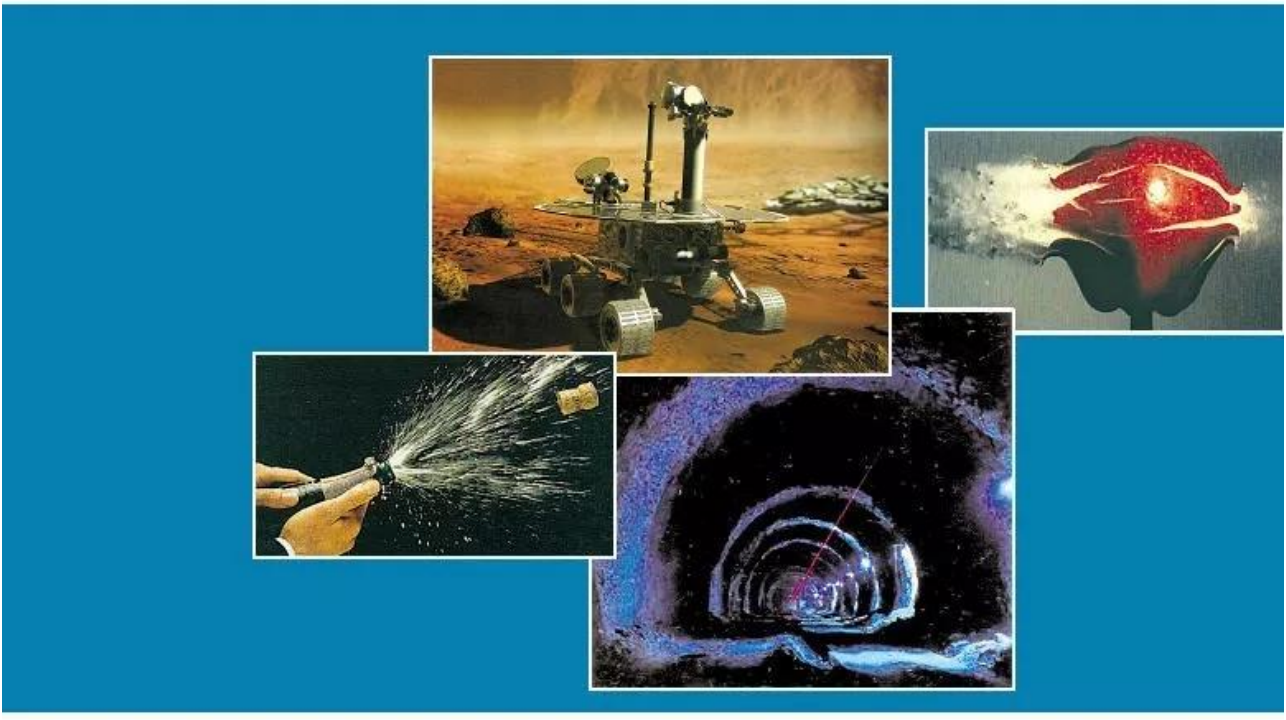
经全国中小学教材审定委员会 2004 年初审通过

普通高中课程标准实验教科书

物理 共同必修 2

PHYSICS

主编 束炳如 何润伟



上海科技教育出版社

常用物理量符号及单位

物理量		单位		备注
名称	符号	名称	符号	
位移	s	米	m	
时间	t	秒	s	
质量	m	千克	kg	
速度	v	米每秒	m/s	
角速度	ω	弧度每秒	rad/s	
频率	f, ν	赫[兹]	Hz	$1\ Hz = 1\ s^{-1}$
加速度	a	米每二次方秒	m/s^2	
力	F	牛[顿]	N	$1\ N = 1\ kg \cdot m/s^2$
功	$W(A)$	焦[耳]	J	$1\ J = 1\ N \cdot m$
功率	P	瓦[特]	W	$1\ W = 1\ J/s$
能量	E	焦[耳]	J	

注：1. 圆括号中的名称和符号，是它前面的名称和符号的同义词。

2. 方括号中的字，在不致引起混淆、误解的情况下，可省略。去掉方括号中的字，即为其名称的省略。

本书主要公式

线速度 $v = \dfrac{2\pi R}{T}$

角速度 $\omega = \dfrac{2\pi}{T}$

向心加速度 $a = \dfrac{v^2}{R} = \omega^2 R$

向心力 $F = m\dfrac{v^2}{R} = m\omega^2 R$

质能关系 $E = mc^2$

光子的能量 $E = h\nu$

物质波的波长 $\lambda = \dfrac{h}{p}$

动能 $E_k = \dfrac{1}{2}mv^2$

重力势能 $E_p = mgh$

机械能 $E = E_k + E_p$

功 $W = Fs\cos\alpha$

功率 $P = \dfrac{W}{t}$

动能定理 $W = \Delta E_k$

或 $Fs\cos\alpha = \dfrac{1}{2}mv_2^2 - \dfrac{1}{2}mv_1^2$

亲爱的同学：



从你打开物理课本起，你已经开始投身于一项壮丽、有趣的探索活动。让我们携手度过一段美好的时光。

你周围世界发生的事情几乎都跟物理学有关，现代社会的许多技术进步都源于对物理规律的理解和应用。学习物理可以使你提高科学素养的愿望得到实现，甚至可以使你成为"专家"。作为现代社会的公民，物理学将有助于我们解决生活、生产中的许多问题。

《物理 1》、《物理 2》是高中学生必须学习的内容。在这里，我们将走过从伽利略到牛顿为建立经典力学体系而开辟的道路，了解从经典力学到现代物理的变革，学习物理学的基本原理，体会物理学的思想观点和研究方法，认识物理学在科学技术上的广泛应用，及其对人类文明与社会发展的巨大影响。

为了让你在学习《物理 2》的过程中获得更大的成功，请浏览本书栏目介绍。

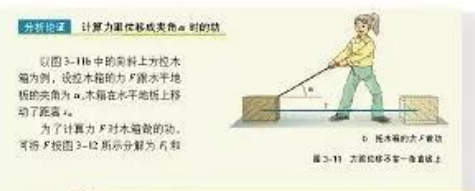
每章的开头都有一些情景，提出一些问题，让你明确本章研究的主要内容。



实验探究

这里将要求你提出问题，设计实验方案，动手做一些有意义的实验，进行科学探究。



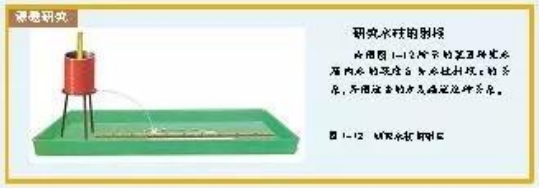


分析论证

在这里，你将经历分析、综合、应用数学工具进行推理、从而得出物理学规律和公式的过程，体会到高中物理理论思维的魅力。

课题研究

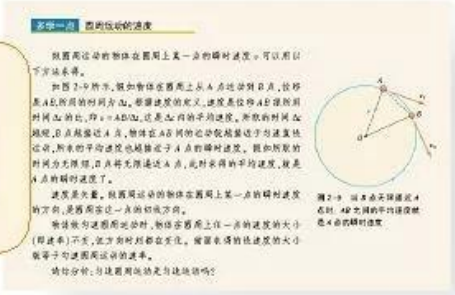
这里提供了一些课题供你选择研究，这种研究将使你的才智得到充分的展示。


课题研究

研究水柱的射程

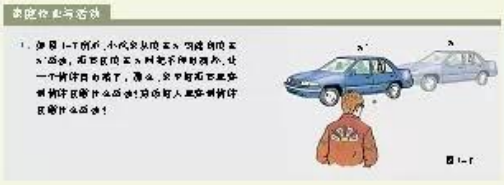
多学一点

这里有更多更深的奥秘，将进一步开阔你的视野。你如果有兴趣，可以作进一步的探索。


多学一点 圆周运动的速度

家庭作业与活动

这里为你提供了丰富多彩的学习活动，让你通过回顾进行自我评价，加深对知识的理解，提高解决问题的能力，体验到成功的喜悦。


家庭作业与活动

信息浏览、STS 栏目

这里为你提供了各种有趣、有用的资料，包括物理学史上的经典事例、科学家小故事等，它们反映了物理学与科学、技术、社会的紧密联系。你的视野将更开阔，你会更加热爱科学。


信息浏览

时间延缓效应的实验验证

目 录



第1章 怎样研究抛体运动 6

1.1 飞机投弹与平抛运动 7

1.2 研究平抛运动的规律 11

1.3 研究斜抛运动 15

第2章 研究圆周运动 21

2.1 怎样描述圆周运动 22

2.2 研究匀速圆周运动的规律 26

2.3 圆周运动的案例分析 31

2.4 研究离心现象及其应用 35

第3章 动能的变化与机械功 41

3.1 探究动能变化跟做功的关系 41

3.2 研究功与功率 47

3.3 动能定理的应用 52

第4章 能量守恒与可持续发展 57

4.1 势能的变化与机械功 57

4.2 研究机械能守恒定律 62

4.3 能量的转化与守恒 67

*4.4 能源与可持续发展 71







第5章 万有引力与航天 78

5.1 从托勒密到开普勒 79

5.2 万有引力定律是怎样发现的 83

5.3 万有引力定律与天文学的新发现 90

5.4 飞出地球去 95



第6章 经典力学与现代物理 104

6.1 经典力学的巨大成就和局限性 105

*6.2 狭义相对论的基本原理 110

*6.3 爱因斯坦心目中的宇宙 115

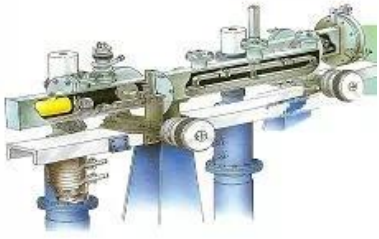
*6.4 微观世界与量子论 122

总结与评价 课题研究成果报告会 128

研究课题示例 128

评价表 129

高中物理选修系列介绍 131



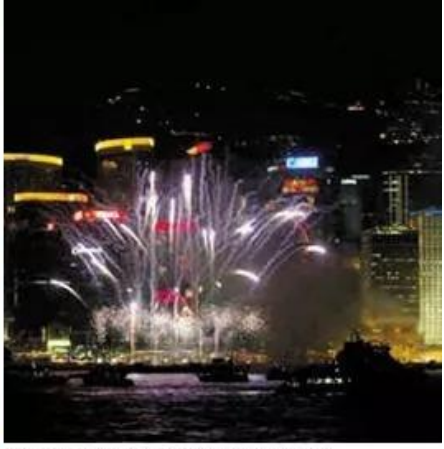
* 打 * 号为选学内容。



运载火箭的运动是曲线运动



海豚从水中跃起的运动是曲线运动



礼花中燃烧颗粒的运动是曲线运动

图 1-1　物体做曲线运动的例子

第 1 章
怎样研究抛体运动

足球场里，人山人海，一场国际足球比赛正在进行。一声哨响，蓝方队员被判犯规，红方获罚任意球。只见红方 10 号队员助跑了几步，飞起一脚，那球在空中划过一道“美丽的弧线”……

在我们生活的广阔空间里，物体在做着各种各样的机械运动，不但有直线运动，更普遍的则是曲线运动（图 1-1）。

那么，怎样研究曲线运动呢？在本章中，我们将以飞机投弹、炮弹发射等现象为背景，从运动的合成与分解出发，沿着伽利略研究抛体运动时走过的道路，学习运用运动的合成与分解的方法分析研究抛体运动，感受数学工具在研究物理问题中的作用。



图 1-2　航空兵的投弹演习

1.1 飞机投弹与平抛运动

从飞机投弹谈起

空军在军事演习中，常需进行投弹演练。飞机沿水平方向飞行时，要使投下的“炸弹”准确地命中地面的目标，飞行员应在何处投弹？

有的同学说：当飞机飞到目标的正上方时投弹，才能命中目标。

有的同学说：当飞机在离目标一定水平距离处投弹，才能命中目标。

……

要想正确地回答这个问题，就要弄清楚“炸弹”离开飞机后的运动情况。

让我们来做一个模拟实验。如图 1-3 所示，使一个小球在水平桌面上以一定的速度向右运动，小球离开桌面后在空中的运动跟炸弹在空中的运动是相似的。你认为哪一幅图中的曲线可以表示小球离开桌面后的运动轨迹？

请动手做一做，并仔细观察小球离开桌面后的运动轨迹。

可以发现，小球因惯性要保持向前运动；同时，小球因受重力作用而向下运动。图 b 中的曲线能大致表示小球的运动轨迹。

将一个物体沿水平方向抛出，在空气阻力可以忽略的情况下，物体所做的运动叫做**平抛运动**(horizontal projectile motion)。上述飞机投弹、小球在空中的运动都是平抛运动。平抛运动是一种二维的曲线运动，那么，怎样来研究平抛运动呢？

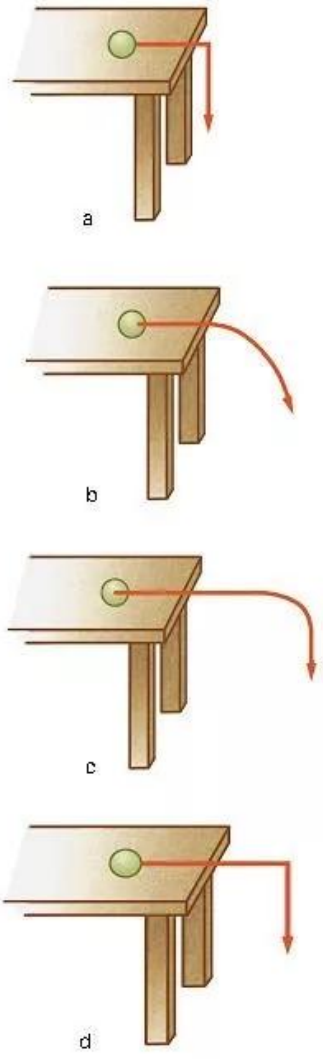


图 1-3 哪一幅图能表示小球运动的轨迹

伽利略的假设

在物理学史上，伽利略(G. Galilei)对抛体运动进行了详细研究，他揭示了对二维曲线运动研究的基本方法。

伽利略认为，做平抛运动的物体同时做两种运动：**在水平方向的运动，物体在这个方向上不受力的作用做匀速直线运动；在竖直方向的运动，物体受到重力作用做自由落体运动。**他假定这两个方向的运动**“既不彼此影响干扰，也不互相妨碍”**，物体的实际运动就是这两个运动的合运动。

由于物体在水平方向做匀速直线运动，它在水平方向通过的位移跟时间的一次方成正比，即在相等的时间间隔内位移相等。物体在竖直方向做自由落体运动，它在竖直方向通过的位移跟时间的二次方成正比，即在同样相等的时间间隔内位移之比为1:3:5:…。据此，伽利略用几何方法作出了平抛物体的运动轨迹，它是一条抛物线(图 1-4)。

笛卡儿(R. Descartes)根据伽利略研究平面曲线运动的数学处理方法，把一维的直线坐标系拓展到二维的平面直角坐标系，建立了解析几何学的基本概念，为许多物理问题的解决带来了方便。

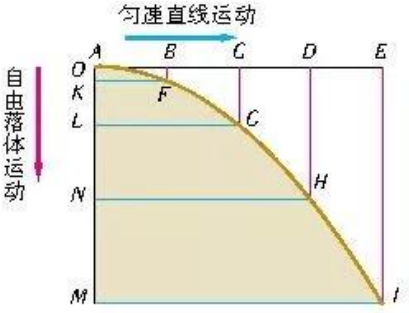


图 1-4　伽利略用几何方法得到的平抛物体的运动轨迹

这样，伽利略对平抛运动的过程和轨迹给出了完整的描述。这是伽利略对抛体运动研究的重大收获，它不但具有重要的实用意义，而且揭示了研究二维或三维运动的基本方法。

伽利略对抛体运动的研究与分析，对你研究较复杂的运动有什么启示？

验证伽利略的假设

下面我们用实验来验证上述伽利略的假设。

实验探究　研究平抛运动

实验的部分装置如图 1-5 所示。实验时，用小锤击打弹性钢片，小球 *B* 沿水平方向飞出，做平抛运动；同时小球 *A* 被放开，做自由落体运动。

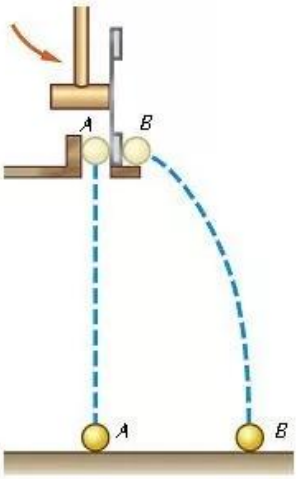


图 1-5　研究平抛运动的实验

你观察到什么现象？

请你分析一下：这个实验的结果能验证伽利略关于平抛运动的假设吗？请说出你的理由。

我们还可以用频闪照相的方法进一步验证伽利略的假设。

分析论证 研究平抛运动的频闪照片

图 1-6 是以间隔 $\frac{1}{30}$ s 拍摄的频闪照片，其中一个小球做自由落体运动，一个小球做平抛运动。请你用刻度尺测量小球在不同时刻水平方向与竖直方向的位移，并记录在下表中。

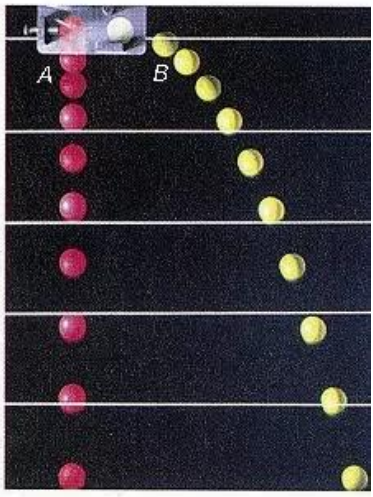


图 1-6 平抛运动的频闪照片

	$t/\left(\frac{1}{30}\text{s}\right)$	0	1	2	3	4	5	…
A 球	x/m							
	y/m							
B 球	x/m							
	y/m							

1. 频闪照片上小球的轨迹跟伽利略用几何方法得到的轨迹是否一致？

2. 伽利略假设平抛运动在水平方向应是匀速直线运动，即小球在相同的时间内通过的位移应相等，你的测量结果怎样？

3. 伽利略假设平抛运动在竖直方向应是自由落体运动，即小球通过的位移应与时间的二次方成正比，你的测量结果怎样？

由以上的实验探究和分析论证，你得出的结论是什么？

家庭作业与活动

1. 如图 1-7 所示，小汽车从位置 A 匀速向位置 A' 运动，乘客在位置 A 时把手伸出窗外，让一个物体自由落下。那么，车中的乘客观察到物体在做什么运动？路边的人观察到物体在做什么运动？

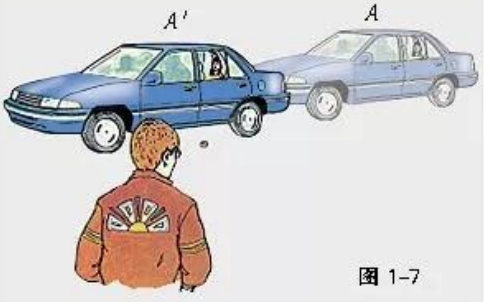


图 1-7

2. 根据伽利略对平抛运动研究所做的假设，下列说法中正确的是
   A. 从同一高度，以大小不同的速度同时水平抛出两个物体，它们一定同时落地，但抛出的水平距离一定不同
   B. 从不同高度，以相同的速度同时抛出的两个物体，它们一定不能同时着地，抛出的水平距离也一定不同
   C. 从不同高度，以不同的速度同时水平抛出的两个物体，它们一定不能同时着地，抛出的水平距离也一定不同
3. 用玩具手枪水平射击一个与枪口位于同一高度的固定靶子，能否击中靶子？若子弹从枪口水平射出的瞬间，靶子从静止开始自由下落，子弹能否击中靶子？
4. 假设一架飞机在高空沿水平方向匀速飞行，每隔相同的时间，从飞机上释放一个物体，请根据伽利略对平抛运动的假设推断：
   (1) 这些物体在落地之前，在空中排列成的几何图线是什么样子？它们在竖直方向的距离之比是多少？
   (2) 这些物体在落地之后，在地面（假设地面平坦）排列成的几何图线是什么样子？相互之间的距离是多少？

1.2 研究平抛运动的规律

飞机水平飞行时，投下的“炸弹”做平抛运动。要使“炸弹”命中目标，飞机应该在离目标有一定水平距离时投弹。这个距离是多少呢？要解决这个问题，就必须对平抛运动进行定量的研究。

运动的合成与分解

从上一节的伽利略对平抛运动的研究和验证实验我们知道，平抛运动可以看成是水平方向运动和竖直方向运动的合运动。人们在研究比较复杂的运动时，通常把这个运动看作是由两个或几个比较简单的运动组成的，这就是运动的合成与分解。物理学中，把物体的实际运动叫做**合运动**，而把组成合运动的两个或几个运动叫做**分运动**。

由分运动求合运动叫**运动的合成**(composition of motions)，由合运动求分运动叫**运动的分解**(resolution of motion)。运动的合成与分解遵循怎样的规律呢？

力是矢量，力的合成与分解遵循平行四边形定则。研究运动的合成与分解就是要研究描述运动的位移、速度、加速度等物理量的合成与分解，这些量都是矢量，它们的合成与分解都遵循平行四边形定则。

运用平行四边形定则可以算出做平抛运动物体的位移、速度等物理量。

案例分析

案例　研究船渡河的运动

如图 1-8 所示，有一条渡船正在渡河，河宽为 260 m，船在静水中的速度是 36 km/h，水的流速是 18 km/h。为了让船能垂直于河岸渡河，船应该怎样运动？

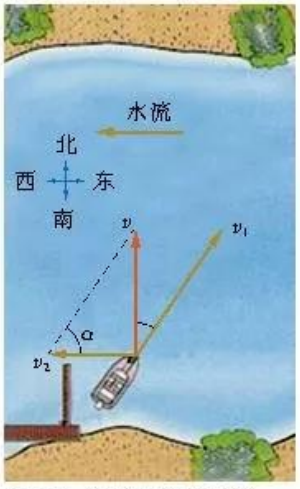


图 1-8　研究船渡河的运动

分析　船在渡河过程中的运动是由两个分运动合成的：船的

匀速运动和水流推动船沿河岸方向的匀速运动。

解答 设河宽 $s = 260$ m，渡船相对于静水的速度 $v_1 = 36$ km/h $= 10$ m/s，河水相对于河岸的速度 $v_2 = 18$ km/h $= 5$ m/s，

渡船相对河岸的运动速度大小

$$v = \sqrt{v_1^2 - v_2^2} = \sqrt{10^2 - 5^2}\ \text{m/s} = 8.7\ \text{m/s}$$

船渡河的时间 $t = \dfrac{s}{v} = \dfrac{260}{8.7}\ \text{s} = 29.9\ \text{s}$

因为渡船参与的两个分运动都是匀速直线运动，所以渡船的合运动也是匀速直线运动。

由图所示的几何关系知 $\cos\alpha = \dfrac{v_2}{v_1} = \dfrac{5}{10} = \dfrac{1}{2}$

得 $\alpha = 60°$

因此，为了让船能垂直于河岸渡河，渡船的航行方向应指向上游方向，且与河岸成 60°角。

研究平抛运动的规律

分析论证 怎样计算平抛运动的位移和速度

将运动的合成与分解应用于平抛运动，不仅可以用几何方法画出做平抛运动物体的轨迹，还可以算出物体在任意时刻的位移和速度。

如图 1-9 所示，设小球离开桌面时的初速度是 v_0。

在水平方向上，由于不受力的作用，小球因惯性以抛出时的

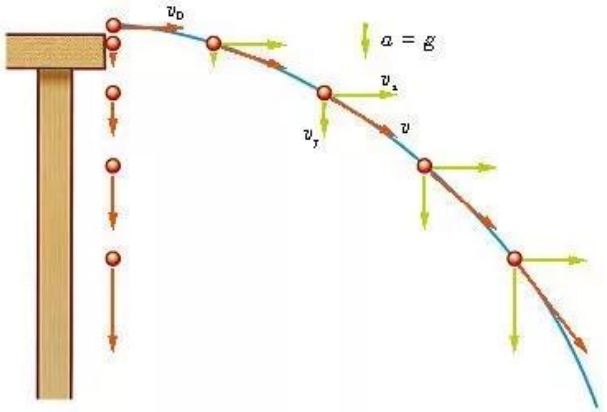


图 1-9 平抛运动

速度做匀速直线运动。物体在任一时刻的速度 v_x、位移 x 分别是

$$v_x = v_0 \qquad x = v_0 t \tag{1}$$

在竖直方向上，小球只受重力作用，做自由落体运动。小球在任一时刻的速度 v_y、位移 y 分别是

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

你能根据分运动的速度和位移，求出图 1-6 中的小球在 1 s、2 s、3 s、…各时刻的速度和位移的大小和方向吗？

做曲线运动的物体的速度方向，是曲线上物体所在的这一点的切线方向。

多学一点　推导平抛运动的轨道方程

把(1)和(2)式中的 t 消去，可得到平抛运动的轨迹方程

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

想一想：这是什么曲线的方程？

再研究飞机投弹问题

现在你可以定量地分析解决飞机投弹的问题了。

案例分析

案例　一架飞机水平飞行的速度为 250 m/s，飞机距地面的高度为 3000 m，飞行员应该在离目标多少水平距离时投弹，才能准确命中目标？（g 取 10 m/s²）

分析　由于飞机的水平速度为 250 m/s，因而炸弹离开飞机后的运动是以 250 m/s 的初速度做平抛运动，所以飞行员必须在离目标一定水平距离时投弹才能命中目标。

炸弹运动的水平距离可根据 $x = v_0 t$ 求出。而炸弹在空中运动的时间 t 可根据飞机的高度，用自由落体运动的规律求出。

解答　由题知 $v_0 = 250$ m/s，$h = 3000$ m。

由 $h = \frac{1}{2} g t^2$，可得

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{2 \times 3000}{10}}\ \text{s} = 24.5\ \text{s}$$

炸弹在水平方向上运动的距离 $x = v_0 t = 250 \times 24.5\ \text{m} = 6125\ \text{m}$。

可见，飞行员应该在离目标水平距离为 6125 m 处投弹，才能命中目标。

家庭作业与活动

1. 图 1-10 是一小球做平抛运动时被拍下的频闪照片的一部分，背景标尺每小格表示 5 cm。由这张照片可得小球做平抛运动的初速度为 _____ m/s。
2. 四楼阳台离地面高度约 9.0 m，在阳台上水平抛出一个小皮球，落点离阳台的水平距离约 6.0 m，则球抛出时的速度约有多大？
3. 图 1-11 中，一名网球运动员正在将球水平击出，他要让球准确地落在图中所示的位置。你能根据图中所给的数据，计算出运动员击出的球的速度吗？
4. 关于平抛运动，下列说法中正确的是
   A. 它是速度大小不变的曲线运动
   B. 它是加速度不变的匀变速曲线运动
   C. 它是水平方向的匀速直线运动和竖直方向的匀速直线运动的合运动
   D. 它是水平方向的匀速直线运动和竖直方向的匀加速直线运动的合运动
5. 某同学在离地高 5 m 处以 5 m/s 的水平速度抛出一个物体，不计空气阻力，则物体在空中运动的时间为 _____ s，物体落地点到抛出点的水平距离为 _____ m（g 取 10 m/s²）。
6. 一架飞机在距地面 0.81 km 的高度以 2.5 × 10² km/h 的速度水平飞行。为了使飞机上投下的物资落在指定的目标上，应该在与目标的水平距离为多远的地方投放（不计空气阻力）？
7. 根据学过的平抛运动知识，用直尺测量玩具手枪子弹射出枪口时的速度。
   (1) 你的测量方法是 _____。
   (2) 计算子弹速度的公式是 _____。

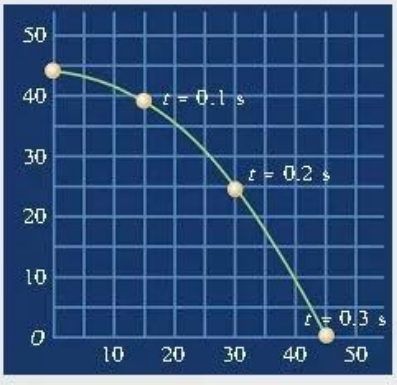


图 1-10

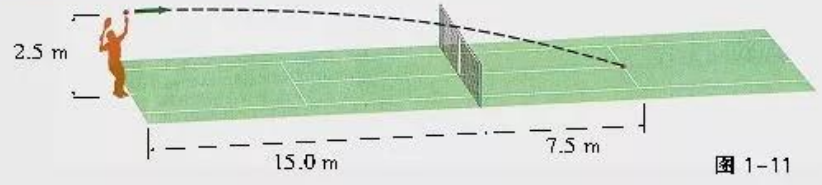


图 1-11

课题研究

研究水柱的射程

请用图 1-12 所示的装置研究水桶内水的深度 h 与水柱射程 s 的关系，并用适当的方式描述这种关系。

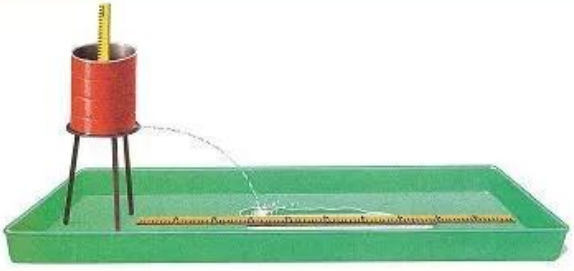


图 1-12　研究水柱的射程

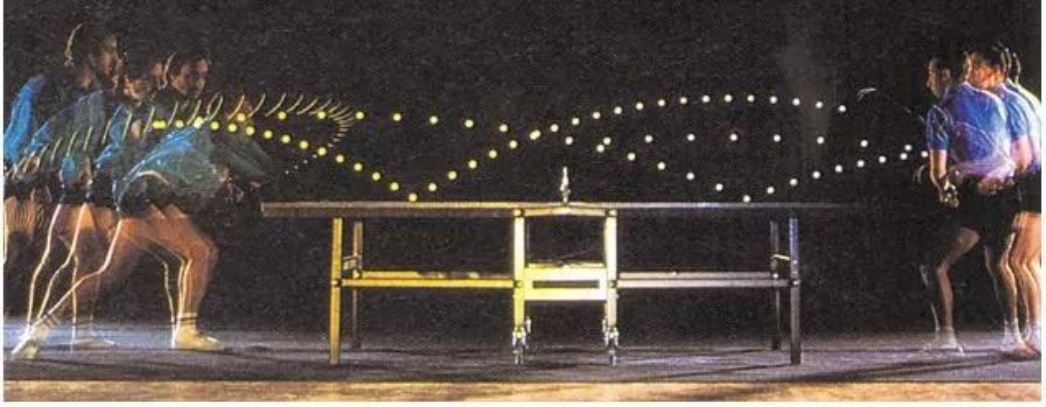


图 1-13　乒乓球的运动轨迹

1.3

研究斜抛运动

炮兵部队进行实弹演习时，炮弹以**一定的初速度斜向射出去，在空气阻力可以忽略的情况下，我们把物体所做的这类运动叫做斜抛运动**（angle projectile motion）。生活中斜抛运动的例子很多，例如，足球运动员踢出的足球的运动，投出去的铅球、铁饼和标枪的运动……

你还能列举一些物体做斜抛运动的例子吗？

本节以炮弹发射为背景，运用运动合成的原理来研究斜抛运动的规律。

为了研究问题的方便，我们假定空气对炮弹的阻力可以忽略不计。

怎样研究斜抛运动

如图 1-14 所示，发射出去的炮弹具有一个向着斜上方的初速度 v_0，不计空气阻力，炮弹在空中运动的轨迹怎样？

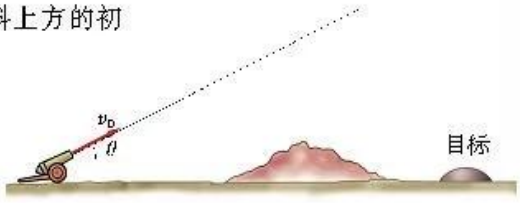


图 1-14　研究炮弹的运动

分析论证

研究斜抛运动，大致有两种思路。

方案 1

设想炮弹不受任何力的作用，它将沿着初速度 v_0 的方向做匀速直线运动。事实上，炮弹在竖直方向受到重力作用，因此它在竖直方向上做自由落体运动。根据运动的合成，我们可以把炮弹的

运动看成是沿初速度 v_0 方向的匀速直线运动与沿竖直方向的自由落体运动的合运动。

如图 1-15 所示，每经过 1 s，炮弹沿初速度方向走过相等的距离；而在竖直方向上，炮弹按自由落体运动的规律，在 1 s 内、2 s 内、3 s 内、…下落的距离之比为 1∶4∶9∶…

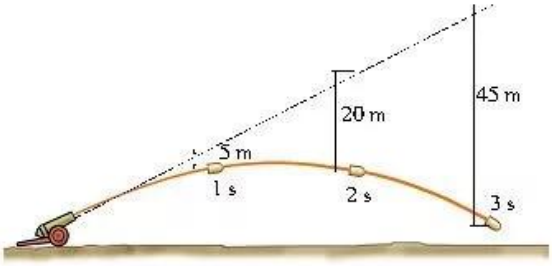


图 1-15　炮弹做斜抛运动时的轨迹

根据以上分析，可以画出炮弹做斜抛运动时的轨迹（图 1-15）。你不妨在图 1-14 中也试画一下，并将你画的轨迹与图 1-15 做一比较。

方案 2

类似于研究平抛运动的方法，以炮弹射出点为原点，建立直角坐标系（图 1-16），将初速度 v_0 分解为沿水平方向的分量 v_{0x} 和沿竖直方向的分量 v_{0y}，这样，炮弹的运动就可以看成是以下两个运动的合运动：

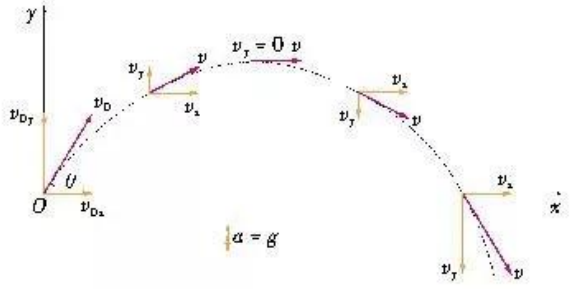


图 1-16　斜抛运动沿水平和竖直方向分解

在水平方向上，炮弹不受力的作用，炮弹在这个方向上的分运动是速度为 $v_x = v_{0x}$ 的匀速直线运动；

在竖直方向上，炮弹受重力作用，加速度为 g，方向与初速度 v_{0y} 的方向相反，因此炮弹沿竖直方向的分运动是匀减速直线运动。

分析图 1-16，你能描述一下炮弹在做斜抛运动的过程中速度的变化情况吗？

在分析炮弹运动轨迹时可以发现：炮弹的运动轨迹对经过最高点的竖直线是左右对称的。这启发我们：是不是可以将斜抛运动作为平抛运动来分析处理呢？有兴趣的同学不妨一试。

设炮弹从炮筒中射出时的速度是 100 m/s，不计空气阻力，当炮筒的仰角分别为 30°、45°、60°时，请用运动合成与分解的方法，描绘炮弹的运动轨迹。

研究斜抛运动的射程与射高

在抛体运动中，人们比较关注的是被抛物体的射高、射程和飞行时间。

射高是被抛物体所能达到的最大高度。

射程是被抛物体抛出点与落点之间的水平距离。

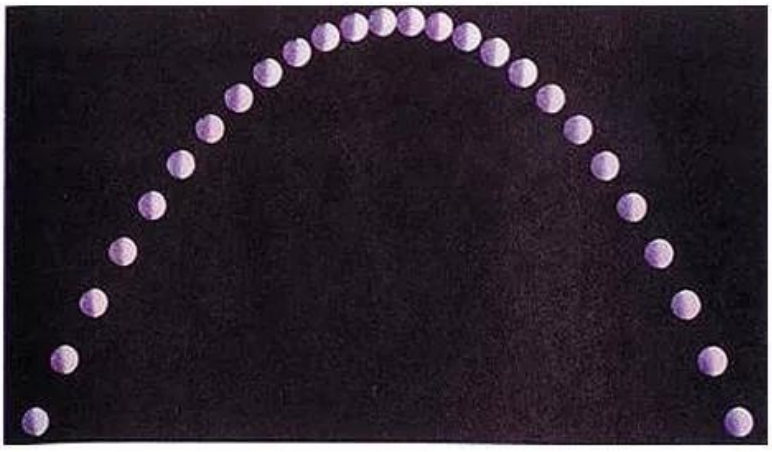


图 1-17　斜抛小球的频闪照片

飞行时间就是被抛物体从被抛出点到落点所用的时间。

你可以用频闪照相(图 1-17)等实验方法进行研究,也可以用理论分析的方法进行研究。

实验探究　研究斜抛运动的射程和射高

如图 1-18 所示,用喷水枪喷射出一股水流,改变水流喷出时初速度的大小和方向(即喷射角),探究斜抛运动的射程和射高与哪些因素有关。说出你的探究结论。

请根据实验结果讨论:

1. 当初速度一定时,喷射角为多大时,射程最远?

