

PUTONG GAOZHONG JIAOKESHU
WULI

普通高中教科书



普通高中教科书

物理

必修

第二册

物理

必修

第二册



普通高中教科书

物理 必修

第二册

上海科技教育出版社有限公司出版

(上海市闵行区号景路159弄A座8楼 邮政编码201101)

各地新华书店发行 上海华顿书刊印刷有限公司印刷

开本 890×1240 1/16 印张 6.75

2022年7月第1版 2025年7月第5次印刷

ISBN 978-7-5428-7806-9/G·4614

定价:8.02元

价格依据文号:琼价费管[2016]49号

举报电话:12315



上海科技教育出版社

上海科技教育出版社

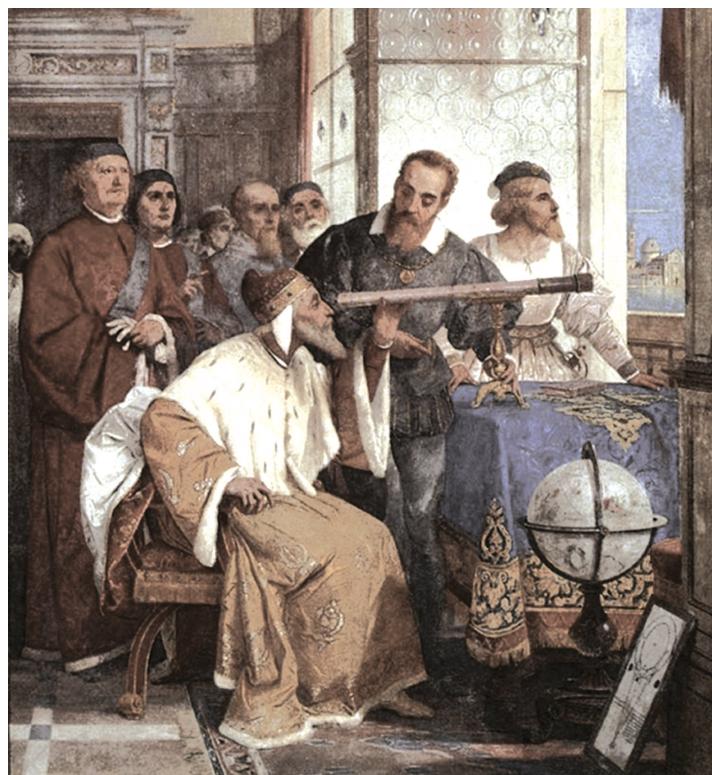
普通高中教科书

物理

必修

第二册

总主编 束炳如 何润伟



亲爱的同学：

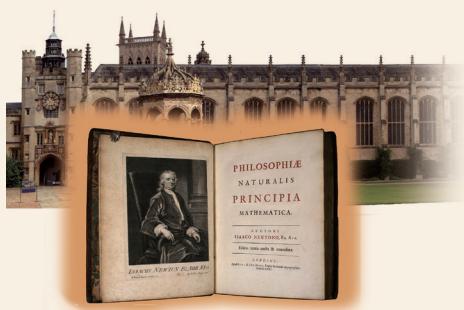
欢迎你学习《物理·必修·第二册》！

你已经投身于一项激动人心的探索活动。让我们继续携手，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。

在《物理·必修·第二册》中，我们将学习曲线运动，探索机械能及其守恒定律，领会万有引力定律的重要意义，了解从牛顿力学到现代物理的变革，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·必修·第二册》的过程中获得更大的成功，请浏览下面的本书栏目介绍。



每章的开头都有一些情境，提出一些问题，让你明确本章研究的主要内容。

第5章 经典力学的局限性与相对论初步

经典力学（classical mechanics），通常叫牛顿力学。牛顿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，总结了经典力学的基本规律。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。著名物理学家开尔文勋爵（Lord Kelvin）踌躇满志地宣告：“科学大厦已经基本建成。”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。”

开尔文担忧的“两朵乌云”是什么呢？

当物理学研究扩展到微观、高速领域时，人们发现经典力学不再适用。20世纪初，物理学家创立了相对论和量子论，驱散了“两朵乌云”，奠定了现代物理学的基础。

本章你将在了解经典力学巨大成就及其局限性的基础上，初步了解相对论时空观，关注宇宙起源和演化，体会人类对自然界的探索永无止境。

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2-1-4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。

用小锤击打弹性钢片后，你观察到了什么现象？

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研究结论吗？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研究结论。

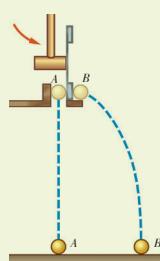


图2-1-4 研究平抛运动的实验

分析与论证

这里你将进行分析、综合，并运用数学工具进行推理，得出物理学规律和公式。通过这一过程，你将体会科学思维的魅力。

分析与论证 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 3-4-3 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：

学生必做实验 探究向心力大小与半径、角速度、质量的关系

我们知道，向心力的大小跟运动物体的质量、速度和圆周运动的半径有关。本实验根据向心力公式，进一步探究向心力大小与物体的质量、角速度、圆周半径之间的关系。

如图 3-2-5 所示，向心力实验仪主要由调速轮、长滑槽、短滑槽、横臂、弹簧测力套筒、标尺、转动手柄、传动皮带、小球、基座等组成。

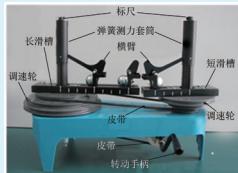


图 3-2-5 向心力实验仪

学生必做实验

这里为你提供了完整的实验活动，让你通过动手实验，探索物理规律，学习物理方法，形成物理观念，提高解决问题的能力，体验成功的喜悦。

信息浏览、STSE

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技术、社会、环境的紧密联系。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，有一种粒子叫 μ 子，它的寿命只有 $2.2 \mu\text{s}$ ，就是说，如果你观察一个相对于你静止的 μ 子，你只能观察 $2.2 \mu\text{s}$ ，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 $0.9966 c$ ，由公式计算出它的平均寿命为 $26.7 \mu\text{s}$ ，实验值也为约 $26.4 \mu\text{s}$ 。因此，实验完全证实了时间延缓公式。

1971 年，哈夫勒 (J. Hafele) 和基廷 (R. Keating) 用喷气式飞机携带铯原子钟进行环球飞行实验，证实了时间延缓效应 (图 5-3-6)。

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 3-1-7 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 $v = \frac{AB}{\Delta t}$ ，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，是圆周上这点的切线方向。

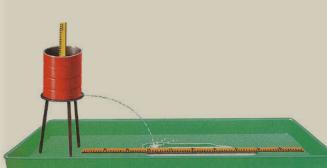
多学一点

这里将介绍更多更深的奥秘，以开阔你的视野。你如果有兴趣，可以作进一步的探索。

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 2-2-6 所示的装置研究水桶内水的深度与水柱射程的关系，并用适当的方式描述这种关系。

图 2-2-6 研究水柱的射程

目 录



第 1 章 功和机械能 6

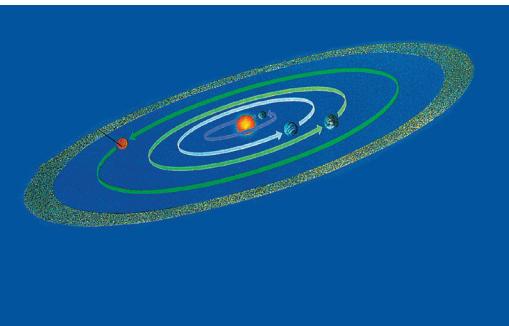
1.1 动能变化跟做功的关系	7
1.2 功与功率	12
1.3 动能定理的应用	17
1.4 势能的变化与机械功	21
1.5 机械能守恒定律	26

第 2 章 抛体运动 31

2.1 飞机投弹与平抛运动	32
2.2 平抛运动的规律	36
2.3 斜抛运动	41

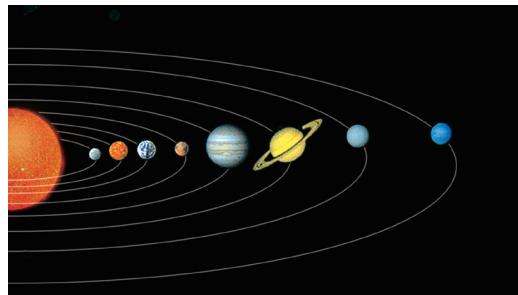
第 3 章 圆周运动 47

3.1 怎样描述圆周运动	48
3.2 匀速圆周运动的规律	52
3.3 圆周运动的案例分析	58
3.4 离心现象及其应用	61



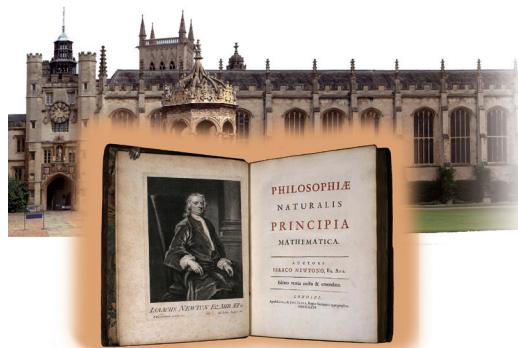
第4章 万有引力与航天 67

- 4.1 从托勒密到开普勒 68
- 4.2 万有引力定律是怎样发现的 72
- 4.3 飞出地球去 78



第5章 经典力学的局限性与 相对论初步 86

- 5.1 经典力学的巨大成就和局限性 87
- 5.2 狭义相对论的基本原理 92
- 5.3 相对论的时空观与宇宙演化 97



- 总结与评价 课题研究成果报告会 104
- 研究课题示例 104
- 评价表 105



第 1 章 功和机械能

你坐过游乐园里的过山车吗？如果坐过，你的感觉如何？过山车时而在低处蜿蜒穿行，时而在高处倒悬着掠过弧顶。当它从高处直冲而下，速度最高可达 200 km/h，当它沿扭转的轨道疾驰，你瞬时感觉天旋地转，定会惊叫连连。太惊悚了！太刺激了！

你能从物理学的角度思考过山车的原理吗？这里涉及做功、物体的动能、势能及其相互转化等物理学原理呢！

本章将以汽车的运动为背景，深化对功和功率的认识，通过实验探究物体的动能变化跟做功的关系。接着以打桩机的工作为背景，研究重力做功与重力势能变化的关系，通过实验证明机械能守恒定律，体会守恒观念对认识物理规律的重要性。

1.1 动能变化跟做功的关系

如图 1-1-1 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，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？

从汽车的动能变化谈起

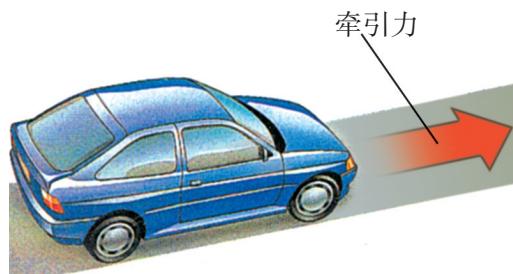


图 1-1-1 汽车在牵引力作用下运动

分析与论证 研究汽车动能的变化过程

如图 1-1-2 所示，假设有一辆质量为 m 的汽车，不受阻力作用，在不变的牵引力 F 作用下沿平直公路行驶，速度由 v_1 增大到 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 、行驶距离 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 $a = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2s}$

由此可得

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

请想一想，(1)式表示什么物理意义？

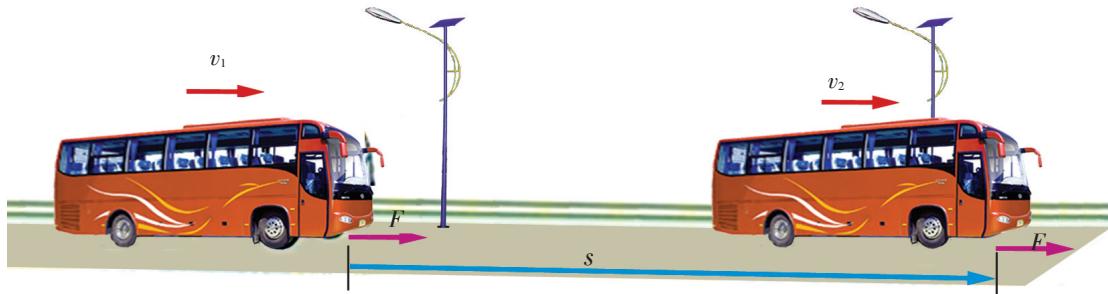


图 1-1-2 汽车在不变的牵引力作用下运动，速度增大

动能 动能定理

我们来分析(1)式的物理意义。

- 等式左边的 Fs 是我们在初中就已熟悉的功。汽车在行驶距离 s 的过程中牵引力 F 所做的功 $W = Fs$ 。

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。

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，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？

物理量的增量是指后一时刻的量值减去前一时刻的量值。

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：

$$W = \Delta E_k \quad (2)$$

需要指出，上式虽然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)。如果同时有多个力对物体做功，则动能定理中的 W 应理解为所有力对物体做功的总和。

动能定理是一条重要的物理规律，(2)式是它的数学表达式。在下一节我们将运用 (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，能否用实验对此进行验证呢？

制订计划与设计实验

为了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。

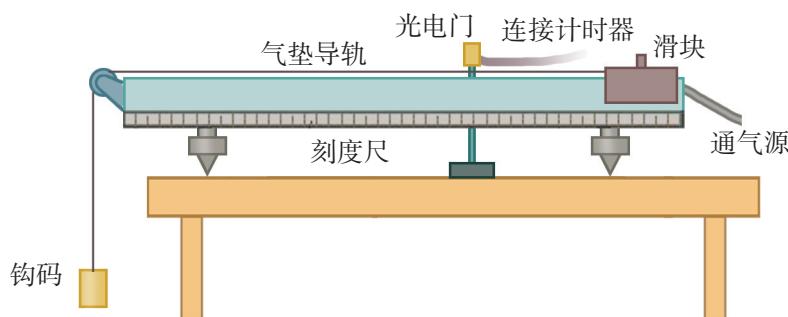


图 1-1-3 用气垫导轨验证动能定理的实验装置

图 1-1-3 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，选用其他器材设计实验。图 1-1-4 的方格坐标纸可供你在实验中选用。

你选用了哪些实验器材？

实验中钩码的质量要远小于滑块的质量，为什么？

请写出你设计的实验方案。

以下两个研究计划供你参考，你也可以制订其他计划。

1. 直接验证 逐一比较外力对物体做的功与物体动能的增量。

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

进行实验与收集证据

请写出你实验中的主要步骤，设计表格，记录实验中收集到的数据。

分析论证

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？

科学不能停留在单纯的观测数据上，必须对观测到的数据进行细致的分析，才能找到规律。

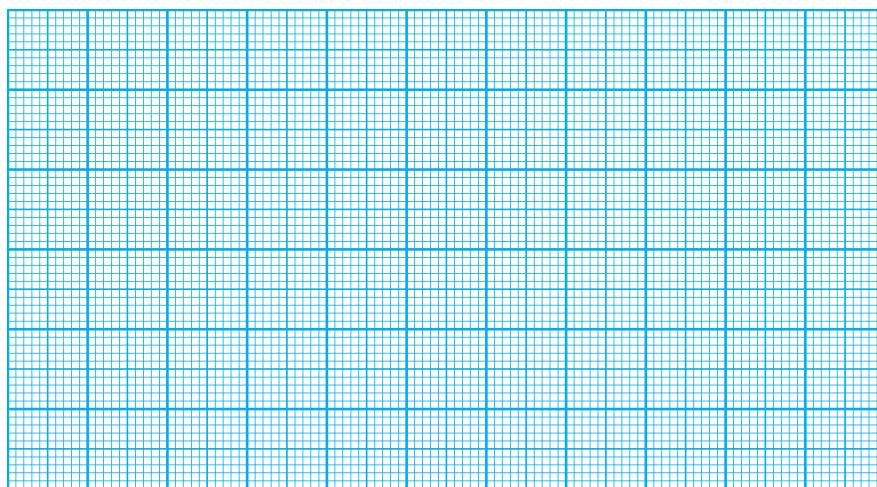


图 1-1-4 方格坐标纸

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，了解他们制订的探究计划和设计的实验方案，分析其中有哪些地方是值得你学习的。

完成一份实验报告。

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 1-1-5 是一颗质量为 40 g 的子弹以 100 m/s 的速度击穿苹果瞬间的照片。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了功，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 $v_2 = 60 \text{ m/s}$ 。

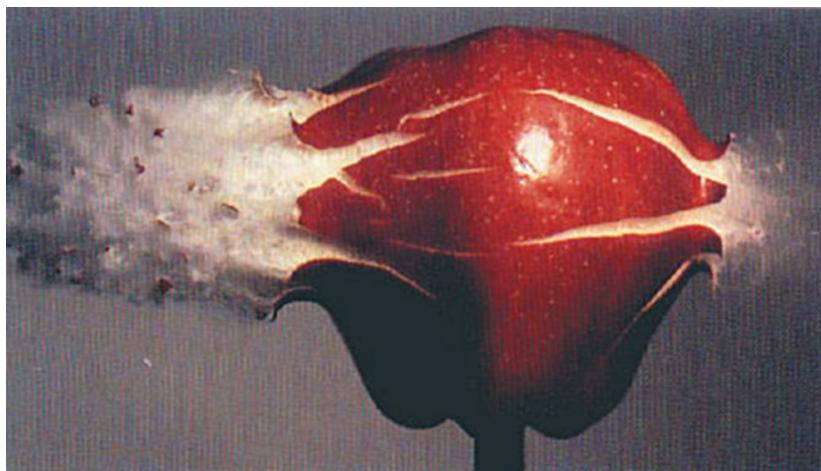


图 1-1-5 子弹击穿苹果的照片

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 $W = -128 \text{ J}$ 。

负号表示苹果对子弹做负功，使子弹的动能减少。

STSE

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（尤其是高速公路）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 ，对小汽车一般是 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，即使驾驶员踩油门加速，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. 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？试通过计算来说明。
2. 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？

3. 质量 $m = 500 \text{ g}$ 的物体，原来的速度 $v_1 = 2 \text{ m/s}$ ，受到一个与运动方向相同的力 $F = 4 \text{ N}$ 的作用，在光滑水平面上发生了位移 $s = 2 \text{ m}$ 。问物体的末动能是多大？

