

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

高级中学课本 物理

(一年级用) 试用本



引 言

0.1 物理学是自然科学的基础

从风霜雨雪、花草树木、飞禽走兽、山谷河流到月球、太阳系乃至宇宙中的一切所构成的整个物质世界叫做自然界。

自然界不是谁创造的，也不会被毁灭。它将永恒地客观存在着，并处于运动、变化和发展之中。近几十年来，由于在天文观测上应用了射电望远镜、太空实验室等新技术，人们已能观测到距离地球远达 100 亿光年的天体，如类星体、脉冲星系以及它们的核爆发现象等。这些资料进一步证实了自然界是处于运动、变化和发展之中。

人类依靠勤劳的双手和无穷的智慧不断地认识自然、改造自然。人们在认识自然的过程中逐步发现在自然界中所发生的运动和变化都是有规律的。自然科学就是专门探究自然规律的。人们研究自然规律的目的不仅在于用来解释一些自然现象，更重要的是利用这些规律来发展生产，改善人民生活，满足社会需要。

随着对自然现象认识的不断深化，人们发现在自然界中，既不存在没有物质的运动，也不存在没有运动的物质，这就是说物质与运动是不可分离的。各种物质的运动形式是多种多样的。物理学研究的是物质的最普遍的运动形式和物质的基本结构，它是其他自然科学的基础。

0.2 物理学与科学技术的发展

物理学基础理论的重大进展往往能促进整个科学技术的发展，带动重大的技术革新和技术革命。

历史上最早的蒸汽机(图 0-1)就是在研究气体的性质以及热现象的基础上发明的，后来经过英国格拉斯哥大学的仪器修理工瓦特(1736~1819)的多次改进，增大了功率，提高了效率，使蒸汽机广泛应用于纺织、冶金、煤矿、交通运输、机器制造等行业，导致了 18 世纪的第一次技术革命。

早在 2000 多年前人们就知道了电，但直到 19 世纪前半期英国科学家法拉第(1791~1867)发现了电磁感应现象以后，杰出的青年物理学家麦克斯韦(1831~1879)才可能建立完整的电磁理论体系。这套理论体系不仅预示了电磁波的存在，揭示了光、电、磁现象本质上的统一性，而且也奠定了现代电力工业和无线电电子工业的基础，并直接导致了 19 世纪工业电气化的第二次技术革命。

19 世纪以来，近代物理(相对论和量子力学)的创立，不仅使人们

对物质世界的认识扩展到高速和微观的领域，而且为新的技术领域的开辟提供了理论基础。核物理的研究实现了核爆炸，建成了核反应堆，使原子核能的开发利用成为可能；由量子力学应用于固体物理而产生的固体能带理论，推动了电子技术、激光技术的巨大发展；产生于机械、电磁计算工具技术基础上的电脑，使生产的自动化技术、遥控和遥感技术得以实现；航天技术的发展几乎集中了现代科技的一切重要成就。当代的第三次技术革命正是以原子核能、电脑和航天技术的发展为标志的。

反过来，技术的发展对物理的研究也起着推动作用。它不仅提出了新的课题，还提供了精密的仪器装备。如低温技术的发展，推动了低温物理学的研究。

0.3 学习物理的方法

高中物理是在初中物理的基础上进一步比较系统地学习一些力学、分子物理学、电磁学和光学的基础知识以及原子物理的初步知识。然而我们学习物理的目的，不仅是要了解一些物理知识，用来认识自然，解释一些物理现象；更重要的是掌握和运用这些知识来改造自然，为今后参加祖国的社会主义现代化建设事业贡献力量。

具体地说，我们学习物理，要反复阅读物理课本，深入思考。认真阅读课本，不仅能加深对知识的理解，还可以培养和提高自学能力。

我们学习物理，要重视学习探究物理规律的方法，在探究过程中，我们要注意做到以下几个方面：

发现问题问题就是矛盾。我们要善于在自然现象中发现矛盾，提出要探究的问题。

提出假设既然提出了问题，就要设法把问题的解答探究出来。怎样探究呢？先要针对问题提出一个或几个可能的解答，叫做假设。有了假设就有了进一步探究的目标和方向。

检验假设究竟哪个假设是问题的正确答案，还要通过实践检验才能断定。检验假设的最好方法当然是动手进行观测实验。

除了用实验来验证假设外，我们还可以从理论上对假设进行论证，即运用学过的知识通过分析、推理等方法来证明假设的正确性。

得出结论从检验假设到得出结论，还要通过一个分析、综合、概括、推理的逻辑思维过程，从而得出问题的完整结论。

例如，在初中物理中，我们探究阿基米德原理是从万吨巨轮为什么会浮在水面上这个问题出发的。从分析浸没在液体中的物体所受浮力与哪些因素有关，提出浮力与液体的深度、密度，以及物体的重力、体积有关等假设。然后，通过实验排除了液体的深度和物体的重力这两个因素，得出与浮力大小有关的因素是：物体浸在液体中的体积和液体的密

度。归纳出浸在液体中的物体所受浮力的大小等于物体排开的液体所受重力的结论。

此外，我们还要学习科学的观察和实验方法。凡事都要问个“为什么”，对自己的想法和一时还不能确定的问题，要设法“验证”一下。要尊重客观事实，实事求是。还要多看课外阅读材料，不断丰富和扩大我们的视野。

0.4 学习物理的要求

课本中每章末列出的“本章学习要求”是学习这一章物理的最基本要求。

对于要求“知道”的知识，应该能够说出它的要点、大意，或能够在有关现象中识别它们。对一些必须记住的物理常量、物理量单位和常用符号，用“记住”来表述。

对于要求“理解”的知识，要明了它的确切含义，并能应用它来分析、解释简单的物理现象或进行简单的计算。

对于要求“掌握”的知识，要能灵活地运用它来分析、解决简单的实际问题。

对于要求“初步学会”的实验技能，要能在教师指导下，根据实验目的，使用规定的器材，按规定的步骤进行实验。

对于要求“会”的实验技能，要在初步学会的基础上能独立地、比较熟练地进行实验。

1 牛顿第一定律

牛顿（1643~1727）是英国科学家，他在前人的科学实验的基础上归纳总结出有关运动和力的基本规律，提出了三条定律，我们称它为牛顿运动定律。牛顿运动定律是研究机械运动和进一步学习物理学的基础。

1.1 牛顿第一定律

【讨论】

列车在作水平匀速直线运动，车厢内有人竖直向上跳起（图 1-2），落下时是否仍在车厢原处？

实验 1.1

〔目的〕观察作匀速直线运动的小车中钢珠下落的运动。

〔器材〕装有电磁铁的机动小车、钢珠。

〔步骤〕1. 小车静止时，接通电路，使电磁铁吸住钢珠；断开电路，观察钢珠下落，掉在正下方的容器内（图 1-3）。

2. 使小车作匀速直线运动，重复上述步骤，观察钢珠是否仍落在容器内。

〔结果〕当小车作匀速直线运动时，钢珠落在车上的容器_____（内、外）。

我们在初中物理中已经知道，物体都具有保持原有运动状态的性质，物体的这种性质叫做惯性。实验 1.1 中小车作匀速直线运动时，钢珠和小车处于相同的运动状态。下落的钢珠由于惯性，在水平方向上具有与小车相同的速度，仍能落在容器内。

同样，车厢内竖直向上跳起的人，由于惯性，在水平方向上具有与列车相同的速度，落下时仍在车厢原处。

【思考】

1. 有一位旅游者想来中国观光。他设想将自己用吊篮悬挂在空中的大气球下面（图 1-4），只要在空中停留几小时，由于地球的自转，他就可到达中国。这种设想能实现吗？

2. 运动员跳远时，由于地球自转，向东跳与向西跳测得的成绩有无差别？

任何物体都具有惯性，物体的惯性是怎样发现的呢？

早在 2000 多年前，古希腊的哲学家亚里士多德（公元前 384~前 322）曾提出：一切运动物体终将归于静止，只有力的作用才能使物体维

持运动状态。这种看法由于得到封建教会的支持而一直被认为是正确的。直到 17 世纪意大利的物理学家伽利略（1564 ~ 1642）根据许多实验事实指出了他的错误。伽利略认为在水平面上运动的物体所以会趋于静止是由于受到摩擦阻力的缘故。他曾做了一系列的斜面实验，发现小球在斜面上以一定的速度开始向下运动，速度增加得很快；减小斜面的倾角，速度虽也在增加，但增加得较慢。于是他推测假如斜面是光滑的，倾角减小为零时，小球将保持原来的速度一直运动下去。正如他自己所描绘的：“设想沿平面无摩擦地射出一颗弹子，……只要这个平面无限大，这颗弹子将永远沿着平面均匀地运动着。”

当时，另一位科学家笛卡儿也通过实验总结出：“一个运动的物体如果不受其他物体的作用，它的运动就不会改变方向。”

牛顿接受并发展了伽利略等人的见解指出：“任何物体都保持静止或匀速直线运动的状态，直到有外力迫使它改变这种状态为止。”这一结论就是牛顿第一定律。

牛顿第一定律是以实验事实为基础，通过推理、想象而总结出来的关于物体不受外力作用时的运动规律。牛顿第一定律揭示了物体具有保持原有运动状态的性质，它还揭示了力是改变物体运动状态的原因，而不是维持物体运动的原因。

任何物体都与其他物体有相互作用，不受外力作用的物体是不存在的。我们看到的物体处于静止状态或作匀速直线运动都是受到平衡力作用的结果。例如，放在桌子上的书本是在竖直向下的重力和竖直向上的弹力的作用下保持静止状态的；跳伞运动员在降落过程中，同时受到重力 G 和空气阻力 f 的作用，当这两个力相互平衡时，跳伞运动员匀速向下运动（图 1-6）。

1.2 匀速直线运动的实验研究

在初中物理中我们已经知道，匀速直线运动是速度不变的运动。物体作匀速直线运动的速度大小等于路程与通过这段路程所需时间的比。怎样判定物体是在作匀速直线运动呢？怎样测定匀速直线运动的速度呢？让我们通过实验来研究。

实验 1.2

〔目的〕

1. 判定匀速直线运动。
2. 测定匀速直线运动的速度。

〔器材〕500mL 的量筒、蓖麻油、钢珠、刻度尺、节拍器。

节拍器(图 1-7)是一种计时工具。它所发出的每两个相邻节拍声之间的时间是一定的,时间的长短可以通过改变摆锤在摆杆上的位置来调节。摆杆上刻有 40~208 的标度,如把摆锤移动到 120 的标度上,摆每分钟就摆动 120 次,每两个相邻节拍声之间的时间为 0.5s。

〔步骤〕

1. 调节节拍器摆锤的位置,使它发出每分钟 60 次的节拍声。
2. 把钢珠由静止开始下落到盛满蓖麻油的量筒中(图 1-8)。待钢珠进入油面后,每次听到节拍声时,把钢珠的位置记录下来。
3. 用刻度尺测量相邻节拍声之间钢珠通过的路程。
4. 确定钢珠开始作匀速直线运动的位置。
5. 计算钢珠作匀速直线运动的速度。〔结果〕
6. 重复实验两次。

〔结果〕

1. 钢珠从量筒壁上的刻度_____处开始作匀速直线运动。
2. 钢珠作匀速直线运动的速度为_____m/s。

【思考】

你是怎样知道钢珠是在作匀速直线运动的?

实验 1.3 练习使用打点计时器

〔目的〕

1. 初步学会使用打点计时器。
2. 用打点计时器研究匀速直线运动。

〔器材〕长木板、小车、纸带、打点计时器、复写纸片、导线两根、低压交流电源、刻度尺。

打点计时器是一种计时仪器。它使用的是电压为 6V、频率为 50Hz 的交流电源,每隔 0.02s 打点一次。打点计时器的构造如图 1-9 所示。通电以前,先将纸带穿过限位孔,再把套在定位轴上的圆形复写纸片压在纸带上。接通电源,振针就跟着振片上下振动,在运动的纸带上打出一系列的点。

由于打点计时器打点的时间间隔是 0.02s,因此打在纸带上一系列的点,记录了纸带运动的时间。当纸带跟运动物体连接在一起时,纸带上的点也就相应地表示运动物体在不同时刻的位置,从而可以得出运动物体的时间与路程的关系。

〔步骤〕

1. 把打点计时器固定在长木板的一端,纸带穿过限位孔,复写纸片套在定位轴上并压住纸带,接上 6V 交流电源。
2. 把长木板放置在桌面上,一端垫垫片(图 1-10),使小车沿长木

板的运动尽可能接近匀速直线运动。然后把小车靠近打点计时器并夹上纸带。

3. 接通电源，让小车沿长木板运动，打点计时器就在纸带上打下一系列间隔均匀的点。

4. 取下纸带，用刻度尺测量从不同点起，相同点数间的距离三次[图 1-11 (a)]；从同一点起，不同点数间的距离三次[图 1-11 (b)]。

〔结果〕打点计时器检验的结果表明做匀速直线运动物体的特征是

物体运动速度的大小差别很大。速度最大的是真空中的光速 $c=3 \times 10^8 \text{m/s}$ 。我国自行设计和制造的 F-8 型喷气式飞机（图 1-12），它的速度可达声速的 2.2 倍。通常自行车的速度是 5m/s ，但在竞赛时速度要大得多。例如在第十一届亚洲运动会上，我国运动员创造的女子自行车（km）世界纪录是 $1 \text{min} 13.899 \text{s}$ ，速度的大小约 13.5m/s 。有些物体的运动速度很小，小得难以觉察，例如我国的珠穆朗玛峰平均每年上升 3mm 。

1.3 匀速直线运动的图象

1.3.1 匀速直线运动的路程-时间图象

描述物体运动的规律可以用数学式，也可以用图象。

选择一个平面直角坐标系，以横轴表示时间 t ，纵轴表示路程 s 。把运动物体在各段时间的路程用描点法作在图上，然后用光滑的线将各点连接起来。这种表示路程与时间关系的图象叫做运动物体的路程-时间图象，简称 $s-t$ 图象。

物体作匀速直线运动时，由于路程与时间成正比，因此匀速直线运动的路程-时间图象是一条通过原点的直线（图 1-13）。

〔例题〕某人用停表测得小车在两次运动过程中路程与相应时间的数据，记录在下列表格中。

时间 t (s)		0	5	10	15	20	25
路程 s (m)	第一次	0	1.8	3.6	5.8	7.2	8.5
	第二次	0	1.2	2.5	3.5	4.6	5.9

试根据这些数据作出小车的 $s-t$ 图象，并根据图象回答以下几个问题。

- (1) 小车所作的两次运动是什么性质的运动？为什么？
- (2) 根据图象算出小车第一、二次运动的速度各为多少？

(3) 在 $s-t$ 图象上, 直线的倾角与物体运动的速度有什么关系?

(4) 在图 1-14 中找出小车在第二次运动过程中从开始起经过 4s 所通过的路程是多少? 第 4s 内通过路程是多少? 4s 末小车的位置在哪里?

解 根据第一次测得的数据, 将坐标为 (5, 1.8)、(10, 3.6)、(15, 5.8)、(20, 7.2)、(25, 8.5) 等五个点画在图上, 作出直线甲, 这些点几乎都在这条直线上。同样根据第二次测得的数据在图上画出五个点, 作出直线乙, 这些点几乎都在这条直线上。从图上可以看出, 直线甲、乙都通过原点。图上有的点偏离了直线, 这显然是测量的误差造成的 (图 1-14)。

(1) 小车两次都作_____运动。

(2) 小车第一次运动的速度为_____ ; 第二次运动的速度为_____。

(3) 在 $s-t$ 图象中, 直线的倾角越大, 物体运动的速度越_____。

(4) 小车第二次运动从开始起经过 20s 所通过的路程为_____ ; 第三个 5s 内通过的路程为_____ ; 20s 末小车的位置离出发点_____处。

1.3.2 匀速直线运动的速度-时间图象

匀速直线运动的速度和时间的关系也可以用图象来描述。选择一个平面直角坐标系, 以横轴表示时间 t , 纵轴表示速度 v 。这种描述速度与时间关系的图象叫做速度-时间图象, 简称 $v-t$ 图象。在匀速直线运动中, 由于任何时刻的速度都是相同的, 因此速度与时间关系的图象是一条平行于 t 轴的直线 (图 1-15)。

【练习】

试在图 1-16 中分别画出速度 $v=5\text{m/s}$ 和速度 $v=8\text{m/s}$ 的两个做匀速直线运动物体的 $v-t$ 图象。

根据运动物体的 $v-t$ 图象, 还可以求出物体在任何时间内所通过的路程。在时间 t 内, 速度为 v , 它的路程 s 就可以用如图 1-17 所示的速度图线下方画有斜线的矩形面积来表示。因为这块矩形的长为时间 t , 宽为速度 v , 所以此矩形面积 vt 表示物体在时间 t 内的路程 s 。

本章学习要求

1. 理解牛顿第一定律。
2. 理解惯性。
3. 理解匀速直线运动, 会判定匀速直线运动。
4. 会用打点计时器。

5. 知道匀速直线运动的 $s-t$ 图象和 $v-t$ 图象。

2 物体运动状态的改变

我们已经知道，地球和其他行星都在环绕太阳运动，而整个太阳系和其他星系也在按一定的规律运动着。由于自然界里的一切物体都在运动，要研究物体的运动必须选定一个物体作参照物来研究其他物体的运动。对于同一个物体的运动，如果选用不同的参照物来描述，结果就可能完全不同。通常我们是以地面为参照物的。

在自然界里，多数物体的运动状态在不断改变，也就是说，多数物体运动的速度是变化的。这种速度不断变化的运动叫做变速运动。如果变速运动的路径是直线，就叫做变速直线运动。

2.1 位移和速度

研究变速直线运动，首先要研究物体位置的变动和位置变动快慢的规律。比较下面两个问题有什么不同：

(1) 某人由 A 处出发，沿直线运动 1km，问他将到达哪里(图 2-1)？

(2) 某旅游车由上海出发到达距离上海正西方 92km 的地点，试利用地图(图 2-2)，找出这个地点的名字。

由此可见，描述物体位置变动，只指明变动的距离，不指明方向就不能确定运动物体变动后的位置。

位移就是用来描述运动物体位置变动的物理量。位移的大小表示物体运动起点与终点间的距离，位移的方向就是物体运动起点指向终点的方向。这种既有大小又有方向的物理量叫做矢量。位移和其他矢量一样可以用带箭头的线段形象地表示出来。线段的长度表示矢量的大小，箭头所指的方向就是矢量的方向。如图 2-3 所示的位移，大小为 4km，方向正东。

像长度、时间等，只有大小，没有方向的物理量叫做标量。

路程是标量，它是物体实际经过的路径的长度。路程不一定等于位移的大小，只有在运动方向不变的直线运动中，路程才与位移的大小相等。

严格说来，速度是描述物体位置变动快慢的物理量。因此，速度等于位移与发生这一位移所用时间的比，即

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

式中 s 表示位移， t 表示时间。速度也是矢量，它既有大小又有方向。在直线运动中速度的方向就是物体位移的方向。

运用上述公式可以算出匀速直线运动的速度。如果用路程除以相应的时间，只能算出匀速直线运动的速度大小(速率)，不能确定速度的方向。

作变速直线运动的物体，在相等的时间内位移不一定相等，因此没有恒定的速度。怎样描述作变速直线运动物体位置变动的快慢情况呢？

假设在公路上作变速直线运动的长途汽车 30min 内的位移为 20km。如果把长途汽车在这段时间内的运动当作匀速直线运动，于是，汽车的速度

$$v = \frac{s}{t} = \frac{20000}{1800} \text{ m/s} = 11.1 \text{ m/s}。$$

这个速度就可以用来描述长途汽车在这段时间内位置变动快慢的大致情况。

我们把变速直线运动中物体的位移与发生这段位移所用时间的比叫做物体在这段时间内或这段位移中的平均速度，即

$$v = \frac{s}{t}，$$

式中 s 表示位移， t 表示时间， v 表示平均速度。

实验 2.1

〔目的〕

1. 用打点计时器确定小车沿斜面向下运动的性质。
2. 测定小车沿斜面向下运动各段位移的平均速度。

〔器材〕

斜面、小车、打点计时器、纸带、复写纸片、刻度尺、低压交流电源。

〔步骤〕

1. 先将接好导线、穿好纸带的打点计时器固定在斜面上端，并将纸带与靠近打点计时器的小车相连接（图 2-4）

2. 调整斜面的倾角，接通电源，使打点计时器开始工作；同时让小车沿斜面向下运动，打点计时器就在纸带上打出一系列的点。

3. 取下纸带，舍去开头的较密集的点，在后面便于测量的地方找一个起始点，把每打五次点的时间作为时间单位，即 $T=0.02 \times 5s=0.1s$ 。在选好的起始点上标以“0”，往后每数到第五个点上依次标以 1, 2, 3, …。设相邻记数点间的位移依次为 s_1 , s_2 , s_3 , …，如图 2-5 所示。

4. 测出位移 s_1 , s_2 , s_3 , …，确定小车沿斜面向下运动的性质。

5. 利用公式 $\bar{v} = \frac{s}{t}$ ，依次算出各段位移的平均速度。

〔结果〕纸带上各相邻记数点间的位移大小_____（均匀、不均匀），这表明小车沿斜面向下的运动是_____。

各段位移的平均速度依次为_____。

【练习 2.1】

某人骑自行车在水平公路上作变速直线运动。他在前 10min 内的位移为 2400m，中间和后 10min 内的位移依次为 3000m 和 1400m。求：

- (1) 自行车在前 10min 内的平均速度。
- (2) 自行车在前 20min 内的平均速度。
- (3) 自行车在后 20min 内的平均速度。
- (4) 自行车在整个 30min 内的平均速度。

解

$t_1=10\text{min}=600\text{s}$ 内， $s_1=2400\text{m}$ ；

$t_2=10\text{min}=600\text{s}$ 内， $s_2=3000\text{m}$ ；

$t_3=10\text{min}=600\text{s}$ 内， $s_3=1400\text{m}$ 。

- (1) 自行车在前 10min 内的平均速度：

$$\bar{v}_1 = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ m/s} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ m/s}_0$$

- (2) 自行车在前 20min 内的平均速度：

$$\bar{v}_2 = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ m/s} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ m/s}_0$$

- (3) 自行车在后 20min 内的平均速度：

$$\bar{v}_3 = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ m/s} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ m/s}_0$$

- (4) 自行车在整个 30min 内的平均速度：

$$\bar{v} = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ m/s} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ m/s}_0$$

在变速直线运动中，各段时间内的平均速度并不相同。

2.2 瞬时速度

平均速度只能描述作变速直线运动物体在某一段时间内位置变动快慢的大致情况，怎样才能测定运动物体在某一时刻的速度呢？

运动物体在某一时刻或某一位置运动的快慢用瞬时速度来描述。如果一辆汽车在作变速直线运动过程中经过某一位置时的瞬时速度为 36km/h，这就是说，这辆汽车经过这点时运动的快慢与一辆以 36km/h 速度作匀速直线运动的汽车运动的快慢一样。驾驶员坐位前的仪表板上装有速度计（图 2-6）。速度计上指针的位置随车速的变化而改变。如果速度计的读数为 40km/h，表明这时汽车的瞬时速度的大小为 40km/h。

瞬时速度简称速度。平时我们所说的子弹出膛速度、跳伞运动员的着地速度、喷气式飞机的着陆速度[图 2-7(a)、(b)]等等都是指瞬时速度。

由于变速直线运动的速度是随着时间不断变化的，有时变化比较复杂，下面我们就来研究最简单的变速直线运动。

【练习 2.2】

某人用实验方法测得小车从斜面上端向下运动过程中的一系列瞬时速度的数据，如下表所示。你能根据这些数据在图 2-8 中作出 $v-t$ 图象吗？

时间 t (s)	0	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00
速度 v (m/s)	0.20	0.39	0.60	0.82	1.00	1.20

解从图象中可以看出，小车在斜面上的运动速度与时间的关系是一条直线。这表明小车速度的变化是均匀的。并从图象中可以读出：

(1) 小车的速度在时间 $0 \sim 0.8\text{s}$ 内由_____m/s 增大到_____m/s。

(2) 小车每经过 0.4s ，速度增大_____m/s；每经过 0.2s ，速度增大_____m/s；每经过 0.1s ，速度增大_____m/s。小车每经过 1s ，速度增大_____m/s。

从上面的练习中可以看出：这辆小车在沿斜面向下运动过程中，每经过单位时间速度的增量是相等的。像这种在相等的时间内速度的变化都相等的直线运动就叫做匀变速直线运动。匀变速直线运动的 $v-t$ 图象是一条直线。

匀变速直线运动是最简单的变速直线运动。例如车辆在起动和制动过程中的运动、枪弹出膛前的运动、石块的上升和下落运动都可以近似地看作匀变速直线运动。

2.3 匀变速直线运动的加速度

图 2-9 表示一列火车起动出站；图 2-10 表示一辆汽车紧急刹车。你认为哪个物体运动速度变化较快？

【练习 2.3】

汽车在平直的公路上行驶， 5s 内速度由 15m/s 均匀地增大到 20m/s 。东方航空公司的一架客机沿某一方向飞行， 20s 内速度由 200m/s 均匀地增大到 210m/s 。算算哪个物体速度变化大些？哪个物体速度变化快些？

解通过计算，_____的速度变化大些，_____的速度变化快些。可见，物体运动速度变化的快慢和速度变化的大小具有不同的含义。

为了计算物体运动速度变化的快慢，通常总是先求出速度变化的大小 $v_t - v_0$ (式中 v_0 是初速， v_t 是末速)，然后算出速度变化的大小与发生这一速度变化的时间 t 的比 $(v_t - v_0) / t$ ，这个比值就表示物体运动速度变化的快慢。描述物体运动速度变化快慢的物理量叫做加速度，通常用符号 a 表示。因此匀变速直线运动的加速度公式可以表示为

$$a = \frac{v_t - v_0}{t}。$$

在国际单位制中，加速度的单位名称是“米每二次方秒”，单位符号是

“ m/s^2 ”。例如世界著名短跑运动员起跑（图 2-11）的加速度可达 $5.6m/s^2$ 。加速度也是矢量，它既有大小，又有方向。在速度方向不变的直线运动中，通常以初速方向为正方向。如果速度由小变大（ $v_t > v_0$ ），加速度方向与速度方向相同，则加速度取正值（ $a > 0$ ）；如果速度由大变小（ $v_t < v_0$ ），加速度方向与速度方向相反，则加速度取负值（ $a < 0$ ）。

图 2-9 中的火车，出站时车速从 $v_0=0$ 增加到一定的 v_t （ $v_t > 0$ ），所以火车的加速度 $a > 0$ ；图 2-10 中的汽车，原来的速度 $v_0 > 0$ ，经过很短时间后 $v_t=0$ ，可见汽车的加速度 $a < 0$ 。

【讨论】

物体运动的速度很大，它的加速度一定很大吗？

物体运动的加速度为零，速度一定为零吗？

【例题 2.1】步枪子弹的出膛速度为 $900m/s$ ，设子弹在枪管里的加速时间为 $0.001s$ ，求步枪子弹在枪管里的加速度。

解 已知子弹的初速 $v_0=0$ ，末速 $v_t=900m/s$ ，加速时间 $t=0.001s$ 。

子弹在枪管里的加速度

$$a = \frac{v_t - v_0}{t} = \frac{900 - 0}{0.001} m/s^2 = 9 \times 10^5 m/s^2。$$

加速度为正值，表示加速度的方向与速度方向一致。

2.4 匀变速直线运动的规律

2.4.1 匀变速直线运动的速度

【练习 2.4】

列车从初速 $v_0=1m/s$ 开始作匀变速直线运动，已知加速度 $a=0.2m/s^2$ ，那么列车的速度每秒增加多少？列车在 t 秒末的速度又是多少？

解列车的速度每秒增加_____m/s；

列车第 1s 末的速度 $v_1=_____m/s + _____m/s$

$$=v_0+_____a$$

列车第 2s 末的速度 $v_2=_____m/s + _____m/s$

$$=v_0+_____a$$

列车第 3s 末的速度 $v_3=_____m/s + _____0m/s$

$$=v_0+_____a$$

.....