2. 要获得同样的射程,可以有几个不同的喷射角?你能找出其中的规律吗?

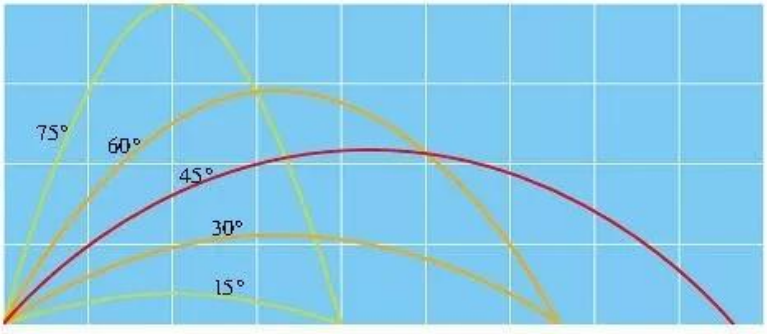


图 1-18　研究喷水枪喷射出的水流的射程

多学一点　理论推导斜抛物体的射程和射高

如图 1-16 所示,设炮弹以初速度 v_0 向斜上方射出,抛射角(即初速度方向与水平方向的夹角)为 θ。先建立直角坐标系,将初速度 v_0 分解为

$$v_{0x} = v_0 \cos\theta \qquad v_{0y} = v_0 \sin\theta$$

飞行时间

$$T = \frac{2v_{0y}}{g} = \frac{2v_0 \sin\theta}{g}$$

射高 Y：　$Y=\dfrac{v_{0y}^2}{2g}=\dfrac{v_0^2\sin^2\theta}{2g}$

射程 X：　$X=v_0\cos\theta\cdot T=\dfrac{2v_0^2\sin\theta\cos\theta}{g}=\dfrac{v_0^2\sin 2\theta}{g}$

可见，给定 v_0，当 $\theta=45°$ 时，射程达到最大值 $X_{max}=\dfrac{v_0^2}{g}$。

请讨论：运动员在投掷铅球、标枪时，应把投射角控制在什么角度为好？运动员的身高对他的投掷成绩有没有影响呢？

你能进一步推导出斜抛运动的轨迹方程吗？请试一试！

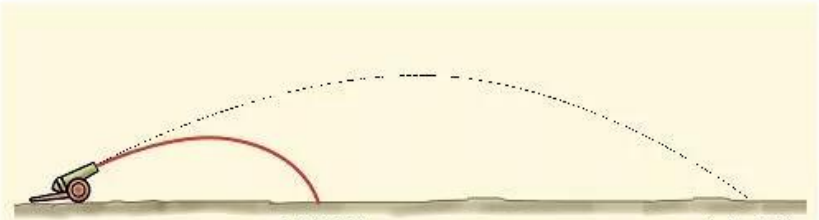


图 1-19　炮弹运动的理想射程和实际射程

理想弹道曲线与实际弹道曲线

在炮弹的实际运动过程中，由于初速度很大，空气阻力的影响是很大的。按不计空气阻力计算：用 20°角射出初速度为 600 m/s 的炮弹，射程应达 24 km。但实际测量的结果却只有 7 km，射高也减小，而且轨迹也不再是抛物线，而变成了图 1-19 中实线所示的弹道曲线（图中的虚线是理想弹道曲线）。在进行炮弹射击训练时，要根据具体情况，对理想弹道曲线进行修正，才能得到实际所需的弹道曲线。

信息浏览

伽利略是怎样研究抛体射程的

伽利略把以各种抛射角发射的物体的射程和射高——计算出来，制成表格，从中得出：当抛射角 $\alpha=45°$ 时，射程最大；抛射角为 $45°\pm\beta$ 的两个斜抛运动射程相等。而在他之前，意大利学者塔尔塔利亚(N.Tartaglia)于 1546 年就指出了前一个结论。

伽利略评论道："仅用数学便得出如此严格的证明，这使我心中充满了又惊又喜的感觉。……通过探索原因而达到对某一简单效应的理解会使人茅塞顿开，从而使理解和验证其他事实毋需要借助实验，目前的例子恰好说明了这一点；由于作者成功地证明了最大射程必定是仰角为 45°时发生的，因此他也证明了在实际上可能从未观察到的情况，即在同 45°角相差（大于或小于）同一数量的仰角下，射程是相等的……"

你从伽利略对斜抛物体射程的研究中得到了哪些启示？

你能证明斜抛体在同样大小的初速度下，抛射角为 $45°+\beta$ 和 $45°-\beta$（$\beta<45°$）时的射程相等吗？

家庭作业与活动

1. 下列哪一选项中的物体做抛物线运动?
   A. 一个从跳板上跳入游泳池的人
   B. 一艘绕着地球运行的太空飞船
   C. 从树上掉下的一片叶子
   D. 沿着平直轨道行进的一列火车
2. 要提高运动员掷铅球的成绩,应该采取哪些措施?
3. 我国于 2003 年 10 月 15 日成功发射了"神舟"5 号载人宇宙飞船,假如航天员杨利伟在飞船中抛出一个小球,小球的运动轨迹将是怎样的?为什么?
4. 图 1-20 所示的是做斜抛运动的物体在几个位置时的速率。分析图中给出的速率,你找到了什么规律?你能用理论分析的方法证明这一规律吗?

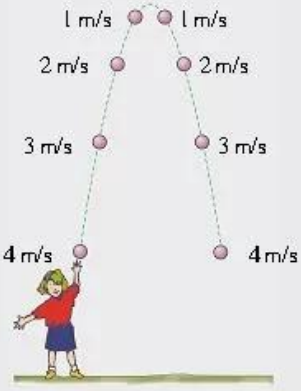


图 1-20

课题研究

研究弹道曲线

学了抛体运动后,有些同学可能会对有关的军事知识产生兴趣,或许想进一步了解弹道曲线方面的知识。

研究弹道曲线的规律是军事和射击运动中的基本科目。请你分析:实际的弹道曲线是由哪些因素决定的?用枪、炮瞄准目标时应考虑哪些因素?怎样增大枪、炮的射程?等等。

在进行此项研究时,你可能要向当地驻军部队战士请教,最好能参加一次实际的射击活动。你可能要查阅一些参考资料。

请把你的研究成果写成科学报告,向同学和老师介绍。

课外活动

假如有一天能在月球上开运动会,你能想象出那将是一种什么样的情景吗?例如,掷铅球、投标枪的成绩会发生什么变化?跳远、跳高的成绩会发生什么变化?等等。

你可以从互联网、资料室查询有关资料。

班级还可以此为题,召开一次科学讨论会。


图 1-21 月球、卫星与地球(近处的为月球)

1.x

第 1 章家庭作业与活动

1. 某人站在匀速运动的自动扶梯上，经时间 t_1 恰好到达楼上。若自动扶梯停止运动，此人沿梯上行，需经时间 t_2 到达楼上。如果自动扶梯正常运行，人仍保持原来的步伐沿梯而上，则到达楼上的时间为 _____。
2. 两个相同的物体位于同一高度处，其中一个水平抛出，另一个沿光滑斜面从静止自由下滑，问哪一个物体先到达地面？到达地面时，两者速率是否相等？
3. 一个小球从高处水平抛出，落地的水平位移为 s。现将 s 分成三等分，则小球相继经过每 $\frac{s}{3}$ 的时间内，下落高度之比为

   A. 1∶1∶1　B. 1∶2∶3　C. 1∶3∶5　D. 1∶4∶9
4. 春游时，在农田旁看见一台正在抽水的农用水泵，其出水管水平放置。只用一把刻度尺，如何估算出水泵的出水口在单位时间内流出的水量（设水从出水口均匀流出）？要求说明需测量的物理量。
5. 你观察过步枪吗？步枪的枪身上有标尺，枪口有准星。用步枪瞄准射击时，口诀是“三点成一线”。用你所学到的知识解释“三点成一线”的物理意义，讨论从枪口射出去的子弹的运动轨迹是什么形状。
6. 水平匀速飞行的飞机上，相隔 1 s 落下物体 A 和物体 B。在落地前，A 物体将

   A. 在 B 物体的前方

   B. 在 B 物体的后方

   C. 在 B 物体正下方

   D. 在 B 物体前下方
7. 做平抛运动的物体，每秒速度增量总是

   A. 大小相等，方向相同

   B. 大小不等，方向不同

   C. 大小相等，方向不同

   D. 大小不等，方向相同

*8. 一艘小船从河岸的 A 处出发渡河，河宽为 260 m，船在静水中的速度是 18 km/h，水流速度是 9 km/h，如图 1-23 所示。为使船在最短的时间内到达河对岸，问：

   (1) 船渡河最短时间是多少？

   (2) 船到达河对岸的位置在 A 点下游多远处？



图 1-22　56 式半自动步枪及其标尺

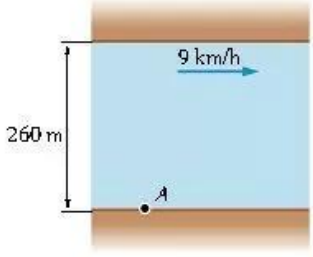
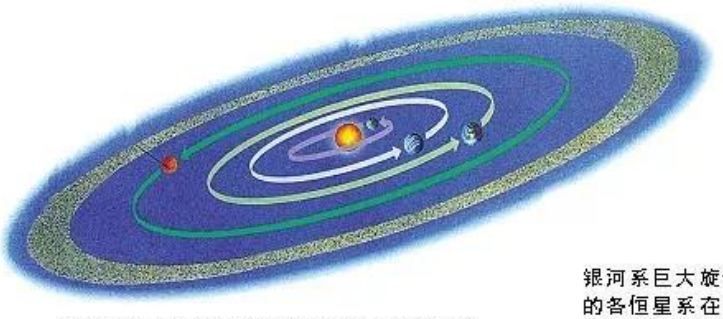
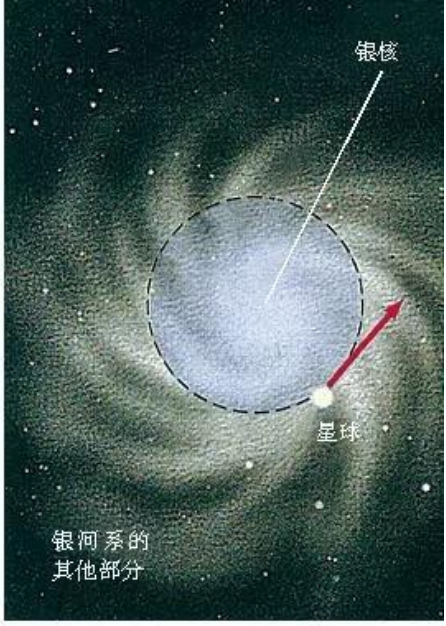


图 1-23



行星围绕太阳的运动可近似看作是圆周运动



银河系巨大旋臂上的各恒星系在绕银核的圆周上运动

图 2-1　这些物体都在做圆周运动

第 2 章
研究圆周运动

你玩过游乐场里的过山车吗？你看它风驰电掣般地冲上一个圆环形的轨道，到达圆环顶部时，整个车子倒了过来，车上的人头朝下，脚朝上，真是惊心动魄。

过山车在这里做的是圆周运动。

圆周运动也是一种常见的曲线运动。例如，人造地球卫星的运动，行星围绕太阳的运动，汽车在公路转弯处的运动，钟表指针上各点的运动等，都可以看作圆周运动。

我们怎样来描述和研究圆周运动呢？

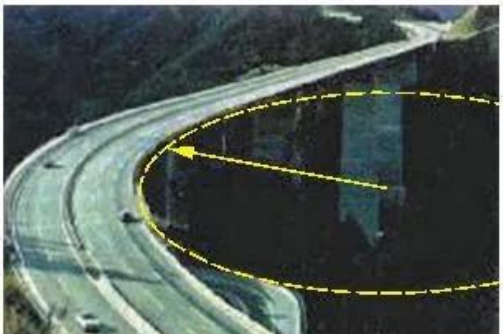
做圆周运动的物体，速度在改变，因而就有加速度，那么做圆周运动物体的加速度有什么特点？力是产生加速度的原因，那么，使物体做圆周运动的力有什么特点？圆周运动遵循哪些运动规律呢？

在本章中，我们将以生活中的圆周运动为背景，研究圆周运动的描述方法，探讨匀速圆周运动的规律，以及这些规律在生活、生产和现代科学技术中的应用。

游乐场里的过山车在做圆周运动



行驶在公路弯道处的车辆在做圆周运动



链球在做圆周运动



2.1 怎样描述圆周运动

做圆周运动的质点的运动轨迹是圆，描述圆周运动的方法跟描述直线运动与抛体运动的方法既有相同点，又有不同点。那么，应该用哪些物理量来描述圆周运动呢？

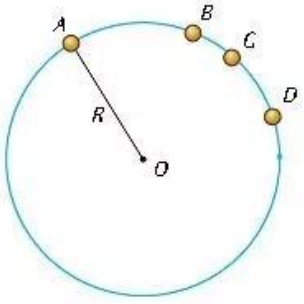


图 2-2　圆周运动的路程与位移

用你熟悉的物理量描述

路程与位移

在直线运动中，常用路程、位移来描述物体的运动。对圆周运动，同样也可以用路程与位移来描述。如图 2-2 所示，物体从 A 点沿圆周运动到 B、C、D 各点。请在图中表示：

1. 物体从 A 点运动到 B、C、D 各点所经过的路程。

2. 物体从 A 点到 B、C、D 各点的位移。

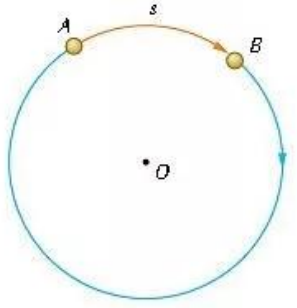


图 2-3　物体经过的弧长与所用时间的比值是圆周运动的线速度

线速度

物体做直线运动的快慢可以用速度来表示，物体做圆周运动的快慢则常常用线速度来表示。

物体经过的圆弧 AB 的长度 s（图 2-3）跟通过这段圆弧所用时间 t 的比值，叫做圆周运动的**线速度**(linear velocity)。线速度的大小可用下式计算：

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

那么圆周运动的速度方向是怎样的呢？如图 2-5 所示，雨伞旋转起来后，水滴将沿雨伞边缘的切线方向飞出。

观察图 2-6，用砂轮打磨工件时，火花是沿什么方向飞出的？这个现象说明了什么问题？



图 2-4　钟表指针上的各点都可看作在做匀速圆周运动

研究表明，圆周运动的线速度方向沿着圆周的切线方向。

物体做圆周运动时，如果在相等的时间里通过的圆弧长度相等，这种运动就叫做**匀速圆周运动**(uniform circular motion)。物体

做匀速圆周运动时，线速度 v 的大小是不变的。钟表指针上各点的运动、“神舟”5号飞船定轨后环绕地球的运动、月亮绕地球的运动都可以近似看作是匀速圆周运动。

你还知道哪些物体做匀速圆周运动？试举例说明。



图 2-5 水滴从伞的边缘沿切线方向飞出

用角度来描述

角速度

物体做圆周运动的快慢还可以用角速度来描述。在相同的时间内，连接运动物体与圆心的半径所转过的角度越大，物体沿圆周运动得就越快。

如图 2-7 所示，物体做圆周运动时，连接它与圆心的半径转过的角度 $\Delta\theta$ 跟所用时间 t 的比值叫做角速度 (angular velocity)，角速度一般用 ω 表示，即

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

式中，$\Delta\theta$ 的单位是弧度，符号是 rad，ω 的单位是弧度/秒，符号是 rad/s，读作“弧度每秒”。

想一想：物体做匀速圆周运动时，它的角速度大小是否变化？



图 2-6 火花沿砂轮的切线方向飞出

周期与转速

圆周运动是一种周期性的运动，因而，描述圆周运动的物理量还有周期和转速。

物体沿圆周运动一周的时间叫做圆周运动的周期(period)，周期一般用 T 表示，在国际单位制中的单位是 s。物体在单位时间内完成圆周运动的圈数，叫做转速(velocity of rotation)，一般用 n 表示，单位是每秒(符号 s^{-1})或转每分(r/min)。由此可知

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

想一想：匀速圆周运动的周期与转速是否变化？

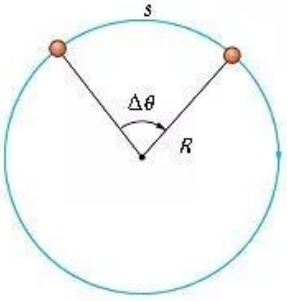


图 2-7 用角速度表示圆周运动的快慢

角速度与线速度的关系

以上描述圆周运动的各物理量之间是互相联系的，例如物体经过的弧长 s 与转过的角度 $\Delta\theta$ 之间的关系是

$$s = R\Delta\theta$$

式中 R 是圆周半径。

用角度来描述圆周运动，建立角速度、转速等概念，比单纯用线速度来描述圆周运动情况更具有实用价值。

你能否证明线速度和角速度的关系是

$$v = \omega R$$

你还能用周期 T、转速 n 来描述匀速圆周运动的线速度 v 和角速度 ω 吗？

请写出你的推导过程与结论。

案例分析

案例 观察自行车的主要传动部件，了解自行车是怎样用链条传动来驱动后轮前进的，如图 2-8 所示，其中右图是链条传动的示意图，两个齿轮俗称“牙盘”。试分析并讨论：

(1) 同一齿轮上各点的线速度、角速度是否相同？

(2) 两个齿轮相比较，其边缘的线速度是否相同？角速度是否相同？转速是否相同？

(3) 两个齿轮的转速与齿轮的直径有什么关系？你能推导出两齿轮的转速 n_1、n_2 与齿轮的直径 d_1、d_2 的关系吗？

试根据以上分析，说明自行车将踏板的转动传递给后轮的过程。你知道多挡变速自行车是怎样变速的吗？

分析 自行车前进时，链条不会脱离齿轮打滑，因而两个齿轮边缘的线速度大小必定相同。但两个齿轮的直径不同，根据公式 $v = \omega R$ 可知，两齿轮的角速度不同，且角速度与直径成反比。根据以上分析，你就可以回答上面的问题了。

请在观察的基础上，运用所学的知识分析讨论所提出的问题，并与同学交流讨论的结果。

请在课外用刻度尺测量自行车的两个齿轮的直径和车轮的直径(例如，被称为“26 英寸”的车轮，其直径应为 66.04 cm)。计算



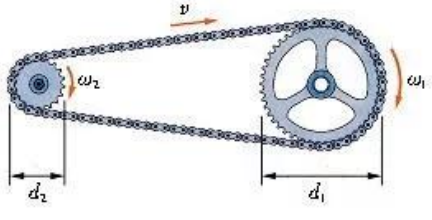


图 2-8 自行车与链条传动

一下，踏脚板绕中轴每转一转，自行车前进多少米？

多学一点　圆周运动的速度

做圆周运动的物体在圆周上某一点的瞬时速度 v 可以用以下方法求得。

如图 2-9 所示，假如物体在圆周上从 A 点运动到 B 点，位移是 AB，所用的时间为 Δt。根据速度的定义，速度是位移 AB 跟所用时间 Δt 的比值，即 $v=\dfrac{AB}{\Delta t}$，这是 Δt 时间内的平均速度。所取的时间 Δt 越短，B 点越接近 A 点，物体在 AB 间的运动就越接近于匀速直线运动，所求的平均速度也越接近于 A 点的瞬时速度。假如所取的时间为无限短，B 点将无限逼近 A 点，此时求得的平均速度，就是 A 点的瞬时速度了。

速度是矢量。做圆周运动的物体在圆周上某一点的瞬时速度的方向，是圆周在这一点的切线方向。

物体做匀速圆周运动时，物体在圆周上任一点的速度的大小（即速率）不变，但方向时刻都在变化。前面求得的线速度的大小就等于匀速圆周运动的速度的大小。

请你分析：匀速圆周运动是匀速运动吗？

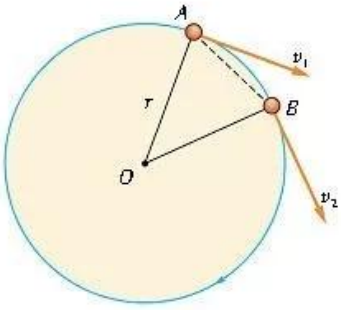


图 2-9　当 B 点无限逼近 A 点时，AB 之间的平均速度就是 A 点的瞬时速度

家庭作业与活动

1. 图 2-10 表示一位同学用绳子系着一个软木塞，让它在竖直平面内做圆周运动。若在软木塞运动至最高点或最低点时突然松手，软木塞将怎样运动？
2. 某物体做匀速圆周运动，圆周的半径为 R，周期为 T，在运动 $\dfrac{9}{4}T$ 的时间内，位移的大小是____，路程是____，转过的角度是____。
3. 手表秒针长 1.3 cm，分针长 1.2 cm，秒针和分针针尖运动的线速度是多大？秒针和分针转动的角速度是多大？
4. 钟表分针的角速度与时针的角速度之比是_____。
5. 图 2-11 是皮带传动机构的示意图（A、B 轮共轴）。

(1) 请分析：三个轮子轮缘上哪些点可能具有相同大小的线速度？哪些点可能具有相等的角速度？三个轮子转速的关系如何？

(2) 设轮 A 与轮 B 的半径分别为 0.4 m 和 0.2 m，轮 C 的半径为 0.2 m。已知轮 B 每分钟转 600 转，计算每个轮子边缘上一点的线速度大小和角速度的大小。



图 2-10

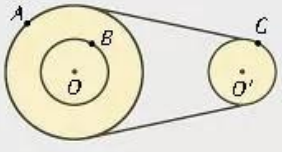


图 2-11

2.2 研究匀速圆周运动的规律

速度是矢量，只要运动物体的速度发生了变化，就表明物体有了加速度。物体做匀速圆周运动时，虽然速度的大小不变，但方向却时刻都在变化，这表明：做匀速圆周运动的物体具有加速度；加速度只改变速度的方向，不改变速度的大小。

物体做匀速圆周运动时，加速度的大小与方向是怎样的呢？它是怎样产生的呢？

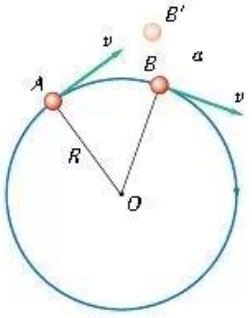


图 2-12　匀速圆周运动具有指向圆心的加速度

向心加速度

我们已经知道，物体做匀速圆周运动时，其速度方向沿圆周的切线方向。如图 2-12 所示，物体在圆周上从 A 点经时间 Δt 运动到 B 点。物体在 A 点时，其速度方向沿 A 点的切线方向，如果没有力的作用（因而没有加速度），物体将因惯性而沿着这条切线运动到 B' 点。然而，实际上物体却是运动到圆周上的 B 点，且速度方向是 B 点的切线方向。这说明做匀速圆周运动的物体受到力的作用，产生了加速度，这个加速度只改变速度的方向。分析表明，做匀速圆周运动的物体在圆周上各点的加速度方向，总是跟该点的速度方向垂直，即沿着半径指向圆心，如图 2-13 所示。

想一想：假如物体在圆周上某一点的加速度方向跟速度方向不垂直，物体沿圆周的运动还能保持“匀速”吗？

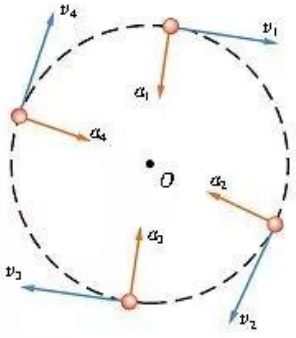


图 2-13　做匀速圆周运动物体的加速度与速度方向垂直指向圆心

做匀速圆周运动的物体具有的沿半径指向圆心的加速度，叫做**向心加速度**(centripetal acceleration)。

理论和实验都证明，向心加速度的大小跟圆周运动的速度和半径有关，其表达式为

$$a = \frac{v^2}{R} \quad 或 \quad a = \omega^2 R$$

在上面两式中，前式表明向心加速度跟半径 R 成反比，后式

却表明向心加速度跟半径 R 成正比。这两个式子是否互相矛盾？你是怎样理解的？

由前式可知，当线速度 v 一定时，R 越大，a 就越小。设有一个物体的线速度为 100 m/s，运动半径等于地球半径，那么是否可以把这个物体的运动看成是水平地面上的匀速直线运动？为什么？

你能用周期 T 或转速 n 来表示向心加速度吗？

多学一点 推导向心加速度公式

如图 2-14a 所示，物体从 A 点经时间 Δt 沿圆周匀速率运动到 B 点，转过的角度为 $\Delta\theta$。物体在 B 点的速度 v_B 可以看成是它在 A 点速度 v_A（$v_A=v_B=v$）和速度的变化量 Δv 的合速度，如图 2-14b。

当 Δt 趋近于 0 时，$\Delta\theta$ 也趋近于 0，B 点接近 A 点，Δv 与 v_A 垂直，指向圆心。所以向心加速度方向沿半径指向圆心。

因为 v_A、v_B 和 Δv 组成的三角形与 $\triangle OAB$ 是相似三角形，所以

$$\frac{\Delta v}{AB}=\frac{v_A}{R}$$

即

$$\Delta v=\frac{AB\cdot v}{R}$$

将上式两边同时除以 Δt，得

$$\frac{\Delta v}{\Delta t}=\frac{AB}{\Delta t}\times\frac{v}{R}$$

当 Δt 趋近于 0 时，等式左边 $\dfrac{\Delta v}{\Delta t}$ 即为向心加速度 a 的大小，$\dfrac{AB}{\Delta t}$ 等于匀速圆周运动的线速度 v，代入上式整理得

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

你能否进一步证明 $a=\omega^2R$？

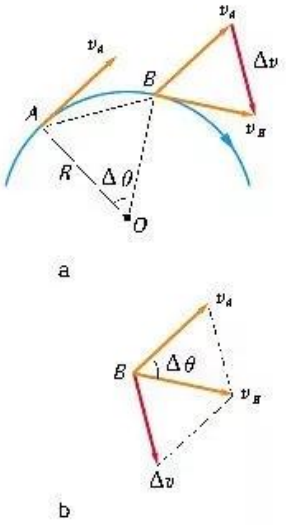


图 2-14 从速度合成的角度看圆周运动速度的变化

向心力

我们知道力是产生加速度的原因。在匀速圆周运动中，产生向心加速度的力叫做**向心力**(centripetal force)。

如图 2-15 所示，在细绳的一端系一个小塑料球，另一端牵在手中。将手举过头顶，使小球在水平面内做圆周运动，感受球运动时绳对手的拉力。



图 2-15 小球做圆周运动时，手通过绳子对球有拉力

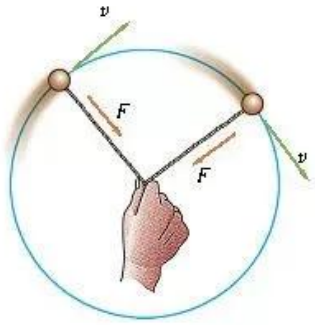


图 2-16　小球做圆周运动的向心力从哪里来

这时，使小球产生向心加速度的力是什么物体提供的(图 2-16)?

改变小球转动的快慢或线的长度或球的质量，感受向心力的变化跟哪些因素有关。

运用牛顿第二定律，可由向心加速度公式推导出向心力的公式如下

$$F = \frac{mv^2}{R} \text{ 或 } F = m\omega^2 R$$

你会推导吗？请试一试。

请讨论：由向心力的公式分析，物体的向心力跟哪些因素有关？

实验探究　用实验验证向心力公式

图 2-17 所示是向心力实验仪。它的基本部件是转轴和固定在轴上的横杆。转轴可由仪器内的小电动机驱动着旋转。两个重物通过滚轮挂在横杆的两侧。重物可以更换，质量标注在上面。闭合电源开关后，电动机驱动横杆转动，重物便随横杆做圆周运动，所需向心力由横杆两侧的弹簧提供。重物做圆周运动的向心力大小和圆周运动的半径可以从显示窗读取。

实验时，转速 n 可以通过时间 t 内转速指示灯闪烁的次数算出，转速大小可以通过背面的旋钮调节。

请用这台仪器设计出验证向心力与物体质量、速度和圆周半径关系的实验。

完成实验操作，设计表格并记录数据。将你的主要实验过程与得出的结论写出来。

关于向心加速度和向心力的有关规律虽是从匀速圆周运动得出的，但对非匀速圆周运动也同样适用。

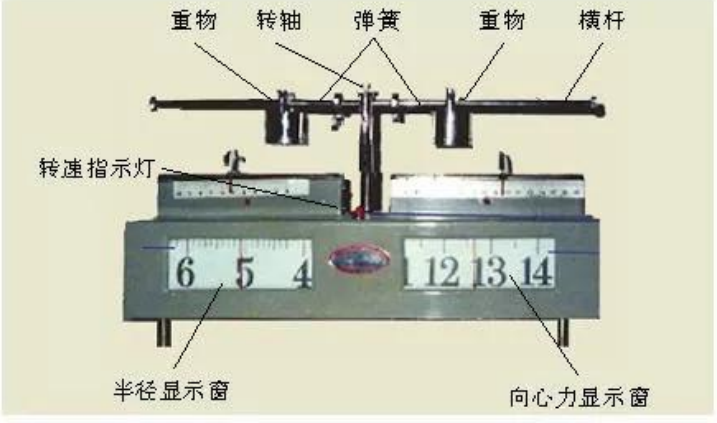


图 2-17　向心力实验仪

实验证明：向心力的大小跟物体的质量 m、圆周半径 r 和角速度 ω 成正比。

案例分析

案例　“神舟”5 号飞船进入轨道后的运动可以简化为围绕地球的匀速圆周运动。飞船的质量是 7790 kg，它围绕地球做匀速圆周运动时的向心加速度和向心力各是多大？飞船做圆周运动的向心力是什么物体提供的？

“神舟”5 号飞船运行轨道的高度是 343 km（指距地面的高度），运行的周期约 90 min，地球的半径是 6.37×10^3 km。

分析　我们在研究“神舟”5 号飞船的运动时，可以把它看成是一个质点。飞船做匀速圆周运动的半径是从地心到运行轨道的距离。根据右边的信息，先要算出“神舟”5 号飞船运动的轨道半径和线速度（或角速度），再根据向心加速度和向心力的公式就可算出向心加速度和向心力的大小。

解答　$R = R_{地} + h = (6.37 \times 10^3 + 0.343 \times 10^3)\ \text{km}$

$= 6.713 \times 10^6\ \text{m}$

$$a_{向心} = \omega^2 R = \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot R$$

$$= \frac{4 \times 3.14^2}{(60 \times 90)^2} \times 6.713 \times 10^6\ \text{m/s}^2 = 9.06\ \text{m/s}^2$$

$F_{向心} = ma_{向心} = 7790 \times 9.06\ \text{N}$

$= 7.06 \times 10^4\ \text{N}$

此向心力是地球提供的，即地球对“神舟”5 号飞船的引力。

家庭作业与活动

1. 要保持一个质量为 3.0 kg 的物体在半径为 2.0 m 的圆周上以 4.0 m/s 的线速度做匀速圆周运动，需要多大的向心力？
2. 飞机做特技表演时常做俯冲拉起运动。如图 2-18 所示。此运动在最低点附近可看作是半径为 500 m 的圆周运动。若飞行员的质量为 65 kg，飞机经过最低点时的速度为 360 km/h，则这时飞行员对坐椅的压力为多大？（g 取 10 m/s²）
3. 如图 2-19 所示，在匀速转动的水平圆盘边



图 2-18

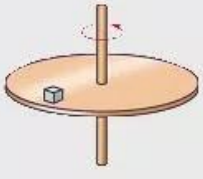


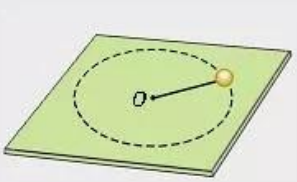
图 2-19

缘处放着一个质量为 0.1 kg 的小金属块，圆盘的半径为 20 cm，金属块和圆盘间的最大静摩擦力为 0.2 N。为不使金属块从圆盘上掉下来，圆盘转动的最大角速度为_____ rad/s。

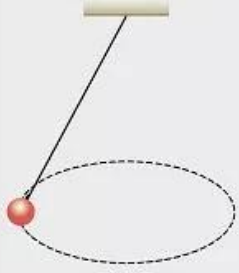
4. 图 2-20 是一些物体做匀速圆周运动的示意图，试在图上画出各物体所受到的向心力，并分析向心力的来源。



人造卫星环绕地球运动



一物体由绳子系住，在光滑水平桌面上围绕 O 点做圆周运动



将绳子一端固定，另一端拴一个小球。让绳子偏移竖直方向一个角度，使小球在水平面内做匀速圆周运动

图 2-20



a　过山车驶至轨道的顶部，车与乘客都在轨道下方，却不会掉下来



b　坐在旋转椅上的人，随着转速的增大，旋转半径也越来越大

图 2-21　过山车与旋转椅

2.3

圆周运动的案例分析

当你在游乐场玩着过山车、坐着旋转椅时，当你乘坐的汽车在弯弯曲曲的盘山公路上行驶时，你是否想过其中的物理原理？在本节中，我们将运用圆周运动的规律来分析生活中多姿多彩的圆周运动。

案例 1　分析游乐场中的圆周运动

案例　过山车（图 2-21 a）能从高高的圆形轨道顶部轰然而过，车与人却不掉下来，这是为什么呢？

分析　为了更好地分析这个问题，让我们先做一个实验。如图 2-22 所示，让一个小球从斜面轨道的不同高度处滚下，观察小球通过圆形轨道时的运动情况。

从这个实验可以看出，如果小球从斜面轨道滚下的起始高度小了，它到达圆轨道底部的运动速度太小，就会在圆形轨道的某处脱离轨道而掉下来；只有当小球的速度足够大时，才能通过圆形轨道的顶部而不掉下来。

设过山车与坐在其中的人的总质量是 m，轨道半径是 R，车经过顶部时的速度是 $v_{顶}$。由向心力公式 $F=m\dfrac{v^2}{R}$ 可知，在圆形轨道的



图 2-22　观察沿斜面轨道滚下的小球通过圆环的情况

顶部，过山车的速度 $v_{顶}$ 越大，人与车所需要的向心力 F 也越大。

当过山车沿圆周运动到轨道的顶部时，人与车作为一个整体，所受到的向心力是重力 mg 跟轨道对车的弹力 F_N 的合力，方向向下（图 2-23）。在这里，重力 mg 总是存在的。那么，轨道对车的弹力 F_N 多大时，过山车才不至于掉下来呢？

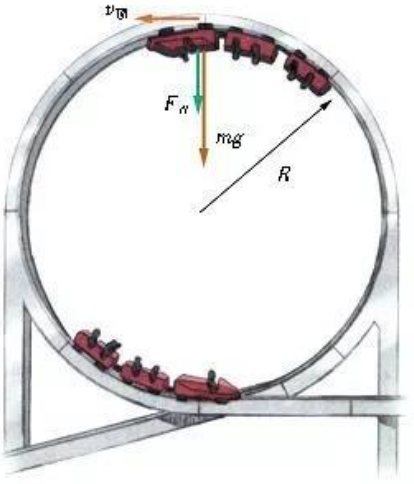


图 2-23　分析过山车的原理

请想一想：

当轨道对过山车的弹力恰为零时，过山车会掉下来吗？此时过山车的速度多大呢？如果过山车的速度小于这个速度，会发生什么现象呢？

为了保证乘客的安全，实际的过山车的车轮都镶嵌在轨道的槽内。乘客被安全带束缚在座椅上。

当 $F_N = 0$ 时，过山车通过圆形轨道顶部时的速度，称为临界速度 $v_{临界}$。

当过山车通过轨道顶部时的速度恰为 $v_{临界}$ 时，重力 mg 恰好等于过山车做圆周运动的向心力，即 $m\frac{v^2}{R} = mg$，由此可得 $v_{临界} = \sqrt{gR}$。这时，重力的作用只是改变过山车的运动方向，车不会向下脱离轨道。

如果过山车通过轨道顶部时的速度小于 $v_{临界}$，所需的向心力小于车所受到的重力，过山车有向下脱离轨道的趋势。

如果过山车通过轨道顶部时的速度大于 $v_{临界}$，所需的向心力大于车所受到的重力，其不足部分将由轨道对车的弹力供给，所以这时轨道对车的弹力不为零。车子不会掉下来。