1.2 功与功率

在初中，我们研究过力与运动方向相同的情形中功的计算式 $W = F s$ ，高中物理中则要从功和能的关系上进行研究，加深对功的理解。

当力的方向与物体的运动方向不相同时（图 1-2-1），怎样计算力对物体做的功呢？

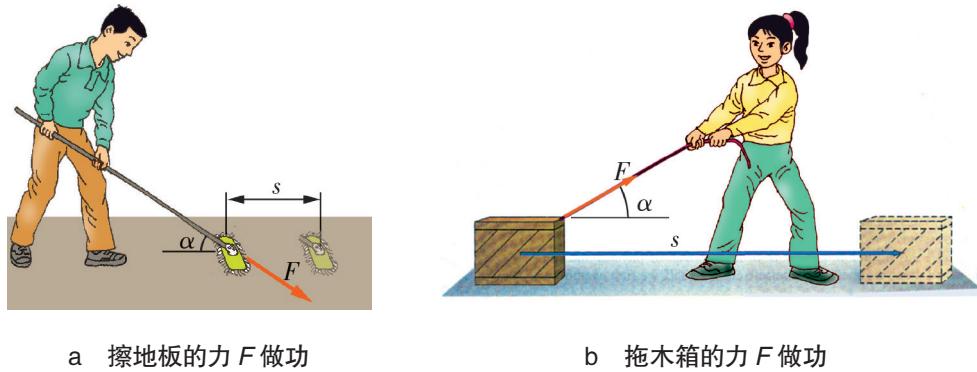


图 1-2-1 力跟位移不在一条直线上

怎样计算力跟位移成一定夹角时的功

分析与论证

计算力跟位移成夹角 α 时的功

如图 1-2-1 b 所示，人向斜上方拉木箱，设拉木箱的力 F 为恒力，它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 1-2-2 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

$$W = F s \cos \alpha$$

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。

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。

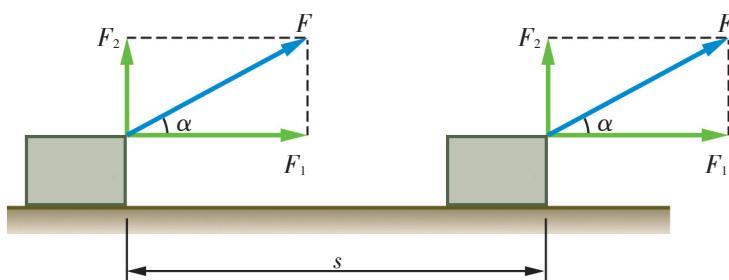


图 1-2-2 拉力的水平分力跟位移方向相同

案例分析

■ 案例 如图 1-2-3 所示，两人用力推一辆熄火的小汽车，每人用力的大小都是 200 N，方向都跟车的运动方向成 30° 。当小汽车前进了 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。

■ 分析 先根据公式 $W = Fs \cos \alpha$ 计算出一个人推汽车所做的功，再计算出另一个人推汽车所做的功，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，再求合力所做的功，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。

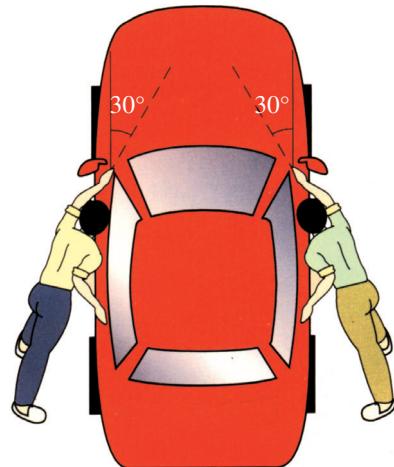


图 1-2-3 两人推汽车

正功、负功的含义

把计算功的一般公式 ($W = Fs \cos \alpha$) 和动能定理 ($W = \Delta E_k$) 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。

我们先讨论只有一个力对物体做功的简单情况。当力 F 与物体位移 s 之间的夹角 α 等于零时， $\cos \alpha = 1$ ，根据功的一般计算式可得， $W = Fs$ ，这表示力 F 对物体做正功。由动能定理可知，因为 $W > 0$ ，所以 $\Delta E_k > 0$ ，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 $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$ 、 $\alpha = \frac{\pi}{2}$ 、 $\frac{\pi}{2} < \alpha \leq \pi$ 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、制动等各个过程中，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？

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（L. 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（G. Monge）则把功称为“动力效应”；法国工程师彭赛列（J. Poncelet）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被引入到了物理学。

研究功率

我们知道，物体做功的快慢用功率来表示。功 W 与完成这些功所用时间 t 的比叫做功率（power），功率用符号 P 表示，即

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

在国际单位制中，功率的单位是瓦特，简称瓦，符号是 W。1 W = 1 J/s。技术上常用千瓦（kW）做单位，1 kW = 1 000 W。

机器的功率是衡量机器性能的重要指标。图 1-2-4 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，因而动能增加得也多。

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？



图 1-2-4 几种汽车发动机的平均功率

分析与论证 研究力、速度跟功率之间的关系

如图 1-2-5 所示, 若汽车在恒定的牵引力 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 $W = F s$, $P = \frac{W}{t}$, 以及速度公式 $v = \frac{s}{t}$, 可以推导出牵引力做功的功率

$$P = F v$$

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。在匀变速直线运动中, 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?

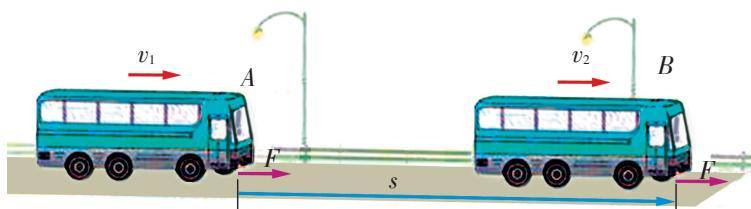


图 1-2-5 汽车在牵引力作用下匀速行驶

家庭作业与活动

1. 某人推着一辆质量为 10 kg 的自行车上坡。已知坡的倾斜角为 30° ，长度为 300 m，此人所用的推力为 75 N，方向平行于坡面。在他把自行车从坡底推到坡顶的过程中：

- (1) 他对自行车做的功是多少？
- (2) 重力对自行车做的功是多少？

2. 图 1-2-6 中，一名举重运动员在 1 s 的时间内把重 210 kg 杠铃举高了 1.2 m；而我们知道，用

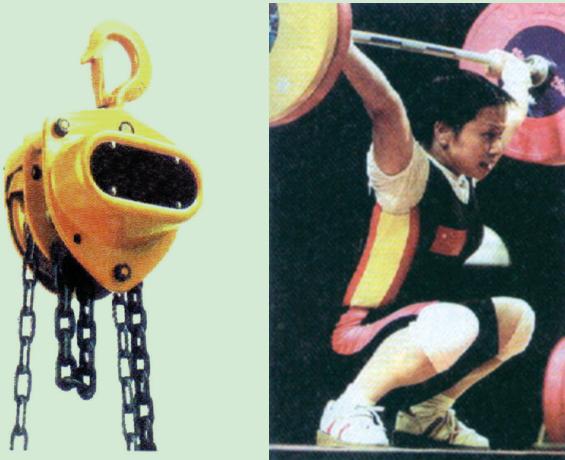


图 1-2-6

手拉葫芦（差动滑轮），一般在 5 min 内可将 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。

3. 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/s^2 。

4. 一辆汽车以 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 1-2-7），那么汽车发动机输出的功率多大？

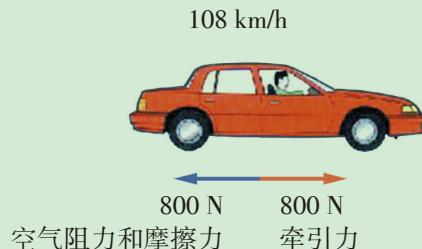


图 1-2-7

课题研究

研究汽车的功率和速度

在司机的指导下，完成下列任务。

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 1-2-8），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下要换挡，他是怎样通过换挡来变速的。了解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，在什么情况下要加大油门，

在什么情况下要减小油门。

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情况，并将你的体验与分析过程写成调查报告。同时拍摄相关的照片，并加以说明。



图 1-2-8 汽车驾驶室

1.3 动能定理的应用

动能定理是物理学的重要原理。用动能定理分析问题，只需考虑物体初、末状态的动能与外力对它所做的功，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，司机踩下制动闸，使汽车在阻力作用下逐渐停止运动（图1-3-1）。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 $v/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	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。
- (3) 设汽车在以60 km/h匀速行驶的时候制动，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。



图1-3-1 汽车制动性能测试

■ 分析 对问题(1)，以汽车为研究对象。在制动过程中，制动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 $\frac{1}{50}$ 。请根据动能定理求出飞机滑行时受到的牵引力。

■ 分析 以飞机为研究对象，先分析飞机受力和每个力做功的情况。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。

■ 解答 牵引力对飞机做的功为

$$W_{\text{牵引力}} = F s$$

阻力对飞机做的功为

$$W_{\text{阻力}} = -f s = -k m g s$$



图 1-3-2 正在滑行的飞机

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

飞机动能的增量为

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

运用动能定理得

$$W = W_{\text{牵引力}} + W_{\text{阻力}} = \Delta E_k$$

请你代入数据，求出飞机所受到的牵引力。

可见，当有多个力对物体做功而使物体的动能发生变化时，应分析物体受到哪几个力，每个力是否对物体做功，做正功还是负功。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。

按这一思路将此题再解答一次，得出的结果是否与前面的一致？

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，直接根据功的定义计算功比较困难。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，铁锤的动能减少直至变为零。

■ **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

$$\begin{aligned} W &= \Delta E_k = E_{k2} - E_{k1} \\ &= 0 - \frac{1}{2}mv_1^2 = -\frac{1}{2} \times 4.0 \times 5.0^2 \text{ J} \\ &= -50 \text{ J} \end{aligned}$$

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：

- (1) 明确要解决的问题，确定研究对象；
- (2) 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；
- (3) 明确研究对象在初末状态的动能，确定动能增量；
- (4) 运用动能定理列出方程。

家庭作业与活动

1. 一同学用手将质量为 1 kg 的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，则下列说法中正确的是（ ）。

- A. 该同学对物体做的功为 12 J
- B. 物体所受合外力做的功为 12 J
- C. 物体所受合外力做的功为 2 J
- D. 物体克服重力做的功为 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_{k1} ；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_{k2} ，则（ ）。

- A. $E_{k2} = E_{k1}$
- B. $E_{k2} = 2E_{k1}$
- C. $E_{k2} > 2E_{k1}$
- D. $E_{k1} < E_{k2} < 2E_{k1}$

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 1-3-3 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 $W_1 : W_2$ 。

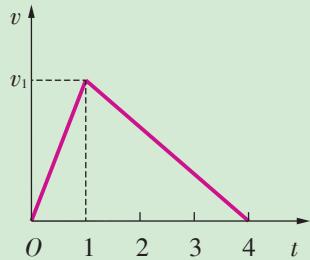


图 1-3-3

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直线滑行，从某一时刻起在滑块上施加一水平向右的力。经过一段时间，滑块的速度方向变为向右，大小为 4 m/s，则在这段时间内力所做的功为_____。

1.4 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 (图 1-4-1)。

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?

研究重力做功跟重力势能变化的关系

分析与论证 重力势能的大小

图 1-4-2 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 (桩的顶端),重锤高度的变化为 $(h_1 - h_2)$,因此重力做的功为

$$W = mg(h_1 - h_2)$$

即

$$W = mgh_1 - mgh_2 \quad (1)$$

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

$$E_p = mgh \quad (2)$$

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。



图 1-4-1 打桩机

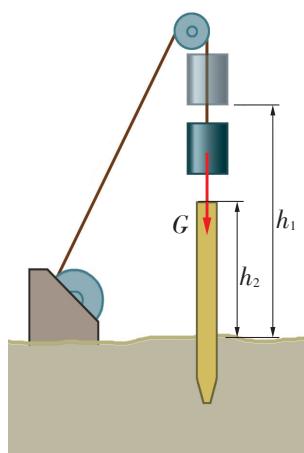


图 1-4-2 打桩机工作示意图

重力势能是地球与物体系统所共有的。

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} 为物体在末了位置的重力势能, 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。

我们在第 1.1 节中已经知道, 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 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 1-4-3 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?

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:

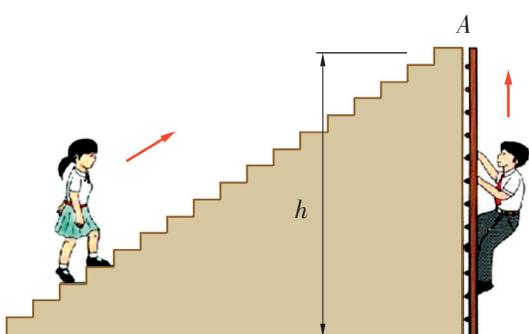


图 1-4-3 重力对谁做功多

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 1-4-4 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？

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。

物体的重力势能计算式 $E_p = mgh$ 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：位于参考平面上方的物体的重力势能为正值，在其下方的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 1-4-5 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？

■ 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 和此位置相对于势能参考面的高度 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与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。



图 1-4-4 重力对滑雪运动员做的功与路径有关吗

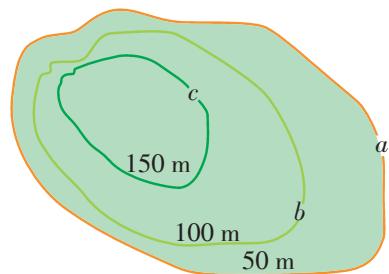


图 1-4-5 地图上的等高线

■ 答案 (1) 请根据上面分析完成问题 (1) 的计算。

(2) 当选择 100 m 的等高线所在平面为参考面时, 计算如下 (g 取 10 m/s^2)。

学生在 a 位置时, 他相对于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

$$E_{pa} = mgh_{ab} = 55 \times 10 \times (-50) \text{ J} = -2.75 \times 10^4 \text{ J}$$

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, 他相对于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

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

从 a 位置上升到 c 位置, 重力做的功等于重力势能增量的负值

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

弹性势能

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 1-4-6)。

弹性势能与形变的大小有关。例如, 弹簧的弹性势能与弹簧的伸长量或压缩量有关。被拉伸或压缩的长度越长, 恢复原状的过程对外做的功就越多, 弹簧的弹性势能就越大。

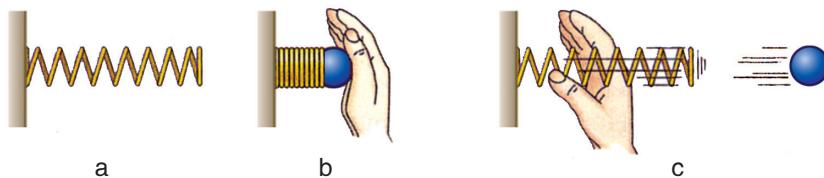


图 1-4-6 压缩的弹簧有做功的本领, 具有弹性势能

多学一点

弹性势能表达式

设弹簧的劲度系数为 k , 弹簧的伸长量或压缩量为 x , 以弹簧原长时为势能零点, 则弹簧的弹性势能可表示为 $E_p = \frac{1}{2} kx^2$ 。

家庭作业与活动

- 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？
- 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？
- 图 1-4-7 是一个质量为 m 的物体被斜抛出去后的运动轨迹。
 - 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？

- 在物体由位置 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？
- 在物体由位置 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？

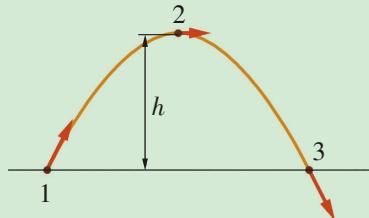


图 1-4-7



a 下落的果实



b 过山车

图 1-5-1 这些物体在运动中的动能与势能怎样转化

1.5 机械能守恒定律

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。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。

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 1-5-1 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。

分析与论证 研究重锤自由下落过程中机械能是否守恒

如图 1-5-2 所示,设打桩机重锤的质量是 m ,当重锤离桩顶高度为 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。当下落至离桩顶高度为 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 , 可得出什么结论?

重锤在自由下落过程中,只有重力做功,它的重力势能转

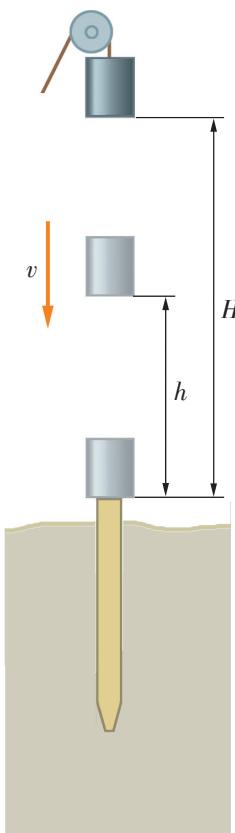


图 1-5-2 研究打桩机重锤下落过程的机械能

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？

研究证明，在只有重力做功的情况下，不论物体是做何种形式的运动，这个结论都是正确的。

同样可以证明，在只有弹力做功的物体系统内，动能与弹性势能可以互相转化，总的机械能也保持不变。

可以得出结论：在只有重力或弹力做功的物体系统内，动能与势能可以互相转化，而总的机械能保持不变。即

$$E = E_k + E_p = \text{恒量}$$

机械能中的势能包括重力势能与弹性势能。

这个结论叫做**机械能守恒定律** (law of conservation of mechanical energy)。它是力学中的一条重要定律，是普遍的能量守恒定律的一种特殊情况。



学生必做实验

验证机械能守恒定律

我们通过实验来研究物体在自由下落过程中动能与重力势能的变化，从而验证机械能守恒定律。

设计实验和进行实验

实验装置如图 1-5-3 所示。重物自由下落时，如果空气阻力可以忽略，就只有重力做功，重物的机械能守恒。

把纸带的一端固定在重物（钩码）上，另一端穿过打点计时器的限位孔。用手竖直提起纸带，使重物停靠在打点计时器下方附近。接通电源，待打点计时器打点稳定后再松开纸带，让重物自由下落，打点计时器就在纸带上打出一系列的点。取下纸带，换上新的纸带，重复实验三次。

重物的质量用天平测出。在纸带上按序标注几个计数点，选定纸带上的起始点作为参考点，设打该点时重物的重力势能为零。通过测量，算出各点的动能和势能，就能验证机械能是否守恒。

收集证据

从三条纸带中选择一条比较理想的纸带，将起始点作为参

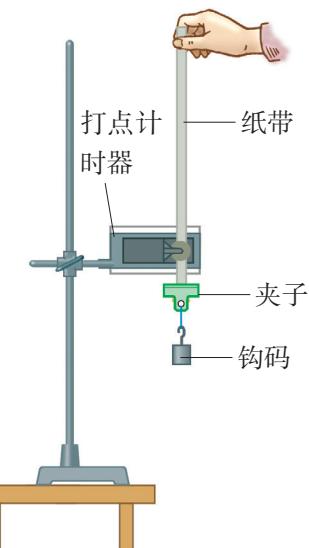


图 1-5-3 验证自由落体的机械能守恒定律

考点 O 。测量出标注的几个其他计数点到位置 O 的距离并计算出各点的瞬时速度，记录在表格中。

重物质量 $m = \underline{\hspace{2cm}}$ kg

位置	O	A	B	C	D
到 O 点距离 s/m					
重力势能 E_p / J					
速度 $v/(m \cdot s^{-1})$					
动能 E_k / J					
机械能 E / J					

分析论证

由上面的实验证据，你得出的结论是_____。

思考讨论

- 确定参考点 O 后，设打该点时重物的重力势能为零，你如何确定打其他点时重物重力势能的正负？
- 通过实验，你得到了什么结论？
- 为什么实验时要用金属钩码而不用木质小球？还有哪些减小实验误差的方法？

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，首先要注意是否满足只有重力或物体系统内部弹力做功的条件。

案例分析

案例 1 图 1-5-4 是上海轨道交通某车站的设计方案。由于站台建得稍高，列车进站时要上坡，出站时要下坡。你能从机械能守恒定律分析这种设计的优点吗？

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。

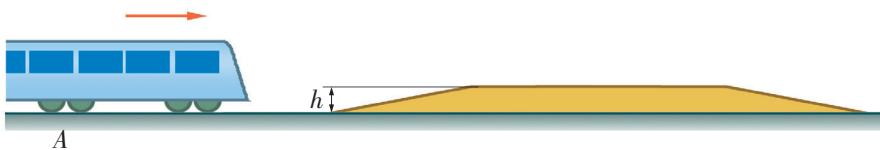


图 1-5-4 上海轨道交通某车站设计方案

■ 案例 2 打桩机重锤的质量为 250 kg，被提升到离地面 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/s^2)。

■ 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，空气阻力可以忽略。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。

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”载人飞船与运载火箭分离前与分离后做无动力运动。

2. 我们在《物理·必修·第一册》中学过，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。你能运用机械能守恒定律来解释为什么要强调“没有摩擦阻力”吗？

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？

第1章家庭作业与活动

A组

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 的速度匀速拉升一质量为 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

一次多？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拉高到同一高度，使物体最后获得的速度为 5 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. 如图 1-A-1 所示, 在“蹦极跳”中, 质量为 m 的游戏者身系一根长为 L 、弹性优良的轻柔蹦极绳, 从水面上方的高台由静止开始下落 $1.5L$ 到达最低点。假定空气阻力可忽略, 则下列说法中正确的是 ()。

- A. 游戏者在下落过程中机械能守恒
 B. 游戏者从开始下落到最低点动能增加了 mgL
 C. 游戏者从开始下落到最低点重力势能减少了 mgL
 D. 在最低点处蹦极绳的弹性势能为 $1.5mgL$

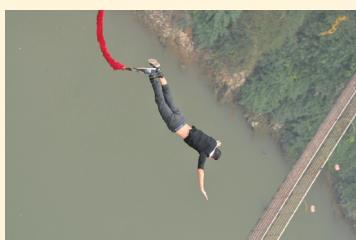


图 1-A-1

4. 图 1-A-2 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? 假如她在水平路面上骑车, 所受阻力仍为 60 N , 最大速度可达到多少? g 取 10 m/s^2 。

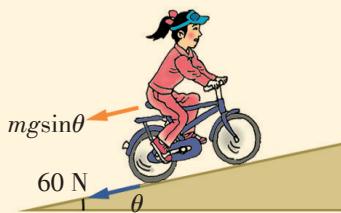


图 1-A-2

5. 一台起重机将质量 $m = 1 \times 10^3 \text{ kg}$ 的货物匀加速地竖直吊起, 在 2 s 末货物的速度为 $v = 4 \text{ m/s}$ 。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。

6. 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 1.6 m 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吗?