由上可知，在初速为 v_0 、加速度为 a 的匀变速直线运动中，运动物体在 t 秒末的速度

$$v_t=v_0+at$$

这就是匀变速直线运动的速度公式。

从上述公式可以看出：如果加速度为正值（ $a > 0$ ），那么末速大于

初速 ($v_t > v_0$)，物体作匀加速直线运动；如果加速度为负值 ($a < 0$)，那么末速小于初速 ($v_t < v_0$)，物体作匀减速直线运动；如果加速度为零 ($a=0$)，那么速度保持不变 ($v_t=v_0$)，物体作匀速直线运动。初速不为零的匀变速直线运动的 $v-t$ 图象是一条不通过原点的直线，图 2-12 表示加速度 $a > 0$ 的情况。

对于初速为零的匀变速直线运动，它的速度公式为

$$v_t=at。$$

初速为零的匀变速直线运动的速度是与时间成正比的因此它的 $v-t$ 图象是一条通过原点的直线 (图 2-13)。

2.4.2 匀变速直线运动的位移

匀变速直线运动的位移公式，可以从它的 $v-t$ 图象上推导出来。

仿照从 $v-t$ 图象上计算匀速直线运动位移的方法匀变速直线运动的位移可以用图 2-14 所示的速度图线下方画有斜线的面积表示。这块面积是一个梯形，它等于一个矩形与一个直角三角形面积的和。

由于矩形面积为 v_0t ，直角三角形面积为 $\frac{1}{2}at^2$ ，因此匀变速直线运

动的位移公式可表示为

$$s = v_0t + \frac{1}{2}at^2。$$

初速 $v_0=0$ 的匀变速直线运动的位移公式为

$$s = \frac{1}{2}at^2。$$

可见，初速为零的匀变速直线运动的位移大小是跟时间的平方成正比的。

[例题 2.2] 原来以 8m/s 的速度，沿平直公路行驶的汽车，由于司机加大油门而获得 0.3m/s^2 的加速度。求从加大油门后 5s 末汽车的速度和 5s 内汽车的位移。

解 已知汽车的初速 $v_0=8\text{m/s}$ ，加速度 $a=0.3\text{m/s}^2$ ，汽车在 5s 末的速度

$$v_t=v_0 + at = (8+0.3 \times 5) \text{m/s}=9.5\text{m/s}，$$

方向与初速方向相同。

汽车 5s 内的位移

$$\begin{aligned} s &= v_0t + \frac{1}{2}at^2 \\ &= (8 \times 5 + \frac{1}{2} \times 0.3 \times 5^2) \text{m} = 44\text{m}。 \end{aligned}$$

[例题 2.3] 被欧洲人誉为“亚洲明星”的中国制造的超音速 FT - 7 型教练机，在主跑道上以 36km/h 的初速匀加速滑行 1000m 后，速度增大

到 324km/h 离地起飞。求教练机在主跑道上滑行时的加速度。

〔分析〕已知教练机的滑行全过程是匀加速直线运动。可以列出

$$v_t = v_0 + at ,$$
$$s = v_0 t + \frac{1}{2} at^2 .$$

从上面的两个公式中消去 t , 就能推导出加速度的计算式。

由速度公式可以列出

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

代入位移公式得

$$s = \frac{v_0(v_t - v_0)}{a} + \frac{a(v_t - v_0)^2}{2a^2}$$
$$= \frac{2v_0(v_t - v_0) + (v_t^2 - 2v_t v_0 + v_0^2)}{2a} ,$$

化简后可得滑行加速度

$$a = \frac{v_t^2 - v_0^2}{2s} .$$

解 已知 $s=1000\text{m}$,

$$v_0=36\text{km/h}=10\text{m/s} ,$$

$$v_t=324\text{km/h}=90\text{m/s} ,$$

教练机的滑行加速度

$$a = \frac{v_t^2 - v_0^2}{2s}$$
$$= \frac{90^2 - 10^2}{2000} \text{m/s}^2 = 4\text{m/s}^2 .$$

$v_t^2=v_0^2 + 2as$ 直接表明了匀变速直线运动过程中末速、初速和加速度、位移之间的关系。在实际问题中运动时间 t 为未知时用起来较为方便。

〔例题 2 . 4〕以 20m/s 行驶的列车制动后的加速度是 -0.2m/s^2 ,

- (1) 制动后经过几秒列车才能停止 ?
- (2) 列车从开始制动到停止的位移是多少 ?
- (3) 作出列车的 $v-t$ 图象, 并从图象中求出 25s 末列车的速度。

解 列车制动后所作的运动是匀减速直线运动。

已知 $v_0=20\text{m/s}$, $v_t=0$, $a=-0.2\text{m/s}^2$ 。

(1) 由匀变速直线运动的速度公式 $v_t=v_0 + at$, 可得

列车从制动到停止所需的时间

$$t = \frac{v_t - v_0}{a} = \frac{0 - 20}{-0.2} \text{s} = 100\text{s} .$$

(2) 列车从制动到停止的位移

$$\begin{aligned}
 s &= v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \\
 &= [20 \times 100 + \frac{1}{2} \times (-0.2) \times 100^2] \text{m} \\
 &= 1000 \text{m}_0
 \end{aligned}$$

(3) 列车作匀减速直线运动的 $v-t$ 图象如图 2-15 所示。速度图线向下倾斜，表明速度随时间而减小。从图象上可知 25s 末列车的速度为 15m/s。

在研究物体的运动时，有时为了使问题简化，可以不考虑它们的形状和大小。例如在上述例题中的汽车、飞机和列车都没有考虑这些因素。这就是说可以用一个有质量的点来代替汽车、飞机或列车。用来代替物体的有质量的点叫做质点，质点是一种理想化的物理模型。一个物体是否可以抽象成质点还要根据具体情况来决定。如果运动物体上各点的运动情况都相同，那么它的任何一点的运动都可以代表整个物体的运动，在这种情况下，可以用质点来表示整个物体。又如在研究地球环绕太阳运动时，由于相对于地球与太阳间的距离，地球的形状和大小可以忽略不计，因此也可以把地球看作质点。但是在研究列车经过某一铁路桥需要多少时间的问题中，由于列车的长度不能忽略，因此列车就不能抽象成质点。

实验 2.2 测定匀变速直线运动的加速度

〔目的〕测定匀变速直线运动的加速度。

〔原理〕设小车作匀变速直线运动，在两个连续相等的时间 T 里的位移分别为 s_1 和 s_2 ， a 为加速度， v_0 、 v_1 依次为 s_1 和 s_2 的初速。则

$$s_1' = v_0 T + \frac{1}{2} a T^2,$$

$$s_2' = v_1 T + \frac{1}{2} a T^2,$$

因为

$$v_1 = v_0 + a T,$$

可得

$$s_2' - s_1' = a T^2,$$

即

$$a = \frac{s_2' - s_1'}{T^2} = \frac{\Delta s}{T^2}。$$

这样，只要测出 s_1 ， s_2 或 s (即 $s_2 - s_1$) 和 T 就可以求出加速度 a^* 。

〔器材〕打点计时器、纸带、复写纸片、低压交流电源、小车、细绳、刻度尺、放在水平桌面上的附有滑轮的长木板、导线两根、重物。

〔步骤〕

1. 把打点计时器固定在长木板的一边。
2. 将穿过打点计时器的纸带与小车相连接。
3. 将挂有重物的细绳跨过滑轮与小车相连接（图 2-16）。

4. 将打点计时器接上电源，让小车在水平长木板上自由运动；打点计时器同时开始工作，在纸带上打出一系列的点。

5. 取下纸带，舍去开头的较密集的点，在后面便于测量的地方找一个起始点，把每打五次点的时间作为时间单位，即 $T=0.02 \times 5s=0.1s$ 。在纸带上从第一点开始，每隔五点依次标上 0, 1, 2, 3, ...。设两个相邻计数点之间的距离分别是 s_1 , s_2 , s_3 , ...。

6. 测出位移 s_1 , s_2 , s_3 , ..., 算出两相邻位移之差 $s_1=s_2 - s_1$, $s_2=s_3 - s_2$, $s_3=s_4 - s_3$, ...。

7. 利用公式 $a = \frac{\Delta s}{T^2}$, 算出加速度 a_1, a_2, a_3, \dots 的值。

8. 求出加速度 a_1, a_2, a_3, \dots 的平均值。它就是小车做匀加速直线运动的加速度。

2.5 自由落体运动规律的探究

2.5.1 自由落体运动

质量相同的纸片和纸团，从同一高度由静止开始下落，纸团先着地。如果没有空气，纸团仍能先着地吗？

现在先来观察不同物体在真空中下落的运动。

实验 2.3

取一根长约 1.5m，一端封闭，另一端装有开关的玻璃管（图 2-17）。把纸团、纸片（或羽毛）、金属片等放在玻璃管内。如果管内有空气，把玻璃管倒过来时，这些物体下落的快慢都不相同。如果把管内的空气抽去，再把玻璃管倒过来，观察这些物体下落的快慢情况。

〔结果〕只受重力作用的物体在同一高度由静止下落，总是同时落地的。

只受重力作用的物体由静止下落的运动叫做自由落体运动。如果空气阻力与物体所受的重力相比可以忽略不计，也可以看作是自由落体运动。

2.5.2 重力加速度

自由落体运动是初速为零的变速直线运动，那么它是不是匀变速直线运动呢？

实验 2.4

〔目的〕探究自由落体运动的性质。

〔器材〕打点计时器、纸带、复写纸片、导线两根、低压交流电源、重物、铁架台、铁夹子等。

〔步骤〕

1. 按图 2-18 所示的装置，将重物与穿过打点计时器的纸带相连接，用手提着纸带，使重物靠近打点计时器。

2. 接通电源，松开纸带，让重物自由下落，打点计时器就在纸带上打出一系列的点。

3. 取下纸带，在纸带上从第一个点开始每隔五个点依次标上 0, 1, 2, 3, ...。

4. 用刻度尺分别测定从 0 到 1、0 到 2、0 到 3、... 的位移 s_1, s_2, s_3, \dots 。

5. 测出两相邻时间的位移 s_1, s_2, s_3, \dots 和位移差 s_1, s_2, s_3, \dots 。

6. 利用公式 $a = \frac{\Delta s}{T^2}$ 算出加速度 a_1, a_2, a_3, \dots 的值。

7. 求出加速度的平均值。

〔结果〕精确实验表明： $s_1, s_2, s_3, \dots = \underline{\hspace{1cm}} \underline{\hspace{1cm}} \underline{\hspace{1cm}} \dots$ ，自由落体运动的位移与时间的 成正比。所以自由落体运动是初速为 的 运动。

从实验可以知道物体做自由落体运动的加速度是个恒量，这个恒量叫做重力加速度，用符号 g 表示，重力加速度的方向总是竖直向下的。

根据实验测定，重力加速度的大小在地球的不同地域是不同的。例如：

在纬度 45° 的海平面上 $g=9.80665\text{m/s}^2$ ；

在赤道 $g=9.780\text{m/s}^2$ ；在南极 $g=9.832\text{m/s}^2$ ；

在北京 $g=9.801\text{m/s}^2$ ；在上海 $g=9.794\text{m/s}^2$ 。

在通常的计算中 g 可以取作 9.8m/s^2 。

月球上的重力加速度大小约为地球上的 $\frac{1}{6}$ 。即 $g_{\text{月}} = 1.6\text{m/s}^2$ ，月球上自由落体运动的规律与地球上相同，只是加速度不同而已。

根据自由落体运动是初速为零、加速度为 g 的匀变速直线运动，可以列出自由落体运动的

$$\text{位移公式} \quad h = \frac{1}{2}gt^2,$$

$$\text{速度公式} \quad v = gt。$$

[例题 2.5] 石块从 19.6m 高处自由落下，求下落的时间。如果石块在月球上从同样高度自由落下，下落的时间又是多少？

解 已知 $h=19.6\text{m}$ ， $g=9.8\text{m/s}^2$ ， $g_{\text{月}}=1.6\text{m/s}^2$ ，

根据公式 $h = \frac{1}{2}gt^2$ 可以求出在地球上石块下落的时间

$$t_1 = \sqrt{\frac{2h}{g}} = \frac{\sqrt{2 \times 19.6}}{9.8} \text{s} = 2\text{s}_。$$

在月球上下落的时间

$$t_2 = \sqrt{\frac{2h}{g_{\text{月}}}} = \sqrt{\frac{2 \times 19.6}{1.6}} \text{s} = 4.9\text{s}_。$$

*[例题 2.6] 物体 1 从高度为 h_1 处自由下落，1s 后另一物体 2 从高度为 h_2 处自由下落。已知物体 1 下落 45m 时追上物体 2；再过 1s 后物体 1 落地。求物体 2 自由下落的落地时间。（ g 取 10m/s^2 ）

[分析] 由于物体 1 下落 45m 时追上物体 2，可见高度 $h_1 > h_2$ 。求物体 2 的落地时间，关键在于找出高度 h_2 。按题意可以作出示意简图，如图 2-19 所示。根据物体 1 下落 45m 所花时间为 3s（为什么？），可以推知物体 1 追上物体 2 时，物体 2 已下落 2s。

解根据示意简图可以列出

$$h_1 - h_2 + \frac{1}{2}g(2)^2 = 45\text{m},$$

即高度差 $h_1 - h_2 = (45 - 20)\text{m} = 25\text{m}_。$

而高度 $h_1 = \frac{1}{2}g(3+1)^2 = 80\text{m},$

可知高度 $h_2 = h_1 - 25\text{m} = 80\text{m} - 25\text{m} = 55\text{m},$

于是可以列出 $\frac{1}{2}gt^2 = 55\text{m},$

则物体 2 的下落时间

$$t = \sqrt{\frac{55 \times 2}{g}} \text{s} = \sqrt{11} \text{s} = 3.3\text{s}_。$$

关于自由落体的运动规律，早在 300 多年前伟大的意大利物理学家伽利略曾经深入地研究过。当时人们都把亚里士多德看作绝对权威。亚里士多德认为重的物体较轻的物体下落得快。伽利略曾多次对亚里士多德的观点提出疑问。他问道：如果把一个重物和一个轻物绑在一起，从

高处落下来，结果将如何呢？按照亚里士多德的观点，下落的时间可以是两个物体各自下落时间的平均数也可以是一个具有两个物体所受重力总和的物体从同一高度的下落时间，这两个结果显然是互相矛盾的。这就证明亚里士多德错了。

为了找出自由落体的实际情况，伽利略做了一个实验，来测量光滑的金属球沿着斜面下滑一定距离所需的时间。这是由于自由落体下落太快，没法直接观察，所以伽利略就“冲淡重力”，设计了斜面的方法，使金属球下落的速度可以测量。通过这样的实验，伽利略发现，一切物体，不论轻重都以同样的时间经过同样的下落距离，而且这个距离是跟下落时间的平方成正比的，即自由落体运动是匀加速直线运动。

本章学习要求

1. 知道质点。
2. 理解位移和路程的区别。
3. 知道矢量和标量。
4. 理解速度的概念，知道速度和速率的区别。
5. 理解变速直线运动的平均速度。会用打点计时器测变速直线运动的平均速度。
6. 知道瞬时速度。
7. 理解加速度的概念，会测定匀变速直线运动的加速度。
8. 掌握匀变速直线运动。
9. 知道匀变速直线运动的速度图象。
10. 知道伽利略对自由落体运动的研究。理解自由落体运动，知道重力加速度。

3 牛顿第三定律

用脚踢足球，足球因受力而改变运动状态；下落的物体受到地球的引力会越落越快。这表明：力是使物体的运动状态发生变化的原因。然而力的作用总是相互的。

本章主要研究力学中常见的重力、弹力、摩擦力以及阐明力的相互作用的牛顿第三定律。

3.1 物体间的相互作用

通过初中物理的学习，我们已经知道力是物体对物体的作用。有受力物体，就必有施力物体。力是不能脱离物体而独立存在的。

实验 3.1

把一台玩具小电风扇放在平板小车上（图 3-1），当叶片转动时，观察风扇的运动情况。

实验 3.2

支架上悬挂着大小相同的铁球 A 和木球 B，将木球 B 向右拉开，使它偏离原来的位置（图 3-2），释放后两球发生撞击，当铁球 A 被撞击向左运动时，观察木球 B 如何运动。

〔结果〕在铁球 A 向左运动的同时，木球 B_____。

从实验可以发现，在甲物体对乙物体作用一个力的同时，乙物体必然也有一个力作用于甲物体。因此，力不可能单独存在，总是成对出现的。如果把物体间相互作用中的一个力叫做作用力，那么另一个力就叫做这个力的反作用力。例如，在实验 3.1 中，如果把叶片推空气的力叫做作用力，那么，空气推叶片的力就叫做它的反作用力。在实验 3.2 中铁球 A 受到木球 B 的作用力而向左运动的同时，木球 B 也受到铁球 A 的反作用力而向右后退。由此可见，作用力和反作用力的方向总是相反的，它们分别作用在两个物体上。

实验 3.3

将动力模型小船放在水中，让船尾下端的螺旋桨转动起来，解释所观察到的现象。

力与速度、加速度一样，也是矢量。它既有大小，又有方向，通常

用符号 F 表示。国际单位制中力的单位名称是牛[顿]，单位符号是 N 。

力可以用带箭头的线段来表示，线段的长短表示力的大小，箭头的指向表示力的方向，箭尾通常画在力的作用点上，这种表示力的方法叫做力的图示。例如在图 3-3 中用 5mm 长的线段表示 200N 的力，那么这辆小车受到的拉力 F 是多大？

地球上的一切物体都受到地球的吸引，物体受到的重力就是由于地球的吸引而引起的。重力的方向总是竖直向下的。

除重力外，我们在力学中经常遇到的力还有弹力和摩擦力。

3.2 弹力

3.2.1 物体的形变

用力拉弹簧会使弹簧伸长，用力压木板，木板会弯曲，这些都表明力能使物体的形状发生改变。通常把物体的形状或体积的改变叫做形变。

拉力器的弹簧是在双手的拉动下发生伸长形变（图 3-4）。这时双手所用的拉力大小相等、方向相反。放置在两个支架上的木板，在它的上面放一重物，木板在三个力共同作用下发生弯曲形变（图 3-5）。

运动员站在跳板上，跳板发生了形变（图 3-6）。那么运动员站在跳台上，跳台会发生形变吗（图 3-7）？

实验 3.4

把氦氖激光器放在讲台上，让激光束射在教室的墙上，用手轻轻挤压讲台桌面，观察墙上光点的位置有无变化。

〔结果〕墙上光点的位置_____。

任何物体在力的作用下都要发生形变。弹簧、跳板等的形变比较明显，而有些物体的形变很微小，实验 3.4 中讲台桌面的微小形变是借助仪器后才被观察到的。

上述几个实验中，当作用力撤去后，弹簧、木板、跳板等都能恢复原状，物体的这种在外力撤去后能恢复原状的性质叫做弹性，这种形变叫做弹性形变。实验还表明，物体都有弹性限度，当外力超过物体的弹性限度，即使撤去外力，物体也不再恢复原状。物体的这种在形变后不能恢复原状的性质叫做范性，这种形变叫做范性形变。任何物体都具有弹性和范性。在弹性限度以内，物体表现为弹性，超出了弹性限度，物体就主要表现为范性了。

3.2.2 弹力

实验 3.5

用手轻轻挤压或拉伸弹簧，感受弹簧对手的作用。

〔结果〕弹簧因反抗形变而对挤压或拉伸它的手____（有、没有）力的作用。在弹簧恢复原状后，对手____（有、没有）力的作用。

发生弹性形变的物体因要恢复原状而对使它形变的物体施加的力，叫做弹力。弹力的方向总是跟物体形变的方向相反，且与接触面垂直。

【讨论】

1. 挂在弹簧下端的物体为什么能处于静止状态（图 3-8）？
2. 该物体受到哪些力的作用，这些力的施力体各是什么？这些力的反作用力分别作用在什么物体上？

实验 3.6

〔目的〕探究弹簧的伸长与弹力间的关系。

〔器材〕螺旋弹簧、刻度尺、钩码、支架。

〔步骤〕

1. 把螺旋弹簧的一端固定在支架上，用刻度尺测出弹簧的原长 L_0 [图 3-9 (a)]。
2. 在弹簧的另一端挂上一个钩码，用刻度尺测出弹簧的长度 L_1 [图 3-9 (b)]，静止时弹簧弹力的大小就等于钩码的重力。
3. 再添加一个钩码，测出弹簧的长度 L_2 。
4. 撤去钩码后，观察弹簧是否恢复到原长。

〔分析〕根据实验记录，弹力的大小与弹簧伸长的比值是个恒量。

精确实验表明：在弹性限度内，弹簧的弹力是跟它的形变量即伸长量或压缩量成正比的。这一规律叫做胡克定律，用公式表示为

$$F = -kx,$$

式中 F 为弹簧的弹力， x 为弹簧的形变量，比例常数 k 叫做物体的劲度 [系数]。弹簧的劲度决定于弹簧丝的粗细、长度、圈数和材料。式中的“-”号表示弹力 F 的方向与弹簧伸长或压缩的方向相反。

弹簧测力计就是根据这一原理制成的。

3.2.3 压力和拉力

大家都知道，放在地面上的物体对地面有压力；用手拉绳索，手对绳索有一个拉力，像这种压力和拉力究竟是一种什么性质的力呢？

实验 3.7

用手挤压两个一端相接触的弹簧 A、B (图 3-10)，观察弹簧 A、B 是否发生形变。判断 A、B 两弹簧的接触面间是否存在力的作用。

同样，用手挤压两个相接触的木块 C、D (图 3-11)，判断木块 C、D 的接触面间是否存在力的作用。

〔结果〕双手挤压弹簧 A、B 时，弹簧 A、B 都_____ (发生、未发生) 形变，因此在弹簧 A、B 的接触面间_____ (存在、不存在) 力的作用。

同样，双手挤压木块 C、D 时，可以判断出木块 C、D 都_____ (发生、未发生) 形变，因此在木块 C、D 的接触面间_____ (存在、不存在) 力的作用。

弹簧的形变是很明显的，而木块所发生的形变却不容易觉察到。由此可见，物体接触面之间的压力是由于形变引起的，它们都属于弹力的性质，而且它们的方向都是与接触面垂直的。

静止在水平桌面上的木块与桌面间的压力也属于弹力的性质 [图 3-12 (a)]。发生形变的桌面对木块有一个向上的压力 F ，当压力 F 与重力 G 相互平衡时，木块保持静止 [图 3-12 (b)]。木块受压力 F 作用也发生形变，因此木块对桌面也有一个向下的压力 F 。很明显，压力 F 和压力 F 是木块和桌面间的相互作用，它们是作用力与反作用力的关系，如图 3-12 (c) 所示。

悬挂在绳端的物体和绳之间的拉力也属于弹力的性质 [图 3-13 (a)]。被拉紧了的绳子产生一个向上的拉力 F 作用在物体上 [图 3-13 (b)]，方向向上，即绳的收缩方向；而发生形变的物体也产生一个向下的拉力 F 作用在绳子上 [图 3-13 (c)]，因此，拉力 F 、 F 也是作用力与反作用力的关系。

3.3 摩擦力

3.3.1 滑动摩擦力

在水平地面上滑动的金属块为什么会停下来？

这是因为它在水平地面上滑动时受到地面对它的阻力 f ，像这种在滑动接触面间阻碍物体滑动的力叫做滑动摩擦力。

要维持金属块匀速滑动，必须施加外力 F ，力 F 和 f 的大小相等、方向相反 (图 3-14)，由于这一对平衡力的作用，金属块才能保持水平方向的匀速滑动。

滑动摩擦力的大小跟哪些因素有关呢？

实验 3.8

〔目的〕探究滑动摩擦力与哪些因素有关。

〔器材〕平板桥式标尺架、螺旋弹簧、标尺（附游标）、滑轮、细线、活动抽板、木块、砝码。

〔步骤〕

1. 如图 3-15 所示，将木块平放在平板的活动抽板上，木块一端通过细线经滑轮与弹簧的下端相连接，使弹簧处于不受力状态，并使标尺上的游标放在起始位置上。

2. 匀速拖动抽板，木块随之运动，移动一段距离，使木块与抽板间刚好发生相对运动时，记下弹簧被拉下时游标所处的位置。

3. 将木块侧面放置在平板的抽板上，重复步骤 1、2，记下游标所处的位置。

4. 同步骤 1，并在木块上加 100g 的砝码以增大正压力。

5. 重复步骤 2，记下游标所处的位置。

6. 在木块上再放上 100g 的砝码以增大正压力，重复步骤 2，观察游标位置有什么变化。

7. 将木块上粗糙的一面放置在木板的抽板上，重复步骤 1、2，及 4、6，记下游标所处的位置。

〔结论〕比较各次游标的位置可以知道：在接触面间正压力一定的情况下，滑动摩擦力的大小与接触面的大小____（有、没有）关系；在接触面性质确定的情况下，滑动摩擦力的大小与接触面间的正压力____（有、没有）关系。

精确实验表明：在接触面性质确定的情况下，滑动摩擦力的大小与接触面间的正压力成正比，通常情况下，滑动摩擦力与接触面积的大小是无关的。滑动摩擦力的方向总是与物体间的相对运动的方向相反。用公式表示，则滑动摩擦力 f 为

$$f = \mu N,$$

式中的 N 为正压力， μ 叫做滑动摩擦系数，它表示摩擦力和正压力的比值，一般小于 1。

进一步的实验表明：滑动摩擦系数决定于两接触面的性质，包括接触面的材料和粗糙程度等。

表 3-1 几种材料间的滑动摩擦系数 μ

接触面的材料	滑动摩擦系数 μ
闸瓦——钢	0.4 ~ 0.6
木材——木材	0.2 ~ 0.4
皮革——钢	约 0.3
聚四氟乙烯——钢	0.1 ~ 0.2
钢——冰	0.01 ~ 0.02
玻璃——玻璃	0.4
钢——雪	约 0.03
钢——钢	0.1 ~ 0.25
气垫导轨	约 0.001

[例题 3.1] 重力为 500N 的物体在水平方向大小为 150N 的力作用下，沿水平地面匀速滑动，求滑动摩擦系数。如果在物体上加放重力为 50N 的几个砝码，使物体仍保持匀速直线运动，求所需水平方向的力的大小。

解 由于 $N=G=500\text{N}$ ， $f=F=150\text{N}$ ，滑动摩擦系数

$$\mu = \frac{f}{N} = \frac{150\text{N}}{500\text{N}} = 0.3。$$

放上砝码后，正压力增大，滑动摩擦系数仍为 0.3，水平方向的力 $F = f = \mu N = 0.3 \times (500 + 50) \text{N} = 165\text{N}$ 。

3.3.2 静摩擦力

放在地面上的箱子受到小孩的水平推力作用（图 3-16），但木箱却仍能保持静止状态，为什么？

从箱子处于静止状态可以推知，箱子在水平方向上除受到推力外，必然还受到一个与推力大小相等、方向相反的阻力，这个阻力就是地面对箱子的摩擦力。像这种发生在两个相对静止物体间的摩擦力叫做静摩擦力。静摩擦力的方向跟物体间相对运动趋势的方向相反。

有些物体间就是靠静摩擦力得以保持相对静止的，而泥石流、雪崩等现象都是由于静摩擦力不足所引起的。

实验 3.9

[目的] 研究静摩擦力。

[器材] 附有固定滑轮的长木板、木块、弹簧秤、细线、吊盘、砝码。

[步骤]

1. 用弹簧秤称出吊盘的重力，并记录在表 3.2 中。按照图 3-17 放置好器材，观察木块是否保持静止，如能保持静止状态，把此时木块所受静摩擦力的大小填在表上。

