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

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。

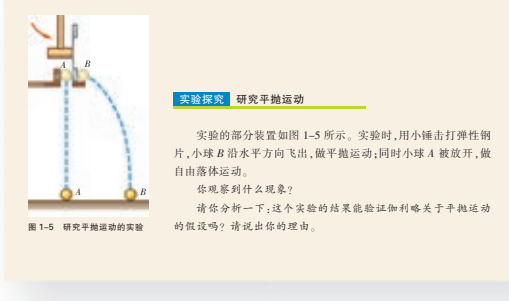
为了让你在学习《物理 2》的过程中获得更大的成功，请浏览本书栏目介绍。

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。


第6章
经典力学与现代物理

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。

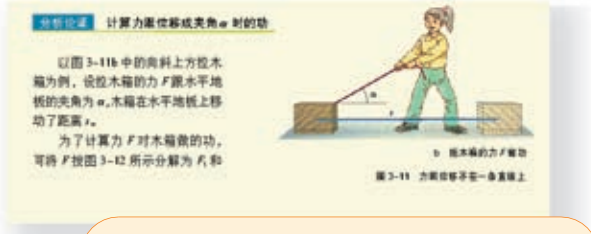

实验探究 研究平抛运动

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。

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。

图 1-5 研究平抛运动的实验


分析论证 计算力在位移成夹角 α 时的功

以图 3-11b 中的向斜上方拉木箱为例，设拉木箱的力 F 跟水平地板的夹角为 α，木箱在水平地板上移动了距离 l。

为了计算力 F 对木箱做的功，可将 F 按图 3-12 所示分解为 F_1 和

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

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

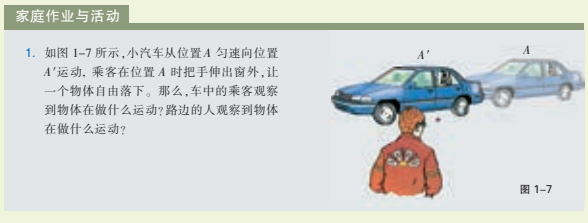
多学一点

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　匀速圆周运动的速度

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。

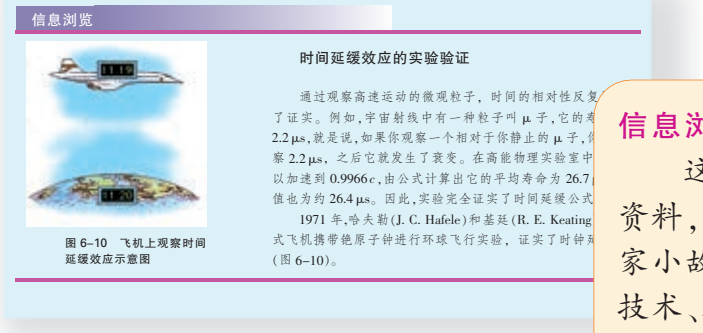

家庭作业与活动

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

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

图 6–10　飞机上观察时间延缓效应示意图

通过观察高速运动的微观粒子，时间的相对性反复了证实。例如，宇宙射线中有一种粒子叫 μ 子，它的寿 2.2 μs，就是说，如果你观察一个相对于你静止的 μ 子，你 察 2.2 μs，之后它就发生了衰变。在高能物理实验室中 以加速到 0.9966c，由公式计算出它的平均寿命为 26.7 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 式飞机携带铯原子钟进行环球飞行实验，证实了时钟 (图 6–10)。

