dots 则有（见第四章第九节）

$$s = s_2 - s_1 = s_3 - s_2 = s_4 - s_3 = \dots = aT^2.$$

由上式还可得到

$$s_4 - s_1 = (s_4 - s_3) + (s_3 - s_2) + (s_2 - s_1) = 3aT^2.$$

同理有

$$s_5 - s_2 = s_6 - s_3 = \dots = 3aT^2.$$

可见，测出各段位移 s_1, s_2, \dots 即可求出

$$a_1 = \frac{s_4 - s_1}{3T^2}, a_2 = \frac{s_5 - s_2}{3T^2} \dots$$

再算出 a_1, a_2, \dots 的平均值，就是我们所要测定的匀变速直线运动的加速度。

实 验

如图实-10 所示，把附有滑轮的长木板平放在实验桌上，并使滑轮伸出桌面，把打点计时器固定在长木板上没有滑轮的一端，连接好电路。把一条细绳拴在小车上，细绳跨过滑轮，下边挂上合适的钩码。把纸带穿过打点计时器，并把纸带的一端固定在小车的后面。

把小车停在靠近打点计时器处，接通电源后，放开小车，让小车拖着纸带运动，打点计时器就在纸带上打下一系列的点。换上新纸带，重复实验三次。

从三条纸带中选择一条比较理想的，舍掉开头一些较密的点子，在后边便于测量的地方找一个开始点。把每打五次点的时间作为一个时间单位，也就是 $T = 0.02 \text{ 秒} \times 5 = 0.1 \text{ 秒}$ 。在选好的开始点下面标明 0，在第六点下面标明 1，在第十一点下面标明 2，在第十六点下面标明 3..... 标明的点 0, 1, 2, 3..... 叫做记数点（图实-11）。两个相邻记数点间的距离分别是 s_1, s_2, s_3, \dots

测出六段位移 $s_1, s_2, s_3, \dots, s_6$ 的长度，把测量结果填入表中。根据测量结果，利用前面的公式，计算出 a_1, a_2, a_3 的值，注意 $T = 0.1 \text{ 秒}$ 。

求出 a_1, a_2, a_3 的平均值，它就是小车做匀变速直线运动的加速度。把计算结果也填入表中。

记数点	位移 s (米)	位移差 (米)	加速度 a (米/秒 ²)
0			
1			
2			
3			
4		$s_4 - s_1 =$	
5		$s_5 - s_2 =$	
6		$s_6 - s_3 =$	

小车做匀变速直线运动的加速度 a=

思 考

如果电源的频率比 50 赫低，测出的加速度值比 50 赫时测出的是大，还是小？

八、验证牛顿第二定律

现在用图实-12 所示的装置粗略地验证牛顿第二定律。

研究的对象是图中所示的小车。小车前端拴着细绳，细绳跨过定滑轮，下面吊一个小桶，桶内装砂。知道了砂和小桶的总质量，可以算出它们受的总重力。细绳对小车的拉力的大小可认为等于这个总重力。小车运动时，用打点计时器把小车的运动情况记录下来，求出加速度，就可以研究小车的加速度跟受力大小的关系以及加速度跟小车质量（车上加砝码时，加上砝码的质量）的关系。

下面我们来做实验。用天平测出小车和小桶的质量 M 和 M' ，把数值记录下来，在小车上加放砝码，小桶里放入适量的砂，使小桶和砂的总质量远小于小车和砝码的总质量，把砝码和砂的质量 m 和 m' 记录下来。

实验前要注意平衡小车与长木板间的摩擦力。在长木板的不带定滑轮的一端下面垫一块木板。反复移动木板的位置，直至小车在斜面上运动时可以保持匀速直线运动状态。这时，小车拖着纸带运动时受到的摩擦阻力恰好与小车所受重力在斜面方向上的分力平衡。

把细绳系在小车上并绕过滑轮悬挂小桶。接通电源，放开小车，打点计时器在纸带上打下一系列的点。取下纸带。在纸带上标上纸带号码。保持小车的质量不变，改变砂的质量，即改变对小车的拉力，再做几次实验。在实验中一定要使砂和小桶的质量远小于小车和砝码的质量。

