

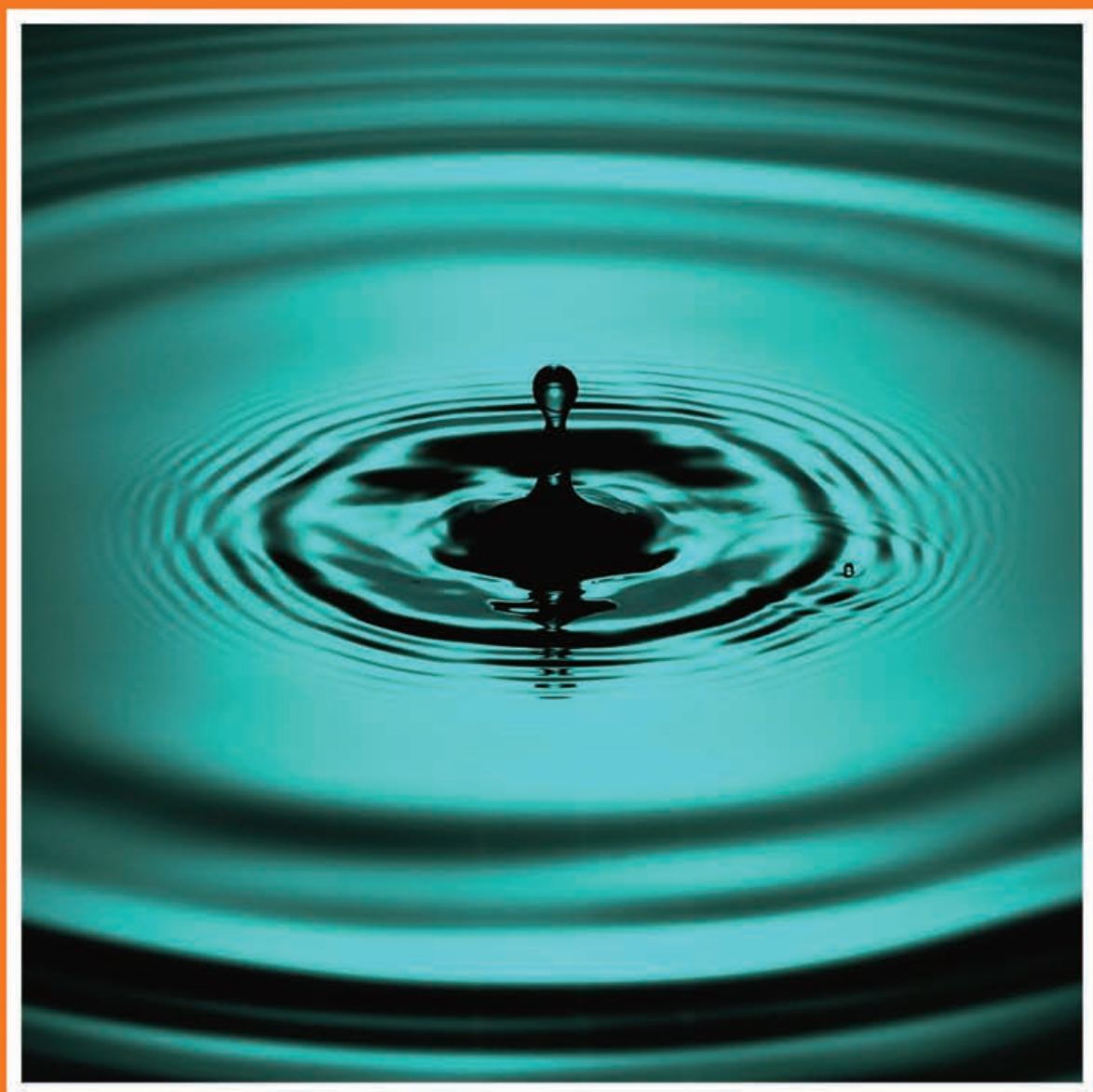


普通高中教科书

物理

选择性必修

第一册



上海科技教育出版社

普通高中教科书

物理

选择性必修

第一册

总主编 束炳如 何润伟



上海科技教育出版社

亲爱的同学：

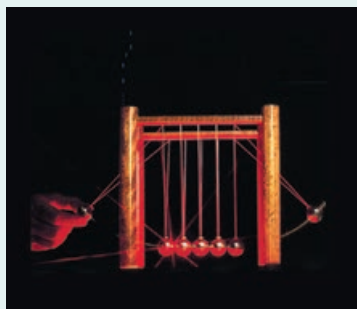
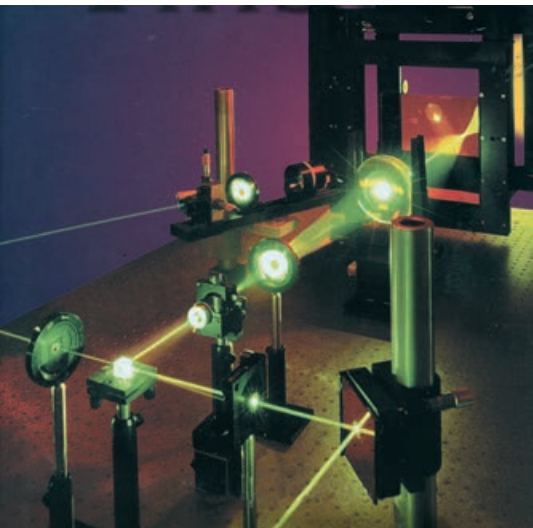
欢迎你学习《物理（选择性必修1）》！

物理学的巨大魅力，可能早已让你爱上了物理学。我们愿继续与你携手，迈向物理学大厦中更加金碧辉煌的厅堂。

你正在进入《物理（选择性必修1）》的大门。在这里，你首先会在碰撞问题中再次享受守恒定律的美妙。接着，你将与波同行，与光为伴，发现物理世界的奇观异彩……这一切会让你流连忘返。

《物理（选择性必修1）》将为你提供进一步进行科学探究的机会。你将通过实验和理论分析，探索碰撞与动量守恒、机械振动、机械波和光的波动性。你可以充分展示你的才华，进一步体会物理学的思想和方法，了解物理学在科学技术中的广泛应用，认识物理学在人类社会发展中的重要作用。

为了让你在学习《物理（选择性必修1）》的过程中获得更大的成功，请浏览下面的本书栏目介绍。



第1章 碰撞与动量守恒

你做过奇妙的碰撞实验吗？在该实验中，横杆上并排地悬吊着5个小球，当你将最左边的小球拉起后放手，你将观察到什么现象？如果将最左边的两个小球拉起后放手，你又会观察到什么现象？

类似的实验现象曾使17世纪的科学家们惊讶不已。你是否也有困惑？这其中隐藏着怎样的规律？

在自然界中，从微观、宏观到宇观，碰撞的事例很多。由于碰撞时相互作用的时间很短，而且在碰撞过程中作用力是变化的，直接运用牛顿运动定律来分析就很困难。那么，怎样分析、研究这类碰撞问题呢？

本章首先你将通过实验探究碰撞中所遵循的物理原理——动量定理和动量守恒定律，知道动量守恒的普适性；然后你将了解弹性碰撞和非弹性碰撞的特点，并用它们解释生产生活中的有关现象，体会用守恒定律分析物理问题的方便，感受自然界的和谐与统一之美。

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。

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 探究受迫振动

1. 将弹簧振子挂在曲轴的弯曲部位（图2-5-5），放在空气中，使其上下振动。振子做自由振动时的频率叫做振动系统的固有频率（natural frequency）。固有频率是由振动系统本身的结构和特征决定的。请估计一下此振动系统固有频率的大小。

2. 让振子浸没在盛水的容器中。均匀地转动曲轴，对振动系统施加驱动力。曲轴转动的频率显然就等于驱动力的频率。等到振动情况稳定后，振子的振动就是受迫振动。通过观察，比较驱动力的频率、振子做受迫振动的频率、振动系统固有频率三者之间的关系。

使轴的转速由小到大分级改变（每次改变后保持新转速恒定），每次都注意观察和比较上述三种频率。



图2-5-5 探究受迫振动

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

如图 1-2-3 所示，在光滑的水平桌面上，有 A、B 两个木球在同一直线上做同方向的匀速运动，设它们的运动方向为正方向。它们的质量分别是 m_1 和 m_2 ，速度分别是 v_1 和 v_2 ，且 $v_2 > v_1$ 。经过一定时间后 B 追上了 A，发生碰撞，此后 A、B 的

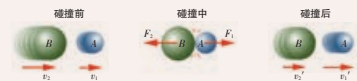


图 1-2-3 两球的碰撞过程

学生必做实验 验证动量守恒定律

为了较好地满足实验条件，我们选择气垫导轨装置，验证由两个物体组成的系统的总动量保持不变。

设计实验

为了验证动量守恒定律，需要测量两个物体碰撞前后的动量。

实验装置如图 1-2-5 所示。你怎样设计这个验证实验？应选择哪些实验仪器和器材？需要测量哪几个物理量？

以下是用气垫导轨进行实验的三种方案，供你参考。

方案 1：使气垫导轨上的一个滑块静止，推动另一个滑块去碰它（图 1-2-5），两个滑块相碰后分开。

方案 2：使两个滑块相向运动，相碰后粘在一起。

方案 3：使一个滑块静止，推动另一个滑块去碰它，相碰

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科学、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

复杂振动可以看成是由简谐运动合成的

在图 2-1-5 所示的实验中，如果使两个频率不同的音叉同时振动发声，观察示波器上的位移-时间图像，你会发现图像不再是正弦或余弦曲线，而是比较复杂的曲线。这是由两个简谐运动共同引起的振动。假如一个物体同时进行两个简谐运动 A 和 B，A 的位移-时间图像如图 2-1-10 a 所示，B 的位移-时间图像如图 2-1-10 b 所示，我们就得到物体合振动的位移-时间图像（图 2-1-10 c）。这就是说，一个比较复杂的振动，可能是由几个简谐运动合成得到的。

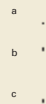


图 2-1-10 振动合成示意图

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

有趣的碰撞

用两根光滑的钢棒（或较粗的铁丝）组装成水平轨道，架在两个凳子上，并固定起来。轨道上放置 A、B 两组玻璃球，各球质量相等，如图 1-4-6 所示。每次分别拨动 A 组的 1 个、2 个或 3 个球去碰撞 B 组的玻璃球。实验之前，你先猜想一下会出现什么现象。然后通过实验，

看看实际现象与你的猜想是否一致，并运用所学的知识予以解释。

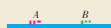


图 1-4-6

多学一点

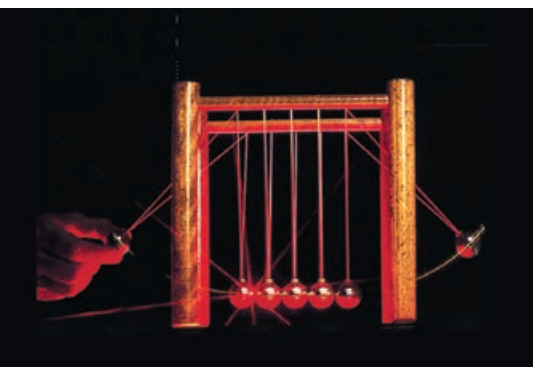
这里将介绍更多更深的奥秘，以开阔你的视野。你如果有兴趣，可以作进一步的探索。

多学一点 全息照相

早在 1948 年，英国物理学家伽柏（D. Gabor）就提出了全息照相的原理。1960 年以后出现了激光，它相干性好、强度大，自然成为全息照相的十分理想的光源，全息技术由此进入一个新阶段，发展非常迅速。

全息照相的工作原理如图 4-7-5 所示。一束激光通过分光镜分成两束光。一束光经透镜扩束照射到物体上，经物体反射

目 录



第 1 章 碰撞与动量守恒 6

1.1 动量变化与冲量的关系	7
1.2 动量守恒定律	11
1.3 动量守恒定律的案例分​​析	16
1.4 美妙的守恒定律	19

第 2 章 机械振动 25

2.1 简谐运动	26
2.2 物体做简谐运动的原因	32
2.3 摆钟的物理原理	35
2.4 单摆振动的周期	38
2.5 受迫振动与共振	43

第 3 章 机械波 48

- 3.1 机械波的产生 49
- 3.2 机械波的描述 53
- 3.3 机械波案例分析 56
- 3.4 惠更斯原理 波的反射与折射 59
- 3.5 波的干涉与衍射 63
- 3.6 多普勒效应 68

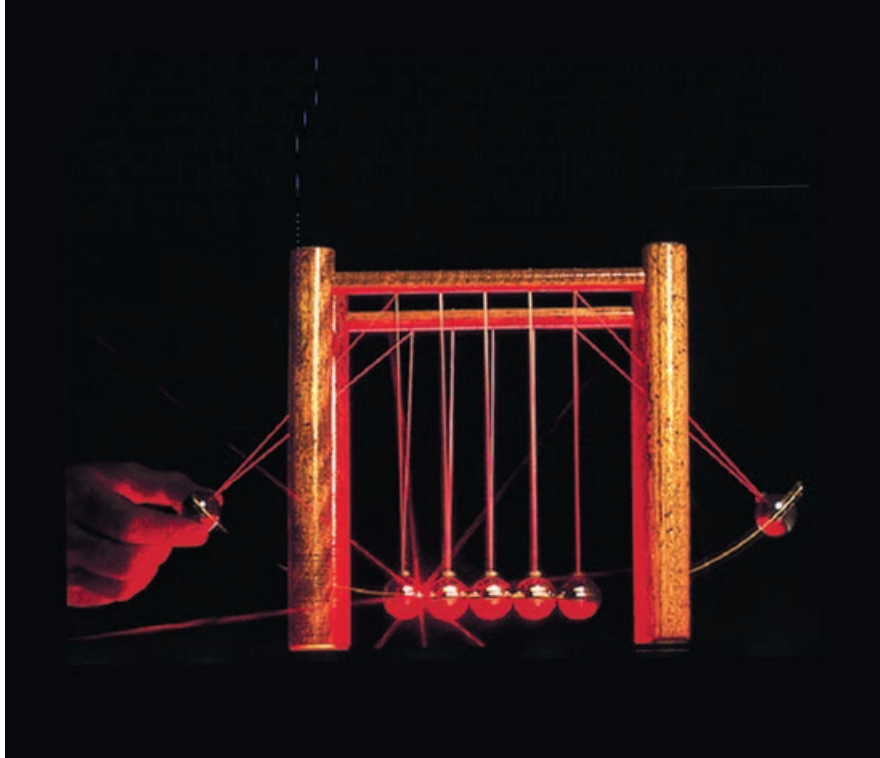


第 4 章 光及其应用 74

- 4.1 光的折射 75
- 4.2 全反射与光导纤维 79
- 4.3 光的干涉 83
- 4.4 用双缝干涉仪测量光的波长 87
- 4.5 光的衍射 91
- 4.6 光的偏振与立体电影 93
- 4.7 激光 97



- 总结与评价 课题研究成果报告会 102
- 研究课题示例 102
- 评价表 103



第 1 章 碰撞与动量守恒

你做过奇妙的碰撞实验吗？在该实验中，横杆上并排地悬吊着 5 个小球，当你将最左边的小球拉起后放手，你将观察到什么现象？如果将最左边的两个小球拉起后放手，你又会观察到什么现象？

类似的实验现象曾使 17 世纪的科学家们惊讶不已。你是否也有同感？这其中隐藏着怎样的规律？

在自然界中，从微观、宏观到宇观，碰撞的事例很多。由于碰撞时相互作用的时间很短，而且在碰撞过程中作用力是变化的，直接运用牛顿运动定律来分析就很困难。那么，怎样分析、研究这类碰撞问题呢？

本章首先你将通过实验探究碰撞中所遵循的物理原理——动量定理和动量守恒定律，知道动量守恒的普适性；然后你将了解弹性碰撞和非弹性碰撞的特点，并用它们解释生产生活中的有关现象，体会用守恒定律分析物理问题的方便，感受自然界的和谐与统一之美。

1.1 动量变化与冲量的关系

从 1990 年起,我国香港的中学生每年都要举行趣味科学比赛,其中的一个项目叫“鸡蛋撞地球”,要求参赛者设计一个保护装置,使鸡蛋从大约 13 m 的高度落地后完好无损。

假如你受邀参加比赛,你的方案是什么?制订方案的依据是什么?

动量和冲量 动量定理

为了参加这项比赛,有一位同学做了如图 1-1-1 所示的实验。

让两个鸡蛋从约 1.5 m 的高处自由落下,分别落在海绵垫上和塑料盘中。

你会看到什么现象?你能猜想一下其中的物理原理吗?

分析与论证

设质量为 m 、速度为 v_0 的物体,在恒定的合力 F 的作用下,经过一段时间 t 后,速度变为 $v_t = 0$ 。

由牛顿第二定律 $F = ma = m \frac{\Delta v}{t}$

可得 $Ft = m \Delta v = mv_t - mv_0$

那么,上式中的 Ft 和 mv 各有什么物理意义呢?

物理学中,力和力的作用时间的乘积 Ft 叫做冲量 (impulse),用 I 表示。在国际单位制中,冲量的单位是牛·秒,符号是 $\text{N} \cdot \text{s}$ 。由于力是矢量,冲量也是矢量,其方向跟力的方向相同。

物体的质量 m 和速度 v 的乘积 mv 叫做动量 (momentum),用 p 表示。在国际单位制中,动量的单位是千克·米/秒,符号是 $\text{kg} \cdot \text{m/s}$ 。动量也是矢量,它的方向跟物体的速度方向相同。

上式可写成:

$$I = Ft = \Delta p$$

可见,物体所受合力的冲量等于物体的动量变化。这个结论叫做动量定理 (theorem of momentum)。

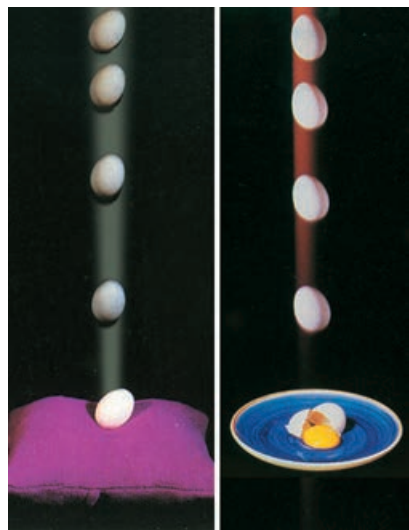


图 1-1-1 下落的鸡蛋

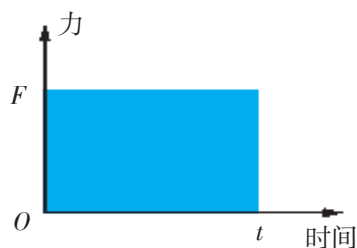
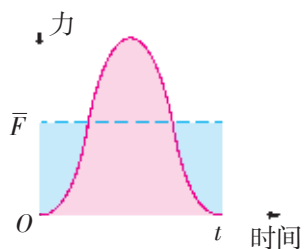
图 1-1-2 恒力 F 的冲量

图 1-1-3 碰撞中的平均作用力

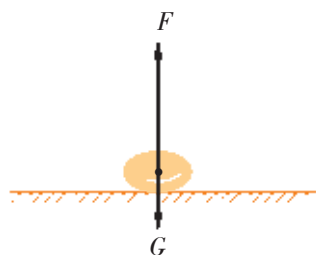


图 1-1-4 鸡蛋受到撞击过程中在某一时刻的受力情况示意图

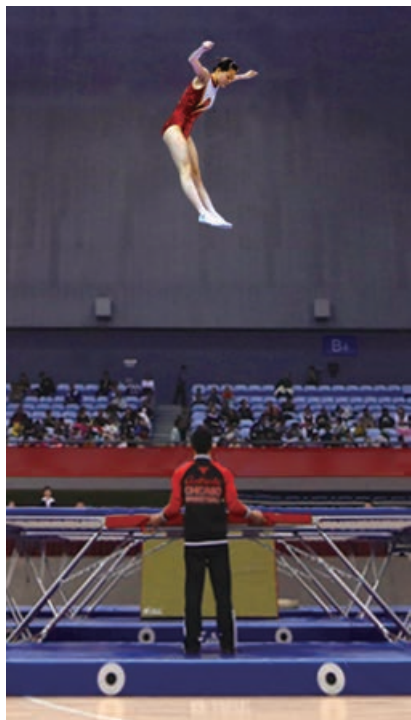


图 1-1-5 蹦床

思考与讨论

1. 运用动量定理分析：鸡蛋从高处落到海绵垫上时，为什么不会破碎？

2. 鸡蛋在被撞击时所受到的力是变力，还是恒力？如果是变力，那么动量定理表达式中的 F 的物理意义是什么？

多学一点

变力的冲量

如图 1-1-2 所示，冲量的大小也可以用力 - 时间图像表示。当物体受到大小和方向不变的恒力作用时，力 - 时间图像是一条平行于时间轴的直线，恒力 F 在 t 时间内的冲量大小在数值上等于图中蓝色矩形的“面积”。

当发生碰撞时，物体所受到的外力不是恒定的，而且作用时间极短。在这极短的时间内，这个力先突然增大，后又迅速消失，其大小变化情况如图 1-1-3 所示。可设想有一恒力 $\bar{F}$ ，它在 t 时间内的冲量与变力在该段时间内的冲量大小相等，这个恒力 $\bar{F}$ 即为该变力在 t 时间内的平均值。

图 1-1-4 是鸡蛋与海绵或塑料盘碰撞过程中某一时刻的受力情况示意图。图中 G 表示鸡蛋所受到的重力， F 表示鸡蛋因碰撞所受到的力， F 是变力。由于两次碰撞中鸡蛋的动量变化量相等，因而它两次所受合力的冲量也相等。但鸡蛋与塑料盘的碰撞时间很短，受到的作用力很大，所以鸡蛋碎了；而落在海绵垫上的鸡蛋因碰撞时间较长，受到的作用力较小，因而安然无恙。

案例分析

案例 蹦床是一项扣人心弦的运动项目。运动员在一张绷紧的弹性网上蹦跳、腾翻，做出各种惊险优美的动作（图 1-1-5）。现有一位质量为 50 kg 的运动员，从离水平网面 3.2 m 的高处自由落下，着网后沿竖直方向蹦回到离水平网面 5 m 的高处。若这位运动员与网接触的时间为 1.2 s ，求网对运动员的平均作用力的大小。 g 取 10 m/s^2 。

分析 以运动员为研究对象，首先需分析运动员与网接触时的受力情况及接触前后的运动状态（图 1-1-6）。设竖直向上的方向为正方向。

由题意可知，这位运动员的质量 $m = 50\text{ kg}$ ，刚接触网时的速度 $v_0 = -\sqrt{2gh}$ ，刚脱离网时的速度 $v_t = \sqrt{2gh'}$ ，所受合外力的冲量 $Ft = (N - G)t$ ，接触前后的动量变化 $\Delta p = p_t - p_0 = mv_t$

$-mv_0$ 。由动量定理即可求得网对运动员的平均作用力 N 的大小。

■ 解答 根据动量定理

$$(N - G)t = m(v_t - v_0)$$

有

$$\begin{aligned} N &= \frac{m(\sqrt{2gh'} + \sqrt{2gh})}{t} + mg \\ &= \frac{50 \times (\sqrt{2 \times 10 \times 5} + \sqrt{2 \times 10 \times 3.2})}{1.2} \text{ N} + 50 \times 10 \text{ N} \\ &= 1250 \text{ N} \end{aligned}$$

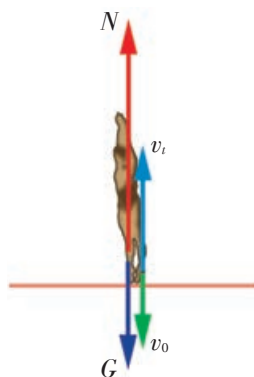


图 1-1-6 运动员与网接触时的受力情况及其前后的运动状态

动量定理的应用

动量定理在生产、生活中有着广泛的应用。

由动量定理可知，如果物体的动量变化一定，那么它受到的冲量也一定。因此作用时间越短，力就越大；作用时间越长，力就越小。

如图 1-1-7 所示，用铁锤钉钉子时，铁锤运动后具有较大的动量，但它碰到钉子后动量减到零，甚至为负（以向下为正方向），动量变化较大，从而冲量较大。由于铁锤与钉子相碰的时间很短，所以对钉子产生较大的作用力，从而把钉子钉入木块中。

相反，有时候人们需要延长作用时间，以减小作用力。赛车赛道边上，要设置用轮胎组成的防撞墙（图 1-1-8）。当赛车因故撞到轮胎上时，轮胎的良好弹性可使作用时间延长，从而减小赛车受到的冲击力。当我们从高处跳下，快要接触地面时，会本能地弯曲膝盖，其实也是不自觉地运用了同样的原理（图 1-1-9）。

你还能举出一些生活中应用动量定理的例子吗？



图 1-1-7 用铁锤钉钉子



图 1-1-8 赛车赛道边的防撞墙



图 1-1-9 从高处跳下的人

家庭作业与活动

1. 一个质量为 5 kg 的物体从离地面 20 m 的高处自由下落。不计空气阻力，试求在下落的这段时间内物体所受重力的冲量。
2. 质量为 5 kg 的小球以 5 m/s 的速度竖直落到地板上，随后以 3 m/s 的速度反向弹回。若取竖直向下的方向为正方向，则小球动量的变化为 ()。
A. $10\text{ kg} \cdot \text{m/s}$
B. $-10\text{ kg} \cdot \text{m/s}$
C. $40\text{ kg} \cdot \text{m/s}$
D. $-40\text{ kg} \cdot \text{m/s}$
3. 如图 1-1-10 所示，质量为 M 的汽车牵引着质量为 m 的拖车在平直公路上以加速度 a 做匀加速运动。当速度为 v_0 时拖车突然与汽车脱钩，到拖车停下时司机恰好发现。若汽车的牵引力一直保持不变，车与路面的动摩擦因数为 μ ，那么拖车刚停下时，汽车的瞬时速度 v 是多大？

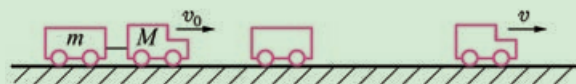
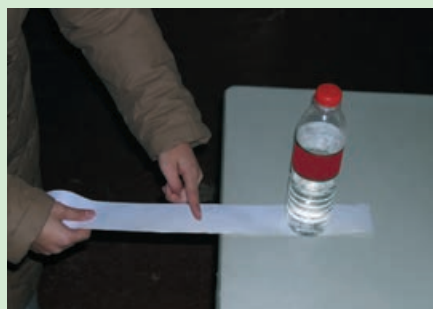