摩托车转弯时，必须向转弯处的内侧倾斜



滑冰运动员转弯时必须向转弯处的内侧倾斜

图 2-24 转弯中的运动物体

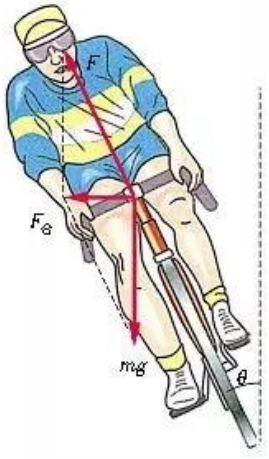
案例 2 研究运动物体转弯时的向心力

案例 生活中经常遇到运动物体转弯的问题(图 2-24)，如田径、滑冰运动员在弯道处就得转弯，自行车、摩托车、汽车、火车、飞机也不时需要转弯。许多物体在转弯时所做的运动，都可以看成是一种局部的圆周运动。那么，做这种圆周运动的向心力是从哪里获得的呢？这里以自行车为例进行分析研究。

经验告诉我们，骑自行车转弯时，车与人会倾向弯道的内侧，这是什么原因呢？

分析 设自行车转弯时所走弯道(作为圆周的一部分)的半径为 R，人和自行车的总质量为 m，自行车转弯时的速度为 v。

自行车在转弯处的受力情况如图 2-25 所示，图中的 F 是地面对车的作用力(地面对车的支持力和静摩擦力的共同作用效果)，mg 是重力，这两个力的合力 $F_合$ 指向弯道处的圆心，它就是自行车做圆周运动的向心力。



自行车向转弯处的内侧倾斜，利用地面作用力与重力的合力作为转弯所需要的向心力

图 2-25 转弯中的自行车

请思考并讨论：

1. 自行车转弯时倾斜的角度与哪些因素有关？

2. 滑冰、摩托车运动员转弯时是怎样获得向心力的？

3. 观察图 2-26，分析汽车在水平路面转弯时，是怎样获得向心力的。图中 f 表示路面对汽车的摩擦力。

4. 观察图 2-27，了解并分析火车转弯时是怎样获得向心力的。

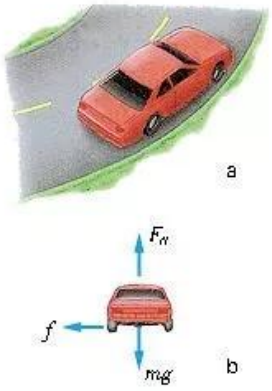


图 2-26　汽车在水平路面转弯

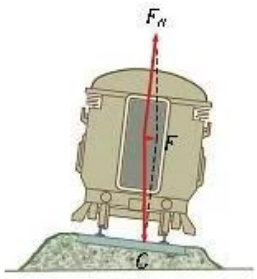


图 2-27　火车在弯道处转弯

圆周运动的规律在现代科学技术中有着广泛的应用。磁场对运动电荷的作用力，能使电荷在均匀磁场中做匀速圆周运动，利用这一原理制成的回旋加速器(图 2-28)，能提高运动电子或质子的能量，在粒子物理学、生物学和医学等领域都有很高的应用价值。

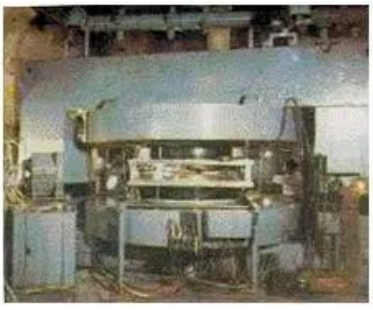


图 2-28　回旋加速器

家庭作业与活动

1. 取一个量杯，在里面放一个小塑料球。摇动杯子，使球在杯内做圆周运动(图 2-29)。改变转动的速度，观察球在杯内的位置和状态。请对观察到的现象进行分析讨论。
2. 回忆你自己或你的同学在赛跑中经过弯道时的跑步姿势，解释为什么要采取这样的姿势。
3. 为了适应我国经济快速发展的需要，我国铁路部门已多次对列车提速，并将继续提速，最高时速将超过 200 km/h。你认为列车提速是否要对原来铁路的弯道进行改造？应该怎样改造？
4. 滑冰运动员以 10 m/s 的速度在水平冰面上沿着半径为 50 m 的圆周滑行，他的身体必须跟冰面成多大的角度才能保持平衡？

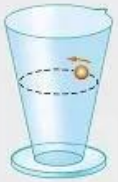


图 2-29



图 2-30 游乐场中的离心机

2.4

研究离心现象及其应用

我们乘公交车时，常听到售票员或车上广播提醒说："前面车辆转弯，请乘客们拉好扶手。"这是为什么呢？因为车辆转弯时会发生离心现象。其实，只要你留意，生活中经常会见到离心现象。那么，什么是离心现象呢？让我们先来分析讨论几个案例。

生活中的离心现象

案例 1 公交车上的一段对话

在公交车上坐着一位中学生，脚旁放着他携带的一小桶水。当公交车急转弯时，桶内的水溅了出来。中学生对司机有意见了，于是便出现了下面的一段对话。

中学生：师傅，车子怎么搞的，我桶里的水都泼出来了？

司机：我车子正在转弯呢！

中学生：那你的弯子为什么转得那么大？转小点，桶里的水就不会泼出来了。

司机：如果我把弯子转得小一点，你桶里泼出来的水会更多。

你读了这段对话，有什么评价？你认为中学生和司机谁说得对？

汽车转弯时，桶内的水会泼出来，这就是一种离心现象。乘客在汽车转弯时有被向外甩出的倾向，这也是离心现象。



案例 2　洗衣机是怎样甩干衣物的

你用过洗衣机吗？你知道洗衣机为什么能甩干衣物吗？图 2-31 是某种全自动滚筒式洗衣机的外形和内部结构图。一般全自动洗衣机的内筒是甩干筒，筒的转轴通过传动带与电动机相连。将潮湿的衣服放入筒内后，开动电动机，甩干筒就会绕轴高速旋转，衣服中的水随着筒的旋转从桶壁的小孔中被甩出去，一会儿衣服上的水就基本上被甩没了。

衣服中的水被从筒壁小孔中甩出去的现象也是离心现象。

你认为甩干筒工作时，转速高时容易甩干衣物，还是转速低时容易甩干衣物？

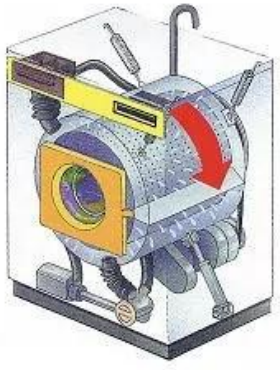


图 2-31　洗衣机甩干筒的壁上有许多小孔，当筒绕轴高速旋转时，衣物中的水从小孔中被甩出

案例 3　汽车一级方程式大赛

你一定在电视上看过汽车方程式大赛。有时候，飞速行驶的赛车在转弯处会突然冲出赛道，翻成个底朝天。你注意观察过失事赛车是沿赛道的什么方向冲出去的吗？一般汽车在水平公路上高速行驶时，如遇道路急转弯，往往也会冲出公路，造成车祸，尤其在雨天，更容易发生这样的事故。

赛车或汽车在转弯处冲出正常行驶道路的物理原因也是离心现象。



图 2-32　赛车

从上面的几个案例可知，做圆周运动的物体，在某种情况下会脱离圆周做离开圆心的运动，这种现象称为**离心现象**(centrifugal phenomenon)。

为什么会产生离心现象呢？

为什么会产生离心现象

实验探究 研究离心现象

取一段细线，在其一端系上一小块吸足水的泡沫塑料。用手指捏牢细线的另一端，甩动塑料块，使它在细线的牵动下做圆周运动。当塑料块转动时，所吸附的水由于离心现象会被甩出。

1. 保持细线长度不变，改变塑料块做圆周运动的转速。

请观察思考：塑料块的转速大时离心现象强烈，还是转速小时离心现象强烈？

2. 保持塑料块做圆周运动的转速不变，改变细线的长度。

请观察思考：细线是长一些时离心现象强烈，还是短一些时离心现象强烈？

在什么情况下，塑料块会脱离圆周运动飞出去？

分析论证 分析产生离心现象的原因

设质量为 m 的物体，沿半径为 R 的圆周做匀速圆周运动，线速度为 v，运动中受到指向圆心的外力的合力为 F，如图 2-33 所示。

物体做匀速圆周运动所需要的向心力是 $F_{向心}=m\frac{v^2}{R}$。试根据向心力公式，思考讨论下列几种情况时物体的运动状况：

1. 如果合外力 F 恰好等于向心力，即 $F=F_{向心}$，物体将怎样运动？

2. 如果运动中合外力 F 突然消失，即 $F=0$，物体将怎样运动？

3. 假设运动中合外力 F 减小了，即 $F<F_{向心}$，以致它不足以提供做线速度为 v、半径为 R 的圆周运动所需的向心力，你能推测出物体的运动轨迹吗？（你可能需要查阅一些资料才能回答。）

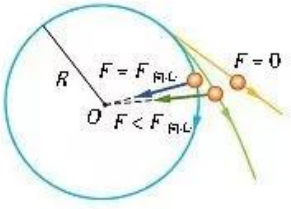


图 2-33 做匀速圆周运动物体所受指向圆心的合力改变时，运动的路径也将变化

从上面的实验探究和分析论证可以知道：做圆周运动的物体，由于本身的惯性，总有沿着圆周的切线方向飞离的倾向，它之所以没有飞出去，是因为有向心力作用，使它保持在圆周上运动。当所受的向心力突然消失，或所受到的指向圆心的合外力小于所需向心力时，物体将沿圆周的切线方向或者沿某一曲线飞离圆

周，这时就出现了离心现象。

现在，你能解释前面的三个案例中离心现象产生的原因吗？

离心现象的应用

离心现象在生活、生产和科技中有广泛的应用。水泥涵管是利用离心现象制成的(图 2-34)，离心式水泵(图 2-35)、离心式真空泵等都是根据离心现象工作的。在实验室、医院里，常用离心分离器将不同密度的物质分离开来。

请再举出一些你所知道的利用离心现象的例子。



图 2-34　水泥涵管是怎么制作的

将制作水泥涵管的钢模固定在离心机上。当钢模随离心机高速旋转时，将搅拌好的水泥送入旋转钢模的空腔中，水泥由于离心现象而贴附在钢模上，凝固后便形成涵管。

离心现象有时也会给人们带来不利的方面。例如汽车在水平路面上转弯时，如果速度太大，致使车轮与地面的侧向静摩擦力小于所需的向心力，那么由于离心现象，汽车会向外侧滑行，导致发生交通事故。所以在高速公路的弯道处，都要对车辆进行限速。曾有因高速旋转的砂轮或飞轮破裂，碎片飞出而造成事故的报



图 2-35　正在抽水的离心式水泵

道，这是离心现象造成的事故。所以在生活和生产中，对转动的物体要限定转速，还要经常检查它们有无裂纹等隐藏的危险因素。

家庭作业与活动

1. 汽车在道路湿滑情况下转弯时要降低速度，这是什么原因？
2. 在图 2-6 中，我们看到，金属件紧贴着飞转的砂轮上边缘，被磨得火花飞溅。请解释火花飞溅的原因。
3. 你坐过游乐场中的离心机（图 2-30、图 2-36）吗？试分析，当离心机转动起来后，转盘里的人将怎样运动？他们会有什么感觉？当转速不断增大时，贴在筒壁上的人会有什么感觉？为什么？
4. 下列现象中，哪些利用了离心现象？哪些是为了防止离心现象产生的影响？
   A. 用洗衣机脱水。
   B. 用离心沉淀器分离物质。
   C. 汽车转弯时要减速。
   D. 转动雨伞，可以去除雨伞上的一些水。
   E. 站在公交汽车里的乘客，在汽车转弯时要用手拉紧扶手。



图 2-36 在游乐场的离心机内

2.x

第 2 章家庭作业与活动

1. 回答下列问题，并举例说明。
   (1) 物体的运动方向和合外力方向是否一定相同？
   (2) 物体受到几个力的作用，是否一定会产生加速度？
   (3) 物体运动的速率不变，所受合外力是否为零？
2. 用绳子拴一个物体，在竖直平面内做圆周运动，当物体到达最高点时，有人说：
   (1) 这时物体受到三个力作用：重力、绳子拉力以及向心力；
   (2) 因为上述三个力的方向都是向下的，但物体不下落，可见物体还受到一个方向向上的力和这些力平衡着。
   以上说法正确吗？为什么？
3. 月球距地球的平均距离约 3.844×10^5 km，地球到太阳的平均距离约 1.496×10^8 km。若将它们的公转看作是匀速圆周运动，分别估算它们公转的角速度和线速度。(月亮的自转周期约 27.3 天)
4. 据新闻媒体报道，我国"神舟"5 号飞船绕地球做圆轨道运行时，轨道离地面高度是 343 km，飞船约 90 min 绕地球 1 圈。请估算"神舟"5 号运行的线速度和角速度。地球半径取 6.37×10^3 km。
5. 质量为 50 kg 的同学坐在绳长为 4.0 m 的秋千板上，当他经过最低点时，速度为 5.0 m/s，问该同学此时对秋千板的压力多大？
6. 自行车赛车场的车道外侧都有一圈斜坡状车道，赛车手往往在斜坡道上飞驶，如图 2-37 所示。分析设立斜坡车道的原因，并推导坡道的倾角 θ 与车速 v 的关系。



图 2-37

7. 图 2-38 是游乐场中的某种过山车。试分析人和车运动到 A 点和 B 点时，人与车的受力情况，并说明是什么力提供了做圆周运动的向心力。

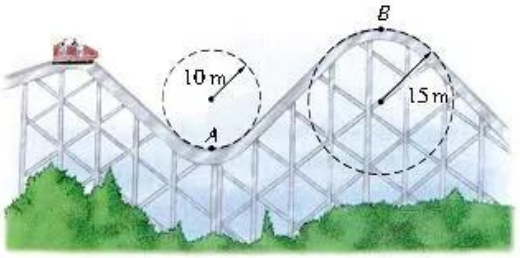


图 2-38

8. 用你学过的知识解释田径运动中运动员掷铁饼时铁饼是怎样飞出去的。影响投掷铁饼成绩的因素有哪些？
9. 用学习和生活中的器材设计一个实验，探究影响向心力大小的因素。
10. 在杂技表演中有一个"水流星"节目。表演时，用一根长 $l=1$ m 的绳子系着一只水桶。在桶内装有适量的水。演员用手抓着绳的另一端使水桶和水在竖直平面内做圆周运动。要使桶内的水转动到最高点时不从桶内流出，求水桶到达最高点时的最小速度。(g 取 10 m/s²)



图 3-1　现代都市中的汽车流

第 3 章
动能的变化与机械功

现代都市，道路纵横，行人穿梭，车水马龙。汽车在这样的环境中行驶，一会儿加速，一会儿减速，一会儿刹车，一会儿又要启动，汽车的动能时常在发生变化。

飞机起飞时，由静止状态加速升空飞行，飞机在起飞过程中的动能也在变化。

我们周围的物体运动时，其动能有时增加，有时减少，这种变化遵循什么规律呢？

本章将以汽车的运动为背景，通过实验观察和分析推理，探究物体的动能变化跟做功的关系，从功和能的观点来研究物体运动的规律。

3.1
探究动能变化跟做功的关系

如图 3-2 所示，汽车启动后，在牵引力的作用下行驶一段距离，速度发生了变化。根据初中所学的知识知道，牵引力对汽车做了功，汽车的动能就发生了变化。那么，汽车动能的变化跟牵引力做的功有什么关系呢？

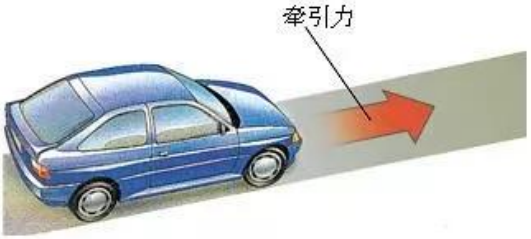


图 3-2　汽车在牵引力的作用下运动

从汽车的动能变化谈起

分析论证　研究汽车动能的变化过程

如图 3-3 所示，假设有一辆质量为 m 的汽车，在不变的牵引力 F 作用下行驶，速度由 v_1 增加到 v_2，相应的行驶距离为 s。那么，在此过程中，汽车的加速度多大？汽车运动的速度 v_1、v_2 跟牵引力 F、距离 s 的关系是怎样的？

根据牛顿第二定律有　　$F = ma$

由运动学公式有　　$a = \dfrac{v_2^2 - v_1^2}{2s}$

由此可得

$$Fs = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 \qquad (1)$$

请想一想，上式表示什么物理意义？

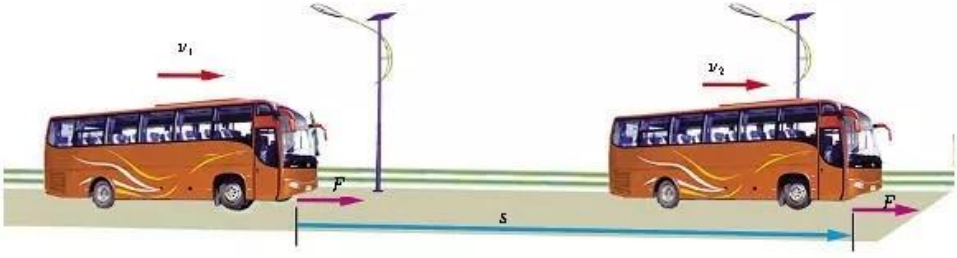


图 3-3　汽车在不变的牵引力作用下运动，速度增大

动能　动能定理

汽车牵引力是工程技术上为了计算方便而引入的一个等效力。在汽车行驶过程中，发动机动力做功，可以等效地看成是牵引力对汽车所做的功。

我们来分析(1)式的物理意义。

1. 等式左边的 Fs 是我们在初中就已熟悉的功的计算式($W = Fs$)，它是汽车行驶距离 s 的过程中牵引力 F 所做的功。

2. 等式右边的两项跟汽车的质量和速度有关。物理学中把 $\frac{1}{2}mv^2$ 叫做物体的动能(kinetic energy)，用符号 E_k 表示，即

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

动能是标量，在国际单位制中，动能的单位是焦耳(joule)，简称焦，符号是 J。

请思考：大货车与小汽车以相同的速率行驶时，谁具有的动能大？同一辆小汽车，或以 60 km/h 的速率行驶，或以 110 km/h 的速率行驶，它以哪个速率行驶时所具有的动能大？

3. $\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2$反映了汽车从初状态到末状态的动能变化，我们称它为汽车动能的增量，即 $\Delta E_k = E_{k2}-E_{k1}$。于是(1)式可写成：

$$W = \Delta E_k \tag{2}$$

物理量的增量是指后一时刻的量值减去前一时刻的量值。

需要指出，上式虽是以汽车的运动为例推导出来的，但具有普遍意义。理论和实验都表明：**外力对物体所做的功等于物体动能的增量**。物理学中把这个结论叫做**动能定理**(theorem of kinetic energy)。

动能定理是一条重要的物理规律，(2)式是它的数学表达式。在下一节我们将结合(2)式对功的概念和功能关系作进一步的讨论。

实验探究 恒力做功与物体动能变化的关系

下面再用实验来研究动能定理。

提出问题

前面已通过理论分析，得出了恒力做功与物体动能变化的关系，即 $W=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2$。那么，能否通过实验进行验证呢？

制定计划与设计实验

为了通过实验探究恒力做功与物体动能变化的关系，你应该怎样来设计实验，需要测量哪些物理量？

请写出你制订的探究计划。

图 3-4 是向你推荐的一种实验装置。你也可以根据自己制订的计划，选用别的器材，设计实验。图 3-5 的方格坐标纸可供你在实验中选用。

以下两个研究计划供你参考，你也可以制定其他计划。

1. 直接验证 逐一比较力对物体做的功与物体动能增量的大小。

2. 用图像验证 根据 $W=\frac{1}{2}mv^2$，用实验数据作出图像，研究图像能否反映 W 与 v^2、W 与 m 的关系。

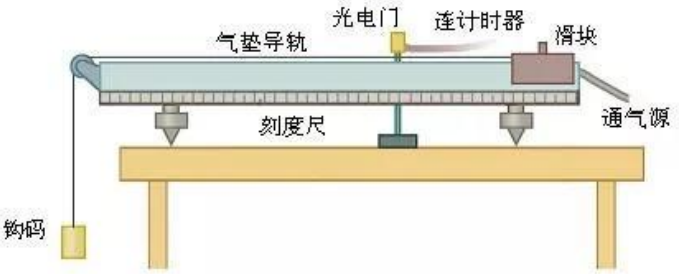


图 3-4 用气垫导轨验证动能定理的实验装置

你选用了哪些实验器材？

请写出你设计的实验方案。

进行实验与收集证据

请写出你实验中的主要步骤，设计出记录表格，记录实验中收集到的数据。

科学不能停留在单纯的观测数据中，必须对观测到的数据进行细致的分析，才能找到事物运动的规律。

分析与论证

请写出数据的主要处理过程。

通过分析，你得出的结论是什么？

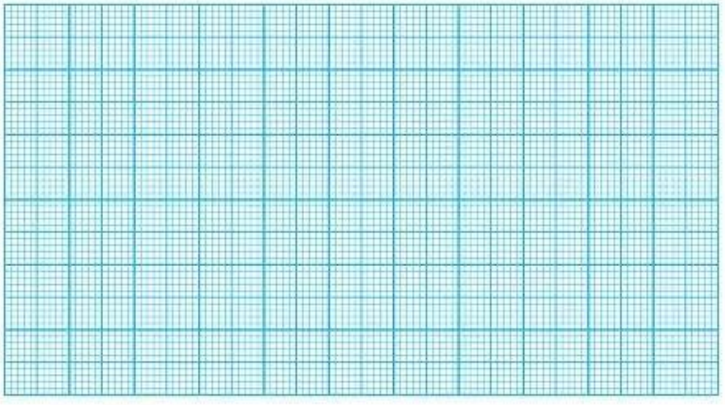


图 3-5 方格坐标纸

评估

请思考，在你的实验中：

主要误差是什么？你是如何减小误差的？

你认为如何改进，可以使你的实验更好一些？

交流与合作

与同学交流讨论，了解他们制定的探究计划和设计的实验方案，了解有哪些地方是值得你学习的。

完成一份实验探究报告。

多学一点　过程量与状态量

由动能定理的分析过程可知，动能是跟物体的运动状态有关的物理量。$\frac{1}{2}mv_1^2$ 是物体在速度为 v_1 时刻的动能，$\frac{1}{2}mv_2^2$ 是物体在速度为 v_2 时刻的动能，W 是物体由速度 v_1 增大到 v_2 过程中，力对物体所做的功，它反映的是力对物体的做功过程。

由此可见，功是力对物体作用的过程量，动能是跟物体运动有关的状态量。动能定理则把做功过程与物体状态（动能）的变化联系了起来。

案例分析

案例　图 3-6 是一颗质量为 40 g 的子弹以 100 m/s 的速度击穿苹果的瞬间照片。子弹穿过苹果后，速度降为 60 m/s。问子弹击穿苹果前后的动能变化了多少？苹果对子弹做了多少功？

分析　以子弹为研究对象，在子弹击穿苹果的过程中，由于苹果的阻力对子弹做功，子弹的动能减少了。根据子弹击穿苹果前后的速度变化，可以计算出子弹的动能增量 ΔE_k。再根据动能定理 $W = \Delta E_k$，就可以算出苹果对子弹所做的功了。

解答　子弹的质量 $m = 40\ \text{g} = 4.0 \times 10^{-2}\ \text{kg}$，子弹的初速度 $v_1 = 100\ \text{m/s}$，击穿苹果后的速度为 $v_2 = 60\ \text{m/s}$。

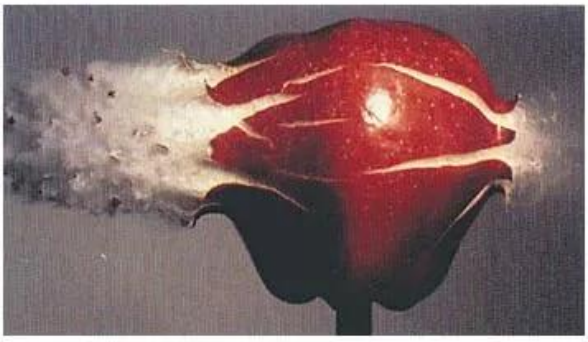


图 3-6　子弹击穿苹果的照片

由动能定理 $W = \Delta E_k$ 可知，苹果对子弹做的功与子弹击穿苹果前后动能的变化量是相等的，

$$W = \Delta E_k = E_{k2} - E_{k1} = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$$

代入数值得 $W = -128\ \mathrm{J}$。

负号表示苹果对子弹做负功，使子弹的动能减少。

STS

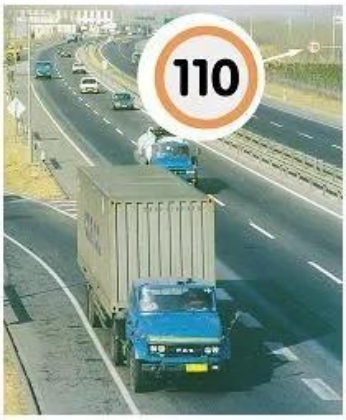


图 3-7　高速公路的限速标志

公路上为什么要限制车速

当公路上行驶的车辆发生意外碰撞时，它们的损坏程度和事故的严重性跟碰撞前车辆的动能大小有关，而车辆的动能则取决于车辆的质量和车速的平方。因此在公路上，尤其是在高速公路上，都有限制车速的标志。货车、客车的质量较大，对它们速度大小的限制值要比轿车小一些。例如，高速公路对中、重型车辆和客车的车速限制一般是 100 km/h，对轿车一般是 120 km/h。

有的汽车（如城市中的双层客车）在设计时厂家就把车速限制在 70 km/h。当汽车速度大于 70 km/h 时，即使驾驶员踩油门，燃油系统也不会把燃油送到发动机中，直到汽车速度小于 70 km/h，才会恢复供油。

家庭作业与活动

1. 举出生活中做功使物体动能变化的例子，并分析这些功使物体的动能增加了，还是减少了。你能举出"做了功，而没有改变物体动能"，或者"物体的动能改变了，但没有做功"的例子吗？
2. 把一辆汽车的速度由 10 km/h 提高到 20 km/h，跟把这辆汽车由 50 km/h 提高到 60 km/h 相比，哪种情况下要做较多的功？试通过分析计算来说明。
3. 质量是 0.5 kg 的物体，从 15 m 高处自由下落到 10 m 高处，在这个过程中，重力对物体做了多少功？物体的动能增加了多少？
4. 质量 $m = 500\ \mathrm{g}$ 的物体，原来的速度 $v_1 = 2\ \mathrm{m/s}$，受到一个与运动方向相同的力 $F = 4\ \mathrm{N}$ 的作用，在光滑水平面上发生了位移 $s = 2\ \mathrm{m}$，物体的末动能是多大？

3.2

研究功与功率

在初中学习的功的计算式 $W = Fs$ 中，只是规定做功要有两个必要因素（F 和 s），而且只研究了力与运动方向相同时的情形。在高中物理中则有必要从功和能的关系上进行研究，加深对功的含义的理解。

当力的方向与物体的运动方向不相同时（图 3-8），怎样计算力对物体所做的功呢？

怎样计算力跟位移成夹角 α 时的功

如图 3-8b 所示，人向斜上方拉木箱，设拉木箱的力 F 跟水平地板的夹角为 α，木箱在水平地板上的位移为 s。

为了计算力 F 对木箱做的功，可将 F 按图 3-9 所示分解为 F_1 和 F_2。F_2 跟运动方向垂直，不做功；F_1 跟运动方向一致，对木箱做功。根据力的分解知识可得

$$F_1 = F\cos\alpha$$

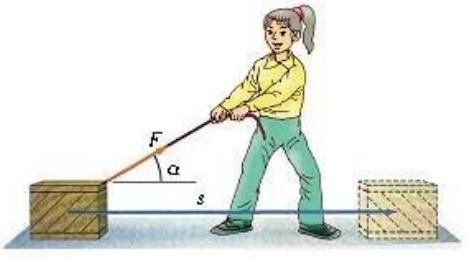
所以，当力跟位移成夹角 α 时，功的计算公式是

$$W = Fs\cos\alpha \tag{3}$$

这是计算功的一般公式，它表明，**力对物体所做的功，等于力的大小、位移的大小、力与位移夹角的余弦这三者的乘积。**



a　撑地板的力 F 做功



b　拖木箱的力 F 做功

图 3-8　力跟位移不在一条直线上

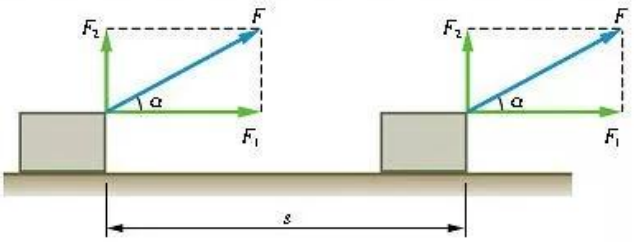


图 3-9　拉力的水平分力跟位移方向相同

功是标量，在国际单位制中，功的单位是焦耳，简称焦，符号是 J。

案例分析

案例　如图 3-10 所示，两人用力推一辆熄火的小轿车，每人用力的大小都是 200 N，方向都跟车的运动方向成 30°角。当小轿车前进了 20 m 时，汽车发动机点火启动。问：

（1）在推车过程，两人对车一共做了多少功？

（2）两人应该怎样推车，才会有最好的效果。

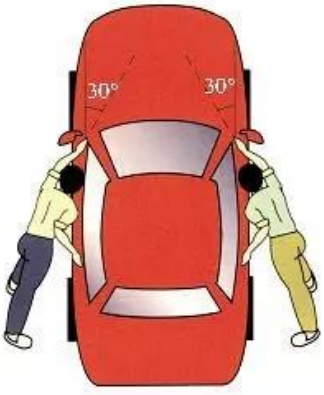


图 3-10　两人推汽车

分析　先根据公式 $W = F s \cos\alpha$ 计算出一个人推汽车所做的功，再计算出两人共同推车所做的功，最后将两人推汽车所做的功相加就是做的总功了。

写出你的计算过程。

有的同学提出：也可以先求出两人推汽车的合力，再求合力做的功，这个值应该与用上面的解法得到的结果相同。

你同意他的意见吗？请试一试。

正功、负功的含义

把计算功的一般公式（$W = F s \cos\alpha$）和动能定理（$W = \Delta E$）结合起来做些分析，不仅可以加深对功的含义的理解，而且可以进一步揭示做功和能量变化之间的联系。

当力 F 与物体位移 s 之间的夹角 α 等于零时，根据功的一般计算式，$\cos\alpha = 1$，$W = Fs$，这表示力 F 对物体做正功；由动能定理可知，因为 $W > 0$，所以 $\Delta E > 0$，这说明物体的动能增加。且做了多少功，动能就增加多少。

请讨论当 $0<\alpha<\frac{\pi}{2}$、$\alpha=\frac{\pi}{2}$、$\frac{\pi}{2}<\alpha\leqslant\pi$ 三种情况下，做功的正负情况和做功与动能变化的关系。

综上所述，力对物体做正功时，物体的动能增加；力对物体做负功时，物体的动能减少；力对物体做多少功，物体的动能就变化多少。这就是说，**功是能量变化的量度。**

请思考并讨论：在汽车启动、加速、减速、刹车等各个过程中，分别有哪些力对汽车做功？哪些力对汽车做正功？哪些力对汽车做负功？做功与动能变化的关系怎样？

多学一点　计算变力做功

实际问题中遇到的力并不都是恒力，例如汽车运动时的牵引力的大小往往是不断变化的。怎样计算变力做的功呢？

图 3-11 表示物体在变力 F 的作用下，沿直线从 O 运动到 O'。

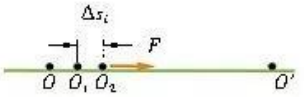
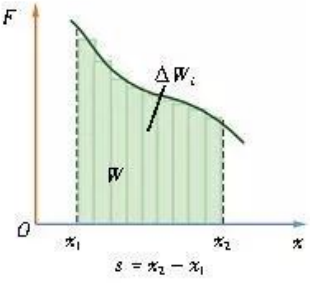


图 3-11　变力对物体做功

因为力 F 是变化的，不能直接运用公式 $W=Fs$ 计算力在全过程中做的功。我们可以把线段 OO' 平均分成很多小段 Δs_i，如图中的 OO_1、O_1O_2、…当每一小段 Δs_i 足够小时，力的变化很小，就可以认为是恒定的。这样，对每一小段，就可以用公式计算出力在此小段距离内做的功 $\Delta W_i=F_i\Delta s_i$，将各小段内的功相加：$W=\sum W_i=\sum F_i\Delta s_i$。$W$ 就是变力 F 在整个过程中所做的功。图 3-12 是变力做功的图像，它表示了分析变力做功问题的思路和方法。



图像下方从 x_1 到 x_2 的面积，就是变力 F 在 $s=x_2-x_1$ 段内做的功，图中各长方条的面积，表示力在各小段内做的功

图 3-12　变力做功的图像

请讨论：

假如物体在弹簧的作用下运动，你能求出弹力所做的功吗？你是怎样分析处理的？

研究功率

我们在初中已经知道，物体做功的快慢用功率来表示。功 W 跟完成这些功所用时间 t 的比值叫做**功率**，功率用符号 P 表示，则

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

在国际单位制中，功率的单位是瓦特(watt)，简称瓦，符号是 W。1 W = 1 J/s。技术上常用千瓦(kW)做单位，1 kW = 1000 W。



小型轿车，功率约 40 kW



高级轿车，功率约 180 kW



货车，功率约 100 kW



赛车，功率约 170 kW



铰接客车，功率约 150 kW

图 3-13　几类汽车发动机的平均功率

机器的功率是衡量机器性能的重要指标。图 3-13 给出了几种汽车的发动机功率。发动机功率大的汽车，单位时间内做的功多，因而动能增加得也快。

想一想：为什么赛车的功率都比较大？

你是否注意到，汽车在路面较好的公路上行驶时，车速较快，而在路面较差的公路上行驶，或者上坡时，司机常通过换挡来减小车速。这表明：当汽车的功率一定时，汽车的牵引力跟车速有一定的关系。那么，牵引力跟车速、功率之间究竟有什么关系呢？

分析论证　研究力、速度跟功率之间的关系

如图 3-14 所示，若汽车在牵引力 F 的作用下做匀速直线运动，经过时间 t 从 A 运动到 B，行驶的距离为 s。

根据功和功率的定义式 $W=Fs$，$P=\dfrac{W}{t}$，以及速度公式 $v=\dfrac{s}{t}$，可以推导出牵引力做功的功率

$$P=Fv$$

请写出你的推导过程。

这个公式反映了功率跟力和速度之间的关系。公式虽然是在匀速直线运动的情况下推导出的，但对变速运动也适用。在变速运动中，如果公式中的 v 是时间 t 内的平均速度，那么 P 就是这段时间内的平均功率；如果 v 表示物体在某一时刻的瞬时速度，那么 P 就是该时刻的瞬时功率。

请用这个公式分析：为什么汽车在路面较差的公路上行驶或爬坡时，司机总要通过换挡来减小车速？

如果汽车上坡时仍要保持原来的速度，司机应该怎样做？为什么要这样做？

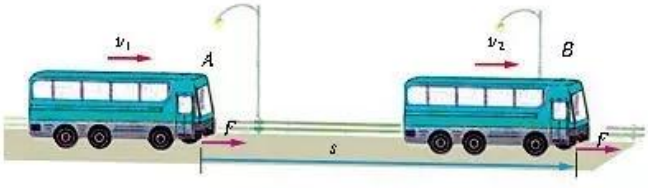


图 3-14　汽车在牵引力作用下匀速行驶

信息浏览

“功”的概念是怎样建立的

在物理学的发展过程中，随着动力学研究的进展，人们逐渐认识到需要一个物理量来衡量“运动量”的转移问题。

到18、19世纪，欧洲的机械工业蓬勃发展。在分析机器的运转中，功作为一个基本参数，逐渐显示出它的重要性。例如，法国工程师卡诺(N. L. S. Carnot) 以重物与升高的高度乘积来评价机器的功效，称其为“作用矩”；法国数学家蒙日(C. P. Monge)则把功称为“动力效应”；1829年，法国物理学家科里奥利(G. G. Coriolis)主张“活力”应表示为 $\frac{mv^2}{2}$，这使得它在数量上等于所做的功；法国工程师彭斯莱(J. V. Ponceler)在同年明确推荐了“功”这个名词。从此，“功”的概念从机械功效的研究中引入了物理学。

家庭作业与活动

1. 物体做匀速圆周运动时，向心力对物体做功吗？为什么？
2. 儿童在荡秋千的过程中，受到哪几个力的作用？哪些力做了功？哪些力不做功？
3. 图 3-15 中举重运动员在 1.0 s 的时间内把 210 kg 杠铃举高 1.2 m；用手拉葫芦(差动滑轮)在 5 min 内将 500 kg 钢材提高 2 m。比较运动员举杠铃和用手拉葫芦吊钢材时做功的功率。



图 3-15

4. 一台水泵每秒能把 30 kg 的水抽到 10 m 高的水塔上，不计额外功的损失，这台水泵的输出功率是多大？如果保持这一输出功率，半小时能做多少功？(g取 10 m/s²)
5. 汽车以 108 km/h 的速率在水平路面上匀速行驶。如果作用在汽车上的空气阻力与摩擦力之和为 800 N(图 3-16)，那么汽车发动机输出的功率多大？



图 3-16

课题研究

研究汽车的功率和速度

在司机的指导下，观察汽车并了解下面的问题或其他你感兴趣的问题。

1. 观察汽车的铭牌，了解汽车发动机的功率等主要参数。

2. 观察汽车的驾驶室(图 3-17)，了解驾驶台上有哪些仪表，它们的用途是什么？怎样读取仪表上的数据？

3. 了解司机在什么情况时要换挡，他是怎样通过换挡来变速的？你所参观的汽车采用的是无级变速还是分挡变速？汽车变速系统的基本物理原理是什么？

4. 请教司机，在什么情况时要加大油门？在什么情况下要减小油门？



图 3-17

5. 观察司机启动汽车的过程。

尽可能用你所学的物理知识分析你所了解的问题，并将你的体验与分析过程写成调查报告。如果有条件，最好用照相机拍摄有关的照片，加以说明。

3.3

动能定理的应用

动能定理是物理学的重要规律。用动能定理分析问题，只需考虑物体初、末状态的动能与所做的功，而不必考虑物体的加速度和时间，因而往往比用牛顿定律和运动学规律更简便。下面来分析几个具体案例。

研究汽车的制动距离

案例分析

案例 汽车的制动性能是衡量汽车性能的重要指标。在一次汽车制动性能的测试中，司机踩下刹车闸，使汽车在阻力作用下逐渐停止运动（图 3-18）。下表中记录的是汽车以不同速率行驶时，制动后所经过的距离。

汽车速率 v/(km·h^{-1})	制动距离 s/m
10	1
20	4
40	16
60	?