在每条纸带上都选取一段比较理想的部分，标明记数点，测量记数点间的距离，算出每条纸带上加速度的值。

把各次实验中的数据填入表 1 内。作用力 F 的大小等于砂和小桶受的重力 $(M' + m')g$ 。用纵坐标表示加速度 a ，横坐标表示作用力 F ，根据实验结果在坐标平面上画出相应的点，如果这些点是在一条通过原点的直线上，就证明加速度与作用力成正比。

表 1

小车质量 $M =$ 克，砝码质量 $m =$ 克， $M + m =$ 克， $T =$ 秒							
纸带 编号	小桶质量 M' (克)	砂质量 m' (克)	作用力 F (牛)	位移 s (米)	位移差 (米)	加速度 (米/秒 ²)	加速度平均 值(米\秒 ²)

保持砂和小桶的质量不变，在小车上加放砝码，重复上面的实验。把各次实验的数据填入表 2 内，用纵坐标表示加速度 a ，横坐标表示质量的倒数 $1/(M + m)$ ，在坐标平面上根据实验结果画出相应的点。如果在实验误差范围内，这些点是在一条通过原点的直线上，就证明加速度与质量成反比。

表 2

小桶质量 $M =$ 克, 砂质量 $m =$ 克, 力 $F = (M + m)g =$ 牛, $T =$ 秒

纸带 编号	小桶质量 M (克)	砝码质量 m (克)	位移 s (米)	位移差 (米)	加速度 (米\秒 ²)	加速度平均 值 (米\秒 ²)
			s_1 s_2 s_3 s_4			
			s_1 s_2 s_3 s_4			
			s_1 s_2 s_3 s_4			

思考

一学生在做上面的实验时, 用改变砂的质量的办法来改变对小车的的作用力 F , 用打点计时器测出小车的加速度 a , 得出若干组 F 和 a 的数据。然后根据测得的数据作出 a - F 图 (图实-13)。结果发现横轴上的截距 OA 较大, 明显地超出了偶然误差的范围。这是为什么?

九、研究平抛物体的运动

在这个实验里，我们要描出平抛物体的运动轨迹，求出平抛物体的初速度。

图实-14 是这个实验的装置示意图。螺旋 a、b 用来调节底板水平，竖直板与底板垂直。竖直板的左上端固定着一个供小球滑下的斜槽，槽的底端有一段平滑部分与底板平行。竖直板两端的立柱中间装有一个可以上下移动的挡球板 MN，它的接球面向板内倾斜，且表面贴有一层较软的物质，以防落下的小球不停地跳动。

实验时先将一张白纸和一张复写纸固定在竖直板上（复写纸压在白纸的上面），然后将底板调平。记下斜槽末端 O 点的位置，并利用重垂线画出通过 O 点的竖直线。将挡球板 MN 固定在某一位置，然后使小球由斜槽某一固定的位置自由滑下，并由 O 点开始做平抛运动，小球碰到挡球板后，会在白纸上留下一个痕迹。改变挡板的上下位置（最好由下而上地变化），再使小球由斜槽上与前一次相同的位置自由滑下，小球又会在碰到挡板时，在白纸上留下一个痕迹。这样，我们可以根据需要记录下小球做平抛运动轨迹上的多个位置。

取下白纸，以 O 点为原点画出竖直向下的 Y 轴和水平向右的 X 轴。根据记下的小球的一系列位置，用平滑的曲线画出小球做平抛运动的轨迹。

在轨迹上选取几个不同的点，测出它们的坐标 x 和 y，已知 g 值，利用公式 $y = \frac{1}{2}gt^2$ 和 $x = v_0t$ 求出每次释放的小球的初速度 v_0 ，最后算出 v_0 的平均值。