2. 逐渐从小到大在吊盘里添加砝码，分别在表 3.2 中记录木块保持静止时各次砝码的重力，直到木块开始滑动为止。

表 3.2

实验次序	拉力 F (N)	静摩擦力 f_s (N)
1		
2		
3		
4		
5		

〔结论〕木块所受的静摩擦力是随着细绳拉力的增大而增大的，它的方向和拉力的方向相反，大小和拉力相等。当拉力增大到某一数值时，木块开始滑动。

实验表明：静摩擦力有一个最大值，这个最大值叫做最大静摩擦力 f_m 。静摩擦力最大值可以认为是使物体开始运动的最小的力。

〔例题 3.2〕某工厂的生产流水线上，用水平放置的皮带传送装置传送工件，当工件随皮带作减速运动时，试分析工件受到的静摩擦力的方向。

〔分析〕当皮带作减速运动时，工件由于惯性企图保持原有的速度大小和方向，它相对于皮带有向前运动的趋势，因此这时工件受到的静摩擦力方向应跟速度方向相反。

实验 3.10

在水平桌面上放一块粗糙的泡沫塑料板，并在塑料板上放置一木块。当使塑料板水平缓缓起动的同时，观察木块的运动情况（图 3-18）。

〔结果〕塑料板被缓缓起动的同时，木块_____。

【讨论】

1. 当拉力作用在塑料板上时，是什么力使木块能跟着一起运动？
2. 在分析塑料板和木块受力情况时，哪两个力是一对平衡力，哪两个力是一对作用与反作用力？

3.4 牛顿第三定律

我们已经知道，物体间的作用力总是同时成对出现的。那么作用力

和反作用力有什么关系呢？

实验 3.11

〔目的〕探究作用力和反作用力的关系。

把两个弹簧秤 A、B 的挂钩连在一起，然后由甲、乙两位同学分别用手拉住这两个弹簧秤的另一端（图 3-19）。这时甲通过弹簧秤对乙的拉力 F 的大小可以从弹簧秤 B 上读出来，而乙通过弹簧秤对甲的拉力 F 的大小可以从弹簧秤 A 上读出来。观察这时两弹簧秤的读数。改变用力的大小，再观察两弹簧秤的读数。

让甲、乙两位同学分别站立在一辆平板小车上，重做图 3-19 的实验，观察两个弹簧秤的读数。

〔结果〕无论甲、乙两位同学如何改变他们的拉力，也不论他们处于静止或运动状态，两个弹簧秤的读数总是_____（相等、不相等）的。

力的这一性质是牛顿首先归纳总结出来的。他指出：物体之间的作用力和反作用力大小相等，方向相反，并且总是作用在一条直线上的，这就是牛顿第三定律。

〔例题 3.3〕粗糙地面上放着一木块，手通过绳子用水平拉力拉木块，木块静止不动 [图 3-20(a)]。分析这时在水平方向上有几对作用力与反作用力。

〔分析〕由于相互接触且发生形变的物体间必然存在着弹力作用，因此手对绳子的拉力 F_1 和绳子对手的拉力 F_1 是一对作用力与反作用力；绳子对木块的拉力 F_2 和木块对绳子的拉力 F_2 也是一对作用力与反作用力。

木块虽然处于静止状态，却具有运动趋势，可以推知它与地面间还存在着静摩擦力。因此地面对木块的静摩擦力 f 和木块对地面的静摩擦力 f 又是一对作用力与反作用力 [图 3-20(b)]。

根据牛顿第三定律可知，这三对作用力和反作用力都是大小相等，方向相反并且分别作用在两个物体上。

此外，从图 3-20(b) 上还可以看到：绳子的两端同时受到拉力 F_1 、 F_2 。而处于静止状态；木块同时受到拉力 F_2 和静摩擦力 f 而处于静止状态。力 F_1 和 F_2 是一对平衡力；当把物体看作是质点时， F_2 和 f 也是一对平衡力。

【讨论】

1. 通过以上学习你能总结出作用力与反作用力具有哪些性质吗？
2. 作用力和反作用力跟一对平衡力有哪些不同？
反作用力在日常生活和生产技术中应用十分广泛。运动员在跳高时

总用力蹬地面，就是要利用地面的反作用力将他向上弹起；农业灌溉用的自动喷水器（图 3-21），当水从弯管的喷嘴里喷射出来时，弯管在水的反作用力的推动下会自动旋转。火箭也是应用燃料燃烧时产生的喷射气流的反作用力使它急剧上升。软体动物乌贼在水中经过体侧的孔将水吸入鳃腔，然后用力把水挤出体外，乌贼就会向相反方向游去（图 3-22）。

本章学习要求

1. 理解力的概念，会用图示法表示力。
2. 知道重力。
3. 理解弹力产生的条件和弹力的方向。
4. 知道胡克定律，知道物体的弹性和范性。
5. 理解滑动摩擦力和滑动摩擦系数。
6. 知道静摩擦力和最大静摩擦力。
7. 理解牛顿第三定律。

4 牛顿第二定律

歼击机在战斗中需要加速追击敌机(图 4-1),赛车在起跑线上需要快速起动(图 4-2),自行车行驶中遇到红灯要紧急刹车等现象,都涉及到怎样使物体获得加速度的问题。因此研究物体产生加速度的原因,具有现实意义。

4.1 探究物体运动的加速度 跟哪些因素有关

【讨论】

(1) 用大小不同的力,去推动一辆停着的小型机动车,哪种情况机动车获得的加速度大些?

(2) 用大小相同的力,分别推动一辆摩托车和一辆自行车,哪辆车所获得的加速度大些?

分析上述问题可以知道,对于同一辆机动车,推力越大,所获得的加速度就越大;用大小相同的力,去推质量不同的摩托车和自行车,质量小的自行车,获得的加速度要大得多。这就表明:物体运动的加速度既与物体所受的力有关,还与物体本身的质量有关。

为了探究力、质量与加速度三个量之间的定量关系,我们可以先在物体质量一定的情况下,探究物体的加速度跟所受力之间的关系;再在物体受力一定的情况下,探究物体的加速度跟质量之间的关系。最后通过逻辑推理的方法,就可以得到加速度与力、质量之间的关系。这就是物理学中常用的控制变量的探究方法。

实验 4.1 研究力、质量和加速度三者之间的关系

〔目的〕

1. 探究在物体质量一定时,加速度与所受力之间的关系。
2. 探究在物体所受力一定时,加速度和质量之间的关系。

〔器材〕打点计时器、纸带及复写纸片、小车、一端附有定滑轮的较光滑的长木板、小桶、沙、细线、低压交流电源、导线、天平、刻度尺、砝码、弹簧秤。

〔原理〕在图 4-3 的实验装置中,研究的对象是小车。如果在小车上加放砝码,质量就是小车和砝码的总质量。把长木板搁置成斜面,调节其倾斜度,使小车沿斜面向下的运动尽可能接近匀速直线运动。用跨过定滑轮的细线把小车和装有沙的小桶连接起来。当沙桶的质量远小于小车的质量时,小车所受的拉力可以认为等于沙桶所受的重力。因此,

用弹簧秤称出沙桶的重力，就得到小车所受的拉力。小车后面拖一条穿过打点计时器的纸带，随着小车的运动，打点计时器在纸带上打下一系列的点，把小车的运动情况记录下来。根据公式

$$a = \frac{\Delta s}{T^2},$$

就能算出小车的加速度的值。

〔步骤〕

1. 将木板放置在桌面上，用垫片调节其倾斜度至小车恰能沿斜面作匀速直线运动为止。

2. 按图 4-3 把实验器材安装好。接通电源，使小车运动。打点计时器在纸带上打下一系列的点。

3. 根据公式 $a = \frac{\Delta s}{T^2}$ 算出小车的加速度。

4. 用天平称出小车的质量 m ，用弹簧秤称出沙桶的重力 F 。

5. 保持小车的质量不变，改变沙桶所受重力，再做几次实验，把数据记录在表中。

6. 根据实验所得的数据，推测加速度 a 与作用力 F 之间的关系，然后用图象法进行验证。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。然后用平滑的线把这些点连接起来（图 4-4）。

7. 保持沙桶的重力不变，改变小车的质量，重复上面的实验。

8. 根据实验所得的数据，推测加速度 a 与质量 m 之间的关系，然后用图象法进行验证。在验证加速度 a 与质量 m 是否存在反比关系时，为了方便，可以用图象验证加速度 a 与质量的倒数 $1/m$ 是否成正比关系。即用纵坐标表示加速度 a ，横坐标表示质量的倒数 $1/m$ ，根据实验结果在坐标平面上画出相应的点，然后用光滑的线把这些点连接起来（图 4-5）。

〔结论〕从实验结果可以得出：

1. 当小车质量一定时，小车运动的加速度和所受的力成正比。

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{F_1}{F_2}, \text{ 即 } a \propto F。$$

2. 当小车所受的拉力一定时，小车运动的加速度同小车的质量成反比。

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

4.2 牛顿第二定律

根据上节的实验结果，可以推出如下的关系：

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

上式表明：物体运动的加速度同作用在物体上的力成正比，同物体的质量成反比，而方向和作用力的方向一致。这就是牛顿第二定律。上式可改写成数学等式

$$F = kma,$$

式中比例常数 k 的数值，决定于公式中物理量所采用的单位。如果使质量为 1kg 的物体产生 1m/s^2 的加速度的力叫做 1N ，即 $1\text{N} = 1\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$ ，则比例常数 $k=1$ ，上式可简化成

$$F = ma,$$

这就是牛顿第二定律的公式。

对于牛顿第二定律还应注意：力改变，加速度随之改变；力停止作用，加速度立即消失。

【讨论】

(1) 物体所受力为零时，加速度等于多大？这时物体处于什么运动状态？

(2) 物体受恒定的力作用时，加速度怎样？物体作什么性质的运动？

(3) 下列说法是否正确：

物体速度越大，表明物体所受的力越大。

物体所受的力越大，速度变化也越大。

(4) 一个物体受到一个逐渐减小的力的作用，力的方向跟速度方向相同，物体的加速度怎样变化？物体是在作加速运动还是减速运动？

我们已经知道，任何物体都具有保持原来运动状态的性质——惯性。若要改变物体的运动状态，必须对它施加力的作用。然而对于质量不同的物体，改变运动状态的难易程度是不同的。两辆以相同的速度在平直公路上行驶的卡车，一辆满载货物，另一辆是空车。如果要它们立即停车，满载货物的卡车就显得困难得多。因为它的质量大，需要很大的制动力。物体的质量越大，改变运动状态越困难，惯性也越大。因此，质量是物体惯性大小的量度。

惯性的大小在实际工作中是经常要加以考虑的。要使物体的运动状态容易改变，应尽可能地减小物体的质量；要使物体的运动状态不易改变，应尽可能地增大物体的质量。

【讨论】

(1) 冲床（图 4-6）为什么要有一个很大的飞轮？

(2) 多级火箭在飞行过程中，当第二级火箭点燃时，为什么要让第一级火箭自动脱离？

物理量单位的选取是很重要的。通常在物理学中选定一些基本物理量，把它们的单位规定为基本单位，其他的物理量单位可以通过物理公式导出，它们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。

当前多数国家都采用国际单位制（SI）。我国目前也规定采用以国际单位制为基础的法定计量单位。国际单位制中的力学单位，是以长度的单位“米（m）”、质量的单位“千克（kg）”和时间的单位“秒（s）”作为基本单位的。如速度的单位“米每秒（m/s）”、加速度的单位“米每二次方秒（m/s²）”和力的单位“牛（N）”等都属于导出单位。

[例题 4.1] 22N 的力作用在质量为 2kg 的物体上，求物体的加速度。

解 由于 $F=22\text{N}$ ， $m=2\text{kg}$ ，根据牛顿第二定律的公式，物体的加速度

$$a = \frac{F}{m} = \frac{22}{2} \text{ m/s}^2 = 11 \text{ m/s}^2,$$

加速度的方向和力的方向相同。

[例题 4.2] 枪膛里的子弹，质量为 0.02kg，由静止开始作匀加速运动 0.002s，然后以 500m/s 的速度离开枪口。求子弹受到燃烧气体对它的推力。

[分析] 要求出气体的推力，必须知道子弹在枪膛作匀加速运动的加速度，加速度可以用匀变速直线运动的公式求得。

解 由于 $v_0=0$ ， $v_t=500\text{m/s}$ ， $t=0.002\text{s}$ ， $m=0.02\text{kg}$ ，子弹在枪膛内的加速度

$$a = \frac{v_t}{t} = \frac{500}{0.002} \text{ m/s}^2 = 250000 \text{ m/s}^2.$$

子弹所受的推力

$$F=ma=0.02 \times 250000\text{N}=5000\text{N}.$$

4.4 重力和质量

我国的科技人员赴南极考察，用同一架台秤称质量为 1kg 的物体。称得物体在上海时所受的重力为 9.794N，到南极后却变为 9.832N。这表明同一物体在地球的不同地域所受重力的大小是不同的。

我们知道，物体只受重力时所具有的加速度就是重力加速度。如果用 G 表示物体所受的重力，用 m 表示物体的质量，用 g 表示重力加速度。那么，根据牛顿第二定律可以得到

$$G=mg.$$

一个物体的质量不论在什么地方都是相同的，但物体所受的重力在地球上不同地域却并不相等，所以从上式可以看出，为什么在不同地域的重力加速度 g 是不相等的。由于各地的 g 值相差很小，在一般情况下，

取 $g=9.8\text{m/s}^2$ ，在粗略计算时可取 $g=10\text{m/s}^2$ 。

在地球上同一地方，物体的重力加速度是相同的。设某地有两个物体，质量分别为 m_1 和 m_2 ，根据 $G=mg$ ，它们所受重力之比

$$\frac{G_1}{G_2} = \frac{m_1}{m_2}。$$

这就是说，在地球上同一地方，物体所受的重力和质量是成正比的。如果两物体的重力相等，它们的质量也相等。天平就是利用这个道理来称量物体质量的。

【讨论】

月球上的重力加速度约为地球上重力加速度的 $1/6$ 。一个在地球上为 1kg 质量的物体，拿到月球上去，它的质量是多少？它所受的重力又是多少？

4.5 力的等效替代

前面所研究的是物体在一个力的作用下获得加速度的情况。在现实生活中，更普遍的情况是物体同时受到几个力的作用，这时物体的加速度又是怎样求得呢？因为物体的加速度是几个力共同作用的结果。只要找到一个力使这个力的作用效果跟几个力共同作用的效果相同，就可以用这个力来等效替代几个力求得物体的加速度。

4.5.1 一直线上几个力的等效替代

我们在初中物理中已经知道，如果一直线上两个力的方向相同，那么等效替代它们的力，大小等于这两个力的和，方向跟这两个力的方向相同；如果一直线上两个力的方向相反，那么等效替代它们的力，大小等于这两个力的差，方向跟较大的那个力的方向相同。这个用来等效替代的力叫做这两个力的合力，求合力的方法叫做力的合成。

4.5.2 互成角度的力的等效替代

在实际问题中，作用在物体上使物体产生加速度的力，往往不在一直线上，而是互成角度的。那么怎样来求它们的合力呢？下面我们用实验的方法来探究这个问题。

实验 4.2

〔目的〕探究两个互成角度的力的合成。

〔器材〕弹簧、细线三根、弹簧秤两个、绘图板、白纸、三角尺、刻度尺、图钉。

〔步骤〕

1. 将钉有白纸的绘图板平放在桌面上，用图钉将一轻质弹簧固定在绘图板上 A 点。

2. 将三根细线的一端结在一起，另一端各打一个细线圈，三个细线圈分别套在弹簧的一端和弹簧秤甲、乙的挂钩上。把两弹簧秤互成角度地拉开，使细线的结点延伸到 O 点 [图 4-7 (a)]。

3. 用铅笔和刻度尺从 O 点出发，沿三细线方向作出三条直线。同时记下两弹簧秤的读数 F_1 、 F_2 ，撤去两弹簧秤，并用图示法以选定的标度作出拉力 F_1 、 F_2 。

4. 用一个弹簧秤，沿 AO 方向拉弹簧，使结点仍延伸到 O 点 [图 4-7 (b)]，记下弹簧秤的读数 F ，撤去弹簧秤并用图示法以同样的标度作出拉力 F [图 4-7 (c)]。

5. 分析力 F 跟力 F_1 、 F_2 的关系。

〔结论〕

1. 力 F_1 、 F_2 分别是弹簧秤甲、乙对 O 点的拉力，它们共同作用的效果与一个弹簧秤对 O 点的拉力 F 的作用效果是_____ (相同、不相同) 的。因此力 F 是力 F_1 和 F_2 的_____。

2. 将表示力 F_1 和 F_2 的线段的顶点 B、C 分别用虚线与表示力 F 的线段的顶点 A 连接起来，则 OB、AC 构成的图形是_____，而 OA 又是这个图形的_____线。

从实验结果可知，要找出两个互成角度的力的合力，可以用表示这两个力的线段为邻边作平行四边形，那么过共点的对角线就表示这两个力的合力。量出平行四边形对角线的长度和与已知力之间的夹角就可以求得合力的大小和方向。这个法则叫做平行四边形定则。这是一条关于矢量合成的普遍法则，对于力、位移、速度等矢量的合成都能适用。

【讨论】

1. F 是 F_1 和 F_2 两个力的合力，则：

(1) F 等于 F_1 和 F_2 的和吗？

(2) F 一定比 F_1 或 F_2 大吗？

(3) F 可以等于零吗？

(4) 什么情况下 F 最大？什么情况下 F 最小？各等于多少？

(5) 如果 F_1 和 F_2 大小相等，在什么情况下 F 的大小与它们相等？

2. 如果作用在一点上的互成角度的力有两个以上时，你能否求出它们的合力？怎样求得？

根据平行四边形定则，我们可以用作图的方法将两个互成角度的力

的合力作出来。根据所用的标度量出它的大小，并用量角器测出合力与已知力之间的夹角，从而确定合力的方向。

当两个力之间的夹角为 90° 时，我们还可以利用直角三角形的边角关系，计算两个力合力的大小，并确定合力的方向。

[例题 4.3] 互相垂直的力 F_1 、 F_2 的大小依次为 12N 和 5N。求它们的合力 F 。

解根据选定的标度作线段 OA 、 OB ，表示力 F_1 、 F_2 ，且 $\angle AOB=90^\circ$ 。用作图法作出矩形 $OACB$ ，则对角线 OC 就表示它们的合力 F （图 4-8）。量出线段 OC 的长度，可知合力 F 的大小为 13N。用量角器量出合力 F 与力 F_1 间的夹角 α 约为 23° 。

如用计算法求合力 F ，则

$$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2} = \sqrt{12^2 + 5^2} \text{ N} = 13\text{N}.$$

因为
$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{F_2}{F_1} = \frac{5}{12},$$

所以
$$\alpha = 22.6^\circ.$$

4.5.3 用两个力等效替代一个力

从上面的讨论中我们已经知道可以用一个力去等效替代两个力的作用，那么是否也可以用两个力来等效替代一个力的作用呢？

如果两个力的共同作用的效果可以等效替代一个力的作用，这两个力就叫做那个力的分力。求一个已知力的分力叫做力的分解。

例如原来某人用 100N 的力去推动小车，跟由两个人分别用 60N 和 40N，同时向同方向去推动小车，效果是相同的。

力的分解和力的合成都遵守平行四边形定则。把表示已知力的线段作为平行四边形的对角线，那么这个平行四边形的两条邻边就表示已知力的两个分力。

[例题 4.4] 已知一个力的大小为 50N，与这个力的夹角为 30° 的一个分力的大小为 20N，求另一个分力。

解根据选定的标度作出表示力 F 的线段 OA ，使 $F=50\text{N}$ ，再作出表示分力 F_1 的线段 OB ，使 $F_1=20\text{N}$ ，且 $\angle BOA=30^\circ$ 。连接 BA ，作以 OB 、 BA 为邻边的平行四边形 $OBAC$ ，则 OC 就表示所求的另一个分力 F_2 的线段（图 4-9）。

量得 $F_2=35\text{N}$ ， F_2 与 F 的夹角 $\alpha=20^\circ$ 。

如果没有附加条件，对角线一定的平行四边形可以有无限多个（图 4-10）。也就是说，一个已知力可以用无数组互成角度的力来替代。因此，力的分解只有在知道了附加条件，例如知道其中一个分力的大小和方向，或者知道两个分力的方向等等，才能得到确定的答案。因此，力

必须根据客观实际的条件和需要进行分解才有意义。在多数情况下，往往需要将一个力分解成两个互相垂直的分力。

[例题 4.5] 倾角为 30° 的斜面上放着一个重力为 20N 的木块。把木块所受的重力 G 分解为平行斜面向下的分力 G_x 和垂直斜面向下的分力 G_y 。

解用表示木块所受的重力 G 的线段 OA 为对角线作矩形 $OBAC$ ，使 OB 与斜面平行、 OC 与斜面垂直。则线段 OB 、 OC 就表示重力的两个分力 G_x 和 G_y (图 4-11)。根据三角知识可以计算出平行斜面的分力 G_x 和垂直斜面的分力 G_y 。

$$G_x = G \sin \theta = 20 \times \frac{1}{2} \text{N} = 10\text{N},$$

$$G_y = G \cos \theta = 20 \times \frac{\sqrt{3}}{2} \text{N} = 17.3\text{N}.$$

4.6 物体同时受到几个力作用下的加速度

在日常生活中，常会遇到几个力作用下的物体的运动问题。例如吊车起吊物体，电梯升降，汽车前进，在斜面上下滑物体等。掌握了力的合成方法，对于同时受到几个力的物体的加速度问题就可以解决了。下面来讨论几个实例。

[例题 4.6] 弹簧秤下端挂一个质量为 2kg 的金属块[图 4-12(a)]。用手提着弹簧秤使金属块作竖直向上的匀加速运动时，弹簧秤的读数为 24N 。若空气阻力不计，求金属块的加速度。(g 取 10m/s^2)

[分析] 金属块同时受到竖直向下的重力 G 和一个竖直向上的拉力 T 的作用[图 4-12(b)]。物体受到竖直向上的拉力 T 的大小等于弹簧秤的读数。金属块运动的加速度是这两个力共同作用的结果。只要找到这两个力的合力，然后根据牛顿第二定律就可以求出金属块的加速度。

解 按照力的合成法则，求出合力

$$F = T - mg = (24 - 20) \text{N} = 4\text{N},$$

方向跟拉力 T 的方向相同。

根据牛顿第二定律，得出金属块的加速度

$$a = \frac{F}{m} = \frac{4}{2} \text{m/s}^2 = 2 \text{m/s}^2.$$

通过上面的学习，我们对牛顿第二定律有了进一步的认识。物体在同时受到几个力作用时，同样可以用牛顿第二定律求出物体运动的加速度。不过这时使物体产生加速度的力是作用在这个物体上所有力的合力，加速度的方向和合力的方向相同。因此，牛顿第二定律的一般表达式是 $F_{\text{合}} = ma$ 。

[例题 4.7] 爱斯基摩人用狗拉雪橇。如果两条狗拉质量是 100kg 的雪橇在水平方向上运动，一条狗用 80N 的水平力 F_1 拉，另一条狗用 20N 的水平力 F_2 拉，两力互成 30° 角（图 4-13）。那么雪橇获得的加速度有多大？（摩擦阻力不计）

[分析] 对雪橇进行受力分析，它一共受到四个力的作用：重力 G 、地面的弹力 N 、拉力 F_1 及 F_2 。由于物体在竖直方向上所受的重力与弹力是一对平衡力，不产生加速度，所以使雪橇在水平方向上产生加速度的力是力 F_1 和 F_2 ，用平行四边形定则求出力 F_1 和 F_2 的合力，然后根据牛顿第二定律求得加速度。

解 作出雪橇的受力图（图 4-14），并用平行四边形定则作出对角线，量得 $F_{\text{合}}=90\text{N}$ ， $F_{\text{合}}$ 与力 F_1 的夹角为 $\alpha=8^\circ$ 。

根据牛顿第二定律，可以得出雪橇的加速度

$$a = \frac{F_{\text{合}}}{m} = \frac{90}{100} \text{ m/s}^2 = 0.9 \text{ m/s}^2。$$

[例题 4.8] 质量为 10kg 的物体从光滑斜面上滑下，斜面倾角为 30° （图 4-15）。求物体沿斜面下滑的加速度和物体对斜面的压力。

解法一 物体在斜面上受到重力 G 和斜面的支持力 N 的作用。由于物体的加速度方向沿斜面向下，所以这两个力的合力的方向必定沿斜面向下。知道了力 N 的方向、重力 G 的大小和方向以及它们的合力方向，可以用作图法作出平行四边形（图 4-16）。量得合力 $F_{\text{合}}$ 的大小为 49N，支持力 N 的大小为 85N。

已知 $m=10\text{kg}$ ，从牛顿第二定律可以得出物体的加速度

$$a = \frac{F_{\text{合}}}{m} = \frac{49}{10} \text{ m/s}^2 = 4.9 \text{ m/s}^2。$$

根据牛顿第三定律可知，物体对斜面的压力

$N' = N = 85\text{N}$ ，方向垂直斜面向下。

解法二 已知物体的质量 $m=10\text{kg}$ ，倾角 $\alpha=30^\circ$ ，在作出受力图后，根据这两个力与合力的关系，可以通过解直角三角形求得物体所受合力为

$$F_{\text{合}} = G \sin \theta = mg \sin \theta。$$

物体的加速度为

$$a = \frac{F_{\text{合}}}{m} = \frac{mg \sin \theta}{m} = g \sin \theta = 9.8 \times 0.5 \text{ m/s}^2 = 4.9 \text{ m/s}^2。$$

斜面对物体的支持力

$$N = mg \cos 30^\circ = 10 \times 9.8 \times \frac{\sqrt{3}}{2} \text{ N} = 84.9 \text{ N}。$$

根据牛顿第三定律，物体对斜面的压力

$$N' = N = 84.9 \text{ N}。$$

解法三 根据力的分解方法,按需要将重力沿平行斜面与垂直斜面的方向进行分解(图 4-17)。利用三角知识得到

$$G_x = mg \sin \theta ; G_y = mg \cos \theta 。$$

由于分力 G_y 与斜面对物体的支持力 N 相平衡,这时 $F_{\text{合}} = G_x$, 因此,物体沿斜面下滑的加速度

$$a = \frac{G_x}{m} = \frac{mg \sin \theta}{m} = g \sin \theta = 9.8 \times 0.5 \text{ m/s}^2 = 4.9 \text{ m/s}^2。$$

物体对斜面的压力

$$N' = N = G_y = mg \cos \theta = 10 \times 9.8 \times \frac{\sqrt{3}}{2} \text{ N} = 84.9 \text{ N}。$$

4.7 牛顿第二定律的应用

牛顿第二定律反映了力、质量、加速度之间的关系。已知物体的受力情况,运用牛顿第二定律可以求出加速度,从而知道物体的运动情况;反过来,已知物体的运动情况,求出加速度并运用牛顿第二定律便能推知物体受力情况。

[例题 4.9] 水平桌面上的木块,质量为 2kg,它与桌面间的摩擦系数为 0.2,在水平拉力作用下,产生的加速度是 3 m/s^2 。求水平作用力。(g 取 10 m/s^2)

[分析] 作出木块的受力图(图 4-18)。木块共受四个力的作用:重力 G 、桌面的支持力 N 、水平拉力 F 、桌面的摩擦力 f 。由于木块在竖直方向没有加速度,可以推知,支持力 N 与重力 G 是一对平衡力。又根据力的合成法则,可知在水平方向上的合力 $F_{\text{合}} = F - f$ 。最后根据牛顿第二定律可求得水平拉力 F 。

解 已知 $m=2 \text{ kg}$, $\mu=0.2$, $a=3 \text{ m/s}^2$, 由于 $N=G=mg$, 因此摩擦力

$$f = \mu N = \mu mg。$$

木块受到的合力

$$F_{\text{合}} = F - f = F - \mu mg。$$

根据牛顿第二定律可以列出

$$F - \mu mg = ma。$$

因此,水平作用力

$$\begin{aligned} F &= \mu mg + ma = m(\mu g + a) \\ &= 2 \times (0.2 \times 10 + 3) \text{ N} = 10 \text{ N}。 \end{aligned}$$

[例题 4.10] 用手提着下挂质量为 2kg 钩码的弹簧秤[图 4-19(a)]。求下列各种情况下弹簧秤的读数。(g 取 10 m/s^2)