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

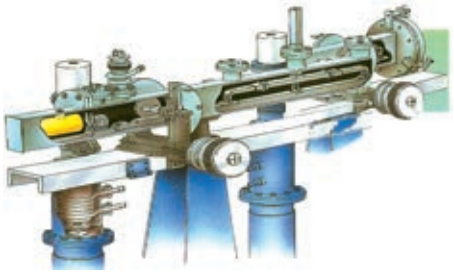
*6.4　微观世界与量子论　122

总结与评价　课题研究成果报告会　128

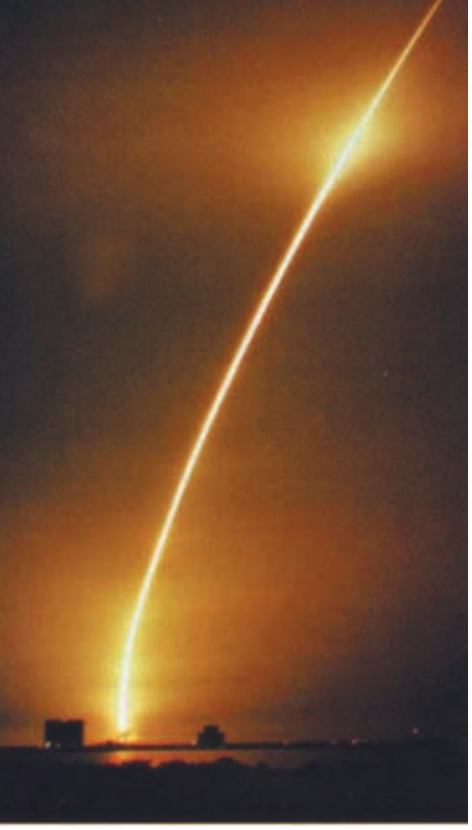
研究课题示例　128

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？

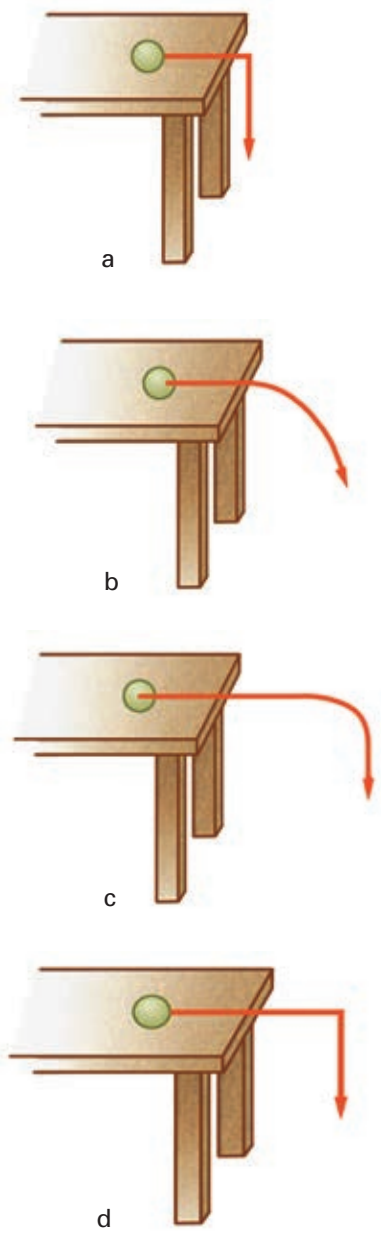


图 1–3　哪一幅图能表示小球运动的轨迹

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。

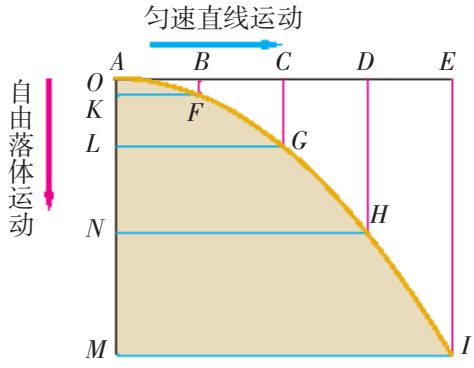


图 1–4　伽利略用几何方法得到的平抛物体的运动轨迹

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？

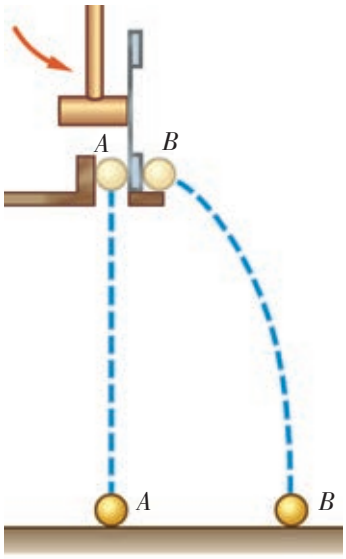


图 1–5　研究平抛运动的实验

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。

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。

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