思 考

你用什么方法可以确认底座已调平？

十、碰撞中的动量守恒

实验原理

这个实验要用两个大小相同但质量不等的小球的碰撞来验证动量守恒定律，实验装置如图实-15所示。让一个质量较大的小球从斜槽上滚下来，跟放在斜槽末端小支柱上的另一个质量较小的小球发生碰撞（正碰）。设两个小球的质量分别为 m_1 和 m_2 。碰撞前，质量为 m_1 的入射小球的速度是 v_1 ，质量为 m_2 的被碰小球静止。两个小球在碰撞前的总动量是 $m_1 v_1$ 。碰撞后，入射小球的速度是 v_1' ，被碰小球的速度是 v_2' ，碰撞后两个小球的总动量是 $m_1 v_1' + m_2 v_2'$ 。根据动量守恒定律，应该有

$$m_1 v_1 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$$

如果我们测出小球的质量和碰撞前、后的速度，把它们代入上式，就可以验证两个小球发生碰撞前后的动量是否守恒。

小球的质量可以用天平称出。怎样简便地测出两个小球碰撞前后的速度呢？两球碰撞前后的速度都是水平的，因此两球碰撞前后的速度，可以利用平抛运动的知识求出。做平抛运动的小球落到地面，它们的下落高度相同，它们的飞行时间 t 也相同，它们飞行的水平距离 $s = v t$ 与小球开始做平抛运动时的水平速度 v 成正比。如果用小球的飞行时间 t 作时间单位，小球飞行的水平距离 s 在数值上就等于它的水平速度 v 。因此，只要测出 s ，就可以用它来表示小球的水平速度 v 。

实 验

用天平测出两个小球的质量。按照图实-15所示的那样，安装好实验装置。将斜槽固定在桌边，使槽的末端点的切线是水平的。被碰小球放在斜槽前边的小支柱上。调节实验装置，使两球相碰时处于同一高度，碰撞后的速度方向在同一条直线上。为了记录小球飞出的水平距离，在地上铺一张白纸，白纸上铺放复写纸，当小球落在复写纸上时，便在白纸上留下了小球落地的痕迹。在白纸上记下重垂线所指的位置 O （图实-16）。它表示碰撞时入射小球的球心在纸上的垂直投影。

先不放上被碰小球，让入射小球从斜槽上某一高处滚下，重复 10 次。用尽可能小的圆把所有的小球落点圈在里面，圆心 P 就是小球落点的平均位置。

把被碰小球放在小支柱上，让入射小球从原来的高度滚下，使它们发生碰撞。重复实验 10 次。用同样的方法标出碰撞后入射小球的落点的平均位置 M 和被碰小球的落点的平均位置 N 。

支持被碰小球的小支柱和斜槽末端点的距离是 $2r$ （ r 是小球半径），在直线 ON 上取 $OO' = 2r$ ， O' 点就是碰撞时被碰小球的球心在纸上的垂直投影。因此线段 $O'N$ 的长度是被碰小球飞出的水平距离，它在数值上等于被碰小球碰撞后的速度 v_2' 。入射小球是在斜槽末端开始飞出或与被碰小球发生碰撞的，所以线段 OP 的长度是入射小球在没有发生碰撞时飞出的水平距离，它在数值上等于入射小球到达斜槽末端的水平速度 v_1 ；线段 OM

的长度是入射小球碰撞后飞出的水平距离，它在数值上等于入射小球碰撞后的速度？¹⁰

用刻度尺测量线段 OM、OP、ON 的长度。把两个小球的质量和相应的速度的数值代入前面的式子中，验证动量守恒定律是否成立。

思 考

1. 如果 P、M、N 三点不在一条直线上，且偏离很大，说明实验中存在什么问题？应该如何校正？

2. 如果入射小球的质量小于被碰小球的质量，将会发生什么现象？实际做做看。

十一、验证机械能守恒定律

在这个实验里，我们来验证机械能守恒定律：在重力作用下，物体的重力势能和动能可以互相转化，但总的机械能守恒。

我们来研究物体自由下落的情况。如果忽略空气的阻力，这时物体的机械能守恒，即重力势能的减少等于动能的增加。设物体的质量为 m ，下落距离为 h 时的速度为 v ，则有

$$\frac{1}{2}mv^2 = mgh.$$

现在用图实-17 所示的装置做实验，研究重物自由下落时的重力势能和动能。将纸带固定在重物上，让纸带穿过打点计时器。先用手提着纸带，使重物静止在靠近打点计时器的地方。然后接通电源，松开纸带，让重物自由下落，计时器就在纸带上打下一系列小点。