- (1) 手提弹簧秤竖直向上作匀速运动。
- (2) 手提弹簧秤以 2 m/s^2 的加速度竖直向上作匀加速运动。
- (3) 手提弹簧秤以 2 m/s^2 的加速度竖直向下作匀加速运动。

〔分析〕首先确定以钩码为研究对象，通过受力分析可知，钩码同时受到竖直向下的重力 G 和弹簧秤对它的竖直向上的拉力 T 的作用，而弹簧秤的读数则是指钩码对弹簧秤的拉力 T' 。 T 和 T' 是一对作用力和反作用力，所以 $T=T'$ ，方向相反[图 4-19 (b)]。

解 (1) 当弹簧秤竖直向上作匀速运动时，钩码处于平衡状态，加速度 $a=0$ ，所受的合力 $F_{\text{合}}=0$ 。即

$$T=G=mg。$$

所以， $T'=T=mg=20\text{N}$ 。

弹簧秤的读数为 20N ，等于钩码所受的重力。

(2) 当弹簧秤竖直向上作匀加速运动时，由于加速度方向竖直向上[图 4-20 (a)]，钩码所受的合力 $F_{\text{合}}=T-G$ ，即

$$T-mg=ma。$$

所以 $T=m(g+a)=2\times(10+2)\text{N}=24\text{N}$ 。弹簧秤的读数

$$T'=T=24\text{N}。$$

这种情况下弹簧秤的读数大于钩码受到的重力，这种现象叫做超重现象。当火箭竖直向上发射作加速运动时，在火箭密封舱内的宇航员就处于超重状态，因而宇航员必须事先经过训练才能适应。

(3) 当弹簧秤竖直向下作匀加速运动时，由于加速度方向竖直向下[图 4-20 (b)]，砝码所受的合力 $F_{\text{合}}=G-T$ ，即

$$mg-T=ma，$$

$$T=m(g-a)=2\times(10-2)\text{N}=16\text{N}，$$

所以弹簧秤的读数 $T'=T=16\text{N}$ 。

这种情况下弹簧秤的读数小于钩码受到的重力，这种现象叫做失重现象。跳伞运动员在跳离机舱后的一段时间内，就处于这种失重状态。

【讨论】

(1) 人站在电梯中，当电梯突然加速上升或突然加速下降时，人对地板的压力有什么变化？

(2) 如果把挂着钩码的弹簧秤从手中放开，使钩码和弹簧秤一起自由下落。这时弹簧秤的读数是多少(图 4-21)？

(3) 超重和失重现象是否说明地球作用于钩码的重力发生了变化？

〔例题 4.11〕质量为 m 的木箱，放在水平光滑地面上，用与水平成角的力 F 拉木箱，使木箱沿地面作匀加速运动[图 4-22 (a)]。求木箱运动的加速度和木箱对地面的压力。

〔分析〕木箱在拉力 F 作用下沿水平方向作匀加速运动，因此木箱所受合力是沿水平方向的。力 F 对木箱起到两个作用效果：一个是对木

箱有向上提的作用，从而减小木箱对地面的压力；另一个是对木箱有向前拉的作用，使木箱获得加速度。因此可以用这两个方向上的力来等效替代力 F 。这样可把木箱的受力情况用图 4-22 (b) 表示，只要求出水平方向的合力，就能求出木箱的加速度。

解 将力 F 分解成 F_x 和 F_y ，即

$$F_x = F \cos \theta, \quad F_y = F \sin \theta。$$

从图 4-22 (b) 上可以看出木箱所受的合力为 F_x 。

在水平方向上 $F_x = ma$ 。

在竖直方向上 $N + F_y = mg$ 。

所以木箱运动的加速度

$$a = \frac{F_x}{m} = \frac{F \cos \theta}{m}。$$

木箱对地面的压力

$$N = N = mg - F_y = mg - F \sin \theta。$$

从上面的例题可以看出，物体对地面的压力 N 不一定等于物体的重力。

【讨论】

1. 如果地面与木箱间的摩擦系数为 μ ，则此时木箱的加速度应如何计算？

2. 如果地面与木箱间的摩擦系数为 μ ，且将拉力改为斜向下的推力，则木箱的加速度又为多少？

[例题 4.12] 质量为 3000kg 的汽车，以 10m/s 的初速驶上倾角 α 为 8° 、长度为 150m 的斜坡，到坡顶时速度为 5m/s，汽车受到的阻力是车重的 0.05 倍。求汽车的牵引力。（ g 取 10m/s^2 ， $\sin 8^\circ = 0.14$ ）

[分析] 研究对象是汽车。汽车受到四个力的作用：重力 G 、斜坡支持力 N 、牵引力 F 、阻力 f ，受力图如 4-23 所示。垂直斜坡方向上汽车没有加速度，汽车沿斜坡向上作匀减速运动。

解 由于 $m=3000\text{kg}$ ， $v_0=10\text{m/s}$ ， $v_t=5\text{m/s}$ ， $s=150\text{m}$ ， $\alpha=30^\circ$ 。因此，汽车的加速度

$$a = \frac{v_t^2 - v_0^2}{2s} = \frac{5^2 - 10^2}{2 \times 150} \text{m/s}^2 = -0.25\text{m/s}^2。$$

负号表示加速度的方向和运动方向相反，因此合力方向也与运动方向相反。

在运用牛顿第二定律列式时，为了方便，通常总是取物体的加速度方向为正方向，因此，加速度总是取正值。

根据牛顿第二定律可以列出

$$mgsin \alpha + f - F = ma。$$

因此，汽车牵引力的大小

$$\begin{aligned}
 F &= mgs \sin \alpha + f - ma \\
 &= (3000 \times 10 \times 0.14 + 0.05 \times 3000 \times 10 - 3000 \times 0.25) \text{ N} \\
 &= 4.95 \times 10^3 \text{ N}。
 \end{aligned}$$

例题 4.8 和例题 4.11 的解题过程中，都用到了力的分解。但可以看出，用到力的分解最终的目的还是为了方便地求出作用在物体上所有力的合力。在例题 4.8 中，物体重力的一个分力 $mgs \sin \alpha$ ，实际上就是作用在物体上重力和弹力的合力。例题 4.11 中拉力的一个分力 $F \cos \alpha$ ，也就是作用在木箱上重力、弹力及拉力这三个力的合力。

应用牛顿第二定律解题的一般步骤：首先确定作为研究对象的物体，然后分析它的受力情况，如果已知物体的运动情况，通常可将不在加速度方向的力，沿着加速度方向和垂直于加速度方向分解，求出加速度方向上的合力，然后应用牛顿第二定律和运动学公式，求出未知量。

4.8 牛顿运动定律的适用范围

17 世纪以来，以牛顿运动定律为基础的经典力学不断发展，在科学研究和生产技术上得到了极其广泛的应用，取得了巨大的成就。这一切不仅证明了牛顿运动定律的正确性，甚至使有些科学家认为经典力学已经达到十分完善的地步，一切自然现象都可以由力学来加以说明，过分地夸大了经典力学的作用。但是，实践表明，牛顿运动定律和所有的物理定律一样，只具有相对的真理性。

1905 年，著名的美籍德国物理学家爱因斯坦（1879~1955）提出了研究匀速相对运动体系的狭义相对论，引起了物理学的一场巨大革命。他指出，经典力学中的绝对时空观并不是直接从观察和实验中得出的。实际上时间、空间和观察者是相对的。根据相对论原理，物体的质量也不是恒定不变的，而是随着物体运动状态的变化而变化。1916 年爱因斯坦又发表了研究加速相对运动的广义相对论。运用这些理论所得出的结论和实验观察基本一致。这表明：对于接近光速的高速运动的问题，经典力学已不再适用，必须由相对论力学来研究。经典力学可以看作是相对论力学在运动速度远小于光速时的特例。

从 20 世纪初以来，原子物理学发展很快，发现许多新的物理现象（如光子、电子、质子等微观粒子的波粒二象性）无法用经典力学来说明。后来，在普朗克（1858~1947）、海森堡（1901~1976）、薛定谔（1887~1961）、狄拉克（1902~1984）等物理学家的努力下创立了量子力学，解决了经典力学无法解决的问题。因此经典力学可以看作是量子力学在宏观现象中的极限情况。

总之，“宏观”、“低速”是牛顿运动定律的适用范围。

本章学习要求

1. 掌握牛顿第二定律。
2. 理解质量是物体惯性大小的量度。
3. 理解物体所受重力跟它的质量成正比的关系式。
4. 理解合力和力的合成，理解分力和力的分解，会用力的平行四边形定则求合力和分力。
5. 会应用牛顿第二定律解决简单的实际问题，掌握解题的基本思路和步骤。
6. 知道牛顿运动定律的适用范围和局限性。
7. 学会控制变量及等效替代的研究方法。

5 物体的平衡

北京亚运会壮丽的建筑群，上海黄浦江上的杨浦、南浦两座大斜拉桥，浦东东方明珠电视塔等，都是我国自行设计和建造的具有先进水平的雄伟建筑。要分析这些建筑的力学结构都要用到物体的平衡知识。

物体所处的静止状态、匀速直线运动状态和转动物体所处的匀速转动状态叫做平衡状态。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。下面就来研究这些条件。

5.1 共点力作用下物体的平衡

几个力作用于物体的同一点或者它们的作用线相交于一点，这几个力叫做共点力。在共点力作用下的物体，一般可以忽略它们的形状和大小而看作质点。

在初中物理中已经知道，作用在一个物体上的两个力如果大小相等，方向相反，并且作用在同一直线上，物体就处于平衡状态。由力的合成法则可以知道，这两个力的合力为零。那么，物体在两个以上共点力作用下的平衡条件是什么呢？

实验 5.1 研究共点力作用下物体的平衡条件

〔目的〕研究共点力作用下物体的平衡条件。

〔器材〕弹簧秤三个、细线三根、绘图板、白纸、三角尺、刻度尺、图钉。

〔步骤〕

1. 将钉有白纸的绘图板平放在桌面上。

2. 将三根细线的一端结在一起，用图钉将结点 O 固定在白纸中央。将三根细线的另一端各打一个细线圈，三个细线圈分别套在三个弹簧秤的挂钩上。拔去图钉，将三个弹簧秤互成角度地拉开，使结点仍在 O 点平衡，把弹簧秤的另一端分别固定在绘图板上，如图 5-1 (a) 所示。

3. 用铅笔和刻度尺从 O 点出发，沿三根细线的方向在白纸上作出三条直线，同时分别记下三个弹簧秤的读数 F_1 、 F_2 、 F_3 ，撤去弹簧秤，并用图示法在白纸上作出共点力 F_1 、 F_2 、 F_3 ，如图 5-1 (b) 所示。

4. 用铅笔和三角尺，研究任何二个力的合力与第三个力的关系。

〔结论〕在共点力作用下物体的平衡条件是_____。

物体在共点力作用下处于平衡状态时，由于加速度等于零，从牛顿

运动定律可以知道，物体所受的合外力也一定等于零。由此得出结论：物体在共点力作用下的平衡条件是这些力的合力等于零。下面将通过几个例子说明，如何应用共点力平衡条件来研究物体所受的力。

[例题 5.1] 悬挂着的荧光节能灯重力为 6N，用水平绳将电线拉到与竖直方向成 30° 角[图 5-2 (a)]，求电线与水平绳所受的拉力。

解法一

[分析] 取电线和水平绳的结点 O 为研究对象，由受力分析可知，O 点受电线 OB 段的向下拉力 Q、电线 OA 段的斜向拉力 F 及绳 OC 的水平拉力 T 而处于平衡状态，这三个力的合力等于零。

为了研究这三个力之间的关系，可以用力的平行四边形定则作出力 F 和 T 的合力 R[图 5-2 (b)]，R 等效替代了力 F 和 T，这就相当于 O 点只受力 Q 和力 R 的作用。力 R 与 Q 一定大小相等，方向相反，在同一直线上，即 R=Q。另以节能灯为受力分析对象，可知力 Q 的大小等于灯所受的重力 6N。

解 在直角三角形 ODE 中， $R=Q=6\text{N}$ ， $\theta=30^\circ$ 。

电线 OB 段所受的拉力

$$Q = Q = 6\text{N}。$$

电线 OA 段所受的拉力 F 和水平绳所受的拉力 T 分别为

$$F' = F = \frac{R}{\cos\theta} = \frac{6}{\cos 30^\circ} \text{N} = 6.9\text{N}。$$

$$T' = T = R \tan\theta = 6 \tan 30^\circ \text{N} = 3.5\text{N}。$$

解法二

[分析] 将力 F 分解成沿水平方向的力 F_x 和沿竖直方向的力 F_y (图 5-3) F_x 、 F_y 等效替代了力 F，这样就相当于 O 点受到四个力 F_x 、 F_y 、T、Q 的作用。根据力的平衡条件可以得出这四个力的大小关系为

$$F_x = T, F_y = Q。$$

解 在直角三角形 OHE 中， $F_y=6\text{N}$ ， $\theta=30^\circ$ 。

$$F' = F = \frac{F_y}{\cos\theta} = \frac{6}{\cos 30^\circ} \text{N} = 6.9\text{N}。$$

$$T' = T = F_x = F_y \tan\theta = 6 \tan 30^\circ \text{N} = 3.5\text{N}。$$

$$T = T = F_x = F_y \tan\theta = 6 \tan 30^\circ \text{N} = 3.5\text{N}。$$

【练习】

光滑斜面上的物体，受到水平推力 F 的作用而处于静止状态[图 5-4 (a)]，已知物体的重力为 G，斜面倾角为 θ ，求水平推力 F。

【讨论】

1. 物体受力图如图 5-4 (b) 所示。本题解法与例题 5.1 有什么相似之处?

2. 找出求解共点力平衡问题的一般规律。

[例题 5.2] 重力为 G 的物体静止在倾角为 θ 的斜面上, 求斜面对物体的弹力和静摩擦力。

[分析] 以物体为研究对象, 对物体进行受力分析, 物体受重力 G 、弹力 N 和静摩擦力 f 的作用而处于平衡状态[图 5-5 (a)], 三个力的合力为零。

解

将重力 G 沿斜面方向和垂直于斜面的方向分解为 G_x 和 G_y , 物体相当于受四个力 G_x 、 G_y 、 f 、 N 的作用[图 5-5 (b)]。沿斜面方向的力 f 和 G_x 大小相等, 方向相反; 垂直于斜面的方向上的力 N 和 G_y 大小相等, 方向相反。

斜面的弹力

$$N = G_y = G \cos \theta$$

静摩擦力

$$f = G_x = G \sin \theta$$

【讨论】

本例题中如果采用沿水平方向和竖直方向来分解力的方法, 与上述解法相比较, 你认为哪种方法简便? 为什么?

[例题 5.3] 在光滑的斜面上用细绳吊着一个重力为 G 的小球。当小球处于如图 5-6 (a) 所示的情况时, 小球受几个力作用? 各等于多少? (设 $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 60^\circ$, $G = 10\text{N}$)

[分析] 小球受到竖直向下的重力 G , 斜面对小球的弹力 N , 这两个力不在一直线上而不能平衡, 小球要沿斜面下滑, 所以对绳子有一拉力, 绳发生形变后产生弹力, 即沿绳子对小球的拉力 T 。小球共受 G 、 N 、 T 三个力的作用而处于平衡状态[图 5-6 (b)]。

解 由于 N 和斜面垂直, 斜面和水平之间成 30° , 则 N 和竖直方向之间夹角为 30° , T 和水平夹角为 60° 。把 T 和 N 都沿水平方向和竖直方向分解, 根据共点力的平衡条件, 得

$$T \cos 60^\circ = N \sin 30^\circ, \quad (1)$$

$$T \sin 60^\circ + N \cos 30^\circ = G, \quad (2)$$

从 (1) 得 $T = N$, 代入 (2), 则得

$$N = T = \frac{\sqrt{3}}{3} G = 5.77\text{N}。$$

实验 5 . 2

〔目的〕测定滑动摩擦系数。

〔器材〕倾角可调节的斜面、玻璃板、木块、打点计时器。

〔步骤〕

1. 先将斜面倾角调节到零度，将木块放在斜面上。

2. 逐步增大斜面倾角，用打点计时器检验，使木块在斜面上下滑时作匀速直线运动。记下这时斜面的倾角。倾角的正切函数就是木块与斜面间的滑动摩擦系数。

3. 改变木块质量，重做实验三次。

4. 将玻璃板做斜面，重做步骤 1、2、3。

〔记录〕

材 料	实验次序	倾角	滑动摩擦系数 tg
木—木	1		
	2		
	3		
木 - 玻璃	1		
	2		
	3		

【讨论】

木块在斜面上作加速运动滑下时，木块与斜面间的滑动摩擦系数还等于斜面倾角 的正切函数吗？

5 . 2* 有固定转轴物体的平衡

能够绕固定轴转动的物体在日常生活中是常见的，如门窗、滑轮、跷跷板等。如果物体相对固定转轴保持静止或匀速转动，我们说物体处于平衡状态。

在初中物理中已经学过，力对物体转动的效果不仅与力的大小有关，而且还与转轴到力的作用线的距离——力臂有关（图 5-7），力和力臂的乘积叫做力矩。设力的大小为 F ，力臂为 L ，则力矩

$$M=FL。$$

力矩的单位由力的单位和力臂的单位决定。在国际单位制中，力矩的单位名称是牛〔顿〕米，单位符号是 $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

通常把使物体作逆时针转动的力矩叫做逆时针力矩；使物体作顺时针转动的力矩叫做顺时针力矩。

下面通过实验来探究有固定转轴物体的平衡条件。

实验 5.3

〔目的〕研究有固定转轴物体的平衡条件。

〔器材〕力矩盘、刻度尺、弹簧秤、铁架台、钩码一组、带套环的横杆、大头针、细线。

〔步骤〕

1. 将力矩盘的金属轴 O 水平地固定在铁架台上，把力矩盘套在轴上并使力矩盘盘面保持竖直，同时在铁架上固定一根水平横杆。

2. 把大头针固定在力矩盘的任意四个位置上，在其中三个大头针上用细线分别悬挂不同个数的钩码，在余下的大头针上用细线挂上弹簧秤，将弹簧秤的另一端挂在水平横杆的套环上，如图 5-8 所示。

3. 当力矩盘在这四个力的作用下处于平衡状态时，测出各个力的力臂，把力和力臂记录在表格上，分别计算出它们的力矩，比较顺时针力矩的和与逆时针力矩的和。

4. 改变大头针的位置，重复实验一次。

〔结果〕有固定转轴物体的平衡条件是：_____。

精确实验表明：有固定转轴的物体的平衡条件是力矩的代数和等于零，即 $M_{顺} - M_{逆} = 0$ 或 $M_{顺} = M_{逆}$ 。

〔例题 5.4〕一根长为 1.4m 的均匀轻质直杆套在支架的轴 O 点上(图 5-9)，在直杆的 A、B、C 处依次挂上重力为 0.5N 的钩码 4 个、3 个、2 个，直杆保持水平不动，求 D 处弹簧秤的读数。已知 A、B、C、D 各点离 O 点的距离分别是 0.4m、0.7m、1m、0.4m。

解 取 O 点为固定转轴，设弹簧秤读数为 F，则逆时针力矩为

$$M_A = F_A L_{OA},$$

$$M_D = F L_{OD}。$$

顺时针力矩为

$$M_B = F_B L_{OB},$$

$$M_C = F_C L_{OC}。$$

根据有固定转轴物体的平衡条件 $M_{逆} = M_{顺}$ ，得

$$M_A + M_D = M_B + M_C,$$

$$F_A L_{OA} + F L_{OD} = F_B L_{OB} + F_C L_{OC},$$

解方程可得 D 处弹簧秤读数

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{F_B L_{OB} + F_C L_{OC} - F_A L_{OA}}{L_{OD}} \\
 &= \frac{1.5 \times 0.7 + 1 \times 1 - 2 \times 0.4}{0.4} \text{ N} \\
 &= 3.1 \text{ N}。
 \end{aligned}$$

在例题 5.4 中，没有考虑轻质直杆所受的重力。假设直杆的重力等于 2N，怎样计算直杆重力对转轴的力矩呢？

直杆由于质量分布均匀，它的各个部分都要受到重力作用，因此 2N 应看作是直杆各部分重力的合力，合力 G 的作用点叫做直杆的重心。

质量均匀的薄板，重心位置只与形状有关。如果形状是对称的，重心 O 就在它的几何中心上（图 5-10）。只要用手指顶在薄板的重心上，薄板就会处于平衡状态（为什么？）。用手指顶的方法还可用来测定质量不均匀的薄板或直棒的重心位置。

通过以上的分析，可以确定均匀直杆的重心是在它的中点上。于是可以算出直杆重力对转轴的力矩

$$\begin{aligned}
 M_G &= G L_{OG} \\
 &= 2 \times 0.3 \text{ N} \cdot \text{m} \\
 &= 0.6 \text{ N} \cdot \text{m} \text{ (顺时针力矩)}。
 \end{aligned}$$

【讨论】

例题 5.4 如要考虑直杆重力，D 处弹簧秤读数等于多少？

本章学习要求

1. 知道共点力。
2. 理解共点力作用下物体的平衡条件。

6 匀速圆周运动

冰上芭蕾运动员表演时在冰上留下一个个圆圈；游乐场中坐在空中转椅上的游客都在沿圆周运动；人造卫星绕地球运行的轨道是一个近似的圆。像这种轨迹是圆的运动叫做圆周运动。质点在相等的时间内通过的圆弧长度都相等的圆周运动叫做匀速圆周运动。电风扇叶片上和电钟指针上每一点的运动，都可以看作是匀速圆周运动。

6.1 匀速圆周运动的周期和速度

旅客坐在某饭店的旋转餐厅里，随着椅子缓慢地转动一周，用 105min 时间就可以把周围的景色饱览无遗（图 6-1）。

旋转餐厅旋转时，旅客和在旋转餐厅里的其他物体一样，都在作匀速圆周运动。他们转一圈所用的时间都等于 105min。通常把物体作匀速圆周运动一周所用的时间叫做匀速圆周运动的周期，用符号 T 表示，在国际单位制中它的单位名称是秒，单位符号是 s 。物体作匀速圆周运动时通过的圆弧长度 s 与通过这段弧长所用的时间 t 的比就是匀速圆周运动速度的大小，即

$$v = \frac{s}{t}。$$

【练习】

设手表的时针针尖为 A ，分针针尖为 B ， C 是分针上的一点。已知点 A 、 C 到圆心 O 的距离相等（图 6-2），则

- (1) A 点与 B 点的运动周期_____（相等、不相等）。
- (2) B 点与 C 点的运动周期_____（相等、不相等）。
- (3) A 、 B 、 C 三点同样运动一周，_____点所通过的圆弧长度最大。
- (4) B 点与 C 点的速度大小_____（相等、不相等）。
- (5) A 点与 B 点的速度大小_____（相等、不相等）。
- (6) A 点与 C 点的速度大小_____（相等、不相等）。

可以看出，作匀速圆周运动的质点的速度大小除了与周期有关，还同它与圆心的距离（即半径）有关。

【讨论】

你能否推导出匀速圆周运动速度的大小与周期、半径之间的关系式。

[例题 6.1] 电唱机转盘每分钟转 45 圈。放在离转轴 0.1m 处的小螺帽随盘作匀速圆周运动。求小螺帽的周期和速度的大小。

解 小螺帽随唱机盘作匀速圆周运动，每分钟转 45 圈，则每秒钟转

$\frac{45}{60}$ 圈。显然，它的周期 $T = \frac{60}{45} \text{s} = \frac{4}{3} \text{s}$ 。

小螺帽随唱机盘转一圈所通过的弧长

$$s = 2\pi r = 2 \times 3.14 \times 0.1 \text{m} = 0.628 \text{m},$$

所以小螺帽的速度大小

$$v = \frac{s}{t} = \frac{s}{T} = \frac{0.628}{4/3} \text{m/s} = 0.47 \text{m/s}。$$

由上可知，作匀速圆周运动的物体的速度大小

$$v = \frac{2\pi r}{T}。$$

物体作匀速圆周运动的速度大小虽然是不变的，但它的方向却随时在改变。因此，如图 6-3 所示的小球在光滑水平面上作匀速圆周运动时，它经过圆周上 A 点和 B 点时的速度是不同的。工人师傅在砂轮上磨刀时砂轮边缘飞出的火星的方向，可以说明作匀速圆周运动物体的速度的方向（图 6-4）。

实验 6.1

在水平桌面上用一个玻璃杯倒过来盖住一粒玻璃弹子，转动杯子使弹子沿杯壁运动，停止杯子的转动，这时弹子在里面作圆周运动（图 6-5）。突然向上拿掉杯子时，弹子就会飞出。重复几次实验，观察弹子从什么方向飞出。

实验表明，作圆周运动的物体，在圆周上某一点的速度方向，就在这一点圆周的切线方向上（图 6-6）。

6.2 匀速转动物体的角速度

电唱机转盘上的各点，在转动中只要距转轴的半径不同，它们的速度大小就不同。那么它们又具有哪些共同的特征呢？

转盘是一个有固定转轴的物体。在转动中转盘上各点都在做圆周运动。由于它们都在同一转动物体上，它们具有相同的转动周期，或者说，它们在单位时间内转过的角度是相同的。

图 6-7 表示一个有固定转轴的转动物体。转轴 O 与纸面垂直，OP 是固定在物体上随物体一起转动的半径。很明显，转动物体的位置可由半径 OP 转过的角 θ 来确定。

在相等的时间里半径 OP 转过的角度总是相等的，转动物体是在做匀速转动。这时半径 OP 转过的角 θ 与所用的时间 t 的比是个定值，叫做匀

速转动物体的角速度，通常用符号 ω 表示。因此匀速转动物体的角速度公式可以表示为

$$\omega = \frac{\theta}{t}。$$

在国际单位制中， ω 的单位是弧度 (rad)。1rad 是弧长为圆半径的一段圆弧所对的圆心角 (图 6-8)。可见，在半径为 r 的圆中，角 θ 的弧度数就等于它所对的弧长与半径的比，即

$$\theta = \frac{s}{r}。$$

因为整个圆周长是半径的 2π 倍，所以周角 360° 就等于 2π rad，或 $6.28\dots\text{rad}$ 。即

$$1\text{rad} = \frac{360^\circ}{2\pi} = 57.3^\circ。$$

在国际单位制中，角速度 ω 的单位是 rad/s，读作“弧度每秒”。

匀速转动物体上的质点都在做匀速圆周运动。它们具有相同的角速度 ω ，且 ω 是个定值。怎样从已知的匀速转动物体的角速度计算出该转动物体上某一质点 P 的速度呢？

假设质点 P 距转轴的半径为 r ，由于质点 P 所转过的弧长

$$s = r\theta，$$

而质点 P 做匀速圆周运动的速度

$$v = \frac{s}{t} = r \frac{\theta}{t}，$$

所以质点 P 做匀速圆周运动的速度

$$v = \omega r。$$

为了区别于角速度，上述速度 v 又可称为线速度。上述公式表明：在匀速转动物体上，距转轴越远的点，作匀速圆周运动的半径越大，线速度也越大。

[例题 6.2] 一汽车发动机的曲柄每分钟转 2400 周，求：

(1) 曲柄转动的周期与角速度；

(2) 距转轴 $r=0.2\text{m}$ 点的线速度。

解 (1) 由于曲柄每秒钟转 $\frac{2400}{60}$ 周，周期 T 为 $\frac{1}{40}\text{s}$ ；而每转一周

为 2π rad，因此曲柄转动的角速度

$$\omega = \frac{2\pi}{1/40} \text{rad/s} = 251\text{rad/s}；$$

(2) 已知 $r=0.2\text{m}$ ，因此这一点的线速度

$$v = r\omega = 251 \times 0.2\text{m/s} = 50.2\text{m/s}。$$

由上可知匀速转动物体的角速度与周期之间的关系是

$$\omega = \frac{2\pi}{T}。$$

6.3 向心力

你观看过田径运动会上的链球比赛吗(图 6-9)? 运动员为了使链球有一个很大的速度, 拉着链子的一端使系在链子另一端的链球不断地作圆周运动, 链球越转越快, 突然一松手, 链球就沿着圆周的切线方向飞出。那么, 为什么运动员一松手, 链球就不再继续作圆周运动呢? 物体作圆周运动的条件是什么呢?