图 1-1-10

4. 如图 1-1-11 a 所示，将纸带的一端压在装满水的饮料瓶底下，用手慢慢地拉动纸带，可以看到瓶子跟着移动起来。拉紧纸带，用手指向下快速击打纸带，如图 1-1-11 b 所示，可以看到纸带从瓶底抽出，而饮料瓶仍平稳地停留在原处，试说明产生上述现象的原因。



a



b

图 1-1-11

课题研究

组织“鸡蛋撞地球”的比赛

以小组为单位，在班上组织“鸡蛋撞地球”的比赛。要求让鸡蛋从 3 楼自由落下，着地后不会破碎。比赛要在老师的指导下进行，特别要注意安全。

对活动的评价可从以下几个方面考虑：

- (1) 实验的效果怎样；
- (2) 选用的材料是否符合经济、安全、取材便利等原则；
- (3) 对实验的现象能否作出令人信服的、科学的解释；
- (4) 小组的团队合作精神怎样。

1.2 动量守恒定律

两位同学在公园里划船。租船时间将到，她们把小船划向码头。当小船离码头大约 1.5 m 时，有一位同学心想：自己在体育课上立定跳远的成绩从未低于 2 m，跳到岸上绝对没有问题。于是她纵身一跳，结果却掉到了水里（图 1-2-1）。她为什么没有如她所想的那样跳到岸上呢？显然这里涉及人和船两个物体相互作用的问题。动量定理只反映了一个物体受到力的作用一段时间后的动量变化规律。当两个物体相互作用时，它们各自的动量会怎样变化呢？

动量守恒定律

图 1-2-2 是小球碰撞的频闪照片，当左边的小球撞到右边的小球后，小球之间发生了多次碰撞，最终动量传递给了最右边的小球。那么，当小球碰撞时，它们的动量变化将遵循怎样的规律呢？

为了使问题简化，这里先研究两个物体碰撞时动量变化的规律。



图 1-2-1 这位自信的同学为什么会掉到水里

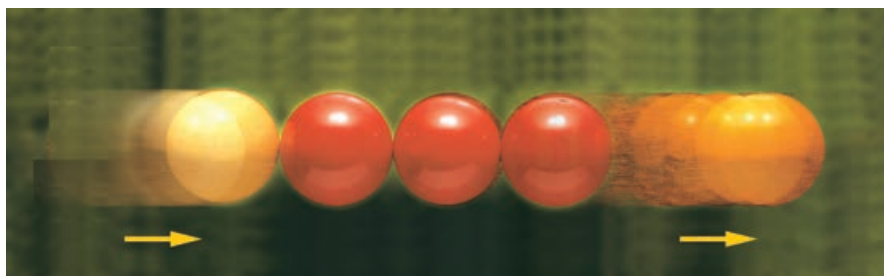


图 1-2-2 小球碰撞的频闪照片

分析与论证

如图 1-2-3 所示，在光滑的水平桌面上，有 A 、 B 两个木球在同一直线上做同方向的匀速运动，设它们的运动方向为正方向。它们的质量分别是 m_1 和 m_2 ，速度分别是 v_1 和 v_2 ，且 $v_2 > v_1$ 。经过一定时间后 B 追上了 A ，发生碰撞，此后 A 、 B 的

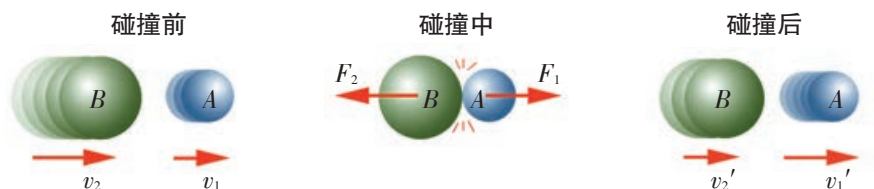


图 1-2-3 两球的碰撞过程

速度分别变为 v_1' 和 v_2' 。

两球在碰撞前后的总动量：

$$\text{碰撞前：} \quad p = p_1 + p_2 = m_1 v_1 + m_2 v_2$$

$$\text{碰撞后：} \quad p' = p_1' + p_2' = m_1 v_1' + m_2 v_2'$$

设碰撞过程中 A 、 B 两个木球所受的平均作用力分别为 F_1 和 F_2 ，力的作用时间为 t 。根据动量定理， A 球所受到的冲量为 $F_1 t = m_1 v_1' - m_1 v_1$ ， B 球所受到的冲量为 $F_2 t = m_2 v_2' - m_2 v_2$ 。根据牛顿第三定律， $F_1 = -F_2$ ，

$$\text{有} \quad F_1 t = -F_2 t$$

$$m_1 v_1' - m_1 v_1 = - (m_2 v_2' - m_2 v_2)$$

$$\text{整理得} \quad m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$$

$$\text{即} \quad p_1 + p_2 = p_1' + p_2'$$

$$p = p'$$

理论分析表明：两物体在碰撞前后总动量的大小、方向均不变。但是，这个结论的成立是有条件的。

在物理学中，把几个有相互作用的物体合称为**系统**（system），系统内物体间的相互作用力叫做**内力**（internal force），系统外的物体对系统内物体的作用力叫做**外力**（external force）。上面两个木球在碰撞过程中就组成了一个最简单的系统。该系统受到的外力有重力和支持力，但它们彼此平衡，即系统所受外力的合力为零，这就是上述结论成立的条件。于是，我们得到：

如果一个系统不受外力，或者所受合外力为零，那么这个系统的总动量保持不变。这个结论叫做动量守恒定律（the law of conservation of momentum）。

动量守恒定律和能量守恒定律一样，是自然界最普遍、最基本的规律之一。它比牛顿运动定律的适用范围更广，不仅适用于宏观、低速领域，而且适用于微观、高速领域。小到微观粒子，大到天体，无论内力是什么性质的作用力，动量守恒定律总是适用的。

案例分析

案例 如图 1-2-4 所示，一只质量为 5.4 kg 的保龄球，撞上一只质量为 1.7 kg、原来静止的球瓶，此后球瓶以 3.0 m/s 的速度向前飞出，而保龄球以 1.8 m/s 的速度继续向前运动，求保龄球碰撞前的运动速度。

分析 保龄球与球瓶碰撞时的相互作用力是内力，并且远大于系统所受的合外力，因此合外力可以忽略不计，满足动量守恒定律的适用条件。

保龄球的质量 $m_1 = 5.4 \text{ kg}$ ，球瓶的质量 $m_2 = 1.7 \text{ kg}$ 。设保龄



图 1-2-4 保龄球

球运动的方向为正方向,碰撞前保龄球的速度为 v_1 , 球瓶的速度 $v_2 = 0$, 两者组成的系统的总动量 $p = m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1$ 。

碰撞后保龄球的速度 $v_1' = 1.8 \text{ m/s}$, 球瓶的速度 $v_2' = 3.0 \text{ m/s}$, 系统的总动量 $p' = m_1 v_1' + m_2 v_2'$ 。

■ **解答** 根据动量守恒定律: $p = p'$

$$\begin{aligned} \text{有} \quad m_1 v_1 &= m_1 v_1' + m_2 v_2' \\ v_1 &= \frac{m_1 v_1' + m_2 v_2'}{m_1} \\ &= \frac{5.4 \times 1.8 + 1.7 \times 3.0}{5.4} \text{ m/s} \\ &= 2.7 \text{ m/s} \end{aligned}$$

现在,你应该能用动量守恒定律来分析本节开始时提出的问题了:那位同学为什么没有如她所想的那样跳上岸?

动量守恒定律的实验验证

学生必做实验

验证动量守恒定律

为了较好地满足实验条件,我们选择气垫导轨装置,验证由两个物体组成的系统的总动量保持不变。

设计实验

为了验证动量守恒定律,需要测量两个物体碰撞前后的动量。

实验装置如图 1-2-5 所示。你怎样设计这个验证实验?应选择哪些实验仪器和器材?需要测量哪几个物理量?

以下是用气垫导轨进行实验的三种方案,供你参考。

方案 1: 使气垫导轨上的一个滑块静止,推动另一个滑块去碰它(图 1-2-5),两个滑块相碰后分开。

方案 2: 使两个滑块相向运动,相碰后粘在一起。

方案 3: 使一个滑块静止,推动另一个滑块去碰它,相碰

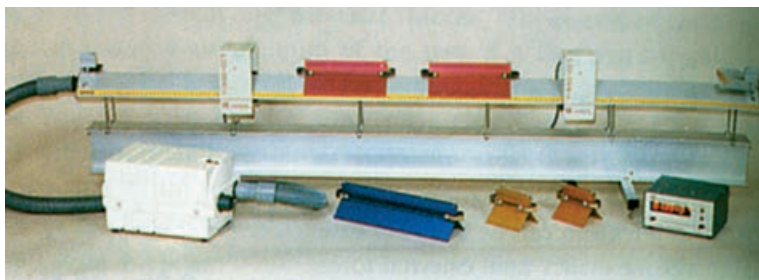


图 1-2-5 用气垫导轨研究物体间的碰撞

后粘在一起。

你也可以根据实验条件和教学实际情况，选用 DIS 实验系统等来设计实验。

进行实验与收集证据

拟定实验步骤，与同学组成小组，合作进行实验，并把实验数据填入下表。

物理量	碰撞前		碰撞后	
质量	m_1	m_2	m_1	m_2
速度	v_1	v_2	v_1'	v_2'
总动量	$m_1 v_1 + m_2 v_2$		$m_1 v_1' + m_2 v_2'$	



笛卡儿（R. Descartes，1596—1650），法国哲学家、数学家、物理学家。解析几何的奠基人之一。

分析论证

分析处理实验数据，并记录处理数据的主要过程。

通过分析，你得出的结论是什么？

实验评估

实验结论与你期望的结果一致吗？能验证两个滑块在碰撞过程中动量守恒吗？

产生实验误差的主要原因是什么？你是怎样减小误差的？

你的实验设计还有什么不足？应如何改进？

完成一份验证动量守恒定律的实验报告。

信息浏览

动量守恒定律的发现历程

早在 17 世纪，法国科学家笛卡儿首先对运动守恒进行了探讨。他把物体的质量和速度的乘积定义为“运动量”。当时科学界还没有对质量的概念做出明确的定义，实际上他已经把动量作为运动的量度。1644 年，笛卡儿提出了运动量守恒的结论。他还具体地总结出了 7 条碰撞定律，但由于他不了解动量的矢量性，所以其中有几条

是错误的。

荷兰物理学家惠更斯（C. Huygens）从 1652 年起对笛卡儿的碰撞定律产生了怀疑。他通过对碰撞的探索，明确指出了动量的矢量性，并于 1669 年提出了动量守恒定律的完整表述：“两个物体所具有的运动量在碰撞中都可以增多或减少，但是它们的量值在同一方向的总和却保持不变，如果减去反方向的运动量的话。”

家庭作业与活动

1. 一个质量为 60 kg 的人，以 5.0 m/s 的水平速度跳到一条静止在水面、质量为 120 kg 的小船上。小船将以多大的速度离岸而去？水的阻力忽略不计。
2. 如图 1-2-6 所示，在水平桌面上有 A 、 B 两辆静止的小车，质量分别是 0.5 kg 和 0.2 kg 。两车用细线拴在一起，中间有一被压缩的弹簧。剪断细线后，两车被弹开，小车 A 以 0.8 m/s 的速度向左运动，那么小车 B 的速度多大？方

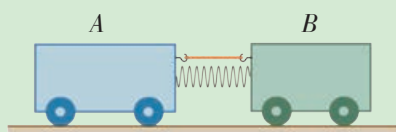


图 1-2-6

向如何？请你将此题改成一个验证动量守恒定律的实验，并把实验方案写出来，与同学交流。

3. 如图 1-2-7 所示，在风平浪静的水面上停着一艘帆船，船尾有一台电风扇，正把风水平地吹向帆面。该艘帆船能向前行驶吗？为什么？

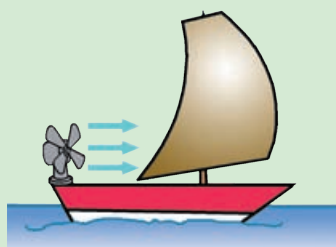


图 1-2-7

课题研究

估测子弹的射出速度

如图 1-2-8 所示，取一只乒乓球，在球上挖一个圆孔，向球内填进一些橡皮泥或碎泡沫塑料，放在桌子的边缘处。用玩具枪水平瞄准球的圆孔，扣动扳机，让子弹射入孔中，与乒

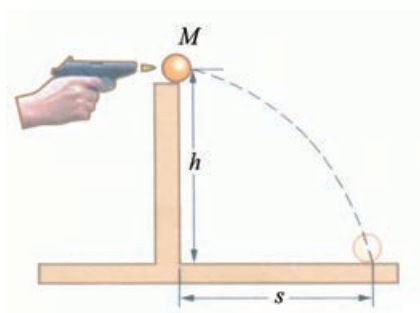


图 1-2-8

乓球一同水平抛出。只需测出球的质量 M 、子弹的质量 m 、桌面的高度 h 和乒乓球落地点离桌子边缘的水平距离 s ，就可估算出玩具枪子弹的射出速度 v 。你能推导出速度 v 的计算式吗？试着做一做这个实验。

安全告诫：
实验中注意安全，
不要把玩具枪枪口对着人！



图 1-3-1 碰碰车

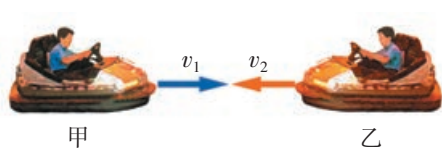


图 1-3-2 碰碰车的碰撞示意图

1.3 动量守恒定律的案例分

用动量守恒定律来研究碰撞（图 1-3-1）、爆炸等问题时，只需考虑物体初、末状态的动量，因此往往比运用牛顿运动定律更为简便。下面来分析几个具体案例。

分析碰碰车的碰撞

案例 如图 1-3-2 所示，在游乐场上，两位同学各驾驶着一辆碰碰车迎面相撞，此后，两车以共同的速度运动。设甲同学和他的车的总质量为 150 kg，碰撞前向右运动，速度的大小为 4.5 m/s；乙同学和他的车的总质量为 200 kg，碰撞前向左运动，速度的大小为 3.9 m/s。求碰撞后两车共同的运动速度。

分析 本题的研究对象为由两辆碰碰车（包括驾驶车的同学）组成的系统，在碰撞过程中此系统中的内力远远大于系统所受到的合外力，合外力可以忽略不计，满足动量守恒定律的适用条件。

设甲同学的车在两车碰撞前的运动方向为正方向，他和车的总质量 $m_1 = 150 \text{ kg}$ ，碰撞前的速度 $v_1 = 4.5 \text{ m/s}$ ；乙同学和车的总质量 $m_2 = 200 \text{ kg}$ ，碰撞前的速度 $v_2 = -3.9 \text{ m/s}$ 。

设碰撞后两车的共同速度为 v ，则系统在碰撞前的总动量为

$$p = m_1 v_1 + m_2 v_2$$

碰撞后的总动量为

$$p' = (m_1 + m_2) v$$

根据动量守恒定律可求得 v ， v 的正、负号表示速度的方向。请自行完成计算。

请思考：假如这两辆碰碰车碰撞后没有以共同的速度运动，而是各自朝着相反的方向运动，你打算怎样分析这种情况？你的依据是什么？

探究未知粒子的性质

为探究未知粒子的性质，物理学家常用加速后的带电粒子去轰击它们，这时常要运用动量守恒定律分析问题、解决问题。

案例 一个质子以 $1.0 \times 10^7 \text{ m/s}$ 的速度向右与一个静止的未知原子核碰撞。已知质子的质量是 $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，碰撞后质

子以 $6.0 \times 10^6 \text{ m/s}$ 的速度反向弹回, 未知原子核以 $4.0 \times 10^6 \text{ m/s}$ 的速度向右运动 (图 1-3-3)。试确定未知原子核的“身份”。

分析 以质子和未知原子核组成的系统作为研究对象。它们碰撞时, 系统的动量守恒。设质子碰撞前的运动方向为正方向, 则其碰撞前的速度 $v_1 = 1.0 \times 10^7 \text{ m/s}$, 碰撞后的速度 $v_1' = -6.0 \times 10^6 \text{ m/s}$, 质量 $m_1 = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 。设未知原子核的质量为 m_2 , 碰撞前的速度 $v_2 = 0$, 碰撞后的速度 $v_2' = 4.0 \times 10^6 \text{ m/s}$ 。

解答 根据动量守恒定律

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$$

$$\begin{aligned} \text{有} \quad m_2 &= \frac{m_1 (v_1 - v_1')}{v_2' - v_2} \\ &= \frac{1.67 \times 10^{-27} \times [1.0 \times 10^7 - (-6.0 \times 10^6)]}{4.0 \times 10^6 - 0} \text{ kg} \\ &= 6.68 \times 10^{-27} \text{ kg} \end{aligned}$$

对照元素周期表, 可知该未知原子核是氦核。

研究反冲现象

如图 1-3-4 所示, 用一木夹夹住笔的尾部, 轻敲笔的被夹部分, 使两者突然分开, 这时会看到木夹和笔各自向着相反的方向运动。

在物理学中, 把物体系统的一部分向某方向运动, 而其余部分向相反方向运动的现象叫做反冲 (recoil)。研究反冲现象的重要依据就是动量守恒定律。喷气式飞机和火箭的飞行都属于反冲现象。图 1-3-5 所示的是使用液体燃料的火箭, 这种火箭一般用液氢做燃料, 用液氧做氧化剂。燃料和氧化剂在燃烧室内混合后点火燃烧, 产生的高温高压燃气从尾喷管迅速向下喷出。由于反冲, 火箭就向空中飞去。

案例 一火箭喷气发动机每次喷出 $m = 200 \text{ g}$ 的气体, 喷出的气体相对地面的速度 $v = 1\,000 \text{ m/s}$ 。设此火箭初始质量 $M = 300 \text{ kg}$, 发动机每秒喷气 20 次, 在不考虑地球引力及空气阻力作用的情况下, 火箭发动机第 1 s 末的速度是多大?

分析 在不考虑地球引力及空气阻力作用的情况下, 火箭与气体组成的系统动量守恒。

以火箭和它在第 1 s 内喷出的气体为研究对象, 火箭第 1 s 内共喷出质量为 $20m$ 的气体。设火箭第 1 s 末的速度为 v' , 以火箭前进的方向为正方向。



图 1-3-3 质子与未知原子核碰撞

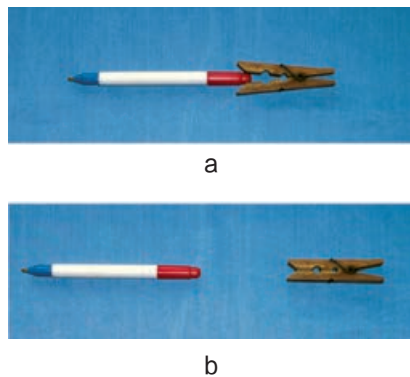


图 1-3-4 反冲现象

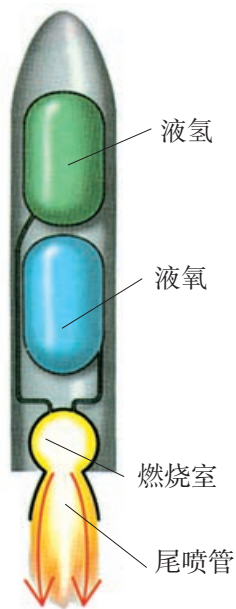


图 1-3-5 火箭

■ 解答 由动量守恒定律得

$$(M - 20m)v' - 20mv = 0$$

$$\text{解得 } v' = \frac{20mv}{M - 20m} = \frac{20 \times 0.2 \times 1\,000}{300 - 20 \times 0.2} \text{ m/s} = 13.5 \text{ m/s}$$

即火箭发动机第 1 s 末的速度大小是 13.5 m/s。

以上只是一种近似的处理方法，火箭的实际运动情况要复杂得多，有兴趣的同学可到图书馆或上网查找有关的资料。

思考与讨论

1. 节日的礼花在空中爆炸后，为什么会散开形成美丽的对称图案？

2. 有位同学在学习了动量守恒定律后，归纳出运用动量守恒定律分析、解决问题的步骤如下：

(1) 确定要研究的系统，判断该系统是否符合动量守恒的条件；

(2) 设定正方向；

(3) 确定系统在初状态和末状态时的总动量；

(4) 运用动量守恒定律列出式子求解。

请你对该同学的归纳进行评价。

家庭作业与活动

1. 一颗质量为 35 g 的子弹，以 475 m/s 的速度水平射向一个静止在水平面上质量为 2.5 kg 的木块。子弹射穿木块后速度降为 275 m/s，求木块的运动速度。
2. 一个不稳定的原子核，质量为 M ，处于静止状态。当它以速度 v 释放出一个质量为 m 的粒子后，原子核剩余部分的速度多大？
3. 如图 1-3-6 所示，质量为 m 的人站在一条质量为 M 、长为 L 的静止小船的右端，小船的左

端靠在岸边。当该人向左走到船的左端时，在不考虑水流速度与对船体的黏滞阻力的情况下，船左端运动到离岸多远的地方？

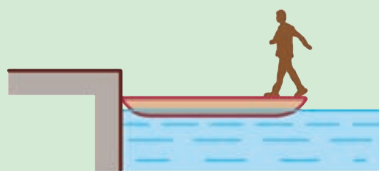


图 1-3-6

1.4 美妙的守恒定律

1666 年，有人在英国皇家学会表演了如图 1-4-1 所示的实验：把 A、B 两个质量相等的硬木球并排挂在一起，然后把 A 球向左拉开，再松手，于是它向右摆动，到达原先的平衡位置时跟 B 球发生碰撞。碰撞后，A 球立即停止，B 球向右摆去，摆到与刚才 A 球开始向右摆动时差不多的高度，又向左摆动，跟 A 球相撞，这时 B 球立即停止，而 A 球向左摆去……如此往复。

当时许多科学家对这一现象百思不得其解。1668 年，英国皇家学会正式悬赏征答，结果有 3 人提交了应征论文，其中荷兰物理学家惠更斯对这个现象做出了比较完整的分析。他在研究中发现，这两个球相撞时，除了动量守恒外，还有一个物理量也是守恒的。那么，这个守恒量又是什么呢？

原来，要解决碰撞问题，除了要考虑碰撞前后的动量外，还要考虑动能是否守恒的问题。

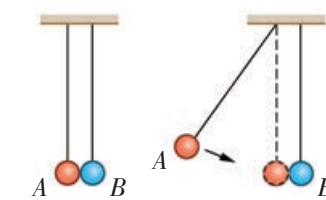


图 1-4-1 英国皇家学会的悬赏征答题

研究碰撞中的动能

分析与论证

某同学在进行 1.2 节的学生必做实验时，在其中两个项目（即第 13、14 页上的方案 3 和方案 1）的研究中分别得到了两组数据，如表 1 和表 2 所示。请根据实验数据，计算这两个项目中滑块碰撞前后的总动能，并进行比较。你有什么发现吗？

表 1 关于两块滑块碰撞后粘在一起的实验记录

序号	m_1 / kg	m_2 / kg	碰撞前		碰撞后	
			m_1 的速度 $v_1 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	动能 E_{k1} / J	$(m_1 + m_2)$ 的速度 $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	动能 E_k / J
1	0.220	0.220	0.499		0.248	
2	0.240	0.220	0.271		0.140	

表 2 关于两块滑块碰撞后分开的实验记录

序号	m_1 / kg	m_2 / kg	碰撞前		碰撞后		
			m_1 的速度 $v_1 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	动能 E_{k1} / J	m_1 的速度 $v_1' / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	m_2 的速度 $v_2' / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	动能 E_k' / J
1	0.220	0.220	0.354		0	0.351	
2	0.300	0.220	0.321		0.045	0.360	

从表 1 的数据可以看出：两个滑块碰撞前后的总动能并不相等。

你最好用自己的实验数据进行分析论证。

而从表 2 的数据可以看出：在实验误差允许的范围内，两个滑块碰撞前后的总动能几乎相等。

由此可见，由两个滑块组成的系统在碰撞过程中动量总是守恒的，但动能却不一定守恒。

在物理学中，把动量和动能都守恒的碰撞，叫做**弹性碰撞**（elastic collision），而把动能不守恒的碰撞叫做**非弹性碰撞**（inelastic collision）。

硬质木球、钢球等物体之间发生碰撞时，动能的损失很小，因此在通常情况下可把它们的碰撞当成弹性碰撞处理。真正的弹性碰撞只有在分子、原子以及更小的微观粒子之间才会发生。

通常情况下，发生非弹性碰撞时，物体的内部状态会发生变化，如物体发热、变形（不能恢复）或破裂等。这说明有一些机械能转化成了其他形式的能，因此碰撞前后的动能也就不守恒了。

有一种比较特殊的非弹性碰撞：两个物体碰撞后“合”为一体，以同一速度运动，这种碰撞叫做**完全非弹性碰撞**（completely inelastic collision），如两个橡皮泥小球的碰撞等。

研究弹性碰撞

分析与论证

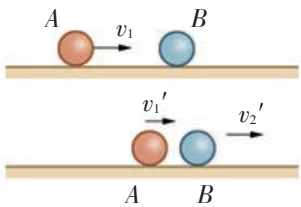


图 1-4-2 两球的碰撞

如图 1-4-2 所示，质量分别为 m_1 、 m_2 的 A、B 两个钢球置于光滑水平面上，A 球的速度为 v_1 ，B 球的速度为零。设两球发生弹性碰撞。

在碰撞的第一阶段，两球接触后均被压缩而发生形变，由此产生弹力，使 A 球减速，使 B 球加速，直到两球速度相等（即相对速度为零），这一阶段称为压缩阶段。在压缩阶段，系统的动能逐渐减少，而弹性势能逐渐增加。当两球的速度相等时，系统的弹性势能达到最大，而动能减至最小，但是在整个过程的任一时刻，系统的机械能保持不变。

在碰撞的第二阶段，由于两球间的弹力作用，A 球继续减速，B 球继续加速，使 B 球的速度大于 A 球的速度，两球的形变逐渐减小。当两球即将分离的瞬间，形变完全消失。这一阶段称为恢复阶段。在恢复阶段，系统的弹性势能逐渐减少，动能逐渐增加。当形变完全消失时，系统的弹性势能为零，而动能恢复到原来大小。

由上述分析可知：系统末态的总动能应等于初态的总动能，故有

$$\frac{1}{2}m_1v_1'^2 + \frac{1}{2}m_2v_2'^2 = \frac{1}{2}m_1v_1^2 \quad (1)$$

由于系统所受合外力为零, 系统的动量守恒, 故可得

$$m_1v_1' + m_2v_2' = m_1v_1 \quad (2)$$

由 (1) (2) 两式解得

$$v_1' = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1$$

$$v_2' = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1$$

根据上面的式子, 思考并讨论:

1. 在什么情况下, v_1' 跟 v_1 方向相同?
2. 在什么情况下, v_1' 跟 v_1 方向相反?
3. 在什么情况下, 碰撞后两球速度互换? (这正是英国皇家学会当年悬赏征答的问题。)

多学一点

研究斜碰问题

在台球比赛中, 我们经常欣赏到精彩的斜碰事例 (图 1-4-3)。研究斜碰问题时, 运用正交分解法较为方便。斜碰也可分为弹性碰撞和非弹性碰撞两类。

如图 1-4-4 所示, 我们用球 A 撞击静止的球 B。把 A、B 两球看作一个系统, 在斜碰中, 动量守恒, 在 v_1 的方向上和垂直于 v_1 的方向上, 动量都应守恒, 因而有

$$m_A v_1 = m_A v_A \cos \alpha + m_B v_B \cos \beta$$

$$m_A v_A \sin \alpha = m_B v_B \sin \beta$$

又因 A、B 两球的碰撞可视为弹性碰撞, 故动能也守恒:

$$\frac{1}{2}m_A v_1^2 = \frac{1}{2}m_A v_A^2 + \frac{1}{2}m_B v_B^2$$

若 $m_A = m_B$, 则 $v_1^2 = v_A^2 + v_B^2$, $\alpha + \beta = 90^\circ$

即碰撞后两球沿着互成 90° 角的方向运动。

用相同的方法, 可以对其他斜碰问题进行分析。

两球在碰撞前的相对速度的方向不沿两球球心连线的碰撞叫做斜碰。

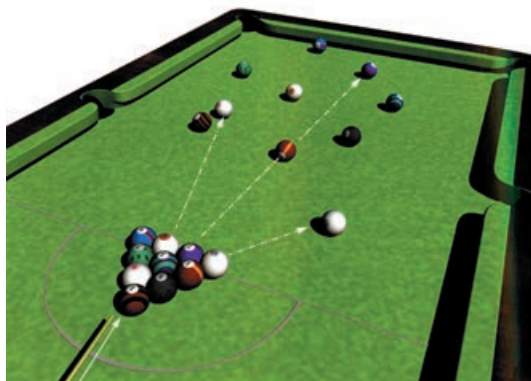


图 1-4-3 台球中的斜碰事例

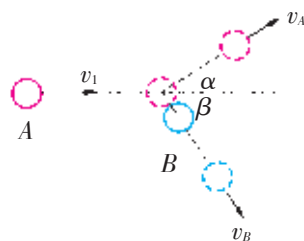


图 1-4-4 两球的斜碰

自然之美——物理学中的守恒定律

自然界虽然千变万化, 但总是遵循着一定的规律, 守恒定律就是其中的一部分。在中学物理中, 我们学习的守恒定律有: 机械能守恒定律、动量守恒定律、电荷守恒定律、能量守恒定律等。随着学习的深入, 我们对各种守恒定律的理解将更加深刻。

物理学中的守恒定律闪耀着自然美的光辉。

物理学的每一条守恒定律都用极其精练的语言将内涵丰富的自然规律表述出来，表现出物理学的简洁美。

物理学的每一条守恒定律中都有一个守恒量，这反映了各种运动形式间的联系和统一，表现出物理学的和谐统一美。

物理学中许多新事物的预言及新理论的建立，无不闪耀着守恒思想的光辉。例如，英国物理学家查德威克（J. Chadwick）运用动量守恒定律和能量守恒定律，成功地发现了中子；瑞士籍奥地利物理学家泡利（W. Pauli）以能量守恒定律为依据，预言了中微子的存在。

家庭作业与活动

- 本章首页图所示的实验装置叫做“牛顿摆”。根据实验现象，你能判断出小球的碰撞是弹性碰撞，还是非弹性碰撞吗？为什么？
- 现有甲、乙两个滑块，质量分别是 $3m$ 和 m ，以相同的速率 v 在光滑水平面上相向运动，发生了碰撞。已知碰撞后，甲滑块静止不动，那么这次碰撞是（ ）。
 - 弹性碰撞
 - 非弹性碰撞
 - 完全非弹性碰撞
 - 条件不足，无法确定它们之间的碰撞是什么碰撞
- 如图 1-4-5 所示，有一摆长为 L 的单摆，摆球

A 自摆呈水平时的位置摆下，在摆的平衡位置与置于光滑水平面上的 B 球发生弹性碰撞，导致后者又跟置于同一水平面上的 C 球发生完全非弹性碰撞。假设 A 、 B 、 C 球的质量均为 m ，那么：

- A 、 B 球碰撞后 A 球的速度为多大？
- B 、 C 球碰撞后它们的共同速度为多大？

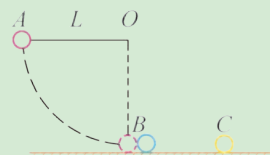


图 1-4-5

课题研究

有趣的碰撞

用两根光滑的钢棒（或较粗的铁丝）组装成水平轨道，架在两个凳子上，并固定起来。轨道上放置 A 、 B 两组玻璃球，各球质量相等，如图 1-4-6 所示。每次分别拨动 A 组的 1 个、2 个或 3 个球去碰撞 B 组的玻璃球。实验之前，你先猜想一下会出现什么现象。然后通过实验，

看看实际现象与你的猜想是否一致，并运用所学的知识予以解释。

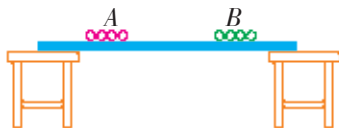


图 1-4-6

第1章家庭作业与活动

A组

1. 跳远时，为什么跳在沙坑里比跳在混凝土路面上安全？钉钉子时，为什么要用铁锤而不用橡皮锤？
2. 一个质量为 0.2 kg 、以 10 m/s 的速度飞来的网球被球拍击中，并以 20 m/s 的速度沿与原方向相反的方向弹回，网球与球拍相接触的时间为 0.1 s ，试求：
 - (1) 网球动量的变化；
 - (2) 球拍对网球的平均作用力。
3. 一位同学在用气垫导轨探究动量守恒定律时，测得滑块 A 的质量为 0.355 kg ，它以 0.095 m/s 的速度水平撞上同向滑行的滑块 B 。 B 的质量为 0.710 kg ，速度为 0.045 m/s 。碰撞后滑块 A 以 0.045 m/s 的速度继续向前运动。求滑块 B 的滑行速度。
4. 质量分别为 m_1 、 m_2 的小球碰撞后在同一直线上运动，它们在碰撞前后的 $s-t$ 图像如图 1-A-1 所示。若 $m_1 = 1\text{ kg}$ ，则 m_2 等于多少？

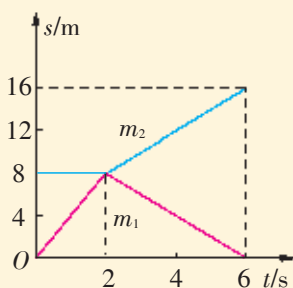


图 1-A-1

5. 图 1-A-2 所示的是一门老式大炮，炮车和炮弹

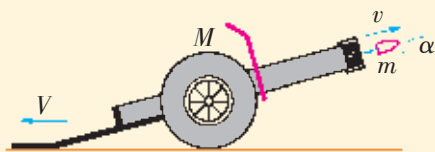


图 1-A-2

的质量分别是 M 和 m ，炮筒与地面的夹角为 α ，炮弹出口时相对于地面的速度为 v 。不计炮车与地面的摩擦，求炮身向后反冲的速度 V 。

6. 如图 1-A-3 所示，把一辆质量为 0.5 kg 的电动玩具车放在质量为 1 kg 的小车上。当接通电动玩具车的电源，使它相对于小车以 0.5 m/s 的速度运动时，小车如何运动？

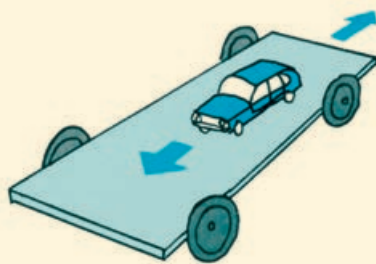


图 1-A-3

B组

1. 如图 1-B-1 所示，长为 l 的轻绳一端系于固定点 O ，另一端系着质量为 m 的小球。将小球从 O 点正下方 $l/4$ 处，以一定初速水平向右抛出，经一定时间绳被拉直，以后小球将以 O 为支点在竖直平面内摆动。已知绳刚被拉直时，绳与竖直线成 60° 角。求：
 - (1) 小球水平抛出时的初速度 v_0 ；
 - (2) 小球摆到最低点时，绳所受的拉力 T 。
 (提示：绳子绷紧瞬间，小球沿绳子方向的动量迅速减小为零。)

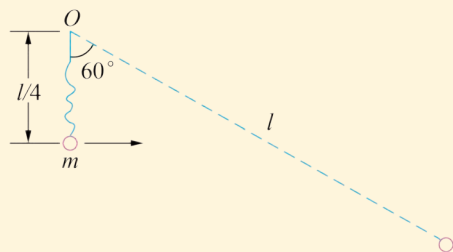


图 1-B-1

2. 如图 1-B-2 所示, 水平地面上静止放置一个质量为 m_A 的小车 A, 小车 A 的上表面光滑, 且与地面间的摩擦力极小, 可以忽略不计。将一个大小可以忽略、质量为 m_B 的物块 B 置于小车 A 的最右端。现对小车 A 施加一个水平向右的

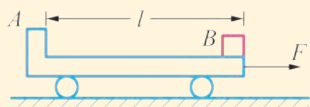


图 1-B-2

恒力 F , 小车 A 开始运动。运动一段时间后, 小车 A 左端固定的挡板与物块 B 发生碰撞, 碰撞时间极短。碰撞后 A、B 粘合在一起, 共同在恒力 F 的作用下继续运动, 经过 0.6 s 后, 二者的速度 v 达到 2 m/s。已知 $m_A = 4 \text{ kg}$, $m_B = 2 \text{ kg}$, $F = 10 \text{ N}$, 求:

- (1) 小车 A 开始运动时的加速度 a 的大小;
- (2) 小车 A 与物块 B 碰撞后的共同速度 v_1 的大小;
- (3) 小车 A 的上表面长度 l 。



第2章 机械振动

大型交响乐团的演奏总会给我们留下深刻的印象，各种乐器（如弦乐器、管乐器、打击乐器等）都在和谐地振动，发出美妙的乐音，使人或心潮澎湃，或心旷神怡。其实，在我们周围，振动无处不在。例如，钟摆的摆动、车辆行进时车身的震动、地震时大地的震颤等，这些，都是振动。世界上几乎所有的物体都会发生振动。

振动是什么样的运动？

振动遵循什么规律？

摆钟为什么能正确计时？

怎样利用振动的规律来为人类服务？

如何避免振动可能带来的危害？

.....

你想知道这些问题的答案吗？

本章将引导你通过实验，建构简谐运动和单摆等物理模型，认识简谐运动的特征，探究单摆，认识受迫振动的特点；你将学习用公式和图像描述简谐运动，探究单摆周期与摆长、重力加速度的关系，了解产生共振的条件及其在生产生活中的应用。

2.1 简谐运动

物体在某一中心位置附近所做的往复运动，叫做**机械振动**（mechanical vibration），通常简称为**振动**（vibration）。简谐运动是最基本、最重要的振动。那么，什么是简谐运动？简谐运动有什么特点？怎样来描述简谐运动呢？

什么是简谐运动

实验探究 1 观察弹簧振子的振动过程

如图 2-1-1 所示，在一根水平的光滑金属杆上穿一根轻质弹簧，弹簧一端固定，另一端与一个质量为 m 的带孔小球相连接，这样的系统称为**弹簧振子**（spring oscillator），其中的小球常称为**振子**。

小球在杆上能够自由滑动，小球与杆间的摩擦可以不计，弹簧的质量与小球的质量相比也可以忽略。

小球原来静止时的位置 O 叫做**平衡位置**（equilibrium position）。将小球拉至右方 B 处放开，小球便以平衡位置 O 为中心做周期性的往复运动。小球在振动过程中，从 O 到 B ，再从 B 到 A ，最后回到 O 的过程，叫做一次全振动。

图 2-1-2 中画出了小球在一次全振动过程中，经过相等的时间间隔所在的位置。图中纵轴表示时间，横轴表示小球球心以平衡位置 O 为起点的位移。

用曲线连接各时刻小球球心的位置，你猜想一下：小球在各时刻的位移跟时间之间存在着怎样的关系？小球运动的 $x-t$ 图像是正弦曲线吗？

实验探究 2 研究弹簧振子的位移跟时间的关系

图 2-1-3 是弹簧振子运动的频闪照片。我们根据照片所提

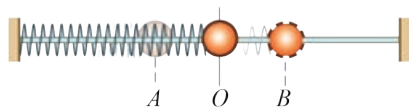


图 2-1-1 弹簧振子的振动

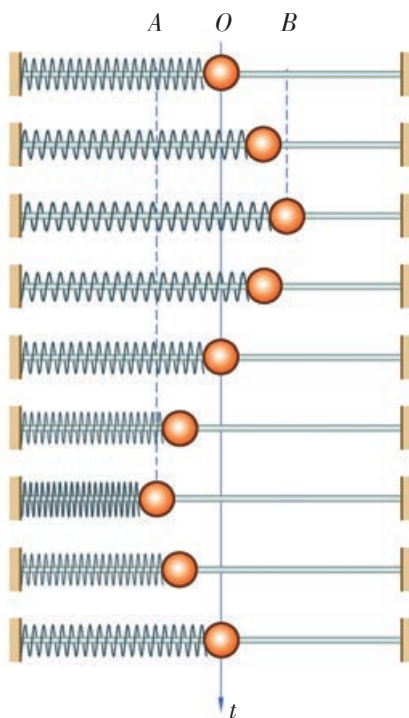


图 2-1-2 弹簧振子在一次全振动过程中间隔相等的 8 个相继时刻的位置

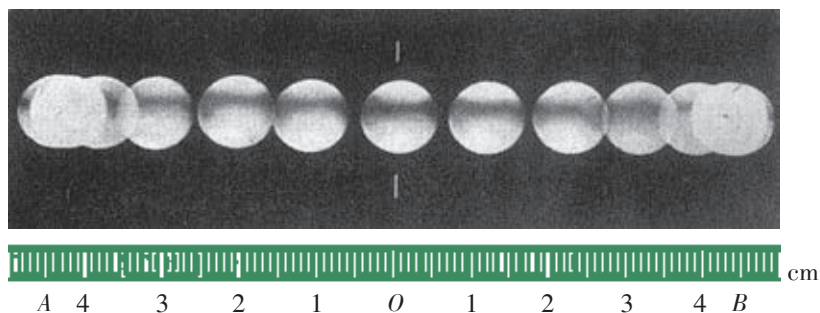


图 2-1-3 弹簧振子运动的频闪照片

供的信息，进一步研究弹簧振子运动过程中小球的位移跟时间的关系。

在图 2-1-3 所示的频闪照片中，取小球在平衡位置 O 时为观察的起始时刻，在位置 O 右侧的水平位移为正，左侧的水平位移为负，每次曝光的时间间隔为 Δt 。请你根据图 2-1-3 测量小球在不同时刻的位移，并记录在你设计的表格中。

在图 2-1-4 所示的坐标纸上以纵轴表示位移 x ，横轴表示时间 t ，每格表示一个 Δt 。根据表格中的数据在坐标平面上标出相应的点，用平滑的曲线将各点连接起来，画出一周期全振动的图像。

在研究振动时，为了方便确定振动物体某一时刻的位置，可将坐标的原点取在平衡位置。

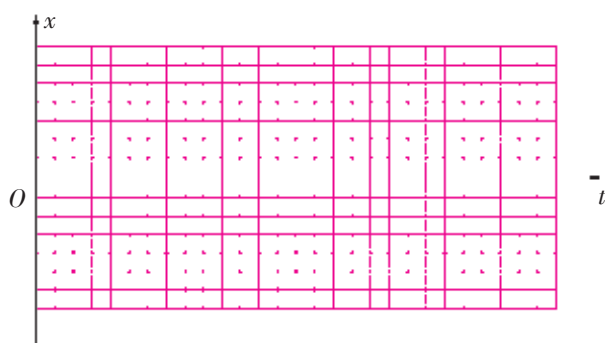


图 2-1-4 坐标纸

互相交流一下，看看得到了怎样的图像？

理论和实验都表明，弹簧振子振动时，其位移 - 时间图像是一条正弦曲线（或余弦曲线）。

如果做机械振动的质点，其位移与时间的关系遵从正弦（或余弦）函数规律，这样的振动叫做**简谐运动**（simple harmonic motion）。图 2-1-3 中弹簧振子的运动就是简谐运动。

描述简谐运动

用图像描述振动

振动的位移 - 时间图像通常叫做振动图像，它是对振动的一种形象描述。

实验探究 3 用示波器研究振动图像

我们用音叉、话筒、示波器再来做一个实验：用橡皮锤敲打音叉，音叉的振动通过空气传递给话筒，话筒再把这种振动转化为音频电压并通过扩音器放大后输入示波器（图 2-1-5），示波器上就显示出这个振动的位移 - 时间图像。

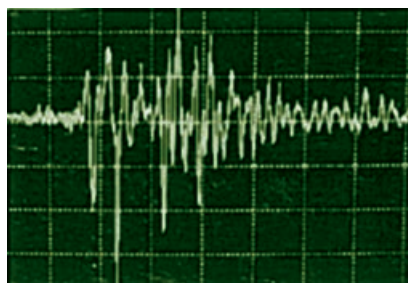


图 2-1-5 用示波器研究声振动

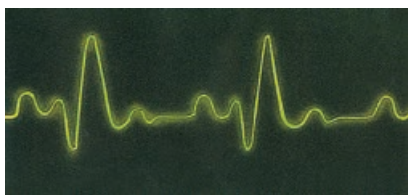
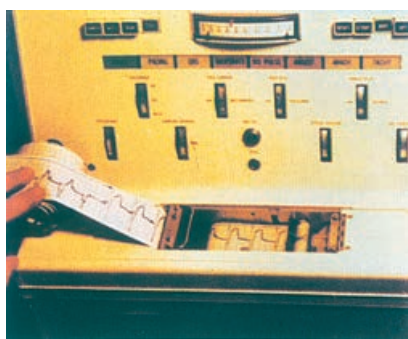
音叉的振动是简谐运动吗？为什么？

对着话筒说话，再观察示波器上的图像，你又看到什么情况？声带的振动是简谐运动吗？为什么？

技术上还可以用多种方法来描绘振动图像。例如在弹簧振子上固定一支笔，沿着垂直于振子振动方向匀速拉动一条纸带，笔就会在纸带上描出一幅振动图像。地震仪和心电图仪等描绘的都是振动图像（图 2-1-6）。振动图像在生产、科研等方面具有实际意义。



a 地震仪描绘的地震图像



b 心电图仪及其描绘的心脏振动图像

图 2-1-6

描述简谐运动的物理量

由于简谐运动是周期性的往复运动，因而除了可用位移、速度、加速度等力学量来描述外，还可以用周期、频率、振幅等物理量来描述。

周期和频率

如图 2-1-1 所示，在振动中小球从 O 到 B ，再从 B 经 O 到 A ，最后回到 O 的过程，就完成了一次全振动。做简谐运动的物体完成一次全振动所经历的时间叫做振动的**周期**（period）；完成全振动的次数与所用时间的比叫做振动的**频率**（frequency）。周期和频率都是表示物体振动快慢的物理量，周期越大，频率就越小，表示振动就越慢。用 T 表示周期，用 f 表示频率，则

$$f = \frac{1}{T}$$

在国际单位制中，周期的单位是秒。频率的单位是赫兹，简称赫，符号是 Hz。1 Hz = 1 s⁻¹。

振幅

图 2-1-1 中的振子小球,在不同时刻以平衡位置为起点的位移虽然是不同的,但是偏离平衡位置的最大距离是不变的,图中 OB ($=OA$) 就是小球离开平衡位置的最大距离。振动物体离开平衡位置的最大距离叫做振动的**振幅** (amplitude), 一般用 A 表示振幅。振幅是表示振动强弱的物理量。

案例分析

案例 图 2-1-7 是一物体做简谐运动的振动图像。请根据图像回答下列问题:

- (1) 在图中 t_1 时刻和 t_2 时刻, 物体的位移各是多少?
- (2) 这个振动的振幅是多大?
- (3) 这个振动的周期是多少? 频率是多大?

分析 (1) 可从图中直接读出: t_1 时刻的位移为 -3 cm ; t_2 时刻的位移为 2 cm 。

(2) 从图中读出物体偏离平衡位置的最大距离是 5 cm , 因此振幅为 5 cm 。

(3) 简谐运动是周期性的往复运动, 图中 a 到 b 表示物体完成了一次全振动又回到原来的状态, 经历的时间即为周期。可见, 这个振动的周期为 2 s , 频率为 0.5 Hz 。

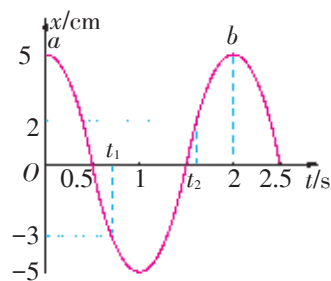


图 2-1-7 用图像分析简谐运动

多学一点

推导简谐运动的位移公式

首先, 我们来做如图 2-1-8 所示的实验。在可调转速的电动机的转动轴上固定一根垂直于转动轴的细杆, 杆的一端装一个小塑料球。电动机启动后, 从侧面用灯光照射, 在墙壁上观察小塑料球影子的运动。然后, 在小塑料球和墙壁之间放一个竖直方向的弹簧振子, 调节电动机的转速, 可以使小塑料球影子与振子影子的运动始终重合。

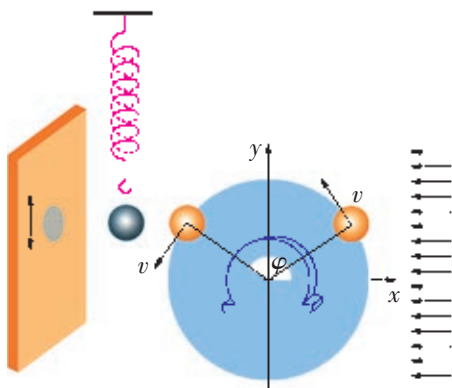


图 2-1-8 做匀速圆周运动的小塑料球在墙壁上的影子的运动是简谐运动

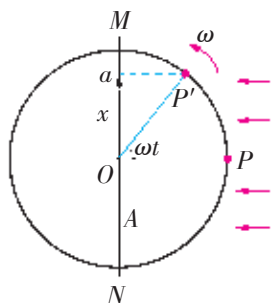


图 2-1-9 用“参考圆”法推导简谐运动的位移公式

可以证明，竖直方向的弹簧振子的振动是简谐运动。因此，这个实验表明：做匀速圆周运动的质点在圆周直径上投影的运动是简谐运动。

由于简谐运动与匀速圆周运动存在上述关系，我们可以借用匀速圆周运动来推导简谐运动的位移公式。如图 2-1-9 所示，设质点 P 在以原点为圆心、以简谐运动的振幅 A 为半径的圆周（称为“参考圆”）上，以角速度 ω 做匀速圆周运动。当 $t=0$ 时，它在竖直方向的直径上的投影在 O 点。在某一时刻 t ，质点到了 P' 点，它在同一直径上的投影为 a ，则从 O 到 a 的位移 x 为

$$x = A \sin \omega t$$

式中的 ω 叫做简谐运动的圆频率。质点做匀速圆周运动的周期，就是其投影做简谐运动的周期，因此， $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$ 。于是简谐运动的位移跟时间的关系便为

$$x = A \sin \frac{2\pi}{T} t = A \sin 2\pi f t$$

可见，简谐运动的位移跟时间的关系是正弦函数，它的图像是正弦曲线。

有兴趣的同学可以用上面介绍的“参考圆”方法推导简谐运动的速度、加速度，以及力跟时间的关系，以加深你对简谐运动的理解。

信息浏览

复杂振动可以看成是由简谐运动合成的

在图 2-1-5 所示的实验中，如果使两个频率不同的音叉同时振动发声，观察示波器上的位移-时间图像，你会发现图像不再是正弦或余弦曲线，而是比较复杂的曲线。这是由两个简谐运动共同引起的振动。假如一个物体同时进行两个简谐运动 A 和 B ， A 的位移-时间图像如图 2-1-10 a 所示， B 的位移-时间图像如图 2-1-10 b 所示，我们就得到物体合振动的位移-时间图像（图 2-1-10 c）。这就是说，一个比较复杂的振动，可能是由几个简谐运动合成得到的。

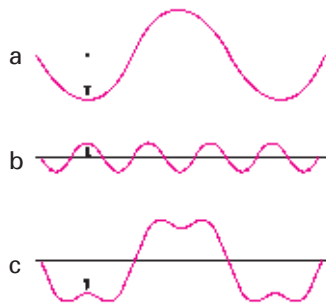


图 2-1-10 振动合成示意图

家庭作业与活动

1. 图 2-1-11 是某质点做简谐运动的振动图像。

根据图像所提供的信息，回答下列问题：

(1) 质点的振幅有多大？频率有多大？

(2) 质点在第 2 s 末的位移是多少？在前 2 s 内通过的路程是多少？

2. 有一个物体做简谐运动，它的振幅是 4 cm，频率是 3 Hz。这个物体在前 2 s 内一共通过了多少路程？

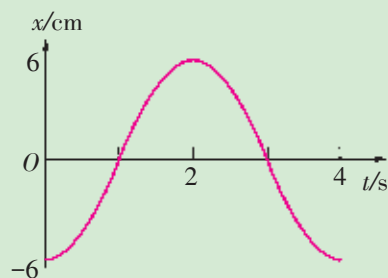


图 2-1-11

课题研究

如图 2-1-12 所示，将钢锯条的一端夹在实验台的边缘，拨动钢锯条，它就上下振动起来。请你猜想一下，钢锯条的振动是简谐运动吗？请你再设计一个实验方案来检验你的猜想是否正确。