请根据表中的数据，分析以下问题：

(1) 为什么汽车的速率越大，制动的距离也越长？

(2) 让汽车载上 3 名乘客，再做同样的测试，制动距离会有变化吗？试分析原因。



图 3-18 汽车制动性能测试

(3) 设汽车在以 60 km/h 的匀速率行驶的时候制动，在表中填上(没有乘客时的)制动距离的近似值。试说明你分析的依据和过程。

分析　对问题(1)，以汽车为研究对象。在制动过程中，刹车产生的阻力对汽车做负功，汽车制动后的末速度是零。假设汽车制动时的阻力为滑动摩擦力，由动能定理可知，汽车制动前的初速度越大，它的初动能越大，制动时阻力做的功也越多，因而制动过程中经过的距离就越长。

请参照以上分析方法分析问题(2)，并写出你的分析过程。

问题(3)要求定量地算出汽车的制动距离 s，由于不知道制动时的阻力 f，也不知道汽车的质量 m，因而很难根据动能定理直接求解。

你可以运用动能定理列方程组解答，也可以通过分析表中的数据，找出车速 v 跟制动距离 s 的(比例)关系，从而求出当汽车速率为 60 km/h 时的制动距离。

请写出你的分析解答过程。

合力做功与动能变化

在实际问题中，往往是多个力同时对一个物体做功，这时怎样运用动能定理分析问题呢？

案例分析

案例　一架质量 $m = 5.0 \times 10^3$ kg 的喷气式飞机，从静止开始在机场的跑道上滑行，经过距离 $s = 5.3 \times 10^2$ m，达到起飞速度 $v = 60$ m/s。在这个过程中飞机受到的平均阻力是飞机所受重力的 0.02 倍。你能根据动能定理求出飞机滑行时受到的牵引力吗？

分析　以飞机为研究对象，先分析飞机受力和每个力做功的

信息浏览

关于汽车刹车的 ABS 系统

早先，汽车刹车时，是用闸瓦将车轮的轴抱死，使车轮只能在地面上滑动。车轮突然被抱死，很容易造成侧滑，使汽车改变行驶方向，甚至酿成车祸。

ABS 刹车系统是对车轮进行点刹车，即刹车装置对汽车制动一次立即放开，再制动再放开……每分钟制动可达数千次，使汽车轮子处于滚动和滑动的交替状态。这样就不会造成汽车侧滑。

情况。飞机在跑道上滑行时，水平方向上受到两个力的作用：一个是发动机的牵引力 F，与飞机滑行方向相同，对飞机做正功；另一个是阻力 f，与飞机滑行方向相反，这个力使飞机的动能减少，对飞机做负功。竖直方向上的力对飞机不做功，可以不考虑。再算出总功和动能的变化；最后根据动能定理可求出牵引力的大小。



图 3-19　正在滑行的飞机

解答　牵引力对飞机做的功为

$$W_{牵引力} = Fs = 5.3 \times 10^2 F$$

阻力对飞机做的功为

$$W_{阻力} = -fs = -kmgs$$

$$= -0.02 \times 5.0 \times 10^3 \times 9.8 \times 5.3 \times 10^2\ \mathrm{J} = -5.2 \times 10^5\ \mathrm{J}$$

飞机动能的增量为

$$\Delta E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \times 5.0 \times 10^3 \times 60^2\ \mathrm{J} = 9.0 \times 10^6\ \mathrm{J}$$

运用动能定理得

$$W = W_{牵引力} + W_{阻力} = \Delta E_k$$

请你代入数据，求出飞机所受到的牵引力。

由以上分析可见，当有多个力对物体做功而使物体的动能发生变化时，应分析物体受到几个力，每个力是否对物体做功，做正功还是做负功。动能定理中的功应是每个力所做功的代数和。

是否可以将动能定理中的功 Fs 理解为合外力所做的功？如果可以，则可先分析物体的受力情况，算出合外力做的功（或列出表示合外力做功的代数式），再应用动能定理列出方程求解。

请按这一思路将此题再解答一次，两次得出的结果是否一致？

此题也可用牛顿定律来解答，请你尝试一下，看看用哪种方法更简便。

由动能定理计算变力做功

有些问题用牛顿定律与运动学知识是很难解决的，但用动能定理却可以很方便地解决。我们知道，当变力对物体做功时，很难根据功的计算式 $W=Fs$ 求出功，但根据功与动能变化的关系就可以方便地求出功。

案例分析

案例　用质量为 4.0 kg 的铁锤，以 5.0 m/s 的速度打击放在铁砧

上烧红的铁块，设击中铁块后铁锤即静止。求铁块对铁锤所做的功。

分析　铁锤打击铁块的过程中，力的大小是变化的，过程比较复杂，用牛顿定律很难解决。但本题并不要求知道物体做功的细节，只要求知道做功的多少，因此可以通过动能定理来解决。

以铁锤为研究对象。在铁锤打击铁块的过程中，铁块对铁锤做了负功，使铁锤由运动变为静止，铁锤的动能减少，变为零。

解答　忽略重力对铁锤做的功。根据动能定理，铁块对铁锤做的功为

$$\begin{aligned} W &= \Delta E_k = E_{k2} - E_{k1} \\ &= 0 - \frac{1}{2} m v_1^2 = -\frac{1}{2} \times 4.0 \times 5.0^2 \text{ J} \\ &= -50 \text{ J} \end{aligned}$$

通过对案例的分析与体验，可归纳出运用动能定理分析解决问题的步骤：

明确要解决的问题，确定研究对象；

分析研究对象的受力情况，确定外力（或合外力）对研究对象所做的功；

明确研究对象在始末状态的动能，确定动能增量；

运用动能定理列出方程。

家庭作业与活动

1. 某人用手将质量为 1 kg 物体由静止向上提起 1 m，这时物体的速度为 2 m/s，g 取 10 m/s²，下列说法中正确的是
   A. 手对物体做功 12 J
   B. 合外力做功 2 J
   C. 合外力做功 12 J
   D. 物体克服重力做功 10 J
2. 一质量为 m 的物体静止在粗糙的水平面上，当此物体受水平力 F 作用运动了距离 s 时，其动能为 E_1，而当此物体受水平力 $2F$ 作用运动了相同的距离时，其动能为 E_2，则
   A. $E_2 = E_1$　　B. $E_2 = 2E_1$
   C. $E_2 > 2E_1$　　D. $E_1 < E_2 < 2E_1$
3. 汽车在平直的公路上由静止开始做匀加速运动，当速度达到 v_1 后立即关闭发动机让其滑行，直至停止。汽车的 $v - t$ 图像如图 3-20 所示。设在运动的全过程中汽车的牵引力做功 W_1，克服摩擦力做功 W_2，求 $W_1 : W_2$。

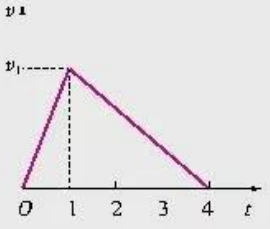


图 3-20

4. 质量为 24 kg 的滑块，以 4 m/s 的初速度在光滑水平面上向左滑行，从某一时刻起在滑块上作用一向右的水平力，经过一段时间，滑块的速度方向变为向右，大小为 4 m/s。则在这段时间内水平力做的功为_____。

3.x

第 3 章家庭作业与活动

1. 物体沿粗糙斜面下滑，在此过程中，什么力做正功？什么力做负功？什么力不做功？
2. 请讨论下列问题：
   (1) 以 5 m/s 的速度匀速提升一质量为 10 kg 的物体，在 10 s 内，拉力做了多少功？
   (2) 若以比上面快 1 倍的速度把物体提升到相同的高度，那么所需做的功是否比前一种多？为什么？
   (3) 在上面两种做功情况下，它们的功率是否相同？
   (4) 若用一个大小不变的力将该物体从静止加速提高到同一高度，使物体最后获得的速度为 5.0 m/s，那么拉力做了多少功？平均功率为多大？开始和结束时的瞬时功率各为多大？
3. 下表中的资料取自《道路交通规则》，内容是关于在适宜驾驶的情况下，小汽车的速率与反应时间、制动距离的关系。

速率/(m·s^{-1})	反应时间/s	制动距离/m
10	0.7	8
20	0.7	30
30	0.7	68

   (1) 反应距离与司机的反应时间有关，那么反应距离与车速有什么关系？
   (2) 司机做出反应(即大脑判定需要刹车)和踏下制动器需要时间，而在踏下制动器后，汽车仍要走一段距离才能停下来。
      a. 根据上表，汽车速率在 30 m/s 时，刹车距离多长？
      b. 两车同样以 30 m/s 的速率一前一后地行驶。两车间最短的安全距离是多少？
4. 根据第 3 题中的表，设一质量为 600 kg 的汽车以 30 m/s 的速率行驶。
   (1) 计算汽车的动能。
   (2) 当司机踏下制动器，汽车的动能怎样变化？
   (3) 在这个车速下的制动距离是多少？计算汽车从 20 m/s 的速率行驶到静止的过程中的平均制动力。
5. 如果汽车行驶的速率加倍，制动距离大约增大为原来的 4 倍。请用能量观点或其他观点解释此变化。
6. 图 3-21 所示的是一学生骑车爬坡的情形。假如她骑车时的最大功率是 1200 W，车和学生的总质量是 75 kg，斜坡倾角 θ 为 20°，运动过程中受到的摩擦等阻力恒为 60 N，方向沿斜坡向下。则此学生骑车上坡的最大速度是多少？假如他在水平路面上骑车，最大速度可达到多少？(g 取 10 m/s^2)

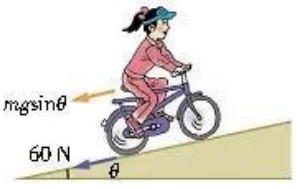


图 3-21

7. 一台起重机将质量 $m = 1.0 \times 10^3$ kg 的货物匀加速地竖直吊起，在 2 s 末货物的速度为 $v = 4.0$ m/s，若 g 取 10 m/s^2，不计额外功，求：
   (1) 起重机在这 2 s 内的平均功率；
   (2) 起重机在 2 s 末的瞬时功率。
8. 用打点计时器能否验证动能定理？请你设计出实验探究方案，写出实验探究报告。
9. 给你一个额定工作电压为 2.5 V 的微型直流电动机和一个没有动力的玩具小汽车。现要用此电动机作为玩具汽车的动力，请你设计一个探究实验，探究 $P = Fv$，并将你探究的结果写成报告。探究需要的器材，可以请老师帮助解决。

第4章
能量守恒与可持续发展

建筑工地上，一台台打桩机巍然耸立，重锤在绞车钢丝绳的带动下隆隆上升，至打桩机顶端后便自由落下，以雷霆万钧之力，把一根根桩打入地下(图 4-1)。

重锤在下落过程中，重力对重锤做了功，那么，重力做功与重力势能的变化有怎样的关系？重力做功有什么特点？

被举高的重锤具有重力势能。重锤在下落的过程中，重力势能转化到哪里去了？

能量来自于能源，而能源是有限的，那么，为了做到可持续发展，人们应怎样既合理地利用能源又注意环境保护呢？

本章将以打桩机的工作过程为背景，通过探究其中的功能关系，研究机械能守恒定律，进而研究能量守恒定律，并从社会、经济发展的视角，了解能源的利用现状以及社会的可持续发展战略。



图 4-1　图中有多台打桩机在工作，它们将一些粗大的桩打入地下，然后在这些桩上搭建建筑，以增强建筑物的强度和抗震性能

4.1
势能的变化与机械功

物理学中把物体由于被举高而具有的能量叫做重力势能(gravitational potential energy)。因此，打桩时被举高的重锤具有重力势能。

重锤的质量越大，上升的高度越高，桩就被打得越深。这表明，重锤的重力势能跟它的质量和高度有关。

那么，重力势能的大小跟重锤的质量与高度，究竟有怎样的关系呢？

请思考一下：假如忽略摩擦阻力，重锤在被钢丝绳匀速提升的过程中受到几个力的作用？哪个力做正功？哪个力做负功？

研究重力做功跟重力势能变化的关系

分析论证　重力势能的大小

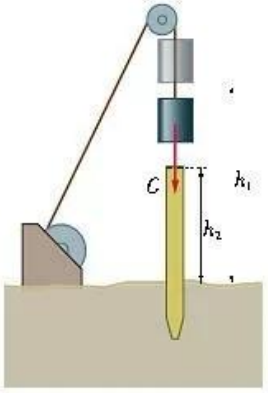


图 4-2　打桩机工作示意图

图 4-2 是打桩机工作的示意图，打桩机重锤的质量为 m，重锤所受到的重力为 $G = mg$。

设重锤从离地面高度 h_1 处，自由下落至离地高为 h_2 处（铁桩的顶端），重锤位移的大小为 $\Delta h = h_1 - h_2$，重力做的功为

$$W = G\Delta h = mg(h_1 - h_2)$$

即

$$W = mgh_1 - mgh_2 \tag{1}$$

这是一个很重要的关系式，下面我们来研究它的物理意义。

(1)式中的 mgh 跟物体的质量和离地面的高度有关，这就是物体的重力势能，用符号 E_p 表示，于是有

$$E_p = mgh \tag{2}$$

重力势能是地球与物体系统共有的。

上式表明，物体的重力势能等于它所受重力和它的高度的乘积。在国际单位制中，势能的单位是焦（耳），符号是 J。

重力做功跟重力势能的变化

(1)式反映了重力做功跟重力势能变化的关系。由(1)式可知：当重锤从高处 h_1 下落到低处 h_2 的过程中，重力做正功，重锤的重力势能减少。

反之，当重锤从低处 h_2 上升到高处 h_1 的过程中，重力做负功，重锤的重力势能增加。

重力做功与重力势能变化的关系可用下式表示

$$W = E_{p1} - E_{p2} = -\Delta E_p$$

式中 W 为重力所做的功，E_{p1} 为物体在初始位置的重力势能，E_{p2} 为物体在末位置的重力势能，ΔE_p 为重力势能的增量。

综合重力做功的两种情况可知：当重力对物体做正功时，物体的重力势能减少；当重力对物体做负功时，物体的重力势能增加。

请讨论：

一个做斜抛运动的物体，在它上升阶段和下降阶段，重力对物体做正功还是负功？这个物体的势能怎样变化？

我们在第3章中已经知道，物体动能的变化可以用外力做功的多少来量度，而重力势能的变化也可以用重力做功的多少来量度。这又一次表明：功是能量变化的量度。

案例分析

案例 一台打桩机重锤的质量是250 kg，重锤在打桩机顶端时，离地面的高度是20 m。试分析计算：

(1) 当重锤被钢丝绳拉着从地面匀速上升到打桩机顶端时，重力对重锤做了多少功？重锤的势能变化了多少？

(2) 当钢丝绳松弛，重锤从打桩机顶端自由落到地面时，重力做了多少功？重锤的势能变化了多少？

分析 首先分析重力对重锤所做的功和重锤势能是怎样变化的。当重锤匀速上升时，重力是做正功还是负功？重锤的势能是增加还是减少？当重锤下落时，情况又怎样呢？

请写出你的分析、计算过程和结果。

重力做功跟路径无关

重力做功跟物体经过的路径有没有关系呢？

在图4-3中，两个学生的质量都是 m，因此他们所受重力相等。当他们分别以图示的路径登上高 h 的阶梯顶端 A 时，重力对这两个学生所做的功是否相同？重力对这两个学生做的功跟他们经过的路径有关吗？

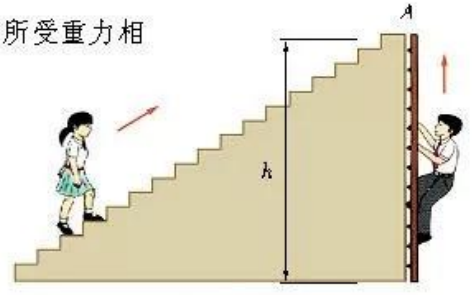


图4-3 重力对谁做功多

请写出你的分析过程与结论。

分析结果表明：重力对这两个学生所做的功一样多，都等于 mgh，跟他们登梯的路径没有关系。

请讨论：

1. 假如图中的男同学沿着另外几种不同的斜坡登上 A 处，重力所做的功是多少？

2. 图4-4中的滑雪运动员从山上沿不同的坡道下滑到山脚，重力对他做的功是否一样？



图4-4 重力对滑雪运动员做的功与路径有关吗

由以上分析和进一步的研究可知：

重力对物体做的功只跟物体的初始位置和末了位置的高度有关，而跟物体经过的路径无关。

物体的重力势能 $E_p = mgh$ 中的 h，是相对于某个重力势能为零的参考平面而言的。在这个参考平面

上，$h=0$，重力势能也为零；选择不同的参考平面，公式中的高度 h 就不相同，因而物体的重力势能也不同：位于参考平面上方物体的重力势能为正值，在其下方物体的重力势能为负值。

选择重力势能的参考平面，应视研究问题的方便而定。通常选择水平地面作为重力势能为零的参考平面。

案例分析

案例 图 4-5 是地图上某小山包的等高线图，a、b、c 为山包上的三个点在地图上的位置。

(1) 若选择海平面为重力势能参考面，质量为 55 kg 的学生在 a、b、c 位置时的重力势能是多大？他从 a 位置上升到 c 位置，重力做了多少功？

(2) 若选择 100 m 的等高线所在平面为重力势能参考面，则质量为 55 kg 的学生在 a、b、c 位置时的重力势能是多大？他从 a 位置上升到 c 位置，重力做了多少功？

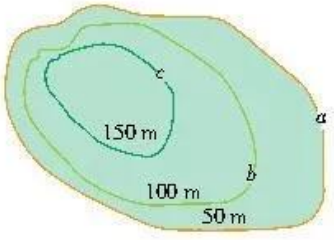


图 4-5

分析 等高线上标注的数字(称为标高)表示地面上此处距海平面的高度。两等高线数字之差表示此两位置之间的高度差(竖直距离)。

根据重力势能计算式，物体在某一位置的重力势能等于物体受到的重力 mg 和此位置到势能参考面的高度 h 的乘积，因此若选择海平面作为重力势能参考面，则重力和等高线标高的乘积就是该物体在此等高线上的势能。若选择某一等高线所指的面为重力势能参考面，则考察点和参考面等高线标高之差和物体所受重力的乘积即为物体相对选定重力势能参考面的重力势能，在参考面之上的重力势能为正值，在参考面之下的重力势能为负值。

解答 请根据上面分析完成问题(1)的计算。

请根据上面分析共同完成问题(2)的计算。为简单起见，g 取 10 m/s^2。

学生在 a 位置时，他距离重力势能参考面的高度

$$h_{ab}=50\ \text{m}-100\ \text{m}=-50\ \text{m},$$

重力势能

$$E_{pa}=mgh_{ab}=55\times10\times(-50)\ \text{J}=-2.75\times10^{4}\ \text{J}$$

学生在 b 位置时，因为就在重力势能参考面上，所以重力势能 $E_{pb}=0$。

学生在 c 位置时，他距重力势能参考面的高度 $h_{cb}=150\ \text{m}-100\ \text{m}=50\ \text{m}$，重力势能

$$E_{pc} = mgh_{ab} = 55 \times 10 \times 50\ \text{J} = 2.75 \times 10^4\ \text{J}$$

从 a 位置上到 c 位置，重力做的功等于两位置重力势能的变化。

$$W = -\Delta E_p = E_{pa} - E_{pc} = -2.75 \times 10^4\ \text{J} - 2.75 \times 10^4\ \text{J} = -5.5 \times 10^4\ \text{J}$$

多学一点 引力势能和弹性势能

重力是由于地球对物体的引力而产生的，重力势能是地球与物体相互作用具有的能，是物体和地球所共有的。研究发现，一切受到吸引力或推斥力作用的物体都具有势能，例如电场中的电荷有势能，组成物质的分子之间也有势能。

物体发生弹性形变时具有的势能叫做弹性势能，被拉伸或压缩的弹簧都具有弹性势能(图 4-6)。弹簧的弹性势能与本身的劲度系数大小有关，还与伸长量或压缩量有关。设弹簧的劲度系数为 k，弹簧的伸长量或压缩量为 x，则弹簧的弹性势能 $E_p = \frac{1}{2}kx^2$。

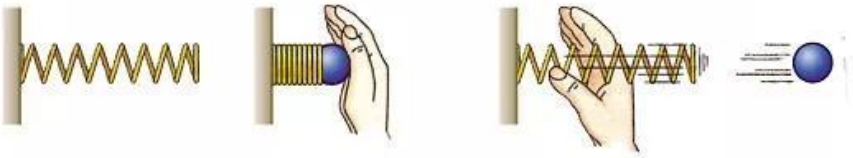


图 4-6 压缩的弹簧有做功的本领，具有弹性势能

家庭作业与活动

1. 请从生活中举出几例说明：重力所做的功只跟物体初位置和末位置的高度有关，跟物体运动的路径无关。
2. 质量为 100 g 的小球从高 1.8 m 处落到水平地面上，又弹回到 1.25 m 高处。在这个过程中，重力对小球所做的功是多少？小球的重力势能变化了多少？
3. 质量为 50 kg 的人沿着长 150 m、倾角为 30° 的坡路走上一个土丘，重力对他所做的功是多少？他克服重力所做的功是多少？他的重力势能增加了多少？
4. 图 4-7 是一个质量为 m 的物体被斜抛后的运动轨迹。
   (1) 在物体由抛出位置 1 运动到最高位置 2 的过程中，重力所做的功是多少？物体克服重力所做的功是多少？物体的重力势能增加了多少？
   (2) 当物体由位置 2 运动到跟位置 1 在同一水平面上的位置 3 的过程中，重力所做的功是多少？物体的重力势能减少了多少？
   (3) 当物体由位置 1 运动到位置 3 的过程中，重力所做的功是多少？物体的重力势能变化了多少？

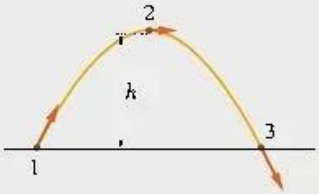


图 4-7

4.2

研究机械能守恒定律



图 4-8　打桩机重锤在下落过程中，动能与势能怎样转化

在初中已经知道，运动的物体往往既具有动能，也具有势能，且势能和动能是可以互相转化的。如图 4-8 所示，打桩机的重锤从高处下落的过程中，重锤的高度越来越小，速度却越来越大，这表明重锤的势能在减少，但动能却在增加，减少的势能转化成了动能。

请你研究一下，图 4-9 中各物体的动能和势能是怎样转化的？

研究机械能守恒定律

物体的动能与势能之和称为**机械能**(mechanical energy)。若用符号 E 表示机械能，则有

$$E = E_k + E_p$$

通过对图 4-9 中各事例的分析，你能猜想出物体机械能的转化遵循什么规律吗？

下面从理论分析和实验探究两方面来研究机械能的转化与守恒问题。

图 4-9　这些运动物体的动能与势能怎样转化

a　下落的果实



b　过山车



c　频闪照片中的斜抛物体



分析论证 研究重锤自由下落过程中机械能是否守恒

如图 4-10 所示，设打桩机重锤的质量是 m，当重锤离地面高度为 H 时，以桩顶为参考平面，重锤具有的机械能是

$$E_1 = E_{k1} + E_{p1} = 0 + mgH = mgH$$

忽略空气阻力，重锤下落过程中只有重力做功。当下落至离地面高度为 h 处时，因为 $v_2^2 = 2g(H-h)$，此时的动能 $E_{k2} = \frac{1}{2}mv_2^2 = mg(H-h)$，而 $E_{p2} = mgh$，所以重锤具有的机械能是

$$E_2 = E_{k2} + E_{p2} = mg(H-h) + mgh = mgH$$

同理，重锤刚下落至桩顶时，因为 $v_3^2 = 2gH$，此时的动能 $E_{k3} = \frac{1}{2}mv_3^2 = mgH$，而 $E_{p3} = 0$，重锤具有的机械能是

$$E_3 = E_{k3} + E_{p3} = mgH + 0 = mgH$$

比较重锤在这三个位置时的机械能 E_1、E_2、E_3，你得出了什么结论？

重锤在自由下落过程中，只有重力做功，它的重力势能转化为动能，但动能与重力势能之和是一个恒量，即机械能保持不变。

上面是从分析重锤自由下落过程中得出的结论。这个结论是否具有普遍意义呢？

分析图 4-9c 中斜抛物体的频闪照片，你也能得出“斜抛物体的动能和势能互相转化，但在任一位置的机械能都相同”的结论吗？

研究证明，在只有重力做功的情况下，不论物体是做直线运动还是做曲线运动（如抛体运动、圆周运动等），这个结论都是正确的。**在只有重力做功的情形下，物体的动能和势能可以互相转化，但其总的机械能保持不变。即**

$$E = E_k + E_p = \text{恒量}$$

这个结论叫做**机械能守恒定律** (law of conservation of mechanical energy)。

请讨论：在只有重力和弹力做功的情况下，机械能守恒定律应该如何表述？

机械能中的势能包括重力势能与弹性势能。

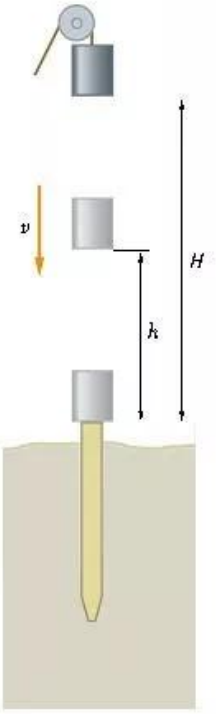


图 4-10 研究打桩机重锤下落过程的机械能

实验探究 验证机械能守恒定律

实验目的 验证在只有重力做功时，物体的机械能守恒。

实验设计 下面推荐两种方案供选用，你也可以自行设计实验方案。

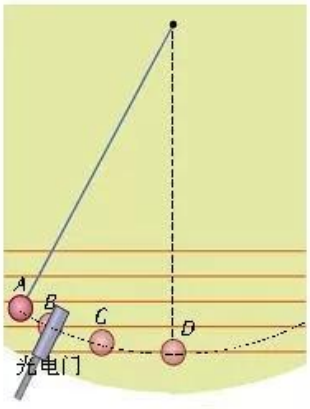


图 4-11　验证摆动中的摆球机械能守恒

根据你的实验方案进行实验，并完成一份实验报告。实验报告中要分析产生误差的主要原因。

实验方案一

用单摆和 DIS 装置验证机械能守恒。

实验装置如图 4-11 所示。由于摆线的拉力始终与小球的运动方向垂直，不做功，因此实验中只有重力对摆球做功。

将 DIS 装置中的光电门先后放在 A、B、C 各点，测出摆球经过各点时的速度。测出各点对 D 点的高度。运用所得数据验证单摆的机械能是否守恒。

下表中的数据是一次实验的记录，其中高度 h 为 A、B、C 各点到 D 点的高度，速度 v 是摆球经过 A、B、C、D 各点的瞬时速度。请根据表中的实验数据计算摆球在 A、B、C、D 各位置的机械能，比较它们是否相同。

Δs（挡光宽度）= 0.008 m　　物体质量 m = 0.011 kg

位　置	A	B	C	D
高度 h/m	0.30	0.20	0.10	0.00
速度 v/(m·s^{-1})	0.00	1.38	1.96	2.36
势能 E_p/J				
动能 E_k/J				
机械能 E/J				

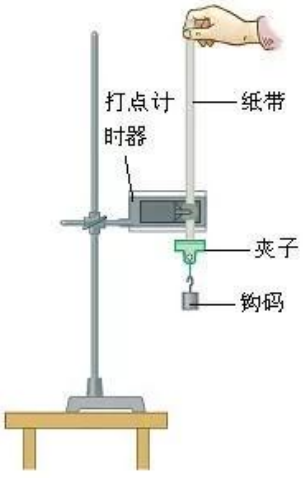


图 4-12　验证自由落体的机械能守恒

实验方案二

用自由落下的重物和打点计时器验证机械能守恒。

实验装置如图 4-12 所示。忽略阻力，则重物自由下落过程中只有重力做功。

纸带上两点之间的距离等于重物下落的高度。选定几个计数点，测出它们之间的距离和重物在各点的速度，验证机械能是否守恒。

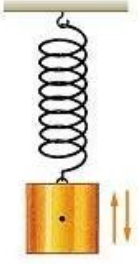


图 4-13　钩码的机械能守恒吗

以上从理论与实验两个方面都验证了机械能守恒定律。机械能守恒定律是力学中的重要定律，是能量守恒定律在机械运动中的体现。

请讨论：

1. 你是怎样理解机械能守恒定律的条件“只有重力做功”的？

2. 当物体沿光滑斜面下滑时，它的机械能守恒吗？

3. 如图 4-13 所示，先将弹簧竖直向下拉伸，然后放手，弹簧

下挂着的钩码将上下振动。钩码在运动过程中的机械能守恒吗?

应用机械能守恒定律分析问题

在生活和生产中，应用机械能守恒定律分析解决有关的力学问题往往比较方便。在分析问题时，首先要注意是否只有重力做功。

案例分析

案例 1 图 4-14 是上海轨道交通 3 号线某车站的设计方案。由于站台建得稍高，列车进站时要上坡，出站时要下坡。忽略斜坡的摩擦力，你能从机械能守恒定律分析这种设计的优点吗?

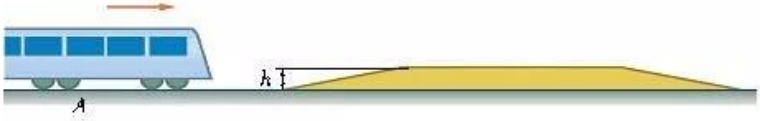


图 4-14 上海轨道交通 3 号线某车站设计方案

分析 列车进站前虽关闭了电动机，但仍具有动能，可使列车爬上斜坡，这是将动能转化为势能储存起来。出站时，列车可利用斜坡再将势能转化成动能。可见，这种设计方案可以节约电能。

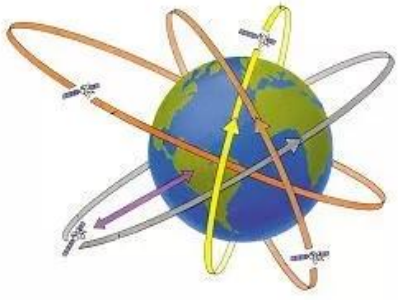
你认为这种设计方案还有哪些优点?说说你的看法。

案例 2 打桩机重锤的质量为 250 kg，被提升到 20 m 的高度后自由下落，求它到达地面时的动能和速度(g 取 10 m/s²)。

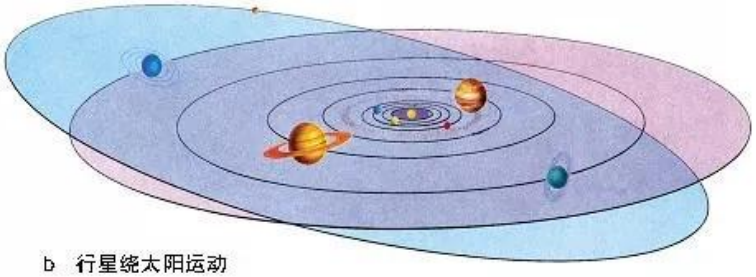
分析 提升到高处的重锤具有重力势能。因为重锤在自由下落过程中，只有重力做功，所以机械能守恒。重锤到达地面时，势能全部转化为动能。可用机械能守恒定律计算这时重锤的速度。

请完成有关的计算。

案例 3 自然界中的很多现象都遵循机械能守恒定律，试用机械能守恒定律分析图 4-15 中的



a 人造卫星绕地球运动



b 行星绕太阳运动

图 4-15 自然界中机械能守恒的事例

现象。

分析 物体的重力是由于地球对物体的引力而产生的。当地球表面的物体只有重力做功时，机械能守恒。研究表明，宇宙中各星球之间都存在着相互作用的引力（第 5 章将专门研究这个问题），行星绕太阳运动、月球绕地球运动、人造卫星绕地球运动，都符合机械能守恒的条件，它们的机械能都守恒。

家庭作业与活动

1. 下列哪些事例中的机械能是守恒的？为什么？
   A. 雨滴接近地面时匀速下落；
   B. 铅球在空中飞行（空气阻力不计）；
   C. 玩具小车沿光滑固定斜面向上运动（空气阻力不计）；
   D. "神舟"5 号载人飞船与运载火箭分离前与分离后做无动力运动。
2. 伽利略在他的理想实验中认为，在没有摩擦阻力的情况下，小球从斜面的一定高度滚下，必然在一个对接的斜面上冲到同样的高度，且不因这个斜面的倾角变化而变化（图 4-16）。由于做这个实验时，摩擦阻力总是存在的，所以伽利略特别指出"在没有摩擦阻力的情况下"。现在，你能运用机械能守恒定律来解释伽利略的想法吗？

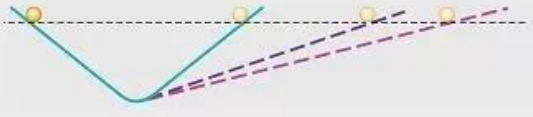


图 4-16 伽利略理想实验示意图

3. 滑雪运动员从离水平地面 30 m 的高处，沿弯曲起伏的滑道向水平地面滑行，阻力不计。运动员滑到水平地面时具有多大的速度？
4. 从高楼的窗户随意向外丢东西是很危险的。假设某人从十层楼房的窗户以 8 m/s 的速度向外抛出一只烂苹果，你能估算出苹果落地时的动能吗（阻力不计）？你认为还需要知道哪些物理量？你估计这些物理量应该是多大？苹果落地时的动能与苹果抛出时的初速度方向有关吗？
5. 17 世纪初，伽利略在研究中发现了"摆球的等高性"。图 4-17 是他当时研究的装置图（叫伽利略摆）。将小铁球拉到一定高度，然后释放，观察小球能摆多高，在哪个位置速度最大。在铁架上再夹一个夹子，使得小球运动到最低点时，挂小球的细线被这个夹子挡住。将小球拉到与先前同样的高度，然后释放，观察小球能摆多高，在哪个位置速度最大。

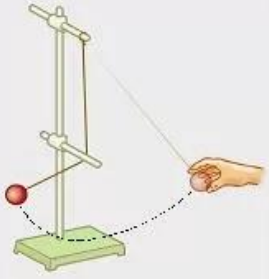


图 4-17

做一下伽利略的实验，你观察到的结果是什么？请用有关机械能的知识进行分析。

6. "勇气"号火星探测器着陆的最后阶段是：着陆器降落到火星表面上，再经过多次弹跳才停下来。假设着陆器第一次落到火星表面弹起后，到达最高点时高度为 h、速度大小为 v_0；第二次落到火星表面时，速度大小为 v，若不计火星大气阻力，你认为着陆器在下落的过程中机械能守恒吗？若守恒，请根据以上数据求出火星表面的重力加速度 g 的表达式。

4.3

能量的转化与守恒

能量是物理学中重要的物理量，除了前面重点研究过的机械能外，还有内能、电磁能、光能、化学能、核能、生物能等多种形式。各种形式的能量是可以相互转化的。能量概念的重要性，就在于能量不仅可以相互转化，而且在转化过程中总是守恒的。

下面让我们先对小汽车行驶时的能量转化情况做一些分析。

分析小汽车行驶时能量的转化

图 4-18 是小汽车部分结构的示意图，从能量的角度分析，这些部件工作时都与哪种形式的能量有关？它们是通过什么途径转化的？

请将你的研究结果用图表的形式表示出来，并与同学交流。

1 节 AA 电池的能量约 4×10^3 J
煮沸 1 杯水所需热量约 4×10^5 J
100 g 稻米能产生热能约 1.3×10^6 J
100 g 牛奶能产生热能约 2.9×10^5 J
轿车蓄电池所含电能约 3×10^7 J
燃烧 1 L 汽油放出能量约 3.4×10^7 J