实验 6.2

细绳的一端系着一个轻质小球, 用手拉住细绳的另一端使小球在作匀速圆周运动(图 6-10)。

[观察]

1. 细绳对小球的拉力方向与速度方向存在什么关系?

2. 当拉力突然消失, 小球还继续作匀速圆周运动吗?

上述实验表明, 物体作匀速圆周运动的条件是受到一个与物体的速度方向垂直、始终指向圆心的力的作用, 这个力叫做向心力。

向心力的作用对物体速度的大小并没有影响, 只是拉住物体使它不断改变速度方向, 从而使物体保持在圆轨道上运动。

【讨论】

任何作匀速圆周运动的物体都受到向心力的作用, 那么

(1) 用线操纵航模飞机在水平面上作匀速圆周运动时(图 6-11), 它所受的向心力是谁提供的?

(2) 赛车沿圆弧形路面急转弯时(图 6-12), 它所受的向心力是谁提供的?

(3) 汽车通过凸形桥面时(图 6-13), 它所受的向心力又是谁提供的?

通过讨论可以看出: 作匀速圆周运动的物体必须要有向心力。重力、弹力、摩擦力或者这些力的合力都可以作为向心力。这就是说, 作匀速圆周运动的物体所受的合外力一定是指向圆心的。

6.4 探究向心力的大小

赛车时, 经常会看到有些赛车因速度过大, 以致在弯道处拐不过弯来而冲出跑道, 这说明物体作匀速圆周运动时需要有一定大小的向心力, 如果物体没有获得足够的向心力, 就会脱离圆周轨道。

那么, 物体在作匀速圆周运动时, 它所需的向心力的大小跟哪些因

素有关呢？

实验 6.3

〔目的〕探究作匀速圆周运动的物体所需向心力的大小与哪些因素有关。

〔器材〕向心力实验器、弹簧秤、天平。

图 6-14 是向心力实验器的结构示意图，它由竖直的转轴、导杆、配重、圆柱体、弹簧和半径指示器等构成。当转轴匀速转动时，固定在轴上的弹簧拉住圆柱体，使圆柱体作匀速圆周运动。向心力就是弹簧对圆柱体的拉力。

〔步骤〕

1. 把向心力实验器固定在桌边，用天平称出圆柱体的质量，按选定的半径调好指示器缺口中心位置。再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，并保持导杆两边平衡。

2. 用手指捻动转轴，使圆柱体转动起来。通过测定转动周期可以算出匀速圆周运动的角速度。

3. 待圆柱体停止转动后，使它静止在指示器上方，用弹簧秤把它钩住并水平拉开，使圆柱体下的凸柱对准指示器缺口。这时弹簧秤的读数就等于实验器上弹簧对它的拉力，即圆柱体所受的向心力。

4. 控制半径 r 和角速度 不变，改变圆柱体质量 m ，分别做两次实验。

5. 控制圆柱体质量 m 和角速度 不变，选择不同的半径 r ，分别做两次实验。

6. 控制圆柱体质量 m 和半径 r 不变，用不同的角速度，分别做两次实验。

〔结论〕通过上述实验可以知道，物体在作匀速圆周运动时：

1. 如果物体的角速度不变，半径不变，质量越大，所需的向心力

_____；

2. 如果物体的质量不变，角速度不变，半径越大，所需的向心力

_____；

3. 如果物体的质量不变，半径不变，物体的角速度越大，所需的向心力_____。

进一步的精确实验表明，当物体作匀速圆周运动时，它所受到的向心力大小与物体的质量成正比，与角速度的平方成正比，与半径成正比。即向心力 F 为

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

式中 m 是做匀速圆周运动物体的质量， ω 是物体的角速度， r 是物体作匀

速圆周运动的半径。

在上式中用 $v=\omega r$ 代入，可以得出向心力 F 与线速度 v 之间的关系。
即

$$F = m \frac{v^2}{r}。$$

【讨论】

在上述两个公式中，向心力 F 既与圆周半径 r 成正比，又与圆周半径 r 成反比。究竟成正比还是成反比呢？

6.5 向心加速度

在匀速圆周运动中，物体运动速度的大小保持不变，那么作匀速圆周运动的物体有没有加速度呢？匀速圆周运动速度的大小虽然保持不变，方向却时刻在改变，因此作匀速圆周运动的物体具有加速度。

从牛顿第二定律可知，物体的加速度是由外力引起的。由于匀速圆周运动物体需要向心力的作用，这就表明匀速圆周运动物体的加速度是在向心力的方向上。通常把这个加速度叫做向心加速度。向心加速度的方向始终与速度的方向垂直，它只描述物体运动速度方向变化的快慢程度，并不描述运动速度大小的变化快慢程度。

向心加速度可从向心力公式推出，因为向心力

$$F = m\omega^2 r, \text{ 或 } F = m \frac{v^2}{r},$$

所以向心加速度

$$a = \frac{F}{m} = \omega^2 r, \text{ 或 } a = \frac{F}{m} = \frac{v^2}{r},$$

式中 ω 是角速度， v 是线速度， r 是圆周半径。因此上式表明：匀速圆周运动的向心加速度在半径一定时，与它的角速度平方成正比，与它的线速度的平方成正比。在角速度一定时，向心加速度与圆周半径成正比；在线速度一定时，与圆周半径成反比。

[例题 6.3] 旋转餐厅的运动周期是 105min，坐在离转轴 2.4m 处顾客的线速度和角速度各是多大？他随餐椅一起作匀速圆周运动的向心加速度又是多大？

解 旋转餐厅的周期 $T=105\text{min}$ ，顾客作匀速圆周运动的半径 $r=2.4\text{m}$ ，则顾客运动的速度和向心加速度为

$$v = \frac{2\pi r}{T} = \frac{2 \times 3.14 \times 2.4}{105 \times 60} \text{ m/s} = 2.4 \times 10^{-3} \text{ m/s},$$

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{2.4 \times 10^{-3}}{2.4} \text{ rad/s} = 1.0 \times 10^{-3} \text{ rad/s},$$

$$a = \omega^2 r = (1.0 \times 10^{-3})^2 \times 2.4 \text{ m/s}^2 = 2.4 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2。$$

【讨论】

如果这位顾客的质量是 50kg，需要的向心力多大？顾客在旋转餐厅里能坐在餐椅上观光、就餐而不会往边缘的窗台移动，你能解释这个现象吗？

[例题 6.4] 水平转台上有两物体 A、B 随转台转动。它们到转轴的距离之比为 5 : 2，求 A、B 的向心加速度之比。

解 A、B 由于随转台一起转动，具有相同的角速度 ω ，因此它们的向心加速度之比

$$\frac{a_A}{a_B} = \frac{\omega^2 r_A}{\omega^2 r_B} = \frac{r_A}{r_B} = \frac{5}{2}。$$

[例题 6.5] 要使一个质量为 3kg 的物体在半径为 2m 的圆周上以 4m/s 的速度作匀速圆周运动。求物体所需的向心力和向心加速度的大小。

解 已知 $m=3\text{kg}$ ， $r=2\text{m}$ ， $v=4\text{m/s}$ ，物体所需的向心力和向心加速度为

$$F = m \frac{v^2}{r} = 3 \times \frac{4^2}{2} \text{N} = 24\text{N}，$$

$$a = \frac{v^2}{r} = \frac{4^2}{2} \text{m/s}^2 = 8\text{m/s}^2。$$

或者用牛顿第二定律求出

$$a = \frac{F}{m} = \frac{24}{3} \text{m/s}^2 = 8\text{m/s}^2。$$

【讨论】

如果物体所受的向心力突然消失，物体将如何运动？如果物体所受的合外力大于或小于它所需的向心力时，物体又将如何运动？

6.6* 离心现象

图 6-15 是一台能使湿衣服脱水的家用脱水器。它的主要结构是带有出水口的圆筒 A，里面套着一个有网孔的转筒 B（图 6-16）。把湿衣服放进筒 B，让筒 B 快速旋转，湿衣服中的水分就从网孔中飞出，使衣服脱水。湿衣服中的水滴在旋转中逐渐远离圆心的现象，叫做离心现象。

离心现象是怎样发生的呢？

实验 6.4

将物块放在转盘上，使转盘转动。当转盘的角速度逐渐增大时，观察放在转盘上的物块所发生的现象。

〔结果〕当转盘的角速度较小时，物块_____；

当转盘的角速度增大到一定程度时，物块_____；

怎样解释上述实验结果呢？

首先分析转盘上物块的受力情况。当转盘静止时，物块在竖直方向上受到重力和支持力，它们相互平衡。转盘开始转动后，质量为 m 的物块开始随转盘做圆周运动。物块所需的向心力 $m\omega^2 r$ 是由转盘与物块间的静摩擦力提供的。当角速度增大时，所需的向心力也随之增大。但物块与转盘间静摩擦力的增大是有限度的。当静摩擦力不足以提供物块所需的向心力时，物块就不再做圆周运动而发生离心现象。可见做匀速圆周运动的物体所发生的离心现象是由于所受合外力突然消失或不足以提供所需的向心力造成的。

离心现象在技术上具有广泛的应用。通常把利用离心现象的机械叫做离心机械。在医院和医务室里常用的电动离心计可以把使用过的体温计内的汞甩回汞泡内。图 6-17 就是这种离心计的原理示意图。先把使用过的体温计放在转轴支架两端的容器内，然后让电动机带动转轴快速旋转，体温计内的汞因离心现象而被甩回汞泡内。

图 6-18 是离心式飞锤的结构示意图。在转轴上端通过上拉杆装有两个重锤——飞锤。上拉杆可在竖直面内绕轴上下摆动。在转轴高速旋转时，飞锤产生离心运动倾向，将上拉杆张开一定角度，并通过下拉杆使套在转轴上的滑动套筒向上移动一段距离。转轴转得越快，上拉杆张角越大，套筒向上移动距离越大，即套筒向上移动距离的大小与转轴的旋转快慢有着对应的关系。因此离心式飞锤具有测速、调速和限速等多方面的用途。例如在热电站里主要用汽轮机带动发电机发电，但因外电路用电情况的变化会影响发电机转速，进而影响发电质量。因此发电时就要求汽轮机的转速能自动调节，保证在用电量变化的情况下发电机转速仍能保持稳定。采用离心式飞锤就可以随机轴转速的增减启动调节进入汽轮机的蒸汽流量，保证转速不变。当机轴因负载减小而转速增大时，飞锤转动加快，套筒上拉，通过杠杆将蒸汽阀门向下关小，使进入汽轮机的蒸汽流量和压强减小，机轴的转速下降到额定的数值，达到稳定转速的效果（图 6-19）。

离心现象有时会造成危害，需要防止。例如汽车、火车在转弯时若速度超过允许范围，就会因离心现象而造成严重交通事故。高速转动的砂轮，若转速过大，便构成砂轮的砂粒间的作用力不足以提供其所需的向心力，就会引起砂轮某些组成部分的离心现象而造成事故。

6.7 万有引力定律

关于天体的运动，历史上曾有过两种不同的说法。早在公元 2 世纪，希腊天文学家托勒玫提出“地心说”，认为地球位于宇宙中心静止不动，而太阳、月球以及其他星体都是绕地球运动的。直到 16 世纪初，波兰天

文学家哥白尼（1473~1543）在经过 40 年的天文观测和研究的基础上，提出了“日心说”，认为地球和其他行星都在自转，并在各自的圆周轨道上围绕太阳公转。

哥白尼的“日心说”批判了为宗教神学服务的“地心说”，正确地反映了客观世界的规律性，解决了不少有关航海方面的实际问题。它第一次沉重打击了教会的统治，宣布了自然科学的独立，这是自然科学发展史上的一次革命。

到了 17 世纪，德国天文学家开普勒（1571~1630）从他的老师、丹麦天文学家第谷（1546~1601）遗留给他的大量天文资料中，经过分析、归纳，发现行星围绕太阳运动的轨道是近似于圆的椭圆。在近似的计算中，可以认为行星都在以太阳为圆心的圆周上作匀速圆周运动。

牛顿在开普勒研究的基础上经过进一步研究后指出，行星围绕太阳作圆周运动需要的向心力，是太阳对行星的引力所提供的。牛顿把天体间的引力和地球吸引物体坠落的力联系起来，得出了一切有质量的物体之间都具有相互吸引力的结论，这个相互作用的力叫做万有引力。

任何物体都是相互吸引的，两物体间引力的大小跟物体质量的乘积成正比，跟它们的距离平方成反比。这就是万有引力定律，用公式表示为

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

式中 F 是万有引力， m_1 、 m_2 分别是两个相互吸引的物体的质量， r 是它们之间的距离，而 G 是一个比例常数，叫做万有引力恒量。万有引力恒量

$$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2,$$

它在数值上等于两个质量都是 1kg 的质点相距 1m 时的万有引力。

万有引力定律中两个物体间的距离，对于相距很远的、可以看作质点的物体，就是指两个质点间的距离；对于均匀球体，就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之一。它把地面上物体运动的规律与天体运动的规律统一起来，对以后物理学与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。

在牛顿发现万有引力定律后 100 多年，由英国物理学家卡文迪许（1731~1810）在 1798 年较准确地测出了万有引力恒量的数值。他设计了一个扭秤（图 6-20），巧妙地解决了因万有引力值极小而难以精确测量物体间相互吸引力的困难，用实验方法证实了万有引力定律的正确性，并首次测出了万有引力恒量的数值，计算出地球的质量和密度。

在 19 世纪初，人们对 1781 年发现的太阳系的第七颗行星——天王星运动的观测和理论计算之间存在着明显的偏差。于是就有人推测，在天王星轨道外可能还存在其他行星。英国大学生亚当斯（1819~1892）

在 1843 到 1845 年，法国天文学家勒维烈（1811~1877）在 1845 年，各自独立地根据万有引力定律进行了计算，并预言在天王星轨道之外的一颗未知行星的质量和轨道。1846 年柏林天文台的加勒（1812~1910）终于在 9 月 23 日晚在预定的位置发现了这颗新行星——海王星。海王星的发现被认为是牛顿引力理论的伟大胜利。太阳系的第九颗行星——冥王星也是运用同样的方法在 1930 年 3 月 14 日发现的（图 6-21）。

[例题 6.6] 某天文台测得某行星的一颗卫星沿半径为 R 的圆周轨道绕行星转动的周期为 T 。求卫星的向心加速度和行星的质量。

解 卫星所受的向心力是由行星对卫星的万有引力提供的。设卫星的向心加速度为 a ，行星的质量为 M ，卫星的质量为 m ，可以列出

$$G \frac{Mm}{R^2} = ma,$$

即卫星的向心加速度

$$a = \frac{GM}{R^2}。$$

又根据向心加速度与角速度之间的关系可以列出

$$a = \omega^2 R = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 R,$$

代入得

$$\frac{GM}{R^2} = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 R,$$

可知行星的质量

$$M = \frac{4\pi^2 R^3}{GT^2}。$$

[例题 6.7] 一热气球上升到离地面 20km 处，求这一高处的重力加速度。

解 设这一高处的重力加速度为 g' ，则质量为 m 的物体在这一高处所受的重力就等于地心对它的万有引力。于是可以列出

$$G \frac{Mm}{(R+h)^2} = mg',$$

式中 h 为物体离地面的高度，而 R 为地球半径， M 为地球质量。

对于质量为 m 的物体在地面上所受的重力等于地心对它的万有引力，即

$$G \frac{Mm}{R^2} = mg,$$

两式相除可得

$$\frac{g'}{g} = \frac{R^2}{(R+h)^2}。$$

已知地球半径 $R=6400\text{km}$ ， $h=20\text{km}$ ，代入得离地面 20km 高处的重力加速度

$$g' = \frac{6400^2}{(6400 + 20)^2} g = 0.994g$$

$$= 9.74 \text{ m/s}^2。$$

6.8 人造地球卫星

20 世纪 70 年代的第一个春天，我国成功地发射了第一颗“东方红一号”（图 6-22），它宣布我国已豪迈地进入了发展空间技术的新阶段。以后的 20 年间，我国共成功地发射了 30 余颗不同类型的人造卫星。其中 1990 年 4 月 7 日运用我国“长征三号”运载火箭发射的“亚洲一号”通信卫星，受到了亚洲各国的欢迎。

6.8.1 第一宇宙速度

人造卫星绕地球运行所需的向心力就是由万有引力提供的。

发射人造卫星时要达到多大的运行速度卫星才不会落到地面上来呢？

为简单起见，我们假定卫星的轨道是以地球中心为圆心的圆周。人造卫星绕地球运行的向心力就是地球对它的万有引力。若人造卫星的质量是 m ，与地心的距离 R 是地球半径 r 与离地高度 H 的和（图 6-23），运行速度为 v ，地球质量为 M ，就可以有下列等式：

$$G \frac{mM}{R^2} = m \frac{v^2}{R}，$$

所以

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R}}。$$

对于靠近地面运行的人造卫星，可以认为 $R \approx r$ ，取 $6.4 \times 10^6 \text{ m}$ 。若 M 取 $6.0 \times 10^{24} \text{ kg}$ ，则卫星的速度

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R}} = \sqrt{\frac{6.67 \times 10^{-11} \times 6.0 \times 10^{24}}{6.4 \times 10^6}} \text{ m/s} = 7.9 \times 10^3 \text{ m/s}。$$

为了便于计算，也可以按照地面上物体受到的重力进行推算

$$mg = m \frac{v^2}{r}，$$

$$v = \sqrt{rg} = \sqrt{6.4 \times 10^6 \times 9.8} \text{ m/s} = 7.9 \times 10^3 \text{ m/s}。$$

从上面两种计算可以得到相同的结果。这个速度叫做第一宇宙速度，也称为环绕速度。

* [例题 6.8] 我国在 1970 年 4 月 24 日成功地发射了第一颗人造地球卫星，其近地点为 439km，远地点为 2384km。求卫星的运转周期。

解 根据人造卫星在离地高度为 h 处作匀速圆周运动所受的向心力由万有引力提供的关系可以列出

$$G \frac{Mm}{(R+h)} = m\omega^2(R+h) = m\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2(R+h),$$

所以
$$T^2 = \frac{4\pi^2(R+h)^3}{GM},$$

$$T = 2\pi(R+h) \sqrt{\frac{R+h}{GM}}.$$

今已知地球半径 $R=6.4 \times 10^6\text{m}$,

地球质量 $M=6.0 \times 10^{24}\text{kg}$,

平均高度 $h = \frac{439+2384}{2}\text{km} = 1.41 \times 10^6\text{m}$,

代入得人造卫星的运转周期

$$\begin{aligned} T &= 2\pi(6.4 \times 10^6 + 1.41 \times 10^6) \sqrt{\frac{6.4 \times 10^6 + 1.41 \times 10^6}{6.67 \times 10^{-11} \times 6.0 \times 10^{24}}} \text{s} \\ &= 6860\text{s} \\ &= 114.3\text{min}. \end{aligned}$$

6.8.2 人造地球卫星的应用

人造地球卫星的种类很多。目前正广泛应用的有通信卫星、气象卫星、测地卫星、导航卫星、科学实验卫星等。

实践证明较有价值的通信卫星是地球同步通信卫星。通信卫星位于地球赤道上空约 36000km 的轨道上，与地球保持相对静止。只要向赤道上空等距离发射三颗地球同步卫星，就可以解决环球通信的问题。我国使用通信卫星后（图 6-24），拉萨、乌鲁木齐等祖国边远地区的居民均可直接收看以通信卫星做中继站转发的中央电视台的节目。

气象卫星是用于气象观测和气象预报的人造卫星。从气象卫星上获取的云图（图 6-25）和其他气象资料，对工农业生产、航空、航海、捕鱼及日常天气预报是卓有成效的。

测地卫星使用的领域包括土地资源调查及监测，地形测绘，农作物长势及产量预估，火山、地震预报，洪水监测和预报，渔区测定等等。

应用科学实验卫星可以进行空间研究。1990 年 10 月 5 日我国发射的一颗科学探测卫星，在西安卫星测控中心的测量控制下，经过 8 天的太空遨游，于 10 月 13 日 12 时顺利返回地面。

我国的航天事业自 1970 年首次发射人造地球卫星以后，经过广大航天工作者的努力与全国各行各业的支援和帮助，取得了空间物理研究、遥感技术、返回技术、通信、广播、电视传输以及其他科学领域中多学科的研究成果，在我国社会主义建设中发挥了重要作用。我国的运载火

箭技术、卫星遥感技术和卫星通信技术已从试验阶段进入实用阶段，开始为我国社会主义现代化建设服务。目前卫星回收、一箭多星、卫星测控、高能低温燃料火箭以及地球同步卫星发射等技术，已进入国际先进行列，我国已成为世界空间技术强国之一。

本章学习要求

1. 理解匀速圆周运动；理解匀速圆周运动的线速度、角速度以及它们之间的关系。
2. 理解匀速圆周运动的周期。理解线速度、角速度和周期之间的关系。
3. 理解向心力。
4. 理解向心加速度。
5. 理解万有引力定律。
6. 知道人造地球卫星。知道第一宇宙速度。

7 能和功

物体的运动形式是多种多样的，处于不同运动形式的物体具有不同形式的能，如机械能（动能、势能）、内能、电能、原子核能等。不同形式的能在一定条件下是可以相互转化的。然而，能量的转化要通过做功来实现。图 7-1 说明能量之间的转化关系。

发电厂里，煤燃烧时锅炉内产生高压高温蒸汽，这是化学能转化为内能；

高压高温蒸汽，推动汽轮机的叶轮转动，这是内能转化为机械能；

汽轮机的叶轮通过转轴带动发电机的转子转动发出电来，这是机械能转化为电能；

电通过电网输送到家庭、工厂、农村……，使电熨斗发热、机床运转等，这是电能转化为内能和机械能等。

本章主要研究机械能和功之间的关系。

7.1 动能的变化和功

我们知道，物体由于机械运动而具有的能叫做动能。

图 7-2 中，枪膛里的子弹原来是静止的，子弹的动能为零。发射后，子弹以很大的速度离开枪口，这时它具有一定的动能。那么，子弹的动能是怎样获得的呢？弹壳中的火药燃烧时，化学能转化为气体的内能，子弹的动能是由气体的内能转化而来的。火药燃烧生成的气体对子弹产生很大的推力，推动子弹在枪膛中发生了一段位移。我们已经知道，一个物体如果受到力的作用并在力的方向上发生了一段位移，这个力便对物体做了功。可见，能量转化的过程总是与做功的过程联系着的，子弹获得的动能是火药燃烧后所产生的气体的推力对子弹做功的结果。

子弹射入沙袋后，由于沙粒对子弹的阻力作用，这个阻力的方向与子弹的运动方向相反，使子弹发生了一段位移后速度减小为零。在这过程中，子弹的动能转化为子弹和沙粒的内能。可见，子弹消耗的动能是阻力对子弹做功的结果。

子弹在射入沙袋之前，可认为作的是匀速直线运动，动能没有变化，因为在这过程中没有力对子弹做功。人背着笨重的箱子站着不动（图 7-3），箱子的能量没有变化，是由于人对箱子没有做功。

综上所述，物体动能的变化是外力对物体做功引起的。通常我们把能使物体增加动能的作用力叫做动力，动力所做的功称之为正功；使物体减小动能的作用力叫做阻力，阻力所做的功称之为负功。

7.2 物体动能变化的量度——功

从上节我们已经知道，物体动能的获得是外力对物体做功的结果，现在我们进一步来研究两者之间的关系。

设有一原来静止的木块，它的质量为 m ，受到恒力 F 的作用，发生了一段位移 s 后，木块得到的速度为 v 。推力对木块所做的功

$$W = Fs,$$

因为 $F = ma$ ， $s = \frac{v^2}{2a}$ ，

所以 $W = Fs = ma \frac{v^2}{2a} = \frac{1}{2}mv^2$ 。

在物理学中，我们把 $\frac{1}{2}mv^2$ ，即物体的质量与速度平方的乘积的一半叫做物体的动能，用 E_k 表示，即

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2。$$

动能只有大小，没有方向，是标量。功也是标量，在国际单位制中，功的单位名称是焦〔耳〕，单位符号是 J。因为

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

所以动能与功的单位是相同的。

[例题 7.1] 我国发射的第一颗人造卫星的质量是 173kg，在轨道上运行速度为 7.2km/s，求卫星的动能。

解 由于 $m=173\text{kg}$ ， $v=7.2\text{km/s}=7200\text{m/s}$ 。卫星的动能

$$\begin{aligned} E_k &= \frac{1}{2}mv^2 \\ &= \frac{1}{2} \times 173 \times 7200^2 \text{J} \\ &= 4.48 \times 10^9 \text{J}。 \end{aligned}$$

[例题 7.2] 物体从高处自由落下，求物体在第 1s 末与第 2s 末动能之比。

解 设物体在第 1s 末与第 2s 末时的动能分别为 E_{k1} 与 E_{k2} 。

$$E_{k1} = \frac{1}{2}mv_1^2, \quad E_{k2} = \frac{1}{2}mv_2^2,$$

因此

$$\frac{E_{k1}}{E_{k2}} = \frac{\frac{1}{2}mv_1^2}{\frac{1}{2}mv_2^2} = \frac{v_1^2}{v_2^2}。$$

由于自由落体的末速 $v=gt$ ，得

$$\frac{E_{k1}}{E_{k2}} = \frac{(gt_1)^2 t_1^2}{(gt_2)^2 t_2^2}。$$

已知

$$t_1=1\text{s}, t_2=2\text{s},$$

动能比

$$\frac{E_{k1}}{E_{k2}} = \frac{1}{4}。$$

如图 7-4 所示，在光滑的水平面上一个质量为 m 的物体运动到 A 点时的速度为 v_0 ，此时受到一个与速度方向一致的水平恒力 F 的作用，经过一段位移 s 到达 B 点时物体的速度为 v_1 。在上述过程中，恒力 F 对物体做的功

$$W=Fs,$$

因为 $F = ma, s = \frac{v_1^2 - v_0^2}{2a},$

所以 $W = Fs = ma \frac{v_1^2 - v_0^2}{2a} = \frac{1}{2}mv_1^2 - \frac{1}{2}mv_0^2。$

式中的 $\frac{1}{2}mv_0^2$ 叫做物体的初动能； $\frac{1}{2}mv_1^2$ 叫做物体的末动能；

$\frac{1}{2}mv_1^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$ 叫做物体的动能的变化量。用 ΔE_k 表示。从式中可以

看出，外力对物体所做的功等于物体动能的变化，即

$$W = \Delta E_k。$$

由此可见，物体动能的变化可以用外力对它做功的多少来量度。

[例题 7.3] 汽车的质量是 1200kg，在光滑水平的道路上行驶，当速度从 5m/s 增加到 15m/s 的过程中，发动机对汽车做了多少功？（设阻力可忽略不计）

解 由于 $m=1200\text{kg}, v_1=5\text{m/s}, v_2=15\text{m/s}$ ，发动机对汽车做的功就等于汽车动能的变化量，即

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 \\ &= \left(\frac{1}{2} \times 1200 \times 15^2 - \frac{1}{2} \times 1200 \times 5^2\right)\text{J} \\ &= 1.2 \times 10^5\text{J}。 \end{aligned}$$

如果物体所受外力的方向跟物体运动的方向不在一直线上而成某一角度，怎样计算外力对物体所做的功呢？

如图 7-5 所示，在水平面上有一个质量为 m 的静止物体，在恒力 F 的作用下开始运动。已知力 F 与水平面成 ρ 角，通过位移 s ，力 F 对物体做了多少功？

我们可以先把力 F 分解成一个水平的分力 $F_x = F\cos\rho$ 和一个竖直的分力 $F_y = F\sin\rho$ ，即把 F_x 与 F_y 两个力来等效替代力 F ，则 F_x 与 F_y 共同对物体所做的功跟 F 对物体所做的功是等效的。由于物体在 F_y 方向上没有位