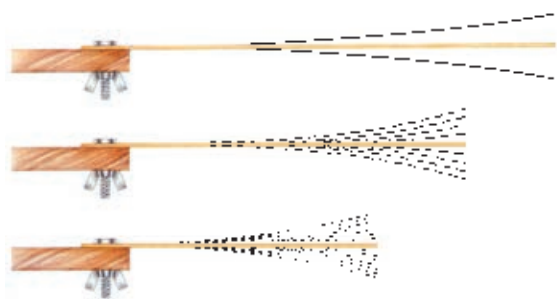


图 2-1-12

2.2 物体做简谐运动的原因

在如图 2-1-1 所示的弹簧振子的实验中，为什么弹簧振子会做周期性的往复运动？显然，这是由于它受到弹簧弹力作用的缘故。

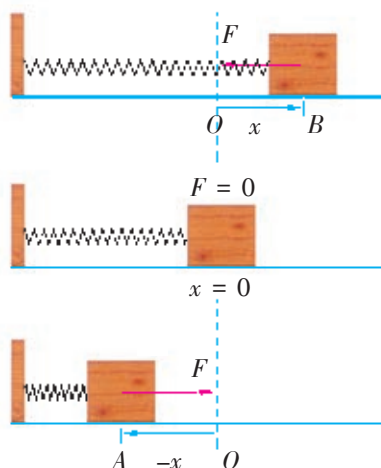


图 2-2-1 弹簧振子的受力和运动分析示意图

回复力使物体做简谐运动

请分析图 2-2-1 所示的弹簧振子的受力情况和运动情况，并回答下列问题：

1. 物体在平衡位置 O 的右侧时，所受的弹力 F 的方向是怎样的？位移 x 的方向是怎样的？ F 的方向与 x 的方向有什么关系？
2. 物体在平衡位置 O 的左侧时，所受的弹力 F 的方向又是怎样的？位移 x 的方向是怎样的？ F 的方向与 x 的方向有什么关系？
3. 根据胡克定律，弹簧的弹力 F 的大小与位移 x 的大小（即弹簧的伸长量或压缩量）间有着怎样的关系？

综合以上讨论，可得出物体所受的弹力 F 与位移 x 间存在以下关系：

$$F = -kx$$

式中的比例系数 k 是弹簧的劲度系数，其值由弹簧的性质决定。如果设从平衡位置向右为 F 、 x 的正方向，那么，当物体在平衡位置 O 的右侧时，位移 x 为正值，弹簧被拉长，弹力 F 取负值；当物体在平衡位置 O 的左侧时，位移 x 取负值，弹簧被压缩，弹力 F 取正值。可见，上式中的负号表示弹力 F 的方向与位移的方向始终相反，并且总是指向平衡位置。由上可知，弹力始终要把物体拉回到平衡位置，所以通常把这个力称为回复力（restoring force）。

理论研究表明，当物体受到跟位移的大小成正比，方向始终指向平衡位置的合力的作用时，物体的运动就是简谐运动。

对一个物体是否做简谐运动，可用它所受的合力 F 跟位移 x 间是否符合以上关系来判断。

案例分析

案例 图 2-2-2 画出了弹簧振子运动过程中的几个特殊位置。图的右边给出了物体在该位置时的位移 x 、回复力 F 、加速

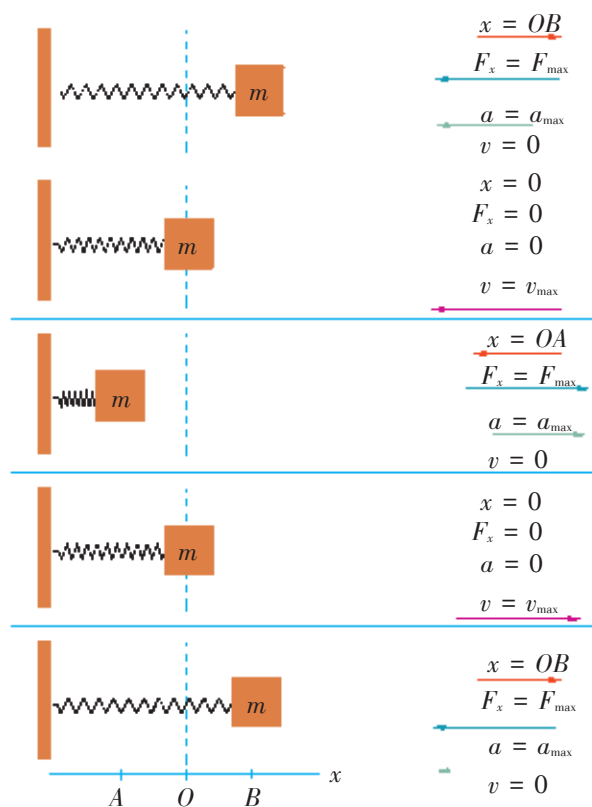


图 2-2-2 弹簧振子运动过程中几个特殊位置的位移、回复力、加速度、速度大小和方向的变化示意图

度 a 、速度 v 的大小和方向。

请你研究图 2-2-2，分析弹簧振子在完成一次全振动的过程中， x 、 F 、 a 、 v 各物理量的值的变化情况，并将结果填入下表。

运动的位置或范围	O	$O \rightarrow B$	B	$B \rightarrow O$	O	$O \rightarrow A$	A	$A \rightarrow O$	O
位移 x									
回复力 F									
加速度 a									
速度 v									

研究简谐运动的能量

从能量的观点看，弹簧振子之所以会不断地做往复运动，是因为在这个系统中，动能与弹性势能在不断地进行转化。从上面的研究可知，在振动过程中，物体的速度在不断变化，因而它的动能也在不断变化；物体的位移（即弹簧的伸长量或压缩量）在不断变化，因而它的弹性势能也在不断变化。那么，弹簧振子的能量变化遵循什么规律呢？

请进一步分析图 2-2-2 所示的弹簧振子在不同位置时的动能和势能及其变化情况，并将你的研究成果填入下表。

运动的位置或范围	O	$O \rightarrow B$	B	$B \rightarrow O$	O	$O \rightarrow A$	A	$A \rightarrow O$	O
动能 E_k									
弹性势能 E_p									
总能量 E									

由上面的分析可知，弹簧振子在振动的过程中，能量在弹簧的弹性势能和弹簧振子的动能之间反复转化。如果不考虑摩擦等阻力造成的损耗，根据机械能守恒定律，在弹簧振子运动过程中的任意位置，系统的动能与势能之和总是不变的，即机械能守恒。

思考与讨论

1. 做弹簧振子的实验时，总是发现振子的振幅会越来越小，最后会停止振动，从能量的观点分析其原因。
2. 弹簧振子振动时，系统的总能量跟哪些因素有关？请你猜想一下，并设计一个实验方案来验证你的猜想。

家庭作业与活动

1. 水平弹簧振子的质量是 0.1 kg，运动到平衡位置左侧 2 cm 处时，受到的回复力是 4 N。那么，当它运动到平衡位置右侧 1 cm 处时，它的加速度大小为多少？方向如何？

2. 一根弹簧的上端固定，下端系一小球。将小球向下拉一点距离后放手，小球便上下振动起来。
- 试证明这个小球在做简谐运动。（提示：使小球振动的回复力是小球所受到的重力和弹簧弹力的合力。）

3. 学习了简谐运动的规律之后，请你谈一谈为什么最好用气垫导轨来做图 2-1-1 所示的实验。

课题研究

研究弹簧振子振动的周期和频率跟哪些因素有关。本课题只要求定性研究，不要求定量

研究。请设计实验方案，并进行实验。

2.3 摆钟的物理原理

你有没有见过摆钟？它为什么能够准确计时？怎样调节它走时的快慢？伽利略最早发现了教堂里吊灯摆动的等时性。1641年，惠更斯按照伽利略的构想，发明制作了一个摆钟（图2-3-1），经后人逐渐改进成为一种常见的计时工具（图2-3-2）。怎样研究钟摆的运动？钟摆的运动有什么规律呢？

惠更斯的科学抽象——单摆

惠更斯分析了钟摆摆动的过程及其特性后，将钟摆简化为一个简单模型——一根很轻的细线系着一个有质量的质点，这个模型叫做**单摆**（simple pendulum），如图2-3-3所示。质点的质量即单摆的质量，摆球重心到悬挂点的距离叫做单摆的摆长。

在实验室里，如果一根细线悬挂着一个小球，细线的伸缩和质量可以忽略，细线的长度比小球直径大得多，那么这样的装置就可以看成单摆。

由此可见，单摆是实际摆的理想化模型。

单摆摆动时摆球在做振动，单摆的振动是简谐运动吗？

探究单摆运动的特点

要判断单摆是否做简谐运动，最简单的方法就是看它的回复力是否满足 $F = -kx$ 的条件。

分析与论证

单摆静止时摆球所处的位置 O 是单摆的平衡位置（图2-3-4）。将摆球从平衡位置拉开一定距离后再释放，摆球就以平衡位置为中心沿着一段圆弧来回做往复运动。

当摆球运动到图2-3-4中的任意位置 P 时，摆球受到的回复力 F 是摆球所受重力 G 沿着圆弧切线向着平衡位置方向的分力 G_1 。

$$F = G_1 = mg \sin \theta$$

若摆角 θ 很小（图2-3-5），则有 $\sin \theta \approx \theta = \frac{\widehat{OP}}{l}$ ，并且位移 $x \approx \widehat{OP}$ 。考虑了位移和回复力的方向后，有

$$F = -mg \frac{x}{l}$$



图 2-3-1 早期摆钟

图 2-3-2 摆钟

惠更斯的这个思想，不论在理论上还是在实验方法上，都是一个独到的创见。

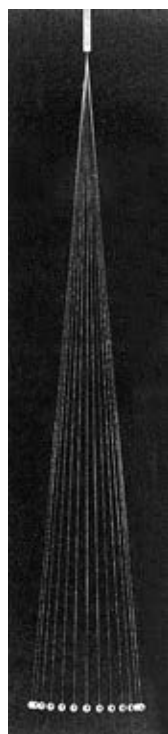


图 2-3-3 钟摆被抽象为单摆

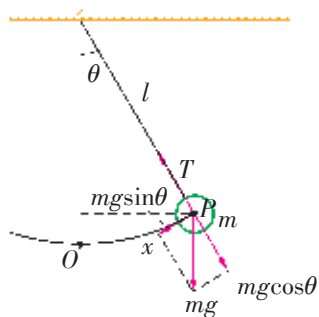


图 2-3-4 单摆的受力分析

上式中, m 是摆球的质量, l 是摆长, g 是重力加速度, x 为摆球偏离平衡位置的位移, 负号表示回复力 F 的方向与位移 x 的方向相反。因为 m 、 l 、 g 都有确定的数值, 所以 $\frac{mg}{l}$ 可以用一个常数 k 来表示, 于是上式可以写成

$$F = -kx$$

可见, 在摆角很小时, 摆球所受到的回复力跟位移成正比而方向相反, 单摆做简谐运动。

当摆角很大时, 单摆的振动还是简谐运动吗?

你能设计一个实验, 描绘出单摆的振动图像吗?



图 2-3-5 单摆做简谐运动的条件

多学一点

研究振动的步调问题

利用单摆模型, 可探究描述振动的另一个重要的物理量。

比较两个振动的“步调”

1. 如图 2-3-6 所示, 在铁架台上悬挂两个相同的单摆, 将两个摆球拉离平衡位置, 使两悬线跟竖直方向有相同的角度, 然后同时放开, 这两个单摆的运动情况应该是完全一样的。那么, 如果不是同时放开, 它们的运动情况也一样吗? 有什么不同?

可以看到, 两个摆球同时放开时, 除了周期、振幅相同外, 还总是同时沿着相同的运动方向经过平衡位置, 并同时达到同一侧的最大位移处。也就是说, 这两个单摆的振动的“步调”是一致的。如果两个摆球不是同时放开, 虽然周期、振幅相同, 但“步调”一般却不一致。

2. 如图 2-3-7 所示, 再将两个摆球拉开到相同位置, 先放开一个, 等它摆动到另一边最大位移处时, 再放开第二个。

请仔细观察, 这两个单摆的运动又有什么不同?

从上面的实验可知, 不同时放开摆球的两个单摆的振幅、频率是一样的, 但它们振动的“步调”一般却是不一样的。为了描述这种“步调”, 物理学中引入了相 (phase) (或称为“相位”“位相”“周相”) 这个概念。在上述第一个实验中, 两个单摆振动“步调”一致, 就说它们的相是相同的, 简称同相; 当两个振动的“步调”不一致时, 就说它们振动的相不同, 或者说它们存在着相差。在第二个实验中, 它们的振动“步调”正好相反, 叫做反相。

用振动图像可以直观地表示不同振动的相。图 2-3-8 是在同一个坐标系里画出的两个同相振动的图像; 图 2-3-9 是在同一个坐标系里画出的两个反相振动的图像。

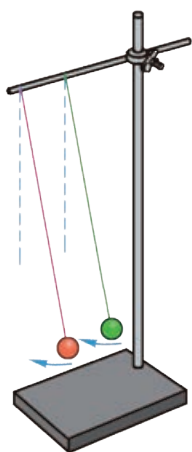


图 2-3-6 两个单摆振动的“步调”一致, 称为同相

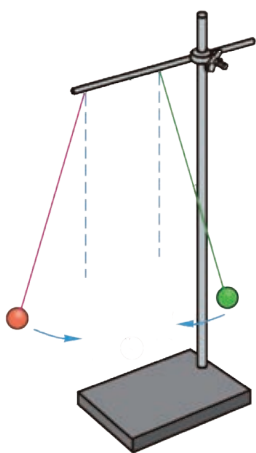


图 2-3-7 两个单摆振动的“步调”相反, 称为反相

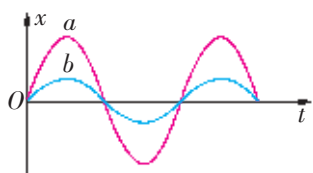


图 2-3-8 两个同相振动的图像

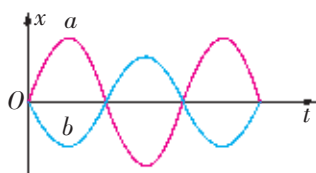


图 2-3-9 两个反相振动的图像

相和相差在波的研究中是很重要的，随着学习的深入，你将体会到它们的作用。

家庭作业与活动

1. 关于单摆，下列认识中正确的是（ ）。

- A. 一根线系着一个球悬挂起来，这样的装置就是单摆
- B. 可以看成单摆的装置中，细线的伸缩和质量忽略不计，线长比小球直径大得多
- C. 单摆的振动总是简谐运动
- D. 两个单摆只要结构相同，它们的振动便相同

2. 对单摆的运动过程中所受到的力（不计各种摩擦），有以下几个认识，其中正确的是（ ）。

- A. 受三个力，重力、悬线的拉力、回复力
- B. 受四个力，重力、拉力、回复力、向心力
- C. 只受两个力，重力和悬线的拉力
- D. 视具体情况而定

3. 对于单摆做振动的回复力，下列各项认识中正

确的是（ ）。

- A. 回复力是重力和悬线的拉力的合力
- B. 回复力是重力沿着运动圆弧切线向着平衡位置方向的分力
- C. 在平衡位置处，摆球受到的回复力为零，而受到的合力不为零
- D. 在平衡位置处，摆球受力平衡而回复力仍然存在

4. 一个单摆摆长为 l ，摆球的质量为 m ，单摆做简谐运动。当摆角为 θ 时，摆球振动的加速度为多大？当它摆动到平衡位置时，若速度为 v ，那么它振动的加速度又为多大？此时的实际加速度是多大？

2.4 单摆振动的周期

我们已经知道，单摆的振动是简谐运动，不同单摆的振动周期（或频率）一样吗？单摆振动的周期跟哪些因素有关呢？

探究单摆振动的周期跟哪些因素有关

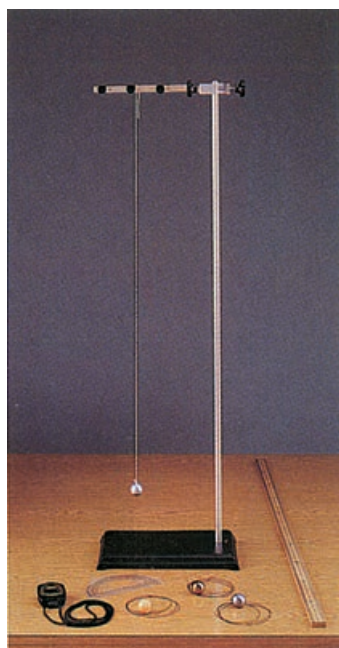


图 2-4-1 探究单摆周期的装置

在这里，测量周期的方法常用微小量累积法。

提出问题

如果摆钟走时不准，修理钟表的师傅会拧一拧钟摆摆锤下方的螺母，调整其走时的快慢。他这样做的依据是什么呢？

猜想与假设

根据单摆的结构和单摆做简谐运动的条件，猜想一下，单摆做简谐运动的周期可能跟哪些因素有关？

制订计划与设计实验

根据图 2-4-1 给出的器材（几个质量不同的摆球、细线、米尺、秒表、铁架台），再加上一把游标卡尺，请制订一个实验方案来验证你的猜想是否正确。

思考讨论

1. 根据单摆“摆长”的含义，怎样用米尺和游标卡尺测单摆的摆长？

2. 单摆在什么情况下才做简谐运动？在实验中对单摆的摆角有什么限制？当需要改变单摆的振幅时应注意什么问题？

3. 测定单摆的周期，可以取平衡位置为计时的起点，也可以取摆球到达最大位移处时为计时的起点，你觉得哪个办法较好？

4. 单摆的周期比较短，要用怎样的方法才能测得更准确些？

进行实验与收集证据

根据以上研究，逐一改变可能影响单摆振动周期的因素（质量、振幅、摆长），完成实验测量工作，将实验数据填入你设计的表格。

分析论证

从实验数据中，你能看出单摆的周期跟质量有关吗？跟单摆的振幅有关吗？单摆振动周期跟摆长的定量关系怎样？

单摆的周期公式

惠更斯推导出在摆角很小时，单摆的周期公式为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

此式表明：单摆振动的周期跟摆长的平方根成正比，跟当地的重力加速度的平方根成反比。

在同一地点， g 的数值一定，摆长一定的单摆就有恒定的振动周期，惠更斯正是利用了摆的这个性质发明了摆钟。

摆钟慢了，实际上是其振动周期过长。调节摆钟快慢，就是调节其振动周期。根据单摆的周期公式，在同一地区（ g 相同），往往要通过调节摆长（把摆锤下方的螺母向上或向下拧一拧）来调节其振动周期。

案例分析

案例 已知月球表面的重力加速度值为地球表面重力加速度值的 $\frac{1}{6}$ ，将在地球表面走时准确的摆钟放到月球表面，则时针在钟面上从“1”走到“2”，在地球上已经过了多少小时？

分析 由摆钟内部机械结构知道，时针在钟面上从“1”走到“2”，钟摆摆动的次数是恒定的，从地球到月球变化的只是摆动的周期。

解答 设钟摆在地球和月球上的周期分别为 T_1 和 T_2 ，时针从“1”走到“2”钟摆摆动的次数为 n ，则

$$\text{在地球上, } t = nT_1 = 1 \text{ h}$$

$$\text{在月球上, } t' = nT_2 = x \text{ h}$$

$$\text{于是有 } \frac{T_1}{T_2} = \frac{1}{x}, \text{ 又因为 } \frac{T_1}{T_2} = \frac{\sqrt{g_{\text{月}}}}{\sqrt{g_{\text{地}}}}$$

$$\text{所以, } \sqrt{\frac{1}{6}} = \frac{1}{x}, x = 2.45$$

可见，在月球上时针从“1”走到“2”，在地球上已经过了 2.45 h。

追寻惠更斯的足迹

惠更斯得出了单摆的周期公式后，在巴黎用一个周期为 2 s 的单摆，精确测量出它的摆长为 3.056 5 英尺，从而计算出重力加

速度为 30.166 6 英尺/秒², 换算成国际单位制约为 9.8 m/s²。现在, 我们仿照他的思路, 来测定我们居住地区的重力加速度的值。

学生必做实验

用单摆测量重力加速度的大小

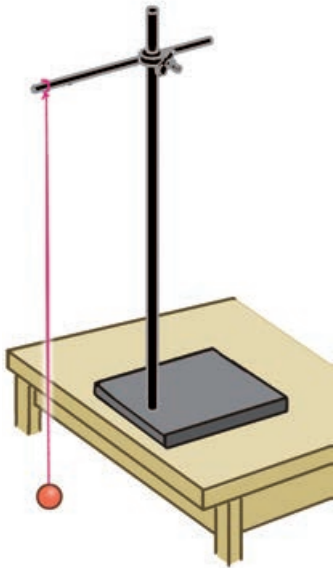


图 2-4-2 单摆实验装置示意图

摆角很小时, 单摆的振动周期跟摆角的大小和摆球的质量无关。本实验要求根据单摆的周期公式 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, 用单摆测量当地重力加速度的大小。

设计实验

实验装置如图 2-4-2 所示。将长度约为 1 m 的细线的一端固定在铁架台横杆上, 细线的另一端穿过沿球心开有小孔的金属摆球, 并打一个比小孔大一些的线结。铁架台放在实验桌边, 横杆伸到桌面外, 让摆球自由下垂。

实验时, 先测量单摆摆长 l , 悬线长度 l' 加上小球半径就是单摆的摆长 l ; 再把摆球从平衡位置拉开一个小角度 (不大于 5°), 使摆球在竖直平面内摆动。测出单摆完成 30 ~ 50 次全振动所用的时间, 然后计算出完成一次全振动所用的平均时间。这个时间就是单摆的振动周期。变更摆长, 重做几次实验, 得到三组以上的数据。

进行实验与收集证据

请拟定实验步骤, 进行实验, 并将测得的数据记入下面的表格。

实验序号	悬线长度 l'/m	摆球直径 d/m	摆长 $l = \left(l' + \frac{d}{2}\right)/\text{m}$	振动 50 次的 时间 t/s	振动周期 T/s
1					
2					
3					

分析论证

- 分别用下面两种不同的方法得出实验结论。
1. 根据单摆的周期公式, 先计算出每次实验的重力加速度

的值，再求出几次实验得到的重力加速度的平均值。

2. 根据多组实验数据，在图 2-4-3 所示的坐标纸上分别以 l 和 T^2 作为纵坐标和横坐标，描点画出 $l - T^2$ 图像，根据图线的斜率可以求出所测的重力加速度的大小。

你测得的当地重力加速度的大小为_____。

实验评估

1. 请上网查询你所在地区的重力加速度的值，与你的实验测量值进行比较。如果存在差别，请分析原因。

2. 在坐标纸上分别以 l 和 T 作为纵坐标和横坐标，描点画出 $l - T$ 图像，和 $l - T^2$ 图像进行比较，哪一种图像更能直观地看出单摆周期和摆长之间的关系？哪一种图像更便于求出当地重力加速度的值？由此进一步评估，图像法在研究物理问题时有什么优缺点？

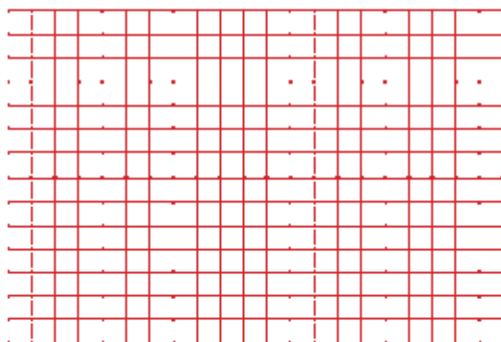


图 2-4-3 坐标纸

多学一点

单摆周期公式的推导

在推导简谐运动位移公式时，已经知道简谐运动的周期就是相应匀速圆周运动的周期。

设匀速圆周运动的周期为 T ，角速度为 ω ，向心加速度为 a ，半径为 R 。由 $T = \frac{2\pi}{\omega}$ 和 $a = \omega^2 R$ ，可得 $T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{a}}$ 。

若物体做简谐运动的振幅为 A ，则相应匀速圆周运动的圆周半径 $R = A$ 。另外，相应匀速圆周运动的向心加速度等于简谐运动的最大加速度，因此又有 $a = a_{\max}$ 。于是，简谐运动的周期就可以表达为 $T = 2\pi \sqrt{\frac{A}{a_{\max}}}$ 。

如果做简谐运动的物体是单摆，单摆振动的最大加速度为 $a_{\max} = g \frac{A}{l}$ 。代入上式，我们就得到单摆做简谐运动的周期为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

课题研究

周期等于 2 s 的单摆叫做秒摆。查一查当地的重力加速度的数值，做一个秒摆，测量一下

它的周期，看看是不是 2 s？

家庭作业与活动

1. 如图 2-4-4 所示，一个单摆在 B 、 C 之间摆动， O 为最低位置， α 很小，周期是 T ，则（ ）。
- A. 摆球质量增加时 T 增大
- B. α 变小时 T 减小
- C. 摆球从 B 到 O 和从 O 到 C 的时间都是 $\frac{T}{4}$
- D. 摆球从 B 到 O 过程中速度增大，加速度减小

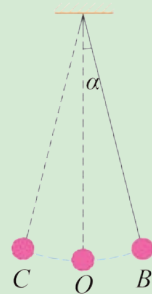


图 2-4-4

2. 有甲、乙两个单摆，甲的摆长是乙的 4 倍，那么，在甲摆动 5 次的时间内，乙摆动了几次？
3. 一个单摆的摆长是 98.1 cm，当地的重力加速度是 9.81 m/s^2 ，单摆振动的周期是多少？将此单摆放到月球上时，周期变为多少？已知月球上的重力加速度是地球上的 $\frac{1}{6}$ 。
4. 用细长线系住一个装满细沙的漏斗做成一个沙摆，它摆动时漏出的细沙在匀速抽动的木板上便显示出沙摆的振动图像。请思考，随着细沙慢慢地流出，沙摆振动的周期会不会变化？
5. 在探究单摆振动周期的过程中，你是怎样测量单摆周期的？为什么要这样测量？
6. 图 2-4-4 所示的单摆经过中心位置 O 在 B 、 C 之间来回摆动，请将单摆能量的转化情况填写在下表中。

运动区间	$O \rightarrow B$	$B \rightarrow O$	$O \rightarrow C$	$C \rightarrow O$
动能变化				
势能变化				

2.5 受迫振动与共振

一个物体在振动过程中，总会或多或少地受到空气阻力或摩擦阻力的影响，使其振幅逐渐减小，最后静止。那么，为什么有些物体（如摆钟）能够长时间维持其振动而不衰减呢？有些物体的振动不仅不衰减，反而振幅越来越大，甚至造成事故呢？图 2-5-1 的照片是 1940 年美国塔科马大桥在风中倒塌的情景，当时的风速还不到设计风速的三分之一，那么坚固的桥梁怎么会在风的吹动下倒塌呢？



图 2-5-1 倒塌的大桥

振动中的能量损失

实验探究

探究振动中的能量损失

1. 如图 2-5-2 所示，置于空气中的弹簧振子振动时，它的振幅有没有变化？它会一直振动下去吗？
2. 将振子浸没在装有水的量杯中，重复上面的实验，它的振动情况有什么显著变化？