图 4-18 小汽车的部分结构示意图

自然界中存在着各种不同的运动形式，也存在着多种形式的能量。

请分析图 4-19 所示的各种现象，其中不同形式的能量是怎样转化的？



a 核爆炸



b 人摄取各种食物



c 雷电

图 4-19 各种形式能量的转化

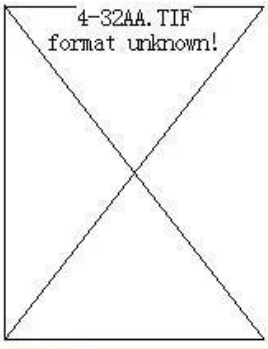
能量守恒定律的确立

上一章中我们已经研究过，在只有重力做功的情况下，打桩机重锤的动能与势能之和是个恒量，即它的机械能守恒。如果除重力做功外，还存在绳子拉力和摩擦力等做功，那么它的机械能还守恒吗？

上面分析过，小汽车在行驶时，各种形式的能量会转化。这些能量在转化过程中是否也守恒呢？

在物理学的发展过程中，人们对能量及其守恒规律的探索源远流长。古代中国和古希腊就已提出了运动不灭的思想。近代科学诞生以来，笛卡儿、莱布尼茨(G. W. Leibniz)等科学家从不同角度提出了宇宙运动量不灭的光辉思想。从 18 世纪末到 19 世纪 40 年代，许多科学家深入研究了各种形式能量的相互转化，以及在转化过程中的数量关系。

目前科学界公认，迈尔(J. R. Mayer)、焦耳、亥姆霍兹(H. Helmholtz)在这方面做出了卓有成效的贡献，他们被誉为是能量守恒定律的奠基者。



焦耳 (J. P. Joule, 1818—1889)，英国物理学家。他先后通过 400 多次实验，确定了热功当量的精确数值，为能量守恒定律的建立提供了可靠的实验依据。

德国医生迈尔是从生理学开始对能量进行研究的。他观察到生活在热带的人，静脉血颜色比生活在温带的人更红，由此想到食物中含有的化学能可以像机械能一样转化为热。在热带高温的情况下，机体只需要较少的热量，所以机体中食物的氧化过程减弱了，静脉血中留下了较多的氧。他分析了 25 种能量的转化和守恒现象，成为世界上首先阐述能量守恒思想的人。

英国物理学家焦耳一生致力于实验研究。在 1840 年到 1878 年将近 40 年的时间里，他研究了电流的热效应、压缩空气的温度升高，以及电、化学和机械作用之间的联系。他做了 400 多次实验，用各种方法测定了热功当量的值，为能量守恒定律的发现奠定了坚实的实验基础。

德国学者亥姆霍兹于1847年在柏林宣读了他的论文《论力的守恒》。在这篇文章中，他总结了许多人的工作，分析了化学、机械、电磁、光等不同形式的能的转化和守恒。他坚信“永动机”是不可能实现的；任何机器都不能提供多于能源供给的能量；当能源用尽时，机器将停止工作；机器只能转化能量，不能创造和消灭能量。亥姆霍兹在论文中把能量概念从机械运动推广到热、电、磁，乃至生命过程，提出了普遍的能量守恒原理，对能量守恒做了清晰、全面的论述，为人们深入地理解自然界的统一性提供了有力的武器。他的思想用现代的话来概括，就是：

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

恩格斯把能量守恒定律和细胞的发现、进化论的建立一起称为19世纪自然科学中“最具决定意义的三大发现”。

上面的话后来被称为**能量守恒定律**(law of energy conservation)。能量转化与守恒定律是19世纪最伟大的发现之一。它不仅适用于无机界，也适用于生命过程，是自然界中最基本、最普遍的规律。

请讨论：能否设计出这样一种小汽车，它能将汽油的化学能百分之百地转化为行驶的机械能或其他有用的能量？

案例分析

没有免费的午餐

——第一类永动机的不可能性

案例 历史上曾有许多人企图发明一种机器，它可以不消耗能量而连续不断地对外做功，或者消耗少量能量而做大量的功。人们把这种设想中的不消耗能量的机器叫做第一类永动机。

图4-20是“永动机”的一种设计方案。轮子边缘悬挂着前端有重锤且可自由活动的棒子。设计者认为，无论轮子在什么位置，右侧重锤距离轮子中心总是比左侧重锤远，它们产生的转动力矩总是比左侧重锤产生的要大，所以，右侧会牵动左侧使轮子旋转，而且会永久旋转下去(至少在轮子磨损之前)，并带动机器转动。

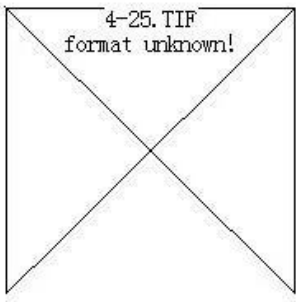


图4-20 一种永动机设想

分析 这仅仅是设计者的想法，实际上这台机器并不能旋转。因为轮子右侧的重锤虽然距离中心较远，每个重锤产生的力矩较大，但重锤的个数少，只有4个。左侧的重锤虽然距离中心较近，单个重锤产生的力矩虽然较小，但个数多，总力矩仍是平

衡的。实际操作时，这个轮子可能会左右晃动几下，然后就停下来了。

能量银行没有利息，更不允许透支。实践证明，一切永动机的设想和制造最后都以失败而告终，这说明能量确实是守恒的。

信息浏览

中微子的发现与能量守恒定律

20 世纪 20 年代，科学家们在研究原子核的 β 衰变时发现，β 衰变放射出的能量小于原子核系统的初态和末态的能量之差。因此包括诺贝尔物理学奖获得者玻尔(N. Bohr)在内的一些物理学家，曾怀疑能量守恒定律在比原子更小更深的层次内，可能不再成立。但是，更多的物理学家，特别是瑞士著名物理学家泡利(W. Pauli)坚信能量守恒定律的普适性。1931 年，泡利设想在这种 β 衰变的过程中，产生了一种静止质量近似等于零的不带电的微小粒子，是它在 β 衰变中把一部分能量带走了。意大利著名物理学家费米(E. Fermi)把这种未知的粒子称为"中微子"。他们的预言在 20 多年后的 1956 年，终于被美国洛斯阿拉莫斯国家实验室的雷因斯和柯恩在实验中证实了。

在中微子的发现过程中，我国物理学家王淦昌曾做出过突出贡献。他的论文《关于探测中微子的建议》于 1942 年在美国《物理评论》上发表。同年，美国科学家艾伦就按照王淦昌建议的方法做了实验，并取得了基本上肯定的结果。1952 年，罗德拜克、戴维斯又分别进行了测量，均与王淦昌预料的结果相符合，从而间接地得到了中微子存在的实验证据，为雷因斯和柯恩最终从实验中捕获中微子开辟了道路。

家庭作业与活动

1. 分析打桩机工作时，各种形式的能量是怎样转化的。
2. 汽车亮灯时，是否要用更多的汽油？汽车开空调时呢？说明理由。(汽车发动机运转时，蓄电池并不为这些装置供电)
3. 在地热发电、风力发电、太阳能光电池等发电方式中，发生的是什么样的能量转化？
4. 2005 年 10 月 12 日，"神舟"6 号飞船发射成功。火箭点火后，向下喷出高速气体，我们看到橘黄色的火焰。在火箭升空的过程中，功能之间的关系是：液体燃料的 _____ 能转化为火箭和飞船的 _____。能量的转化关系是通过喷出的气体对 _____ 做功来实现的。
5. 人身体在最佳状态下只能把人体化学能的 25%转化为有用的机械能。假设质量为 60 kg 的小李同学有这样的转化效率，他登山时平均每小时登高 400 m。那么，在 3 h 内，小李共消耗了多少化学能？(g 取 10 m/s²)

4.4

能源与可持续发展

根据能量守恒定律，汽车行驶所需要的能量不会“无中生有”地产生，它来自汽缸内汽油燃烧所释放的能量。那么，汽油释放的能量中有多少可为汽车所用呢？其中又有多少能量损失掉了呢？损失掉的能量还可回收再利用吗？下面就从汽车的能量流向出发，研究能量的转化效率、能量转化的方向性，以及能源与可持续发展等问题。

研究能量的转化效率

研究轿车的能量流向

图 4-21 是一辆普通轿车在额定功率下行驶时的能量流向图。我们知道，轿车在额定功率下匀速行驶时，克服有用阻力所做的功是有用功。



图 4-21 轿车的能量流向图

根据图中所示的能量流向，通过分析计算回答以下问题：

1. 轿车行驶时，做有用功的能量占燃料能量的比例是多少？

2. 在排气管和散热片中散失的能量占多大比例？

通过这些分析，你有哪些思考？

由分析可知，轿车行驶时，来自燃料的化学能在转化和转移的过程中，处处被分流克扣，真正用于做有用功的能量竟然不到输入能量的 13%。由此可见，研究并提高机器的实际能量利用率，具有重要的经济和社会意义。

能量的转化效率

人们利用机器工作时，都要输入能量让它做功，但任何机器都不可能将输入的能量全部转化为有用的能量，必然会有一部分能量要损失掉。如电动机将电能转化为机械能时，总会有一部分电能转化成导线的内能，还有一部分因摩擦而转化为机器的内能。白炽

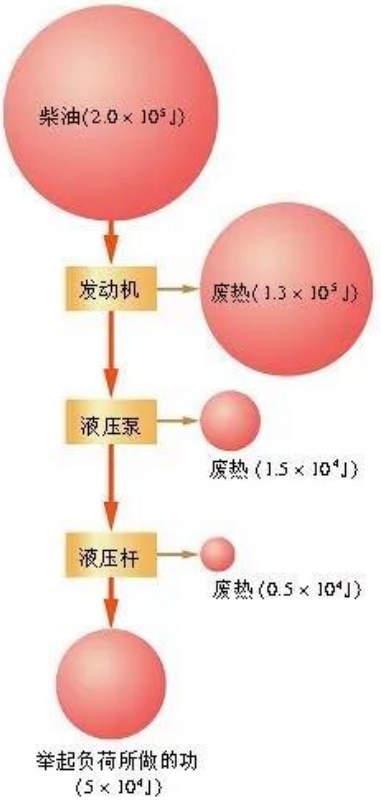


图 4-22　打桩机的能量流向图

电灯只能将输入电能的不到 10% 转化成我们需要的光能。

为了衡量机器可将多少输入的能量转化为有用的能量，人们提出了“能量转化效率”这一概念，它是转化为有用功的能量跟输入能量的比值，即

$$\text{能量的转化效率} = \frac{\text{有用的能量}}{\text{输入的能量}}$$

请讨论：

1. 根据图 4-21 所示，轿车的能量转化效率为多少？

2. 从地面将物理课本捡起放到桌上，课本的重力势能增加了，但要弥补你为此付出的能量，你必须从食物中摄取数量为课本势能增加量约 9 倍的能量才行。为此，你需要喝多少牛奶，或者吃多少米饭？请自己查找需要的数据，并写出你的计算过程。

3. 提高机器设备的能量转化效率有什么经济和社会意义？

案例分析

案例　图 4-22 是一台打桩机的能量流向图，试计算打桩机工作时的能量转化效率。

分析　打桩机工作时，将重锤（负荷）从地面提到空中，即克服重力做功，这是有用功，但在发动机、液压装置等部件中，有不少能量转化成这些部件的内能，这些都是无法避免的损耗。

解答　根据图中的数据，计算打桩机的能量转化效率。

能量转化和转移的方向性



图 4-23　热水会自动变凉

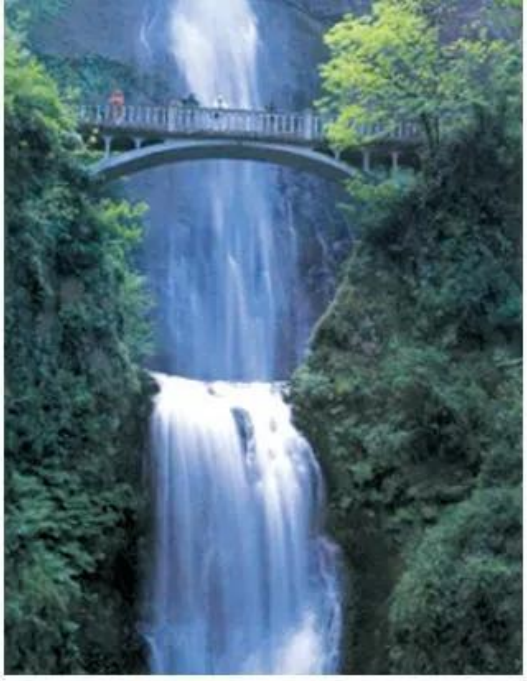


图 4-24　燃烧的火柴

碗中的热水（图 4-23）过了一会就自动变凉，这表明热能够自动地从温度高的热水向周围温度低的空气传输。但是，你见过碗中的冷水会自动变热吗？热能够从低温物体自发地向高温物体传输吗？

图 4-24 中的火柴燃烧后能自动恢复原状吗？

经验与研究都表明，与热现象相关的能量转化过程是有方向性的。如果要使能量转化沿反方向进行，则必须做





从瓶中喷出的香槟酒，能自动地回到瓶里吗

瀑布中的水能够自动地把动能转化为势能而回到悬崖上吗



闹钟里的发条松弛后，能自动地再旋紧吗

图 4-25　这些能量转化过程能自动地反向进行吗

功。例如电冰箱将冰箱内食品（温度低）的热能转移给空气（温度高），就必须消耗电能，使冰箱中的压缩机做功才行。

进一步的研究发现，其他能量的转化过程也有方向性。研究图 4-25 所示的各种现象，这些过程能自动地沿相反方向发生吗？请交流你们的研究结果。

研究和事实都表明：能量的转化和转移具有方向性，或者说，能量的转化和转移具有不可逆性。

自然现象的变化也具有类似的不可逆性，例如沙漠化的土地不会自发地再变为绿洲。因此人类不仅要珍惜能源和资源，还要自觉地保护自然。

案例分析

不亏不盈也不行

——第二类永动机的不可能性

案例　有人想设计一台机器，该机器能自动地从低温热源吸收内能，向高温热源释放。高温热源将得到的能量通过另一台做功装置对外做功。这样，不需要任何其他动力机械，不消耗任何其他能源，整个循环可永远进行下去。这样的机器被称为第二类永动机。

分析　第二类永动机并不违背能量守恒定律，但违背了能量转化和转移的不可逆性，内能不可能不消耗其他能量而自发地从低温热源转移到高温热源。因此，第二类永动机也是不会成功的。

让天更蓝、水更清、地更绿

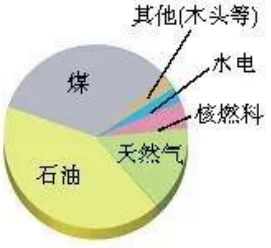


图 4-26　目前人类使用的各种能源的比例

能源是人类生存和发展的物质基础，是人类从事各种经济活动的原动力，也是社会经济发展水平的重要标志。图 4-26 是目前人类使用的各种能源所占的比例。由图可见，煤、石油、天然气等化石燃料是目前所用的主要能源，它们是千百万年前由太阳能转化而成的(图 4-27)，是不可再生的。

在地球的能源仓库中还有水能、核能、风能等等。

关于能源，你还知道哪些？

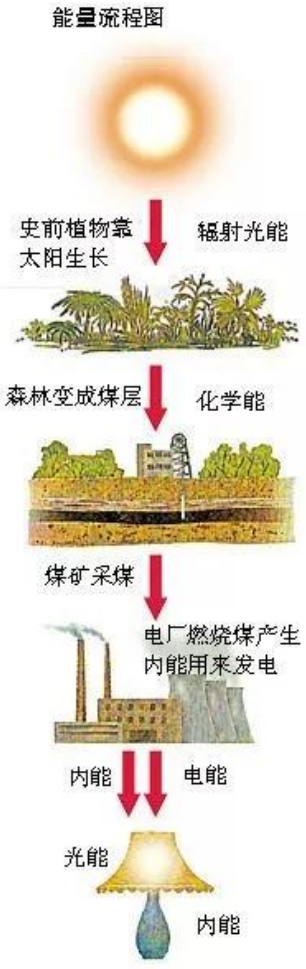


图 4-27　由太阳能转化而来的能量及其利用过程

20 世纪中叶以来，随着现代化进程的进一步加快，经济、社会的快速发展和人类生活的更加丰富多彩，对能源的需求越来越大，能源的消耗也越来越厉害。

但是地球能源仓库的库存量是有限的，不可再生能源的过度开采和消耗给人类带来了能源危机。化石能源的大量使用也给环境造成了危害，影响了人类的生存。

常规能源的短缺和使用这些能源所带来的环境污染，使得新能源的开发成为当务之急。为了既满足当今社会发展对能源的现实需求，又保证未来社会发展对能源的潜在需求，世界各国都制定了关于能源的可持续发展战略，尽可能地开发和利用各种新能源，千方百计地提高不可再生能源的合理利用率和转化效率，并且厉行节约，避免浪费。

我国能源资源虽然品种齐全，总量(不包括铀)约占世界的 11%，居世界第三位，但人均拥有量仅相当于世界平均水平的一半，而且优质能源相对较少。我国能源资源总量中煤炭占 90%以上，而热效率高的石油、天然气等优质、清洁、低碳能源所占比例仅为 2.3%，远低于世界平均水平的 21%。

随着我国社会主义现代化进程的加快，对能源的需求也越来越大。据预测，到 2020 年，中国的能源需求总量将达到近 2.5×10^9t 标准煤，这个数字比 2000 年高出了 90%。从 1980 年到 2000 年，中国在能源消费翻一番的情况下，实现了国内生产总值(GDP)翻两番的目标，这一成就在国际能源界被普遍视为一个奇迹。但从现在到 2020 年，中国还有机会重现这一奇迹吗？

如果在能源的使用过程中，大气环境得不到有效的治理，到 2020 年，城市中受污染的人口将急剧增加。因此，我国制定了相应

的可持续发展战略，让能源的开发与利用，以及能源与环境等协调发展，力求在发展能源的同时，保护好环境，让天更蓝、水更清、地更绿。

请阅读下面的一段报道，谈谈你对这个报道的看法。

2003年12月8日国内某媒体报道了下面的这则消息：

这个冬天，对于湖南长沙市的150多万市民来说，将格外漫长。因为从今年11月30日起，可能一直要持续到明年3月份，这里的市民，将分区分片“享受”每连续供电3天之后，停电24小时的“待遇”。《××晚报》11月27日的报道中，已经赫然出现了商店秉烛营业的景观。

长沙并不是唯一的例子。从今年春天就开始逐渐浮出水面的电力危机，在盛夏季节达到一个短暂的高峰，至今这个阴影仍然挥之不去，影响范围先后涉及全国几乎三分之二的省份。有人戏称，中国电力市场又退回到了20世纪80年代。

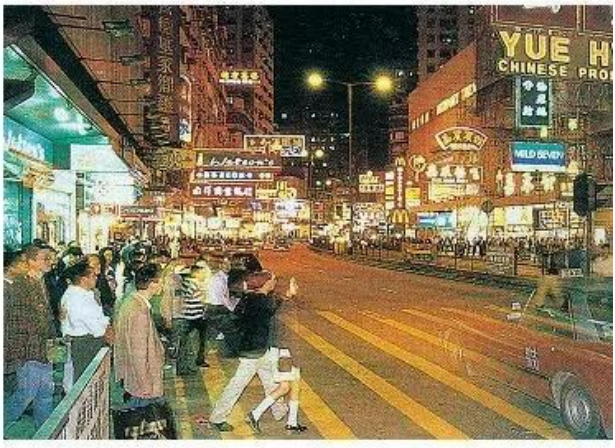


图4-28 这条街上的电灯消耗的能量相当于每分钟烧掉1 t煤

仅仅是电力吗？似乎没有这么简单。入秋之后，柴油的紧张情况，从珠江三角洲到长江三角洲，从福建到浙江，已经成为一种新的“流行病”。即使在北京地区，限量供应的情况也再次出现，就差没有“凭票供应”了。

信息浏览

能源与环境

从20世纪50年代中期到70年代初，不到20年的时间里，由于中东战争而连续四次发生能源危机。这促使人们不得不对地球上的石油、天然气、煤炭等常规能源的储量进行一番认真的调查研究。研究人员估计，按照目前的开采速度，地球上的石油储量仅能维持40~45年；天然气的可开采储量仅能维持50~60年。至于煤炭，随着石油和天然气的逐渐“枯竭”，加上煤炭的气化和液化技术日趋成熟，煤炭的年消费量将会大幅度增长，因此地球上煤的储量也仅能维持250年左右。

大量消耗常规能源带来了严重的环境问题。石油和煤炭燃烧时所放出的大量的二氧化碳、二氧化硫和氮氧化物等有害物质，使大气中二氧化碳含量升高，从而产生“温室效应”，地球的平均温度因此而不断升高。这将导致寒带和极地的冰川大量融化，海平面上升，从而淹没地势较低的沿海地区；同时，也会使干旱的热带地区更干旱，形成高温热浪，频繁出现飓风和龙卷风，造成各种灾难。大气中的二氧化硫

和氮氧化物与水蒸气发生反应后生成的酸，随同雨雪降落，形成酸雨。酸雨进入地表、江河，将破坏土壤，影响农作物生长，造成森林大面积死亡，破坏生态平衡。酸雨对建筑物的腐蚀作用也相当严重。氮氧化物也是破坏臭氧层的一个重要因素，因为臭氧易与氢、氮、氯等发生化学反应。

工业生产过程中产生的废气和汽车排出的废气中除了上述污染物外，还有含铅化合物，这是大城市中最大的污染源。这种污染物将引起人体的多种疾病。所以，节约和减少煤、石油等燃料的使用，对保护人类环境是非常必要的。

家庭作业与活动

1. 有可能制造出一种效率为 100% 的汽车吗？这种汽车能排出废气吗？它的发动机会发热吗？
2. 照射在每平方米地面上的太阳能的平均功率（昼夜平均值）是 200 W，平均每个家庭消耗的电功率为 1000 W。若每块光电池的面积为 0.5 m^2，转化效率为 20%，则每户家庭需多少块光电池，才能保证正常用电？
3. 在三种用得最多的不可再生能源中，我国哪一种储量最丰富？
4. 请你从节能的角度分析为什么新建的小区窗户要求安装双层玻璃。并请你从生活实际出发，提出一些节能措施。
5. 和同学交流一下：有没有办法降低我们的能量消费而不影响我们的生活质量？有没有办法让社会降低能量消费而同时提高我们的生活质量？

课题研究

1. 调查本地 1 kW·h 电、1 kg 煤和 1 L 汽油、1 m^3 天然气（或煤气）的价格。从投资成本、使用成本、设备折旧费、节能等方面对太阳能、燃气、电三种热水器进行分析比较，并写出分析研究报告。

2. 调查当地的能源结构与使用状况，假如要你向当地政府的有关部门提出一项能源可持续发展的建议，你打算提出哪些建议？这些建议的依据是什么？

4.x

第 4 章家庭作业与活动

1. 某同学身高 1.8 m，在学校运动会上参加跳高比赛，起跳后身体横着越过了高度 1.6m 的横杆。若不计阻力，你能根据机械能守恒定律估算出他起跳时竖直向上的速度大小吗？
2. 在图 4-29 所示的装置中，细线长 1m，小球的最大偏角为 30°。求小球运动到最低点时的速度（阻力忽略不计）。

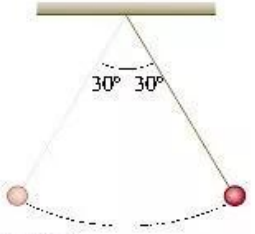


图 4-29

3. 图 4-30 所示的是大型露天游乐场中的过山车。把过山车从很高的轨道一侧的顶端释放，它就不断地加速向下运动，最后冲上轨道另一侧。你能用机械能守恒定律说明过山车为什么要从很高的轨道顶端释放吗？若环行轨道的半径为 R，你认为过山车至少要从多高的轨道顶端释放？

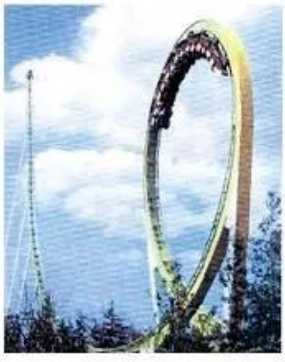


图 4-30

4. 图 4-31 是一种用单摆和打点计时器验证单摆在 $\frac{T}{2}$ 中的机械能守恒的实验装置。你能说出这个实验的原理吗？有条件的话，利用课外时间做一做。

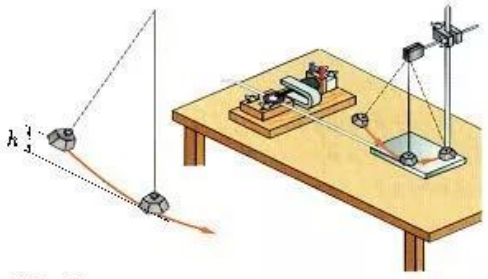


图 4-31

5. 图 4-32 中的图像记录了摆球的动能、势能随摆球位置而变化的关系。请你分析图像，说明图像证明了什么物理规律。

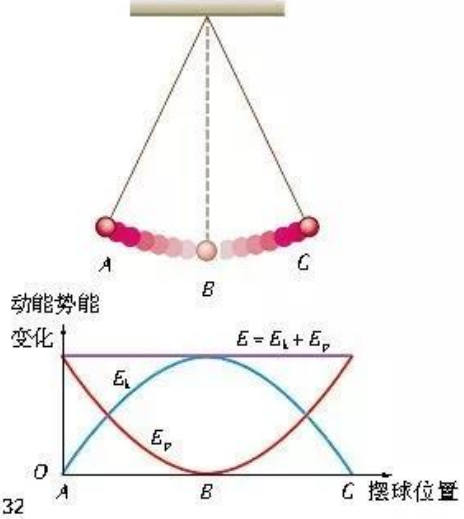


图 4-32

6. 下面说法是否正确？
   （1）功可以全部转化为热，但热不能全部转化为功。
   （2）热量能从高温物体传到低温物体，但不能从低温物体传到高温物体。
7. 请查找资料，调查历史上曾出现过哪些类型的"永动机"，它们失败的原因是违反了什么规律。
8. 请查询世界和我国的能源情况，或一次性化石能源对社会发展的正面效应和负面效应。要有典型的事例。

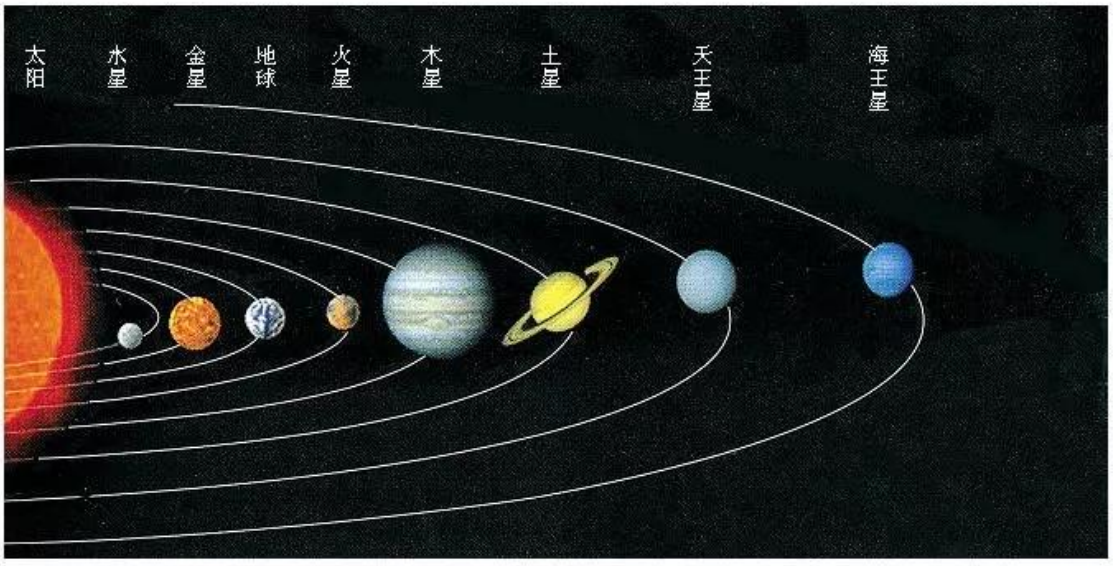


图 5-1　太阳系示意图

第 5 章
万有引力与航天

“坐地日行八万里，巡天遥看一千河。”浩瀚广袤的宇宙，常会引起人们无限的遐想。

天体的运动遵循着什么规律？天体为什么这样运动？天体和地面物体的运动有没有内在的联系？

“嫦娥奔月”的神话，寄托着人类飞天的梦想。人类要摆脱地球的羁绊去遨游太空，从力学的角度看，需要满足怎样的条件呢？

地球上的人类是怎样一步步地认识宇宙的呢？

本章先对托勒密模型、哥白尼模型和开普勒行星运动定律作一介绍，你将跨越千年时空，进行一次对宇宙结构认识的“三级跳”；接着展示牛顿发现万有引力定律的过程，你将认识到天体运动的奥秘；最后通过学习关于宇宙速度和航天方面的知识，你将重温人类向宇宙进军过程中那些激动人心的时刻，展望令人神往的未来。

5.1

从托勒密到开普勒

托勒密集古代天文学研究之大成

在古代，人们在观察日月的升落、星辰的移动时，就对天体模型作了各种想像。公元前400年，古希腊天文学家假定天空中有一些透明的球壳，天体镶在这些球壳上，球壳围绕着地球旋转，天体便跟着做圆周运动。

公元150年，天文学家托勒密秉承天体做匀速圆周运动的思想，构筑了宇宙"地心体系"的九重天模型(图5-2)。

托勒密把一系列不同的圆运动(他称之为轮)组合起来，并巧妙地选取了圆的大小、运动平面的交角和运动的速度，以此来描述行星的运动。他的这个模型能预报相当长时间内的行星位置、日食和月食的发生等，顺利地解释了许多天文现象，从而成为古代天文学的研究基础。为了解释天体的运动，托勒密的模型竟用了80多个轮子，重重叠叠，令人头晕目眩。由于托勒密的模型既符合人们坐地观天的习惯，又符合当时普遍接受的地球不动且处于宇宙中心的观念，因此被奉为"金科玉律"，一直传到15世纪。



托勒密 (C. Ptolemaeus，约90—168)，集古代天文学、地理学、数学研究之大成的古希腊学者。

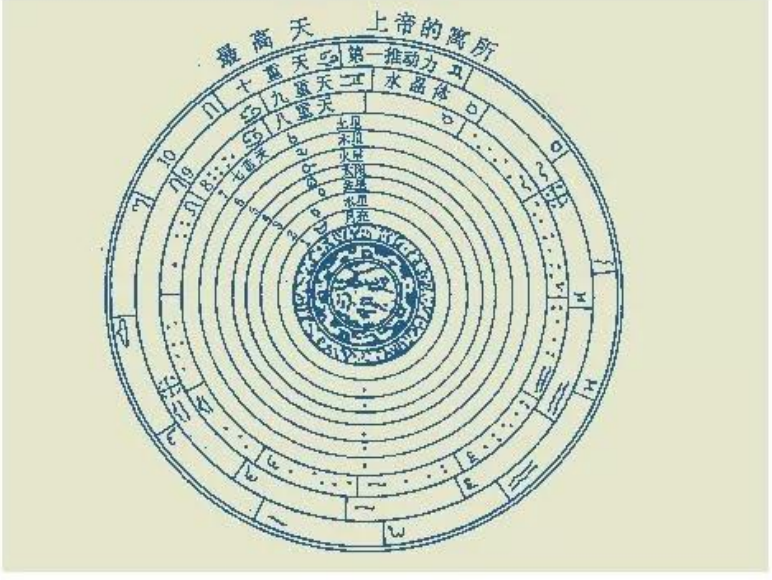


图5-2 托勒密的宇宙模型
托勒密认为，地球位于宇宙的中心，岿然不动，月亮、太阳及各个行星都围绕着地球在大小不同的球面上运动。他把每个球面称为一重天。全部恒星镶在第八重天上。在恒星之上，还有一重最高天，即"原动天"，那是神灵居住的地方



哥白尼 (N. Copernicus, 1473—1543)，波兰天文学家。哥白尼认为，托勒密的那些圆运动组合完全是人为的、随意的，他从古代一些哲学家假定“地球在运动”的见解中受到启发，从1506年起开始了对天体运动的新思考。

托勒密的地心体系在天文学研究方法上有一定的积极意义，例如，在“天球”球壳上对恒星进行定位的坐标系，至今仍在天文观测中应用。

哥白尼迎来了科学的春天

哥白尼经过长期的观察和反复的计算，逐渐形成了他的新宇宙观。他认为太阳是不动的，且位于宇宙中心，包括地球在内的所有行星都围绕太阳做匀速圆周运动。哥白尼倾注了几乎毕生的心血，写成了他的《天体运行论》。这部巨著完整地提出了日心体系说，即太阳系模型。

哥白尼根据观察到的资料，运用他的模型，不仅算出了每颗行星绕太阳运行的周期，而且在历史上第一次算出了每颗行星到太阳的距离，从而也第一次给出了宇宙大小的尺度。

请你考虑一下，对于天体运动的描述，托勒密以地球为参考系，哥白尼以太阳为参考系，从参考系的选择来说，是否都可以？哥白尼的太阳系模型的优越性在哪里？

哥白尼的学说不但引起了天文学上的一次革命，而且有力地推动了欧洲文艺复兴时代思想解放的浪潮。以这次天文学革命为先导，近代科学的春天来临了。恩格斯评价道：“以他的理论来向自然事物方面的教会权威挑战，从此自然科学便开始从神学中解放出来。”

法国科学方法论学者阿雷说：“科学的基本活动就是探究和制定模型。”哥白尼和托勒密都采用建立物理模型的方法研究天体的运动，这是本章中值得加以体会的一种重要的研究方法。

信息浏览

哥白尼的计算结果与现代公认值的比较

行星	绕太阳运行的周期		到太阳的距离(以日地距离为单位)	
	哥白尼值	现代值	哥白尼值	现代值
土星	29.5年	29.46年	9.2	9.54
木星	11.8年	11.86年	5.2	5.20
火星	687天	686.98天	1.52	1.52
地球	365天	365天	1.00	1.00
金星	224天	224.70天	0.72	0.72
水星	88天	87.9天	0.38	0.39

德国诗人歌德盛赞道：“哥白尼地动说撼动人类意识之深，自古无一种创见、无一种发明，可与之相比。”

开普勒提出行星运动三定律

哥白尼的学说虽然取得了很大的成功，却依然沿袭着古希腊天文学家的思想，被束缚在“匀速”、“正圆”的框架内。真正揭开行星运动奥秘的功绩，应当属于第谷和开普勒。

第谷通过自己设计制造的天象仪，凭肉眼观测记录星体的位置，准确度几乎到了人眼的极限。第谷临终前，把他一生中对750多颗星的观测记录留给了他的助手开普勒。

开普勒利用第谷对火星的丰富观测资料，根据哥白尼的行星沿圆轨道匀速运动的观点分析计算，前后经过70多次尝试，发现根据哥白尼理论计算的结果与观测资料之间存在着8弧分(0.133度)的微小误差。

开普勒坚信，第谷的观测是精确的，观测误差绝不会有这样大。为了解决这8弧分之差，开普勒决心直接根据第谷的观测结果，求出行星运动轨道的形状和大小。经过多次的尝试与大量的计算，他终于发现火星的轨道不是圆，而是椭圆。

开普勒经过多年的潜心研究，用第谷20余年来观测得到的几千个数据做了大量的复杂计算，在1609年和1618年先后提出了行星运动的三大定律。

第一定律(轨道定律) 所有行星围绕太阳运动的轨道都是椭圆，太阳处于所有椭圆的一个公共焦点上。

第二定律(面积定律) 对于每一颗行星而言，太阳和行星的连线在相等的时间内扫过相等的面积(图5-3)。

第三定律(周期定律) 所有行星轨道的半长轴的立方与公转周期的平方的比值都相等。用公式表示为

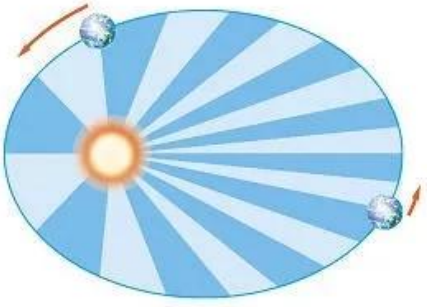


图5-3 太阳和行星的连线在相等的时间内扫过相等的面积



第谷 (B. Tycho, 1546—1601)，丹麦天文学家。著名的科家史家丹皮尔说道：“把行星运动的详细情况更精确地记录下来的第一位天文学家，要算是哥本哈根的第谷·布拉赫。”