做实验时，要把打点计时器竖直地架稳，以便减小重物带着纸带下落时所受的阻碍。由于自由落体加速度 g 的值比较大，在实验中从几条打上点的纸带中挑选第一、二两点间的距离接近 2 毫米并且点迹清晰的纸带进行测量。

在挑选的纸带上，记下第一个点的位置 0，并在纸带上从任意点开始依次选取几个点 1, 2, 3, 4,并量出各点到位置 0 的距离 h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4，这些距离就是物体运动到点 1, 2, 3.....时下降的高度。

根据第四章末习题 B 组第 (8) 题的结论：“时间 t 内的平均速度等于该段时间中点 $\frac{t}{2}$ 时刻的瞬时速度”，算出点 1 到点 3 之间的距离 $h_3 - h_1$ ，除以 2×0.02 秒 (纸带上任意两个相邻的点间所表示的时间都是 0.02 秒)，计算出平均速度，这个平均速度就是点 2 处的瞬时速度。用这种办法计算一下物体在打下点 2, 3, 4.....时的瞬时速度 v_2 , v_3 , v_4。

把得到的数据填入自己设计的表格里，算出重物运动到点 2, 3, 4.....时减少的重力势能 mgh_2 , mgh_3 , mgh_4再计算物体运动到点 2,

3, 4.....时增加的动能 $\frac{1}{2}mv_2^2$, $\frac{1}{2}mv_3^2$, $\frac{1}{2}mv_4^2$根据机械能守恒定律

应当有： $\frac{1}{2}mv_2^2 = mgh_2$, $\frac{1}{2}mv_3^2 = mgh_3$, $\frac{1}{2}mv_4^2 = mgh_4$你计算的结

果是否跟理论一致？这里并不需要知道动能和势能的具体数值，因此不需要测出重物的质量 m 。 g 最好取当地的数值。

* 十二、用冲击摆测弹丸的速度

实验原理

冲击摆是一个用细线悬挂着的砂箱。弹丸击中砂箱时陷入箱内，使砂箱摆至某一高度（图实-18）。利用这种装置可以测出弹丸的速度。

设弹丸的质量为 m ，速度为 v ，砂箱的质量为 M 。弹丸未射入砂箱前，砂箱静止在平衡位置，弹丸和砂箱的总动量为 mv ；弹丸击中砂箱后，弹丸和砂箱以相同的速度运动，设这个速度为 v' ，它们的总动量为 $(M+m)v'$ 。由动量守恒定律有

$$mv = (M+m)v' \quad (1)$$

弹丸和砂箱一起运动后，线的拉力不做功，只有重力做功，机械能守恒。因此，它们在开始运动时的动能，在到达最高位置时完全转化成重力势能。设砂箱到达的最大高度为 h ，则有