比较两次实验中观察到的现象可知，弹簧振子受到的阻力越小，它的能量随时间的流逝就越慢，因而振幅随时间的衰减也越慢。由此推理：当完全不存在介质阻力时，弹簧振子的简谐运动可以一直保持下去，它的振幅不发生衰减。

当阻力较大时，振动很快就会停止。振幅逐渐减小的振动叫做**阻尼振动**（damped vibration）。阻尼振动的图像如图 2-5-3



图 2-5-2 研究弹簧振子能量的损失

振动系统的能量与振幅有关，振幅越大，能量越大。

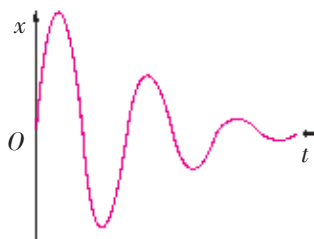


图 2-5-3 阻尼振动图像

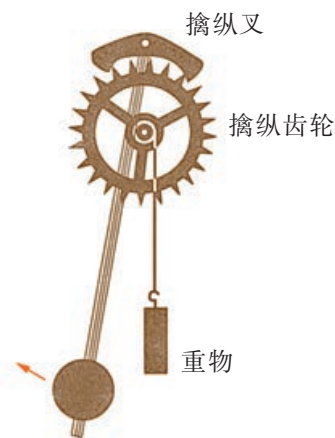


图 2-5-4 摆钟的擒纵齿轮和擒纵叉

所示。

如果想使振动不衰减，就需要不断地补充因阻力影响而损失的能量。儿童荡秋千时，有些母亲会不断地用力推动秋千，就是不断给系统补充能量。在工程技术中，则通过自动装置来控制能量的补充。摆钟能保持运行，其补充的能量源于重物的重力势能，而且擒纵齿轮和擒纵叉把能量一份一份地供给钟摆（图 2-5-4）。电子摆钟是由电池的化学能来补充能量的。

受迫振动

给振动系统补充能量的最简单方法，是让周期性变化的外力对振动系统做功。物体在周期性变化的驱动力（driving force）作用下的振动叫做受迫振动（forced vibration）。下面我们来研究这种振动。

实验探究

探究受迫振动

1. 将弹簧振子挂在曲轴的弯曲部位（图 2-5-5），放在空气中，使其上下振动。振子做自由振动时的频率叫做振动系统的固有频率（natural frequency）。固有频率是由振动系统本身的结构和特征决定的。请估计一下此振动系统固有频率的大小。
2. 让振子浸没在盛水的容器中。均匀地转动曲轴，对振动系统施加驱动力。曲轴转动的频率显然就等于驱动力的频率。等到振动情况稳定后，振子的振动就是受迫振动。通过观察，比较驱动力的频率、振子做受迫振动的频率、振动系统固有频率三者之间的关系。

使轴的转速由小到大分级改变（每次改变后保持新转速恒定），每次都注意观察和比较上述三种频率。



图 2-5-5 探究受迫振动

在上面的实验中，因为有驱动力做功，周期性地补充能量，我们可以看到振子的振幅不会减小。通过实验现象，我们还发现了一个重要的事实：物体做受迫振动时，振动稳定后的频率等于驱动力的频率，跟物体自身的固有频率无关。

在生活和生产中，物体做受迫振动的事例很多，像汽车底盘上弹簧减震片的振动（图 2-5-6）、扬声器纸盆的振动、缝纫机缝针的运动、汽缸里活塞的运动等都是受迫振动。



图 2-5-6 汽车底盘的弹簧减震片

共振及其产生的条件

我们已经知道，不同的振动系统受同样的周期性驱动力作

用时, 不管其固有频率如何, 它做受迫振动的频率总等于驱动力的频率, 与其固有频率无关。但是, 它做受迫振动的振幅也与其固有频率无关吗? 对此, 我们通过实验来进行研究。

实验探究 研究摆的共振

图 2-5-7 所示的装置中, 几个不同的单摆悬挂在同一根较粗的绳子上, 其中 A、D 的摆长相等。使 A 摆摆动起来后, A 摆的振动带动绳子做同样频率的晃动, 就给了其他几个摆周期性变化的驱动力, 使它们都振动起来。

观察实验现象, 并回答下列问题:

1. B、C、D、E 摆振动的频率是否相等? 若相等, 则都等于什么?

请思考: 在这个实验中, 驱动力的频率等于什么?

2. 仔细比较 B、C、D、E 摆振动的振幅。

哪个摆的振幅最大? 从摆长的角度思考: 振幅最大的那个摆的固有频率跟驱动力频率 (即 A 摆的频率) 有什么关系?

理论与实验都表明, 受迫振动的振幅 A 跟驱动力频率 f 之间的关系图像如图 2-5-8 所示 (常称为共振图像)。从图中可以看到, 当驱动力的频率 f 等于物体的固有频率 $f_{\text{固}}$, 即 $f = f_{\text{固}}$ 时, 受迫振动的振幅最大; f 跟 $f_{\text{固}}$ 相差越大, 受迫振动的振幅越小。

当驱动力的频率跟物体的固有频率相等时, 物体做受迫振动的振幅最大, 这种现象叫做**共振** (resonance)。

我们用图 2-5-9 所示的装置来模拟厂房因机器运转而做受迫振动的情况。当有偏心结构的电动机转动时, 连着弹簧的平板便跟电动机一起振动起来。改变电动机转速至某个值时, 可以看到振动系统的振幅特别大。这个实验表明, 如果机器转动施加给厂房的驱动力的频率很接近厂房的固有频率, 厂房便会处于共振状态, 这样很可能会出现危险情况。

图 2-5-1 所示的那座悬索桥的倒塌, 是由于出事那一天的一场风所致。风施加的驱动力的频率跟桥的固有频率恰好很接近, 桥梁就处于共振状态, 使振幅变得很大, 酿成了这场事故。

当然, 共振也有可以利用之处。像浇灌混凝土时, 用共振泵使水泥沙石剧烈振动而互相挤紧。工厂里的共振筛也是利用共振原理, 提高筛的效率。

微波炉已经是比较普及的家用炊具了, 它的基本原理也是利用了共振。微波炉的微波频率与被加热的食物中水分子振动的固有频率 2 500 MHz 非常接近, 因此, 当微波照射到食物时, 微波施加的驱动力使食物中的水分子做受迫振动, 并且处于共



图 2-5-7 研究摆的共振

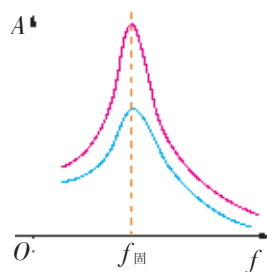


图 2-5-8 共振图像



图 2-5-9 模拟机器共振



图 2-5-10 乐器的共鸣箱

振状态,振动剧烈,从而使食物的温度迅速升高。由于这种“加热”方式是里外同时发生的,所以它比其他加热食物的方式更快捷。

许多乐器在构造上有声源体和共振体,声源体发出的声音作为驱动力使共振体做受迫振动。当满足共振条件时,共振体处于共振状态而有较大的振幅,这种声音的共振现象通常叫做共鸣。欣赏大型音乐会时,不妨去看一看各种各样的乐器,小提琴、大提琴、二胡、琵琶……它们都有形状不同、构造各异的共鸣箱(图 2-5-10),这就是它们的共振体。靠箱内空气的共鸣,这些乐器才能发出洪亮、美妙、动听的声音。

无线电接收技术中的电谐振原理,是共振的另外一种表现形式。此外,医院里常用的一种先进检测手段——磁共振,同样也是利用了共振原理。

总之,在需要利用共振时,应使驱动力的频率等于或者接近振动系统的固有频率;在需要防止共振产生危害时,应设法使驱动力的频率偏离振动系统的固有频率,偏离得越大越好。

家庭作业与活动

1. 在图 2-5-5 所示的探究受迫振动的实验中,先让弹簧振子上下自由振动,测得它的振动周期为 0.4 s,然后匀速转动曲轴的把手使弹簧振子做受迫振动,问:把手的转速多大时,振子的振幅最大?
2. 跳水运动员进行跳板跳水做起跳动作时,脚蹬跳板的频率是否应该接近于跳板的固有频率?
3. 火车车厢是装在减震弹簧上的,它们的固有周期是 1.5 s。假如铁轨每经过 12.5 m 便有一个小的空隙,车轮通过空隙便受到一次冲击而使车厢振动。那么,火车匀速运动的速度多大时,车厢振动得最厉害?
4. 在列队通过桥梁时,为什么不能齐步走?

课题研究

研究声音的共鸣

如图 2-5-11 所示,取一只盛有水的量筒,将一根内径小一些的玻璃管插入,使管内水面上方留有一段空气柱。敲打一下音叉后,将它放在空气柱的上方,可以听到嗡嗡的声音。上下移动玻璃管,比较所听到的声音,你发现什么情况?

换用不同频率的音叉,情况又有什么变化?

请查找资料并完成实验,探究对于不同频率的声音,发生共鸣时的空气柱其长度变化的规律。



图 2-5-11 研究声音的共鸣

第2章家庭作业与活动

A组

1. 一个质点做简谐运动，其振动图像如图 2-A-1 所示。由图像可知()。

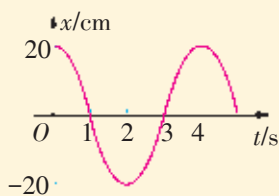


图 2-A-1

- A. 质点振动的振幅随时间变化
B. 质点振动的频率为 4 Hz
C. 在 $t = 2.5$ s 时，质点离开平衡位置运动
D. 在 $t = 4$ s 时，质点受到的回复力为最大值
2. 有一个振动系统，它做自由振动时的频率为 $4f$ 。现在用频率分别为 f 、 $2f$ 、 $4f$ 、 $5f$ 的驱动力依次对它施加作用，比较每次振动稳定后的情况。下列判断中正确的是()。
- A. 振动的振幅越来越大
B. 振动的频率越来越大
C. 振动的振幅先变大再变小
D. 振动的频率保持不变
3. 一个弹簧振子做简谐运动，周期为 T 。下列判断中正确的是()。
- A. 若 t 时刻和 $(t + \Delta t)$ 时刻振子位移的大小相等，方向相同，则 Δt 一定等于 T 的整数倍
B. 若 t 时刻和 $(t + \Delta t)$ 时刻振子速度的大小相等，方向相反，则 Δt 一定等于 $\frac{T}{2}$ 的整数倍
C. 若 $\Delta t = T$ ，则在 t 时刻和 $(t + \Delta t)$ 时刻振子的加速度一定相等
D. 若 $\Delta t = \frac{T}{2}$ ，则在 t 时刻和 $(t + \Delta t)$ 时刻弹簧长度一定相等
4. 若单摆的摆长不变，摆球的质量增加为原来的 4 倍，摆球经过平衡位置的速度减为原来的 $\frac{1}{2}$ ，则单摆振动的物理量变化的情况是()。
- A. 频率不变，振幅不变
B. 频率不变，振幅改变

- C. 频率改变，振幅改变
D. 频率改变，振幅不变

5. 用洗衣机洗衣服，在甩干衣服这道工序中，当用水桶的转速慢慢减小到一定程度时，洗衣机抖动得特别厉害。请你在家中试验一下，观察是不是会发生这个现象，然后给出解释。

6. 如图 2-A-2 所示，用两条长度都为 L 的细线，在天花板上悬挂一个小球，使两个悬挂点之间的距离等于 $2L \cos \alpha$ ，这样便构成了一个双线摆。让摆球在这个装置的中垂面内摆动。若摆动的摆角很小，则这个双线摆摆动的周期是多少？

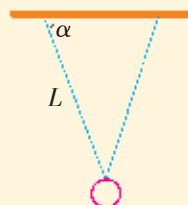


图 2-A-2

7. 有一个单摆摆长为 L ，摆球的质量是 m ，做简谐运动的最大摆角为 α ，问：
- (1) 它从摆角为 α 摆到摆角为 β 时，速度有多大？
(2) 在上述过程中摆球所受到的合外力做了多少功？

B组

1. 图 2-B-1 是探究单摆共振条件时得到的图像，它表示振幅跟驱动力频率之间的关系。请回答：

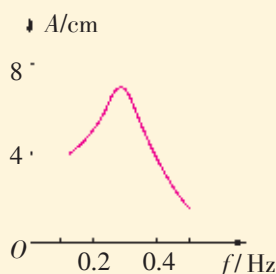


图 2-B-1

- (1) 这个单摆的摆长是多少？
(2) 如果摆长变长一些，画出来的图像的高峰将向哪个方向移动？
2. 在北京走时准确的摆钟搬到了上海，走时还准确吗？如果不准确，是快了还是慢了？一昼夜相差多少秒？怎样才能调整准确呢？请查阅相关资料，并通过计算加以说明。



第 3 章 机械波

你见过冲浪运动吗？当滚滚波涛汹涌而来时，冲浪者随波逐浪，快速滑行。只见他时而冲上浪峰，时而滑向浪谷，出没在惊涛骇浪之中，真是惊心动魄。

将一颗小石子扔进平静的水中，会激起层层水波。如果将两颗小石子扔进平静的水面，你又会看到什么现象？

为什么平静的水面会形成上下起伏的水波向四周扩散？

为什么两列水波看起来会相安无事地独立扩散？

.....

你想知道这些现象的共同之处吗？

那就是——它们都是波。

那么，波究竟是什么？它是怎样产生的？它在传播过程中遵循怎样的规律呢？

本章我们将与水波、绳波、弹簧波相伴，引导你通过观察和实验，认识波的特征；你将研究波的反射和折射现象，了解波的干涉与衍射现象，认识多普勒效应，学习多普勒效应在生产生活中的应用。

3.1 机械波的产生

在汉语中，“波”这个词最早用于描述水纹起伏之状。考古出土的仰韶文化时期的陶器上就有水波纹饰。

我们在初中已经知道，声音是通过声波将声源的振动传到耳朵的。水波、声波、地震波等都是机械波。那么，什么是机械波？机械波是怎样形成和传播的？机械波有什么特点呢？



图 3-1-1 出土陶器上的水波纹饰

机械波是怎样形成的

实验探究

观察机械波

1. 如图 3-1-2 所示，用滴管把一滴水滴入盛水的容器中，仔细观察水面的变化。

2. 如图 3-1-3 所示，将一根绳子的右端固定在一块板上，用手上下摆动绳子的左端，仔细观察绳子的形状变化。

水波和绳子上的波是怎样形成和传播的呢？

物理学中，把机械振动在物质中的传播叫做机械波（mechanical wave）。传播机械波的物质，如水、空气、绳子、地壳等称为介质。



图 3-1-2 观察水波的实验

分析与论证

机械波的形成过程

下面以绳子上的波为例，研究机械波形成的过程。

设想一根绳子由很多小段组成，每一小段可看成一个质点，质点间存在着相互作用。当绳子的一端做上下方向的简谐运动时，绳端质点就带动其相邻的质点振动，相邻的质点又带动更远一些的质点振动……于是，绳子上的各个质点都相继跟着振动起来。绳子上就形成了一系列有凸有凹、向前移动的波。

下面让我们通过作图来展示波的具体形成过程。

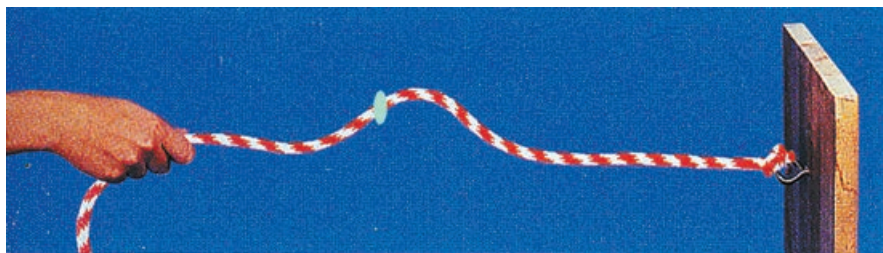


图 3-1-3 绳子上的横波

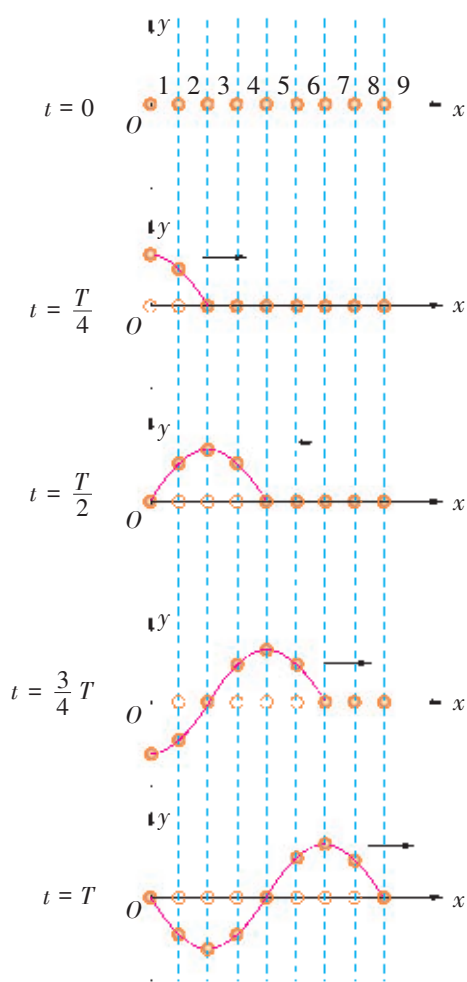


图 3-1-4 探究机械波的形成

如图 3-1-4 所示，在绳子上选取若干个质点 1、2、3……作为研究对象。

当 $t = 0$ 时，这些质点均处于平衡位置。当质点 1 沿上下方向振动时，便牵动质点 2，质点 2 又牵动质点 3，质点 3 又牵动质点 4，依次振动起来，后面各质点也跟着振动起来。

当 $t = \frac{T}{4}$ 时，质点 1 运动到上方最大位移处，而质点 3 则刚要开始运动。质点 1 在到达最上方后，将开始向下运动。

当 $t = \frac{T}{2}$ 时，质点 1 又回到平衡位置，而此时质点 3 刚到达上方最高处，质点 5 则刚刚开始运动。

用同样的方法，请你分析 $t = \frac{3}{4}T$ ， $t = T$ 时各质点的位置和运动情况。

思考与讨论

1. 在波的形成过程中，介质中的各质点有没有随波而沿传播方向“迁移”？波在形成过程中，传播的是什么呢？
2. 绳子中各质点的振动方向跟波的传播方向有什么样的关系呢？

横波与纵波

如图 3-1-5 a 所示，取一根较长的轻质弹簧，上下摆动弹簧的左端，波就向右传播了。此时，弹簧上各质点做上下振动，波向右传播，两者的方向是相互垂直的。物理学中，把介质质点的振动方向跟波的传播方向垂直的波叫做**横波**（transverse wave）。在横波中，凸起部分的最高处叫做**波峰**，凹下部分的最低处叫做**波谷**。

实验探究

观察弹簧上的纵波

如图 3-1-5 b 所示，用手轻轻推动水平放置的弹簧的左端，使弹簧的左端沿左右方向振动。仔细观察弹簧的疏密分布及较密部分的运动情况。

弹簧各段的振动方向跟波的传播方向有什么关系？

物理学中，把介质质点的振动方向跟波的传播方向在同一直线上的波叫做**纵波**（longitudinal wave）。

在纵波中，质点分布较密集的部分叫做**密部**，质点分布较稀疏的部分叫做**疏部**。声波也是纵波。敲击音叉时，音叉的振

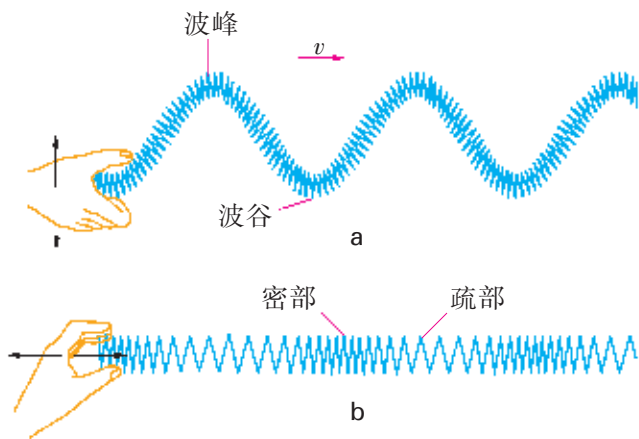


图 3-1-5 弹簧上的横波与纵波

动推动周围的空气，空气中就产生疏密相间的纵波向远处传播（图 3-1-6）。

波可以传递能量和信息

在图 3-1-2 所示的观察水波的实验中，如果在水面上放一片小纸片，在水波传播的过程中，小纸片会“随波逐流”吗？波传播的是什么呢？

在绳波和弹簧波的实验中，机械波传播时，绳子和弹簧上的各质点都相继发生振动，但介质并不随波而迁移，传播的只是振动这种运动形式。介质中原来静止的质点，随着波的传来而相继振动起来，这表明它获得了能量，这个能量是从波源传递过来的。可见，波是传递能量的一种形式。冲浪运动员就是利用海浪传来的巨大能量运动的。

波不仅能传递能量，而且还能传递信息。如声波可以直接传递各种语言和声音的信息；无线电波和光波可以传递代表各种声音、图像和文字的信号等。

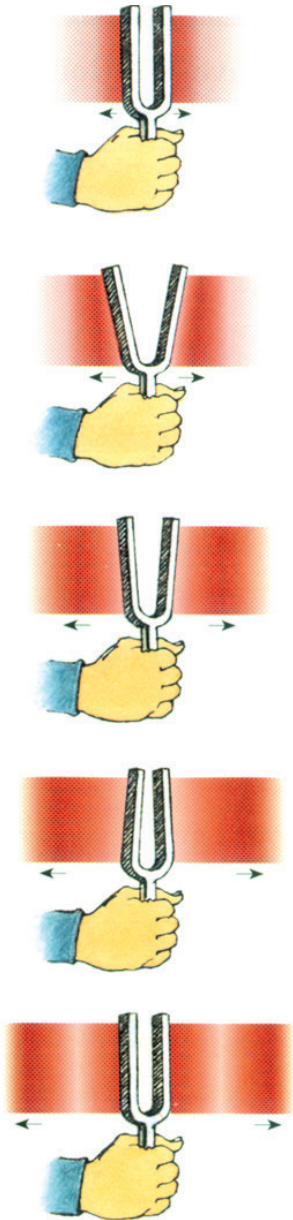


图 3-1-6 声波是纵波

课题研究

请到有关部门了解我国地震带的分布情况，并查阅相关资料，分析一下我国沿海如果发生地震，是否会引起海啸。

你对建立我国地震或海啸的预警机制，有哪些想法和建议？

家庭作业与活动

1. 一只皮球掉进水塘。请尝试往水塘中投石头，看看水波能否把皮球冲到岸边。解释所看到现象的原因。
2. 2011 年 3 月 11 日，日本宫城县发生了里氏 9.0 级地震并引发海啸，造成重大人员伤亡和财产损失。从这一事件中，你能进一步理解（地震）波本质上传播的是什么吗？
3. 关于振动和波的关系，下列说法中正确的是（ ）。
 - A. 有振动就一定有波
 - B. 波是质点由近及远的移动过程
 - C. 波是传递波源振动能量的一种方式
 - D. 波源停止振动，则波也立即停止传播
4. 区分横波与纵波的依据是（ ）。
 - A. 质点是沿水平方向还是沿竖直方向振动
 - B. 质点的振动方向跟波的传播方向是互相垂直还是在一条直线上
 - C. 波是沿水平方向还是沿竖直方向传播
 - D. 波传播的距离是近还是远

3.2 机械波的描述

机械波是机械振动在介质中的传播。波的显著特征就是在空间和时间上都具有周期性。我们既可以用图像来形象地描述波，也可以用一些表示周期性运动特征的物理量来描述波。

用图像描述机械波

某一时刻介质各质点的空间分布，直观地描述了该时刻的机械波。如果用横坐标 x 表示在波的传播方向上各个质点的平衡位置，用纵坐标 y 表示某一时刻各质点偏离平衡位置的位移，就能描绘出这一时刻波的图像。下面以横波为例，描绘波的图像。

设在横波中，位移方向向上时取正值，位移方向向下时取负值。在 xOy 坐标平面上，画出各质点的平衡位置 x 及其偏离平衡位置的位移 y ，就得到一系列坐标为 (x_1, y_1) ， (x_2, y_2) ， (x_3, y_3) ……的点。将这些点连成曲线，就得到某一时刻的波的图像。波的图像有时也称为波形图。

图 3-2-1 所示的波的图像是正弦曲线，它所表示的波叫做简谐波。当波源做简谐运动时，介质的各个质点也随着做简谐运动，所形成的波就是简谐波。简谐波是一种最基本、最简单的波，其他的波可以看作是由若干简谐波合成的。

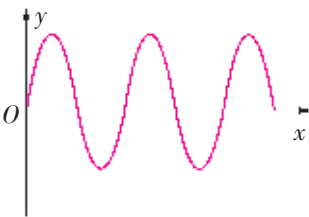


图 3-2-1 波的图像

思考与讨论

1. 在图 3-2-1 中，标明波峰与波谷。
2. 从研究对象、物理意义等方面比较波的图像和振动图像，并将你理解的内容填入下表。

振动图像	波的图像

用频率、波长描述机械波

频率和周期

波的基本特征就是周期性。在波的传播过程中，各质点的振动频率 f （或周期 T ），都等于波源的振动频率 f （或周期 T ）。因而波源的频率 f （或周期 T ）就叫做波的频率 f （或周期 T ）。

波长

在波动中，振动位移总是相同的两个相邻质点间的距离叫做波长（wavelength）。波长通常用 λ 表示（图 3-2-2）。

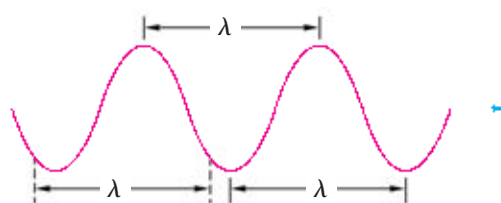


图 3-2-2 波长

如图 3-2-3 所示，在横波中，两个相邻波峰（或两个相邻波谷）之间的距离等于波长。在纵波中，两个相邻密部（或两个相邻疏部）之间的距离等于波长。

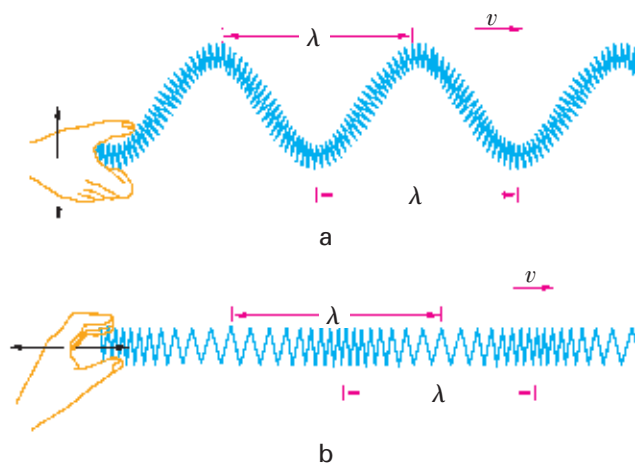


图 3-2-3 横波与纵波的波长

波长、频率与波速的关系

波传播的速度叫做波速（wave speed）。波在均匀介质中是匀速传播的。

由图 3-1-4 可知，质点 1 的振动经过一个周期 T ，传到质点 9，传播的距离恰好就是一个波长 λ 。

由此可得

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

波速还可以写成

$$v = \lambda f$$

即波速等于波长跟频率的乘积。

实验和理论都表明,波在不同介质中传播时,其频率(周期)保持不变。由于波在不同介质中波速不同,因此,波长也不同。

案例分析

案例 假设某一种声波的频率为 250 Hz, 在空气中传播时的波长为 1.36 m, 那么它的波速为多大?