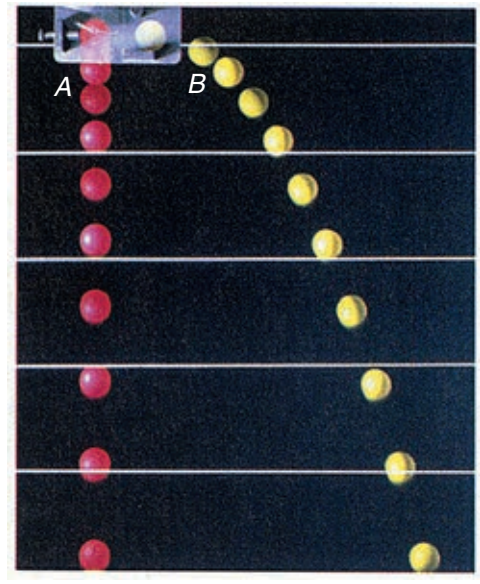


图 1–6　平抛运动的频闪照片

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？

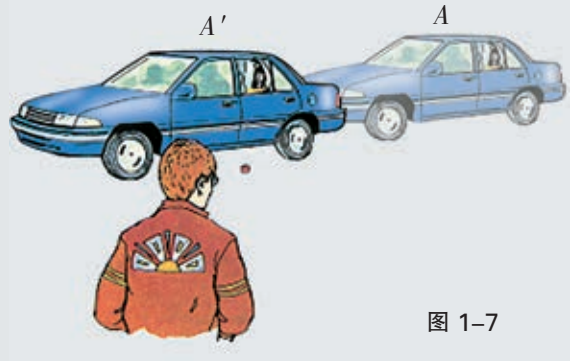


图 1–7

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

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？

分析　船在渡河过程中的运动是由两个分运动合成的：船的

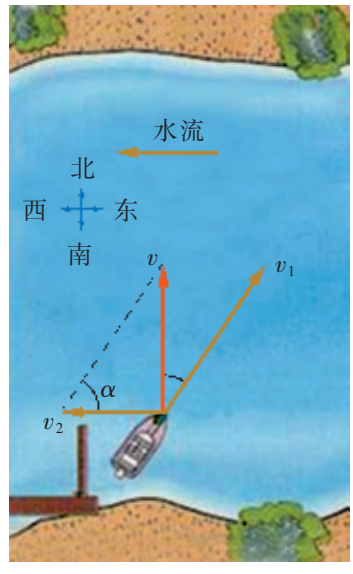


图 1–8　研究船渡河的运动

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

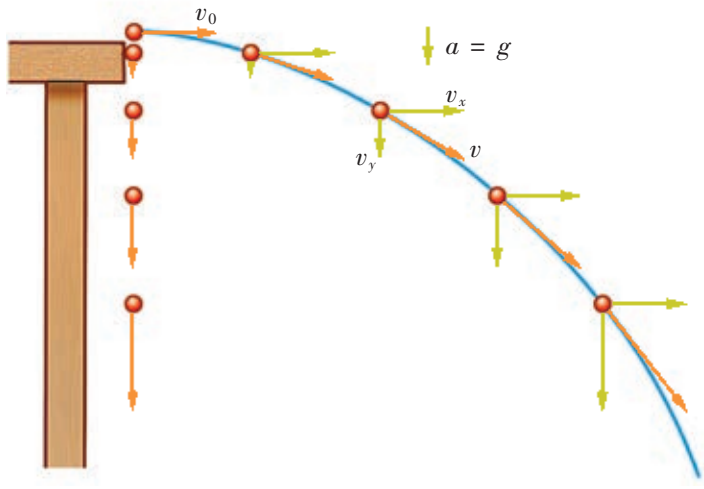


图 1–9 平抛运动

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/s^2）

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 _____。

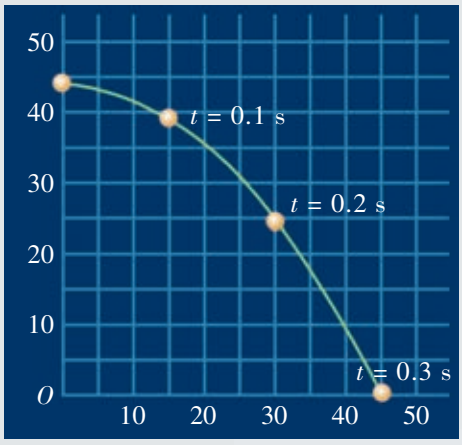


图 1–10

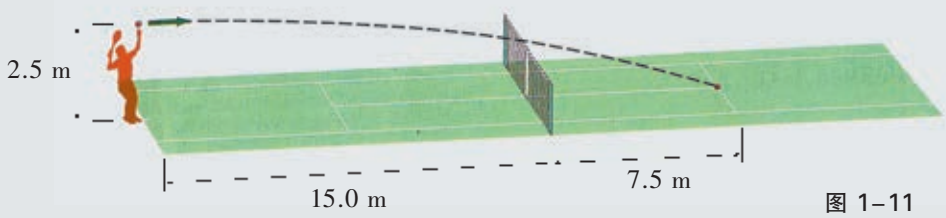


图 1–11

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。