$$\frac{1}{2}(M+m)v'^2 = (M+m)gh, \quad (2)$$

即

$$v' = \sqrt{2gh}.$$

代入(1)式后可得

$$v = \frac{M+m}{m} \sqrt{2gh}.$$

因为砂箱的质量 M 比弹丸的质量 m 大得多，所以近似地有

$$v = \frac{M}{m} \sqrt{2gh}. \quad (3)$$

设砂箱摆动的最大角度为 θ ，摆长（悬绳长度）为 l ，我们有

$$h = l(1 - \cos\theta). \quad (4)$$

代入(3)中得

$$v = \frac{M}{m} \sqrt{2gl(1 - \cos\theta)}. \quad (5)$$

测出 M 、 m 、 l 、 θ ，由(5)式即可求得 v 。

实 验

现在用图实-19 所示的装置来做实验。这个装置主要由冲击摆和弹簧枪组成。冲击摆的摆锤用四根线绳悬挂着，线绳的长度可以调节。摆锤是中空的，弹丸射入摆锤后，被卡在里面，不能反跳出来。弹簧枪用来发射弹丸。它有三档，能够用三种不同的速度发射弹丸。摆锤摆动时，推动着指针偏转。这个指针可以停留在任一位置上，实验中根据指针停留的位置就可以从刻度盘上读出摆锤摆动的最大角度 θ 。

将实验装置水平放在桌子上。调节四根线绳的长度，使弹丸恰好能射入摆锤内，并使摆锤摆动平稳。让冲击摆在平衡位置静止。扳动弹簧枪的扳机，把弹丸射入摆锤内。摆锤和弹丸一起摆动，并推动着指针偏转。摆锤在推动指针偏转时，要克服摩擦力做功，应使指针先偏转适当的角度，以减少能量的损耗。记下摆锤摆动的最大角度 θ ，测出悬绳的长度（摆长）

1, 用天平测出弹丸的质量 m 和摆锤的质量 M , 用公式 (5) 求出弹丸的速度。

用同样的方法, 求出弹簧枪另外两档发射的弹丸速度。

* 十三、验证向心力公式

在这个实验里，利用图实-20 所示的装置来验证向心力公式。

实验仪器由竖直的转动轴、横杆、配重、圆柱体、弹簧和半径指示器组成。当轴匀速转动时，固定在轴上的弹簧拉住圆柱体，使它随转轴做匀速圆周运动。圆柱体做匀速圆周运动的向心力是由弹簧提供的。半径指示器的金属片或塑料片中央有一个小缺口，在圆柱体以适当的半径做匀速圆周运动时，我们听不到圆柱体下面的小凸柱撞击金属片或塑料片的声音，这时圆周运动的半径 r 就是缺口到转轴中心的距离。

把仪器固定在桌边，称出圆柱体的质量 m 。按选定的圆周半径 r 调好指示器缺口中心的位置。调好圆柱体与转轴间的距离，以保证转动时弹簧能正常伸长，并保持横杆两边平衡。用手指搓动转轴，使圆柱体转动起来。当圆柱体匀速无声地通过指示器缺口时开始计时。测量转动 20 周所用的时间，算出圆周运动的周期 T 。反复测量三次，求出 T 的平均值。再利用 $\omega = 2\pi / T$ ，算出 ω 值。将测出的质量 m 、圆周半径 r 以及所得到的角速度的值代入公式 $F = mr\omega^2$ 中，算出向心力 F 。

调整横杆的方向，使圆柱体静止在指示器上方，用弹簧秤把它钩住并水平向外拉，使圆柱体下面的凸柱对正指示器缺口，这时弹簧秤的示数就等于圆柱体做圆周运动时弹簧对它的拉力的数值，也就是等于圆柱体受到的向心力的数值。

改变圆柱体的质量或改变它做圆周运动的半径，重做上述实验。把直接测得的弹簧拉力和计算出来的向心力加以比较，看看它们是否相等，以验证向心力公式。

十四、用单摆测定重力加速度

由单摆的周期公式 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 可得

$$g = 4\pi^2 \frac{l}{T^2}.$$

可见，测出单摆的摆长 l 和周期 T ，就可以求出当地的重力加速度 g 的值。

选取一段 1 米左右的细线，让线的一端穿过小球的小孔，然后打一个比小孔大一些的线结。把线的上端用铁夹固定在铁架台上，把铁架台放在实验桌边，使铁夹伸到桌面以外，让摆球自由下垂。

用米尺量出悬线长 l_0 ，准确到毫米。为了测量方便，可以用游标卡尺测量摆球的直径，然后算出摆球的半径 r ，也准确到毫米。 $l_0 + r$ 就是单摆的摆长。