分析 已知这种声波的频率 $f = 250 \text{ Hz}$, 波长 $\lambda = 1.36 \text{ m}$,

由公式

$$v = \lambda f$$

得

$$v = 1.36 \times 250 \text{ m/s} = 340 \text{ m/s}$$

如果这列声波在纯净水中传播,波速是 1 531 m/s, 那么它的波长是多少?

家庭作业与活动

1. 一列横波某时刻的波形图如图 3-2-4 所示。如果波沿着 x 轴正方向传播, 那么 A、B、C 三个质点中, 哪一个最先回到平衡位置? 如果波沿着 x 轴负方向传播, 那么这三个质点中, 哪一个最先回到平衡位置?

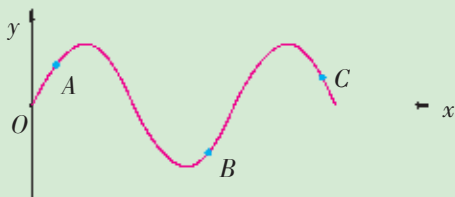


图 3-2-4

2. 某乐律 C 调 “la” 的频率为 $f = 440 \text{ Hz}$, 试求这个音在空气中的波长和水中的波长。已知声波在空气中的波速为 332 m/s, 声波在水中的波速为 1 450 m/s。
3. 设一简谐波在给定的介质中传播, 则下列说法中正确的是 ()。
- 振幅越大, 则波速越大
 - 振幅越大, 则波速越小
 - 在一个周期内, 振动质点通过的路程等于一个波长
 - 质点振动的频率越大, 则波传播一个波长的距离所用的时间越短
4. 湖面上停着甲、乙两条船, 它们相距 30 m。一列水波正在湖面上传播, 使得每条船每分钟上下震荡 30 次。当甲船位于波峰时, 乙船在波谷, 两船之间还有一个波峰。求水波的波速。

3.3 机械波案例分析

机械波在同一均匀介质中是匀速传播的，因此可用 $s = vt$ 来处理有关问题。

P 波和 S 波传到地球表面会发生反射，产生沿地表传播的表面波（ L 波）。

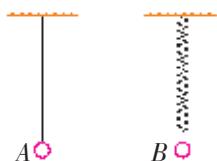


图 3-3-1 摆 A、摆 B 结构示意图

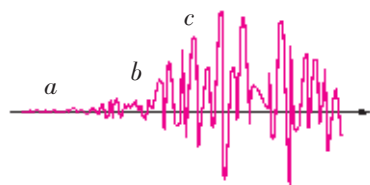


图 3-3-2 地震波示意图

我们已经知道机械波的形成过程、特性及其描述，下面通过案例分析，应用这些知识和有关方法解决一些具体问题。

案例分析 1

案例 地震是一种破坏性极大的自然灾害，它源于地壳内岩层的突然破裂。岩石发生破裂的地方叫做震源，它一般在地表下几千米到几百千米。震源正上方地表处叫做震中。

设地震波纵波（ P 波）的波速 $v_p = 9.9 \text{ km/s}$ 、横波（ S 波）的波速 $v_s = 4.5 \text{ km/s}$ ，表面波（ L 波）的波速 $v_L < v_s$ 。

（1）如图 3-3-1 所示，位于震中的某实验室内有摆 A 和摆 B，地震发生时，最先摆动的是哪一个摆？

（2）该实验室的地震观测仪记录到的地震图像如图 3-3-2 所示，由图像推断， a 、 b 、 c 三种波形各对应于哪种地震波？

（3）若通过图像测得 P 波与 S 波到达地震观测仪的时间差为 7.5 s ，则该地震观测仪距震源多远？

分析 （1）由于 $v_p > v_s > v_L$ ，可知纵波先传到震源正上方地面，物体受纵波影响，先在竖直方向振动，即最先振动的是摆 B。

（2）因为三种波传播的距离相等，波速大的先到达地表，在地震图像上首先出现，所以 a 为纵波（ P 波）， b 为横波（ S 波）， c 为表面波（ L 波）。

（3）假设地震观测仪与震源的距离为 s ，由 $\frac{s}{v_s} - \frac{s}{v_p} = \Delta t$ 得

$$s = \frac{\Delta t}{\frac{1}{v_s} - \frac{1}{v_p}} = \frac{7.5}{\frac{1}{4.5} - \frac{1}{9.9}} \text{ km} = 61.9 \text{ km}$$

利用波长、频率、波速三者之间的关系，还能解决哪些问题？请举例说明。

案例分析 2

案例 波是振动状态的传播。对某一列波来说，图 3-3-3 中的 a 、 b 两个图像，哪一个是波的图像，哪一个是波源的振动图像？你能根据这两个图像所提供的信息，计算出波长、周期和波速吗？

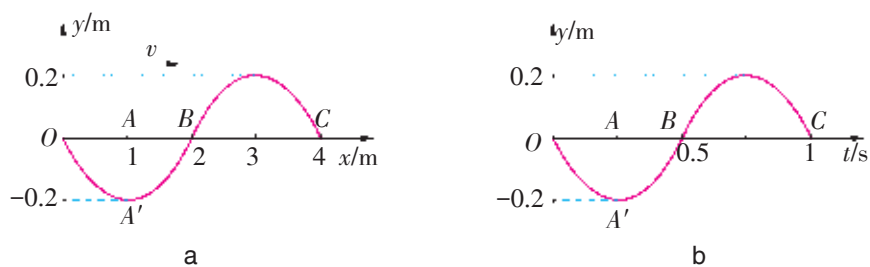


图 3-3-3 波的图像与振动图像

分析 根据图像中的横坐标单位可以判断, 图 a 是波的图像, 图 b 是波源的振动图像。

图 a 中 AA' 是某质点某时刻的位移 (正好在最大位移处), 因此, 这列波各质点的振幅为 0.2 m 。 OC 表示这列波的波长, $\lambda = 4 \text{ m}$ 。

图 b 中 AA' 是波源质点振动的振幅, 为 0.2 m ; OC 表示该质点的振动周期, $T = 1 \text{ s}$ 。

由于两个图像描述的是同一列波的有关情况, 所以波速为

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{4}{1} \text{ m/s} = 4 \text{ m/s}$$

你怎样区分振动图像和波的图像?

案例分析 3

案例 某时刻一列横波的图像如图 3-3-4 中的红线所示, 如果已知该时刻质点 a 的运动方向向下, 试判断这列波的传播方向。

分析 对这个问题, 一般可用两种方法进行分析。

(1) 在质点 a 的两侧不超过 $\frac{\lambda}{4}$ 的范围内, 各取两点 a_1 和 a_2 , 根据该时刻质点 a 的运动方向, 就可知道质点 a_1 带动 a 向下运动, 而质点 a_2 被 a 带着向下运动。这表明, 这列波是沿 x 轴正方向传播的。

(2) 可假设波沿某方向传播, 将图像沿着这假设的传播方向移动一段距离 $\Delta x = v\Delta t$ ($\Delta t < \frac{T}{4}$), 然后观察图中质点 a 的位置变化是否为题设的向下运动的结果, 从而确定假设的传播方向是否正确。若不正确, 则反方向为正确。

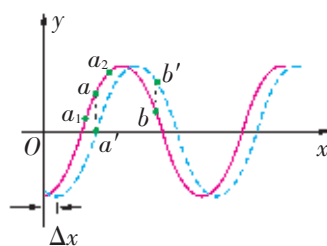


图 3-3-4 波的传播示意图

思考与讨论

1. 假如已知波的传播方向, 根据波的图像, 你能确定某一质点的振动方向吗?
2. 图 3-3-3 a 中, OA 、 AB 间各质点的运动方向怎样?
3. 图 3-3-3 b 中, 质点在 $0 \sim 0.25 \text{ s}$ 内是远离还是向着平衡位置运动? 在 $0.25 \sim 0.5 \text{ s}$ 内的情况又怎样呢?

家庭作业与活动

1. 下列关于波长的说法中正确的是 ()。
 - A. 一个周期内质点走过的路程
 - B. 横波中相邻的两个波峰间的距离
 - C. 一个周期内振动状态所传播的距离
 - D. 两个振动速度相同的质点间的距离
2. 一列波在第一种均匀介质中的波长为 λ_1 , 在第二种均匀介质中的波长为 λ_2 , 且 $\lambda_1 = 3\lambda_2$, 那么这列波在这两种介质中的频率之比和波速之比分别为 ()。
 - A. $3:1$ 和 $1:1$
 - B. $1:3$ 和 $1:1$
 - C. $1:1$ 和 $3:1$
 - D. $1:1$ 和 $1:3$
3. 如图 3-3-5 所示, 绳子右端固定, 一列波刚传播到 B 点。据图可判断出质点 A 开始振动的方向是 ()。
 - A. 向上
 - B. 向下
 - C. 向左
 - D. 向右

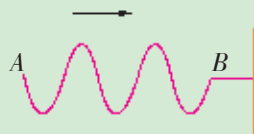


图 3-3-5

3.4 惠更斯原理 波的反射与折射

你游览过北京的天坛公园吗？那里有著名的“回音壁”和“三音石”。当你紧贴回音壁小声讲话时，在回音壁的另一处，你的朋友可以很清楚地听见你的讲话声；当你站在三音石上击掌一次，就能听到多次回声。这些现象都跟波的传播规律有关。要研究波的传播规律，首先必须研究惠更斯原理。

惠更斯原理

在均匀介质中，波源质点的振动会向各个方向匀速传播，形成球面波（图 3-4-1）。波在介质中传播时，任一时刻介质振动步调相同的点的包络面叫做**波面**（wave surface）；最前面的波面又叫**波前**（wave front）；垂直于波面并指向波传播方向的直线叫做**波线**（wave ray）。波面是平面的波叫做平面波（图 3-4-2）。

惠更斯对波的传播进行了深入研究后，于 1690 年提出：介质中波前上的各点，都可以看作是一个新的波源（子波源），并发出子波；其后，这些子波的包络面就是新的波面。这就是**惠更斯原理**（Huygens principle）。

如图 3-4-3 所示，已知 S_1 是球面波和平面波在 t 时刻的波前，根据惠更斯原理，其上各点都可以作为新的波源，向各个方向发出子波。经 Δt 时间，子波波面的半径为 $v\Delta t$ ，其包络面 S_2 即为 $(t + \Delta t)$ 时刻的新波前，这样就可以在图中画出 $(t + \Delta t)$ 时刻的各个子波及波面（波前）。

天坛位于北京市，为世界文化遗产、全国重点文物保护单位。始建于明永乐十八年（1420 年），清乾隆、光绪时曾重修改建。

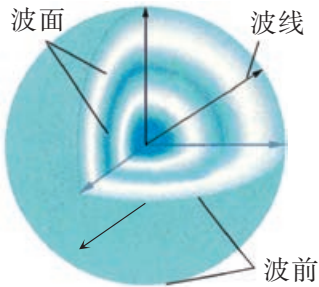


图 3-4-1 球面波

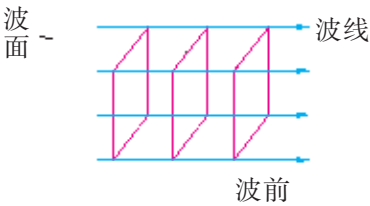


图 3-4-2 平面波

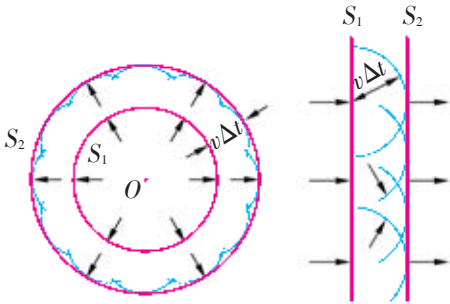


图 3-4-3 球面波与平面波的传播

根据惠更斯原理，只要知道某一时刻的波面，就可以用作图的方法确定下一时刻的波面。下面我们就用这个方法来研究波传播到两种介质的分界面上时，传播方向会发生怎样的改变，即波的**反射**（reflection）和**折射**（refraction）的规律。

研究机械波的反射规律

实验探究

观察波的反射现象

通过振动发生器在矩形水槽中激发的水波可以看成是平面波。

如图 3-4-4 所示，在矩形水槽的一端放置一窄条形的平板状振动发生器。平板上装有小电动机，电动机的轴上装有偏心轮。当电动机转动后，便带动振动器在竖直方向振动，于是在水槽中便激发出水波。

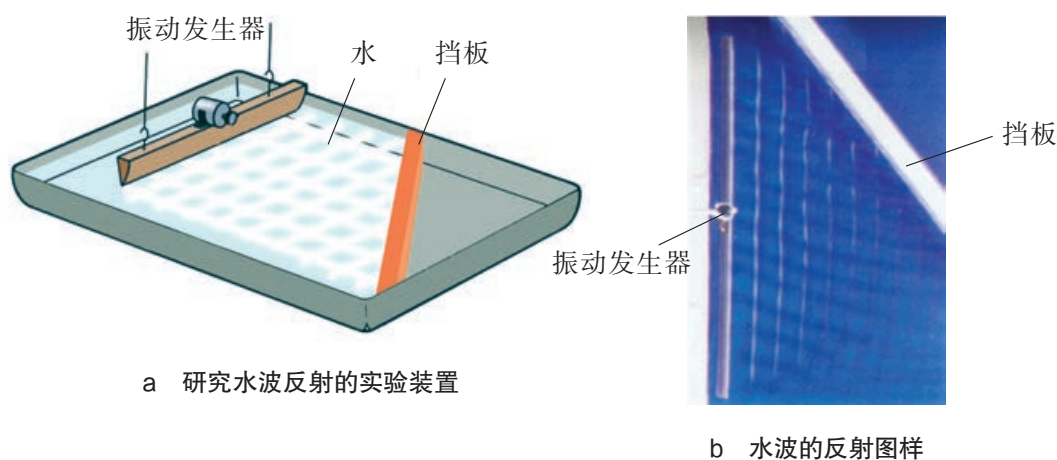


图 3-4-4 观察水波的反射现象

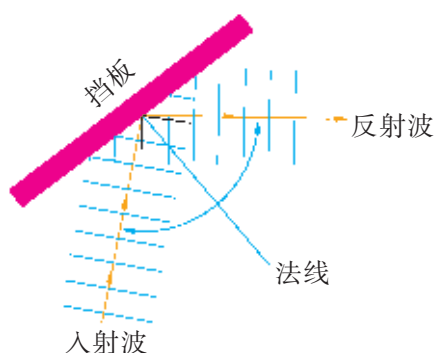


图 3-4-5 分析水波的反射规律

当水波碰到挡板时，便发生反射。观察反射波的传播情况，并与入射波进行比较。请根据图 3-4-5 分析，入射到挡板上的水波的方向跟反射的水波的方向有什么关系？

分析与论证

研究机械波的反射规律

如图 3-4-6 所示，设入射的平面波的波面和两种介质的分界面均垂直于纸面。在时刻 t ，波面 AB 的 A 点和界面相遇。经过三个相等的时间间隔，此波面依次到达分界面上等间距的 E_1 、 E_2 和 C 点。

因为波在同一均匀介质中的传播速度不变，所以，可以分别以 A 、 E_1 、 E_2 为圆心，以 BC 、 $B'E_2$ 、 $B''E_1$ 为半径，画出三个反射子波，进而确定反射波的波面（子波包络面）和波线（波

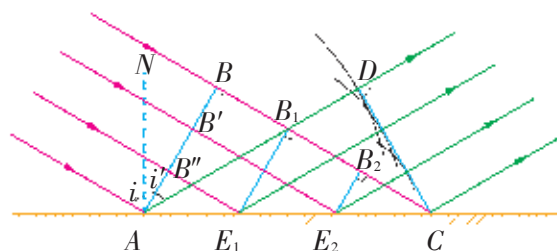


图 3-4-6 波的反射

面的垂线)。

过 A 点作界面的法线 AN ，标出入射角 i 和反射角 i' 。请根据图 3-4-6 证明，反射角等于入射角。这就是波的反射定律 (the law of reflection)。

研究机械波的折射规律

实验探究

观察波的折射现象

如图 3-4-7 所示，在矩形水槽底部一半区域内垫一块厚度均匀的玻璃板，形成深水区 and 浅水区。利用振动发生器激起水波，当水波从深水区传播到浅水区时，可以观察到如图 3-4-8 所示的折射图样。

水波的波速与水深有关，水越深，波速越大。实验中因深水区和浅水区的波速不同，故可将深水区和浅水区视为两种介质。

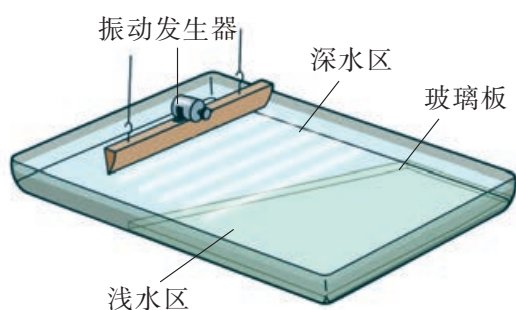


图 3-4-7 研究水波折射的实验装置

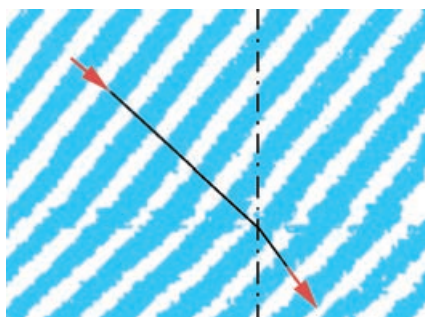


图 3-4-8 水波的折射图样

分析与论证

研究机械波的折射规律

研究表明，波速跟介质的性质有关。当波由第一种介质进入第二种介质时，由于其波速不同，在分界面上就会发生折射现象。下面我们用惠更斯原理来分析波的折射规律。

如图 3-4-9 所示，设 v_1 、 v_2 分别表示波在第一种和第二种介质中的波速，且 $v_1 > v_2$ 。时刻 t 入射波波面 AB 到达图示位置，其后经过三个相等的时间间隔，此波面依次到达等间距的 E_1 、 E_2 和 C 点。

仿照波的反射的作图方法，在图 3-4-9 中，从 A 向第二种介质发出的子波的波面半径为 $v_2 \Delta t$ ，它必小于 $BC = v_1 \Delta t$ 。而从 E_1 、 E_2 向第二种介质发出的子波的波面半径分别为 $\frac{2}{3} v_2 \Delta t$ 和 $\frac{1}{3} v_2 \Delta t$ 。这些子波的包络面也是与纸面垂直的平面。它与纸面的交线为 CD ， $\Delta t = \frac{BC}{v_1} = \frac{AD}{v_2}$ 。作垂直于此包络面的直线，即得折射线。由图可以看出，入射波的波线跟折射波的波线不在一条直线上。作 AN 垂直于分界面，即作分界面的法线。以 r

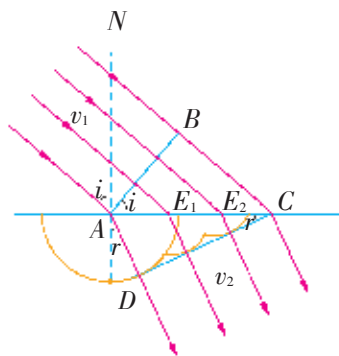


图 3-4-9 波的折射

表示折射角，则有 $\angle ACD = r$ ，再以 i 表示入射角，则有 $\angle BAC = i$ 。由图可以看出

$$BC = v_1 \Delta t = AC \sin i$$

$$AD = v_2 \Delta t = AC \sin r$$

上式除以下式得

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}$$

我们把 $\frac{v_1}{v_2}$ 叫做第二种介质
对于第一种介质的相对折射率。

研究表明，波从第一种介质进入第二种介质时，在它们的分界面处会发生折射现象。入射角的正弦跟折射角的正弦之比，等于波在第一种介质中的波速跟在第二种介质中的波速之比。这就是波的**折射定律**（the law of refraction）。

家庭作业与活动

1. 影剧院的内墙壁是不是很光滑？请实地观察后谈谈影剧院为什么这样处理墙壁。
2. 某旅游者走过一个山谷，他拍了一下手后经过 0.5 s 听到右边山坡反射回来的声音，经过 1.5 s 又听到左边山坡反射回来的声音，则这个山谷的宽度大约是_____ m。
3. 为了测一根长铁管的长度，甲同学把耳朵贴在长铁管的一端，乙同学在长铁管的另一端敲一下铁管，甲同学听到了两次响声，测得它们的时间间隔为 0.5 s。已知声音在铸铁和空气中传播的速度分别为 3 910 m/s 和 340 m/s，这根铁管有多长？
4. 图 3-4-10 所示的是一列机械波从一种介质进入另一种介质时发生的折射现象。已知这列波

在介质 I 中的波速为 v_1 ，在介质 II 中的波速为 v_2 ，则 $v_1 : v_2$ 为（ ）。

- A. $1 : \sqrt{2}$
- B. $\sqrt{2} : 1$
- C. $\sqrt{3} : \sqrt{2}$
- D. $\sqrt{2} : \sqrt{3}$

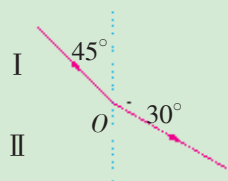


图 3-4-10

3.5 波的干涉与衍射

湖面上，几艘快艇在水中飞驰，艇后留下了一条条白浪翻滚的水波（图 3-5-1）。

这些水波相遇时以及相遇后的情况会怎样呢？

波的叠加原理

实验探究

研究绳波的叠加

将一根 8~10 m 的长绳放在地上，两位同学各自站在一端，他们先是将绳稍稍拉紧，然后分别上下摆动一下，各使绳产生一列波，向对方传播过去。

由于绳子上波的传播速度较快，人眼很难看清楚波的传播和叠加情况。用摄像机将其拍摄下来，截取不同时刻的几个画面，就可以清楚地看到图 3-5-2 所示的叠加过程。两列波彼此穿过，继续传播，波的形状和传播情况跟相遇前一样吗？

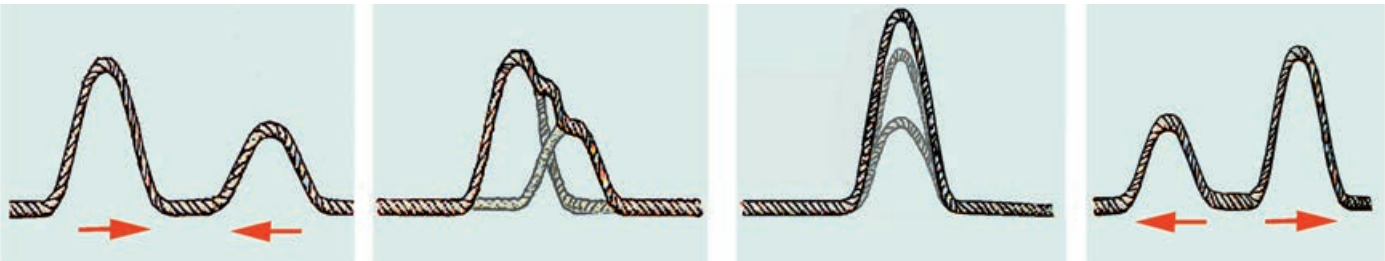


图 3-5-2 绳波的叠加

在水面上，有两个圆形水波，波前逐渐扩展，到一定时候两波相遇，然后又分开（图 3-5-3）。两列波在相遇后，各自的传播状况是否发生变化？

大量事实证明，几列波相遇时能保持各自的特性（频率、波长、振动方向等）不变，继续传播，互不影响。在相遇区域内，任一质点的位移是各列波单独传播时在该点所引起的位移的矢量和。这就是波的独立性和叠加原理。

研究波的干涉

实验探究

研究水波的干涉

实验装置如图 3-5-4 所示。波源是固定在同一振动发生器上的两个振动小球。当振动器上下振动时，两个振动小球便周



图 3-5-1 几列水波相互独立地传播



图 3-5-3 水波的叠加

期性地触动水面，成为两个振动频率和振动步调相同的波源。这两个波源产生的是两列步调相同、频率也相同的波。这两列波在水面传播时，水面各质点的振动方向都沿上下方向。两列波相遇后，在它们的重叠区域会形成奇妙而稳定的图样（图 3-5-5）。仔细观察水面振动的图样，可以看出，存在着一条条从两个波源中间伸展出来的相对平静的区域和激烈振动的区域。

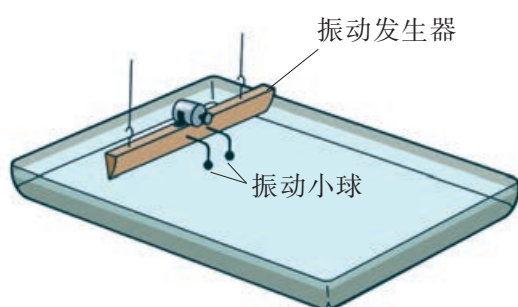


图 3-5-4 水波干涉实验装置

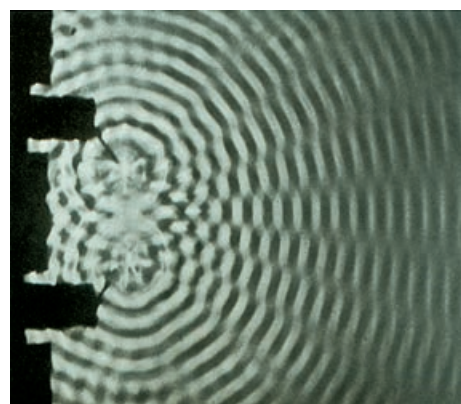


图 3-5-5 水波干涉图样

相对平静的区域和激烈振动的区域在水面上的位置是不是固定的？水面的花纹有什么特点？

分析与论证

研究波的干涉规律

为了便于分析，将图 3-5-5 所示的照片画成图 3-5-6。某时刻在水面上的某一点（图 3-5-6 中的 a 点），两列波的波峰跟波峰相遇，经过半个周期，在这一点就是波谷跟波谷相遇。波峰跟波峰相遇时，质点的位移最大，等于两列波的振幅之和；波谷跟波谷相遇时，质点的位移也是最大，也等于两列波的振幅之和。在这一点上，两列波引起的振动始终是加强的，质点振动的振幅等于两列波的振幅之和。