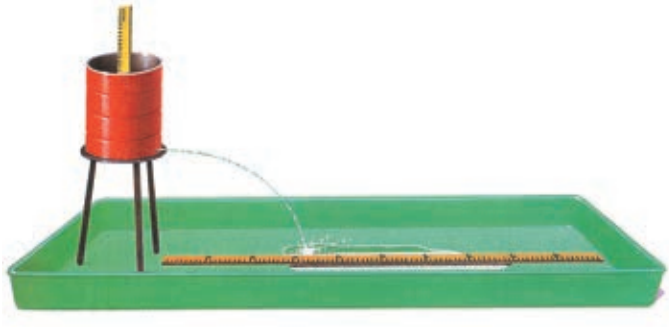


图 1–12　研究水柱的射程

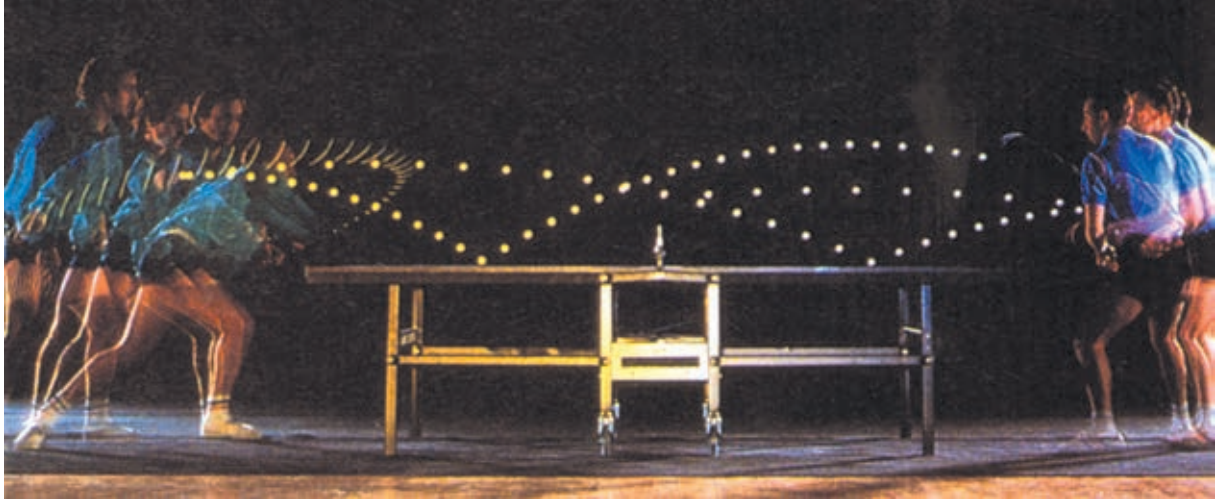


图 1–13　乒乓球的运动轨迹

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∶…

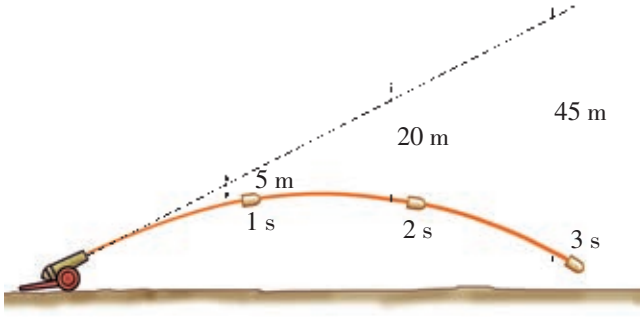


图 1–15　炮弹做斜抛运动时的轨迹

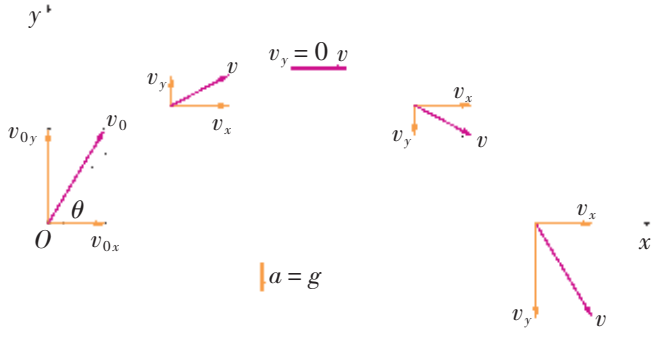


图 1–16　斜抛运动沿水平和竖直方向分解

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：

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。

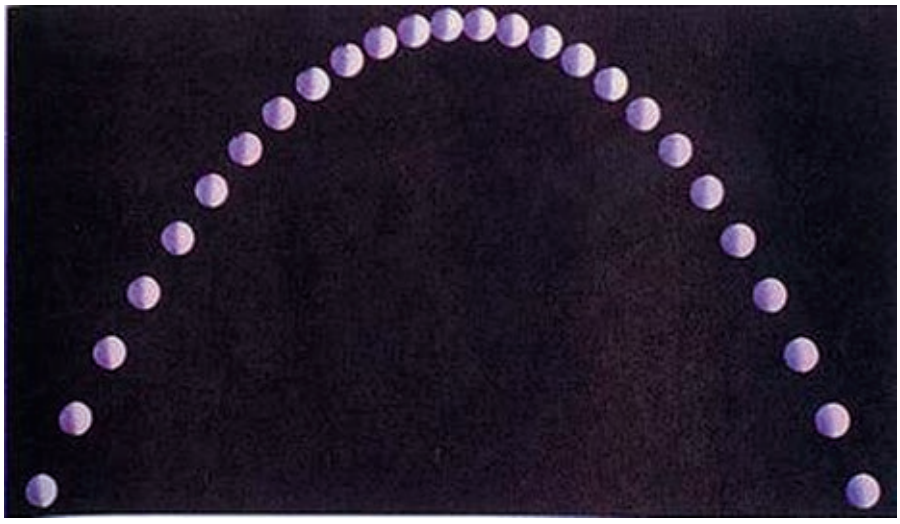


图 1–17　斜抛小球的频闪照片

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?

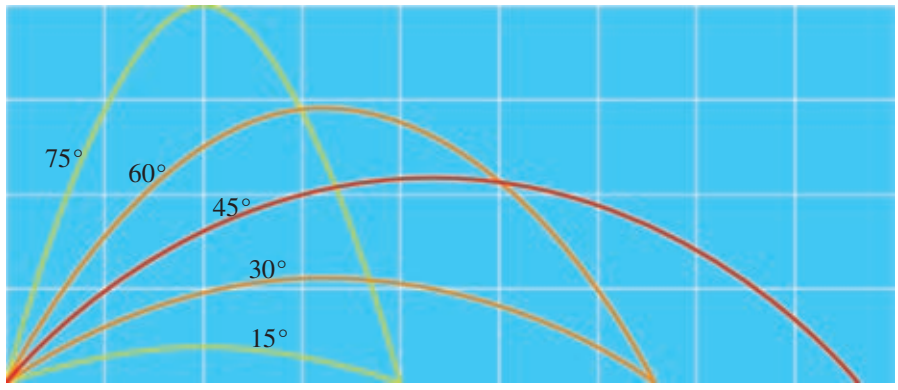


图 1–18　研究喷水枪喷射出的水流的射程

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：　$X=v_0\cos\theta\cdot T=\dfrac{2v_0^2\sin\theta\cos\theta}{g}=\dfrac{v_0^2\sin2\theta}{g}$