开普勒 (J. Kepler,1571—1630)，德国天文学家，曾任第谷的助手，后接替了第谷的职位。少年时家境贫困，因病眼睛受到严重损伤，视力很差，不过他有一颗极聪明的头脑，这个头脑与第谷的眼睛相结合，写下了天文学史上最辉煌的篇章。

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

式中 k 是一个与行星无关、而与太阳有关的常量。

第谷与开普勒，一个重视客观实际，善于观察，一个富于理论思维，精通数学。第谷的眼睛与开普勒的头脑相结合，观测与理论的对证和交融，终于在天文学上结出了一颗璀璨的明珠。

开普勒关于行星运动的三条定律，同样适用于卫星绕行星的运动，只是比值 k 的大小有所不同。

作为近似处理，有时候可以把行星的椭圆轨道简化为圆形轨道。

信息浏览

八大行星的基本数据

行星名	半径/km	质量/地球质量	自转周期/s	公转周期/s	特 点
水星	2 440	0.0554	5.07×10^6	7.60×10^6	八大行星中运动最快的行星
金星	6 050	0.815	2.10×10^7	1.94×10^7	除太阳和月亮外，是全天候最亮的星，比天狼星还亮；自转方向与其他行星相反
地球	6 378	1.000	8.64×10^4	3.16×10^7	距太阳 1.5×10^8 km
火星	3 395	0.1075	8.86×10^4	5.94×10^7	一颗火红色的星球
木星	71 400	317.94	3.54×10^4	3.74×10^8	八大行星中最大的一颗；亮度仅次于金星
土星	60 000	95.18	3.68×10^4	9.30×10^8	八大行星中的第二颗大行星；卫星最多，共23颗
天王星	25 900	14.63	8.64×10^4	2.65×10^9	自转轴与公转轨道平面平行
海王星	24 750	17.22	7.92×10^4	5.20×10^9	距太阳 4.5×10^9 km

家庭作业与活动

1. 人类对天体运动研究的历史悠久，其中有许多脍炙人口的精彩故事，请去图书馆或上网收集有关资料，与同学们交流。
2. 在开普勒的成功中，你认为哪一处（或哪几处）对你的影响最深？
3. 我国的"风云"2 号卫星是地球同步卫星。因为它与地球自转同步，所以就像停在天空中不动一样。应用开普勒定律，根据月球绕地球运动的相关数据，请估算同步地球卫星离地面的高度。设月球和"风云"2 号卫星的轨道近似为圆轨道，已知月球的轨道半径约为地球半径的 60 倍，运行周期约为 27 天，地球半径为 6400 km。（计算时保留两位有效数字）

5.2

万有引力定律是怎样发现的

开普勒定律揭示了行星运动的规律，但是行星为什么沿着一定的轨道，绕着太阳作如此和谐而有规律的运动呢？是什么力量在支配着行星的运动呢？在开普勒的时代，这还是一个谜！

发现万有引力的过程

关于行星运动原因的猜想

不少科学家曾从不同的角度对这个谜作了许多猜想。例如，哥白尼提出日心说后不久，英国的吉尔伯特(W. Gilbert)根据他对磁体相互作用的研究，猜想行星是依靠太阳发出的磁力维持着绕日运动的。

开普勒在研究行星运动的过程中，意识到太阳有一种力支配着行星的运动。

1644年，法国数学家笛卡儿提出“旋涡”假设，认为空间充满着一种看不见的流质，形成许多大小、速度、密度不同的旋涡，从而带动行星转动。

1645年，法国天文学家布利奥(I. Boulliau)首先提出平方反比假设。认为每个行星受太阳发出的力支配，力的大小跟行星与太阳距离的平方成反比。

……

从17世纪中叶起，引力思想已逐渐被人们所接受，甚至有了引力与距离平方成反比的猜想。其中，英国物理学家胡克（R. Hooke）、雷恩(C. Wren)和哈雷(E. Halley)都对此做出了重要的贡献。

伽利略的研究表明，要使行星和卫星在轨道上运行，而不循直线向空间飞去，必定有一个原因。伽利略把这个原因看作是力，但这个力是否存在仍有待证明。

——丹皮尔

站在巨人肩上的牛顿

1665—1666年，据说牛顿(I. Newton)由苹果落地联想到：月球绕地球运动的向心力，是地球对月球的引力。此后，他进一步证实，不仅行星都被太阳吸引着，而且天体之间普遍地存在着相互

吸引的力。他进而提出，任何两个物体间都存在着相互吸引的力。

牛顿指出："我们必须普遍地承认，一切物体，不论是什么，都被赋予了相互的引力的原理……"

这是牛顿第一次提出"万有引力"这一概念。

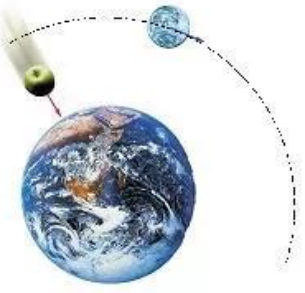


图 5-4　月亮和苹果都有加速度吗？为什么月亮不掉下来？

请讨论：

1. 有一个流传很广的美丽传说：牛顿看见苹果落地而发现万有引力定律。你相信这一传说吗？这个传说对你有什么启示？

2. 图 5-4 中的苹果受到地球的引力作用，产生加速度落向地面，月亮也会受到地球的引力作用，也产生加速度吗？为什么月亮没有掉到地球上？你能运用牛顿万有引力的概念和圆周运动的知识解释吗？

前进道路上的困难

牛顿之前或与牛顿同时代的科学家为什么不能把引力问题彻底解决呢？归根结蒂是他们无法逾越前进道路上的三大困难。

困难之一　行星沿椭圆轨道运动，速度的大小、方向不断发生变化，如何解决这种变化的曲线运动问题，当时还缺乏相应的数学工具。

困难之二　天体是一个庞然大物，如果认为物体间有引力，那么如何计算由天体各部分对行星产生的力的总效果呢？当时同样缺乏理论上的工具。

困难之三　如果天体间是互相吸引的，那么在众多天体共存的太阳系中，如何解决它们之间相互干扰这一复杂的问题呢？

这三大困难横亘在许多科学家面前，无情地阻挡着他们前进的脚步。

那么，牛顿是怎样解决这三大困难的呢？物体间的万有引力究竟遵循什么规律呢？

据科学史研究，德国数学家莱布尼茨在同一时期也发明了微积分。

牛顿利用他发明的微积分方法，越过了变速运动的障碍；他又运用模型方法，提出了质点的概念，并通过微积分运算的论证，把庞大天体的质量集中于球心，这样就能方便地计算出天体间引力的总效果。至于众多天体共存的"多体问题"，则是至今仍要用大型计算机才能解决的问题。牛顿大胆地撇开其他天体的作用不计，只考虑太阳对行星的作用——合理的简化使他能不受干扰地

直达问题的本质。

牛顿汲取了前辈科学家关于引力思想的精华，克服了前进道路上的三大困难。他大约从 1665 年到 1666 年进行了“月-地检验”，经过长期、艰巨的创造性工作，终于摘取了引力问题的桂冠。牛顿的成就遥遥领先于同时代人，但他谦逊地说：“如果我比别人看得远些，那是因为我站在巨人们的肩上。”

万有引力定律

牛顿于 1687 年正式发表了**万有引力定律** (law of universal gravitation)：

自然界中任何两个物体都是相互吸引的，引力的大小跟这两个物体的质量的乘积成正比，跟它们的距离的二次方成反比。

如果用 m_1、m_2 表示两个物体的质量，用 r 表示它们之间的距离，万有引力定律可用公式表示为

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

式中 G 是一个常量，叫做引力常量。当质量的单位用 kg，距离的单位用 m，力的单位用 N 时，$G = 6.67\times10^{-11}\ \mathrm{N\cdot m^2/kg^2}$。这表示两个质量 1 kg 的物体相距 1 m 时，它们之间相互吸引力的大小是 6.67×10^{-11} N。

你知道它们之间的万有引力有多大吗？

两个相距约 10 cm 的大苹果：约 2×10^{-10} N。

两位座位相邻的中学生：约 3×10^{-7} N。

氢原子中的质子与电子：约 4×10^{-47} N。

你手中拿的纯净水与你：约 7×10^{-9} N。

两辆相邻的大客车：约 2×10^{-3} N。

万有引力定律是自然界中的一条基本规律，不管是宏观天体还是微观粒子，也不论物体的化学成分、物理性状，更不论物体间是否存在着不同的介质，万有引力定律都适用。

万有引力定律堪称是物理世界中普遍规律的经典。它将天上和地上的引力统一了起来，它不但使过去一向由神学和迷信占统治地位的宇宙学得到了解放，而且可以从天体运动的规律出发，进行科学的计算，对天体的运动作出预言。

与天体相比，通常物体的质量都比较小，因此它们间的引力是极小的，难以察觉。天体的质量巨大，它们间的引力十分惊人。例如，太阳对地球的引力达到 3.56×10^{22} N，正是由于受到太阳的强大引力，地球及各行星才乖乖地绕太阳运动，无法脱身。

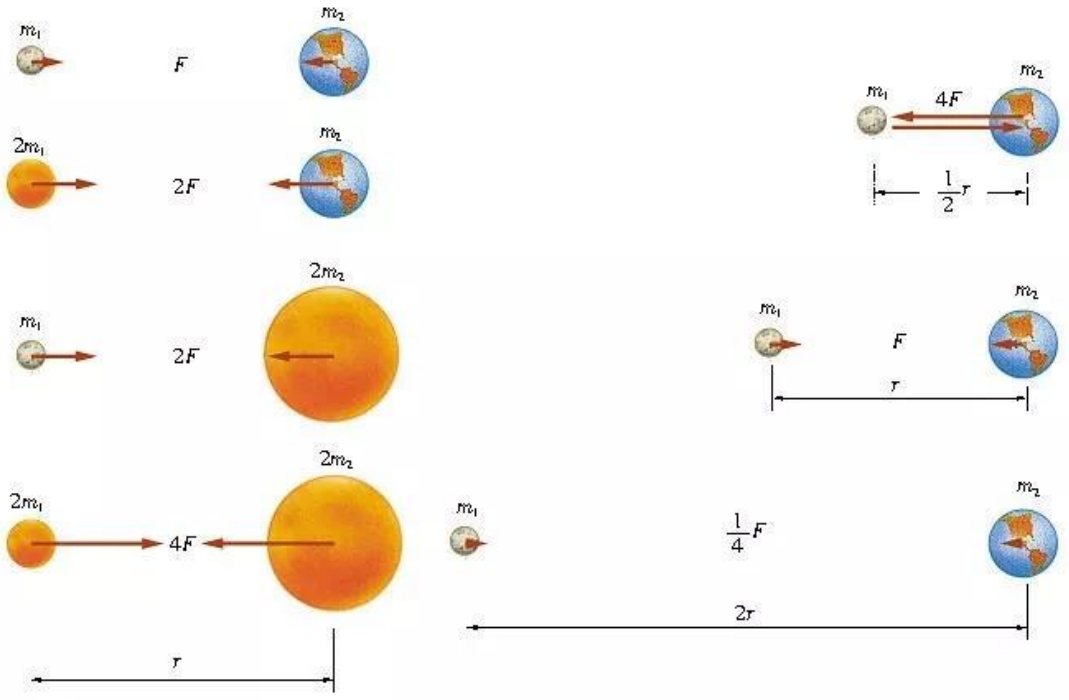


图 5-5　左图表示万有引力跟物体质量的关系，右图表示万有引力跟距离的关系

近代物理学家狄拉克(P. Dirac)曾形象地说："在地球上摘朵花，你就移动了最远的星球！"你能体会这句话的含义吗？

请讨论：

1. 既然地球吸引苹果，苹果也吸引地球，为什么我们只看到苹果落向地球，而没有看到地球向苹果运动呢？

2. 既然任何物体之间都有引力作用，为什么我们没有看到水平地面上的两个物体在引力作用下互相靠拢呢？

案例分析

案例　最近几十年，人们对探测火星十分感兴趣，先后曾发射过许多探测器。称为"火星探路者"的火星探测器曾于 1997 年登上火星。2004 年，又有"勇气"号和"机遇"号探测器登上火星。已知地球质量约是火星质量的 9.3 倍，地球直径约是火星直径的 1.9 倍。探测器在地球表面和火星表面所受引力的比值是多少？

解答　设探测器的质量为 m，根据万有引力定律，它在地面和火星表面分别受到地球和火星的引力为

$$F_{地}=G\frac{M_{地}m}{R_{地}^{2}} \text{ 和 } F_{火}=G\frac{M_{火}m}{R_{火}^{2}}$$

所以

$$\frac{F_{地}}{F_{火}}=\frac{M_{地}}{M_{火}}\left(\frac{R_{火}}{R_{地}}\right)^{2}=9.3\times\frac{1}{1.9^{2}}=2.6$$

即探测器在地球表面受到的引力是在火星表面所受引力的 2.6 倍。

请思考:

假如有一天你能到火星上去旅行,你会感到自己的体重发生什么变化?你在火星上走路或运动与在地球上有什么不同?

多学一点

现在让我们沿着牛顿的思路,用初等数学方法作一番探究。

(1) 首先把行星沿椭圆轨道的运动简化为匀速圆周运动,认为太阳对行星的引力提供行星绕太阳运动的向心力,即

$$F_{引}=m\omega^{2}r=m\frac{4\pi^{2}}{T^{2}}r$$

根据开普勒第三定律,$\frac{r^{3}}{T^{2}}=k$,代入上式后,得太阳对行星的引力

$$F_{引}=4\pi^{2}k\frac{m}{r^{2}}$$

式中 k 是跟中心天体(太阳)质量 M 有关的量。令 $4\pi^{2}k=GM$,得

$$F_{引}=G\frac{Mm}{r^{2}}$$

即太阳对行星的引力跟太阳质量和行星质量的乘积成正比,跟它们距离的平方成反比。

(2) 把引力公式推广。牛顿认为:行星与卫星之间的引力、地球作用于物体上的重力和太阳对行星的引力,都是同样性质的力。根据上述引力公式,对"月-地系统"和地面上的物体分别可得到

$$G\frac{M_{地}m_{月}}{r^{2}_{地月}}=m_{月}a_{月}$$

$$G\frac{M_{地}m_{物}}{r_{地}^2}=m_{物}a_{物}=m_{物}g$$

两式相比，得月球绕地球运动的向心加速度

$$a_{月}=\left(\frac{r_{地}}{r_{地月}}\right)^2 g$$

因为地球和月球之间的距离$r_{地月}$约为地球半径$r_{地}$的60倍，因此

$$a_{月}=\left(\frac{1}{60}\right)^2 g$$

$$=\frac{1}{3600}\times 9.8\ \mathrm{m/s^2}$$

$$=2.7\times 10^{-3}\ \mathrm{m/s^2}$$

(3) 用观测的结果加以对照。根据天文观测，月球绕地球运动的周期$T=27.3$天，地球与月球间距离$r_{地月}=3.85\times 10^8$ m，因此从运动学公式可直接得到月球运动的向心加速度

$$a'_{月}=\frac{4\pi^2}{T^2}r_{地月}$$

$$=\frac{4\pi^2}{(27.3\times 86400)^2}\times 3.85\times 10^8\ \mathrm{m/s^2}$$

$$=2.7\times 10^{-3}\ \mathrm{m/s^2}$$

两者结果完全相符，这表明我们的引力公式是可靠的。

这个结果是牛顿于1666年在家乡避瘟疫时完成的。当时牛顿所知的地球半径数据不精确（我们这里改用了精确的数值），而且牛顿仅得出了圆轨道的引力与半径的平方成反比的关系，对椭圆轨道的情况是否有同样的关系，以及能否把地球质量集中于球心，也尚未严格证明，因此牛顿并未发表他的结果。

信息浏览

卡文迪许实验

在牛顿发现万有引力定律100年后，英国物理学家卡文迪许(H. Cavendish)于1789年巧妙地利用扭秤测出了引力常量。

卡文迪许的实验装置如图5-6所示。

在一根金属丝下倒挂着一个T形架，架的水平横梁两端各装一个质量为m的小球，T形架的竖直部分装有一面小平面镜，两个小球由于受到质量均为M的两个大球的吸引而转动，使金属丝发生扭转。当吸引力的力矩跟金属丝的扭转力矩平衡时，T形架停止不动。根据平面镜反射的光点在标尺上移动的距离可算出金属丝的扭转角度，结合事先测定的金属丝扭转角度跟扭转力矩的关系，就可以算出扭转力矩，从而算出引力F和引力常量。卡文迪许测定的引力常量$G=$

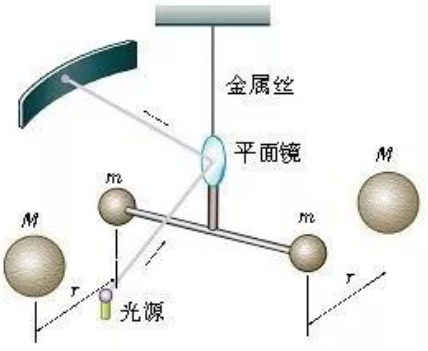


图5-6 卡文迪许扭秤

$6.754\times10^{-11}\ N\cdot m^2/kg^2$。在以后的八九十年间，竟无人超过他的测量精度。

引力常量的测定是验证万有引力定律的一个重要实验，它使万有引力定律有了真正的实用价值。

卡文迪许把他的这个实验说成是"称地球的重量"(应该是"称地球的质量")。有了 G 值后，我们还可以"称"出太阳或其他星球的质量。

家庭作业与活动

1. 请你简单表述一下牛顿是怎样得出万有引力定律的。
2. 两个质量为50 kg的同学，当他们相距1 m时，他们之间的万有引力有多大？通过计算你可以知道，平常分析物体受力时，为什么可以不考虑万有引力。
3. 已知太阳质量 $M=1.97\times10^{30}$ kg，地球质量 $m=5.98\times10^{24}$ kg，太阳和地球间的平均距离 $r=1.49\times10^{11}$ m，则太阳和地球间的万有引力有多大？已知拉断截面积 $S_0=1\ cm^2$ 的钢棒需施力 $F_0=6.68\times10^4$ N，那么太阳吸引地球的力可以拉断截面积多大的钢棒？
4. 目前普遍认为，质子、中子都不是点粒子，它们也是有内部结构的。例如，一个质子由两个 u 夸克和一个 d 夸克组成。已知一个夸克的质量为 7.1×10^{-30} kg，那么当两个夸克相距 1.0×10^{-16} m 时，它们之间的万有引力为多大？
5. 根据案例中的数据计算一下：当"火星探路者"距火星表面 100 m 高时自由下落一个物体，那么此物体经过多少时间落到火星表面？着陆时的速度有多大？

5.3

万有引力定律与天文学的新发现

牛顿发现的万有引力定律，开始只是一个假设，也是在其后一百多年间，由于不断被科学实验所证实，才逐渐得到普遍承认。

笔尖下发现的行星



勒维烈（U. J. Le Verrier, 1811—1877），法国天文学家。

在发现万有引力之前，人们完全依靠光学望远镜的直接观察，才能确定茫茫太空中天体的位置，发现新的行星。

1781 年发现天王星后，许多国家的天文学家都对它进行不断地观察。结果发现，根据不同观察时间的资料算出来的天王星轨道各不相同，根本无法根据以前的观察资料预报天王星未来的位置。天王星的“出轨”现象，引起了许多天文学家的思考：

是星表有错？

是牛顿力学的理论有误？

还是有另外的未知行星在干扰？

……



亚当斯（J. Adams, 1819—1892），英国天文学家。

天王星的“出轨”现象，也激发了法国青年天文学家勒维烈和英国剑桥大学学生亚当斯的浓厚兴趣。勒维烈经常到巴黎天文台去查阅天王星的观察资料，并把这些资料跟自己理论计算的结果进行对比。亚当斯也不断到剑桥大学天文台去，他还得到一份英国皇家格林尼治天文台的资料，这使他的理论计算能及时跟观察资料比较。他们两人根据自己的计算结果，各自独立地得出结论：在天王星的附近，还有一颗新的行星！

1845 年 9 月，亚当斯把研究结果请剑桥大学天文系转给皇家天文台台长，可是，这并没有引起这位尊贵的台长的重视，被搁置了起来。直到 1846 年 7 月 29 日，皇家天文台才开始根据亚当斯的研究结果搜寻新的行星。但在搜寻过程中，又两次把这颗新星当做恒星轻易放过了。

1846 年 8 月 31 日，勒维烈也把自己最后的研究结果送到法国科学院，后转到德国柏林天文台。9 月 18 日，他写信给德国天文

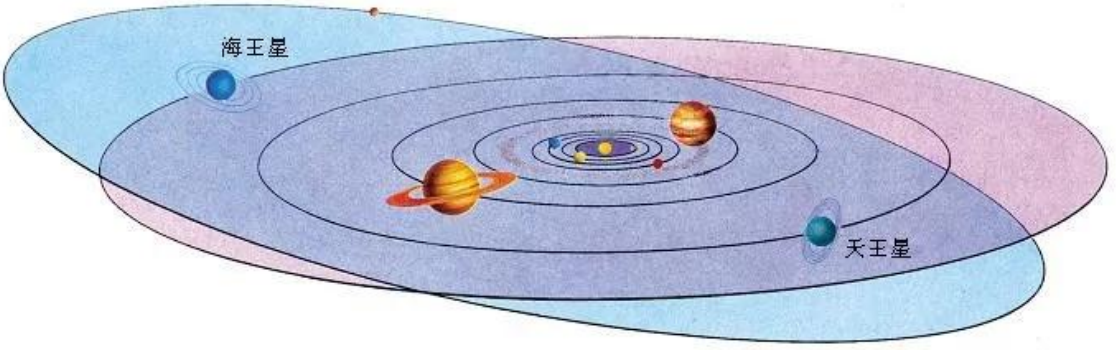


图 5-7 天王星和海王星轨道

学家伽勒,请他注意观察新的行星。9 月 23 日,即伽勒收到信的当天晚上,在勒维烈所指出的那个位置上,果然发现了原有星图上没有的一颗行星,这就是后来被称为海王星的太阳系第八颗行星!

两位年轻人,居然事先不向天空看一眼,凭借着万有引力定律,通过计算,在笔尖下发现了新的天体,这充分显示了科学理论的威力。海王星的发现,在天文学史上是一件惊天动地的大事。那么,究竟谁是发现者呢?历史是公正的,人们认为,亚当斯和勒维烈,他们两位都是海王星的发现者。

勒维烈给伽勒的信中说:"请你把你们的望远镜指向黄经 326°处宝瓶座内的黄道的一点上,你就将在此点约 1°的区域内发现一个圆而亮的新行星……"

恩格斯对海王星的发现评价道:哥白尼的太阳系学说有三百年之久,一直是一种假设。这个假设尽管有百分之九十九、百分之九十九点九、百分之九十九点九九的可靠性,但毕竟是一种假设。而当勒维烈从这个太阳系学说所提供的数据,不仅仅推算出一定还存在一个尚未知道的行星,而且还推算出这个行星在太空中的位置的时候,当后来伽勒确实发现了这个行星的时候,哥白尼的学说就被证实了。

哈雷彗星的预报

1682年,天空出现了一颗大彗星。英国天文学家哈雷(E. Halley)发现它的轨道跟 1531 年、1607 年出现的大彗星的轨道基本重合,他大胆断言,这三次出现的彗星是同一颗星,并根据万有引力定律计算出这颗彗星的椭圆轨道,发现它的周期约为 76 年。

这颗彗星能否按哈雷的计算在 76 年后回归,这又一次成为对牛顿万有引力定律的严峻考验。

1759年 3 月 13 日——与预算日期仅差 1 个月,这颗大彗星果然不负众望,光耀夺目地通过近日点。5 月 15 日,它终于向世人展现了它那长长的美丽的彗尾。

这是人类确认的第一颗周期性彗星,它的回归成为当时破天荒的奇观。人们难以想象,神出鬼没的彗星居然也有稳定的轨道,而且还能被准确地预测。这颗大彗星后来被称为哈雷彗星。它最近的一次回归是 1985 年,下一次回归应该是 2061 年,同学们一



图 5-8　哈雷彗星



图 5-9　西汉古墓出土的帛书中所记载的彗星图像
此图像对彗星的描述画面生动，弥足珍贵。在世界各文明古国的历史典籍中，都有关于彗星的记载，我国在这方面的记载尤为丰富

定有幸目睹它的迷人风采。

案例　把天体的质量“称”出来

在牛顿之前，如果有人提出“称天体的质量”，一定被认为是天方夜谭。而现在，根据万有引力定律，结合圆周运动的知识，就可以估算出天体的质量。

案例　地球绕太阳的公转周期 $T = 365$ 天 $\approx 3.15 \times 10^7$ s，平均轨道半径 $r = 1.50 \times 10^{11}$ m。太阳的质量多大？

分析　如图 5-10 所示，设质量为 m 的行星（或卫星）绕某天体做匀速圆周运动，轨道半径为 r。

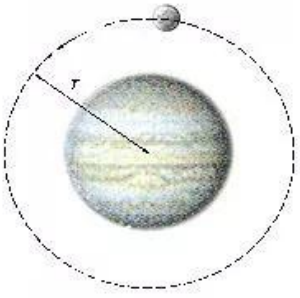


图 5-10　行星绕天体做匀速圆周运动

由于中心天体对行星（或卫星）的万有引力提供了行星做圆周运动的向心力，所以有

$$G\frac{Mm}{r^2} = m\frac{4\pi^2 r}{T^2}$$

即

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

由上式可知，只需测出行星（或卫星）绕某天体运动的周期 T 和轨道半径 r，查出引力常量 G，就可以算出该天体的质量了。

解答　设太阳的质量为 M，则可得

$$M = \frac{4\times3.14^2\times(1.50\times10^{11})^3}{6.67\times10^{-11}\times(3.15\times10^7)^2}\ \text{kg} \approx 2\times10^{30}\ \text{kg}$$

请讨论:

1. 如果要估算出地球或太阳的平均密度,应该知道哪些条件?

2. 假如要你"称"出我们生活的地球的质量,你能否通过查阅我国发射的某一颗人造卫星或飞船的有关数据,推算出地球的质量?

多学一点 破解重力变化之谜

万有引力跟我们生活的关系也十分密切。地球附近的任何物体都会受到地球的吸引力:人们能安全地行走,房屋、桥梁能牢固地矗立在地面上,大气不会逃逸……这一切都归功于引力的作用。不过,引力有时也会跟人"开玩笑"。被津津乐道的故事——挪威人贩鱼到赤道附近时鱼儿变轻,就是因为引力在"作祟"。

现在,我们根据万有引力定律,结合圆周运动的知识,就可以对同一物体的重力随位置发生变化作出正确的解释。

假设地球是一个半径为 R 的密度均匀的球体,其质量为 M。地面上纬度为 θ 处有一个质量为 m 的物体,它受到地球的引力大小为

$$F = G\frac{Mm}{R^2}$$

这个力的方向沿半径指向球心,如图 5-11 所示。

地面上的一切物体,一方面紧压地面(或紧拉悬绳),另一方面也随着地球一起自转,需要一个向心力,物体所受的引力 F 就承担着这双重的任务。因此,可以把引力 F 分解成 F_1、F_2 两个分量。其中:

分力 $F_1 = mg$,等效于平常说的重力,它的方向即常说的竖直向下。

分力 $F_2 = m\omega^2 R\cos\theta$,是物体随地球自转所需的向心力,它的方向指向地轴。

当物体从两极移向赤道时,随着纬度 θ 的减小,分力 F_2 增大,分力 F_1 减小,这就是物体从两极移向赤道时重力减小的主要原因。

此外,由于地球呈椭球状,其极半径比赤道半径小,物体在两极时受到地球的引力比在赤道时大,这也会造成物体从两极移向赤道时重力变小。

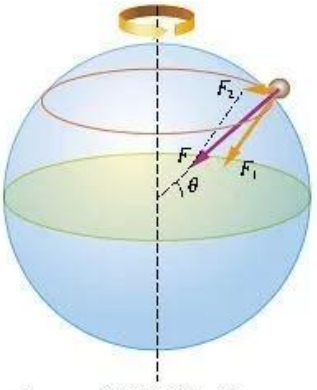


图 5-11 重力随纬度变化

信息浏览

地球形状的预测

"许多自然科学的理论之所以被称为真理，不但在于自然科学家们创立这些学说的时候，而且在于为尔后的科学实验所证实的时候。"

对万有引力定律重要的实验验证之一，是关于地球形状的预测。

16世纪初，航海家麦哲伦(F. Magellan)率船队环球航行，历时三年终于成功，这足以证明地球为一球体。那么，地球是不是一个半径处处相同的标准球体呢？在无法从地球之外观察地球全貌，也无法在地面上进行实际测量的情况下，只能借助某些现象作一些预测。

牛顿通过用万有引力定律的理论计算，大胆预言：由于地球的自转，赤道部分的物质应向外隆起，使地球成为两极稍扁的扁球体，犹如一个橘子。



图5-12 人类美丽的家园

笛卡儿根据涡旋假设作出预言，地球应是两极伸长的扁球体，犹如一个柠檬。

这场"橘子与柠檬"之争持续了几十年，直到1735年，法国科学院派出两个测量队，分赴赤道地区和高纬度地区测量后，才一锤定音。牛顿胜利了，万有引力定律也胜利地经受了考验。

家庭作业与活动

1. 一艘宇宙飞船沿着围绕未知天体的圆形轨道飞行，航天员只用一块秒表，能测量出的物理量是
   A. 飞船的线速度　　B. 飞船的角速度
   C. 未知天体的质量　　D. 未知天体的密度
2. 已知引力常量，下列条件中能算出地球质量的是
   A. 已知地球绕太阳运动的轨道半径和地球表面的重力加速度
   B. 已知近地卫星的周期和它的向心加速度
   C. 已知卫星轨道半径和运动周期
   D. 已知卫星质量和它离地面的高度
3. 一位航天员来到一颗未知星球上，资料给出该星球的半径为R，请设计一个实验，利用秒表和刻度尺估算出该星球的质量(引力常量G已知)。
4. 地球质量$M=5.98\times10^{24}$ kg，极半径$R_{极}=6357$ km，赤道半径$R_{赤}=6378$ km。质量为1 kg的物体在两极和赤道时的重力分别为多少？(取$G=6.67\times10^{-11}\ \mathrm{N\cdot m^2/kg^2}$)
5. 从牛顿发表万有引力定律(1687年)到海王星的发现(1846年)，历时一个半世纪。你对科学定律的确立过程及其对人类探索未知世界的价值有何认识？





图 5-13 “神舟”5 号与中国第一位航天员杨利伟

5.4

飞出地球去

万有引力定律的发现，不仅解决了天上行星的运行问题，也为人们开辟了上天的理论之路。

现代火箭航天技术先驱、俄国科学家齐奥尔科夫斯基曾说过：“地球是人类的摇篮，人类绝不会永远躺在这个摇篮里，而会不断地探索新的天体和空间。”1957 年 10 月 4 日，苏联用三级火箭发射了世界上第一颗人造地球卫星——“旅行者”1 号，人类开始迈入航天时代。

2003 年 10 月 15 日，“神舟”5 号飞船载着中国第一位航天员杨利伟成功升空，标志着我国进入了载人航天时代。

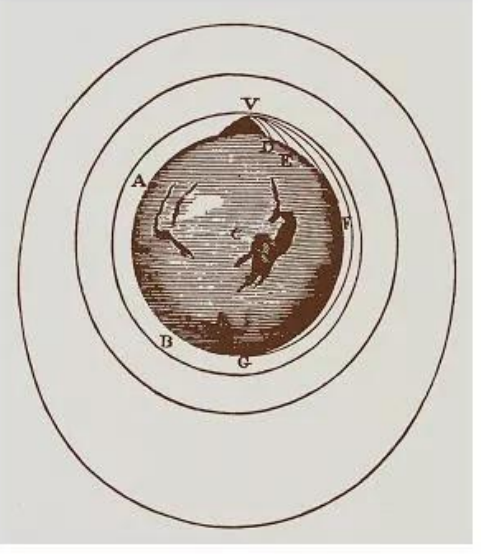


图 5-14 牛顿的预言

牛顿提出一个著名的思想实验：从高山顶水平抛出一个铅球，当抛出速度足够大时，铅球将环绕地球运动，成为一个“小月亮”

三个宇宙速度

第一宇宙速度

卫星要具有多大的速度，才能环绕地球运动呢？

分析论证

人造卫星就像一个小月亮，能在一定的轨道上绕地球运动。为简化起见，假设卫星绕地球做匀速圆周运动，地球对卫星的万有引力提供卫星做匀速圆周运动所需的向心力。

设地球和卫星的质量分别为 M 和 m，卫星的轨道半径为 r（图 5-15），则由

$$G\frac{Mm}{r^2}=m\frac{v^2}{r}$$

得卫星的运动速度

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

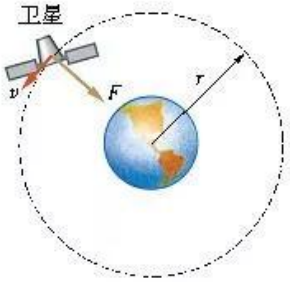


图 5-15　人造卫星绕地球做匀速圆周运动

上式表明，人造卫星绕地球做圆周运动的速度与轨道半径有关，半径越大，速度越小。

对于在地面附近飞行的卫星，轨道半径可取地球半径。

请算出卫星在这种情况下的速度。

你算的结果是 7.9 km/s 吗？这是人造地球卫星在地面附近做匀速圆周运动的速度，叫做**第一宇宙速度**（first cosmic velocity），又叫地面附近的**环绕速度**。

你能否算出在地表附近运动的人造卫星的周期？如果在地面上空不同高度处有两颗人造地球卫星，它们的运动速度跟周期的关系怎样？



图 5-16　“长征”2F 型火箭在西昌发射中心腾空而起

案例分析

案例　一颗卫星在离地面高度等于地球半径的轨道上运转，计算其环绕速度和周期。

分析　地球对卫星的万有引力是卫星绕地球运转的向心力。按题意，卫星运转的轨道半径 r 是地球半径 R 的 2 倍，$r=2R$。由

此可算出速度和周期。

解答 $F_{万}=C\dfrac{mM}{r^2}$，$F_{向心}=m\dfrac{v^2}{r}$

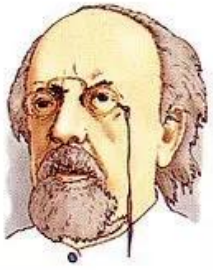
$$m\frac{v^2}{r}=C\frac{mM}{r^2}$$

$$v=\sqrt{\frac{CM}{r}}=\sqrt{\frac{6.67\times10^{-11}\times5.98\times10^{24}}{2\times6.37\times10^{6}}}\ \text{m/s}$$

$$=5.59\times10^{3}\ \text{m/s}$$

$$T=\frac{2\pi r}{v}=\frac{4\pi R}{v}=\frac{4\times3.14\times6.37\times10^{6}}{5.59\times10^{3}}\ \text{s}$$

$$=1.43\times10^{4}\ \text{s}$$



齐奥尔科夫斯基（К.Э. Циолковский，1857—1935），俄国科学家，现代火箭航天技术的先驱。他提出的多级火箭理论（齐奥尔科夫斯基公式）是航天技术的基础理论之一。

第二宇宙速度——飞出地球去

地球引力像一根强大而无形的绳子，牵引着人造卫星和月亮围绕地球转动。卫星具有了第一宇宙速度，可以围绕地球运动，但还不能脱离地球引力的束缚，还不能飞出地球去拜访别的星球。如果要挣脱地球引力的束缚，实现真正意义上的星际航行，还必须提高速度。

理论研究指出，如果航天器进入地面附近的轨道速度大于7.9 km/s，小于11.2 km/s，它的轨道就不再是个圆，而是个椭圆。速度越大，这个椭圆形的轨道就越“扁”（长轴越长）。当航天器的速度达到11.2 km/s时，就能脱离地球引力的束缚，成为跟地球“平等”地绕太阳运动的“人造行星”（图5-17）。航天器脱离地球的这个速度（11.2 km/s），叫做**第二宇宙速度**（second cosmic velocity），又叫脱离速度。

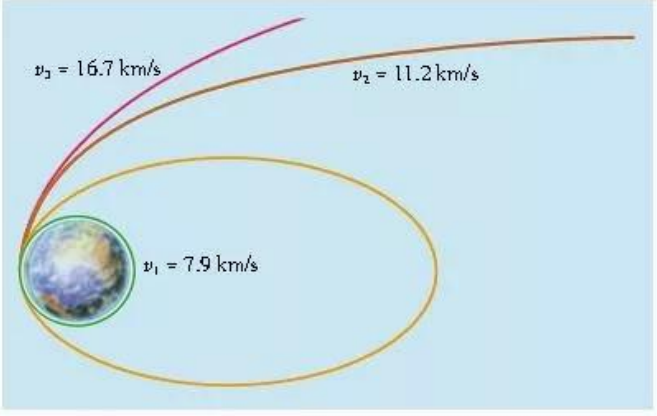


图5-17 三个宇宙速度示意图



图 5-18　人类第一次登上月球



图 5-19　月球上的第一个人类脚印

第三宇宙速度——飞出太阳系

如果航天器的速度继续增加，增加到等于或大于 16.7 km/s 时，就能脱离太阳引力的束缚，进入茫茫太空的深处。航天器脱离太阳引力的速度（16.7 km/s）叫做**第三宇宙速度**(third cosmic velocity)，又叫地面附近的**逃逸速度**。