7. 一质量为 1 kg 的小车, 沿着高为 0.3 m 的光滑斜坡滑下, 到了斜坡底部后, 小车继续在平地上滑行, 此时它受到一个 2.0 N 的摩擦力作用。小车在停下之前, 能在平地上滑行多远?

B 组

1. 张强每天的工作就是把地上的箱子搬到 12 m 高的楼上。某天, 他必须尽可能快地把 30 箱总质量为 150 kg 的箱子搬上楼, 因此他考虑不能一次只搬一箱。但如果每次搬得太多, 就会走得很慢, 不时要休息, 而如果每次只搬一箱, 那么大量的体能将用于提升自己的身体。现测得他在一段时间里的功率与他所搬物体质量之间的关系如图 1-B-1 所示。如果不把他返回楼下的时间和搬起、放下每个箱子的时间计算在内, 请你求出:

- (1) 在所需时间最短的情况下, 他每次搬运箱子的数目。
 (2) 把所有箱子都搬到楼上所需要的最短时间。

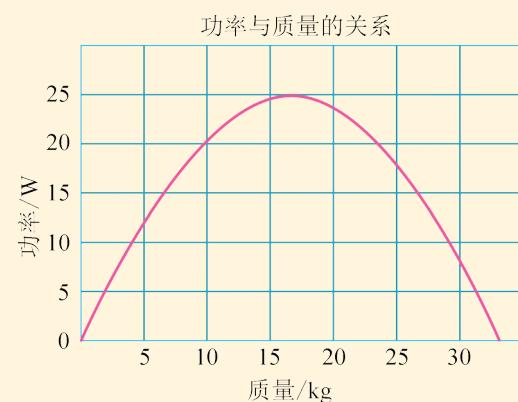


图 1-B-1

2. 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。
 3. 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2章 抛体运动

观众席上，人山人海；绿茵场上，激情飞扬。一场国际足球比赛正在激烈进行。一声哨响，蓝方队员被判犯规，红方获得任意球机会。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，不但做直线运动，而且更多的是做曲线运动。

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，探讨物体的曲线运动；像伽利略那样，运用运动合成与分解的方法，实验探究平抛运动的规律，分析生产生活中的抛体运动，体会将复杂运动分解为简单运动的物理思想。

2.1 飞机投弹与平抛运动

从飞机投弹谈起

空军在军事演习或实战中，常需进行投弹。飞机在空中沿水平方向飞行时，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。

曲线运动

让我们来做一个模拟实验。如图 2-1-1 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 2-1-1 b 中的曲线能大致表示小球的运动轨迹。我们把物体沿着一条曲线路径的运动叫做曲线运动（curvilinear motion）。常见的圆周运动就是曲线运动。

物体做曲线运动的条件

模拟飞机投弹的实验表明：当物体受到的合力的方向跟它运动的速度方向不在同一直线上时，物体就做曲线运动。

运动物体加速度的方向跟它所受合力的方向是相同的。因此，物体的加速度跟它的速度方向不在同一直线上，该物体做曲线运动。

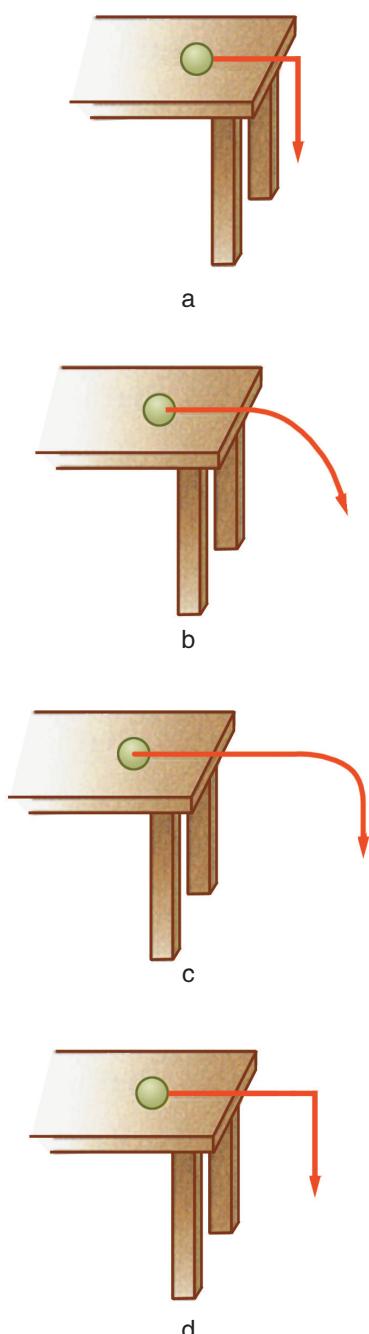


图 2-1-1 哪一幅图能表示小球运动的轨迹

曲线运动速度的方向

曲线运动的速度方向总是不断地变化着。做曲线运动的质点在某一点（或某一时刻）的速度方向是在曲线上该点的切线方向上（图 2-1-2）。

我们知道，速度是矢量，只要速度的方向发生了变化，速度就发生了变化，也就有了加速度。曲线运动的速度方向时刻都在改变，所以曲线运动是变速运动。

平抛运动

将一个物体以一定的初速度沿水平方向抛出，不考虑空气阻力，物体只在重力作用下所做的曲线运动，叫做平抛运动（horizontal projectile motion）。上述飞机投弹、滑出台面的小球在空中的运动都是平抛运动。平抛运动是一种二维曲线运动，下面我们来研究平抛运动。

伽利略关于平抛运动的研究

早在 17 世纪，伽利略（Galileo Galilei）就对抛体运动进行了详细的研究，找到了研究二维曲线运动的基本方法。

伽利略假定，做平抛运动的物体同时做两种运动：在水平方向上，物体不受力的作用做匀速直线运动；在竖直方向上，物体受到重力作用做自由落体运动。他认为这两个方向的运动“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，它在水平方向发生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，它在竖直方向发生的位移跟时间的二次方成正比，即在相等的时间间隔内位移之比为 $1:3:5:\dots$ 。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 2-1-3）。

这样，伽利略对物体做平抛运动的过程和轨迹给出了完整的描述。伽利略关于平抛运动的研究结论，不但具有重要的实用价值，而且是研究在恒力作用下的二维运动的基本方法。

伽利略对平抛运动的研究与分析，对你研究较复杂的运动有什么启示？

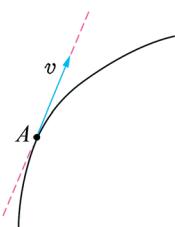


图 2-1-2 做曲线运动的质点在某一点 A 的瞬时速度 v 的方向就在该曲线上过 A 点的切线方向上

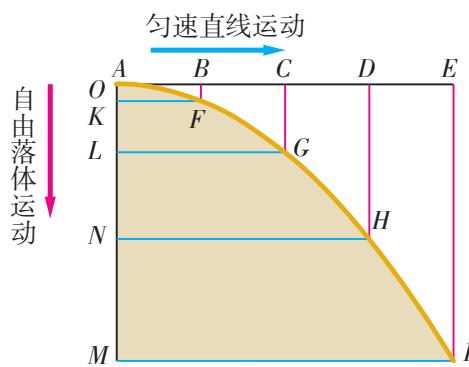


图 2-1-3 伽利略用几何方法得到的平抛物体的运动轨迹

验证伽利略的研究结论

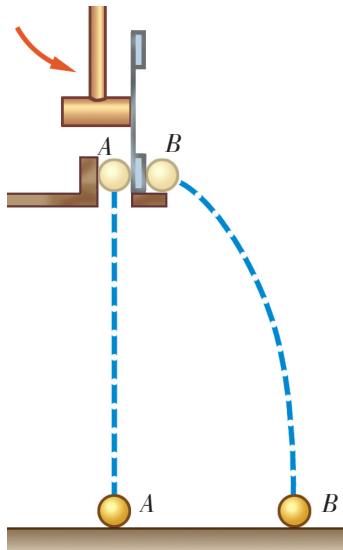


图 2-1-4 研究平抛运动的实验

下面我们用实验来验证伽利略关于平抛运动的上述研究结论。

实验探究 研究平抛运动

实验的部分装置如图 2-1-4 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。

用小锤击打弹性钢片后，你观察到了什么现象？

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研究结论吗？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研究结论。

分析与论证 研究平抛运动的频闪照片

我们用频闪照相的方法记录小球在平抛运动中的运动情况。

图 2-1-5 是以间隔 $\frac{1}{30}$ s 拍摄的频闪照片，其中小球 A 做自由落体运动，小球 B 做平抛运动。请你用刻度尺分别测量小球 A 和 B 在不同时刻所处的水平位置 x 和竖直位置 y，记录在下页表中，并讨论所列问题。

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？

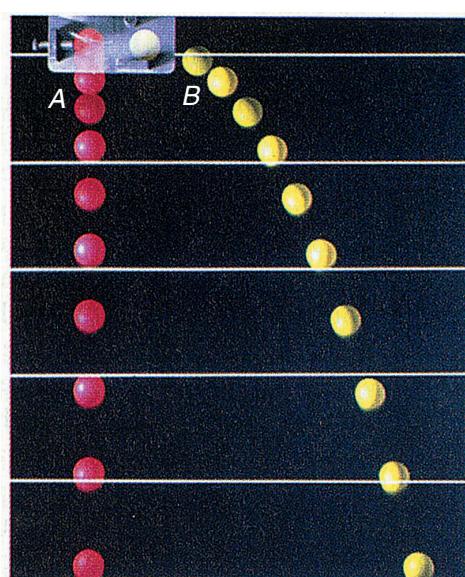


图 2-1-5 平抛运动的频闪照片

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

- 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发生的位移应相等，你的测量结果怎样？
 - 伽利略假设平抛运动在竖直方向应是自由落体运动，即小球发生的位移应跟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

- 研究平抛运动规律的一般方法是：将平抛运动分解到_____方向和_____方向。伽利略根据平抛物体受到重力作用，猜测物体在竖直方向可能做_____运动；根据平抛物体在水平方向不受力的作用，猜测物体在水平方向可能做_____运动。
- 根据伽利略关于平抛运动的研究结论，下列说法中正确的是（ ）。
 - 从同一高度，以大小不同的速度同时水平抛出的两个物体，它们一定同时落地，但抛出的水平距离一定不同
 - 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
 - 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

- 用玩具手枪水平射击一个与枪口位于同一高度，但有一定距离的固定靶子，子弹能否击中靶子？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？
- 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结论推断：
 - 这些物体在落地之前，在空中排列成的几何图形是什么样子？它们在竖直方向的距离之比是多少？
 - 这些物体在落地之后，在地面（假设地面平坦）排列成的几何图形是什么样子？相互之间的距离是多少？

2.2 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

通过上一节的学习我们已经知道，平抛运动可以看成是水平方向上的匀速直线运动和竖直方向上的自由落体运动的合运动。人们在研究复杂运动时，通常是把复杂运动看作是由两个或几个简单运动复合而成的，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做运动的合成 (composition of motions)，由合运动求分运动叫做运动的分解 (resolution of motion)。怎样进行运动的合成与分解呢？

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包括研究描述运动的位移、速度、加速度等物理量的合成与分解。这些量也都是矢量，它们的合成与分解都遵循平行四边形定则。

若已知两个分运动的规律，就可以运用平行四边形定则算出做平抛运动物体的位移、速度等物理量。

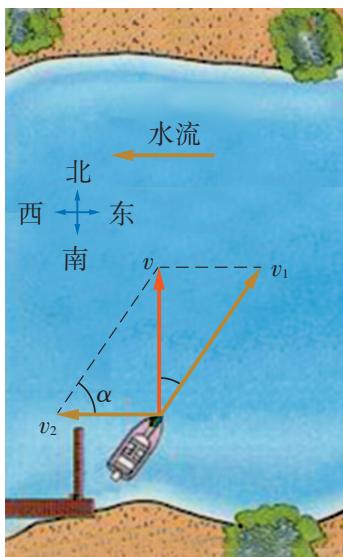


图 2-2-1 研究船渡河的运动

案例分析

案例 研究船渡河的运动

如图 2-2-1 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运动而渡过河去，船应该怎样航行？

■ 分析 船在渡河过程中的运动是由两个分运动合成的：船在垂直于河岸方向上的匀速直线运动和在水流推动下船平行于河岸的匀速直线运动。

■ 解答 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，于是，渡船相对河岸的运动速度的大小

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

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

因为渡船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 $\cos \alpha = \frac{v_2}{v_1} = \frac{5}{10} = \frac{1}{2}$ ，于是

$$\alpha = 60^\circ$$

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

分析与论证 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的物体的轨迹，还可以算出此物体在任意时刻的位移和速度。

如图 2-2-2 所示，设小球离开桌面时的初速度是 v_0 。

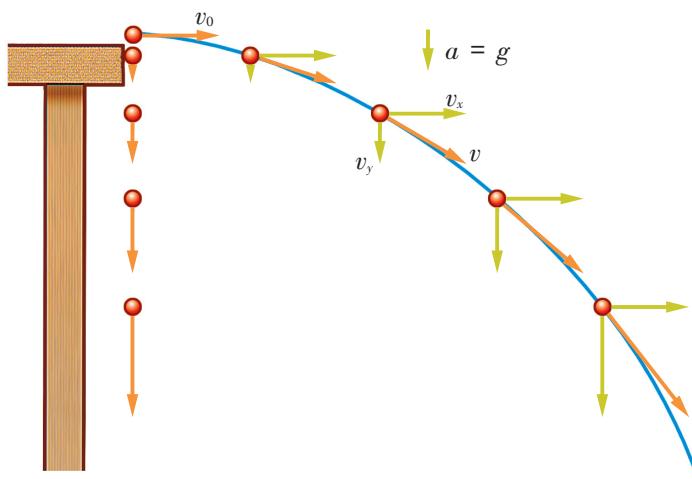


图 2-2-2 平抛运动

在水平方向上，由于不受力的作用，小球因惯性以抛出时的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

$$v_x = v_0 \quad x = v_0 t \quad (1)$$

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

$$v_y = g t \quad y = \frac{1}{2} g t^2 \quad (2)$$

你能根据分运动的速度和位移，求出图 2-1-5 中的小球在第 1 次，第 2 次，第 3 次……拍照时的速度和位移的大小和方向吗？

多学一点

推导平抛运动的轨道方程

把上述 (1) 和 (2) 式中的 t 消去，可得到平抛运动的轨迹方程

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

想一想：这是什么曲线的方程？



学生必做实验

探究平抛运动的特点

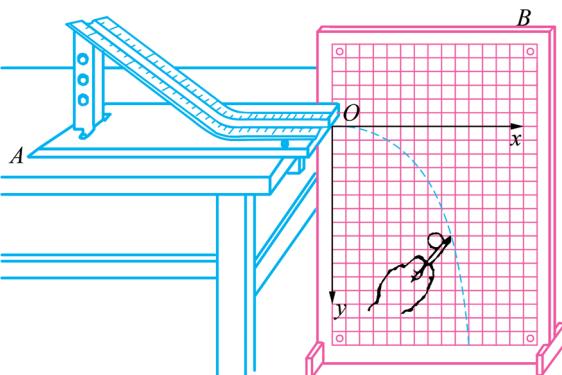


图 2-2-3 研究平抛物体的运动

本实验要求学生描绘出平抛物体的运动轨迹，探究平抛运动的特点和规律。

实验装置如图 2-2-3 所示，将固定有斜槽的木板 A 放在水平桌面上，用图钉把坐标纸固定在竖直的木板 B 上，使坐标纸上的竖线处于竖直位置，并在坐标纸上选定与斜槽末端投影所在的位置为坐标原点 O ，以水平向右的方向为 x 轴的正方向，竖直向下的方向为 y 轴的正方向。

设计实验

实验时，在斜槽上某一固定位置释放小球，使小球自由滑下，并从 O 点开始做平抛运动。先目测做平抛运动的小球在某一水平位置 x 处（如 $x = 1.0$ cm）的 y 值。然后使小球重新从固定位置自由滑下，在目测确定的位置附近，用铅笔记下小球实际经过的位置，并记录在坐标纸上。接着依次改变 x 值，重复上述步骤，确定各点的位置。

进行实验与收集证据

1. 安装实验装置，按照设计好的方案进行实验。
2. 收集信息。

(1) 取下坐标纸，用平滑曲线连接各位置点，画出小球做平抛运动的轨迹。

(2) 在平滑曲线上选取几个不同的点，测出它们的 x 值

和 y 值，并填入下表中。

实验序号	0	1	2	3	4	5
x/cm						
y/cm						

分析论证

运用所学知识分析论证实验结果。

1. 做平抛运动的小球的运动轨迹是抛物线吗？为什么？
2. 已知重力加速度 g 的值，利用公式 $x = v_0 t$ 和 $y = \frac{1}{2} g t^2$ ，求出上述实验中小球做平抛运动的初速度 v_0 的平均值。