把单摆从平衡位置拉开一个很小的角度（不超过 5° ），然后放开小球让它摆动，用停表测出单摆做 30 ~ 50 次全振动的时间，计算出平均摆动一次的时间，这个时间就是单摆的振动周期。

根据单摆的周期公式，计算出重力加速度。

变更摆长，重做几次实验，计算出每次实验的重力加速度。最后，求出几次实验得到的重力加速度的平均值，即可看作本地区重力加速度。

设计一个表格，把测得的数据和计算结果填入表中。

利用实验中测得的数据还可以研究周期跟摆长的关系。从单摆的周期公式知道，周期跟摆长的平方根成正比。算出不同摆长下周期跟相应的摆长的平方根之比，看看这些比值是否相等。

从单摆的周期公式知道，周期跟偏角的大小、摆球的质量没有关系。用实验验证这个结论。

思 考

在测定周期时，可以从摆球通过平衡位置时开始计时，也可以从球摆到最高位置时开始计时。你认为这两种办法哪一种更好，为什么？

十五、验证玻意耳定律

在这个实验中，我们用一个带有刻度的注射器粗略地验证玻意耳定律。

实验研究的对象是封闭在注射器里的空气柱。空气柱的体积可由注射器的刻度直接读出。除了大气压外，如果空气柱不受其他力的作用，空气柱的压强就等于大气压强 p_0 。实际上，空气柱还受到注射器的活塞和固定在它上面的框架的压力作用，以及我们施加的拉力或压力的作用。设这些力的合力是 F ，则空气柱的压强 $p = p_0 \pm \frac{F}{S}$ ，其中 S 为活塞的横截面积。

（请考虑一下，哪种情况公式取加号，哪种情况公式取减号）

用刻度尺测出注射器的全部刻度的长度，用这个长度去除它的容积即得活塞的横截面积 S 。记下气压计（全班共用一个气压计）指示的大气压强 p_0 。

称出活塞和框架的质量，算出它们受的重力。

把适量的润滑油抹在注射器的活塞上，在注射器内来回拖动活塞，使活塞与器壁的间隙均匀地涂上油。将活塞插进注射器内一部分，然后将注射器的小孔用橡皮帽堵住，封入一定质量的空气。记下空气柱的体积。

把框架安装在活塞上，把注射器固定在支架上。在框架两侧挂上钩码（图实-21）。由于施加在活塞上的压力（等于钩码受的重力）和活塞、框架受的重力方向一致，它们的合力 F 等于它们所受的重力之和。记下挂在框架上的钩码的质量，算出加在空气柱上的合力 F 的数值，并记下相应的空气柱的体积 V 。改变钩码的个数，再做几次实验，记下相应的合力 F 和空气柱体积 V 的数值。

取下挂在框架上的钩码，用弹簧秤钩住框架上的钩竖直向上拉（图实-22），使空气柱的体积增大。由于活塞所受到的拉力跟活塞和框架所受的重力方向相反，它们的合力 F 应该等于拉力和重力之差。记下每拉到一定高度时弹簧秤的读数，算出加在空气柱上的合力 F 的数值，记下相应的空气柱的体积 V 。

把记录的数据填入自己设计的表格里。根据公式 $p = p_0 \pm \frac{F}{S}$ 算出各个压强值，求出各个压强 p 跟相应的体积 V 的乘积。比较这些乘积，能得出什么结论？

*十六、验证理想气体状态方程

这里，我们利用上一实验所示的装置来验证理想气体的状态方程。

同上一实验一样，先把一定质量的空气封闭在注射器里，我们通过
在框架上挂不同质量的钩码来改变注射器内气体的压强。气体的压强

$p = p_0 + \frac{F}{S}$ 。式中的 p_0 是大气压强，可由气压计直接读出其数值。F是活

塞、框架和所挂钩码受的重力之和。S 是活塞的横截面积，它的数值在上
个实验里已经测出。

称出活塞和框架的质量，把所用的仪器按照图实-23 那样安装好。注
射器的下半部分位于烧杯之中。记下这时气体的温度（室温）和它的体积。

往烧杯中加入适量的热水，使注射器内的空气柱位于水面之下。加入
热水三分钟后再测量水的温度，可以认为这个温度等于气体的温度。测量
这时气体的体积。在这个温度下，改变气体的压强，再测量气体的体积。