请讨论：某时刻在水面上的另一点（图 3-5-6 中的 b 点）两列波的波峰跟波谷相遇，经过半个周期，在这一点就是波谷跟波峰相遇。在这一点上，两列波引起的振动是加强还是减弱？

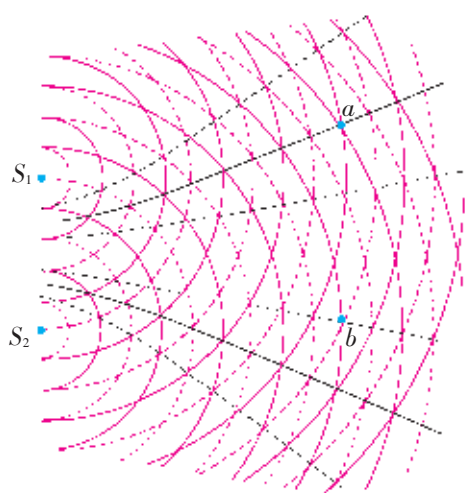


图 3-5-6 两列波的干涉（实线表示波峰，虚线表示波谷）

图 3-5-6 中实圆弧与实圆弧的交点（或虚圆弧与虚圆弧的交点）为振动的加强区（用放射状实线画出）；实圆弧与虚圆弧的交点为振动的减弱区（用放射状虚线画出）。可以看出，这一图样跟实验所得到的图样是一致的。

由上面的实验和分析可知，振动频率相同、步调一致的两列波叠加，使某些区域的振动加强，某些区域的振动减弱，而

且振动加强的区域和振动减弱的区域相互错开，始终稳定，这种现象叫做波的干涉（interference）。能够产生两列相互干涉的波的波源叫做相干波源，干涉所形成的图样叫做干涉图样。

两列波相遇，一定会产生干涉现象吗？要产生干涉现象，对波源有什么要求？

一切波只要符合相干条件都能发生干涉现象。

研究波的衍射

图 3-5-7 中，水波通过两座小山之间狭窄的水面时，形成半圆形的水波向外扩散，绕过小山。这是为什么呢？

图 3-5-8 中，雄伟的大桥下，悠悠江水，层层波浪绕过桥墩，桥墩却“若无其事”。

波还会转弯，这是什么缘故？

实验探究

观察水波的衍射

水槽内，在波源的前方竖一块木板，观察水波在传播过程中发生的现象。如果在波源的前方插一段细铁丝，观察到的现象又是怎样的呢？

波可以绕过障碍物继续传播，这种现象叫做波的衍射（diffraction）。在什么条件下波才能发生明显的衍射现象呢？

在水槽里放两块挡板，当中留一窄缝，保持水波的波长不变，由宽到窄逐渐改变窄缝的宽度，观察波的传播情况（图 3-5-9）。

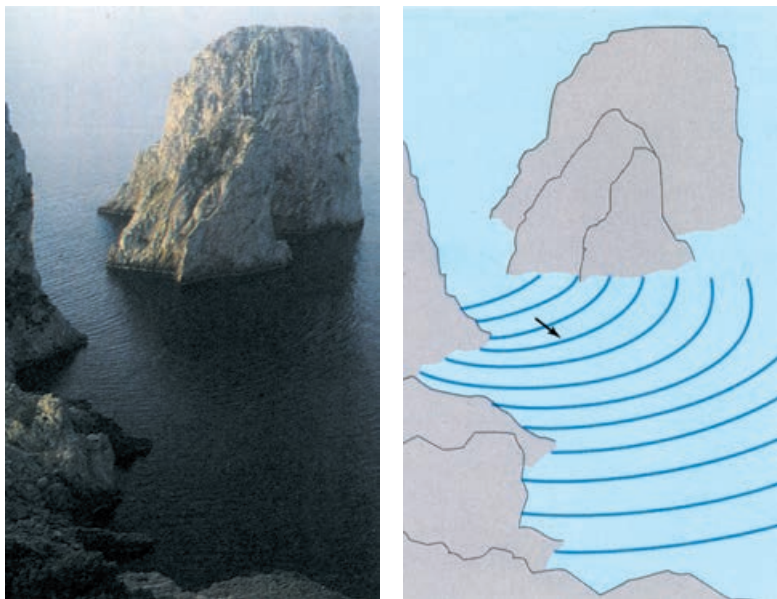


图 3-5-7 水波绕过小山



图 3-5-8 水波绕过桥墩

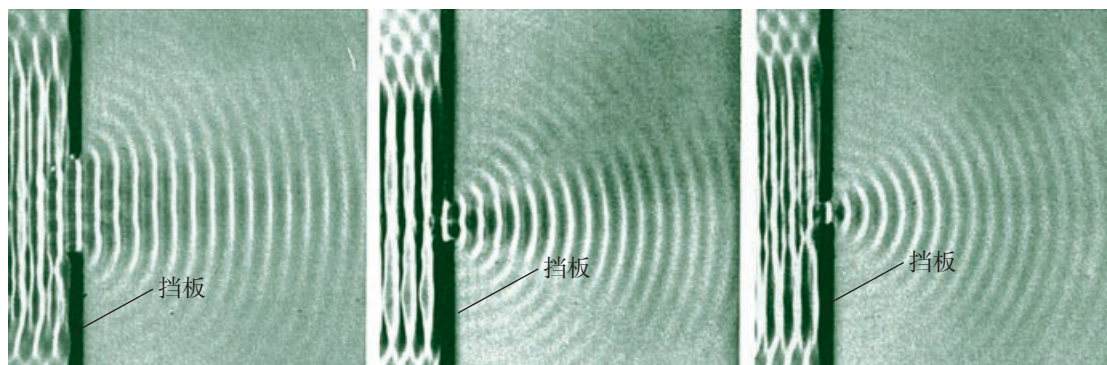


图 3-5-9 水波发生明显衍射的条件

思考与讨论

缝、孔或障碍物的尺寸跟波长相比较，大致满足怎样的关系才能观察到明显的衍射现象？如果缝、孔或障碍物较大时，就不存在衍射现象吗？

障碍物或孔、缝的尺寸大小并不是决定水波是否发生衍射的条件。障碍物或孔、缝的尺寸也不是越小越好。当障碍物或孔、缝的尺寸远小于波长时，尽管衍射现象十分突出，但由于波的能量减弱，也不容易观察到衍射现象。

请解释生活中“闻其声而不见其人”的现象。

分析与论证

研究水波的衍射

如图 3-5-10 所示，波面为直线的水波，传到宽为 d 的缝时，缝上各点成为新的子波源，它们都要发射半圆形子波。以这些子波源为中心作半径为 vt (v 为波速) 的半圆面，再作与这些半圆面相切的包络面，这个包络面就是波通过缝后在时刻 t 的波前。从图中可以看出，波面为直线的水波通过缝后，除了与缝等宽部分的波面仍为直线外，在缝的边缘处，波面发生了弯曲，波线改变了方向，传播到了障碍物的后面，说明产生了衍射现象。

如图 3-5-11 所示，如果缝很狭窄，宽度 d 跟波长相差不多，水波经过狭缝后的波前是圆形的，衍射现象就非常明显。

总之，当缝很宽，其宽度远大于波长时，波通过缝后基本上是沿直线传播（除了缝的边缘处），不会发生明显的衍射现象。当缝的大小（或障碍物的大小）跟波长相差不多时，就能发生明显的衍射现象。

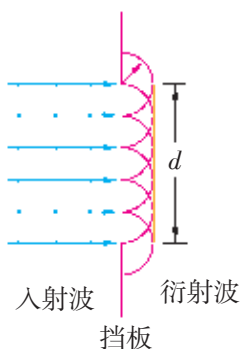


图 3-5-10 平面波的衍射

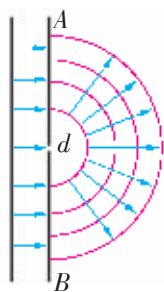


图 3-5-11 波面为直线的水波的窄缝衍射

STSE

利用干涉原理制成干涉型消声器

图 3-5-12 是干涉型消声器的工作原理图。

有一列波长为 λ 的声波，沿水平管道自左向右传播。当此波到达 a 处时，分成两列互相干涉的波，它们分别通过长度为 r_1 和 r_2 的弯管和直管，到 b 处再相遇。若 $\Delta r = r_1 - r_2$ 恰好等于声波半波长 $\frac{\lambda}{2}$ 的奇数倍，即 $\Delta r = \frac{(2k+1)\lambda}{2}$ 时，声波的振幅 $A = 0$ ，就是说该频率的声波被削弱。利用这一原理，可以达到控制噪声的目的。

干涉型消声器能有效地消除低频噪声。发动机（正常工作期间）的周期性排气噪声，就是一种典型的低频噪声。一台四缸四冲程发动机，当以

2 000 r/min 的转速运转时，峰值频率在 200 Hz 以下的噪声较大，所以常用干涉型消声器来消除这类低速转动发动机所发出的低频噪声。一台柴油发动机经如此消声处理后，其排气噪声可以降低 10 dB 以上。

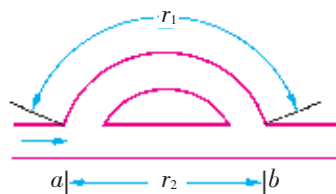


图 3-5-12

家庭作业与活动

1. 准备一台收录机和两个相同的扬声器，请设计一个实验，体验声波的干涉现象。
2. 两列波长相等的水波发生了干涉现象。若在某一时刻，恰好在 P 点处两列波的波峰相遇，在 Q 点处两列波的波谷相遇，则（ ）。
 - A. 在 P 点振动加强，在 Q 点振动减弱
 - B. 在 P 、 Q 两点振动都加强
 - C. 在 P 、 Q 两点的振动周期相同
 - D. 在 P 、 Q 两点始终处在最大或最小位移处
3. 下列有关干涉图样的说法中正确的是（ ）。
 - A. 振动加强的区域和振动减弱的区域相间
 - B. 两个波源连线的垂直平分线上的质点的振动是减弱的
 - C. 两列波的波谷与波谷相遇处的质点的振动是减弱的
 - D. 两列波的波峰和波谷相遇处的质点的振动是加强的
4. 在做水波通过小孔发生衍射的实验时，激发水

波的振动器频率为 5 Hz，水波在水槽中的波速为 0.05 m/s。为使实验效果更明显，小孔直径 d 应为_____。

5. 如图 3-5-13 所示， B 为波源， M 、 N 为两块挡板，其中， M 板固定， N 板可上下移动，两板中间有一狭缝。此时测得 A 点没有振动。为了使 A 点能发生振动，可采用的方法是（ ）。
 - A. 增大波源的频率
 - B. 减小波源的频率
 - C. 将 N 板向上移动一些
 - D. 将 N 板向下移动一些

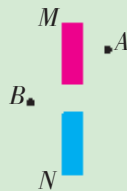


图 3-5-13

3.6 多普勒效应

生活中，我们能否从飞机飞行时所发出的轰鸣声的音调的高低，来判断它是从远处飞来，还是掠过头顶飞离而去？



图 3-6-1 空中飞机的轰鸣声与多普勒效应示意图

站在马路边，一辆鸣着喇叭的汽车从身边驶过，你听到的喇叭声音调是否变化？

1842 年初夏的一天，奥地利物理学家多普勒（J. Doppler）带着心爱的女儿在铁道旁散步。这时远处有一列快速行驶的火车鸣笛而来，火车经过他们身旁后又鸣笛离去，多普勒发现，汽笛声的音调先变高，后又变低。多普勒对这种现象十分惊奇，他再次来到铁路旁，体验当初的感觉，证实了自己的直觉没错。

偶然中孕育着必然。多普勒对这种现象进行了认真的研究，总结出了其中的规律。

感受多普勒效应

1845 年，荷兰皇家气象学院院长白贝罗（C. Buys-Ballot）在乌得勒支铁路上进行了一次实验：让机车牵引一节平板车厢，上边坐了一队小号手在奏乐。当机车快速驶来驶去时，一些训练有素的音乐家使用自己的耳朵判断音调的变化。然后音乐家与小号手对调位置，重新实验。实验进行了两天，结果是认定小号声音调确实有明显的变化。

实验探究

感受多普勒效应

对于上述现象，我们可以通过如下两个实验来体验。

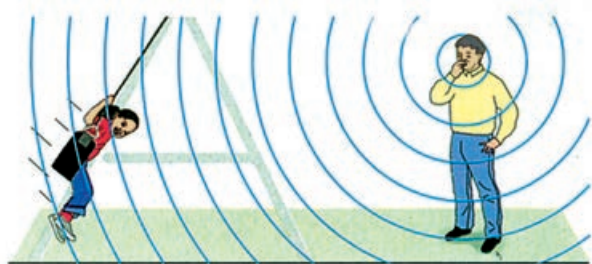
1. 如图 3-6-2 所示，将一个正在播放声音的蜂鸣器（也可以使用手机或 MP3 播放器）系在长约 1 m 的细绳的一端，另一端系在手上，并让蜂鸣器离开地面少许，转动手腕使蜂鸣器在竖直面上旋转。注意聆听蜂鸣器发出的声音的音调变化情况。

2. 两位同学相隔一段距离（约 10 m），一人吹口哨（或手持蜂鸣器），另一人坐在秋千上来回摆动（图 3-6-3 a）。当秋千经过图 3-6-3 b 中的不同位置 A、B、C、D、E 时，细心体会一下听到的音调是如何变化的。

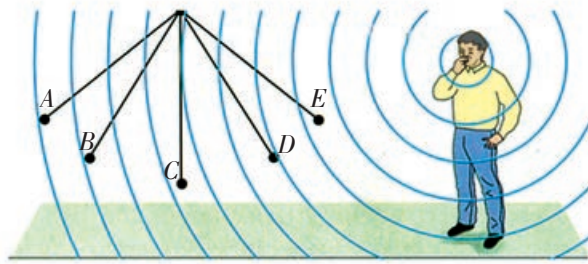
这种波源跟观察者之间的相对运动，使得观察者感受到波的频率发生了变化的现象叫做**多普勒效应**（Doppler effect）。



图 3-6-2 体验蜂鸣器发出的声音的音调变化



a



b

图 3-6-3 体验哨声音调的变化

分析与论证

多普勒效应表明：观察者相对波源运动时，观察者接收到的波的频率与波源的频率不同（图 3-6-4）。这种效应是怎样发生的呢？

设波源的频率为 f ，波在介质中的波速为 V ，观察者接收到的波的频率为 f' 。当波源和观察者均相对于介质静止时，单位时间内观察者接收到的完整波的个数等于波源发出的完整波的个数，即观察者接收到的波的频率等于波源的频率。

1. 当波源相对于介质静止，观察者向着波源以速度 v 运动时，相当于波相对于观察者的速度增大，而波长不变，故单位时间内观察者接收到的完整波的个数多于波源发出的完整波的个数，即观察者接收到的波的频率大于波源的频率。

请思考：当观察者以速度 v 离开波源运动时，观察者接收到的波的频率跟波源的频率有什么关系？

2. 当观察者相对介质静止，波源以速度 u 向着观察者运动时，相当于波长减小而波速不变，因此单位时间内观察者接收到的完整波的个数多于波源发出的完整波的个数，即观察者接收到的波的频率大于波源的频率。

请思考：当波源以速度 u 离开观察者运动时，观察者接收到的波的频率跟波源的频率有什么关系？

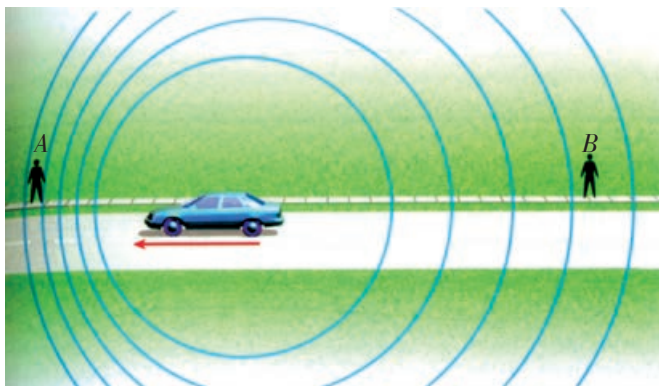


图 3-6-4 产生多普勒效应的原理示意图

身边的多普勒效应

多普勒效应在科学研究、工程技术、交通管理、医疗诊断等多个领域有广泛的应用。工业生产中，根据多普勒效应制成的流量计，可以测定各种封闭管道中流体或悬浮物液体的流速。医学中根据多普勒效应制成的胎心控制器和血流测定仪，可以探测人体内脏器官因变化而引起的异常状况。利用激光的多普勒效应可以精确地测定各种运动物体的速度。天文学上，根据多普勒效应可以准确地计算出天体相对于地球运动的速度和人造卫星的运动速度等。观测恒星光谱，天文学家发现谱线向红端移动，也就是说它们发出的电磁波的频率在减小，由此判断出它们在向远方离去。美国科学家哈勃经过仔细测量得知，恒星越远，红移量越大，离去速度越大。这是大爆炸理论的重要依据之一。

案例分析

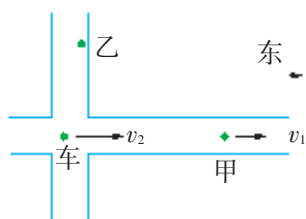


图 3-6-5

案例 如图 3-6-5 所示，在公路的十字路口东侧路边，甲骑车以速度 v_1 向东行驶；在路口北侧，乙站在路边；一辆汽车以速度 v_2 通过路口向东行驶并鸣笛。已知汽车笛声的频率为 f_0 ，车速 $v_2 > v_1$ 。设甲听到的笛声频率为 f_1 ，乙听到的笛声频率为 f_2 ，司机自己听到的笛声频率为 f_3 ，则此三人听到笛声的频率由高至低依次为_____。

■ **分析** 已知汽车（波源）向甲临近，所以 $f_1 > f_0$ 。汽车离开乙，所以 $f_2 < f_0$ 。汽车相对司机是静止的，有 $f_3 = f_0$ 。因此三人听到笛声的频率由高至低依次为 $f_1 > f_3 > f_2$ 。

信息浏览

冲击波

如图 3-6-6 d 所示，当波源速度 v_s 超过了波速 v_0 ，这样，在任一时刻波源本身都超过了它此前发出的波前。当波源在 A 位置时发出的波，在其后 t 时刻的波面半径为 $v_0 t$ ，而此时刻波源已前进了 $v_s t$ 的距离，到达了 B 位置。在波源的前方，

没有任何波动产生。在时间 t 内的一系列波面的包络面形成了一个圆锥面，这个圆锥面叫马赫锥。有时可以看到当船速超过水波的波速，就会在水中激起以船为顶端的 V 形波。当飞机或炮弹超音速飞行时，就会在空气中激起圆锥形的波，这就是冲击波。

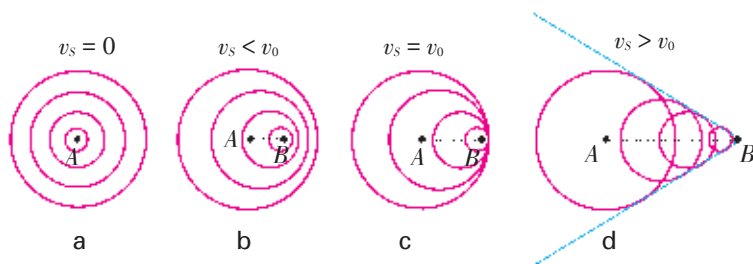


图 3-6-6 冲击波的形成过程

家庭作业与活动

- 一人站在火车轨道旁，一列正在鸣笛的火车高速驶来，然后又高速离去，则此人听到的鸣笛声的频率将（ ）。
 - 变大
 - 变小
 - 先变大后变小
 - 先变小后变大
- 波源所发出的机械波的频率为 180 Hz，观察者所接收到的机械波频率也为 180 Hz。下列判断中正确的是（ ）。
 - 若波源静止不动，则观察者一定静止不动
 - 波源和观察者之间的相对距离不变
 - 波源和观察者之间的相对距离增大
 - 波源和观察者之间的相对距离减小
- 有一种由钢丝牵着进行操纵做圆周飞行的飞机模型，装有两冲程的活塞式发动机作为动力。操纵者站在圆心，在他听来发动机工作时发出的音调是平稳不变的，而场边的观众则听到发动机的音调忽高忽低地做周期性变化，这是由于_____，这种现象叫做_____。

第3章 家庭作业与活动

A 组

1. 图 3-A-1 是同一机械波在两种介质中传播的波的图像。从图中可以直接观察到发生变化的物理量是 ()。

A. 波速 B. 频率
C. 周期 D. 波长

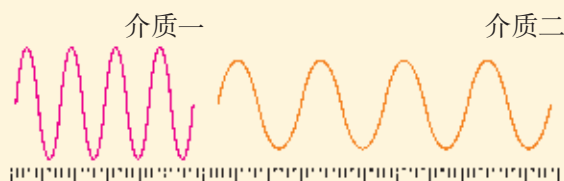


图 3-A-1

2. 图 3-A-2 为一简谐横波在某一时刻的波形图。已知此时质点 A 正向上运动，如图中箭头所示。由此可判定此横波 ()。
- A. 向右传播，且此时质点 B 正向上运动
B. 向右传播，且此时质点 C 正向下运动
C. 向左传播，且此时质点 D 正向上运动
D. 向左传播，且此时质点 E 正向下运动

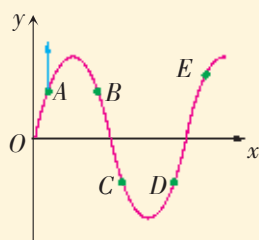


图 3-A-2

3. 图 3-A-3 是两列波叠加的示意图。这两列波的振动方向、振幅、频率完全相同，M、N、Q 为叠加区域的三个点，Q 点为两个波谷相遇点，M 点为两个波峰相遇点，N 点为波峰和波谷相遇点，则下列说法中正确的是 ()。
- A. Q 点为振动加强点

B. N 点始终静止不动

C. 经 $\frac{1}{2}T$ ，质点 Q 传播到 N 点

D. M 点为振动加强点，经 $\frac{1}{2}T$ ，此点振动减弱

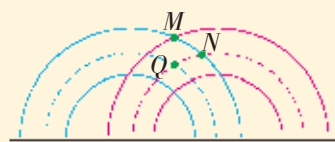


图 3-A-3

4. 关于波的衍射，下列说法中正确的是 ()。
- A. 衍射是一切波的特性
B. 波长比孔的宽度大得越多，衍射现象越不明显
C. 发生波的衍射时必须有两个波源
D. 波的衍射也是由于波的叠加产生的
5. 有一测速雷达，发射的电磁波频率为 f_1 ，想用它来测量一辆迎面开来的汽车的车速。设该雷达接收到的汽车反射波频率为 f_2 ，则有 ()。
- A. $f_1 > f_2$ B. $f_1 = f_2$
C. $f_1 < f_2$ D. 无法确定
6. 关于声波，下列说法中正确的是 ()。
- A. 空气中的声波一定是纵波
B. 声波不仅能在空气中传播，而且能在固体、液体和真空中传播
C. 声音在水中的传播速度大于在空气中的传播速度
D. 空中有时雷声不绝，这是由声波的干涉引起的
7. 如图 3-A-4 所示，A、B 是 x 轴上的两个质点，有一列简谐波沿 x 轴正方向传播。在某一时刻，A 点正沿竖直向上的方向通过其平衡位置，B 点则正沿竖直向下的方向通过其平衡位置。如果这列波的周期为 T，那么这列波到达 A、B

两点的时间差为 ()。

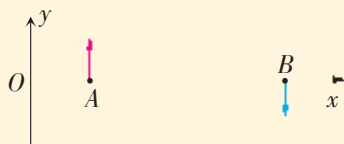


图 3-A-4

- A. $(2n+1)T$ B. $\frac{(2n+1)T}{2}$
 C. $\frac{3(2n+1)T}{4}$ D. $\frac{(2n+1)T}{4}$

B 组

1. 已知空气中的声速为 340 m/s。现有三种声波：

①周期为 $\frac{1}{20}$ s；②频率为 10^4 Hz；③波长为 10 m。若它们传播时遇到宽度约为 13 m 的障碍物，则能产生显著衍射现象的是 ()。

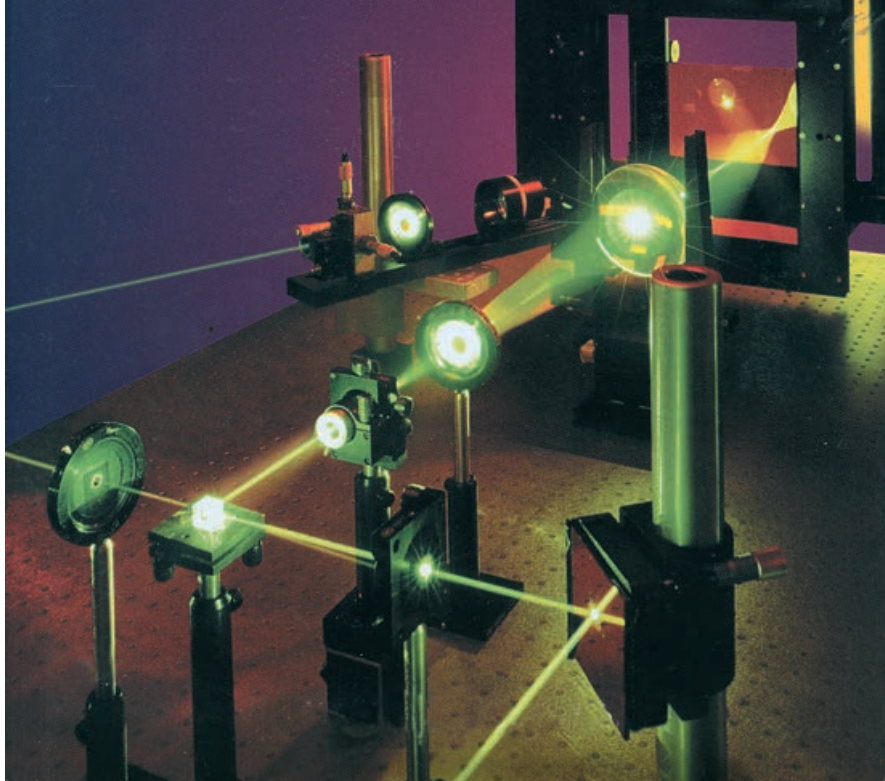
- A. ①和② B. ②和③
 C. ①和③ D. 都可以

2. 如图 3-B-1 所示，一根张紧的水平弹性长绳上的 a 、 b 两点，相距 10 m。当一列简谐横波沿此长绳向右传播时，若 a 点的位移达到正极大时， b 点的位移恰为零，且向下运动。经过 1 s 后， a 点的位移为零，且向下运动，而 b 点的位移恰达到负极大。试求这列简谐横波的波速的可能值。



图 3-B-1

3. 地壳某处发生了地震，地震波由震源向周围传播，既有横波又有纵波。已知其横波的传播速度为 7.5 km/s，纵波的传播速度为 14 km/s。当时，离震源有相当距离处的人先感到房子上下跳动了几次，隔了 10 s，后又感觉到房子水平方向摇摆了几次，则震源距人所在处约为多少米？取两位有效数字。



第4章 光及其应用

“赤橙黄绿青蓝紫，谁持彩练当空舞？”* 我们生活在一个五光十色的世界中。

光是什么呢？光现象有何特点和规律呢？你能解释以下现象吗？

肥皂膜上会出现彩色花纹；

孔雀羽毛显得色彩斑斓；

立体电影具有那么神奇的立体效果；

.....