移，所以 F_y 对物体不做功。 F_x 对物体做功，所以力 F 对物体所做的功

$$W = F_x s = F \cos \alpha \cdot s。$$

从以上的分析可以得出功的一般计算公式

$$W = F s \cos \alpha，$$

式中 α 是力 F 与物体位移 s 之间的夹角。

由公式 $W = F s \cos \alpha$ 可知：当 $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ ， $W > 0$ ，外力 F 对物体作正功；当 $\alpha = 90^\circ$ ， $W = 0$ ，外力 F 对物体不做功；当 $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ ， $W < 0$ ，外力 F 对物体作负功。

[例题 7.4] 质量为 5kg 的物体，在光滑水平面上以 8m/s 的速度运动，当受到一个与位移方向成 60° 角、大小为 20N 的力作用后，继续沿直线运动 9m 时物体的速度是多少？又，如果力的方向与位移方向成 120° 角，发生相同的位移时，物体的速度又是多少？

解 根据 $W = F s \cos \alpha$ ，

$$W = E_{k2} - E_{k1} = \frac{1}{2} m v_t^2 - \frac{1}{2} m v_0^2$$

得

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

$$= \frac{1}{2} m v_0^2 + F s \cos \alpha$$

$$= \left(\frac{1}{2} \times 5 \times 8^2 + 20 \times 9 \times \cos 60^\circ \right) \text{J}$$

$$= (160 + 90) \text{J}$$

$$= 250 \text{J}，$$

所以
$$v_t = \sqrt{\frac{2E_{k2}}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 250}{5}} \text{m/s} = 10 \text{m/s}。$$

又力的方向与位移方向成 120° 角时

$$E'_{k2} = \frac{1}{2} m v_0^2 + F s \cos 120^\circ$$

$$= \left[\frac{1}{2} \times 5 \times 8^2 + 20 \times 9 \times \left(-\frac{1}{2}\right) \right] \text{J}$$

$$= 70 \text{J}，$$

所以
$$v'_t = \sqrt{\frac{2E'_{k2}}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 70}{5}} \text{m/s} = 5.3 \text{m/s}。$$

7.3 功率

一块农田，用拖拉机去耕所用的时间要比用牛去耕所用的时间少得多；建筑工地上把砖送到楼顶，相同时间内用起重机比用人工送的砖多得多（图 7-6）。

在上述的例子中，拖拉机与牛哪一个做功快？起重机与人谁做功快？

我们用功率来描述物体做功的快慢，功与完成这些功所用的时间的比叫做功率。

如果用 W 表示功， t 表示做功所用的时间，那么功率

$$P = \frac{W}{t}。$$

在国际单位制中，功率的单位名称是瓦〔特〕，单位符号是 W 。1W 的功率就是在 1s 时间里能完成 1J 的功， $1W=1J/s$ 。

[例题 7.5] 马拉着车在 1h 内前进 5km，如果马的拉力为 324N，求马拉车的功率。

解 由于 $F=324N$ ， $s=5000m$ ， $t=1h=3600s$ 。

因为 $P = \frac{W}{t}$ ， $W = Fs$ ，

所以马拉车的功率

$$\begin{aligned} P &= \frac{W}{t} = \frac{Fs}{t} \\ &= \frac{324 \times 5000}{3600} W = 450W。 \end{aligned}$$

现在来思考一个问题，为什么机动车上桥时的速度要比在平地上行驶时的速度小得多？

为了回答这个问题，我们把功率的公式变换成

$$P = \frac{W}{t} = \frac{Fs}{t} = Fv。$$

机动车的最大输出功率 P 是一定的，从上式中可以看出，牵引力 F 与速度 v 成反比。因为上桥时的牵引力比平地上行驶时的牵引力大得多，所以上桥时的速度要比在平地上行驶时的速度小得多。

如果公式 $P=Fv$ 中， v 是平均速度，那么 P 是平均功率；如果 v 是瞬时速度，则 P 是瞬时功率。在实际问题中，一个人或一台机器所输出的功率不可能是绝对均匀的，往往是变化着的，在某一时刻所输出的功率就是瞬时功率。

下面来讨论几个问题：

(1) 为什么同样一辆机动车，在满载时的行驶速度一般比空载时小得多？

(2) 在公式 $P=Fv$ 中， P 保持不变时，是否可将作用力无限地减小，以使运动物体的速度无限地增大。你认为在实际中可能做到吗？

(3) 怎样估测人上楼时的功率，你认为需要估测哪些物理量，怎样进行计算呢？

功率反映了机器的一种主要技术性能，平时我们所说的某一机器的功率是指这一机器在正常工作情况下的最大输出功率，又叫做额定功率。

功率有大有小，例如，液晶显示数字电子手表耗电功率为 $1.0 \times$

$10^{-5}W$ ，而火箭起动的功率可达 $7.35 \times 10^{12}W$ ，后者是前者的 7.35×10^{17} 倍。

解放前，我国工业十分落后，不会生产汽车，更不会生产飞机、轮船、大型水电站和火箭等。解放后，在党的领导下，走社会主义道路，我国工业得到了迅速的发展，我们可以从下面的功率表中得到一个概貌的了解。

普通盒式录音机耗电功率	约 2.5W
摩托车（50 型）	1.6 ~ 1.8kW
国产手扶拖拉机（不同型号）	2.2 ~ 8.8kW
红旗 80 型拖拉机的发动机	60kW
国产小轿车（不同型号）	66 ~ 162kW
国产大客车（不同型号）	70 ~ 118kW
国产 300t 大平板车	294kW
国产万吨级远洋货轮	7000 ~ 23000kW
我国 1981 年已运行的原子反应堆	125000kW
长江葛洲坝水电站总发电功率	2700000kW

7.4 势能

弹簧枪中被压缩了的弹簧在恢复原状过程中，弹簧的弹力能对子弹做功（图 7-7），说明压缩了的弹簧具有能量。在物理学中，把物体由于发生弹性形变而具有的能量叫做弹性势能。

图 7-8 (a)、(b)、(c) 所示的是发生弹性形变的物体具有弹性势能的例子。你能说出图中什么物体具有弹性势能，它将对什么物体做功吗？

在力学中，除了弹性热能外，还有其他形式的热能吗？现在再来看一个例子，举高了的重锤落下时能对桩做功（图 7-9），说明举高了的重锤具有能量，这种能量由重锤对地球的相对位置决定的。在物理学中，由物体与地球间的相对位置决定的能量叫做重力势能。其实，重力势能是物体和地球所共有的，为了叙述方便，可以说成是某一物体的重力势能。悬挂着的电灯、高山上的积雪、天空中的飞鸟等都具有重力势能。

物体重力势能的变化，也可用外力对它所做的功来量度。

质量为 m 的物体在匀速举高的过程中，外力 F 的大小等于物体所受的重力 G ， s 是举高物体所通过的竖直位移 h ，由于 $G=mg$ ，则

$$W=Fs=mgh,$$

物体的重力势能常用 E_p 来表示

$$E_p=mgh。$$

重力势能是标量。在国际单位制中，物体的质量以 kg 为单位，重力加速度以 m/s^2 为单位，高度以 m 为单位，重力势能的单位也是 J。

想一想，在图 7-10 中，站在地面上的人说电梯里的重物具有重力势能，而电梯里的人说重物的重力势能为零，哪一个人说得对？

重力势能计算式中的 h ，是相对于某个参考平面而言的，在参考平面上 $h=0$ ，选择不同的参考平面，物体的高度 h 也不同，物体的重力势能也就不同。所以物体的重力势能大小需要指明是对哪一个参考平面来说的。通常取地面为参考平面。

[例题 7.6] 在某乐园中学生乘滑车游乐。学生的质量为 50kg，当学生离开地面高 16m 时，学生的重力势能是多少？

解 根据重力势能公式 $E_p=mgh$ ，可以算出学生具有的重力势能

$$E_p=mgh=50 \times 9.8 \times 16J=7840J。$$

在物理学中，把动能、弹性势能、重力势能统称为机械能。

想想看，图 7-11 中，物体各具有什么形式的机械能？

重力做功有什么特点呢？我们来看下面的例子。

物体从离地面高度为 h 的斜面顶端 A 沿斜面 AC 和 AD 滑到地面（图 7-12），重力对物体各做了多少功呢？

沿斜面 AC 滑下时，重力做的功为

$$W_1=mgsin\theta_1 \cdot AC；$$

沿斜面 AD 滑下时，重力做的功为

$$W_2=mgsin\theta_2 \cdot AD，$$

因为 $ACsin\theta_1=h$ ， $ADsin\theta_2=h$ ，所以 $W_1=W_2$ 。

可以看出，物体不论沿哪一斜面滑下，重力所做的功都相同。还可以证明，物体沿任何曲线从同一高度滑下，重力所做的功总是相同的。因此，可以得到这样的结果：重力所做的功跟路径无关，只跟起点和终点的高度差有关。

由此可见，物体的高度 h 减少时，重力对物体作正功，此时物体的重力势能减小，且重力做多少正功，物体减少多少重力势能；物体的高度 h 增加时，重力对物体做负功，此时物体的重力势能增加，且重力对物体做多少负功，物体增加多少重力势能。

综上所述，动能的变化可以用外力做功的多少来量度，重力势能的变化可以用重力做功的多少来量度。可见，功是能的转化的量度。

7.5 机械能守恒定律

一个由细线悬挂着的小球，由位置 A 开始沿 ABCD 来回摆动（图 7-

13) , 取位置 B 为参考平面, 讨论以下几个问题:

- (1) 小球在位置 A 时具有哪些形式的机械能?
- (2) 小球在位置 B 时具有哪些形式的机械能?
- (3) 小球在位置 C 时具有哪些形式的机械能?
- (4) 小球在位置 D 时具有哪些形式的机械能?

小球在摆动过程中, 它的重力势能与动能在相互转换, 有多少重力势能转换成动能? 或者有多少动能转换成重力势能?

在图 7-14 中, 球 A 竖直上抛, 球 B 自由下落。现在来讨论几个问题:

- (1) 球 A 在竖直上升过程中, 重力是否做功? 做什么功? 哪些形式的机械能减小? 哪些形式的机械能增大?
- (2) 球 B 在自由下落过程中, 重力是否做功? 做什么功? 哪些形式的机械能减小? 哪些形式的机械能增大?

在只有重力做功时, 物体的动能与重力势能相互转换的多少, 可以用重力做功的多少来量度。重力做正功, 物体的重力势能减小, 动能增大; 重力做负功, 物体的重力势能增大, 动能减小。

[例题 7.7] 质量为 10kg 的物体, 从 20m 高处自由落下 (图 7-15), 运用已经学过的知识, 把下表填好。(g 取 10m/s²)

物体所在位置	动能 E_k (J)	重力势能 E_p (J)	动能与重力势能的和 ($E_k + E_p$) (J)
A			
B			
C			

由此可见, 在只有重力做功的情况下, 物体的动能和重力势能都发生了变化, 但它们的总量保持不变, 即

$$E_k + E_p = \text{恒量}。$$

总之, 在只有重力做功的情况下, 物体发生重力势能与动能的相互转化时, 机械能的总量保持不变。这一规律叫做机械能守恒定律, 是自然界重要的定律之一。

[例题 7.8] 物体的质量 $m=4\text{kg}$, 以 $v_0=3\text{m/s}$ 的初速沿倾角 $\theta=30^\circ$ 的光滑斜面底端 A 向上滑动, 经过 B 点后到 C 点时速度为零, 已知 $AB=0.5\text{m}$, g 取 10m/s^2 (图 7-16), 问:

- (1) 物体在 A 点时有多少动能? 多少势能? 多少机械能?
- (2) 物体在 B 点时有多少动能? 多少势能? 多少机械能?
- (3) 物体在 C 点时有多少动能? 多少势能? 多少机械能?

解 (1) 物体在 A 点时

动能 $E_{kA} = \frac{1}{2} m v_0^2 = \frac{1}{2} \times 4 \times 3^2 \text{J} = 18\text{J},$

势能 $E_{PA}=0$,
机械能 $E_A=E_{KA} + E_{PA}=18J + 0=18J$ 。

(2) 物体在 B 点时

$$h_B = AB \sin \theta = 0.5m \times \sin 30^\circ = 0.25m ,$$

$$\begin{aligned} v_B &= \sqrt{v_0^2 - 2g \sin 30^\circ \cdot AB} \\ &= \sqrt{3^2 - 2 \times 10 \times 0.5 \times 0.5} \text{m/s} \\ &= 2 \text{m/s} , \end{aligned}$$

动能 $E_{KB} = \frac{1}{2} m v_B^2 = \frac{1}{2} \times 4 \times 2^2 \text{J} = 8 \text{J} ,$

势能 $E_{PB} = mgh_B = 4 \times 10 \times 0.25 \text{J} = 10 \text{J} ,$

机械能 $E_B = E_{KB} + E_{PB} = (8+10) \text{J} = 18 \text{J}。$

在例题中可以看出，物体在除重力外没有其他力做功的情况下，机械能的总量保持不变。

(3) 物体在 C 点时

动能 $E_{KC}=0$,

根据机械能守恒定律

势能 $E_{PC} = E_C - E_{KC} = 18 \text{J} - 0 = 18 \text{J}。$

本章学习要求

1. 理解动能的概念。理解做功跟动能变化的关系。
2. 知道功是能的转化的量度。
3. 理解功的概念。
4. 理解功率的概念。
5. 知道弹性势能。
6. 理解重力势能的概念。理解重力做功跟重力势能变化的关系。
7. 理解机械能。
8. 理解动能和重力势能的相互转化与守恒。

8 振动和波

振动现象和波的现象在自然界中是广泛存在着的。向平静的水面投一颗石子，受冲击的水开始做向上、向下的往复运动而振动起来，但是振动并不停留在一处，而是以波的形式向四周传去，使离石子落水处较远的水面也振动起来。原来静止不动的水，随着波的传来而开始振动，表明振动和波是两种联系紧密的运动形式，振动可以产生波，而波中又伴随着振动。

这一章我们主要研究有关机械振动和机械波的一些基础知识。

8.1 简谐振动

树枝的随风摇曳，钟摆的来回摆动，都是往复运动。物体在某一平衡位置附近作往复运动叫做机械振动，简称振动。

振动是自然界里十分普遍的运动形式，一切发声的物体都在振动，有的振动比较简单，如音叉的振动，有的振动比较复杂，如钢琴的振动。图 8-1 是音叉振动的位移-时间图，又称振动图象。钢琴的振动图象如图 8-2 所示。那么机械振动是怎样产生的呢？下面通过实验来研究一种最简单、最基本的振动，即弹簧振子的振动。

实验 8.1

[目的] 研究弹簧振子振动的规律和产生条件。

[器材] 弹簧振子。

如图 8-3 所示，在一根水平的光滑金属杆上穿一根轻质螺旋弹簧，弹簧的一端固定，另一端和一个质量为 m 的带孔小球（振子）相连接，这样就构成了一个弹簧振子。

[步骤] 1. 观察振子静止在 O 点时的情况，分析振子受到哪些力的作用。

2. 用手将振子向右拉到 B 处，然后释放，观察振子的振动情况。

[结果] 1. 振子静止在 O 点时，受到_____和_____的共同作用，处于_____状态。

2. 振子由 B 到 O 作_____运动；由 O 到 C 作_____运动；由 C 到 O 作_____运动；由 O 到 B 作_____运动。

下面来分析是什么力促使振子不断地改变运动状态的。

振子被拉到 B 处后释放，受到指向 O 点弹簧弹力的作用，使振子向 O 点作加速运动；过了 O 点后弹簧被压缩，振子受到指向 O 点的弹力作用，振子作减速运动；到达 C 点时速度为零，振子在弹簧弹力的作用下返回

到 0 点，振子继续运动到 B 点时速度为零。振子就在平衡位置 0 点两侧作往复运动。

振子由 B 点开始运动，待再次回到 B 点时，振子就完成了一次全振动。在实验中，由于振子受到摩擦力的作用，所以来回振动几次就停下来了。

【讨论】

1. 振子回到 0 点时为什么不立即停下来？
2. 振子所作的运动是匀变速直线运动吗？为什么？

作往复运动的物体始终受到一个指向平衡位置的力的作用，这个力就叫做回复力。对于弹簧振子来说，这个回复力就是弹簧对振子的弹力，它的大小与弹簧的形变量，即振子的位移成正比，但与振子的位移方向总是相反的，即

$$F = -kx,$$

式中 F 是回复力， x 是对平衡位置的位移，而 k 是比例常数，对于弹簧振子来说， k 就是弹簧的劲度，负号表示回复力和位移的方向始终相反。回复力是机械振动的产生条件。像这种回复力与位移成正比，与位移方向始终相反的振动叫做简谐振动。

实验 8.2

〔目的〕研究单摆的振动。

〔器材〕单摆。

一根长的细线的下端拴一个小摆球，悬挂起来便构成一个单摆（图 8-4）。

- 〔步骤〕1. 观察单摆静止时的情况，分析摆球受到哪些力的作用。
2. 用手将摆球拉离平衡位置到 B 点释放，观察摆球的摆动情况。

〔结果〕1. 摆球静止在 0 点时，受到_____和_____的共同作用，处于_____状态。

2. 摆球由 0 到 B 作_____运动；由 B 到 0 作_____运动；由 0 到 C 作_____运动；由 C 到 0 作_____运动。从而完成一次全振动，以后又周而复始重复上述过程，在 B-0-C 之间作往复运动。

下面来分析是什么力促使摆球不断改变运动状态的。

摆球在 B 点时受到重力和细线拉力的作用，把重力分解为沿着细线方向的力 G_y 和垂直细线方向的力 G_x （图 8-5）。摆球在回复力 G_x 的作用下向平衡位置运动，随着摆角的减小， G_x 的数值也减小，摆球作变加速运动，速度逐渐增大，到平衡位置时，速度达到最大值，而 G_x 为零。过了平衡位置， G_x 的方向跟摆球的运动方向相反，摆球作变减速运动，到达 C 点时速度为零，以后又从 C 点运动到 B 点，完成了一次全振动。理

论研究表明：当摆线偏离平衡位置的角度不超过 5° 时，单摆的振动可以看作简谐振动。

8.2 描述振动的物理量

8.2.1 频率、周期和振幅

研究不同的运动形式，需要用不同的物理量来描述。对于振动，除了位移、速度、加速度以外，还需要用哪些物理量来描述呢？

振动是一种周期性的往复运动，我们把振动物体完成一次全振动所需的时间叫做振动周期，用符号 T 表示。在国际单位制中，周期的单位名称是秒，单位符号是 s 。振动物体在单位时间里完成全振动的次数叫做振动频率，用符号 f 表示。在国际单位制中，频率的单位名称是赫[兹]，单位符号是 Hz 。振动的频率和周期两者互为倒数，即

$$f = \frac{1}{T}, T = \frac{1}{f}。$$

弹簧振子的振动具有一定的范围，如图 8-3 所示，振子在位置 B 和位置 C 时离开平衡位置最远。振动物体的位移最大值叫做振动的振幅，它是标量，反映了振动范围的大小。

8.2.2 振动的固有周期和固有频率

我们通过实验来研究弹簧振子的振动周期与振幅有没有关系。

实验 8.3

〔目的〕研究弹簧振子的振动周期与振幅有没有关系。

〔器材〕弹簧振子、节拍器、气垫导轨。

气垫导轨是一种摩擦力很小的力学实验装置，导轨表面有许多小孔，导轨通过皮管与气源相通，在实验过程中，导轨表面许多小孔不断往外喷气，因此振子在导轨上滑动时，在它们的接触面间充满着气体，摩擦力能减小到可以忽略的程度。

〔步骤〕1. 将弹簧振子安装在气垫导轨上，导轨旁放一个节拍器，如图 8-6 所示。调节节拍器，使它每相邻两响的时间恰好等于弹簧振子的半周期。

2. 多次改变弹簧振子的振幅，观察节拍器每一个相邻两响的时间是不是仍等于弹簧振子的半周期。

〔结果〕弹簧振子的振动周期与振幅_____关系。

实验表明，物体振动的周期是由振动物体本身的性质决定而与振幅

无关，这个周期就叫做振动物体的固有周期。

根据振动频率和周期之间的关系，物体振动时的频率也与振幅无关，这一频率叫做振动物体的固有频率。

8.2.3 单摆的固有周期

单摆的固有周期是由单摆本身的性质所决定的，那么，单摆的固有周期与哪些因素有关呢？

实验 8.4

〔目的〕 研究单摆的固有周期与哪些因素有关。

〔器材〕 铁架台、细线、木球、铁球、停表。

〔步骤〕 1. 先用木球组成单摆，在偏角小于 5° 的情况下，记下摆动 30 次所需的时间，如图 8-7 所示。

2. 在不大于 5° 的前提下改变偏角的大小，记下摆动 30 次所需的时间。

3. 不改变摆长，改用铁球组成单摆，在偏角不大于 5° 的前提下，记下摆动 30 次所需的时间。

4. 改变摆长，重做上面各步骤的实验。

5. 分析单摆的固有周期与哪些因素有关。

〔结果〕 在偏角不大于 5° 的情况下，单摆的振动周期跟振幅____（有、没有）关系，跟摆球的质量____（有、没有）关系，跟摆长____（有、没有）关系。

实验表明：单摆的振动周期与单摆的振幅（偏角不大于 5° 时）和单摆的摆球质量都无关。经过大量精确的实验研究和理论分析，得出单摆振动的固有周期公式是

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}},$$

式中 L 为单摆的摆长， g 为重力加速度。

此公式表明，单摆的振动周期与单摆摆长的平方根成正比，与单摆所在地的重力加速度的平方根成反比。

利用单摆的周期公式可以测出当地重力加速度的值。

实验 8.5 用单摆测定当地重力加速度的值

〔目的〕 用单摆测定当地重力加速度的值。

〔器材〕 铁架台、细线、有孔的金属球、停表、刻度尺。

[步骤] 1. 用约 1m 长的细线系住金属球做成一个单摆, 把单摆固定在铁架台的铁夹上。

2. 用刻度尺测量摆长 L , 摆长的下端应从摆球的重心算起。

3. 把单摆从平衡位置拉开一个不大于 5° 的角度然后释放, 用停表测出它完成 30 次全振动所用的时间, 求出完成一次全振动所需时间的平均值, 先后测量 3 次, 求出单摆周期的平均值。

4. 由 $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$, 可得 $g = \frac{4\pi^2 L}{T^2}$ 。把测得的周期平均值和摆长代

入式中, 算出当地重力加速度 g 的值。

8.3 波的产生

8.3.1 机械波的产生条件

树梢的振动能使我们听到沙沙声, 琴弦的振动能使周围的人们听到悦耳的琴声。机械振动在介质中的传播过程叫做机械波, 简称波。

下面通过实验来具体研究波产生的条件。

实验 8.6

1. 在水波演示盘中, 利用针尖持续地接触水面, 观察水面上发生的现象。

2. 如果这时水面上有片树叶, 观察树叶的运动。

[结果] 1. 水面上可以看到一圈一圈形成的_____从波产生的地方——波源向四周传播开去(图 8-8)。

2. 当水波传到树叶处, 树叶_____ (上下振动、随波移去)。

实验表明, 波源持续振动, 就产生持续的波。波源停止振动, 已经传播开去的波继续向四周传播(图 8-9)。

声波就是一种机械波, 它是由声源的振动引起的。可以传播机械振动的物质叫做介质, 固体、液体和气体都可以成为传播振动的介质。因此, 波源和介质是产生机械波的两个不可缺少的条件。在真空中声波是不能传播的。

实验 8.7

将细绳的一端固定, 用手拿着另一端上下摆动(图 8-10)。观察细绳上发生的现象。

[结果] 可以看到一系列_____相间的波由细绳的一端向另一端传

去。

实验表明，细绳中各部分的振动是由波源引起的，只是它们的振动在时间上比波源迟一些，离开波源越远的部分，振动开始得越迟。

8.3.2 横波

现在来具体研究振动是怎样在介质中传播开去的。

首先，我们可以把一条水平细绳看成是由一系列在水平线上的质点构成的[图 8-11(a)]，一个质点的运动将带动相邻质点的运动。当绳端质点 1 振动到它的最高点时，由于质点间弹力的作用，使质点 2、3 随着向上振动，质点 4 即将向上振动 [图 8-11(b)]。当绳端质点 1 回到平衡位置时，质点 4 已向上运动到它的最高点，质点 7 即将向上振动[图 8-11(c)]，依次类推，可以知道绳上为什么会出现一系列凹凸相间的波向细绳的另一端传去。

从上面的分析可知，在这一列波水平向右传播的过程中，每一个质点只是在做竖直方向上的简谐振动，并没有沿波的传播方向运动，像这种传播方向和质点振动方向垂直的波叫做横波。横波在传播过程中有明显的波峰和波谷。

横波的这个特性可以由同学做体操进行模拟。让一组同学排成一行，第一个同学做蹲站运动，第二个同学跟着模仿前面的同学做同样的动作，但慢了一拍，第三个、第四个……跟着模仿前面的同学做，都依次慢一拍，在旁边的同学看起来，犹如一列横波在前进（图 8-12）。这种情景在大型团体操中是经常可以看到的。

8.3.3 纵波

实验 8.8

将细软钢丝制成的螺旋形弹簧套在一根固定的日光灯管上（图 8-13），双手握住弹簧两端，左手固定不动，右手有节奏地推、拉弹簧，即做水平方向上的简谐振动，观察弹簧中发生的现象。

〔结果〕在弹簧中看到一系列_____相间的波向弹簧的左端传去。

像这种传播方向和质点的振动方向在同一条直线上的波叫做纵波。纵波在传播过程中有明显的疏部和密部（图 8-14）。

想一想，通过体操能模拟纵波吗？

横波和纵波是两种不同形式的机械波。由于介质的性质不同，在液

体和气体内部波只能以纵波的形式传播，而在固体里既能以纵波的形式传播，又能以横波的形式传播。常见的声波在空气中就是以纵波的形式传播的（图

8.4 波长、周期和波速

现在我们来研究描述波的物理量。为了研究方便，想象给细绳上的横波照一张相片，让波在某一时刻的形状“凝固”起来，在照片上我们把坐标轴标上去。假如波源的振动是简谐振动，就可以看到绳中的波呈正弦图形，是正弦波，波的凸起部分是波峰，凹下部分是波谷，如图 8-15 所示。

从图中可以看出，相邻两个波峰之间的距离和相邻两个波谷之间的距离都是相等的，称为波长，用符号 λ 表示。在国际单位制中，波长的单位名称是米，单位符号是 m。

波在介质中传播一个波长所需的时间叫做波的周期，用符号 T 表示。波在介质中的传播速度叫做波速，它和波长、周期之间的关系是

$$v = \frac{\lambda}{T},$$

即

$$\lambda = vT.$$

波的周期是由波源的振动周期决定的，波的周期就等于波源的振动周期，又等于介质中各质点的振动周期。波速是由介质的性质决定的，一般情况下，波在固体中的传播速度要比在液体中的大，在液体中的传播速度又要比在气体中的大。例如，声波在钢铁中的传播速度约为 5000m/s，在水中约为 1500m/s，在空气中约为 340m/s。所以将耳朵贴在钢轨上能较早地听到远方开来的火车声。

[例题 8.1] 一列波的波源的振动频率是 200Hz，相邻波峰和波谷的距离是 0.8m，求这列波的周期和传播速度。

解 由于 $f=200\text{Hz}$ ，相邻波峰和波谷的距离是 0.8m，则 $\lambda=0.8\text{m} \times 2=1.6\text{m}$ ，可得这列波的周期和传播速度为

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{200} \text{ s} = 0.005 \text{ s},$$

$$v = \lambda f = 1.6 \times 200 \text{ m/s} = 320 \text{ m/s}.$$

8.5 振动和波的能量

物体在做简谐振动的过程中，它的能量不断地在转换着。如图 8-16 所示，弹簧振子在振动过程中振子在位置 B 和位置 C 时，弹簧伸长和压缩的量最大，弹性势能最大，振子的速度等于零，动能等于零；振子从位置 B 或位置 C 向平衡位置振动过程中，速度逐渐变大，动能也逐渐增

大，弹簧的伸长量或压缩量逐渐变小，弹性势能逐渐变小；振子在平衡位置时，弹簧没有形变，弹性势能为零，但这时振子的速度最大，动能也最大。振子在振动过程中，由于杆是光滑的，摩擦力没有做功，在不计空气的阻力时，振子的总能量没有损失，只表现为弹性势能和动能之间的不断转换。

【讨论】

单摆振动过程中能量是怎样转换的？

在波的传播过程中，波传到哪里，振动也随着传到哪里，这个过程是波把波源的振动向外传递的过程，同时也是波将波源能量向外传递的过程，所以波是能量传递的一种形式。

8.6 受迫振动

8.6.1 阻尼振动和无阻尼振动

实验 8.9

一根上端钻有小孔的薄木板，套在销子上悬挂起来，用手轻推一下让它振动，观察木板下端振动时的振幅变化情况（图 8-17）。

当木板的下端每次到达 A 点或 B 点时用手指趁势轻推一下，观察木板下端振幅的变化。

〔结果〕1. 木板振动过程中振幅逐渐_____（变大、变小、不变）。

2. 用手指趁势不断轻推木板后，木板下端振幅_____（变大、变小、不变）。

从实验可知，振动物体的能量如果得不到补充，物体振动的能量将不断减小，振幅也随之不断变小。经过一段时间，物体的振动就会停下来。我们把这种振幅越来越小的振动叫做阻尼振动（图 8-18）。物体振动时所受的阻力越大，振幅减小得越快。

如果我们不断地给振动物体补充能量，以补偿它在振动过程中所消耗的能量，振幅就会始终保持不变。实验中用手指不断趁势推木板以补偿木板在振动过程中所消耗的能量，木板就作等幅振动（图 8-19）。钟摆在摆动时消耗的能量就是靠发条的弹性势能来补偿的。等幅振动又叫做无阻尼振动。

8.6.2 受迫振动

振动物体都有它自己的固有频率，但是在实际应用中往往需要物体按照人们要求的频率去振动，而不是按照它自己的固有频率去振动。例

如，扬声器中的纸盆就要求按照乐音的频率去振动，各种乐器的共鸣腔也都要按乐音的变化去振动。那么，怎样才能使这种振动得以实现呢？

实验 8 . 10

我们用图 8-20 所示的装置，在手柄的曲轴上悬挂一个挂有砝码的弹簧。匀速转动把手，弹簧就振动起来。经过一段时间后，弹簧就会以手转动手柄的频率振动。

由实验可知，振动物体在周期性变化的外力作用下将按周期性变化的外力的频率振动，而不是按本身的固有频率振动。如果外力每次补充的能量和弹簧振动时损失的能量相等，振动是等幅的，即该物体作无阻尼振动。

我们把这种在周期性变化的外力策动下的振动叫做受迫振动，这个周期性变化的外力叫做策动力。例如，波源由于振动而对它周围介质的质点产生策动力，因此，介质质点所做的振动是受迫振动，而不是固有振动。这也是为什么介质质点的振动频率等于波源的振动频率的原因。

想一想，改变匀速转动曲柄的频率，重复图 8-20 的实验，我们将会看到什么现象。

8 . 6 . 3* 共振

物体作受迫振动时，一般情况下策动力的频率并不等于该物体的固有频率。那么，一旦策动力的频率和物体的固有频率相等时，将会产生什么现象呢？

实验 8 . 11

〔目的〕研究受迫振动时的振幅。

〔器材〕两端固定在支架上的水平细绳，摆长不等的单摆 4 个，其中 2 个摆长相等。

〔步骤〕1. 按图 8-21 将 4 个单摆 A、B、C、D 悬挂在两端固定的水平细绳上。其中单摆 A、C 的摆长相等，单摆 B 的摆长较短，单摆 D 的摆长较长。

2. 在 4 个单摆静止的情况下，用手使单摆 A 摆动起来，比较单摆 B、C、D 与单摆 A 的振动频率。

3. 观察单摆 B、C、D 的振幅大小。

〔结果〕1. 在单摆 A 摆动后，单摆 B、C、D _____（开始摆动、继续静止）。

2. 单摆 B、C、D 是在做_____。(为什么?)