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！

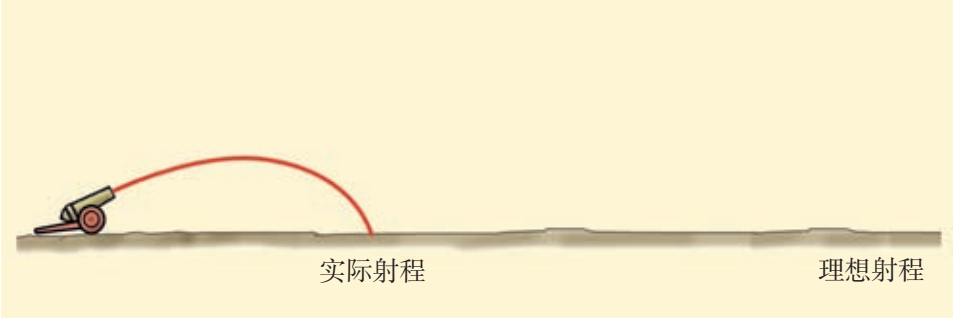


图 1–19　炮弹运动的理想射程和实际射程

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一一计算出来，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？

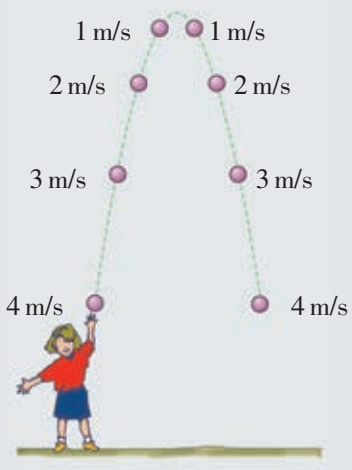


图 1–20

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

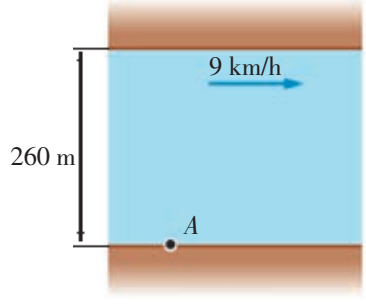
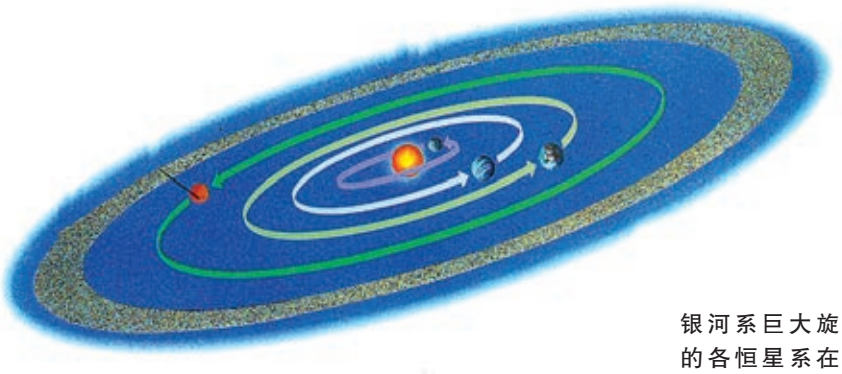
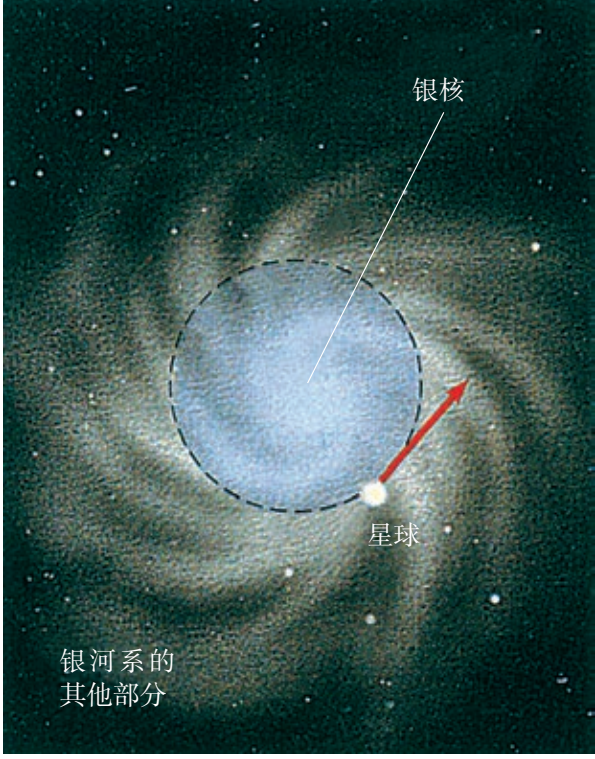