思考讨论

实验时，要求斜槽的末端必须处于水平位置，为什么？

案例分析 飞机投弹问题的研究

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 $3\,000\text{ m}$ 。飞行员应该在离目标多少水平距离时投弹，才能命中目标？ g 取 10 m/s^2 。

分析 由于飞机的水平速度为 250 m/s ，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 $v_0 = 250\text{ m/s}$ ， $h = 3\,000\text{ m}$ 。

由 $h = \frac{1}{2} g t^2$ ，可得

$$\begin{aligned} t &= \sqrt{\frac{2h}{g}} \\ &= \sqrt{\frac{2 \times 3\,000}{10}} \text{ s} \\ &= 10\sqrt{6} \text{ s} \\ &= 24.5 \text{ s} \end{aligned}$$

炸弹在水平方向上运动的距离

$$x = v_0 t = 250 \times 10\sqrt{6} \text{ m} = 6\,124 \text{ m}.$$

可见，飞行员应该在离目标水平距离为 $6\,124\text{ m}$ 处投弹，才能命中目标。

家庭作业与活动

1. 图 2-2-4 是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。

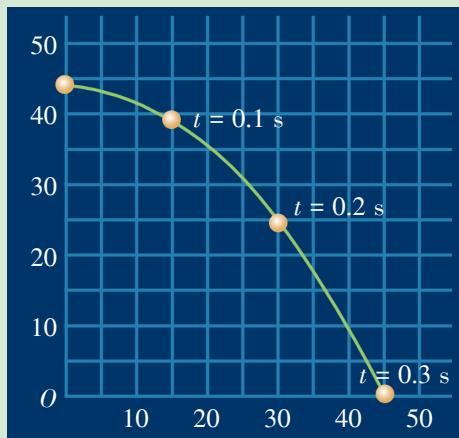


图 2-2-4

2. 四楼阳台离地面约 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 2-2-5 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

出球时球的速度吗？

4. 关于平抛运动，下列说法中正确的是（ ）。
- 它是速度大小不变的曲线运动
 - 它是加速度不变的匀变速曲线运动
 - 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
 - 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/s^2 。
6. 飞机在距地面 0.81 km 的高度以 250 km/h 的速度水平飞行。要使得投下的物资落在指定地点，飞机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。
- 你的测量方法是_____。
 - 计算子弹速度的公式是_____。

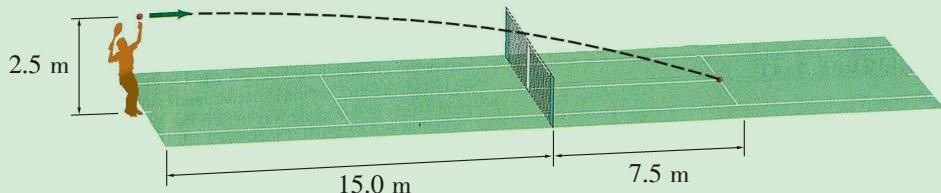
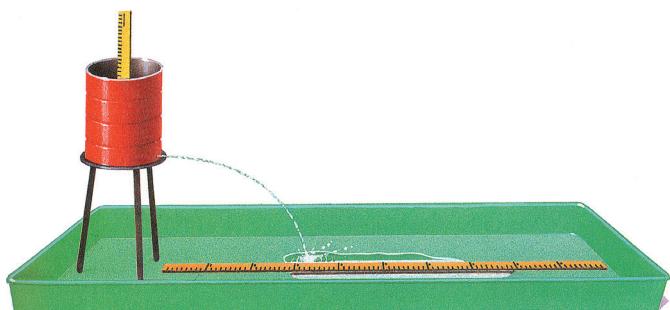


图 2-2-5

课题研究



研究水柱的射程

请用图 2-2-6 所示的装置研究水桶内水的深度与水柱射程的关系，并用适当的方式描述这种关系。

图 2-2-6 研究水柱的射程

2.3 斜抛运动

将一个物体以一定的初速度沿斜向抛出，且该物体在运动过程中仅受重力作用，该物体所做的运动叫做斜抛运动（angle projectile motion）。生活中斜抛运动的例子很多，例如，运动员踢出的足球的运动，投出去的铅球、铁饼或标枪的运动……

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，运用运动合成的方法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 2-3-1 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是怎样的？

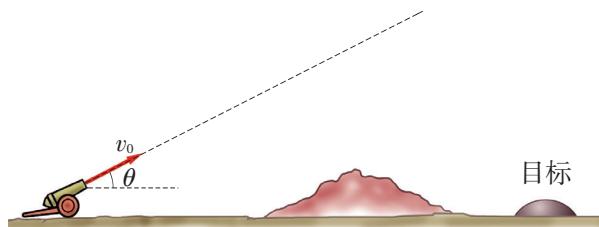


图 2-3-1 研究炮弹的运动

分析与论证

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。而事实上，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 2-3-2 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 : …。

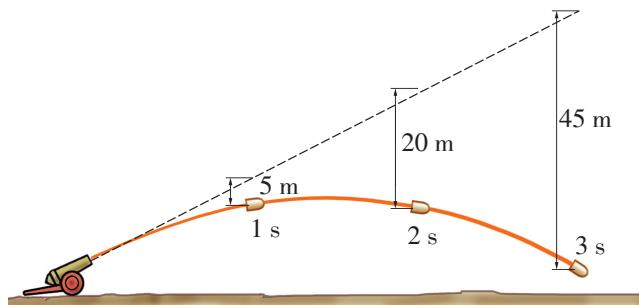


图 2-3-2 炮弹做斜抛运动时的轨迹

根据以上分析, 可以画出炮弹做斜抛运动时的轨迹(图 2-3-2)。

你不妨在图 2-3-1 中也试画一下, 并将你画的轨迹与图 2-3-2 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 2-3-3), 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, 因此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, 因此炮弹沿这个方向的分运动是匀减速直线运动。

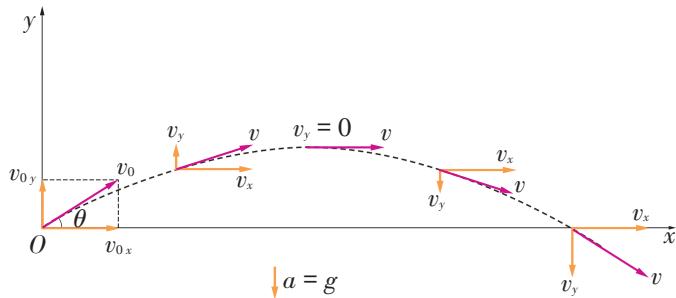


图 2-3-3 斜抛运动沿水平和竖直方向分解

分析图 2-3-3, 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: 炮弹的运动轨迹关于经过其最高点的竖直线是左右对称的。这启发我们: 是不是可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

在斜抛运动中，人们比较关注的是射高、射程和飞行时间。

射高是被抛物体所能达到的最大高度。

射程是被抛物体的抛出点与同一水平面上的落点之间的水平距离。

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 2-3-4）等实验方法进行研究，也可以用理论分析的方法进行研究。

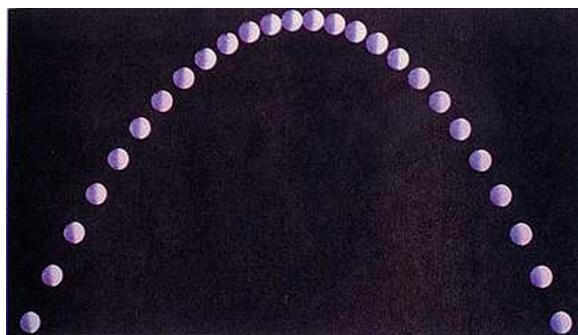


图 2-3-4 斜抛小球的频闪照片

实验探究

研究斜抛运动的射程和射高

如图 2-3-5 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：

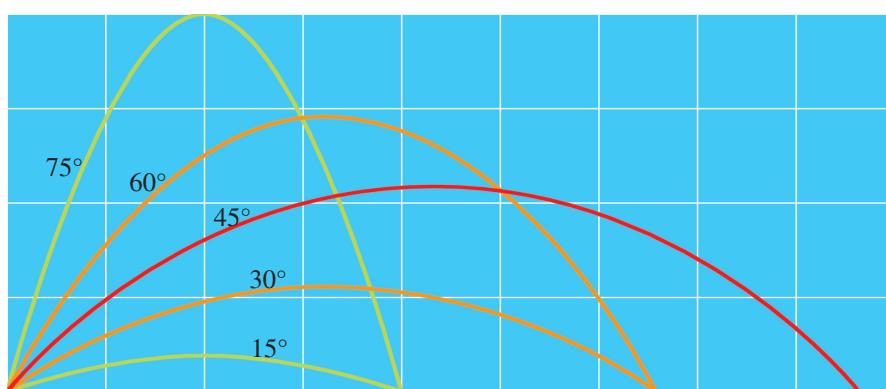


图 2-3-5 研究喷水枪喷射出的水流的射程和射高

1. 设初速度一定, 当喷射角为多大时, 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?

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 2-3-6 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。

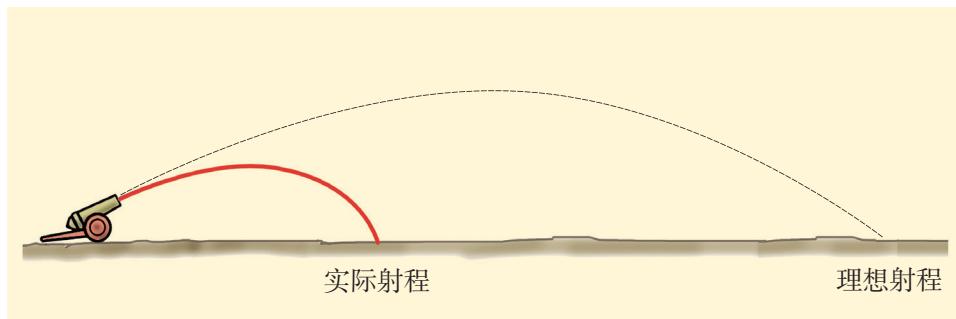


图 2-3-6 炮弹运动的理想弹道曲线和实际弹道曲线

信息浏览

伽利略是怎样研究斜抛物体射程的

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 $\alpha = 45^\circ$ 时, 射程最大; 抛射角为 $45^\circ \pm \beta$ 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?

你能证明斜抛物体在同样大小的初速度下, 抛射角分别为 $45^\circ + \beta$ 和 $45^\circ - \beta$ ($\beta < 45^\circ$) 时的射程相等吗?

家庭作业与活动

- 下列选项中物体做抛物线运动的是()。
 - 一个从跳板上跳入游泳池的人
 - 一艘绕着地球运行的太空飞船
 - 一片从树上掉下的叶子
 - 一列沿着平直轨道行进的火车
- 要提高运动员掷铅球的成绩,应该采取哪些措施?
- 我国于2003年10月15日成功发射了“神舟”五号载人宇宙飞船。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么样的?为什么?
- 图2-3-7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?

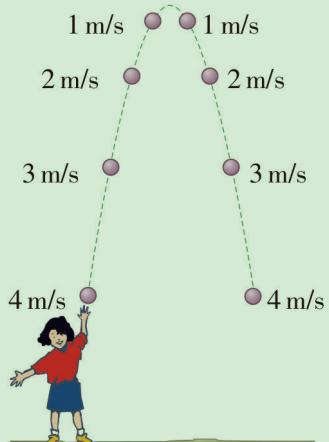


图2-3-7

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官兵请教,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

中国探月工程三期圆满收官后,探月四期已全面启动。假如有一天我们真的登上月球,在上面召开运动会,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。

你可以在互联网、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2-3-8 月球、卫星与地球(近处的为月球)

第2章家庭作业与活动

A组

- 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。若自动扶梯停止运行，此人沿此梯拾级而上，需经时间 t_2 到达楼上。如果自动扶梯正常运行，人仍保持原来的步频沿梯而上，则到达楼上的时间为 _____。
- 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，哪一个物体先到达地面？到达地面时，两者速率是否相等？
- 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
- 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
- 一个小球从高处水平抛出，抛出点跟落地点的水平距离为 s 。现将 s 分成三等分，则小球在水平方向上相继运动 $\frac{s}{3}$ 的时间内，其下落高度之比为（ ）。
 - A. $1:1:1$
 - B. $1:2:3$
 - C. $1:3:5$
 - D. $1:4:9$
- 一艘小船从河岸的 A 点出发渡河，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 2-A-1 所示。为使船在最

短的时间内到达

河对岸，问：

- 船渡河最短时间是 260 m，多少？
- 船到达河对岸的位置在 A 点下游多远处？

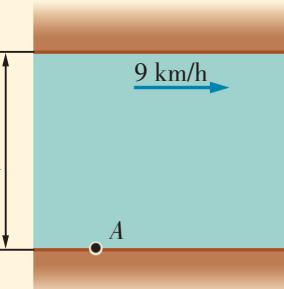


图 2-A-1

B组

- 春游时，同学们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来的水量（设水从出水口均匀流出）？要求说明需测量的物理量。
- 如图 2-B-1 所示，枪管 AB 对准小球 C，ABC 在同一水平线上。子弹射出枪口时，悬挂小球的细线突然断开，小球 C 由静止开始下落。已知 BC 的距离 s 为 100 m，不计空气阻力，重力加速度 g 取 10 m/s^2 ，问：
 - 如果小球 C 下落 20 m 时被击中，那么子弹离开枪口时的速度是多大？
 - 如果子弹离开枪口时的速度大于上面所求的数值，那么子弹仍然能击中这个小球吗？为什么？
 - 如果悬挂小球的细线突然断开后，小球 C 不是由静止开始下落，而是和子弹同时以 10 m/s 的初速度沿子弹初速度方向水平抛出，那么子弹是否还能击中这个小球？若能击中，在何处击中？

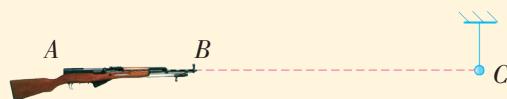
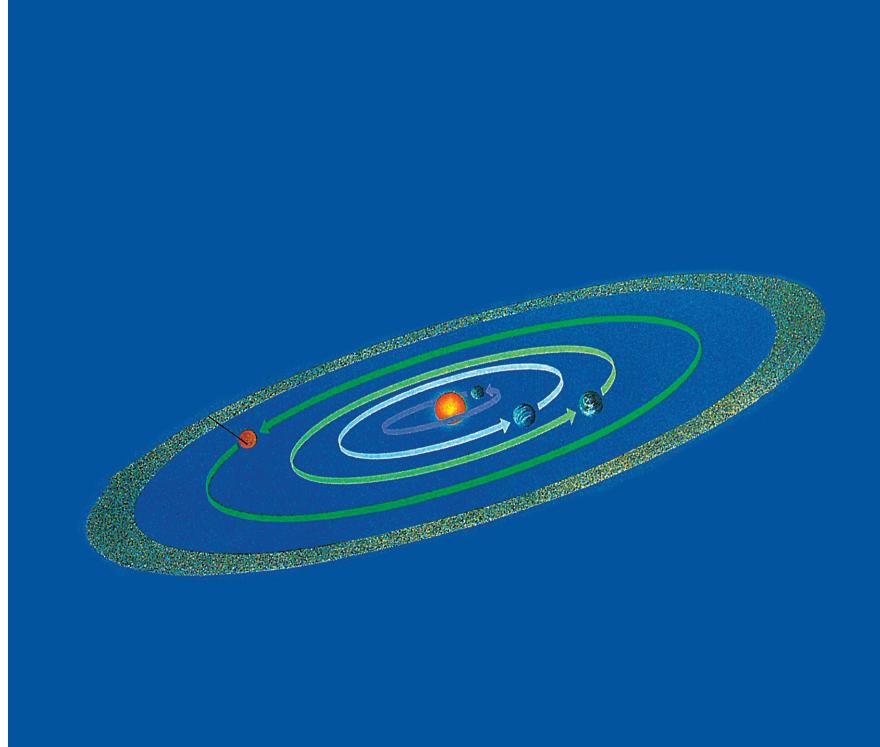


图 2-B-1



第3章 圆周运动

过山车运行时，最令人惊心动魄的是它倒悬着掠过弧顶的那一刻。它怎么就不掉下来呢？要回答这个问题，我们要来研究一下圆周运动。

圆周运动是一种常见的曲线运动。汽车在公路转弯处的运动，钟表指针上各点的运动等，通常都可以看作圆周运动。

我们怎样描述和研究圆周运动呢？

使物体做圆周运动的力有什么特点呢？

圆周运动遵循哪些规律呢？

在本章中，我们将以生产生活中的圆周运动为背景，认识与描述最简单的圆周运动——匀速圆周运动。通过实验，探究匀速圆周运动的规律，用牛顿第二定律分析匀速圆周运动，了解生产生活中的离心现象及其产生的原因。进一步体会物理学中化繁为简的方法，增强分析和解决问题的能力。

3.1 怎样描述圆周运动

质点的运动轨迹是圆的运动称为圆周运动，其中最简单的圆周运动是运动快慢保持不变的圆周运动，称为匀速圆周运动。下面我们就从最简单的匀速圆周运动开始研究。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？

路程、位移与线速度

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 3-1-1 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。

线速度

物体做直线运动的快慢可以用速度来描述，物体做圆周运动的快慢则常常用线速度（linear velocity）来描述。

物体经过的圆弧 AB 的长度 s （图 3-1-2）跟通过这段圆弧所用时间 t 的比，叫做圆周运动的线速度的大小，用符号 v 表示，则

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

那么圆周运动的线速度方向是怎样的呢？如图 3-1-3 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 3-1-4，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

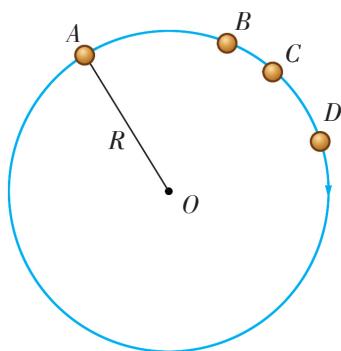


图 3-1-1 圆周运动的路程与位移

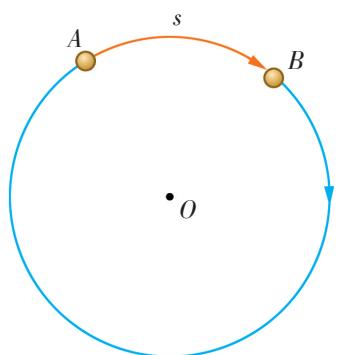


图 3-1-2 物体经过的弧长与所用时间的比值是圆周运动的线速度



图 3-1-3 水滴从伞的边缘沿切线方向飞出

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”飞船环绕地球的运动、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。

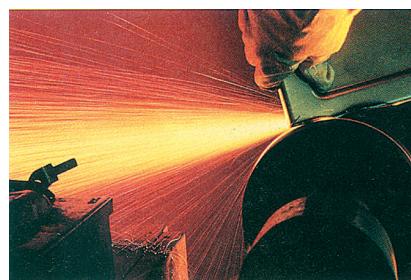


图 3-1-4 火花沿砂轮的切线方向飞出

角速度与周期

角速度

物体做圆周运动，也可以看作绕圆心转动，绕圆心转动的快慢用角速度 (angular velocity) 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，物体绕圆心转动得就越快。

如图 3-1-5 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。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发生变化？

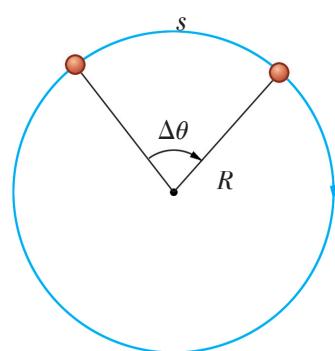


图 3-1-5 用角速度表示圆周运动的快慢

周期

圆周运动是一种周期性的运动，因此，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 (rotation speed)，转速一般用 n 表示，单位是转每秒 (r/s) 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？

角速度与线速度的关系

从绕圆心转动的角度来描述圆周运动，建立角速度、转速等概念，很有实用价值。

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 是圆周的半径。

你能否证明线速度和角速度的关系是 $v = \omega R$ 吗？

你还能推导出周期 T 、转速 n 与线速度 v 和角速度 ω 的关系吗？

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 3-1-6 所示，其中 b 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？你能推导出两齿轮转速 n_1 、 n_2 与两齿轮直径 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？

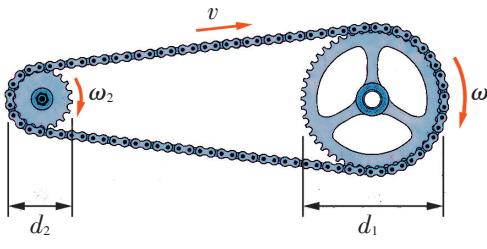
分析 自行车前进时，链条不会在齿轮上打滑，因而两个齿轮边缘的线速度大小必定相同。但两个齿轮的直径不同，根据公式 $v = \omega R$ 可知，两齿轮的角速度不同，且角速度与直径成反比。根据以上分析，你就可以回答上面的问题了。

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，其直径约 66 cm）。计算一下，踏脚板每转一圈，自行车前进多少米？



a



b

图 3-1-6 自行车与链条传动

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 3-1-7 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 $v = \frac{AB}{\Delta t}$, 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。前面说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?