3. 单摆_____振幅最大。

实验表明,做受迫振动的物体,在它的固有频率等于或接近于策动力的频率时,振幅最大,这就是共振现象。如果固有频率与策动力的频率相差较大,那么受迫振动的振幅就很小。

取两个频率相同的音叉,如图 8-22 放置,用橡皮锤敲响其中的一个,然后用手按住,不让它继续振动,这时就会发现另一个没有敲过的音叉却在振动,并发出声响,这就是共鸣现象。共鸣现象的本质就是共振。

想想看,如果两个音叉的频率不相同,为什么不会发生共鸣现象呢?

共振现象有很多地方可以利用。例如振动打桩机就是利用振动机使管桩产生共振,管桩激烈振动而打入地下。这种打桩机噪声小、效率高。共振筛也是利用共振原理使筛子有较大的振幅来提高工作效率的。

但在某些情况下,共振也会造成损害。本世纪,国外的一次空难事故,就是因为共振而造成机翼脱落,以致酿成大祸。所以,无论造桥、建筑厂房还是设计机床等都要考虑避免共振问题。

8.7 波的特性

我们能听到墙外的声音,表明声波能绕过障碍物传到人的耳朵。那么其他形式的波有没有这种特性呢?我们通过对水波的观察来研究波的各种特性。

8.7.1 波的反射

水波在传播过程中遇到障碍物,它的方向会改变吗?

实验 8.12

在水波演示盘中插进一块厚玻璃,观察水波传到水和玻璃的界面上所发生的现象。

〔结果〕水波遇到障碍物(玻璃)会被_____。

日常生活中我们听到的回声就是声波反射的结果。

8.7.2 波的叠加

实验 8.13

在水波演示盘中观察由两个波源分别发出的单个波相遇时的情况（图 8-23）。

〔结果〕1. 当两个波峰同时传到水面上的同一点时，这一点振动的振幅就等于_____。

2. 两个波峰在相遇后继续_____，就像未曾相遇过一样。

实验表明，两列波在相遇时，不会像两个小球相互碰撞那样完全改变原来的运动方向，而是相互穿过，穿过后又都保持它们原来的周期、波长和传播方向继续向前传播，就像未曾相遇过一样。这表明两列波在同一介质里能各自独立地传播，它们在同一点激起的振动将会在那里合起来，这种现象叫做波的叠加（图 8-24）。波的这种特性就叫做波的叠加性。

8.7.3 波的干涉

实验 8.14

在水波演示盘中两个固定在同一振动片上的金属丝 S_1 和 S_2 分别发出两列波，观察这两列波在水槽中相互叠加的情况。

〔结果〕两列波在水槽中相互叠加产生的花样是_____。

两个振子在水面上产生的波在水槽中传播时相互叠

加，并在水面上出现某些地方的振动始终加强，在另一些地方的振动始终减弱、甚至完全抵消的现象。这些振动加强的区域和振动减弱的区域互相间隔，形成明显的固定的花样（图 8-25）。

如图 8-26 所示的两列波长相同的波相遇时，在波峰和波峰或波谷和波谷相遇的地方振动加强，在波峰和波谷相遇的地方振动减弱，而振动加强和减弱的区域是相互间隔的。

波长相同的两列波叠加，使某些区域的振动加强，而使另一些区域的振动减弱，并且振动加强和减弱的区域是相互间隔的。这种现象叫做波的干涉，所产生的图样叫做波的干涉图样。所以，两列波长相同的波。波的情况相同，相遇时能产生干涉现象，这就是波的干涉的条件。因为波能产生干涉现象，所以干涉现象是波所具有的重要特性之一。

8.7.4 波的衍射

声波能绕过某些障碍物传播，水波遇到障碍物能绕过它继续传播吗？

实验 8.15

在水波演示盘中先后放进大小不同的障碍物。

1. 观察水波能否绕过比水波波长小的障碍物继续传播。

2. 观察水波能否绕过比水波波长大的障碍物继续传播。

〔结果〕1. 水波遇到一些比水波波长小的障碍物，水波_____（能、不能）绕过障碍物继续传播。

2. 水波遇到一个比水波波长大得多的障碍物，水波_____（能、不能）绕过障碍物继续传播。

实验 8.16

在水波演示盘中间用一块挡板使水槽分隔成两部分，在挡板中间有一个可以调节的缝隙，调节缝隙的大小，观察水波通过缝隙后的传播情况。

〔结果〕当缝隙宽度小于水波的波长或与水波的波长差不多时，缝隙后传播着以缝隙为中心的波。似乎后面的波就是以缝隙为波源所产生的（图 8-27）。

当挡板上的缝隙的宽度比水波的波长大好几倍时，如图 8-28 所示，在缝隙后面的水波是在连接波源和缝隙边的两条直线所限制的范围里传播，只是在离缝隙较远的地方水波才稍微绕到“影子”范围里。

这种波绕过障碍物的现象叫做波的衍射，由实验可知，当障碍物的尺寸或缝隙的大小跟波的波长差不多时，波能产生明显的衍射现象。如果障碍物的尺寸或缝隙的大小比波的波长大好几倍时，不会发生衍射现象。衍射现象是波所具有的重要特性之一。

本章学习要求

1. 知道机械振动，知道简谐振动的产生条件和特征知道振动图象。
2. 知道单摆作简谐振动的条件，理解单摆振动的规律和单摆周期公式。
3. 知道波是振动的传播，知道机械波及其产生条件。
4. 理解横波，知道纵波。
5. 知道横波的图象。
6. 知道振动的振幅，理解振动的周期和频率以及它们之间的相互关系。
7. 知道固有振动。知道受迫振动。
8. 会用单摆测重力加速度。
9. 知道波长，理解波长、频率、波速的关系。

- 10 . 知道振动过程中的能量转化。
- 11 . 知道波是传播能量的一种方式。
- 12 . 知道波的叠加。
- 13 . 知道波的干涉现象及其产生条件。
- 14 . 知道波的衍射现象以及能够产生明显衍射的条件。

9 物质分子动理论的基础

早在 2000 多年前，古希腊的哲学家德谟克利特等人就提出：物质是不连续的，万物的本原是细小的、不可再分的“原子”；而哲学家亚里士多德等人则认为物质是连续的，万物是由火、气、水、土等四种“元素”所组成。我国古代学者也曾提出五行学说，认为水、火、木、金、土等五行是万事、万物的根本。这些朴素的“原子论”显然都是一些关于物质结构的猜测，而不是科学的论断。

17 世纪英国科学家玻意耳（1627 ~ 1691）批判了古希腊关于“元素”的观点，科学地把化学元素定义为不能再分解的最简单的物质（单质）。随着几十种元素的发现，英国化学家道尔顿（1766 ~ 1844）提出了他的原子学说，认为化学元素是由非常微小的、不可再分的原子组成的。另一方面，在 18 世纪关于热的本质出现了一些定性的分子动理论（分子运动论）的假说，1744 ~ 1748 年俄国科学家罗蒙诺索夫（1711 ~ 1765）明确提出热是分子运动的表现。直到 19 世纪 60 年代，麦克斯韦、克劳修斯、玻耳兹曼等科学家又把气体分子动理论从一些定性的论据发展成为一个系统的定量的理论。

本章将在初中物理的基础上，进一步学习物质分子动理论的基础以及物体内能的知识。

9.1 宏观物体由大量分子组成

大量事实表明：宏观物体是由大量分子组成的。分子是能保持物质化学性质而独立存在的最小微粒。分子是由原子组成的。金属单质和惰性气体的分子是由一个原子组成的，称为单原子分子；生物中的牛胰岛素分子却大约由 1500 个原子组成。

那么分子有多大呢？我们知道，在化学中常以碳原子质量的 $1/12$ 为单位来比较各种物质分子的相对质量，叫做物质分子的摩尔质量。如果某种物质分子的摩尔质量为 μ ，那么质量为 μ 千克的这种物质就是 1 个摩[尔]，单位符号是 mol。1mol 各种纯物质所含的分子数是恒定的，即 6.022045×10^{23} 个，这个数目叫做阿伏伽德罗常量，通常用代号 N_A 表示。

掌握了阿伏伽德罗常量，就可以估计出各种物质分子的绝对质量和大小。

分子极其微小，如果把分子看成球形，它的直径只有零点几个纳米（nm），约只有 1m 的 10^{10} 分之几。

大量的实验都表明：在任何物质的分子间都有空隙存在，不同的物质分子间的空隙大小是不同的。对于同种物质的分子说来，分子间的空

隙在气态时最大，液态时小些，固态时最小。

9.2 分子的无规则运动

即使用最好的显微镜，也不能分辨个别分子，更谈不上观察到分子的无规则运动了。但是通过下面的实验，我们可以间接地推断出分子是在作无规则的运动。

实验 9.1

将显微镜放在平稳的台面上，观察悬浮在水中的花粉粒子。图 9-1 是观察装置的示意图，在悬浊液中含有悬浮着的花粉粒子。

实验表明：花粉粒子在不停地作无规则运动。图 9-2 是定时记录下来的花粉粒子的位置，显然这不是花粉粒子实际运动中的位移图。花粉粒子的位置是在每一分钟末记录的，然后将这些点用直线连接起来。实际上花粉粒子在任何两点间的路程是弯弯曲曲、不规则的。这种运动是由英国植物学家布朗在 1827 年首先观察到的，因而叫做布朗运动。

最初人们把这些花粉粒子的运动看作是一种生命的形式，后来很快就发现，即使把很小的无机物粒子悬浮在水中也会有同样的表现。直到 1905 年这种布朗运动才由爱因斯坦作出科学的解释。他指出：悬浮在液体或气体中的粒子所以会做布朗运动，是因为它们参与了液体或气体的分子的无规则运动的结果。实际上水分子的大小只有做布朗运动的花粉粒子的几千分之一。由于水分子在作无规则的运动，就跟花粉粒子碰撞起来。每一个花粉粒子同时受到周围来自四面八方的许多水分子的碰撞。又由于水分子运动的无规则，因此它们对花粉粒子的碰撞在各个方向上不可能完全平衡，这就使花粉粒子总是向作用弱的一侧运动。随着碰撞作用弱的方向不断变化，花粉粒子就做无规则运动了。1908 年法国物理学家佩兰（1870~1942）筛选了几种不同的粒子和几种不同的液体作了大量的测量，并将测得的结果用爱因斯坦公式进行计算，得出了阿伏伽德罗常量，从而用实验证明了分子动理论的正确性。为此他获得了 1928 年诺贝尔物理奖。

布朗运动永远不会停止，并且随着温度的升高运动更加剧烈。这就证实了物质分子在作永不停息的无规则运动；分子运动越剧烈，温度越高。

9.3 分子间的作用力

固体能保持一定的形状，液体能保持一定的体积，就是因为物质分子之间存在着相互的作用力。

实验 9 . 2

用细线将一块玻璃片水平地悬挂在弹簧秤下端，然后用手拉住弹簧秤的上端，让玻璃片接触水面（图 9-3），这时玻璃片就贴在水面上。在使玻璃片脱离水面的一瞬间，观察弹簧秤的读数有何变化。

〔结果〕弹簧秤读数_____（增大、减小）。

怎样解释上述实验结果呢？从玻璃片与水面接触的一面在脱离水面后仍沾有一层水可以看出，玻璃片在脱离水面的一瞬间，弹簧秤读数的增大是由于两层水分子间的引力引起的。实验表明：就像固体分子间存在着作用力一样，液体分子间也存在着作用力。要拉大分子间的距离，外力就要克服它们之间的引力。同样，要压缩分子间的距离，就需要很大的外力来克服它们之间的斥力。分子间的引力和斥力统称为分子力。

气体分子间的距离很大，因此气体分子间的引力是微不足道的，往往可以忽略不计。

分子力的大小与分子间的距离有关。图 9-4 是两个同种物质分子间的分子力随它们之间的距离变化而变化的关系示意图。分子间的引力和斥力是同时存在的。图中上方的虚线表示斥力与分子距离的关系；下方的虚线表示引力与分子距离的关系；实线则表示引力和斥力的合力与分子距离的关系。从图上可以看出，当分子距离等于 r_0 时，分子间的引力和斥力相互平衡，即分子力等于零。因此距离 r_0 就相当于正常情况下分子间的空隙，大约为零点几个纳米，叫做分子间的平衡距离。当分子距离小于 r_0 时，分子间的引力和斥力同时增大，但斥力增大得较快，因此这时的分子力表现为斥力。当分子距离大于 r_0 时，即从零点几个纳米增大到几十个纳米时，分子间的引力和斥力同时减小，但斥力减小得较快，因此这时的分子力表现为引力。当分子距离大于 60nm 时，分子力就变得十分微弱而可以看作零，表明这时两个分子之间已不存在相互作用了。

9 . 4 分子的动能和势能 物体的内能

我们已经知道，组成物质的分子总是不停地在运动着，分子的运动是没有规则的。同一时刻，物体内的分子的运动方向不同，向各个方向都有；同一时刻，分子运动的速率也不同，大多数分子是中等速率，但也有一些分子速率很大，有一些分子速率很小。

运动着的分子跟运动着的物体一样具有动能，叫做分子的动能。我

们在研究分子动能时，不只是一个分子的动能，而是物体内所有分子动能的平均值，叫做分子的平均动能。

温度越高，布朗运动越剧烈，扩散现象也加快，表明温度跟大量分子的无规则运动的剧烈程度有关。分子运动越剧烈，分子平均动能就越大，物体的温度也越高，所以从分子动理论的观点来看，温度是物体分子平均动能的标志。

我们已经学过，重力势能和弹性势能是由于相互作用的物体的相对位置关系所具有的能量。分子之间也存在相互作用力，因此分子也具有由它们相对位置所决定的势能，叫做分子的势能。

我们已经知道分子间的相互作用与分子间的距离有关。当分子距离等于 r_0 时，引力和斥力恰好相等，分子处于平衡状态。如果分子间的距离小于 r_0 ，它们之间的相互作用表现为斥力，分子的势能随着分子间的距离减小而增大；如果分子间的距离大于 r_0 ，它们的相互作用表现为引力，分子的势能先随着分子间的距离增大而增大，接着随分子间的距离增大而减小。

一个物体，它的体积改变时，分子间的距离随着改变，分子的势能也随着改变，因此分子的势能跟物体的体积有关。

一切物体都是由相互作用着的分子组成，这些分子都是不停地在作无规则运动。我们把物体所有的分子的动能和所有分子间的势能的总和叫做物体的内能。物体内能的多少跟物体的体积和物体的温度有关。

9.5 物体内能的变化

物体的温度升高，分子的动能增加；温度降低，分子的动能减少。物体的体积改变时，分子的势能也发生变化。物体的内能随着物体的温度和体积的变化而改变。

实验 9.3

用铁砂布使劲、快速擦铁棒后，用手摸铁棒和铁砂布。

〔结果〕铁棒的温度_____了，铁砂布的温度_____了。

实验表明，我们用铁砂布擦铁棒时，克服摩擦做了功，铁棒和铁砂布的温度都会升高，内能增加。在日常生活中常常可以看到做功使物体内能变化的例子。例如，用锯子锯木块，锯条和木块的温度都要升高，内能增加。

我们用力压缩空气，对空气做功，也会使空气的温度升高。

实验 9.4

把硝化棉放在厚玻璃筒的底部，迅速向下压活塞（图 9-5）。

〔结果〕硝化棉_____了。

实验表明，用力压空气，对空气做功，空气的温度升高，达到硝化棉的燃点，硝化棉就燃烧起来。可见，外力压缩气体，对气体做功，使气体内能增加。柴油机就是利用这个道理，在第三冲程时，活塞迅速压缩气体，使气缸内的雾状柴油和空气的混合物温度升高而燃烧的。

实验 9 . 5

小金属筒中装有压缩空气，扳开活塞，气体迅速逸出（图 9-6），用手摸金属筒的外壳。

〔结果〕金属筒的温度_____了。

受压缩的空气膨胀，对外做功，气体温度降低，使金属筒的温度也降低。

从以上的例子，我们知道，做功可以改变物体的内能。

但是，做功并不是改变物体内能的唯一方法。例如，灼热的电热炉，可以使周围物体的温度升高，内能增加；一杯热水，不断向外界散发热，逐渐冷却，内能减少。这两个例子中，虽然没有做功，但物体的内能变化了，这种没有做功而使物体内能改变的过程叫做热传递。

可见，能够改变物体内能的方式有两种：做功和热传递。

我们可以用做功的方式使物体的温度升高，也可以用热传递的方式使物体升高同样的温度，效果是一样的，因此，功、热量、能量的单位是相同的，统一用焦〔耳〕，单位符号是 J。

但是，在能量转化上，做功使物体内能改变，是机械能与内能之间的转化，而热传递使物体内能改变，只是内能由一个物体转移到另一个物体。

9 . 6 能量守恒定律

我们在能和功这一章里已经学过机械能守恒定律，知道动能和势能可以互相转化。这一章我们又知道机械能和内能也可以互相转化。机械能、内能和其他形式的能，如电能、原子核能、化学能等都可以互相转化。例如，电流通过导体，导体温度升高，电能转化为内能；燃料燃烧生热，化学能转化为内能；原子能发电站，原子核能转化为锅炉中水的内能；水蒸气推动汽轮机转动，内能转化为汽轮机转子的机械能；汽轮机带动发电机发电，机械能又转化为电能发送出去。

各种形式的能都可以互相转化，实际上地球上各种能量都是由太阳

能不断转化过来的。各种能量在转化过程中，总的能量是守恒的。大量事实证明，任何形式的能转化为别种形式的能时，总的能量都是守恒的。

能量既不能凭空产生，也不能凭空消失，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。

历史上，直至今天，有不少人都想设计一种机器，他们希望这种机器不消耗任何能量和燃料，却能不断地向外做功，这种机器被称为永动机。但是这种永动机从来也没有制造成功过。人类通过实践认识到，任何机器对外界做功都要消耗能量，不消耗能量的机器是无法做功的。能量守恒定律的发现，使人们进一步认识到：任何机器，只能使能量从一种形式转化为另一种形式，不可能无中生有地创造能量。我们的任务是设法找出合理利用能量，减少不必要的能量损耗，研制永动机是永远无法实现的。

能量的利用和能源的开发是我国经济建设的战略重点之一。在原有的基础上，我们的进步是非常快的，保证了国民经济的高速发展；但跟世界先进水平来比较，我们的技术落后，设备陈旧，管理不善，能源利用率低，浪费大。随着国民经济继续发展和人民生活改善的需要，能源的需求还要大量增加，所以我们必须注意节约能源和开发新能源，以保证社会主义现代化建设的顺利进行。

本章学习要求

1. 理解布朗运动。
2. 理解分子动理论的基本要点。
3. 知道分子的动能和分子的势能。
4. 知道物体的内能。
5. 理解改变物体内能的两种方式。
6. 理解能量守恒定律。

10 固体和液体的性质

自然界的物体都是由大量的分子、原子或离子等微粒组成的。固体的分子，由于排列整齐，分子间的作用力比较强，因而固体不仅具有一定的体积，还有一定的形状。液体分子间的距离较大，分子间的作用力较弱，因而液体具有很大的流动性，它只有一定的体积，而没有一定的形状。这一章主要研究固体的一些性质和液体表面的性质。

10.1 固体的性质

人类在远古时期就开始利用石器作为生产工具与生活用器。我国早在商代（公元前 16 ~ 公元前 11 世纪）就铸造出青铜器（图 10-1）。春秋时期（公元前 5 ~ 公元前 3 世纪）的冶铁技术已能制成锋利的刀剑（图 10-2）。

随着生产力的发展，人们根据科学技术的需要，制造出多种人造的固体材料。超导体是一种在低温状态下电阻完全消失的导体，目前我国超导材料的研制工作处于世界先进水平。我国航天事业能进入世界先进行列的重要原因之一，就是因为我国已能生产出制造火箭、人造卫星所需要的各种特殊材料，例如强度高、密度小、耐高温的钛合金等。

我国早在六七千年前就能制造陶器。陶器是最古老的人造固体材料，在现代的尖端技术中，它又显示出重要的作用。它的特点是强度高、硬度高、耐高温、耐腐蚀，因此可以制成各种切削工具和各种耐温隔热材料。如在航天飞机的外壳上就需要粘上特制的陶瓷片，以防止飞机在穿过大气层时机身被烧损。有些陶瓷材料具有独特的电学性能，有些是绝缘体，有些是导体，有些是半导体。

下面来观察几种固体的外形。

实验 10.1

观察硫酸铜、食盐、松香、橡胶和明矾的形状。

〔结果〕_____具有规则的几何形状，_____没有规则的几何形状。

由分子、原子或离子按一定的规律重复排列而成的固体叫做晶体，图 10-3 所示就是食盐 NaCl 晶体的结构示意图。晶体的外形具有规则的几何形状，如食盐晶体呈立方体，石英的晶体中间是六棱柱，两端是六棱锥（图 10-4），雪花是冰的晶体，各种雪花的形状都是六角形的（图 10-5）。像玻璃、松香、沥青等没有规则的几何形状的固体叫做非晶体。

晶体和非晶体的物理性质有什么不同呢？

实验 10.2

在云母薄片和玻璃片上面均匀地涂一层很薄的石蜡。将烧热的钢珠分别接触云母片和玻璃片的反面，观察石蜡熔化形成的图形。

〔结果〕云母片上石蜡熔化形成的图形是_____，玻璃片上石蜡熔化形成的图形是_____。

由此可知云母在各个方向上的导热性能不相同，玻璃在各个方向上的导热性能相同。

实验 10.3

将方铅矿石，灵敏电流计，干电池，电键连接成如图 10-6 所示的电路，先让矿石 A 端和电池正极相连接。然后把矿石掉个头，B 端跟电池正极相连接。观察两次通电时电流计的读数。

〔结果〕方铅矿石各个方向的导电性能_____（相同、不相同）。

实验表明，晶体在不同方向上导热性能、导电性能等物理性质不相同，这种特性叫做各向异性，而非晶体在各个方向上的各种物理性质都是相同的。

我们在初中学习物理时已经知道，晶体都有固定的熔点，而非晶体没有熔点。

晶体有单晶体和多晶体两种。整个物体就是一个晶体叫做单晶体，如果整个物体由大量不规则排列的小晶体组成，叫做多晶体。多晶体不具有规则的几何形状，各种金属材料都是多晶体。由于小晶体的排列是杂乱的，所以金属整体表现为各向同性。

单晶体的硅与锗是半导体工业的重要原材料。应用十分广泛的微电子技术、计算机技术就需要用单晶硅制成的半导体元件。

我国在 60 年代用单晶体红宝石制成了第一台激光器。我国自制的人造金刚石钻头，已用于地质勘探。

有的物质可以是晶体，也可以是非晶体。例如石英水晶是晶体，而石英玻璃却是非晶体。有的晶体与非晶体在一定的条件下可以互相转化。

液晶是一种液态晶体，它一方面像液体，具有流动性，另一方面又像晶体，具有各向异性。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，去掉电压又恢复透明。电子手表与电子计算器就是利用液晶的这种性质来显示数字的（图 10-7）。

10.2 液体的表面现象

荷叶上的小水滴和草上的露珠会呈球形（图 10-8），一滴汞能成为球形在玻璃板上滚动，而不附着在玻璃板上，细玻璃管插入水中，管里的水面比容器里的水面要高（图 10-9），这些现象都跟液体表面的性质有关。

跟气体接触的液面薄层叫做表面层。我们通过实验来研究液体表面层的性质。

实验 10.4

将一个如图 10-10 所示的拴有松弛棉线的铁丝环浸入肥皂水中再拿出来，使环上布满肥皂液膜，用烧热的针刺破两段棉线间的肥皂液膜。观察两侧肥皂液膜面积的变化情况和棉线的形状。

〔结果〕环内棉线两侧肥皂液膜面积变_____，棉线变成_____形。

实验 10.5

铁丝框上设有可以移动的直铁丝 AB，将框浸没在肥皂水里再拿出来，使框上附有肥皂液膜，然后将铁丝 AB 轻轻地向外拉（图 10-11），再放开铁丝 AB，观察肥皂液膜面积的变化和铁丝 AB 的移动方向。