图 1–23



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？

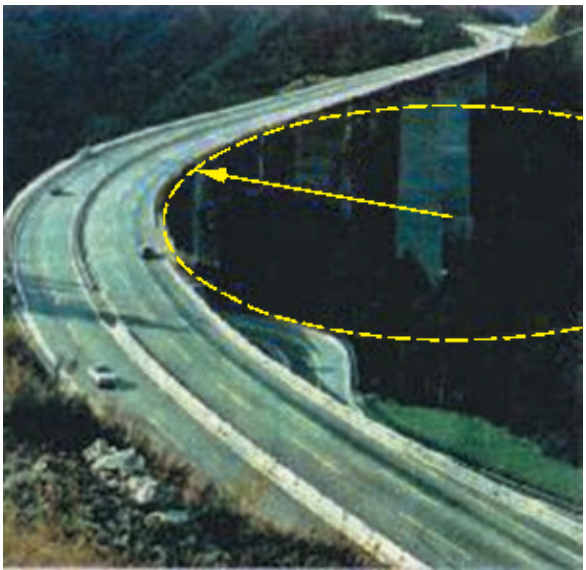
做圆周运动的物体，速度在改变，因而就有加速度，那么做圆周运动物体的加速度有什么特点？力是产生加速度的原因，那么，使物体做圆周运动的力有什么特点？圆周运动遵循哪些运动规律呢？