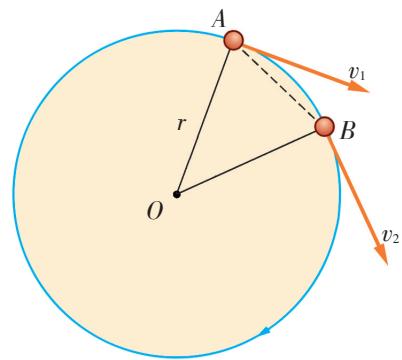


图 3-1-7 当 B 点无限逼近 A 点时, AB 之间的平均速度就是 A 点的瞬时速度

家庭作业与活动

1. 图 3-1-8 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?

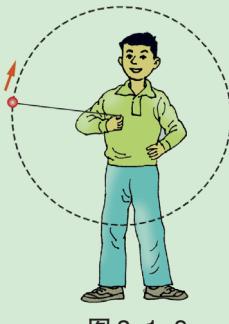


图 3-1-8

2. 某物体做匀速圆周运动, 圆周的半径为 R , 周期为 T 。物体在运动 $\frac{9}{4}T$ 的时间内, 位移的大小是____, 路程是____, 转过的角度是____。
3. 手表的秒针长 1.3 cm, 分针长 1.2 cm, 秒针针尖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 3-1-9 是皮带传动机构的示意图 (A 、 B 轮共轴)。

- (1) 请分析: 三个轮子边缘上哪些点可能具有相同

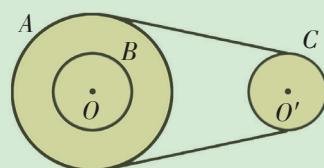


图 3-1-9

- 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又如何?

- (2) 假设轮 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和角速度。

3.2 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；这个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？

向心加速度

我们已经知道，物体做匀速圆周运动时，其速度方向沿着圆周的切线方向。如图 3-2-1 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，其速度方向沿着 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，且速度方向沿着 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 3-2-2 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？

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线速度、角速度和半径有关，其表达式为

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

在上面两式中，前式表明向心加速度的大小跟半径 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？

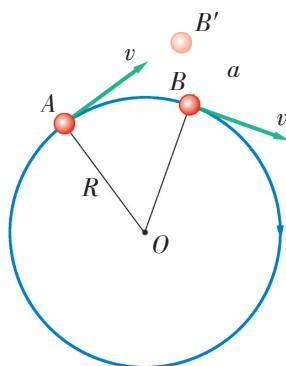


图 3-2-1 做匀速圆周运动的物体具有加速度

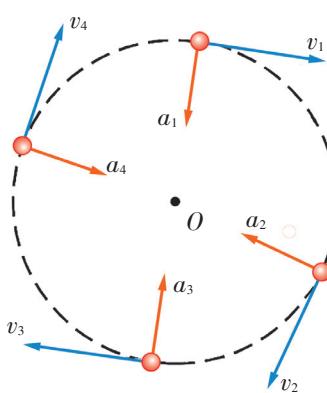


图 3-2-2 做匀速圆周运动物体的加速度与速度方向垂直，指向圆心

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, 运动所在圆周的半径等于地球半径, 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 3-2-3 a 所示, 物体从 A 点经时间 Δt 沿圆周做匀速圆周运动到达 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 点的速度 v_A ($v_A = v_B = v$) 和速度的变化量 Δv 的合速度, 如图 3-2-3 b。

当 Δt 趋近于 0 时, $\Delta\theta$ 也趋近于 0, B 点接近 A 点, Δv 接近于同 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, 仅从大小上看, 有

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

即

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

将上式两边同时除以 Δt , 得

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

当 Δt 趋近于 0 时, 等式左边 $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ 即为向心加速度 a 的大小, $\frac{AB}{\Delta t}$ 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 $a = \omega^2 R$?

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

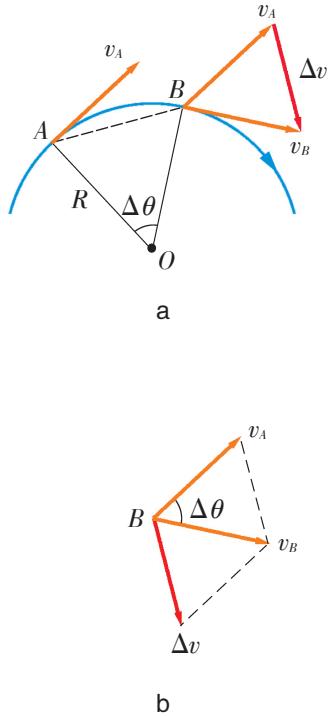


图 3-2-3 从速度合成的角度看向心加速度的方向和大小

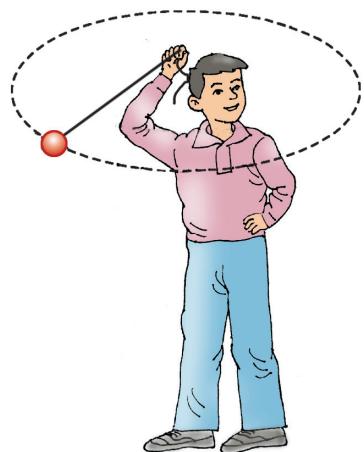


图 3-2-4 小球做圆周运动时，手通过绳子对球有拉力

生向心加速度的力叫做向心力 (centripetal force)。

如图 3-2-4 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，使小球做圆周运动，感受球运动时绳对手的拉力。

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

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

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？



学生必做实验

探究向心力大小与半径、角速度、质量的关系

我们知道，向心力的大小跟运动物体的质量、速度和圆周运动的半径有关。本实验根据向心力公式，进一步探究向心力大小与物体的质量、角速度、圆周半径之间的关系。

如图 3-2-5 所示，向心力实验仪主要由调速轮、长滑槽、短滑槽、横臂、弹簧测力套筒、标尺、转动手柄、传动皮带、小球、基座等组成。

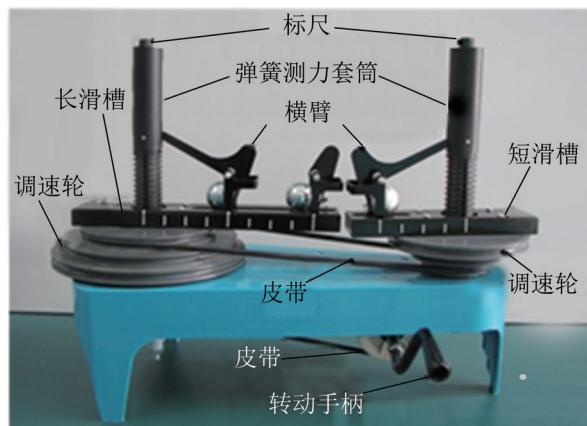


图 3-2-5 向心力实验仪

实验时，将仪器放置平稳并使转动手柄能伸出台面以便操作。转动手柄，可使调速轮以及长滑槽和短滑槽随之匀速转动。

皮带分别套在两个调速轮的不同圆盘上，可使两个滑槽内的小球分别以不同的角速度做匀速圆周运动。小球做圆周运动的向心力由横臂的挡板对小球的压力提供，小球对挡板的反作用力通过横臂的杠杆使弹簧测力套筒下降，从而露出标尺，标尺上露出的格子的多少可以显示出所测向心力的大小。

思考讨论

- 利用向心力实验仪，如何探究向心力的大小与物体的质量 m 、角速度 ω 、圆周半径 R 的关系？
- 如何利用转速计算角速度的大小？

设计实验

根据思考与讨论的结果，你能制订出探索向心力大小与物体的质量、角速度、圆周半径之间关系的实验方案吗？

进行实验与收集证据

根据你所制订的实验方案进行实验，将实验数据记录在下表中。

探究影响向心力大小的因素实验数据记录表

质量 m	角速度大小 ω	圆周半径 R	向心力大小 F

分析论证

你能根据所记录的数据推断出向心力大小与物体的质量 m 、角速度大小 ω 、圆周半径 R 的关系吗？

实验结论

实验证明：向心力的大小跟物体的 _____

成正比。

案例分析

“神舟”五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。

■ **案例** “神舟”五号飞船进入运行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 7 790 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？

■ **分析** 我们在研究飞船的运动时，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。根据本页旁批提供的信息，先要算出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以计算出向心加速度和向心力的大小。

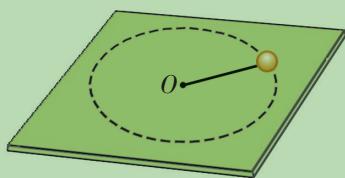
$$\begin{aligned} \text{■ 答案} \quad R &= R_{\text{地}} + h = (6.37 \times 10^3 + 0.343 \times 10^3) \text{ km} \\ &= 6.713 \times 10^6 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{\text{向心}} &= \omega^2 R = \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot R \\ &= \frac{4 \times 3.14^2}{(60 \times 90)^2} \times 6.713 \times 10^6 \text{ m/s}^2 = 9.08 \text{ m/s}^2 \\ F_{\text{向心}} &= ma_{\text{向心}} = 7790 \times 9.08 \text{ N} \\ &= 7.07 \times 10^4 \text{ N} \end{aligned}$$

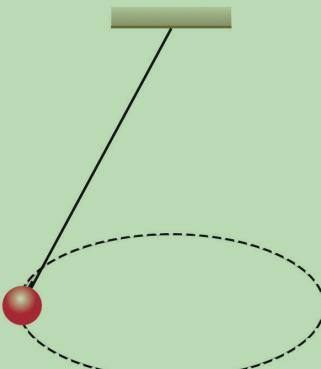
此向心力是由地球对飞船的引力提供的。

家庭作业与活动

1. 图 3-2-6 是小球在不同的情况下做匀速圆周运动的示意图，试在图 a、b 上分别画出小球所受到的力，并分析它们做匀速圆周运动所需的向心力的来源。



a 一小球由绳子系住，在光滑水平桌面上围绕 O 点做圆周运动



b 将绳子一端固定，另一端拴一个小球。让绳子偏离竖直方向一个角度，使小球在一水平面内做匀速圆周运动

图 3-2-6

2. 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，需要提供多大的向心力？
3. 如图 3-2-7 所示，在匀速转动的水平圆盘的边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_____。

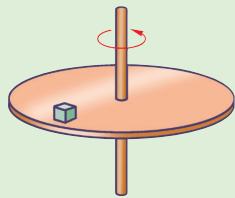


图 3-2-7

4. 飞机进行特技表演时常做俯冲拉起运动，如图 3-2-8 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，则这时候飞行员对座椅的压力为多大？ g 取 10 m/s^2 。

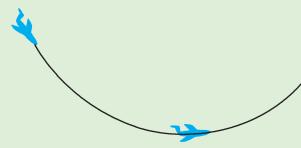


图 3-2-8

3.3 圆周运动的案例分析



图 3-3-1 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

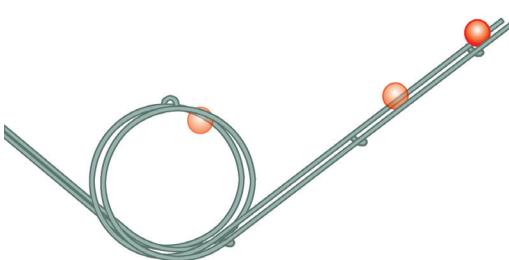


图 3-3-2 观察沿斜面轨道滚下的小球通过圆周轨道的情况

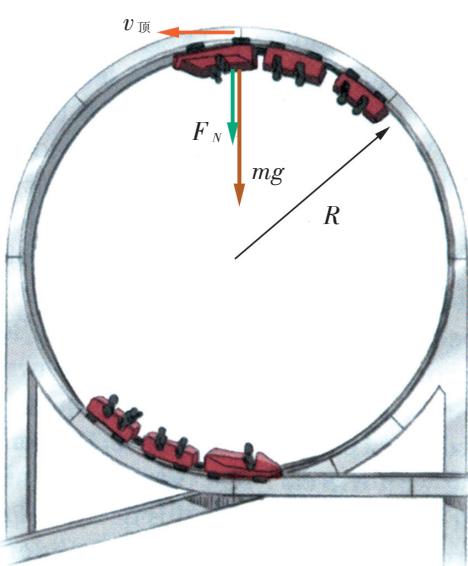


图 3-3-3 分析过山车的原理

为了保证乘客的安全，实际运行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。

当你在游乐场玩着过山车或者坐着旋转椅时，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3-3-1）能从高高的圆周轨道顶部轰然而过，车与人却不会掉下来，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3-3-2所示，让一个小球从斜面轨道的不同高度处滚下，观察小球通过圆周轨道时的运动情况。

从这个实验可以看出，如果小球从斜面轨道滚下时的起始高度过低，它到达圆周轨道底部的速度太小，就会在圆周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，才能通过圆周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 $v_{\text{顶}}$ 。由向心力公式 $F = m \frac{v^2}{R}$ 可知，在圆周轨道的顶部，过山车的速度 $v_{\text{顶}}$ 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，所受到的指向圆心的力是重力 mg 跟轨道对车的弹力 F_N 的合力（图3-3-3）。

请思考：

如果轨道对过山车的弹力恰为零，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？

如果过山车通过轨道顶部时 $F_N = 0$ ，则重力 mg 恰好等于过山车做圆周运动所需的向心力，即 $m \frac{v^2}{R} = mg$ ，由此可得 $v = \sqrt{gR}$ 。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。



a 摩托车转弯时，必须向转弯处的内侧倾斜



b 滑冰运动员转弯时必须向转弯处的内侧倾斜

图 3-3-4 转弯中的运动物体

如果过山车通过轨道顶部时的速度 v 小于 \sqrt{gR} ，则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 v 大于 \sqrt{gR} ，则所需的向心力大于车所受到的重力，车将挤压轨道，所以这时轨道对车的弹力不为零，车子不会掉下来。

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。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。这里需要讨论的问题是，做这种圆周运动的向心力是从哪里获得的呢？下面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 。

自行车在转弯处的受力情况如图 3-3-5 所示，图中的 F 是地面对车的作用力（地面对车的弹力和静摩擦力的合力）， mg 是重力，这两个力的合力 $F_{合}$ 指向弯道处的圆心，它提供了自行车做圆周运动的向心力。

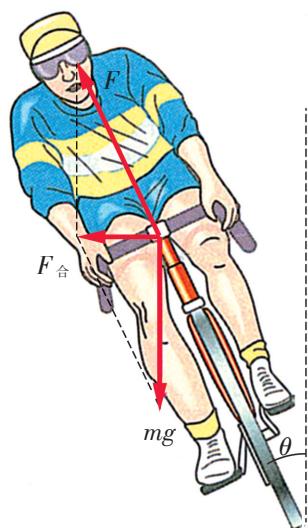


图 3-3-5 转弯中的自行车

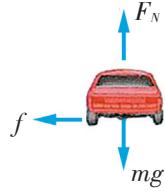
自行车向弯道的内侧倾斜，利用地面作用力与重力的合力作为转弯所需要的向心力。

请思考并讨论：

1. 自行车转弯时倾斜的角度 θ 与哪些因素有关？
2. 观察图 3-3-6，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。
3. 观察图 3-3-7，了解并分析火车转弯时是怎样获得向心力的。



a



b

图 3-3-6 汽车在水平路面转弯

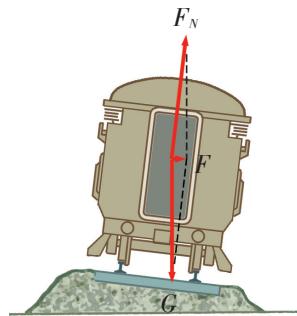


图 3-3-7 火车在弯道处转弯

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 3-3-8）。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。

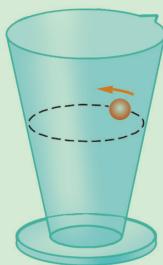


图 3-3-8

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，最高时速已经超过 350 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证既不会冲向滑道外侧，也不会向里侧摔倒？他这时是不是处于平衡状态？

5. 长 $L = 0.5$ m 的轻杆，其一端连接着一个零件 A，零件的质量 $m = 2$ kg。现让零件在竖直平面内绕 O 点做匀速圆周运动，如图 3-3-9 所示。在零件通过最高点时， g 取 10 m/s 2 ，求下列两种情况下零件对杆的作用力：

- 零件的线速度为 1 m/s；
- 零件的线速度为 4 m/s。

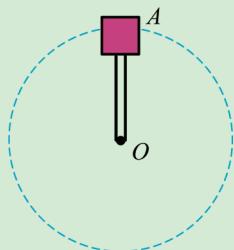


图 3-3-9

3.4 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：“车辆将要转弯，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

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，桶内的水泼了出来。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的对？

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3-4-1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。将潮湿的衣物放入筒内后，选择脱水挡，开动电动机，甩干筒就会绕轴快速旋转，衣物中的水随着筒的旋转从桶壁的小孔中被甩出去，一会儿衣物中的水就几乎被甩没了。

衣服中的水从筒壁小孔中被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？

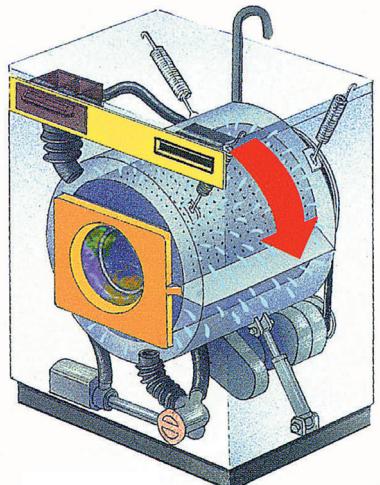


图 3-4-1 洗衣机甩干筒的壁上有许多小孔，当筒绕轴快速旋转时，衣物中的水从小孔中被甩出

案例 3

汽车一级方程式大赛

你在电视上看过汽车方程式大赛吗？有时候，飞速行驶的赛车在转弯处会突然冲出赛道。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 3-4-2 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？