〔结果〕肥皂液膜面积会_____，铁丝 AB 向_____移动。

实验表明，液体的表面层好像是绷紧的橡皮膜一样，具有收缩的趋势。荷叶上的小水滴、草上的露珠成球形，都是液体表面层收缩的结果。

【讨论】

（1）雨伞的伞面有细小的孔，为什么水不会从孔里漏下去（图 10-12）？

（2）将分币轻轻地放在一碗水的水面上，为什么分币会浮在水面上不沉下去（图 10-13）？

液体与固体接触的液体薄层，叫做附着层。下面我们通过实验来研究液体附着层的性质。

实验 10.6

将洁净的玻璃片和石蜡块分别浸入水中，然后拿出来。观察水在玻璃片和石蜡块上的附着情况。

〔结果〕水_____（能、不能）附着在玻璃片上。水_____（能、不

能)附着在石蜡上。

实验表明,在洁净的玻璃片上放一滴水,水能扩展形成薄层,附着在玻璃板上(图 10-14)。这种液体附着在固体表面上的现象叫做浸润。对玻璃来说,水是浸润液体。在石蜡面上放一滴水,水不能附着在石蜡表面上(图 10-15),这种液体不能附着在固体表面上的现象叫做不浸润。对石蜡来说,水是不浸润液体。同一种液体,对一些固体是浸润的,而对另一些固体可以是不浸润的。

盛有液体的容器器壁附近的液面会成弯曲的形状,也是由浸润或不浸润现象引起的。如果液体能浸润器壁,在接近器壁处液面向上弯曲(图 10-16)。如果液体不浸润器壁,在接近器壁处液面向下弯曲(图 10-17)。

浸润与不浸润现象在日常生活中与生产技术上是常见的。例如焊接时,熔融了的焊锡与被焊金属必须是浸润的;医药上要用脱脂棉,就是要使酒精,药液与棉花浸润;在有些物体上写字困难,是因为墨水不浸润物体;有些动物羽毛上能分泌脂肪,水就不浸润羽毛;有些矿石在冶炼前必须采用浮选矿石的措施,利用液体不浸润矿粒但浸润砂石的性质将矿粒与砂石分离开来。

下面通过实验来观察液体的一种有趣的现象——毛细现象。

实验 10.7

将几根内径不同的细玻璃管插入水中,把观察到的现象画在图 10-18 上。

〔结果〕管内水面比容器里的水面_____,管的内径越小,管内水面越_____。

实验还表明把内径不同的细玻璃管插在汞中,管内汞面比容器里的汞面低,管的内径越小,管内汞面越低。

像这种浸润液体在细管内液面升高的现象和不浸润液体在细管内液面降低的现象,叫做毛细现象。

具有大量毛细管的物体,只要液体与该物体浸润,就能把液体吸入物体中。毛巾吸水、砖块吸水、灯芯吸油,都是这个原因。土壤中有许多毛细管,容易将地下水吸上来,有时为了防止水分蒸发,就将地表面的土锄松,以破坏过多的毛细管。毛细现象在生理中有很大的作用,因为植物与动物的大部分组织,都是以各种各样的细微管道连通起来的。

本章学习要求

1. 知道晶体与非晶体以及它们的区别。
2. 知道液体表面有收缩趋势。

3. 知道浸润现象和不浸润现象。
4. 知道毛细现象。

11 气体的性质

气体具有很大的压缩性。压缩的气体在膨胀过程中可以对其他物体做功。生活中常用的气压式热水瓶，就是将空气压缩后，受压空气把热水压出瓶外的（图 11 - 1）。

喷气式飞机的发动机前面有进气口，空气进入发动机进行压缩得到高温，引燃喷入的雾状油产生高温高压气体从尾部喷出，使飞机得到反冲（图 11-2）。

为了更好地利用气体，必须研究气体的物理性质。

11 . 1 气体的态参量

实验 11 . 1

在上端有活塞的厚玻璃筒底部，放一块硝化棉，用手很快地向下压活塞（图 11-3），观察发生的现象。

〔结果〕筒内的棉花会_____。这说明：气体受到压缩后，体积变小，压强变_____，温度_____。

从上面的实验可以看出，当用手向下压活塞时，被密闭在玻璃筒里气体的体积、压强和温度都发生了变化，我们就说气体的状态发生了改变。体积、温度、压强都是用来描述气体状态的物理量，叫做气体的〔状〕态参量。

11 . 1 . 1 体积

气体分子之间的距离较大，分子间的相互作用力十分微弱，所以气体容易膨胀也容易被压缩。气体的体积是指气体分子所能达到的空间，就等于气体所充满的容器的容积。在国际单位制中，体积的单位名称是立方米，单位符号是 m^3 。

11 . 1 . 2 温度

气体的温度是描述气体冷热程度的物理量，它决定于气体分子无规则运动的剧烈程度。分子的运动越剧烈，分子运动的平均动能就越大，温度越高。所以温度是物体分子平均动能大小的标志。

11 . 1 . 3 压强

大量气体分子对闭合容器器壁的不断冲击，形成了对器壁的压力，器壁单位面积上所受的力就是气体的压强，在国际单位制中，压强的单位名称是帕〔斯卡〕，单位符号是 Pa，

$$1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2。$$

任何容器里的气体，只要与大气相通，它的压强就等于大气压强。

$$1 \text{ 个标准大气压}=1.013 \times 10^5\text{Pa}。$$

测量气体的压强可用压强计。最简单的压强计是汞压强计。金属制成的盒式压强计，可以从表头的刻度上直接读出压强的数值(图 11-4)。

[例题 11.1] 一根装有汞的玻璃管，汞柱高 0.2m，求汞柱对管底因重力而产生的压强(图 11-5)。

解 根据压强公式可知汞柱对管底的压强

$$p = \frac{F}{S}，$$

式中压力 F 的大小就等于汞柱所受重力 G 的大小，S 为汞柱截面积。

由于 $h=0.2\text{m}$ ， $\rho_{\text{汞}}=13.6 \times 10^3\text{kg}/\text{m}^3$ ， $g=9.8\text{m}/\text{s}^2$ ，因此汞柱由于重力而产生对玻璃管底的压强

$$\begin{aligned} p &= \frac{G}{S} = \frac{\rho_{\text{汞}}ghS}{S} = \rho_{\text{汞}}gh = 13.6 \times 10^3 \times 9.8 \times 0.2\text{Pa} \\ &= 2.67 \times 10^4\text{Pa}。 \end{aligned}$$

[例题 11.2] 汞压强计的 U 形管中(图 11-6)，(1)若 B 端的汞面比 A 端的汞面高 10cm，求容器中气体的压强；(2)若 B 端的汞面比 A 端的汞面低 20cm，求容器中气体的压强。

解 容器中气体的压强等于 A 端汞面所受的压强，B 端汞面所受的压强为大气压强 P_0 。

(1) U 形管 A 端的汞面比 B 端的汞面低[图 11-6(a)]，表明气体压强大于大气压强。气体压强是

$$\begin{aligned} p &= p_0 + \rho_{\text{汞}}gh = (1.013 \times 10^5 + 13.6 \times 10^3 \times 9.8 \times 0.1)\text{Pa} \\ &= 1.146 \times 10^5\text{Pa}。 \end{aligned}$$

(2) U 形管 A 端的汞面比 B 端的汞面高[图 11-6(b)]，表明气体压强小于大气压强。气体压强是

$$\begin{aligned} p &= p_0 - \rho_{\text{汞}}gh = (1.013 \times 10^5 - 13.6 \times 10^3 \times 9.8 \times 0.2)\text{Pa} \\ &= 7.46 \times 10^4\text{Pa}。 \end{aligned}$$

[例题 11.3] 注射器活塞重力为 G，截面积为 S，大气压强为 p_0 。在注射器内密封着一定质量的空气。求注射器如图 11-7(a)、(b)、(c) 所示三种位置放置时，密封空气的压强。

解 (1) 注射器如图 11-7(a) 放置，活塞受到三个力：大气向下的压力为 p_0S 、密封空气向上的压力 pS 、重力 G，三个力相互平衡，即

$$p_0S + G = pS，$$

因此密封空气的压强

$$p = p_0 + \frac{G}{S}。$$

(2) 注射器如图 11-7 (b) 放置，活塞在水平方向只受两个力：大气向右的压力 p_0S 和密封空气向左的压力 pS ，二个力相互平衡，即

$$pS = p_0S，$$

因此密封空气的压强

$$p = p_0。$$

(3) 注射器如图 11-7 (c) 放置，活塞受到三个力：大气向上的压力 p_0S 、重力 G 、密封空气向下的压力 pS ，三个力相互平衡，即

$$pS + G = p_0S，$$

因此密封气体的压强

$$p = p_0 - \frac{G}{S}。$$

11.2 气体的体积与温度的关系

一定质量气体的状态是由体积、温度和压强三个参量决定的。通常在气体状态变化时，这三个参量都要变化。为了研究它们之间的变化规律可以采用控制变量的办法，让一个参量不变，研究另两个参量之间的关系。

实验 11.2

〔目的〕研究一定质量的气体，在压强不变时，体积与温度的关系。

〔器材〕注射器、温度计、烧杯、酒精灯、铁架台。

〔步骤〕

1. 在注射器内密封一定质量的气体。
2. 保持气体压强不变(图 11-8)，将注射器浸没在水里，用酒精灯加热，每升高一定的温度测出密封气体的体积。

〔记录〕

实验次序	温度 t ()	体积 V (cm^3)
1		
2		
3		
4		
5		

根据记录数据，在图 11-9 上作出一定质量的气体在压强不变时的 $V-t$ 图象。

〔结论〕一定质量的气体，当压强不变时，体积随温度的_____而线性地_____。

进一步的精确实验表明，一定质量的气体，在压强不变的情况下，温度每升高（或降低）1℃，增加（或减小）的体积等于它在0℃时体积的 $\frac{1}{273}$ ，这一规律是法国物理学家盖·吕萨克（1778~1850）在1802年发现的，因而叫做盖·吕萨克定律。用数学式可以表达如下：

$$\frac{V_t - V_0}{t} = \frac{V_0}{273},$$

$$V_t - V_0 = \frac{V_0 t}{273},$$

$$V_t = V_0 \left(1 + \frac{t}{273}\right).$$

式中 V_t 、 V_0 依次为一定质量的气体在压强不变的情况下， t 和0℃时的体积。图11-10就是压强不变时，一定质量的气体的体积-温度图象，简称V-t图。

从图11-10可以看出：一定质量的气体的体积-温度图象是一条直线，如果将直线向低温方向延长，则当温度降低到-273℃时，气体体积将减小为零，这显然是不可能的。因为气体温度在未到达-273℃前，早已液化甚至凝固成固体，而不再遵守盖·吕萨克定律，这个温度（-273℃）叫做绝对零度。理论与实践都证明，这是自然界中只能接近而无法到达的极限温度。

英国科学家开尔文（1824~1907）提出的以-273℃为零度的温标，叫做热力学温标。用热力学温标表示的温度叫做热力学温度。

热力学温度用符号T表示，在国际单位制中，热力学温度的单位名称是开〔尔文〕，单位符号为K，它是国际单位制的基本单位之一。目前国际公认的绝对零度为-273.15℃。热力学温标的1度的大小等于摄氏温标的1度大小，因此热力学温度T与摄氏温度t的换算关系式是

$$T = t + 273.15。$$

在一般的计算时，可以取

$$T = t + 273。$$

采用热力学温标，可使盖·吕萨克定律的表达式简化为

$$\frac{V_t}{V_0} = 1 + \frac{t}{273} = \frac{t + 273}{273} = \frac{T_t}{T_0}。$$

这样，盖·吕萨克定律又可表述为：当压强不变时，一定质量气体的体积与热力学温度成正比。即

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}。$$

将图11-10中的V-t坐标向左平移到绝对零度，直线通过新坐标的原点，就成了一定质量的气体的体积-热力学温度图象，简称V-T图象

(图 11-11)。在物理研究中,常用此法来简化物理量关系的表达式。我们把这种保持压强不变,而只有体积与温度在变化的过程叫做等压过程或等压变化。

[例题 11.4] 图 11-12 所示的是一个水平放置的气缸,活塞截面积为 $1 \times 10^2 \text{cm}^2$,气缸内盛有一定质量的空气。在室温 7°C 时,体积是 $1 \times 10^{-3} \text{m}^3$,如将密封空气温度升高到 127°C 时,活塞将向右移动多少距离?

解 在温度升高的过程中,气体的压强始终与大气压强相等而保持不变,因此活塞内密封的空气是等压变化。由于

$$\begin{aligned} T_1 &= (273 + 7) \text{K} = 280 \text{K}, \\ T_2 &= (273 + 127) \text{K} = 400 \text{K}, \\ V_1 &= 1 \times 10^{-3} \text{m}^3, \end{aligned}$$

根据盖·吕萨克定律

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2},$$

可以求得温度升高到 127°C 时的体积

$$V_2 = \frac{V_1 T_2}{T_1} = \frac{1 \times 10^{-3} \times 400}{280} \text{m}^3 = 1.43 \times 10^{-3} \text{m}^3.$$

那么,活塞向右移动的距离

$$\begin{aligned} d &= \frac{V_2 - V_1}{S} = \frac{1.43 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-3}}{1 \times 10^2 \times 10^{-4}} \text{m} \\ &= 4.3 \times 10^{-2} \text{m}. \end{aligned}$$

一定质量的气体,压强保持不变时,既然它的体积与热力学温度成正比,那么,可以推知气体的密度和热力学温度成反比。即

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{T_2}{T_1}.$$

事实上,只要气体的压强保持不变,无论质量是否改变,这个关系总是成立的。

热气球就是利用这个原理制成的。热气球的下方开口处,用发热器将气球内空气加热,减小其密度,使热气球受到外界空气的浮力超过热气球所受的重力,热气球就冉冉上升(图 11-13)。

11.3 气体的压强与体积的关系

实验 11.3 气体的压强与体积的关系

[目的] 研究一定质量的气体,在温度不变时,压强与体积的关系。

[器材] 注射器、钩码、气压计、铁架台、测力计。

[步骤]

1. 在注射器内密封一定质量的空气,为了使变化过程中密封空气的

温度保持不变，活塞移动时要缓慢。

2. 先在活塞框架上加几个钩码，然后逐次减少钩码，使密封空气的压强减小，记下每次气体的体积与压强。

3. 在钩码全部取下后，再用测力计慢慢提起活塞（图 11-14），继续减小压强，记下每次气体的体积与压强。

〔记录〕

实验次序	压强 p (Pa)	体积 V (m^3)	pV (Pa · m^3)
1			
2			
3			
4			
5			
6			

实验表明，一定质量的气体，在温度不变时，压强与体积成反比。

即

$$pV = \text{恒量}, \text{ 或 } p_1V_1 = p_2V_2。$$

这个规律称为玻意耳定律，是英国科学家玻意耳（1627 ~ 1691）在 1660 年发现的。这个状态变化过程由于温度不变，所以称为等温过程或等温变化。用实验 11.3 的记录，可以画出一定质量气体，在温度不变时的压强- 体积图象，简称 p - V 图。气体的等温线是双曲线（图 11-15）。

〔例题 11.5〕图 11-16 为一个验证玻意耳定律的演示实验装置。往 A 管中打气，B 管内一定质量的气体就会受到压缩。相反，从 A 管中抽气，B 管内气体就会膨胀，它的压强可从压强计上读出。如 B 管中气体体积为 $2 \times 10^{-3}m^3$ ，压强计读数为 5×10^4Pa 。当 B 管中气体体积变为 $0.5 \times 10^{-3}m^3$ 时，压强计读数为多大？

解 由于 $P_1 = 5 \times 10^4Pa$ ， $V_1 = 2 \times 10^{-3}m^3$ ， $V_2 = 0.5 \times 10^{-3}m^3$ 。

根据 $p_1V_1 = p_2V_2$ ，可以算出此时压强计的读数

$$p_2 = \frac{p_1V_1}{V_2} = \frac{5 \times 10^4 \times 2 \times 10^{-3}}{0.5 \times 10^{-3}} Pa = 2 \times 10^5 Pa。$$

〔例题 11.6〕在一端封闭、另一端开口、内径均匀的直玻璃管内注入一段长 15cm 的汞柱，就可以粗略地测大气压。玻璃管水平放置时，被汞柱封闭的空气柱长 30cm。将玻璃管缓慢地转动到使开口竖直向上时，空气柱长 25cm（图 11-17），求大气压。

解 确定被汞柱封闭的空气柱为研究对象，设其截面积为 S 。在玻璃管水平时，密闭气体的压强 p_1 等于大气压 p_0 ，体积为 V_1 。当玻璃管竖直放置时，气体的压强为 p_2 ，体积为 V_2 。由于气体质量一定，温度不变，可以运用玻意耳定律 $p_1V_1 = p_2V_2$ ，求出大气压。

由于 $p_1=p_0$,

$$p_2=p_0 + \rho gh=p_0+13.6 \times 10^3 \times 9.8 \times 0.15\text{Pa} ,$$
$$=p_0+2 \times 10^4\text{Pa} ,$$

将 $V_1=0.3S$ 、 $V_2=0.25S$ 代入 $p_1V_1=p_2V_2$, 得

$$p_0 \times 0.3S=(p_0+2 \times 10^4) \times 0.25S ,$$

所以, 大气压 $p_0=1 \times 10^5\text{Pa}$ 。

11 . 4 气体的压强与温度的关系

实验 11 . 4

〔目的〕研究一定质量的气体, 在体积不变时, 压强与温度的关系。

〔器材〕注射器、钩码、气压计、温度计、烧杯、铁架台、酒精灯。

〔步骤〕1. 在注射器内密封一定质量的空气, 记下注射器的刻度。

2. 将注射器浸没在水里, 用酒精灯对水加热。每升高一定温度, 在活塞框架上加钩码, 使注射器保持原来的刻度以保证密封空气保持原来的体积。分别测出在不同温度的情况下密封空气的压强。

〔记录〕

实验次序	温度 t ()	压强 p (Pa)
1		
2		
3		
4		
5		

根据记录数据, 作出一定质量的气体在体积不变时的 $p-t$ 图象 (图 11-18)。

〔结论〕一定质量的气体, 在体积不变时, 压强随温度的_____而线性地_____。

进一步的精确实验表明, 一定质量的气体, 在体积不变的情况下, 温度每升高 (或降低) 1°C , 增加 (或减少) 的压强等于它在 0°C 时压强的 $\frac{1}{273}$ 。这一规律是法国物理学家查理 (1746 ~ 1823) 在 1787 年发现的, 因而叫做查理定律。这个状态变化过程由于体积不变, 所以称为等体 (积) 过程或等体 (积) 变化。

【练习】

(1) 假设 p_t 、 p_0 分别为一定质量气体在 t 和 0 时的压强, 列出查理定律的数学表达式, 并作出 $P-t$ 图。

(2) 若采用热力学温标, 列出查理定律的简化表达式, 并在 $p-T$ 图

上表示出来。

(3) 将 $p-t$ 图作在图 11-19 上。

解 (1) 设 p_t 、 p_0 分别为一定质量气体在体积不变情况下，温度 t 和 0 时的压强，则

$$\frac{p_t - p_0}{t} = \underline{\hspace{2cm}}, \quad p_t - p_0 = \underline{\hspace{2cm}},$$

所以 $p_t = \underline{\hspace{2cm}}$ 。

(2) 设 $T = t + 273$ ，所以

$$\frac{p_t}{p_0} = \underline{\hspace{2cm}}。$$

于是得出查理定律的简化表达式：

(3) 同时可将 $p-t$ 图 (图 11-19) 改变为 $p-T$ 图。

11.5* 理想气体的状态方程

前面的实验都是用压强不太大 (和大气压比较)、温度不太低 (和室温比较) 的气体进行的。当压强很大，温度很低时，上述气体定律就不成立。为了研究方便，我们设想有一种理想气体能严格遵守上述实验定律。许多实际气体如氢气、氧气、空气等，在通常的温度和压强下，可以近似地看作理想气体。

我们已经知道气体状态变化时，压强、体积、温度三个态参量都会发生变化。现在运用逻辑推理的方法，从盖·吕萨克定律和玻意耳定律推导出在气体状态变化过程中三个态参量之间的关系。

假设一定质量的理想气体，由状态 A 变化到状态 B。若气体处于状态 A 时，压强为 p_1 、体积为 V_1 、热力学温度为 T_1 ；气体处于状态 B 时，压强为 p_2 、体积为 V_2 、热力学温度为 T_2 。假设气体由状态 A 变化到状态 B 以前，先经过一个中间状态 C。气体经过等压变化由状态 A 变化到状态 C，又经过等温变化由状态 C 变化到状态 B。气体处于状态 C 时的压强为 p_1 ，体积为 V_C ，热力学温度为 T_2 (图 11-20)。

状态	压强 p	体积 V	温度 T
A	p_1	V_1	T_1
C	p_1	V_C	T_2
B	p_2	V_2	T_2

按盖·吕萨克定律可以根据气体由状态 A 变化到状态 C，列出

$$\frac{V_1}{V_C} = \frac{T_1}{T_2}。$$

按玻意耳定律可以根据气体由状态 C 变化到状态 B，列出

$$p_1 V_C = p_2 V_2$$

因此

$$\frac{V_1 T_2}{T_1} = V_C = \frac{p_2 V_2}{p_1},$$

即

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}, \text{ 可见 } \frac{pV}{T} = \text{恒量}.$$

这就是一定质量的理想气体的状态方程，简称气态方程。

[例题 11.7] 柴油机的气缸中，活塞在最高位置时气缸的容积为活塞在最低位置时的 $1/10$ 。若活塞在最低位置时空气温度为 700°C ，压强为 $1.2 \times 10^5 \text{Pa}$ 。当活塞推动到最高位置时，空气被压缩，使温度升高到 1812°C ，求这时空气的压强。（设空气可看作理想气体）

解 设活塞在最低位置时，空气的体积为 V_1 ，温度 $T_1 = (700 + 273) \text{K} = 973 \text{K}$ ，压强 $p_1 = 1.2 \times 10^5 \text{Pa}$ 。当活塞被推动到最高位置时，空气的体积为 V_2 ，而 $V_2 = \frac{1}{10} V_1$ ，温度 $T_2 = (1812 + 273) \text{K} = 2085 \text{K}$ ，压强为 p_2 。

根据理想气体状态方程 $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$ ，可以求得活塞在最高位置时

空气的压强

$$p_2 = \frac{p_1 V_1 T_1}{T_1 V_2} = \frac{1.2 \times 10^5 \times 10 \times 2085}{973} \text{Pa} = 2.57 \times 10^6 \text{Pa}.$$

[例题 11.8] 图 11-21 是一个简单的汞气压计，露出汞面的玻璃管长 1m 。大气压为 $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ ，管内汞面上混有少量空气，温度为 7°C ，汞柱高 75cm 。求温度为 27°C 、汞柱高 74cm 时的大气压。

〔分析〕以汞气压计汞面上的空气为研究对象。

设玻璃管截面积为 S ，长度为 l 。初状态时，大气压为 p_{01} ，则气体压强 $p_1 = p_{01} - h_1 \rho g$ ，体积 $V_1 = (l - h_1) S$ 。末状态时，大气压为 p_{02} ，则气体压强 $p_2 = p_{02} - h_2 \rho g$ ，体积 $V_2 = (l - h_2) S$ 。

解 根据气态方程

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2},$$

可以列出

$$\frac{(p_{01} - h_1 \rho g)(l - h_1) S}{T_1} = \frac{(p_{02} - h_2 \rho g)(l - h_2) S}{T_2}.$$

由于

$$\begin{aligned} p_{01} - h_1 \rho g &= (1.013 \times 10^5 - 0.75 \times 13.6 \times 10^3 \times 9.8) \text{Pa} \\ &= 1.34 \times 10^3 \text{Pa}, \\ l - h_1 &= (1 - 0.75) \text{m} = 0.25 \text{m}, \\ l - h_2 &= (1 - 0.74) \text{m} = 0.26 \text{m}, \\ T_1 &= (273 + 7) \text{K} = 280 \text{K}, \end{aligned}$$

$$T_2 = (273 + 27) \text{ K} = 300 \text{ K},$$

$$p_{02} - h_2 \rho g = 1.34 \times 10^3 \times \frac{0.25}{0.26} \times \frac{300}{280} \text{ Pa}$$

$$= 1.38 \times 10^3 \text{ Pa},$$

即汞柱高 74cm 时的大气压为

$$p_{02} = (1.38 \times 10^3 + 0.74 \times 13.6 \times 10^3 \times 9.8) \text{ Pa}$$

$$= 1.00 \times 10^5 \text{ Pa}.$$

11.6* 空气的湿度

为什么湿衣服在晴朗的天气比较容易干，而在阴雨天却很难干呢？这类问题都跟大气里所含水蒸气离饱和状态的远近有关。

11.6.1 饱和汽

一瓶汽油，如果不把瓶盖拧紧，过一段时间，汽油就会蒸发掉。装在密封容器中的液体（图 11-22），从液体表面飞出的分子不可能飞散到容器外，只能聚集在液体表面附近的有限空间里。其中一部分分子由于相互碰撞或与器壁碰撞后，又会回到液体，这时在液面上同时存在汽化和液化的过程。随着液面上方汽分子的密度越来越大，回到液体的分子数也越来越多，最后总会达到这样一种状态：在单位时间内单位液面上飞出去的分子数和飞回液体的分子数相等，液面上的汽就达到了饱和状态，饱和状态下的汽叫做饱和汽，饱和汽的压强叫做饱和汽压。没有达到饱和状态的汽叫做未饱和汽。

实验表明，饱和汽的温度越高，饱和汽压也越大，但与饱和汽的体积无关。图 11-23 表明水的饱和汽压与温度的关系。说明饱和汽并不遵循理想气体状态方程。

11.6.2 空气的相对湿度

我们知道，海洋、河川里的水在不断地蒸发，在空中凝结成雨、雪返回地面，因此，大气里总是含有一定量的水汽。空气里的水汽含得越多，空气就越潮湿；空气里的水汽含得越少，空气就越干燥。湿度就是用来描述空气中水汽的多少以及空气干湿程度的物理量。湿度有绝对湿度和相对湿度之分，绝对湿度描述了空气中水汽的多少。

水蒸发的快慢，人对空气干燥、潮湿的感觉，并不取决于空气里所含水汽的多少，而是跟空气里所含水汽离饱和状态的远近有关。夏日，由于气温很高，即使空气里所含水汽多些，由于离饱和状态远，人们不会有空气潮湿的感觉。冬天，空气里所含水汽少些，由于气温低，水汽

离饱和状态较近，人们不会有干燥的感觉。如果在房内用火炉升高室温，水汽离饱和状态远了，就需要在炉上烧水不断供应水汽，使空气干湿适度。

在一定温度下，空气里的水汽压强与同一温度下的饱和汽压的百分比叫做空气的相对湿度。一般情况下，相对湿度在 60% 左右，对于人们的生活起居是较适宜的。纺织厂车间里的相对湿度约 80%，以利于棉纱的加工。农业上水稻在抽穗扬花时，最适宜的相对湿度约 70% ~ 80%。

11.6.3 毛发湿度计

湿度计是专门用来测定空气湿度的仪器。图 11-24 是一种毛发湿度计的构造示意图。它是根据毛发脱脂以后，长度会随空气的相对湿度的变化而改变的原理制成的。相对湿度增大时，毛发就伸长，毛发湿度计上的指针就会转动。人们可以直接读出当时的相对湿度。

本章学习要求

1. 知道气体的态和态参量。
2. 会计算气体的压强。
3. 理解盖·吕萨克定律，知道 $V-t$ 图象。
4. 理解玻意耳定律，知道 $p-V$ 图象。
5. 理解查理定律，知道 $p-t$ 图象。
6. 理解热力学温标，知道绝对零度的意义。理解热力学温度表示的盖·吕萨克定律和查理定律的公式
7. 知道 $V-T$ 图象，知道 $p-T$ 图象。