改变烧杯中水的温度，重复上面的实验。

把每种情况下的实验数据填入设计好的表格内。

把实验中测得的温度 t 换算成热力学温度 T 后，再把每次实验的气体
的压强、体积和温度的数值代入 $\frac{pV}{T}$ 中去，看看它们是否相等。

附 录

国际单位制 (SI)

我们知道，物理公式在确定物理量的数量关系的同时，也确定了物理量的单位关系。因此，只要我们选定为数不多的几个物理量的单位，就能够利用它们推导出其他物理量的单位。这些被任意选定的物理量叫做基本量，如力学中的长度、质量和时间就是三个基本量。基本量的单位，如米、千克、秒等，叫做基本单位。由基本量根据有关公式推导出来的其他物理量，叫做导出量。导出量的单位叫做导出单位。

所谓单位制，就是有关基本单位、导出单位等一系列单位的体制。由于所采用的基本量的不同，基本单位的不同，以及用来推导导出单位的定义公式的不同，存在着多种单位制。多种单位制并用，严重影响了计量科学的进步，影响了科学技术的交流和发展。为了避免多种单位制的并存，国际上制订了一种通用的适合一切计量领域的单位制，叫做国际单位制，国际代号为 SI，我国简称为国际制。国际单位制是 1960 年第十一届国际计量大会通过的，其后并向全世界推荐使用。我国国务院于 1984 年 2 月 27 日发布了《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》，决定：“在采用先进的国际单位制的基础上，进一步统一我国的计量单位。”现在世界上许多国家采用了国际单位制或者正在向国际单位制过渡。

在力学范围内，国际单位制规定长度、质量和时间为三个基本量，它们的单位米、千克、秒为基本单位。对于热学、电磁学、光学等学科，除了上述三个基本单位外，还要加上另外的基本量，并选定合适的基本单位，才能导出其它物理量的单位。这样，国际单位制的基本单位共有七个。表 1 和表 2 分别列出了国际制的基本单位和常用的力学量和热学量的国际制单位。

表 1. 国际制基本单位

物理量名称	单位名称	单位符号	
		中 文	国 际
长度	米	米	m
质量	千克	千克	kg
时间	秒	秒	s
电流	安培	安	A
热力学温度	开尔文	开	K
发光强度	坎德拉	坎	cd
物质的量	摩尔	摩	mol

表 2. 常用的力学量和热学量的国际制单位

物理量		单 位			备 注
名 称	符号	名称	中文符号	符号	
面 积	S	平方米	米 ²	m ²	
体 积	V	立方米	米 ³	m ³	
位 移	s	米	米	m	
速 度	v	米每秒	米/秒	m/s	
加速度	a	米每二次方秒	米/秒 ²	m/s ²	
角速度		弧度每秒	弧度/秒	rad/s	
频 率	ν, f	赫兹	赫	Hz	1 赫=1 秒 ⁻¹
密 度		千克每立方米	千克/米 ³	kg/m ³	
力	F	牛顿	牛	N	1 牛=1 千克·米/秒 ²
力 矩	M	牛顿米	牛·米	N·m	
动 量	P	千克米每秒	千克·米/秒	kg·m/s	
压 强	P	帕斯卡	帕	Pa	1 帕=1 牛/米 ²
功	W	焦耳	焦	J	1 焦=1 牛·米
能	E	焦耳	焦	J	
功 率	P	瓦特	瓦	W	1 瓦=1 焦/秒
摄 氏 温 度	t	摄氏度	焦	C	
热 量	Q	焦耳	焦	J	
比 热	c		焦/千克·开	J/kg·K (J/kg·)	
内 能	U(E)	焦耳	焦	J	