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海绵。用手指捏牢细线的另一端，甩动海绵块，使它在细线的牵动下做圆周运动。当海绵块转动时，所吸附的水由于离心现象会被甩出。

1. 保持细线长度不变，改变海绵块做圆周运动的转速。

请观察思考：海绵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. 保持海绵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，海绵块会脱离圆周运动飞出去？

分析与论证

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 3-4-3 所示。

物体做匀速圆周运动所需要的向心力是 $F_{\text{向心}} = m \frac{v^2}{R}$ 。

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. 如果指向圆心的合外力恰好等于运动物体所需要的向心力，即 $F = F_{\text{向心}}$ ，物体将怎样运动？
2. 如果运动中指向圆心的合外力突然消失，即 $F = 0$ ，物体将怎样运动？
3. 假设运动中指向圆心的合外力减小了，即 $F < F_{\text{向心}}$ ，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？

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，是因为它受到指向圆心的合外力的作用，使它保持在圆周上运动。当指向圆心的合外力突然消失，或小于所需要的向心力时，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 3-4-4），离心式水泵（图 3-4-5）、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。

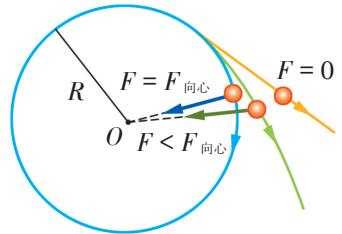


图 3-4-3 做匀速圆周运动的物体所受的指向圆心的合力改变时，运动的路径也将变化

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。



图 3-4-4 制作水泥涵管



图 3-4-5 正在抽水的离心式水泵

离心现象有时也会给人们带来种种危害。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，汽车就会向外侧滑行，导致交通事故。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道，这也是离心现象造成事故。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 3-1-4 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. 下列现象中，哪些利用了离心现象？哪些是为了抵消离心现象所产生的不利影响？
 - 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. 站在公交车里的乘客，在汽车转弯时要用手拉紧扶手
4. 你坐过游乐场中的离心机（图 3-4-6）吗？试分析，当离心机转动起来后，转盘里的人将怎样运动？他们会有怎样的感觉？当转速不断增大时，贴在筒壁上的人会有什么感觉？为什么？



图 3-4-6 在游乐场的离心机内

第3章家庭作业与活动

A组

1. 图3-A-1所示的传动装置中, B 、 C 两轮固定在一起绕同一轴转动, A 、 B 两轮用皮带传动, 三轮半径关系为 $r_A = r_C = 2r_B$ 。若皮带不打滑, 则 A 、 B 、 C 轮边缘的 a 、 b 、 c 三点的角速度之比为_____，线速度之比为_____。

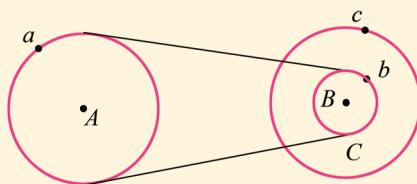


图3-A-1

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. 如图3-A-2所示, 两个质量不同的小球用长度不等的两根细线挂在天花板的同一点上。它们在同一水平面内做匀速圆周运动, 则它们的_____。

- A. 运动周期相同

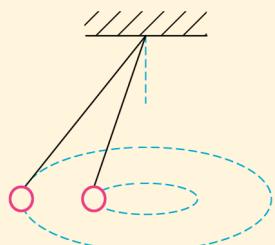


图3-A-2

- B. 线速度一样

- C. 角速度相同

- D. 向心加速度相同

4. 据报道, 我国“神舟”五号飞船绕地球做圆周轨道运行时, 轨道离地面高度是343 km, 飞船大约90 min 绕地球1圈。请估算“神舟”五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. 图3-A-3是某游乐场里的过山车。试分析过山车运动到 A 点和 B 点时它(包括车中乘客)的受力情况, 并说明是什么力提供了它做圆周运动的向心力。设过山车与其中乘客的总质量为300 kg, 通过 A 、 B 点的线速度分别是25 m/s和6 m/s, g 取 10 m/s^2 , 求过山车对轨道 A 点和 B 点的压力。

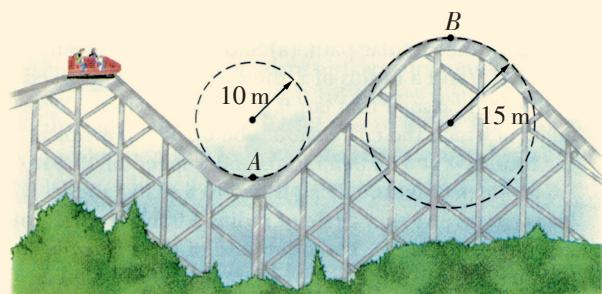


图3-A-3

7. 有一个叫“水流星”的杂技节目。表演时, 用一根长 $l = 1$ m的绳子, 一端系着一只水桶。桶内装有适量的水。演员用手抓着绳的另一端, 使装着水的水桶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, 水桶到达最高点时的最小速度应为多少? g 取 10 m/s^2 。

B组

1. 自行车赛车场的车道外侧都有一种斜坡状车道，赛车手往往在这斜坡车道上飞驶，如图 3-B-1 所示。分析设立斜坡车道的原因，并推导斜坡车道的倾角 θ 与车速 v 的关系。



图 3-B-1

2. 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。
3. 如图 3-B-2 所示，细绳一端系着质量为 0.6 kg 的物体 A，静止在水平放置的平板上，另一端

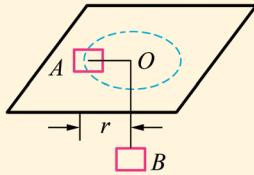


图 3-B-2

通过光滑小孔吊着质量为 0.3 kg 的物体 B。已知物体 A 的中点与圆孔的距离 r 为 0.2 m，并知物体 A 和平板的最大静摩擦力为 2 N。现使平板绕中心轴线转动，那么角速度 ω 在什么范围内，物体会与平板保持相对静止的状态？ g 取 10 m/s^2 。

4. 如图 3-B-3 所示，一个光滑的圆锥体固定在水平桌面上，其轴线沿竖直方向，母线与轴线之间的夹角 $\theta = 30^\circ$ 。一条长为 L 的绳（质量不计），一端固定在圆锥体的顶点 O 处，另一端拴着一个质量为 m 的小物体（可看作质点），此物体以线速度 v 绕圆锥体的轴线做水平匀速圆周运动。
- (1) 当 $v_1 = \sqrt{gL/6}$ 时，求绳对物体的拉力；
- (2) 当 $v_2 = \sqrt{3gL/2}$ 时，求绳对物体的拉力。

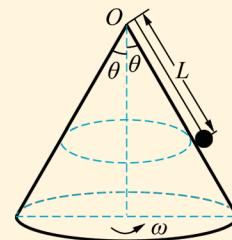
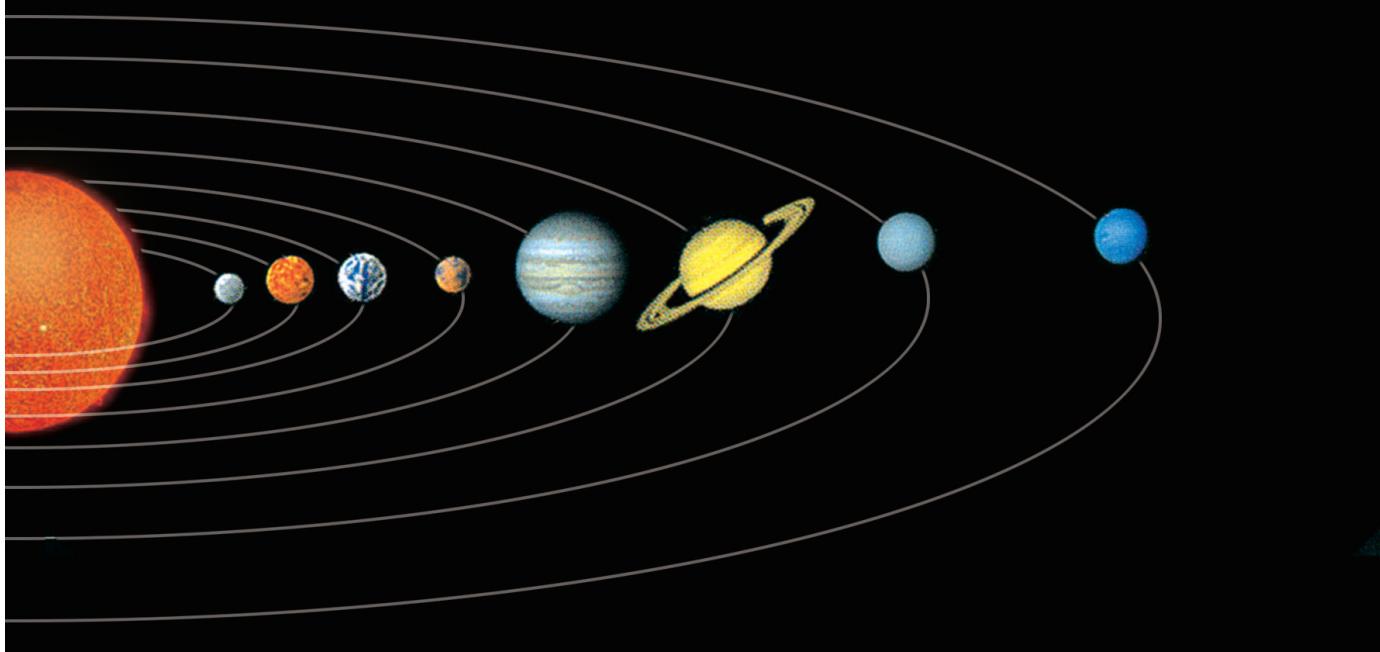


图 3-B-3



第4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。人类要遨游太空，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？

本章你将跨越千年时空，进行一次对宇宙结构认识的“三级跳”；你将领略牛顿发现万有引力定律过程的精彩，认识发现万有引力定律的重要意义，从万有引力定律的普适性认识自然界的统一性；你将重温人类向宇宙进军过程中那些激动人心的时刻，关注物理学定律与航天技术等现代科技的联系。

* 摘引自毛泽东《七律二首·送瘟神》。

4.1 从托勒密到开普勒

托勒密与地心说



托勒密 (C. Ptolemaeus, 约90—168)，集古希腊天文学、地理学、数学之大成的学者。

在古代，人们在观察日月的升落、星辰的移动时，就对天体模型做了各种想象。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，构筑了宇宙的“地心体系”模型（图 4-1-1）。

托勒密的模型把一系列不同的圆周运动（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。托勒密的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，从而成为西方古代天文学的研究基础。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。

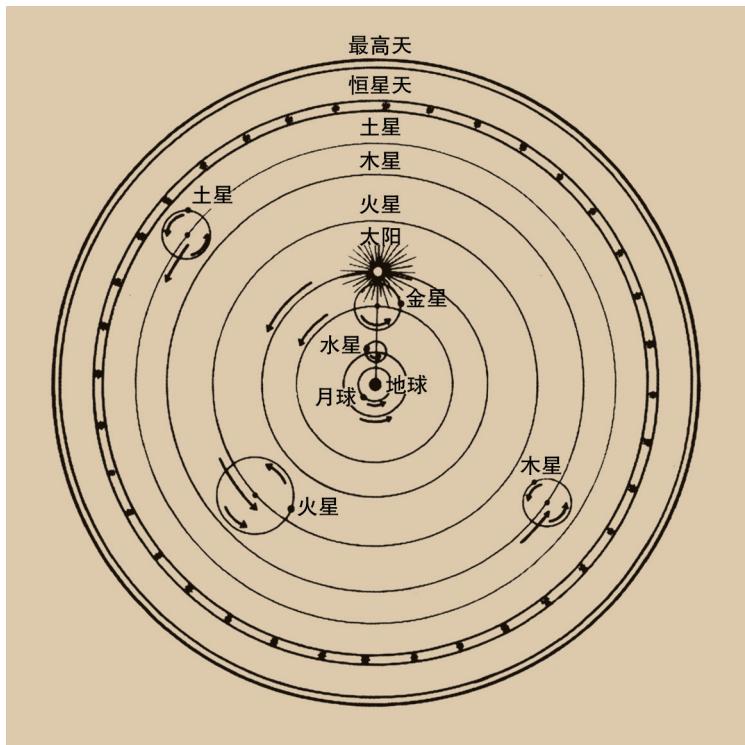


图 4-1-1 托勒密的宇宙模型

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。

哥白尼与日心说

为了解释天体的运动，托勒密的模型竟用了 80 多个轮，重重叠叠，令人头晕目眩。

哥白尼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。经过长期观察和反复计算，并针对托勒密地心体系存在的问题，哥白尼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。

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。请你考虑一下，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。”

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 a	29.46 a	9.2	9.54
木星	11.8 a	11.86 a	5.2	5.20
火星	687 d	686.98 d	1.52	1.52
地球	365 d	365.25 d	1.00	1.00
金星	224 d	224.70 d	0.72	0.72
水星	88 d	87.9 d	0.38	0.39



哥白尼 (N. Copernicus, 1473—1543)，波兰天文学家。

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



第谷 (T. Brahe, 1546—1601)，丹麦天文学家。著名的科学史家丹皮尔 (W. Dampier) 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。这颗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。

哥白尼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路，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周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 4-1-2）。

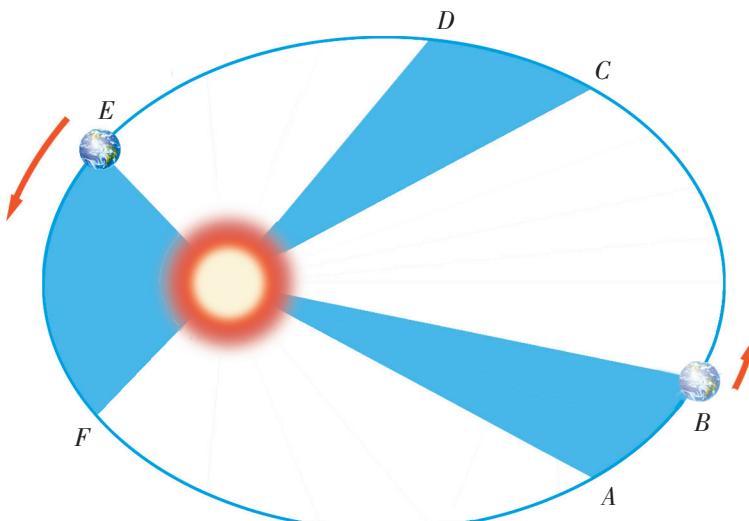


图 4-1-2 太阳和行星的连线在相等的时间内扫过相等的面积

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都相等。用公式表示为

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

式中 a 表示行星椭圆轨道的半长轴， T 是行星公转的周期， 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，观测与理论相互印证和相互交融，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，有时可把行星的椭圆轨道简化为圆周轨道。

信息浏览

八颗行星的基本数据

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	0.055 4	5.07×10^6	7.60×10^6	八颗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	0.107 5	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	八颗行星中最大的一颗；亮度仅次于金星
土星	60 000	95.18	3.68×10^4	9.30×10^8	八颗行星中次大的行星
天王星	25 900	14.63	3.68×10^4	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

- 人类对天体运动的研究历史悠久，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。
- 在开普勒的成功中，你认为哪一处（或哪几处）对你的影响最大？
- 我国的“风云”二号卫星是地球同步卫星。因为它与地球自转同步，所以我们看上去就像停在天空中不动一样。请运用开普勒定律，根据月球绕地球运动的相关数据，估算同步地球卫星离地面的高度。近似地把月球和“风云”二号卫星的轨道看作圆周轨道，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 d，地球半径为 6 400 km。计算时保留两位有效数字。

像停在天空中不动一样。请运用开普勒定律，根据月球绕地球运动的相关数据，估算同步地球卫星离地面的高度。近似地把月球和“风云”二号卫星的轨道看作圆周轨道，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 d，地球半径为 6 400 km。计算时保留两位有效数字。

4.2 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，绕着太阳做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，这些都还是谜！

发现万有引力的过程

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

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）都对此作出了重要的贡献。

站在巨人肩上的牛顿

1665—1666年，牛顿（I. Newton）研究发现：维持月球绕地球运动所需的力，来自地球对月球的吸引力。此后，牛顿进一步证实，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。牛顿进而提出，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。

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 4-2-1 中，苹果受到地球的引力作用，产生加速度落向地面，但月亮也会受到地球的引力作用，它也产生加速度吗？那么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？

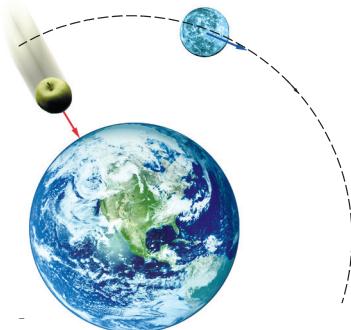


图 4-2-1 月亮和苹果都有加速度吗？为什么月亮不掉下来？

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？归根结底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？

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，这样就方便地计算出了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，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。大约从 1665 年到 1666 年，他进行了“月—地检验”，经过长期、艰巨的创造性工作，终于在引力问题上

据科学史研究，德国数学家莱布尼茨 (G. Leibniz) 在同一时期也发明了微积分。

摘取了桂冠。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** (the 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， $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ 。这表示两个质量 1 kg 的物体相距 1 m 时，它们之间相互吸引的力的大小是 $6.67 \times 10^{-11} \text{ N}$ 。

万有引力定律是自然界中的一条基本规律。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 $3.56 \times 10^{22} \text{ N}$ 。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。

请讨论：

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！”你能体会到这句话的含义吗？

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1 最近几年，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大小的比值是多少？

■ **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大小为

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

所以

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

即探测器在地球表面受到的引力大小是在火星表面所受到的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？

■ **案例2** 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，并运用圆周运动的知识，就可以估算出天体的质量。已知地球绕太阳的公转周期 $T = 365.25 \text{ d} = 3.16 \times 10^7 \text{ s}$ ，平均轨道半径 $r = 1.50 \times 10^{11} \text{ m}$ 。太阳的质量有多大？

■ **分析** 如图4-2-2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 。

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

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

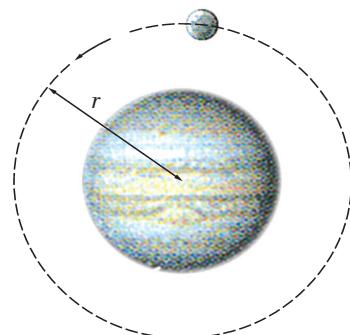


图4-2-2 行星绕天体做匀速圆周运动

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

$$M = \frac{4 \times 3.14^2 \times (1.50 \times 10^{11})^3}{6.67 \times 10^{-11} \times (3.16 \times 10^7)^2} \text{ kg} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$$

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”出我们所在的地球的质量, 需要查阅哪些数据和资料? 请用这些数据推算出地球的质量。

信息浏览

海王星的发现

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了不断的观察。结果发现, 根据不同时间的观察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?