人类为了获得探索宇宙所需要的速度，经历了长期的研究与探索。我们知道，目前最快的超音速飞机的速度也只在 1 km/s 左右，而发射人造卫星和航天飞船需要的速度远大于此。如何才能获得这么大的速度呢？俄国科学家齐奥尔科夫斯基在 1903 年证明，要脱离地球的引力，必须采用多级火箭。第一级火箭燃料用完后即自动脱落，下一级火箭接着点燃……这种方法叫做多级火箭技术，通常多用三级火箭发射卫星和飞船。目前世界上发射卫星和飞船的著名火箭有美国的“大力神”号火箭、俄罗斯的“质子”号

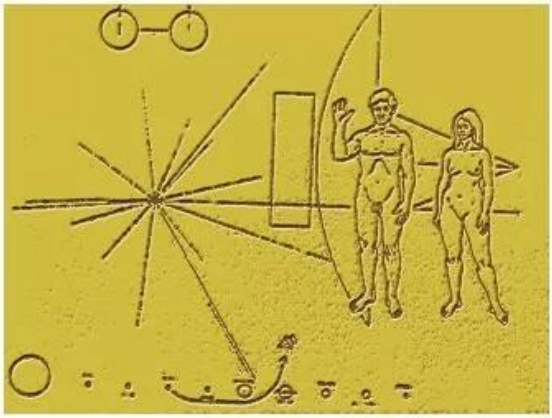


图 5-20　“先驱者”号携带的地球人“名片”



图 5-21 “旅行者”号携带的镀金唱片



图 5-22 镀金唱片上的一幅照片——中国人的家宴

火箭和“能源”号火箭、欧洲宇航局的“阿里安娜”火箭、中国的“长征”系列火箭等。图 5-16 是中国的“长征”2F 型火箭升空时的雄姿。

为了和平与进步

人类在探索宇宙的道路上经历了艰难的跋涉，已取得了巨大的成就。

1957 年 10 月 4 日，前苏联发射了第一颗人造地球卫星；1961 年 4 月 12 日，前苏联将世界上第一位航天员加加林送入太空。

1969 年 7 月 16 日，美国发射了载人登月飞船“阿波罗”11 号。经过约 75 小时的长途跋涉，1969 年 7 月 20 日，美国航天员阿姆斯特朗终于踏上了月面。他面对沉睡已久的月球，深情地说：“对一个人来说，这只不过是小小的一步，可对全人类来说，这却是一次巨大的飞跃。”他在月球上插了一块金属纪念牌，上面镌刻着一行大字：“公元 1969 年 7 月，来自行星地球上的人首次登上月球。我们是全人类的代表，我们为和平而来。”

1976 年 7 月和 9 月，美国的“海盗”1 号和“海盗”2 号在火星先后成功地软着陆。

1977 年 7 月 4 日，美国“火星探路者”在火星着陆，一辆六轮遥控车对火星进行了较大范围的移动考察。

1972 年和 1973 年，“先驱者”10 号、11 号“兄弟俩”，肩负着人类的重托，各带着一张地球人的“名片”(一块镀金铝质金属牌)飞向太空。这张“名片”上反映着太阳系的主要组成、地球人及“先驱者”号来自何处等信息，还用哑铃状图案表示了宇宙中最丰富的元素——氢的分子结构。它们先在太阳系内拜访了木星，然后绕过海王星，离开太阳系，进入茫茫太空，去寻找人类的知音。



图 5-23　在火星上着陆的“勇气”号探测器(模拟图像)



图 5-24　“勇气”号发回的火星表面照片

1997 年 8 月和 9 月,又有一对“孪生兄弟”——“旅行者”1 号和 2 号先后出发,再次对太阳系进行考察。这次它们携带的“名片”是一张直径约为 30 cm 的镀金铜制唱片,唱片灌满了“地球之音”。它向太空人宣告:“这是一个来自遥远的小小星球的礼物,它代表了我们的声音、科学、形象、音乐、思想和感情。我们正在努力,相信将来有朝一日,将会解决面临的问题,参加到银河系的文明大家庭中。这张唱片代表了我们的希望、决心和对遥远世界的良好祝愿!”这张唱片可自动放音 120 min,其中有地球上 35 种自然界的声响(如雨点声、风声等)、27 种世界名曲的片段(包括中国的古典乐曲——《高山流水》)、60 种不同民族的问候声(包括汉语“祝你们大家好!”)。它还采用编码形式介绍了地球的山川海空、草木花卉、飞禽走兽、人体、DNA、太阳系的情况以及人类在地球上的生活。

2004 年 1 月 4 日和 1 月 25 日,“勇气”号和“机遇”号火星探测器先后在火星上成功着陆(图 5-23),并发回了火星表面的高清晰度照片(图 5-24)。

中华民族是最早产生飞天梦想的伟大民族。从“嫦娥奔月”的动人传说到敦煌飞天的美丽壁画,从明代的万户飞天到如今的“神舟”号飞船,中华民族探索太空的脚步从来就没有停止过。1970 年 4 月 24 日,我国的第一颗人造地球卫星——“东方红”1 号上天了,嘹亮的“东方红”乐曲响彻太空,中国人也有了自己的



图 5-25 中国航天员杨利伟在飞船内

美国著名太空学者迪安认为："神舟"5号对于中国科技发展的影响堪比"阿波罗计划"对美国科技进步作出的贡献。迪安说："美国人必须清醒地意识到，我们在太空面对的将不仅仅是白蓝红旗帜(做国国旗)，一条红色的巨龙正在太空轨道上升起。"

卫星。接着，我国相继研制和发射了科学实验卫星、返回式卫星、通信卫星、气象卫星等一系列卫星。

我国还用自己研制的火箭发射了美国的"铱星"双星，发射了"澳星"，都获得了完满的成功。

1992年，党中央做出决策，铺开了中国载人进军太空的宏伟蓝图，载人航天工程(921 工程)正式上马。"漫漫十年磨一剑"，攻克了无数的难关，在四次无人飞船试验的基础上，中国人终于梦圆飞天！

2003 年 10 月 15 日 9 时整，"神舟"5 号飞船载着中国第一位航天员杨利伟成功升空，在太空遨游了 21 个多小时，绕地球飞行 14 圈，于 2003 年 10 月 16 日 6 时 23 分在内蒙古安全着陆。

我国国家航天局还宣布，我国已正式启动探月计划，并将其命名为"嫦娥工程"。这标志着我国对宇宙的探索又迈开了新的征程。

请讨论：

1. 人类为什么要发射人造卫星？为什么要探测月球、火星或其他星球？

2. 你知道我国在航天领域取得了哪些成就？你为哪些成就感到自豪？

3. 你在探索宇宙方面有哪些希望与幻想？

家庭作业与活动

1. 关于相对于地面静止不动的同步卫星，下列说法中正确的是
   A. 它一定在赤道上空
   B. 同步卫星的高度和速率是确定的值
   C. 它运行的线速度一定小于第一宇宙速度
   D. 它运行的线速度一定介于第一宇宙速度和第二宇宙速度之间
2. 设人造地球卫星绕地球做匀速圆周运动，卫星离地面越远，则卫星的
   A. 速度越大　　B. 角速度越大
   C. 向心加速度越大　　D. 周期越长
3. 我国已建成了酒泉、太原、西昌等航天城，如果还要建立一个航天城，从发射卫星时尽可能节约火箭燃料的角度，下列城市中你认为最合适的是
   A. 三亚　　B. 福州
   C. 哈尔滨　　D. 大连
4. 已知地球半径为 R，自转角速度为 ω，地球表面的重力加速度为 g，在赤道上空一颗相对地球静止的同步卫星离开地面的高度是_____（用以上三个量表示）。
5. 1990 年 3 月，紫金山天文台将 1965 年 9 月 20 日发现的第 2752 号小行星命名为“吴健雄星”，其直径为 32 km。如果该小行星的密度和地球密度相同，则该小行星的第一宇宙速度是多少？已知地球半径 $R = 6400$ km，取地球第一宇宙速度 $v_1 = 8$ km/s。

课外活动

你对航天事业感兴趣吗？请收集有关资料，写一篇科学报告，参考题材如下（自己可另选题）：

(1) 我国的人造地球卫星；
(2) 世界航天事业近 10 年来的新进展；
(3) 宇航员的生活；
(4) 关于地外文明的畅想。

课题研究

为“神舟”飞船设计一项搭载实验

在“神舟”5 号飞船或航天飞机内，都搭载了不少利用微重力环境的科学实验项目，其中有些是中学生设计的，如在“哥伦比亚”号航天飞机内就搭载有我国中学生设计的“微重力下蚕的生长发育的实验”。你想在飞船内搭载实验吗？请在老师的指导下，与同学合作，设计一项搭载实验。全班可举行一次活动，评选出优秀的实验方案。

5.x

第 5 章家庭作业与活动

1. 木星到太阳的距离约等于地球到太阳距离的 5.2 倍，已知地球在轨道上的公转速度为 30 km/s，则木星在轨道上的速度等于 _____km/s。
2. "神舟"5 号飞船的成功升空标志着我国进入了载人航天时代。"神舟"5 号飞船绕地球飞行时可以视为做匀速圆周运动，则飞船运行速度 v 的大小是
   A. $v<7.9$ km/s
   B. $v=7.9$ km/s
   C. 7.9 km/s $<v<$ 11.2 km/s
   D. $v=11.2$ km/s
3. 设在卡文迪许扭秤实验中，小球质量 $m=0.01$ kg，大球质量 $m'=0.5$ kg，两球球心间距为 0.05 m，不计其他物体对小球的引力，则两小球间的引力及由此引力产生的加速度有多大？
4. 已知地球半径 $R=6370$ km，试计算：当物体从地面升高到 $h=1$ km 的高空时，重力的变化为地面时的倍数。
5. 用 m 表示地球通信卫星（同步卫星）的质量，h 表示它离地面的高度，R_0 表示地球的半径，g_0 表示地球表面的重力加速度，ω_0 表示地球自转的角速度，则通信卫星所受到的地球对它的万有引力的大小是多少？
6. 请查阅资料，写一篇关于人造卫星分类、运行轨道和主要性能用途的小论文，并与同学交流。
7. 发射地球同步卫星时不是一次把卫星送到最后的轨道上。发射时，先将卫星发射至近地圆轨道 1，然后点火使其在轨道 2 上沿椭圆轨道运行。最后再次点火将卫星送入同步圆轨道 3。轨道 1、2 相切于 Q 点，轨道 2、3 相切于 P 点，如图 5-26 所示。比较卫星分别在三个轨道上正常运行时，下列物理量的关系正确的是
   A. 卫星在轨道 3 上的速率大于在轨道 1 上的速率
   B. 卫星在轨道 3 上的角速度小于在轨道 1 上的角速度
   C. 在轨道 2 上运行的卫星与在轨道 3 上运行的卫星，到 P 点时加速度是相等的
   D. 卫星在轨道 1 上运行时，与它在轨道 2 上经过 Q 点时的速度大小相等

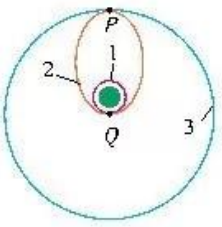


图 5-26

8. 你知道我国人造卫星（包含飞船）的研制发展情况吗？请从网上收集信息（包括精美的图片等），整理后与同学交流，并供物理老师参考。
9. 太阳对木星的引力是 4.17×10^{23} N，它们之间的距离是 7.8×10^{11} km，已知木星的质量为 2×10^{27} kg，求太阳的质量。
10. 地球的第一宇宙速度为 v_1，若某行星质量是地球质量的 4 倍，半径是地球半径的 2 倍，求该行星的第一宇宙速度。
11. 有两艘轮船，质量分别为 5.0×10^7 kg 和 1.0×10^8 kg，相距 10 km，求它们之间的引力。将这个力与它们所受的重力相比较，看看相差多少倍。
12. 利用所学知识，推导第一宇宙速度的另一表达式 $v=\sqrt{gR}$。
13. 若人造卫星绕地球做匀速圆周运动，则离地面越近的卫星
   A. 速度越大　　B. 角速度越大
   C. 向心加速度越大　　D. 周期越长

第6章
经典力学与现代物理

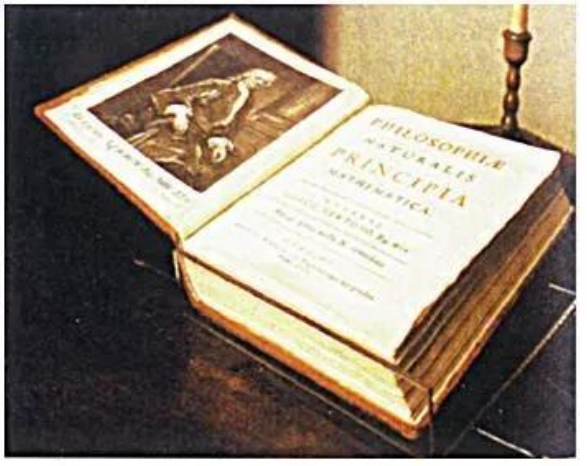


图 6-1 《自然哲学的数学原理》

经典力学(classical mechanics),通常叫牛顿力学,主要研究宏观物体机械运动的规律。牛顿在伽利略、开普勒等人工作的基础上,把地面上物体的运动与行星的运动综合起来进行深入研究,发现了机械运动的基本规律——牛顿运动三定律和万有引力定律。他的不朽名著《自然哲学的数学原理》,为经典力学奠定了基础。

步入19世纪末叶,在经典力学基础上发展起来的经典物理学,似乎到了尽善尽美的程度。当时著名的英国物理学家威廉·汤姆生(William Thomson)踌躇满志地宣告:"科学大厦已经基本建成","后辈物理学家只要做一些零碎的修补工作就行了。"但他也有所担忧:"在物理学晴朗天空的远处,还有两朵小小的令人不安的乌云。"

那么,他的担忧是不是有根据呢?那两朵乌云指的是什么呢?

历史证明,威廉·汤姆生的担忧是有道理的。原来,当物理学研究深入扩展到微观、高速领域时,人们发现经典力学在这些领域不再适用。为此,在20世纪初的几十年中,物理学家创立了相对论和量子论,奠定了现代物理学的基础。

本章在简述经典力学巨大成就及其局限性的基础上,让你学习相对论和量子论的基本观点,了解关于物体高速运动和微观粒子运动的现代物理学方面的初步知识。

6.1 经典力学的巨大成就和局限性

一座永垂不朽的纪念碑

牛顿的《自然哲学的数学原理》(以下简称《原理》)出版于1687年,是一部奠定了经典力学基础的划时代著作。它对近、现代科学和科学哲学的发展,产生了无与伦比的影响,是自然科学史上的一座伟大的丰碑。

为什么说《原理》是自然科学上的一座丰碑?它对近、现代科学产生了怎样的影响?

为此,让我们对《原理》产生的时代背景和概貌作简单介绍。

一代科学伟人,一种科学上的革命性的伟大发现,都是时代的产物。

《原理》产生的背景

牛顿的科学发现植根于17世纪和18世纪早期,英国乃至欧洲的剧烈社会变革和科学发展的背景之中。社会经济和技术发展的需要、资产阶级革命的深刻影响、逻辑实证主义的启迪、国内外科学交流和英国皇家学会的建立……对于牛顿的科学成就起了很大的作用。

《原理》的概貌

《原理》共有两大部分。

第一部分是"定义和注释"、"运动的基本定理或定律(包括三个运动定律)"。这部分篇幅不大,却极为重要,是建立力学逻辑体系的前提。第二部分是这些定律的应用,共包括三卷。第一卷讨论万有引力定律和行星运动;第二卷属于流体力学的开创性研究,讨论物体在有阻力的介质中的运动,包括流体静力学、动力学以及流体和弹性介质波的传播问题等;第三卷的总题目是"论宇宙系统",是天体力学和宇宙系统的开拓性研究,包括行星绕日运动、卫星绕行星运动、地面上的落体运动、抛体运动、彗星轨道、岁差以及潮汐现象等,这一卷呈现了牛顿那高瞻远瞩的宇宙观。

对《原理》的评价

牛顿的《原理》，第一版用拉丁文于1687年出版。不久，就得到众多学者的盛赞。

法国著名天文学家和天体力学家拉普拉斯(P. S. Laplace)对《原理》的评价是：

《原理》将成为一座永垂不朽的深邃智慧的纪念碑，它向我们揭示了最伟大的宇宙定律。这部著作是高于人类一切其他思想产物的杰作，这个简单而普遍的定律的发现，因为它囊括对象之巨大和多样性，给予人类智慧以光荣。

牛顿是怎样看待自己巨大成就的呢？

牛顿有句名言："如果我比别人看得远些，那是因为我站在巨人们的肩上。"他还说过："我不知道世人怎样看我，但我自认为我不过是像一个在海边玩耍的孩童，不时为找到比常见的更光滑的石子或更美丽的贝壳而欣喜，而展现在我面前的是全然未被发现的浩瀚的真理海洋。"从这两句话中，可以窥见到一个多么博大深邃的精神世界！

读了牛顿的上述名言，你有什么想法？

牛顿啊，请原谅我！你所发现的道路，在你那个时代，是一位具有最高思维能力和创造力的人所能发现的唯一的道路。你所创造的概念，甚至今天仍然指导着我们的物理学思想，虽然我们现在知道，如果要更加深入地理解各种联系，那就必须用另外一些离直接经验领域较远的概念来代替这些概念。

——爱因斯坦

经典力学的巨大成就

牛顿运动三定律和万有引力定律把天体的运动与地上物体的运动统一起来，是人类对自然界认识的第一次大综合，是人类认识史上的一次重大飞跃。

经典力学的基础，在以后的200多年里几乎统治了物理学的各个领域。

经典力学和以经典力学为基础发展起来的天体力学、材料力

信息浏览

牛顿运动三定律是经典力学的逻辑基础

在《原理》中，牛顿对我们所熟悉的运动三定律是如何表述的呢？

定律1　每个物体继续保持它的静止或沿一直线做等速运动状态，除非有力加于其上迫使它改变这个状态。

定律2　运动的改变和所加的动力成比例，并且发生在加的力的那个直线方向上。

定律3　每一个作用，总有一个相等的反作用；或者说，二物体彼此的相互作用是永远相等的，并且指向相反的部分。

上面对运动三定律的这种表述，与你学过的是不是一致？

学和结构力学等得到了广泛的应用，并取得了巨大的成就。

18世纪60年代，力学和热力学的发展及其与生产的结合，使机器和蒸汽机得以改进和推广，引发了第一次工业革命。

由牛顿力学定律导出的动量守恒定律、机械能守恒定律等，是航空航天技术的理论基础。火箭、人造地球卫星、航天飞机、宇宙飞船、行星探测器等航天器的发射，都是牛顿力学规律的应用范例。

经典力学是最早形成的物理理论，后来的许多理论，包括相对论和量子力学，它们的形成都受到经典力学的影响。

经典力学方法论的意义

经典力学方法的典型就是伽利略和牛顿的研究方法。

伽利略关于机械运动的研究，开创了将实验、逻辑（数学）相结合的方法，也就是“自然数学化”的方法。他不仅通过实验进行观察测量，而且用理想实验的方法进行推理。理想实验最能与数学处理相结合。由于在地球上做力学实验，认识力学规律，首先要考虑摩擦的影响，这就要有全新的观念来做实验，包括设计、实施、解释结果等。

有人说，全部近代物理都是建立在“自然数学化”基础上的。你对这种说法有什么看法？







图6-2 经典力学应用一瞥

牛顿的方法可称为“归纳-演绎法”。第一个大量运用数学方法系统地整理物理学理论的，是牛顿。他的方法与一般演绎法的不同之处在于：演绎的结果必须诉诸实验验证。

例如，万有引力定律的建立过程，即从第谷的观察到开普勒的运动学描述，再上升到万有引力定律以及进一步的预言、验证等，为后人提供了建立物理学理论的一种模式。牛顿以后，寻找不同事物之间的联系，建立统一的理论解释，已经成为物理学家锲而不舍的追求。牛顿的《原理》为以后各种物理学理论体系的建立树立了一个典范，极大地促进了物理学的发展。

伽利略和牛顿的科学方法影响深远，成为后来物理学家的一种朴实的自发倾向，并不断得到发展和完善，逐渐成为一种传统，甚至作为社会科学和哲学的方法论，意义也是很大的。

经典力学的局限性

自然界的一切现象，全都可以根据力学的原理，用相似的推理一一地演绎出来。

——牛顿

经典力学的巨大成就，促使人们用力学观点去理解自然，把一切自然现象都归结为机械决定论。这种观点主张自然界是由完全同一的微粒组成的，自然界的千差万别，只是微粒的数量和空间排列不同，一切运动（包括生物的生长）不是什么神秘力的驱使，而是机械位移和碰撞的结果。

机械论是物理学发展到一定阶段的必然产物，在当时是认识史上的一个进步。

根据力学原理，若已知一物体在某一时刻的位置和速度，则原则上便可以精确地计算出该物体以后变化的所有细节，甚至可以上溯到它过去历史的全部细节。机械论因果律的观点认为，世界的过去、现在和将来都只有量的变化，而不会发生质的变化。它否定了物质世界的变化和发展。拉普拉斯在说明这一图景时说，如果在创造世界的时候，世界状态的细节便被一个有无限精力和勤勉的数学家一一全部录下，这位数学家便能推断出整个世界的未来发展。

机械论对时间和空间的认识是经典力学的基础。牛顿认为，时间和空间不依赖人们的意识而存在，也就是说，空间和时间是绝对的。牛顿就是在这样的时间和空间中来描述机械运动的，这对于低速的机械运动是足够精确的，这无疑是人类认识史上的一次飞跃。然而，他把时间、空间割裂开来，认为它们与物质运动无

关。这一观点，在微观与高速领域中就不对了。

请讨论：

上述一些机械论的观点，哪些是有道理的？它们在历史上起了怎样的进步作用？哪些是不正确的？对人们认识世界有哪些负面影响？

19世纪末叶，正当物理学家在庆贺物理学大厦落成之际，科学实验却发现了许多经典物理学无法解释的事实。这些事实与经典物理学的基本概念以及一系列基本规律产生了尖锐的矛盾，从而引起了物理学的一场伟大的革命，导致了现代物理学的诞生。

家庭作业与活动

1. 利用互联网收集经典力学在科学技术方面的典型应用事例。
2. 将一枚面值一元的硬币用确定的速度向上抛起，你能否断定（不是猜测）它落地时哪一面朝上？请试一试，这种现象能用经典力学解释吗？
3. 撰写一篇题为"关于伽利略、牛顿的科学研究方法对物理学发展的意义"的小论文。

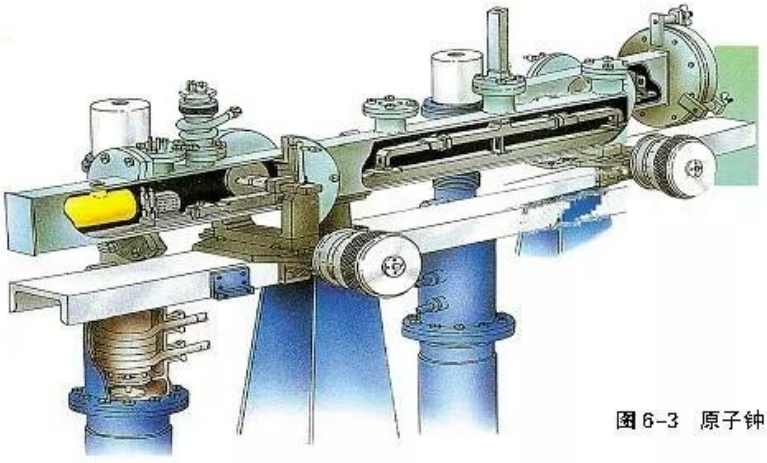


图 6-3　原子钟

*6.2 狭义相对论的基本原理

如果你不问我什么是时间，我对它还能意会；你一问起我，我就不知道怎样言传了。

——奥古斯丁

从钟表的嘀嗒声到太阳的东升西落，我们时刻都在与时间和空间打交道。在日常生活和生产中，用时钟测量时间，用米尺测量长度，也是司空见惯的事。那么，你想过没有，到底什么是时间和空间呢？

我们知道，力学的研究对象是物体的机械运动，要定量地研究这种运动，必须选定适当的参考系。力学的概念及其规律对一定的参考系才有意义。我们也知道，无论是运动的描述，还是运动规律的说明，都跟长度和时间的测量有关。那么，相对于不同的参考系，长度和时间的测量结果是一样的吗？

一个概念愈是普遍，它愈是频繁地出现在我们的思维之中，它同感觉经验的关系愈直接，我们了解它的意义也就愈困难。

——爱因斯坦

对上述问题，物理学家进行了长期的探索。于是，物理学经历了一场关于时空观的根本性变革，从牛顿时代的经典力学跨越到爱因斯坦的相对论。

经典力学的时空观

公园草坪上的空间，不会因白天如织的游人而存在，也不会因夜晚的寂静而消失，它永远客观地存在着。不管你使用什么计时工具，时间都不会改变它流逝的快慢；也不管你是在学校、汽车

或飞机上，或一人在家中，它都在默默地流逝着，对任何人、任何事物都一样。

这就是经典力学的时空观。

在物理学中把这种时空观叫做绝对时空观。牛顿在《原理》中写道："绝对的空间，就其本性而言，是与外界任何事物无关而永远相同和不动的"，"绝对的真正的和数学的时间自身在流逝着，而且由于其本性而均匀地与任何其他外界事物无关地流逝着。"

绝对时空观的特点是：时间和空间是分离的，时间尺度和空间尺度与物质运动无关，都是绝对的。

绝对时空观符合人们对空间和时间的感受，这种观念一直为牛顿以后的物理学研究者所接受，持续了百余年。

按照经典力学的观点，宇宙会有共同的时间，这个时间跟观察者没有关系。通常说北京22点，伦敦14点，华盛顿9点，都是指同一时刻（它们钟点数的不同，是地理时差引起的），即这三个城市可以处在同一个现在。凡是在这一时刻发生的事件，叫做同时事件，这个同时是绝对的。正是有了这个绝对性，全世界，乃至宇宙，才会有统一的时间。空间也一样，比如，一列火车从上海开往北京，有确定的距离。不论是站在地面上不动的观察者，还是乘火车或乘火箭做高速运动的观察者，这段距离对他们都一样，也是绝对的。

我不对时间、空间、地点和运动下定义，因为它们是人人熟知的。

——牛顿

绝对时空观是人们在地球范围内凭直觉经验建立起来的，它真是绝对合理并具有普遍意义的吗？

请讨论：

1. 百米赛跑时，发令枪的打响和裁判员的开始计时应该同时。在用秒表计时的情况下，为了达到这个"同时"的目的，百米之外的裁判员不是根据发令枪的声音按秒表，而是看发令枪冒出的白烟按秒表。这是为什么？

2. 2004年1月4日，"勇气"号火星探测器在火星地面着陆。"勇气"号拍摄的火星照片，通过用电磁波传向地球。电磁波从火星到地球约要10 min的时间。地球上的人能看到地球与火星同时发生的事吗？为什么？



图6-4 不同地点的同一时刻

狭义相对论的基本公设

上面这两个问题都跟光的传播速度有关，爱因斯坦建立狭义相对论也源于对光速的考虑。

追光问题的思考

根据爱因斯坦自己的回忆，他从16岁(1895年)起就开始思考这样一个问题："如果我以光速追光波，将会看到什么？"这个问题困扰他10年之久。

为什么这个问题难以解决呢？这是因为：如果认为观察者看到的是一个静止不前的电磁振荡，与直觉经验不符；而如果认为看到的是一个以一定速度行进的光，则违反了速度合成法则。

你思考过这个问题吗？你的看法如何？

伽利略相对性原理

夫天地者，万物之逆旅；光阴者，百代之过客。

——李白：《春夜宴桃李园序》

在经典力学中，牛顿运动定律是力学规律的基础，如果牛顿运动定律在某个参考系中成立，这个参考系就叫做**惯性系**(inertial frame)。相对于一个惯性系做匀速直线运动的另一个参考系也是惯性系。

在不同的惯性系中，力学规律都是相同的。如果我们在不同的惯性系中测物体自由下落的时间，测一个单摆的周期，研究平抛运动的规律，或研究牛顿第二定律的实验，我们会发现，所有的实验现象和实验结论，都不会因惯性系的不同而有所不同，也就是说，各个惯性系都是等价的。这个观点叫做**伽利略相对性原理**。

但是，如果将伽利略相对性原理推广到与光速有关的情况时，就要产生不可解决的矛盾了。

请讨论：

假设有一艘宇宙飞船，它的速度高达 7.5×10^{8} km/s（光速的 $\frac{1}{4}$）。你的同学带着一个激光电筒在飞船中，你带一个激光电筒站在地面上。

1. 当飞船向你飞来时，你向飞船发出一束激光，你的同学在飞船中测得的激光速度是多大？

2. 当飞船远离你而去时，你向飞船发出一束激光，你的同学在飞船中测得的激光速度是多大？

3. 当飞船向你飞来时，同学向你发出一束激光，你测得的激光速度是多大？

根据伽利略相对性原理可算出，第1个问题的答案是3.75×10^5 km/s，第2个是2.25×10^5 km/s，第3个是3.75×10^5 km/s。但这些答案都是错误的。因为大量的事实证明，光的传播速度跟光源的运动情况无关，光在任何惯性系中传播的速度都是不变的。

你是不是觉得有点不可思议？伽利略的相对性原理为什么不适用于高速运动呢？

两条基本公设

光速不变是一个重要的事实。

爱因斯坦以他独特的思考方式，把人们看来互相矛盾的相对性原理和光速不变原理作为他的狭义相对论(special relativity)的基本公设：

1. 在不同的惯性参考系中，一切物理规律都是相同的。这个公设通常叫做爱因斯坦相对性原理。

2. 在一切惯性系中，光在真空中传播的速度都等于c，跟光源的运动无关。

从绝对时空观的角度看，这两条基本假设是矛盾的。所以必须抛弃经典的绝对时间、绝对空间的观念，才能使二者融洽。

爱因斯坦是怎样解决这个矛盾的呢？他说："我的解决办法是，分析时间这个概念，时间不能绝对定义，时间与速度之间有不

信息浏览

光速的测定

相对论理论的建立，实际上是从研究光的奇特性质开始的，其中很重要的一个问题就是光的传播速度。

早先，对光的传播速度是无限的还是有限的，有过激烈的争论，像笛卡儿这样有名的科学家也认为光的传播速度是无限的，而伽利略等人就持相反的意见，认为光速有限。相传，伽利略曾和助手分别站在两个山头上，采用相互发送和接收光信号的方法测量光速。测量失败了，因为光速实在是太大了。

但伽利略对光速的测量没有停止。1676年，丹麦天文学家罗默(O. Romer)提出通过观察木星的卫星蚀来测光速，得到的光速是210 000 km/s。1728年英国天文学家布拉德利(J. Bradley)运用天文方法测得的光速是303 000 km/s。

1849年，物理学家斐索(H. Fizeau)第一次成功地在地面上不借助于天文观察完成了光速的测量。他把光射到23 km远的平面镜上反射回来，从而大大增加了光传播的距离。斐索测得的光速$c=(299\,870\pm50)$ km/s，这已经十分准确了。

后来至少又有18位科学家测定了光速。从1862年之后，测得的光速都很接近，科学家现在公认的光速是3×10^5 km/s。值得一提的是科学家迈克耳孙(A. Michelson)和莫雷(E. Morley)于1887年所做的实验，他们的实验目的是寻找宇宙中存在的"绝对参考系"——"以太"的证据，结果并没有寻找到"以太"，倒是证明了光速与光源的运动与观察者无关，真可谓"种豆得瓜"了。

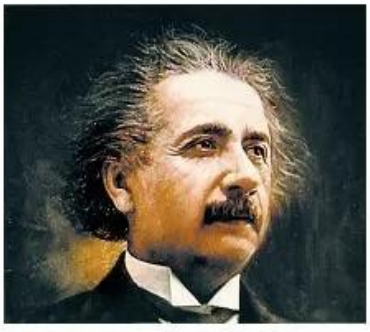
这种光速丝毫不受光源或观察者影响的特性，违背了一般的速度合成法则，很令人费解。威廉·汤姆生所说的"两朵乌云"，一朵就是指迈克耳孙-莫雷实验。

可分割的联系。使用这个新概念，我第一次完满地解决了整个困难。”接着，爱因斯坦用五个星期完成了他的狭义相对论。狭义相对论的出现，使得人们的时空观发生了重大的变革。

爱因斯坦的两条基本公设只涉及无加速运动的惯性系，由此建立的相对论通常叫做狭义相对论。

狭义相对论是对经典物理学的一次变革。

信息浏览



爱因斯坦简介

爱因斯坦（Albert Einstein），1879 年出生于德国符腾堡的乌尔姆市。1896 年进入瑞士苏黎世工业大学学习，并于 1900 年毕业。他大学期间在学习上就表现出“离经叛道”的性格，颇受教授们责难。毕业后即失业。1902 年到瑞士专利局工作，1909 年起开始当教授。他早期一系列最有创造性、最有历史意义的研究工作，如创立相对论，都是在专利局工作时利用业余时间进行的。1914 年起，他任德国威廉皇家学会物理研究所所长兼柏林大学教授。由于希特勒法西斯的迫害，他于 1933 年到美国定居，任普林斯顿高等研究院研究员，直到 1955 年逝世。

爱因斯坦的主要科学成就有以下几个方面：

（1）创立了狭义相对论。这个理论揭示了空间和时间的联系，引起了物理学的革命。同年又提出了质能相当关系，在理论上为原子能时代开辟了道路。

（2）发展了量子理论。他在 1905 年提出了光的量子论，并因此获得了 1921 年的诺贝尔物理学奖。以后他又陆续发表文章提出受激辐射理论（1916 年），并发展了量子统计理论（1924 年）。

（3）建立了广义相对论。他在 1915 年建立的广义相对论，揭示了空间、时间、物质、运动的统一性，以及几何学和物理学的统一性，解释了引力的本质，从而为现代天体物理学和宇宙学的发展打下了重要的基础。

此外，他对布朗运动的研究（1905 年），为气体动理论的最后胜利做出了贡献。他还开创了现代宇宙学，他努力探索统一场论的思想，指明了现代物理学发展的一个重要方向。

爱因斯坦之所以能取得这样伟大的科学成就，应该归因于他那勤奋、刻苦的工作态度和求实、严谨的科学作风，更应该归因于他那对一切传统和现成的知识所采取的独立的批判精神。他不因循守旧，不迷信权威，敢于离经叛道，敢于创新。他提出科学假设的胆略之大，令人惊奇，但这些假设又都是他的科学作风和创新精神的结晶。除了他非凡的科学理论贡献之外，这种伟大革新家的创新精神也是他给人们留下的一份宝贵的遗产。

爱因斯坦的精神境界高尚。在巨大的荣誉面前，他从不把自己的成就全部归功于自己，总是强调前人的工作为他创造了条件。他曾说过：“人是为别人而生存的。”“人只有献身于社会，才能找出那实际上是短暂而有风险的生命的意义。”“一个获得成功的人，从他的同胞那里所取得的总无可比拟地超过他对他们所做的贡献。然而看一个人的价值，应当看他贡献什么，而不应当看他取得什么。”

家庭作业与活动

简单分析伽利略相对性原理和爱因斯坦相对性原理的相同点和不同点。



图 6-5　浩瀚的宇宙

*6.3 爱因斯坦心目中的宇宙

爱因斯坦认为，时间与空间是不可分的，时空与物质也是不可分的。那么，爱因斯坦是怎样分析时间的呢？为什么说时间不能绝对定义？时间、空间与物质运动的速度之间有什么关系？

爱因斯坦的时空观

同时的相对性

我们已初步讨论过同时性的概念。为了得到明确的结论，爱因斯坦设想有一列开得很快的火车，在它的一节车厢的正中间有一个观察者 A 和一台闪光器，车头和车尾各有一台光的接收器 P

这是爱因斯坦设计的一个理想实验。爱因斯坦在思考研究问题时，经常设计一些理想实验帮助分析论证。

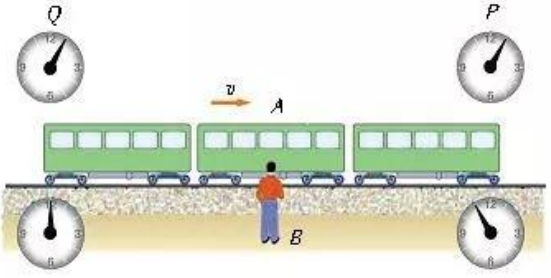


图 6-6　同时的相对性实验

和 Q，在站台上有另一个观察者 B，如图 6-6 所示。

火车驶过站台，在 A 和 B 相遇的瞬间，闪光器发出一次闪光，这个闪光会被车头和车尾上的两个接收器 P、Q 所接收。这两个接收器是同时收到闪光信号的吗？车上的观察者 A 和站台上的观察者 B 的结论是一致的吗？