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？

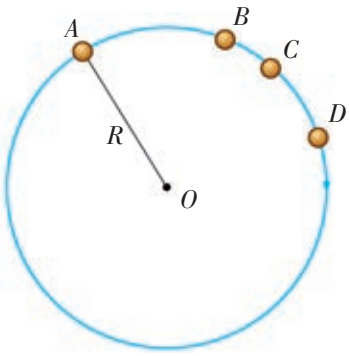


图 2–2　圆周运动的路程与位移

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。

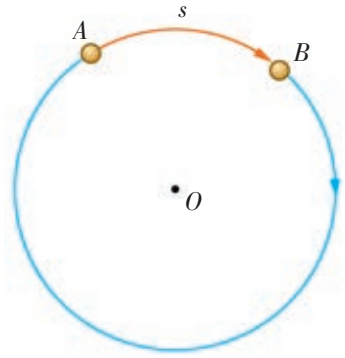


图 2–3　物体经过的弧长与所用时间的比值是圆周运动的线速度

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：

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



图 2–4　钟表指针上的各点都可看作在做匀速圆周运动

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？

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？

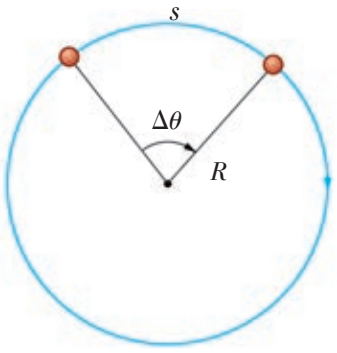


图 2–7 用角速度表示圆周运动的快慢

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



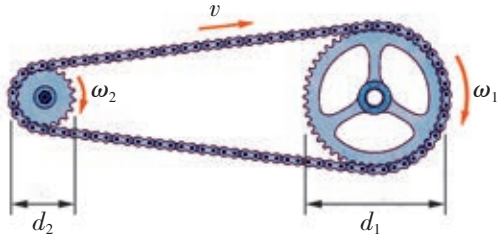


图 2–8 自行车与链条传动

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。

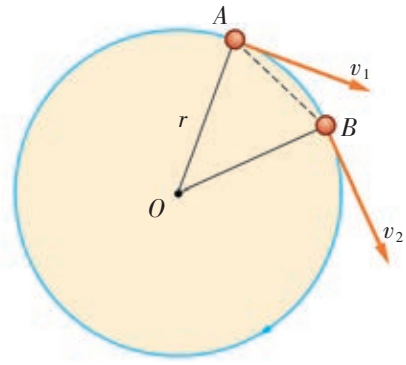


图 2–9　当 B 点无限逼近 A 点时，AB 之间的平均速度就是 A 点的瞬时速度

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，是圆周上这点的切线方向。

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？

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

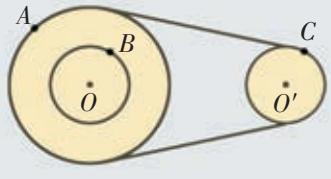


图 2–11

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？

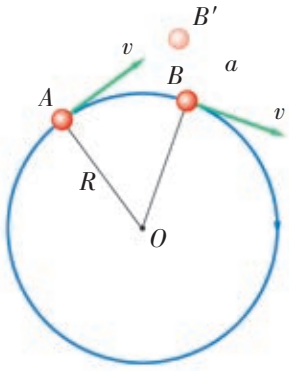


图 2–12　匀速圆周运动具有指向圆心的加速度

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？

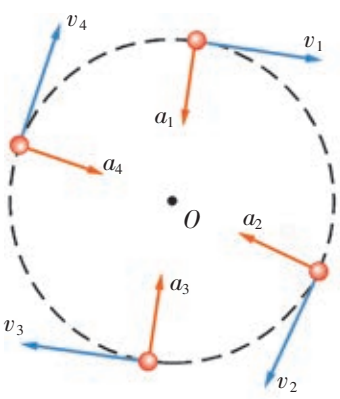


图 2–13　做匀速圆周运动物体的加速度与速度方向垂直指向圆心

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 $a=\omega^2R$？

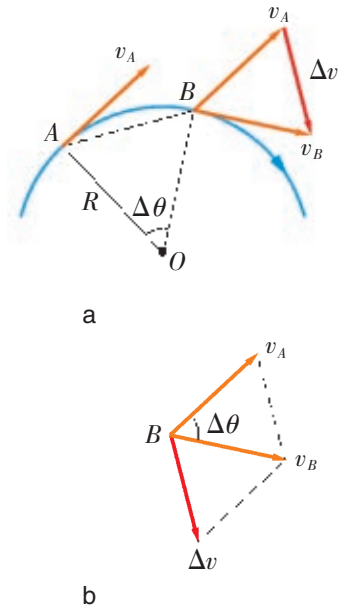


图 2–14　从速度合成的角度看圆周运动速度的变化

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

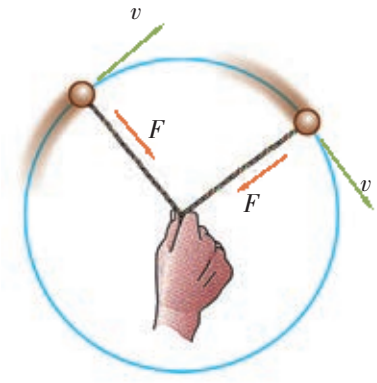


图 2–16　小球做圆周运动的向心力从哪里来

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。

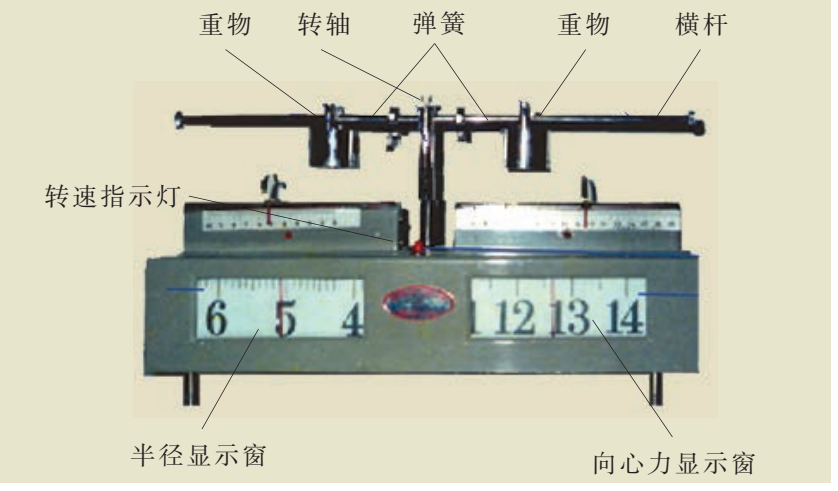


图 2–17　向心力实验仪

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 的平方成正比。

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

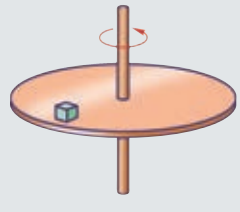


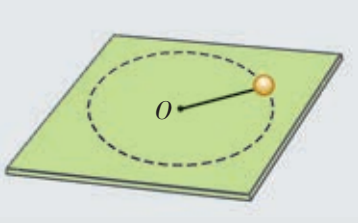
图 2–19

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。

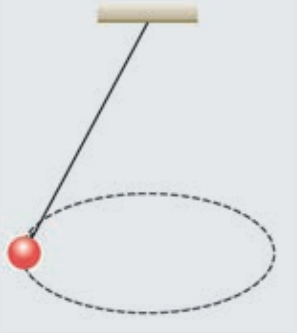
4. 图 2–20 是一些物体做匀速圆周运动的示意图，试在图上画出各物体所受到的向心力，并分析向心力的来源。



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？

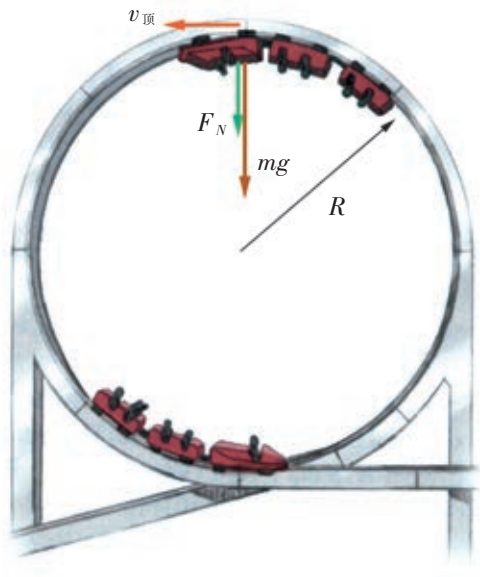


图 2–23　分析过山车的原理

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 $m\dfrac{v^2}{R} = mg$，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。