.....

天王星的“出轨”现象, 也激发了法国青年天文学家勒维烈 (U. Le Verrier, 1811—1877) 和英国剑桥大学学生亚当斯 (J. Adams, 1819—1892) 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。亚当斯也不时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, 还有一颗有待发现的行星!

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, 这些资料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这颗行星, 但在搜寻过程中, 又两次把这颗行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, 他写信给德国天文学家加勒 (J. Galle)。他在信中说: “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° 的区域内发现一颗圆而亮的新行星……”9 月 23 日, 即收到勒维烈信的当天晚上, 加勒在信中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

现了前所未知的天体，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。

恩格斯对海王星的发现评价道：“哥白尼的太阳系学说有300年之久一直是一种假说，

这个假说尽管有99%、99.9%、99.99%的可靠性，但毕竟是一种假说；而当勒维烈从这个太阳系学说所提供的数据，不仅推算出必定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，当后来加勒确实发现了这个行星的时候，哥白尼的学说就被证实了。”

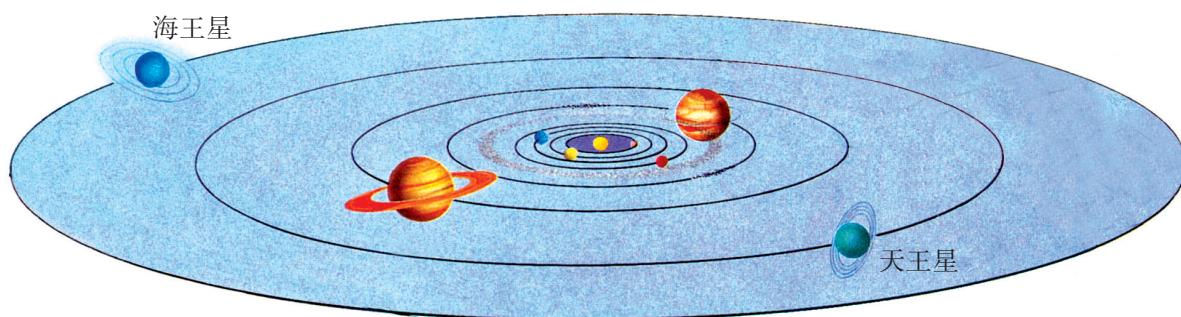
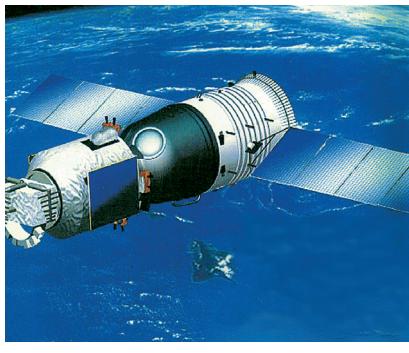


图 4-2-3 天王星和海王星的轨道

家庭作业与活动

- 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。
- 已知太阳质量 $M = 1.97 \times 10^{30}$ kg，地球质量 $m = 5.98 \times 10^{24}$ kg，太阳和地球间的平均距离 $r = 1.49 \times 10^{11}$ m，则太阳和地球间的万有引力有多大？已知拉断截面积 $S_0 = 1 \text{ cm}^2$ 的钢棒需施力 $F_0 = 6.68 \times 10^4$ N，那么太阳吸引地球的力可以拉断截面积多大的钢棒？
- 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？
- 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（ ）。
 - 飞船的线速度
 - 飞船的角速度
 - 未知天体的质量
 - 未知天体的密度
- 已知引力常量，下列条件中能算出地球质量的是（ ）。
 - 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
 - 已知近地卫星的周期和它的向心加速度
 - 已知卫星轨道半径和运动周期
 - 已知卫星质量和它离地面的高度
- 根据案例1中的数据计算一下：如果“火星探路者”在距火星表面100 m高处自由下落一个物体，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？
- 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）。



a



b

图 4-3-1 “神舟”五号飞船与中国第一位航天员杨利伟

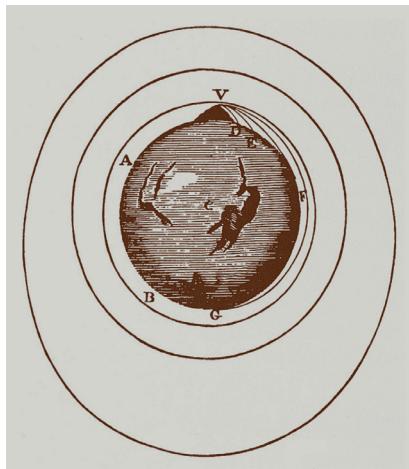


图 4-3-2 牛顿的预言

牛顿提出过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”。

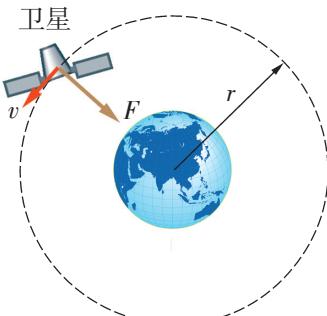


图 4-3-3 人造卫星绕地球做匀速圆周运动

4.3 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，也为人们在理论上开辟了上天之路。

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，人类迈入航天时代。

2003年10月15日，“神舟”五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。

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？

分析与论证

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 4-3-3），则由

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

得卫星运动速度的大小

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

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，这个速度越小。

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的大小。

你算的结果是 7.9 km/s 吗？这是人造地球卫星在地面附

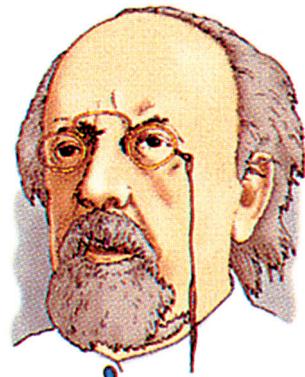
近做匀速圆周运动必须达到的速度，叫做第一宇宙速度 (first cosmic velocity)，又叫地面附近的环绕速度。

你能否算出在地表附近运动的人造卫星的运动周期？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？

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，还必须提高卫星的运动速度。

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 4-3-4）。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。



齐奥尔科夫斯基（К. Э. Циolkовский，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。

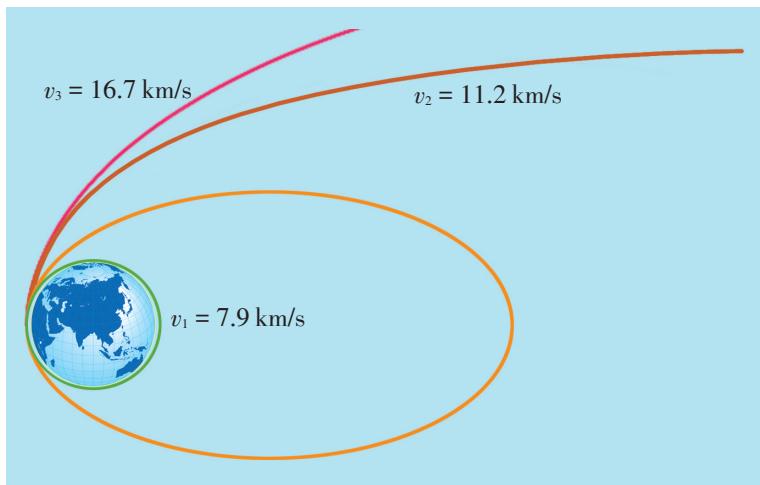


图 4-3-4 三个宇宙速度的示意图

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。



图 4-3-5 人类第一次登上月球

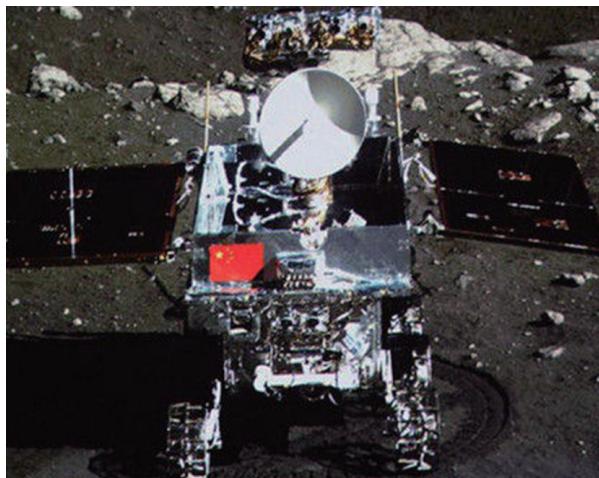


图 4-3-6 我国的“玉兔”号月球车在月球上自由行走



图 4-3-7 “旅行者”1号和2号都携带着的镀金唱片



图 4-3-8 “长征”七号运载火箭在海南文昌航天发射场发射升空

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，而让人造卫星和航天飞船脱离地球引力所需要的速度远大于此。怎样才能获得这么大的速度呢？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……这就是多级火箭技术，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4-3-8是中国的“长征”七号运载火箭升空时的雄姿。

人类探索宇宙的历程

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，苏联发射了第一颗人造地球卫星；1961年4月12日，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4天的飞行，1969年7月20日，美国航天员阿姆斯特朗(N. Armstrong)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，这只不过是一小步，可对全人类来说，这是一次巨大的飞跃。”

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。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。1977年8月和9月，又有一对“孪生兄弟”——“旅行者”2号和1号先后出发，再次对太阳系进行考察。

1976年7月和9月，美国的“海盗”1号和“海盗”2号先后成功地在火星软着陆。1997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。2004年1月3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，并发回了火星表面的高清晰度照片（图4-3-9）。

中华民族是最早产生飞天梦想的伟大民族。从“嫦娥奔月”的动人传说到底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”一号上天了，嘹亮的《东方红》乐曲响彻太空。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。近年来，我国载人航天、探月探火工程取得了一系列重大突破。

1992年，我国决定实施载人航天工程。2003年10月15日，“神舟”五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小时23分钟，绕地球飞行14圈。之后，我国又成功发射了多艘“神舟”飞船以及“天宫”一号、“天宫”二号目标飞行器。2021~2022年，中国载人空间站的“天和”核心舱、“问天”实验舱、“梦天”实验舱等相继发射，并完成空间站T字基本构型在轨组装。11月12日，“天舟”五号货运飞船与空间站成功对接，中国航天员首次在空间站迎接货运飞船来访。空间站建成后，标志着我国载人航天进入了应用发展阶段，踏上了探索未知世界、造福人类的新征程。

我国探月工程顺利完成了“绕”“落”“回”的预期目标。中国首个实施无人月面取样返回的月球探测器“嫦娥”五号于2020年11月24日发射，“嫦娥”五号探测器于12月1日成功在月球正面预选着陆区着陆，“嫦娥”五号返回器于12月17日携带月球样品返回地球。

我国火星探测工程起步较晚，但起点高、效率高。2020



图4-3-9 “勇气”号发回的火星表面照片

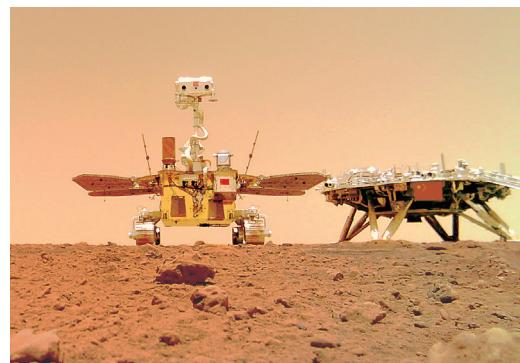


图4-3-10 “天问”一号和“祝融”号火星车“着巡合影”图



图4-3-11 中国空间站T字构型建造示意图

年 7 月 23 日，“天问”一号探测器发射升空，迈出了中国自主开展行星探测的第一步。2021 年 5 月 15 日，“天问”一号成功实施火星着陆，之后，“祝融”号火星车驶上火星表面开始巡视探测，“天问”一号环绕器准确进入遥感使命轨道，开展火星全球遥感探测。在首次探测任务中就一次性实现了“绕”“落”“巡”三大任务，史无前例。

近年来，我国在载人航天、探月探火和其他领域取得了重大成果，进入创新型国家行列。

请讨论：

1. 人类为什么要发射人造卫星？为什么要探测月球、火星和其他星球？
2. 你知道我国在航天领域取得了哪些成就？
3. 你在探索宇宙方面有哪些希望与梦想？

案例分析

■ **案例1** 已知地球质量为 M ，半径为 R ，自转周期为 T ，引力常量为 G 。由此计算地球同步卫星离地面的高度。

■ **分析** 地球同步卫星绕地心相对地面静止地做圆周运动需要的向心力是由地球对卫星的万有引力提供的。按题意，卫星的运转周期和地球自转周期相同。由此可以计算出卫星离地面的高度。

■ **解答** 设卫星离地面的高度为 h ，

$$F_{\text{引}} = G \frac{mM}{(R+h)^2} \quad F_{\text{向心}} = m \frac{4\pi^2}{T^2} (R+h)$$

$$G \frac{mM}{(R+h)^2} = m \frac{4\pi^2}{T^2} (R+h)$$

$$h = \sqrt[3]{\frac{GMT^2}{4\pi^2}} - R$$

■ **案例2** 站在某星球表面上的航天员，在离星球表面高 h 处沿水平方向抛出一个小球，小球落在星球表面上的 P 点，测得抛出点和落地点 P 之间的水平距离为 L 。若将小球以相同的初速度竖直向上抛出，经过时间 t 小球落回到抛出点。该星球半径为 R ，引力常量为 G ，不计星球自转的影响。求：

- (1) 该星球的质量 M ；

(2) 该星球的第一宇宙速度 v_1 。

■ 分析 首先根据平抛运动规律求出该星球表面的重力加速度 g 。在不计星球自转影响的情况下, 对于星球表面上的物体, 有 $G \frac{Mm}{R^2} = mg$ 。由此可求出该星球的质量。绕星球表面做匀速圆周运动需要的向心力是由星球对卫星的万有引力提供的, 由此可求出该星球的第一宇宙速度。

■ 解答 (1) 设小球抛出时的初速度为 v_0 , 平抛物体的飞行时间为 t' , 该星球表面的重力加速度为 g 。

由平抛运动规律可知: $L = v_0 t'$, $h = \frac{1}{2} g t'^2$ 。

小球以相同的初速度竖直上抛时, 有 $v_0 = \frac{1}{2} g t$ 。

联立以上各式, 解得: $g = \frac{2L^2}{ht^2}$ 。

设小球的质量为 m , 根据万有引力定律得: $G \frac{Mm}{R^2} = mg$ 。

由此解得: $M = \frac{2L^2 R^2}{Ght^2}$ 。

(2) 由 $G \frac{Mm}{R^2} = mg = m \frac{v_1^2}{R}$ 得: $v_1 = \frac{L}{t} \sqrt{\frac{2R}{h}}$ 。

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. 它的线速度一定小于第一宇宙速度
- D. 它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. 已知地球半径为 R , 自转角速度为 ω , 地面的重力加速度为 g 。在赤道上空一颗相对地面静止的同步卫星离开地面的高度是_____ (用以上三个量表示)。

4. 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（也可自己另选题）：

（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）航天员的生活；
（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”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”号航天飞机内就曾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。

第4章家庭作业与活动

A组

- 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。
- 设在卡文迪什扭秤实验中，小球质量 $m = 0.01\text{ kg}$ ，大球质量 $m' = 0.5\text{ kg}$ ，两球球心间距离0.05 m。不计其他物体对小球的引力，两球间的引力及由此引力产生的加速度有多大？
- 已知地球半径 $R = 6370\text{ km}$ ，则当一物体从地面升高到 $h = 1\text{ km}$ 的高空时，其所受重力的变化是在地面所受重力的多少倍？
- 太阳对木星的引力是 $4.17 \times 10^{23}\text{ N}$ ，它们之间的距离是 $7.8 \times 10^8\text{ km}$ 。已知木星的质量为 $2 \times 10^{27}\text{ kg}$ ，求太阳的质量。
- 有两艘轮船，质量分别为 $5.0 \times 10^7\text{ kg}$ 和 $1.0 \times 10^8\text{ kg}$ ，且相距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。
- “神舟”五号飞船的成功升空标志着我国进入了载人航天时代。“神舟”五号飞船绕地球的飞行可视为匀速圆周运动，则对于飞船运行速度 v 的大小来说，正确的是（ ）。
 - $v < 7.9\text{ km/s}$
 - $v = 7.9\text{ km/s}$
 - $7.9\text{ km/s} < v < 11.2\text{ km/s}$
 - $v = 11.2\text{ km/s}$
- 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？

- 发射地球同步卫星时不是一次性地把卫星送到最终的轨道上。发射时，先将卫星发射至近地圆周轨道1，然后使其在轨道2上沿椭圆轨道运行，最后将卫星送入同步圆周轨道3。轨道1、2相切于 Q 点，轨道2、3相切于 P 点，如图4-A-1所示。卫星分别在三个轨道上正常运行时，下列物理量的比较关系中正确的是（ ）。
 - 卫星在轨道3上的速率大于在轨道1上的速率
 - 卫星在轨道3上的角速度小于在轨道1上的角速度
 - 卫星在轨道2上运行到 P 点时与它在轨道3上运行到 P 点时加速度是相等的
 - 卫星在轨道1上运行时的速度，与它在轨道2上经过 Q 点时的速度大小相等

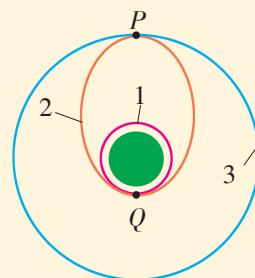
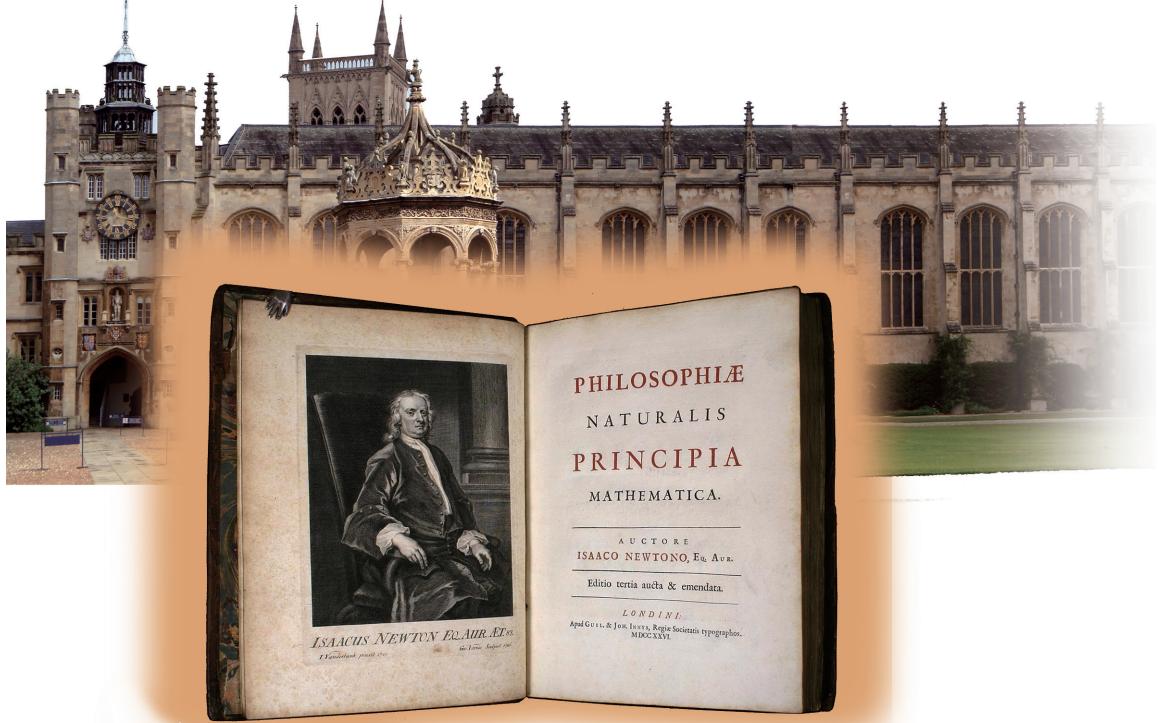