观察者 A 认为，闪光信号以光速相对于他（即火车）进行传播，P、Q 两个接收器与闪光器的距离相同，闪光信号到达 P、Q 的时间是相同的，即两个接收器同时收到闪光信号。

观察者 B 认为，根据光速不变原理，闪光信号也以光速相对于他进行传播，但 P 在向前运动，当闪光信号到达 P 时，P 已前进了一段距离，故闪光信号走过的距离长；相反，闪光信号从闪光器到达 Q 所走过的距离短。因此，闪光信号应先抵达 Q，后抵达 P，即两个接收器不是同时收到信号。

这种不同时性，确实令人惊讶。人们原以为，地面上的人，甚至其他星球上的“人”，都会有相同的“同一瞬间”，因此宇宙中存在着牛顿式的普适时间。现在从爱因斯坦的狭义相对论来看，这是错误的，不存在全宇宙普适的同时性概念。

时空的相对性

上面的实验说明，时间是不能绝对定义的，它与物体的运动速度有关。那么，时间、空间与物体运动的速度有怎样的关系呢？

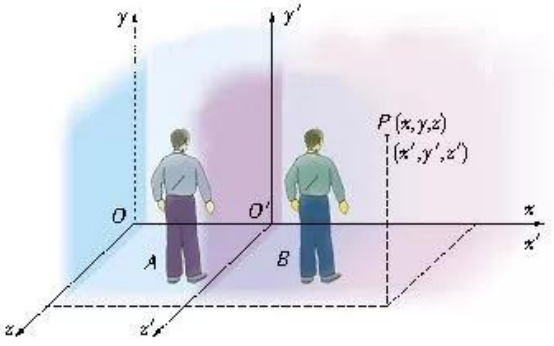


图 6-7　两个坐标系中的时间与空间

如图 6-7 所示，有 A、B 两个参考系，每个参考系中各有一只钟和一位观察者。设参考系 A 不动，参考系 B 以速度 v 向右运动。

假如有一个事件 P 发生，它在两参考系中的坐标如图所示，按伽利略相对性原理，因时间、空间与物质运动无关，其变换公式为

$$\begin{cases} x = x' + vt' & (1) \\ t = t' & (2) \end{cases}$$

前面已经知道，按这两个公式导出的速度关系，不符合光速不变的原理。为此，爱因斯坦认为，时间、空间与物质运动是有关的。

他根据光速不变原理和时空的性质，导出了如下关系式

$$\begin{cases} x = \dfrac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}} & (3) \\ t = \dfrac{t' + \dfrac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}} & (4) \end{cases}$$

上式中，x 和 t 为 P 在 A 参考系中的位置和时间；而 x' 和 t' 为 P 在 B 参考系中的位置和时间；v 为 B 参考系相对 A 参考系的速度，c 为光速。显然，当 $v \ll c$ 时，(3)、(4)两式近似于(1)、(2)两式。

(3)、(4)两式揭示了时间、空间与物质运动存在着内在的不可分割的联系。

两个奇特的效应

由(3)、(4)两式，我们可以得出狭义相对论的两个重要结论：长度收缩效应和时间延缓效应。

长度收缩效应

长度的测量在经典物理学中是与参考系无关的。在某一个参考系中测量棒的长度，就是测量它的两个端点在同一时刻的位置之间的距离。根据爱因斯坦的观点，既然同时是相对的，那么长度的测量也是相对的。例如你的同学在飞船上测量飞船窗口的长度 l' 和高度 h'，而你在地面上也测量飞船窗口的长度 l 和高度 h(图 6-8)，你们测得的飞船窗口高度会相同($h' = h$)，但你测得的窗口长度 l 却比飞船上同学测量的 l' 要短一些。这种缩短的现象不只发生在窗口，飞船上的物体沿飞行方向的长度，在地面上测量的值都比在飞船上测量的值要小。这种情况被叫做**长度收缩效应**(length contraction)，或**尺缩效应**。这个效应显示了空间的相对性。图 6-9 是发生尺缩效应时，长度与速度的关系。

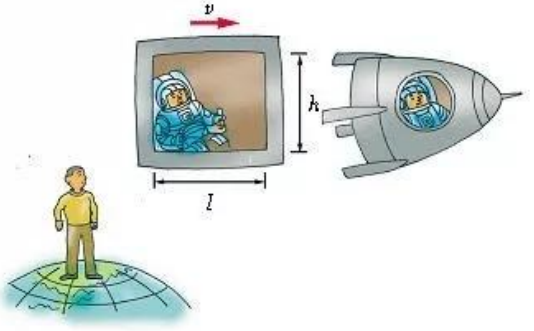


图 6-8 地面上和飞船上测量的飞船窗口长度不相同，而高度相同

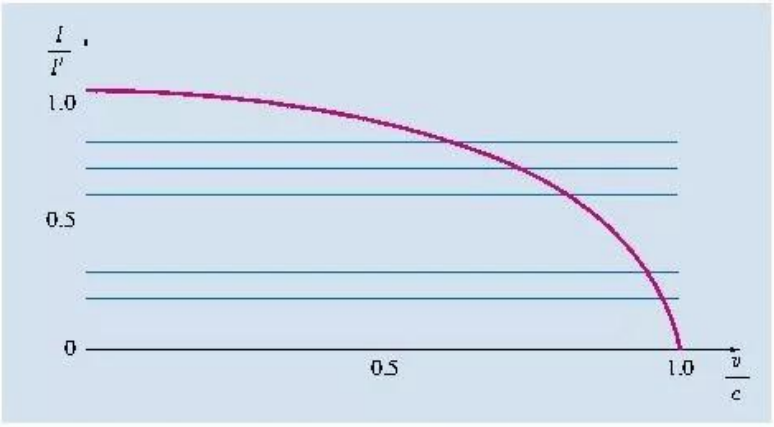


图 6-9　发生尺缩效应时，长度与速度的关系

应当指出，尺缩效应也是一种相对效应。静止参考系中沿运动方向放置的棒，在运动的参考系中测量，其长度也要收缩。

时间延缓效应

一般地说，在一个相对于我们做高速运动的惯性系中发生的物理过程，在我们看来，它所经历的时间比在这个惯性系中直接观察到的时间长。惯性系的速度越大，我们观察到的过程所经历的时间越长。对于化学反应、生命过程等，这一结论也是正确的。这就是**时间延缓效应**(time dilation)，又叫做**钟慢效应**。

钟慢效应也是相对的，飞船上的观察者也认为地面上的时间进程比飞船上要慢一些，因为对于飞船上的观察者来说，地面正以同样的速度朝相反的方向运动着。

信息浏览

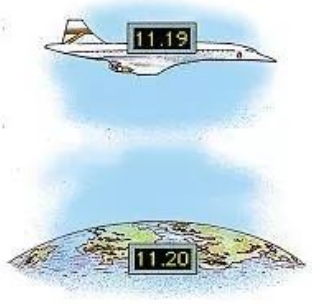


图 6-10　飞机上观察时间延缓效应示意图

时间延缓效应的实验验证

通过观察高速运动的微观粒子，时间的相对性反复地得到了证实。例如，宇宙射线中有一种粒子叫 μ 子，它的寿命只有 2.2 μs，就是说，如果你观察一个相对于你静止的 μ 子，你只能观察 2.2 μs，之后它就发生了衰变。在高能物理实验室中，μ 子可以加速到 0.9966c，由公式计算出它的平均寿命为 26.7 μs，实验值也为约 26.4 μs。因此，实验完全证实了时间延缓公式。

1971 年，哈夫勒(J. C. Hafele)和基廷(R. E. Keating)用喷气式飞机携带铯原子钟进行环球飞行实验，证实了时钟延缓效应(图 6-10)。

爱因斯坦的质速公式

1901 年，德国物理学家考夫曼(W. Kaufman)在实验中发现电子的质量会随速度增大而增加。如果以 m_0 表示电子的静止质量，m 表示运动电子的质量，c 表示光速，根据考夫曼的测量结果，可得到图 6-11 所示的曲线。他的这一工作，首次证实了电子质量随速度的改变而改变。考夫曼的实验结果与后来爱因斯坦推导出来的表述质量的公式完全一致

实物有静止质量，辐射没有静止质量。

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

上式说明，物体质量随速度的增大而增加。在高能物理学实验室中，质量随速度增大而增加是司空见惯的事。例如一个亚原子粒子可以加速到超过 0.99 c 的速度，非常接近光速，相对论预言它的质量要比静止质量大几千倍，实验观察结果与预言的情况符合得十分好。

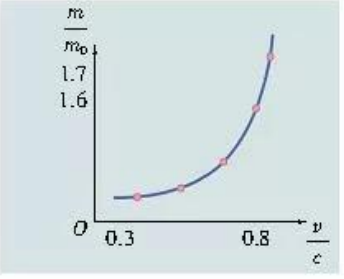


图 6-11　考夫曼实验曲线

请讨论：

1. 如果你使一个物体加速、加速、再加速，它的速度会增加到等于光速甚至大于光速吗？为什么？

2. 光有静止质量吗？如果有，情况将会怎样？

质能关系

物体速度增大了，它的质量增加。按照动能定理，质量的增加就意味着能量的增加。

爱因斯坦对质量与能量的关系进行了深入研究，得出了如下关系式

$$E = mc^2$$

上式表示，任何质量 m 都对应着一定的能量 mc^2。此式通常叫做爱因斯坦的质能关系公式。

爱因斯坦曾把这个公式看作他的狭义相对论最有意义的结果，因为这个公式为开发和利用原子能提供了理论基础。

案例分析

案例 1 kg 的铀裂变后，其静止质量亏损了 0.01 kg。由于这些质量的亏损，将释放多少能量？

分析 因为亏损的质量 $m = 0.01$ kg，根据质能关系公式 $E = mc^2$，即可计算出释放的能量。

解答 $E = mc^2 = 0.01 \times (3 \times 10^8)^2$ J $= 9 \times 10^{14}$ J。

请你查找资料计算一下：这些能量要完全燃烧多少优质煤才能获得？

相对论认为空间和时间是运动着的物质存在的形式，时空概念是从物质运动中抽象出来的，而不是独立于物质运动之外的概念。

人们对时空的认识和对一切事物的认识一样，都是在实践中逐步发展和加深的。相对论并没有否定经典物理学。尽管相对论更具有普遍性，但是经典物理学作为它的低速近似，在处理低速运动问题时仍然是正确的。

爱因斯坦创立的狭义相对论，是 20 世纪物理学最大的成就之一。这个理论导致了物理学史上一次深刻的变革，成为近代物理学的两大支柱之一（另一支柱是量子力学）。同时，狭义相对论使人类对物质世界的认识发生了巨大的飞跃。牛顿力学让我们登上月球观光，爱因斯坦的相对论把我们引向更远的宇宙。我们正在进入一个新的时空！



图 6-12 由于太阳的引力使光线弯曲，我们能够看到太阳后面的星星

多学一点 广义相对论简介

经典力学和狭义相对论都是针对惯性系的。狭义相对论建立后，爱因斯坦又继续思考：物理规律在具有加速度的参考系中将是怎样的呢？

爱因斯坦根据他所设计的理想实验推断：在一个具有均匀加速度的参考系中做物理实验，观察到的结果跟在引力场中的实验结果是没有区别的。爱因斯坦把这个推断表述为一条与狭义相对论相似的基本原理：

每一个做加速运动的观察者都体验到同样的自然规律。换句话说，在任何一个封闭的房间里做的实验都不能告诉你，你是在

没有重力的环境中做加速运动，还是在有重力的情况下处于静止状态。

这叫做**广义相对性原理**。

狭义相对性原理是说物理规律不受参考系的速度影响，广义相对性原理则是说物理规律不受参考系的加速度影响。

从广义相对性原理，爱因斯坦断言：引力会使光线弯曲。这一预言已在日食时被观察到，如图 6-12 所示。

因为空间与时间是不可分离的，所以引力不仅影响了空间，而且影响了时间，广义相对论(general relativity)对这种影响的描述方式是，一切物体都处在一个四维的世界中，即在我们已经习惯了的三维空间之外，再加上第四维——时间。

在引力场中，时空发生弯曲。天体之间的引力作用是时空弯曲的结果(如图 6-13 所示)，万有引力是广义相对论的时空弯曲理论在弱引力场中的很好的近似表述。

关于宇宙产生的大爆炸学说、关于宇宙发展的宇宙膨胀学说，以及宇宙中的黑洞和暗物质等，都与广义相对论有关。有兴趣的同学可以找一下这方面的科普书籍阅读，或者看一些科普影视片。

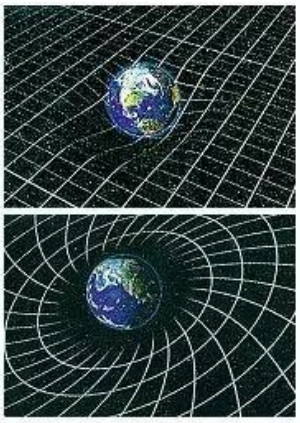


图 6-13 爱因斯坦的广义相对论预言：时空弯曲
上图表示任何具有质量的物体都会使周围的空间弯曲；下图表示具有质量的物体的旋转使其周围的时空发生扭曲

想象一个四维空间是不可能的。我个人觉得形象地想象三维空间已经够难了。

——史蒂芬·霍金

家庭作业与活动

1. 同时的相对性是什么意思？为什么会有这种相对性？如果光速是无限大，是否还有这种相对性？
2. 一列火车在前进中，车头和车尾各遭到一次闪电轰击。据车上的一个观察者测定，这两次轰击是同时发生的。试问：据地面上观察者的测定，它们是否仍然同时？如果不同时，车头和车尾哪个先遭到轰击？
3. 尝试用(3)、(4)两式验证长度收缩公式。
4. 有三只完全相同的时钟，钟 A 放在地面上，钟 B、C 各放在一艘飞船上，两艘飞船分别以速度 v_B 和 v_C 朝同一方向飞行，$v_B < v_C$。在地面上的观察者看来，哪只时钟走得最快？哪只时钟走得最慢？

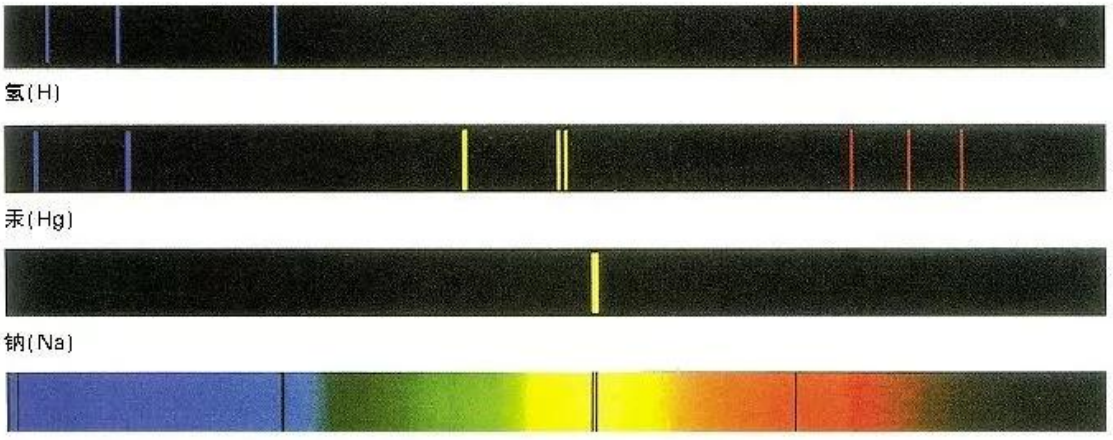
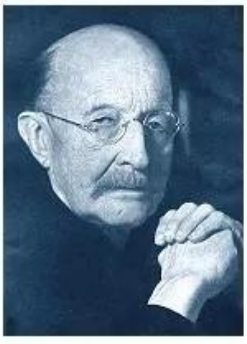


图 6-14 线状光谱

*6.4 微观世界与量子论



普朗克 (M. Planck, 1858—1947),德国物理学家。1900 年 12 月 14 日,在德国物理学会年会上宣读的论文中,提出了与经典物理学格格不入的能量量子化假设。

一个人要是对量子物理学不感到震惊,他就根本没有理解它。

——尼尔斯·玻尔

我们周围到处都有光。那么,光是什么?它来自何处?在物理学发展的过程中,对这个问题的探索,不仅导致了相对论的建立,而且导致了量子论(quantum theory)的建立。

德国物理学家普朗克于 1900 年 12 月 14 日在德国物理学会年会上,宣读了题为"关于正常光谱的能量分布定律"的论文。在论文中,他提出了与经典理论相矛盾的能量量子化假设。

量子概念是一个"伟大的创造性概念",极小的普朗克常量 $h = 6.62 \times 10^{-34}\,\mathrm{J \cdot s}$ 是其定量的标志。量子论断言:自然界的变化是以不连续的方式发生的,而不是像经典物理学家预言的那样是连续的。

量子论的实际影响延伸到每一种基于微观世界细节的器件,如晶体管、硅片、集成电路,以及全部信息技术、大部分现代化学和生物学、原子物理学、核物理学、核能和核武器技术等等。

光电效应

1890 年前后,赫兹(G. Hertz)等科学家注意到,当可见光和其他电磁辐射照射到金属表面上时,能从金属表面打出电子,这种现

象叫做光电效应，而被打出的电子叫做光电子。

将光电管（图 6-15）接入图 6-16 所示的电路中，闭合开关 S，电流表一般是没有电流通过的。如果用紫外线照射光电管，就会有电流通过电流表。

经典物理学认为，金属板受光波照射，当板中电子接收的能量超过电子从金属板中脱离出来所需要的能量时，电子就会从板中脱离出来。然而，对于确定的金属板，用频率低于某个极限频率（见附表）的光波照射时，无论其强度多么大，照射的时间多么长，都不会有光电子产生。而用频率高于该极限频率的光波照射时，不论其强度多么小，都立即会有光电子产生。经典物理学对这种现象是无法解释的。

1905 年，爱因斯坦发展了当时不被大家接受的普朗克的量子论，对光电效应的规律在量子论的基础上给出了合理的解释。

爱因斯坦认为，表面上看起来连续的光波是一颗一颗以光速运动的粒子组成的粒子流，这些粒子不能再分割，只能被整个地吸收或产生出来。这种粒子称为**光量子**，简称光子。光子的能量 E 跟光的频率 ν 成正比，即

$$E = h\nu$$

式中 h 是普朗克常量。光子的频率越高，能量就越大；单位时间内发射的光子数越多，光的强度越大。

爱因斯坦的光子说对光电效应的解释是：

当光波照射到金属板上时，金属板接收到的是大量光子。如果光波的频率较低，光子的能量小于电子从金属板中脱离出来所需要的能量，电子吸收一个光子后并不能成为光电子，于是就没有电流产生。如果光波的频率高到一定程度，一个光子的能量大于电子从金属板中脱离出来所需要的能量，电子吸收了一个光子后就能从金属板中脱离出来而成为光电子。单位时间内入射光子数越多，光电子数越多，由光电子形成的光电流也就越大。就这样，爱因斯坦的光量子理论很好地解释了光电效应的实验规律。

研究表明，光既是电磁波，又具有粒子的特征，即光具有波粒二象性。一切辐射都具有波粒二象性。

几种金属的极限频率 ν_0 和极限波长 λ_0

	铯	钾	锌	银	铂
ν_0/Hz	4.55×10^{14}	5.38×10^{14}	8.07×10^{14}	11.5×10^{14}	15.3×10^{14}
λ_0/nm	660	558	372	260	196



图 6-15 光电管

光电管是一只密封的球形玻璃泡，球心处装有一个金属阳极 A，玻璃泡内壁正对阳极的一部分涂有碱金属，作为阴极 K，阳极和阴极都用导线引出玻璃球壳外。玻璃球内抽成高度真空。

爱因斯坦用光量子解释了一些理论上的问题，并成功地解释了光电效应，由此获得了 1921 年的诺贝尔物理学奖。

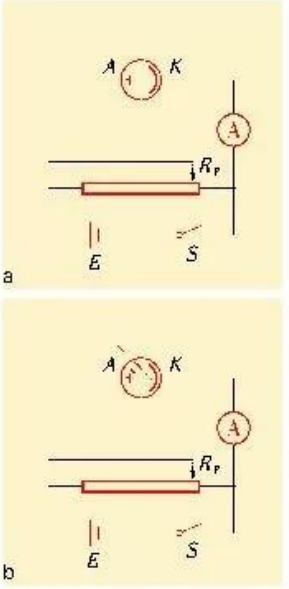


图 6-16 光电效应实验电路

连续光谱与线光谱

分光镜中有一个三棱镜，可以把复色光进行分解，是光谱分析中的重要仪器。

牛顿用三棱镜将太阳光分解成红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫的彩色光带，这种通过分光镜得到的彩色光带叫做**光谱**。太阳光的光谱是从红到紫连续分布的，这叫做**连续光谱**。灼热的固体和液体、高压气体发出的都是连续光谱，图 6-17 是灯泡中的钨丝通电后被加热到 3000 ℃时发出的连续光谱。

线光谱中又分明线光谱和暗线光谱。

图 6-18 是氢的光谱，这种光谱是不连续的，在黑暗的背景上只有几条发亮的光谱线，这样的光谱叫做**线状光谱**，又简称线光谱。气态物质经加热或高压放电后发出的就是线状光谱。线状光谱中每条光谱线都对应着一种频率，不同物质的线光谱不同，因此，通过测定线光谱可以鉴别物质。

为了解释线状光谱，1913 年，丹麦物理学家玻尔在卢瑟福的原子核式结构模型的基础上，把普朗克的量子概念及爱因斯坦的光子概念引用到原子系统，对氢原子的线状光谱作出了解释。

不同的原子，结构不同，能级也不同，所以不同的原子发光频率不相同，光谱中亮线的位置也不同。在光谱学中，人们就是通过光谱分析知道是什么元素在发光。

尽管玻尔的理论在解释和预言氢原子光谱问题上取得了很大的成功，但是这个理论是经典力学和量子理论相结合的产物，因此必然存在自身无法克服的局限性。例如，玻尔的理论虽然对氢原子光谱做了很好的解释，但对于氢以外的其他元素的原子光谱却无法解释。20 世纪 20 年代发展起来的量子力学取代了玻尔的理论，它以全新的观念阐明了微观世界的基本规律，在涉及微观运动的各个领域都取得了巨大的成功。



图 6-17　通电后的灯泡钨丝，在温度高达 3000 ℃左右时的光谱



图 6-18　氢的线状光谱（明线光谱）

实物粒子与波

1924年，年轻的法国物理学家德布罗意(L. de Broglie)在他的博士论文《关于量子理论的研究》中提出：在实物和辐射(电磁波)之间应该存在某种对称性。他认为，既然辐射(例如光)显示出波粒二象性，而像电子这样具体的实物，其行为仅表现出粒子性，这是不对称的。实物也应当具有波粒二象性。德布罗意把实物粒子所对应的波叫做物质波，后人又称之德布罗意波。

物质波是对经典物理学在微观领域的又一次冲击，尽管它出乎常理，但独具一格，拓宽了人们的视野，使人们对自然的认识又深入了一步。

德布罗意的博士论文使学术委员会不知所措，最后寄给了爱因斯坦，征求他的意见。爱因斯坦被这篇论文深深打动了，他评论说："它是照在这个最难理解的物理学之谜上的一缕微弱的光线"，揭开了"自然界巨大面罩的一角"。

信息浏览

量子理论的应用

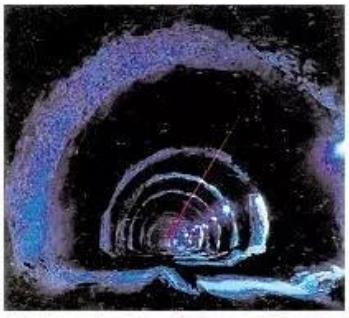
量子理论不仅使人们对自然的认识发生了又一次重大变革，而且也延伸到微观领域研究的各个方面。在这个理论指导下形成的技术产品，既有力地帮助了人们有效地进行科学研究和经济建设，也改善和丰富了人们的社会生活。

利用光电效应中光电流与入射光强度成正比的特性，可以制造光电转换器，实现光信号与电信号之间的相互转换。这些光电转换器如光电管等，广泛应用于光功率测量、光信号记录、电影、电视、自动控制，以及遥感、遥测等诸多方面。光电池(图 6-19)也是一种光电转换器，它是人造卫星和飞船的主要电源，也是人类正在开发的新能源。

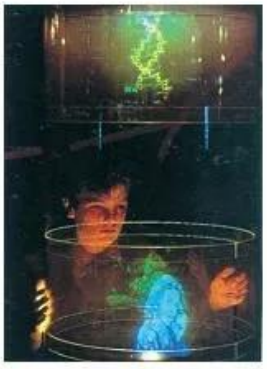
量子理论的发展，不但使人们对激光产生机理的认识愈加深入，而且为寻求具有更加优异特性的新型光子材料，充分利用成熟的微电子工艺制造出功耗低、响应快、寿命长、兼容性好的激光器提供了理论依据，使激光被更加广泛地应用于科研、生产和生活(图 6-20)。没有激光技术的发展，我们现在就不会拥有 CD、VCD、DVD，计算机中也不会有大容量的光存储器。



图 6-19 光电池经串并联组成的阵列



用激光检查隧道的质量



激光拍摄的全息像

图 6-20 激光的应用

利用无线电波通信是众所周知的。光既是粒子，又具有电磁波的特性，由于频率高，如果用作通信，其容量将比无线电波更大。激光器问世后，科学家就对利用激光通信进行了艰苦的探索。1966年，英籍华裔学者高锟提出用光导纤维取代传统的电缆传送光信息的设想，从此奠定了光纤通信的物质基础。而光纤通信的理论基础，则与量子理论有关。

根据量子理论制造的扫描隧穿显微镜，可看到单个原子的图像。

此外，核能的利用也与量子理论有关。

可以说，当今世界离不开量子理论，现代科学技术也离不开量子理论的支持。



图 6-21　有了激光器和光纤，互联网才能连通全球各地

家庭作业与活动

1. 计算波长为160nm的紫外线的光子的能量。
2. 能量是 22.5 eV的光子，波长是多少？（1 eV = 1.6×10^{-19} J。）
3. 估算红光、紫光光子的能量。由此能否大致估计出可见光范围内光子能量的数量级？

6.x

第 6 章家庭作业与活动

1. 相对论中物体长度缩短与物体热胀冷缩的长度缩短是否同一回事?
2. 有一枚相对于地球飞行的宇宙火箭,在地球上的观察者将测得火箭上的长度缩短、过程时间延长,有人因此得到结论说:火箭上的观察者将测得地球上的物体比火箭上同类物体更长,而同一过程的时间缩短。这个结论对吗?
3. 如果火箭的速度达到 8000 m/s,它的质量是静质量的几倍?如果火箭的速度达到 80000 m/s,它的质量是静质量的多少倍?这时可否不考虑质量的变化?
4. 太阳由于向各方空间辐射能量,每秒损失质量 4×10^{9} kg,求太阳辐射的功率。
5. 在可见光范围内,哪种光的光子能量最大?
6. 我们可以说"红光的光子"、"黄光的光子"吗?有没有"白光的光子"?为什么?
7. 学了本章后,你能简单谈一下你对时空的认识吗?

课题研究

可从下面选一个课题。

1. 通过阅读科普读物,观看科教影视片,网上查找或聆听专家报告,收集相对论的有关资料,自选具体内容,撰写一篇与相对论有关的科普小论文,或科普小小说。

2. 普朗克、爱因斯坦等人建立的量子论,后来被物理学家们进一步发展为量子力学,它研究的是关于微观粒子运动的基本规律。请围绕这个主题到图书馆或者上网查找有关量子论在生活、生产和科技领域应用的资料,写一篇量子论给社会带来巨大影响的调研报告。

向你推荐一些参考资料:

阿尔伯特·爱因斯坦著. 郝建钢译. 相对论的意义. 上海:上海科技教育出版社. 2003.

哈拉尔德·弗里奇著. 邢志忠译. 改变世界的方程——牛顿、爱因斯坦和相对论. 上海:上海科技教育出版社. 2005.

伽莫夫著. 暴永宁译. 吴伯泽校. 从一到无穷大. 北京:科学出版社. 2003.

伽莫夫、斯坦纳德著. 吴伯泽译. 物理世界奇遇记. 长沙:湖南科学技术出版社. 2000.

史蒂芬·霍金著. 许明贤、吴忠超译. 时间简史. 长沙:湖南科学技术出版社. 2001.

史蒂芬·霍金著. 吴忠超译. 果壳中的宇宙. 长沙:湖南科学技术出版社. 2002.

总结与评价　课题研究成果报告会

亲爱的同学：

祝贺你即将完成物理 2 的学习。在那些激动人心的探索活动中，你和你的同学经受了困难的考验，也享受了成功的喜悦。在学完本书后，你一定想让同学们分享自己的研究成果，那么，就让我们开一个“课题研究成果报告会”吧！

你可以把你平时做过的最满意的课题拿来，再作进一步的研究，取得更有意义的成果，到这个报告会上去展示；你也可以从下面的研究课题示例中，选择你感兴趣的课题，自己一人或与同学合作进行研究。当然，你还可以自选其他课题进行研究。

在这个报告会上，也许没有宏篇大论，也许没有什么重大发明，但这里展示的成果，铭刻着你们的勤奋，凝聚着你们的心血……这里，最可贵的是真实！

简单就是美丽，巧妙就是智慧！

这个“课题研究成果报告会”，将让你的智慧放出灿烂的火花，让你的才智得到充分的展示！

研究课题示例

运动场中的抛体运动和圆周运动

体育运动中的许多项目都跟抛体运动和圆周运动有关。请在体育课或学校运动会上观察投掷、跳远、跳高等运动，用所学的物理知识进行分析，从物理学的角度提出一个提高运动成绩的方案。进行这项课题研究时，要向体育老师请教。

测量人在做某种运动时的功率

这是一项很有意义的研究，需要你自行设计实验。你可以有很多方法，这就要发挥你的创造性了。你可以测一位同学做这项运动时的平均功率，也可以测他在某一时刻的瞬时功率，还可以将几位同学运动时的功率进行比较。

研究汽车的启动过程

用你在物理课中学过的功与动能变化的关系，分析汽车启动时牵引力、速度与发动机输出功率的关系。访问驾驶员，了解他们在汽车启动过程中是如何操作的，这种操作与你的理论分析有什么不同，驾驶员这样操作的理由是什么。

关于当地能源状况的调查

通过社会调查，了解当地所使用的几种主要能源，分析能源的供需情况和能源利用的效率。就能源与环境、能源与可持续发展等方面的问题向当地政府提出一些建议。

我国的航天事业

从互联网和图书、期刊中，收集关于我国航天事业发展成就和前景的资料。如果能向同学们做一个介绍我国航天事业发展的综合报告，一定会受到同学和老师的欢迎。

相对论时空观给我们的启示

这个课题具有较强的理论性，你需要通过图书资料自学一些相对论理论，当然，还需要请教老师。这项课题研究，将会发展你的理论思维能力，使你感受到现代物理的魅力。

设计草坪或蔬菜地的自动喷灌装置

这是一项很有实用价值的研究课题。可利用你学过的物理知识和身边的器材进行设计。如果你能根据自己的设计制作一个模型，演示给同学们看，一定会给他们一个惊喜的。

游乐场中的力学

你已经知道过山车的力学原理了。如果你去游乐场，不妨对其他各种游乐项目进行一番考察，用学过的物理知识分析它们的物理原理。如果你能对某项设施提出改进的建议（如怎样保证游客的安全），将会受到有关部门的赞扬。

评价表

课题名称：

姓名：　　完成日期：

合作者：

1. 课题设计思路	2. 课题研究过程
3. 收集的主要资料或证据	4. 分析和论证
5. 研究成果和结论	

6. 自我评价

我在课题研究中的表现：　　我对小组研究的贡献是：　　我擅长的是：

我在研究中遇到的困难是：　　我在这些方面应该做得更好：

自我评价等级(在评价的等级上画圈)

A级(优秀)　B级(良好)　C级(合格)　D级(低于标准)

7. 小组评语

建议从成果的科学性、创造性、实践性，以及从参与课题研究的热情和态度、克服困难的勇气、团队合作精神等方面进行评价。

8. 教师评语

建议从成果的科学性、创造性、实践性，以及从参与课题研究的热情和态度、克服困难的勇气、团队合作精神等方面进行评价。

高中物理选修系列介绍

亲爱的同学：

在完成了《物理 1》、《物理 2》的学习后，你准备选修哪个系列继续学习物理呢？为了帮助你选择，现将本套教科书提供的三个选修系列的特点介绍如下，供你参考。

选修系列 1

这是为对人文学科感兴趣的同学开设的。有《物理选修 1-1》、《物理选修 1-2》两册。本系列以物理学的核心内容为载体，侧重物理学与社会的相互关联和相互作用，突出物理学的人文特色，注重物理学与日常生活、社会科学以及人文学科的结合，强调物理学对人类文明的影响。

选修系列 2

这是为对技术感兴趣的同学开设的。有《物理选修 2-1》、《物理选修 2-2》、《物理选修 2-3》三册。本系列以物理学的核心内容为载体，侧重从技术应用的角度展示物理学，强调物理学与技术的结合，着重体现物理学的应用性、实践性。

选修系列 3

这是为对物理特别感兴趣的同学开设的。有《物理选修 3-1》、《物理选修 3-2》、《物理选修 3-3》、《物理选修 3-4》、《物理选修 3-5》五册。本系列将让你比较全面、系统地学习物理学的基本内容，进一步了解物理学的思想和方法，较为深入地认识物理学在科学技术中的应用以及对经济、社会的影响。

现在，你已经作出了自己的选择吗？

预祝你在新的学习进程中获得成功！

后　记

本书根据《基础教育课程改革纲要(试行)》的精神,按照《普通高中物理课程标准(实验)》的要求,力求体现课程改革的理念,贯彻和完成《课程标准》所规定的多方面教育任务,全面推进素质教育。

本套教科书主编:束炳如、何润伟。本册书主编:何润伟、王继珩。编写人员(按姓氏笔画为序):王天娇、王可兵、王继珩、王溢然、杨思峰、何润伟、梅小景、戴结林。

在本书的编写过程中,得到了许多专家、学者、教学研究人员和广大教师的帮助和支持。沈永昭教授和刘红博士审阅了全书书稿。汪玉强、唐定山、张庆铮等同志就本书中的实验给予了帮助。路文艳、李跃红等同志对本书中习题设计给予了帮助。上海科技教育出版社的编辑朱惠霖、汤世梁、李志棣和有关工作人员为本书出版在组织协调、编辑加工、美术设计、排版印刷等方面做了大量的工作。特别是全国中小学教材审定委员会的委员们严格把关,对我们的送审本提出了许多宝贵的修改意见和具体修改细节。在此一并表示诚挚的谢意。

编写基于模块结构的普通高中物理教科书,是一个全新的课题。我们编写组全体成员认真学习,潜心研究,分工协作,充分发扬团队精神,终于可以把本书呈献给大家。但由于水平有限,仍不免有错误和不当之处。竭诚希望试验区的师生和广大读者提出批评和建议。

编　者

2004 年 6 月

修改说明

本书自国家级实验区试用以来，实验区的学生、教师和教研人员对教科书给予了热情关怀和支持，在充分肯定本套教科书特色的同时，也对教科书的进一步修改和完善提出了不少宝贵的意见和建议。两年多来的教学实践为修改本书奠定了基础。

新课标教科书的研制过程是合作、对话、协商、共建的过程，为此，编写组始终与实验区的教师和教研员保持着密切的联系和互动。本次修改前专门召开了关于教科书的研讨会和征求意见会，进一步征求了教师对教科书的意见，在此基础上，我们对教科书进行了认真的修改。

这次修改仍坚持按照《普通高中物理课程标准(实验)》的要求，在保持本套教科书特色的基础上，力图更好地体现《课程标准》的改革理念，努力吸取实验区教与学的新鲜经验，使教科书更加切合教学实际，更加利教便学。

参加本书修改的除本册教科书的主编和编写人员外，还有陈聆、顾民永等同志，最后由束炳如、何润伟统稿定稿。

在本书修改过程中，得到了物理学科的专家、学者、研究人员、教师、学生和家长等多方面的支持和帮助。王文祥、罗基鸣、徐建国、梁明奋等同志对本书的修改提出了很多宝贵的意见。上海科技教育出版社的责任编辑李志棣和有关工作人员为本书的修改、编辑、设计等方面做了大量工作，并提出了许多宝贵的建议。在此，编写组特向提供帮助的各方面人士表示由衷的感谢。

研制符合课改理念的、有特色的、高质量的高中物理教科书，始终是我们所追求的目标。随着本套教科书进入更多的实验区，恳请专家、学者、教师、教研员、学生和家长对本书提出宝贵的意见和建议，与我们共建这套教科书。

编　者

2007 年 5 月