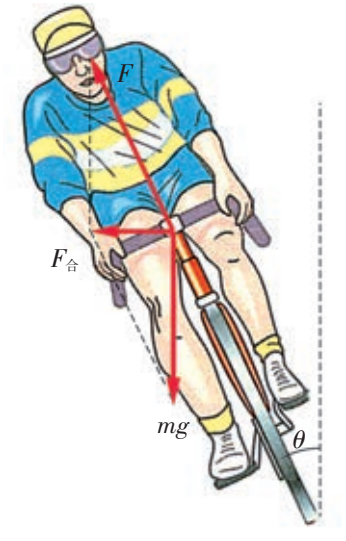
请思考并讨论：

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。



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

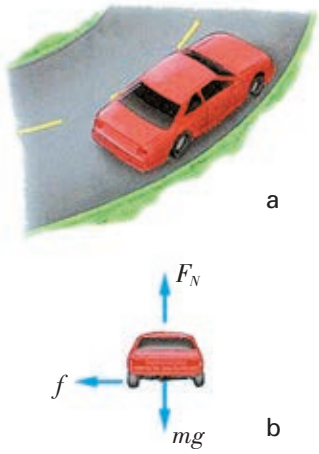


图 2–26　汽车在水平路面转弯

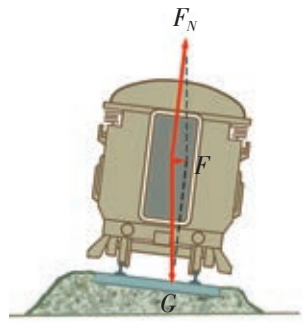


图 2–27　火车在弯道处转弯

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。

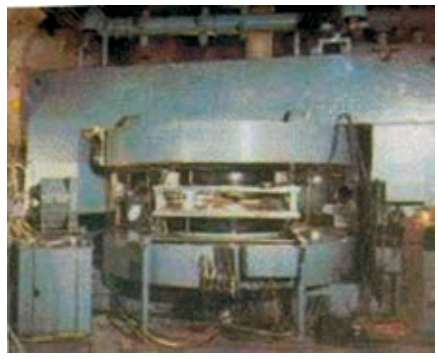


图 2–28　回旋加速器

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。

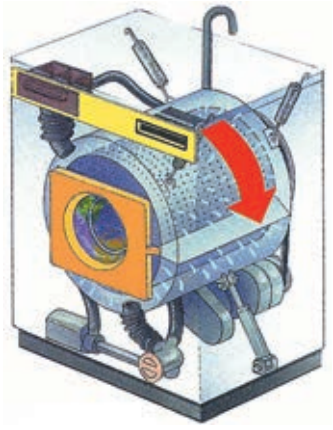


图 2–31　洗衣机甩干筒的壁上有许多小孔，当筒绕轴高速旋转时，衣物中的水从小孔中被甩出

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？

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。）

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

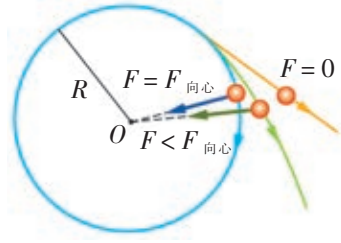


图 2–33 做匀速圆周运动物体所受指向圆心的合力改变时，运动的路径也将变化

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。

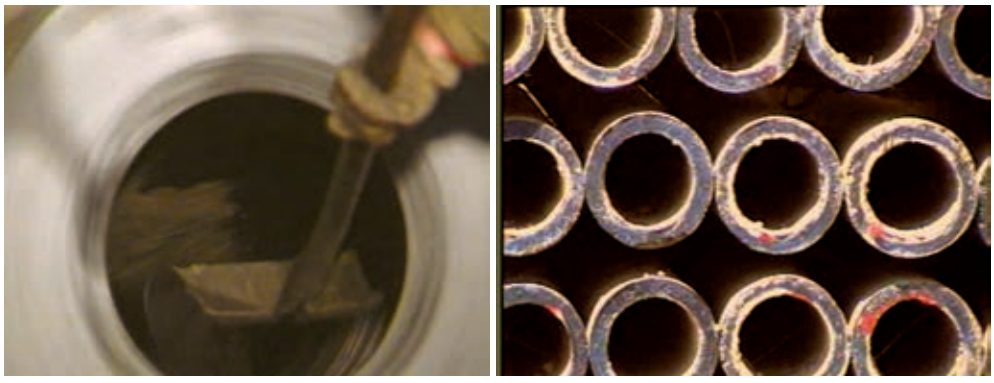


图 2–34　水泥涵管是怎么制作的

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。（月球自转一转的时间跟它绕地球公转一周的时间相同）
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。

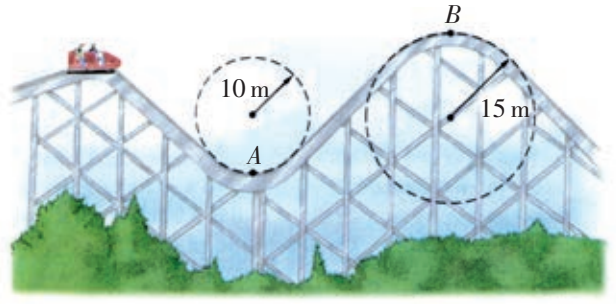


图 2–38

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/s^2）