图4-A-1

B组

- 设地球的第一宇宙速度为 v_1 ，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。
- 利用所学知识，推导第一宇宙速度的另一表达式 $v = \sqrt{gR}$ 。
- 请查阅资料，写一篇关于人造卫星的分类、运行轨道和主要性能、用途的小论文，并与同学交流。



第 5 章 经典力学的局限性 与相对论初步

经典力学 (classical mechanics)，通常叫牛顿力学。牛顿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，总结了经典力学的基本规律。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。著名物理学家开尔文勋爵 (Lord Kelvin) 踌躇满志地宣告：“科学大厦已经基本建成。”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。”

开尔文担忧的“两朵乌云”是什么呢？

当物理学研究扩展到微观、高速领域时，人们发现经典力学不再适用。20 世纪初，物理学家创立了相对论和量子论，驱散了“两朵乌云”，奠定了现代物理学的基础。

本章你将在了解经典力学巨大成就及其局限性的基础上，初步了解相对论时空观，关注宇宙起源和演化，体会人类对自然界的探索永无止境。

5.1 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。

《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……这些都对牛顿的科学成就起了很大的作用。

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》的概貌

《原理》共有两大部分。

第一部分包含“定义和注释”及“运动的基本定理或定律（包括三个运动定律）”。《原理》遵循古希腊的公理化模式，首先给出基本力学量的定义，然后提出运动三定律及其推论。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。第一卷讨论无阻力自由空间中物体的运动；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，不但提出了万有引力定律，还进一步研究了行星绕日运动、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. 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？

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了。这既是人类对自然界认识的一次大综合，也是人类认识史上的一次重大飞跃。

经典力学的思想，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。

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，除非有力加予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？

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，开创了将实验与数学相结合的方法。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。

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。



图 5-1-1 经典力学应用一瞥

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，以及它受到的力随时间空间的变化规律，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。机械论把这一思想运用到了自然界的一切事物上。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，这无疑是人类认识史上的一次飞跃。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。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

- 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。
- 将一枚硬币随机向上抛起，你能否断定（不是猜想）它落地时哪一面朝上？请试一试。当抛的次数越来越多时，你发现了什么规律？
- 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。

5.2 狹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

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

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，力学的研究对象是宏观物体的机械运动，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？

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，不是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；不管你是在学校、
汽车或飞机上，或一人在家中，时间都在默默地流逝着，
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，持续了两百余年。

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（它们当地时钟示数的不同，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。

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？

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

狭义相对论的基本假设

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的光波，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，则违反了伽利略的速度合成法则。

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量物体自由下落的时间，测量单摆的周期，研究平抛运动的规律，或用实验研究牛顿第二定律，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，能不能将伽利略相对性原理推广到与光速有关的情况呢？

请讨论：

假设有一艘宇宙飞船，它的速度高达 7.5×10^4 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？

根据伽利略的速度合成法则可以计算出，第1个问题的答案是 3.75×10^5 km/s，第2个答案是 2.25×10^5 km/s，第3个答案是 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？伽利略的速度合成法则为什么不适用于高速运动呢？

两条基本假设

其实，光速不变是一个重要的事实，光速不变也是一条物理规律。

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) 的基本假设：

1. 在不同的惯性参考系中，一切物理规律都是相同的。这条假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假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。

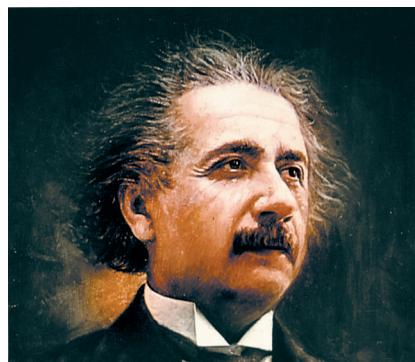
信息浏览

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。1902 年到瑞士专利局工作，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。1909 年起开始当教授。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

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

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），为分子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。”

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，即光速。

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。

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 $c = (299 870 \pm 50) \text{ km/s}$ ，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约为 $3 \times 10^5 \text{ km/s}$ 。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相对运动影响的特性，违背了一般的速度合成法则，很令人费解。开尔文所说的“两朵乌云”，一朵就是指迈克耳孙-莫雷实验。

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。

5.3 相对论的时空观与宇宙演化

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 和 Q ，在站台上有一个观察者 B ，如图 5-3-2 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。

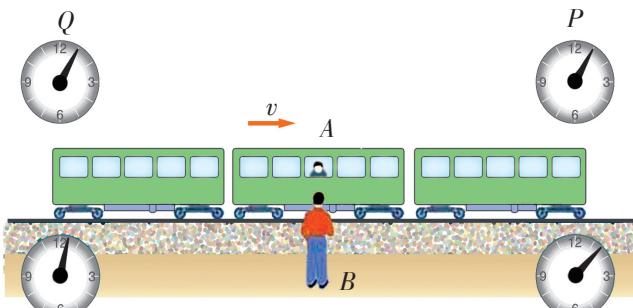


图 5-3-2 同时的相对性实验

这种不同时性，确实令人惊讶。人们原以为，地面上的人，



图 5-3-1 浩瀚的宇宙

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。

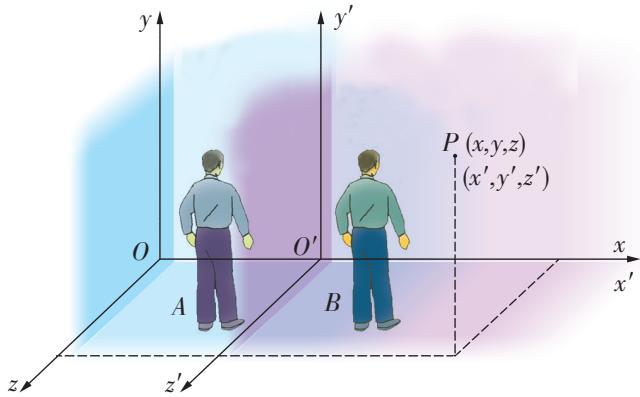


图 5-3-3 两个参考系中的时间与空间

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？

如图 5-3-3 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，按经典力学的时空观和伽利略的速度合成法则，因时间、空间与物质运动无关，其变换公式为

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

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

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

$$\begin{cases} x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} t = \frac{t' + \frac{v}{c^2} x'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{cases} \quad (4)$$

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 5-3-4), 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 (length contraction) 效应, 或尺缩效应。这个效应显示了空间的相对性。图 5-3-5 是发生尺缩效应时, 长度与速度的关系。

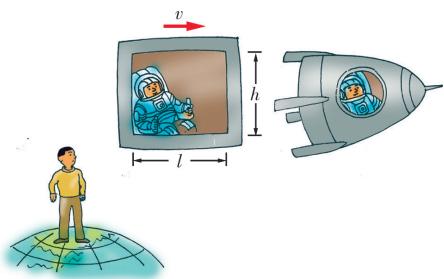


图 5-3-4 地面上和飞船上测量的飞船窗口长度不相同, 而高度相同

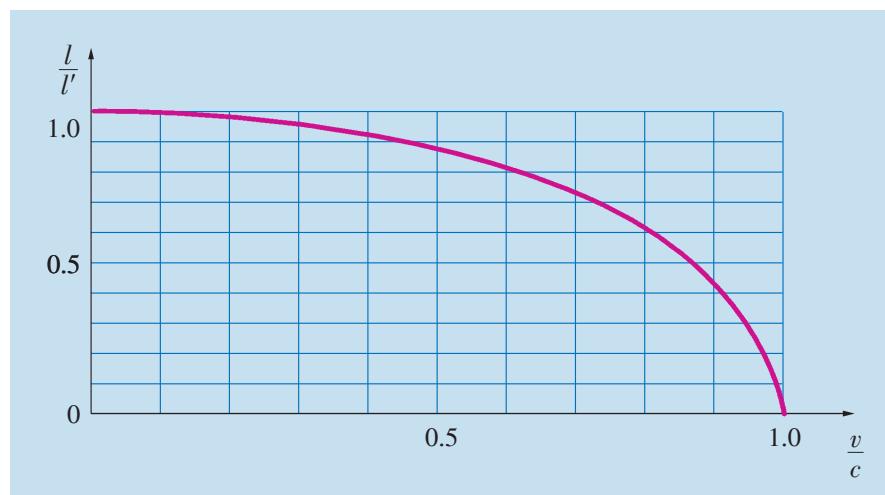


图 5-3-5 发生尺缩效应时, 长度与速度的关系

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 (time dilation) 效应，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。

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

信息浏览

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，有一种粒子叫 μ 子，它的寿命只有 $2.2 \mu s$ ，就是说，如果你观察一个相对于你静止的 μ 子，你只能观察 $2.2 \mu s$ ，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 $0.9966 c$ ，由公式计算出它的平均寿命为 $26.7 \mu s$ ，实验值也为约 $26.4 \mu s$ 。因此，实验完全证实了时间延缓公式。

1971年，哈夫勒 (J. Hafele) 和基廷 (R. 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 5-3-6)。

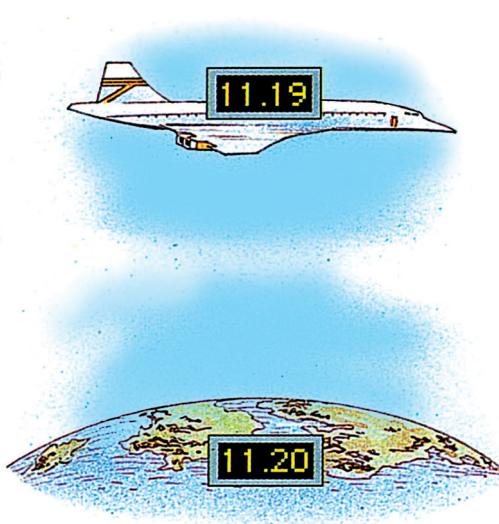


图 5-3-6 飞机上观察时间延缓效应示意图

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惯性参考系的速度影响，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 5-3-7 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 5-3-8 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。

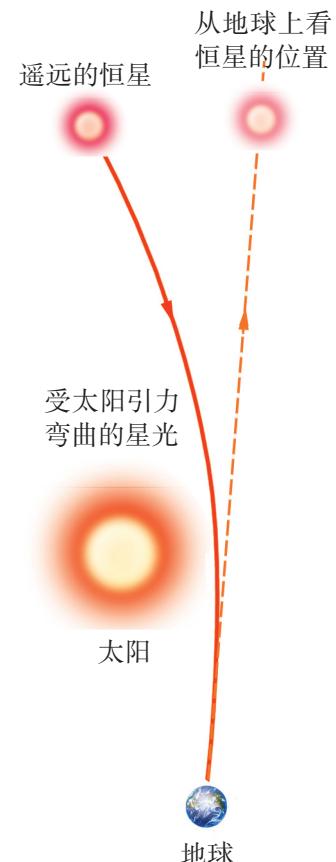


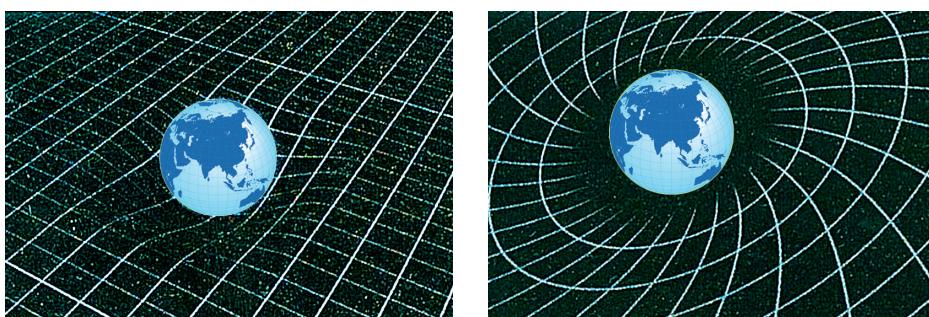
图 5-3-7 由于太阳的引力使光线弯曲，我们能够看到太阳后面的星星

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

图 5-3-8 爱因斯坦的广义相对论预言：时空弯曲

左图表示任何具有质量的物体都会使周围的空间弯曲；右图表示具有质量的物体的旋转使其周围的时空发生扭曲。



宇宙的起源与演化

从古到今，关于宇宙起源之谜、宇宙演化之谜，引发了人类种种遐想。为了揭开这些谜底，人们将宇宙作为一个整体来研究，形成了一门新的科学——宇宙学。

大爆炸宇宙模型，与 DNA 双螺旋模型、地球板块模型、夸克模型一起，被认为是 20 世纪自然科学中最重要的四个模型。

宇宙的起源

关于宇宙的起源，目前比较有影响的理论是宇宙热大爆炸假说。它是俄裔美国物理学家伽莫夫 (G. Gamov) 在 1948 年首先提出的。该假说认为，我们所观察到的宇宙，产生于最初的一次大爆炸，那时宇宙的温度极高，密度极大，体积极小。随着爆炸的发生，宇宙不断地向各个方向迅速膨胀。随着温度和密度的降低，宇宙早期存在的微小的密度不均匀性在引力作用下不断增强，最后逐渐形成今天宇宙中的各种天体。这一宇宙模型被公认为标准宇宙模型。

伽莫夫根据自己的大爆炸假说预言，作为爆炸的后果，宇宙空间应该存在当时产生的微波辐射。那么在实验中能否探测到这一微波辐射，就被认为是初步验证大爆炸假说的关键。

20 世纪 60 年代初，美国科学家威尔逊 (R. Wilson) 和彭齐亚斯 (A. Penzias) 在一次实验中意外地发现，接收微波的天线不管指向何方，总会接收到一定的微波噪声，这一微波噪声跟方向、日夜和季节均无关。他们认为，这是来自空间的一种辐射。为此他们获得了 1978 年的诺贝尔物理学奖。

从宇宙学观点来看，这种微波背景辐射是一百多亿年前的宇宙存留到今天的遗迹，对它的进一步精密观测将告诉我们许多关于宇宙早期的信息。例如，大爆炸后的第一瞬间发生了什么？宇宙是如何演变成今天我们所见到的复杂星系结构的？宇宙的年龄究竟是多少？宇宙的膨胀速度到底有多大？

哈勃红移现象与机械波中的多普勒效应相似。

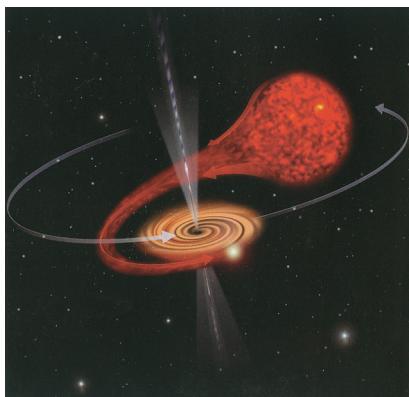


图 5-3-9 黑洞吸引大爆炸产生的物质

宇宙的演化

1929 年，美国天文学家哈勃 (E. Hubble) 用望远镜对远距离星云进行观测时，发现遥远的恒星发出的谱线普遍存在一种“红移”现象：即和地球上同物质的谱线进行比较时，其波长变长，频率减小，即向光谱的红色方向移动，且离地球越远的恒星，这种红移越大。这一现象表明，这些恒星正在离我们远去，从而表明宇宙处于一种膨胀状态。

在宇宙演化的过程中，黑洞 (black hole) 是恒星演化的结果。当一个大质量的恒星进入演化的后期，其自身强大的引力使得这种恒星收缩。随着它的收缩，其引力场的强度变得越来越大。当恒星收缩到一定程度时，引力场变得如此之强，以致光线弯向内部并被囚禁在那里，再不会返回到太空。根据相对论，光

的速度是最快的，如果它都不能逃脱这种星体的束缚，那么任何其他的东西也就不可能逃出了，一切都被极强的引力场所吞噬。这样的星体就叫做黑洞（图 5-3-9）。

黑洞本身不能发出光线，所以就不可能直接显示它的存在。但是，可以观察到它巨大的引力场对周围物质产生的效应。例如，从黑洞边缘经过的光线，如果没有被黑洞所吸收，它们就会发生很大的偏移，甚至可能在到达观察者之前，在黑洞周围多次地以循环型轨道行进。

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，

车头和车尾哪处先遭到轰击？

3. 尝试用（3）（4）两式导出长度收缩公式。
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？

第5章家庭作业与活动

A组

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，如果地球上的观察者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，而同一过程的时间将缩短。这个结论对吗？

B组

学了本章后，你能简单谈一下你对时空的认识吗？

课题研究

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。

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·必修·第二册》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，也许没有鸿篇大论，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如何积极稳妥地推进碳达峰碳中和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，一定会受到大家的欢迎。

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。

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. 分析与论证

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。

后记

我们编写的《普通高中物理课程标准实验教科书》（沪科教版）在实验区已试用十余年了，随着基础教育课程改革的深入，教育部又颁布了《普通高中物理课程标准（2017年版）》，为此，我们根据新课标的要求，对这套教科书进行了全面修订，以适应新时期课程改革的要求。

这次修订旨在落实“立德树人”根本任务，进一步提升学生的物理核心素养，为学生的终身学习、终身发展和做有责任感的社会公民奠定基础。

参加本册修订的编写组成员如下：

总主编：束炳如 何润伟

副总主编：母小勇 仲扣庄

本册主编：郭怀中 母小勇

本册主要作者：王高、郭怀中、路文艳、母小勇、李志棣

本教科书于2004年首次出版，当时参加本册书有关内容编写人员还有（以姓氏笔画为序）：王天骄、王可兵、王继珩、王溢然、杨思峰、梅小景、戴结林等。沈永昭、倪汉彬、汪乾荣、王文祥、罗基鸣、徐建国、梁明奋等同志也曾对本书的修改提出了许多宝贵意见。随着课程改革的深入，编写队伍的组成人员也发生了一些变化，旨在进一步优化编写队伍，以适应新时期课程改革的需求。

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热情帮助和大力支持。上海科技教育出版社的匡志强、李桔青、朱惠霖、汤世梁等同志和有关工作人员为本书的编辑加工、美术设计、排版印刷等方面做了大量的工作，在此，编写组特向关心本书及为本书的出版提供帮助的所有同志表示诚挚的谢意。

研制符合时代要求的、有特色的、高质量的高中物理教科书，始终是我们的追求目标。恳请广大专家、学者、教师、教研员、学生和家长对本套教科书提出宝贵的意见和建议，与我们一起，合作共建这套教科书。

上海科技教育出版社接收教科书意见和建议的联系方式

电话：021-64702058 电子邮箱：office@sste.com