本章将引导你通过观察和实验，理解光的折射定律及其应用，探究光的干涉、衍射和偏振现象，了解激光的特性和在生产生活中的应用；通过光的干涉、衍射等现象来论证光具有波动性，将增强你的证据意识，提升科学论证能力。

* 摘引自毛泽东《菩萨蛮·大柏地》。

4.1 光的折射

在初中，我们已经知道光的折射现象，但没有研究入射角跟折射角之间的定量关系。

探究光的折射定律

1621年，荷兰数学家斯涅耳（W. Snell）从实验中得到了入射角*i*跟折射角*r*之间的定量关系，即入射角的正弦跟折射角的正弦成正比。下面通过实验来进行探究。

实验探究

研究光的折射规律

如图4-1-1所示，将半圆形玻璃砖固定在光具盘上，将激光射到半圆形玻璃砖的直边上，研究入射光的折射情况。在实验过程中，要仔细观察入射光线、折射光线跟法线是否处于同一平面，并从光具盘边缘的刻度上读出入射角*i*和折射角*r*。

请测定入射角为10°、20°、30°、40°、50°、60°、70°、80°时的折射角，计算入射角的正弦与折射角的正弦及其比值。

你得到的结果跟斯涅耳的结论一致吗？

这样，可以得到如下结论：当光从真空射向介质时，入射角*i*跟折射角*r*满足下式

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n$$

式中的*n*是一个常数。

上式表明：折射光线与入射光线、法线处在同一平面内，折射光线与入射光线分别位于法线两侧，入射角的正弦跟折射角的正弦成正比。这就是光的折射定律。

分析与论证

在第3章中，我们已经用惠更斯原理研究过机械波的折射规律，用这种方法也可以得到光的折射定律。

惠更斯认为，光的折射是因为光波在界面两侧不同介质中有不同的传播速度。

研究表明，不同介质的光学性质是有区别的，光在不同介质中的速度是不同的。假设有一列光波从真空进入介质（图4-1-2），光在真空和介质中的速度分别是*c*和*v*，入射角为*i*，折射角为*r*。

古希腊天文学家托勒密（C. Ptolemaeus，约90—168）认为入射角*i*与折射角*r*之间是简单的正比关系，但这个结果只对比较小的入射角才大致成立。

由于激光平行度好、亮度高，常用于光学实验。

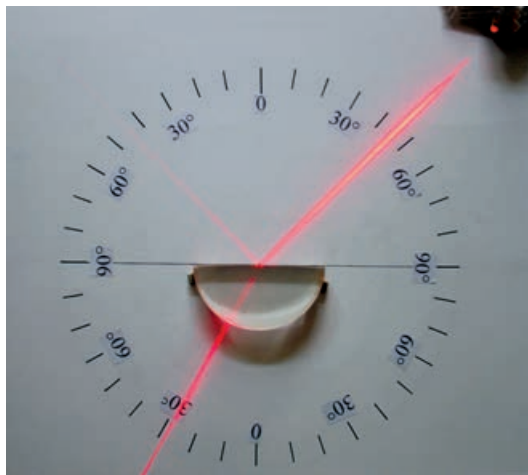


图4-1-1 用光具盘探究光的折射定律

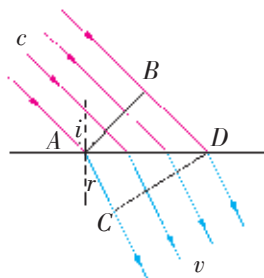


图4-1-2 光的折射

请根据惠更斯原理，用作图法和几何法证明下式

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{c}{v}$$

由于 c 是常量，比值 $\frac{c}{v}$ 取决于光在介质中的速度 v ，而对确定的介质来说， v 是一个确定的值，这样 $\frac{c}{v} = \text{常数}$ 。

根据上式，对于从真空以同一个入射角 i 进入介质的光来说，光在介质中的速度 v 越小，折射角 r 是越大还是越小？

折射率

物理学中用**折射率**（refraction index）来反映介质使光偏折的性质。某种介质的折射率，等于光在真空中的传播速度 c 跟光在这种介质中的传播速度 v 之比。即

$$n = \frac{c}{v}$$

由于光在真空中的传播速度 c 大于光在任何介质中的传播速度 v ，所以任何介质的折射率 n 都大于 1。光从真空斜向射入任何介质时， $\sin i$ 总是大于 $\sin r$ ，即入射角 i 总是大于折射角 r 。

光在真空中跟在空气中的速度相差很小。通常情况下可认为，光从空气进入某种介质时，入射角的正弦跟折射角的正弦之比就是该种介质的折射率。下表列出了几种常见介质在室温情况下对钠黄光的折射率。

几种常见介质的折射率

物质	折射率	物质	折射率
空气	1.000 293	水	1.333 0
二氧化碳	1.000 451	金刚石	2.417
氢气	1.000 132	石英玻璃	1.458
甲烷	1.000 444	钠钙玻璃	1.512
二氧化硫	1.000 686	火石玻璃	1.655
甘油	1.473 0	冰	1.310

同一种介质对不同频率的光发生折射时的折射率是不同的，折射率是随着光的频率的增大而增大的。当一束白光以某个角度入射介质时，由于各种色光的折射角不同，各种色光就分开了，这种现象叫做光的色散。把白光射到三棱镜上，经过两次折射，不同色光就分散得更加明显。牛顿（I. Newton）首次观察到三棱镜把太阳光分成连续分布的七种色光(图4-1-3)，这是一种连续分布的彩色光谱。



图 4-1-3 牛顿用三棱镜把太阳光分成连续分布的七种色光

光谱中红光的偏折角度最小，紫光的偏折角度最大，中间是橙、黄、绿、蓝、靛等色光。下表是实验测得的某种玻璃对各种色光的折射率。

色光	紫、靛	蓝	绿	黄	橙	红
折射率	1.532	1.528	1.519	1.517	1.514	1.513

学生必做实验

测量玻璃的折射率

材料的折射率是描述光学材料性能的重要指标。根据折射定律，可以测量玻璃的折射率。

实验设计

用长方体玻璃砖、刻度尺、量角器、激光笔、白纸、大头针、铅笔等器材，设计测定玻璃折射率的实验方案，拟订实验步骤，完成测量。

思考讨论

1. 怎样确定光从空气进入玻璃砖后的折射方向？
2. 如果玻璃砖的前后表面平行，那么光从空气入射玻璃砖又出射到空气中，出射光的方向与入射光的方向有什么关系？
3. 怎样把激光的光路描绘在白纸上？

图 4-1-5 是某同学在实验过程中留在白纸上的记录痕迹， aa' 和 bb' 是玻璃砖的两个界面， P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 是大头针。你从图上得到哪些启发？请写出实验步骤。

进行实验与收集证据

当入射角分别是 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 时，测出相应的折射角，把入射角 θ_1 、折射角 θ_2 和它们的正弦值分别记入表格中。

计算出不同入射角下的 $\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}$ ，再计算出它们的平均值，即得到玻璃的折射率。

分析论证

可以有多种方法处理收集到的实验信息。

用算法处理：对每次实验得到的数据，计算得到不同入射角时的折射率，然后计算出平均值，即视作该玻璃的折射率。

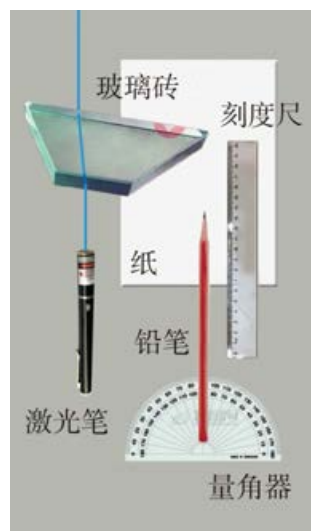


图 4-1-4 测量玻璃折射率实验的主要器材示意图

友情提醒：不要将激光直射眼睛，避免受到伤害。

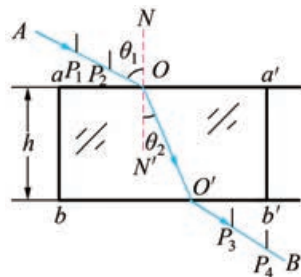


图 4-1-5 某同学的实验测量记录

θ_1	15°	30°	45°	60°	75°
θ_2					
$\sin \theta_1$					
$\sin \theta_2$					
$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}$					
n_i					
$\bar{n}$					

用图像法处理：作 $\sin \theta_1 - \sin \theta_2$ 图像，可知图线应为直线，其斜率即为玻璃的折射率。

请结合本实验收集的信息，分别用计算法和图像法计算出该玻璃的折射率。

家庭作业与活动

1. 如图 4-1-6 所示，宽度为 d 的单色平行光从玻璃射向玻璃和空气的分界面，若它能进入空气，则（ ）。

- A. 进入空气后光束变宽
B. 进入空气后光速变大
C. 进入空气后波长变长
D. 进入空气后光束宽度不变

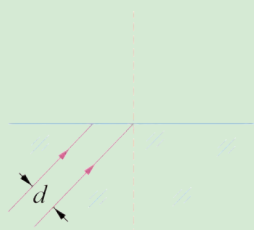


图 4-1-6

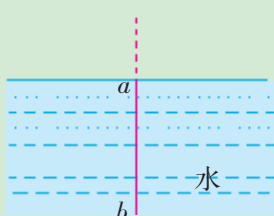


图 4-1-7

2. 发出白光的细线光源 ab （长度为 l_0 ）竖直放置，上端 a 恰好在水面以下，如图 4-1-7 所示。现考虑线光源 ab 发出的靠近水面法线（图中的虚线）的细光束经水面折射后所成的像。由于水对光有色散作用，若以 l_1 表示红光所成的像的长度，以 l_2 表示紫光所成的像的长度，则（ ）。

- A. $l_1 < l_2 < l_0$ B. $l_1 > l_2 > l_0$

- C. $l_2 > l_1 > l_0$ D. $l_2 < l_1 < l_0$

3. 如图 4-1-8 所示，有一贮油圆桶，其底面直径和桶高均为 d 。当桶内无油时，从某点 A 恰能看到桶底边缘上的某点 B ；当桶内油的深度等于桶高的一半时，在 A 点沿 AB 方向看去，能看到桶底上的 C 点， C 、 B 相距 $\frac{d}{4}$ ，由此可得出油的折射率 $n = \underline{\hspace{2cm}}$ ，光在油中传播的速度 $v = \underline{\hspace{2cm}}$ m/s（结果可用根式表示）。

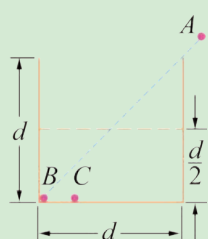


图 4-1-8

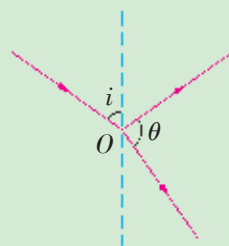


图 4-1-9

4. 如图 4-1-9 所示，光线以入射角 i 从空气射向折射率为 $\sqrt{2}$ 的透明介质表面。
- (1) 当入射角 $i = 45^\circ$ 时，求反射光线与折射光线的夹角 θ 。
- (2) 当入射角 i 为何值时，反射光线与折射光线间的夹角 $\theta = 90^\circ$ ？

4.2 全反射与光导纤维

光导纤维(图4-2-1)已经成为互联网传递信息的主要工具。那么,光导纤维是怎样传输光及相关信息的呢?这跟光的全反射有关。让我们先通过实验来探究光的全反射规律。

研究光的全反射现象

实验探究 探究光的全反射现象

如图4-2-2所示,将半圆形玻璃砖固定在光具盘上,观察激光光束从玻璃进入空气时的折射情况。

1. 请仔细观察,当入射角增大时,折射角如何变化?反射光和折射光的强度如何变化?
2. 当入射角增大到多大时,可看到折射光线沿着玻璃砖的直边传播?如果再增大入射角,你会看到什么现象?

由实验可知,当入射角增大到超过某一角度时,折射光会完全消失,只剩下反射光(图4-2-3)。这种现象叫做全反射(total reflection)。

分析与论证

上述实验中,玻璃与空气相比较,玻璃是光密介质,空气是光疏介质。当光从光密介质进入光疏介质时,有可能发生全反射现象。

当光从光疏介质进入光密介质时,会发生全反射现象吗?请用实验证实一下你的结论。

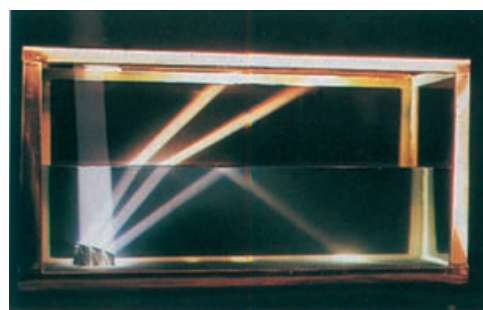
实验表明,光从玻璃进入空气时,折射角大于入射角。当入射角增大到一定程度时,折射角就会增大到 90° ,这时的入



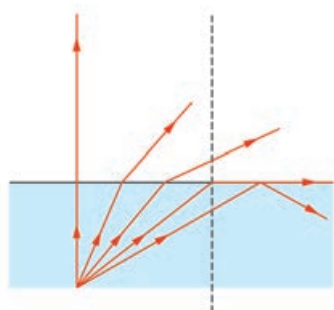
图 4-2-1 光导纤维



图 4-2-2 光的全反射实验



a



b

图 4-2-3 全反射现象

折射率较小的介质称为光疏介质,折射率较大的介质称为光密介质。光疏介质与光密介质是相对的。

已知介质的折射率，就可以确定光从这种介质射到空气（或真空）时的临界角。

水的临界角为 48.8° ，各种玻璃的临界角在 $32^\circ \sim 42^\circ$ ，金刚石的临界角为 24.5° 。

射角叫做**临界角**（critical angle）。

当光线从光密介质射入光疏介质时，如果入射角大于或等于临界角，就发生全反射现象。

光从不同的介质进入空气（或真空）时，发生全反射的临界角是不一样的。那么，怎样确定全反射的临界角呢？

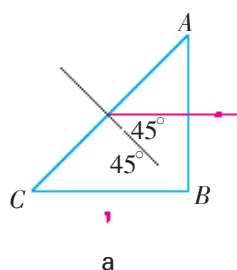
假设某种介质的折射率为 n ，当光从该介质进入空气（或真空），请证明，此时的临界角

$$C = \arcsin \frac{1}{n}$$

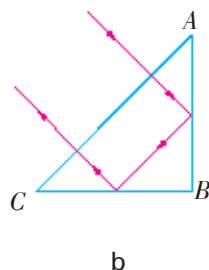
全反射现象的应用

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

发生全反射时，光的能量损失很小。这一优点被人们广泛利用。例如，把玻璃微珠掺入涂料，刷在各种交通标志上，夜间在汽车前灯的照射下，光几乎全部从玻璃微珠内反射后再折射出来，特别耀眼醒目。如图 4-2-4 所示的直角棱镜叫做全反射棱镜。图 4-2-4 a 表示入射光在 AC 面处发生全反射，不损失能量而改变了光路；图 4-2-4 b 表示入射的光在 AB 、 BC 面上发生全反射，最后使入射的光折返，自行车尾灯用的就是全反射棱镜（图 4-2-5）。



a



b

图 4-2-4 全反射棱镜



图 4-2-5 自行车的尾灯

工程上用激光测量距离时，常用全反射棱镜做靶。例如，“阿波罗”11 号的航天员把由 100 个全反射棱镜组成的 18 英寸方形靶（1 英寸 = 2.54 厘米）带到月球上，以用于测量月地距离。

光纤及其应用

光纤的原理

光导纤维（简称光纤）是一种新材料。每根光纤分内外两层，

内层纤芯的折射率为 1.8 左右,外面包层的折射率为 1.4 左右(图 4-2-6)。这样当光由内层射到内外层的界面时,入射角小于临界角的那些光会逸出纤维,而入射角大于临界角的光则会发生全反射,在界面上经多次全反射后从光纤的一端传到另一端,如图 4-2-7 所示。

取一根弯曲的细玻璃棒,一端插在激光笔的输出端,观察玻璃棒的另一端(图 4-2-8)。你会看见光传递过来吗?

光纤在医学上的应用

把许多光纤聚集成一束,保持排列位置不变,就可以传输图像信号。医学上用这种传像光纤束制成内窥镜(图 4-2-9),检查人体胃、肠、气管等器官的内部。实际的内窥镜装有两组光纤,一组用来把光传送到人体内,另一组用来把人体内的图像传送出来供医生观察(图 4-2-10)。利用光纤,还可以把激光导入人体内做肿瘤切除手术。

光纤通信

光纤通信是光纤技术最成功的应用之一。将载有声音、图像以及各种数字信号的激光从光纤的一端输入,激光就可以沿着光纤传到千里以外的另一端。在使用光纤通信之前,人们使用同轴电缆通信。同轴电缆单管每千米质量至少 200 kg,而每千米光纤的质量仅为 2.7×10^{-2} kg。通信用的光纤是由直径约几微米的多根或单根玻璃(或透明塑料)纤维组成的(图 4-2-11)。由几十根甚至几百根光纤聚集在一起组成的光缆具有强大的通信能力。现在,由光纤通信构成的信息高速公路已将全世界连接成互联互通的信息网络,使人类进入信息时代。

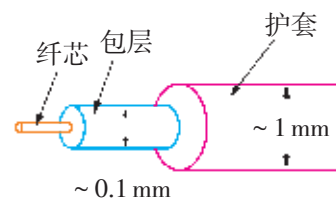


图 4-2-6 光纤的结构示意图

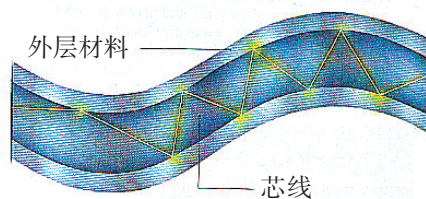


图 4-2-7 光纤的原理



图 4-2-8 激光沿弯曲的玻璃棒传播

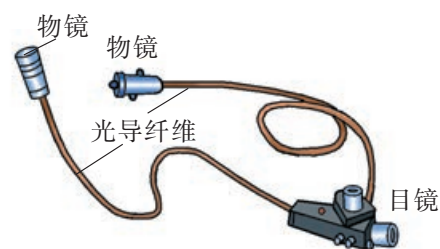


图 4-2-9 内窥镜



图 4-2-10 用光纤检查人体

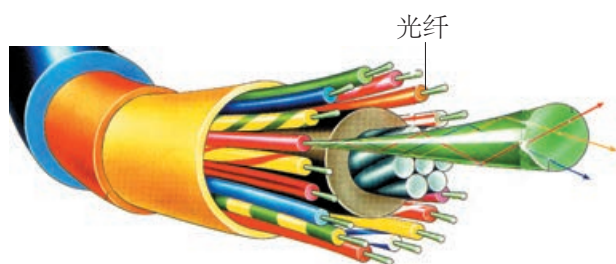


图 4-2-11 通信用的光纤

家庭作业与活动

1. 如图 4-2-12 所示, ABC 为一全反射棱镜, 棱镜对不同色光的折射率不同, 对红光的临界角为 42° , M 为一与 BC 边垂直的光屏。一束白光沿平行于 BC 的方向射向 AB 面, 经 AB 面折射后的光线又射向 BC 面, 则 ()。

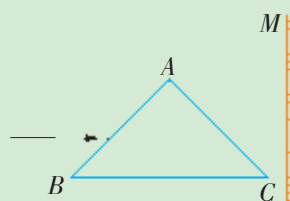


图 4-2-12

- A. BC 面将有色光射出
 B. 光屏 M 上会出现彩色光带且紫光在上
 C. 光屏 M 上会出现彩色光带且红光在上
 D. 将光屏与 BC 保持垂直地向右平移, 屏上彩色光带逐渐变宽
2. 如图 4-2-13 所示, 只含黄光和紫光的复色光束 PO , 从空气中沿半径方向射入玻璃半圆柱后, 被分成 OA 和 OB 两束光, 并分别沿着如图所示的两个方向射出, 则 ()。



图 4-2-13

3. 如图 4-2-14 所示, 有一个半导体砷化镓发光管, 竖直向上发出波长为 $0.9 \mu\text{m}$ 的红外线光, 发光区为直径 $AB = 3 \text{ mm}$ 的圆盘。发光面上覆盖着一个折射率 $n = 2.4$ 的半球形介质。要使发光器发出的全部光线在球面上不发生全反射, 则此介质球的半径至少应该多大?

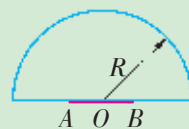


图 4-2-14

4.3 光的干涉

光是什么呢？这个问题很早就引起了人们的注意。科学家在长期的探索过程中,关于光的本性形成了两种学说,即光的“微粒说”和光的“波动说”。

17 世纪，牛顿支持光的微粒说，认为光是从光源发出的一种物质微粒，在均匀的介质中沿直线传播。光的微粒说在很长一段时间内占据了主导地位。直到 19 世纪，托马斯·杨和菲涅耳（A. Fresnel）率先在实验室里观察到无法用微粒说来解释光的干涉和衍射现象，光的波动说才得到普遍承认和迅速发展。

杨氏双缝干涉实验

干涉是波动的一个基本特征。我们从研究水波干涉时知道，两个频率相同、振动方向一致的波，在其相遇区域，会形成稳定的干涉图样。

1801 年，托马斯·杨做了著名的光的双缝干涉实验，证实了两束单色光叠加时，会产生像水波干涉那样的增强或减弱的现象，说明光具有波动性。现在我们用类似的方法来研究光的干涉现象。



托马斯·杨（Thomas. Young, 1773—1829），英国物理学家，最先用波动学说成功地解释了白光照射下薄膜颜色的由来，并用双缝显示了光的干涉现象。

实验探究 研究光的干涉现象

如图 4-3-1 所示为一台双缝干涉仪，是用于研究光的干涉现象的实验装置。用单色光照射双缝干涉仪上的双缝 S_1 和 S_2 ，通过测微目镜可以观察到两束光在屏上形成的一系列明暗相间的条纹（图 4-3-2），即干涉图样。

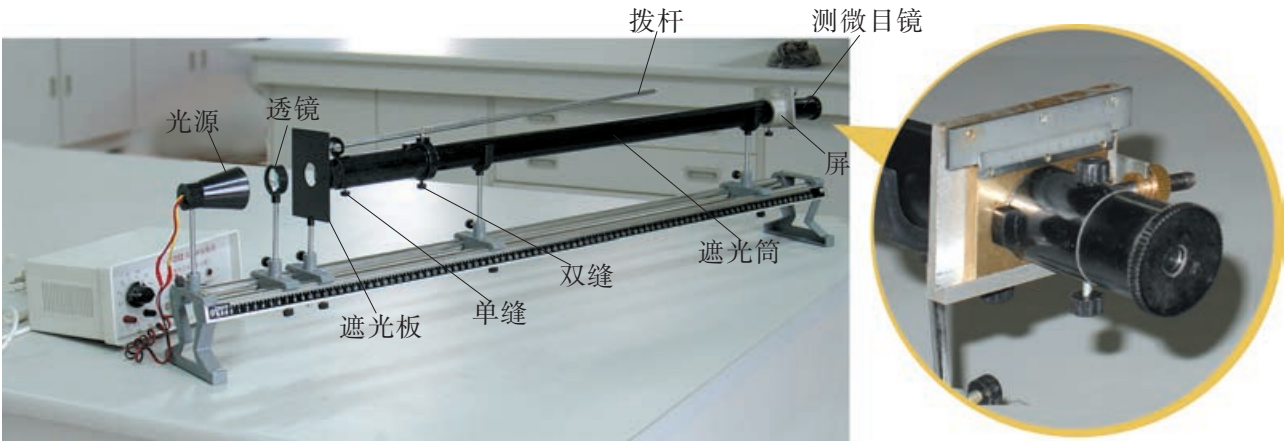


图 4-3-1 双缝干涉仪

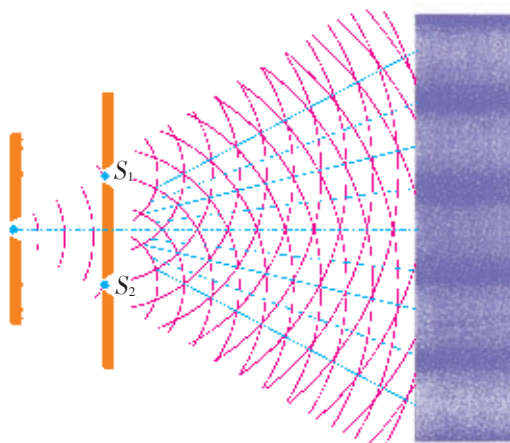


图 4-3-2 光的双缝干涉条纹示意图

分析与论证

怎样用光的波动性来解释光屏上出现的这一系列明暗相间的条纹呢？

要满足怎样的条件，光屏上才会出现明（或暗）条纹呢？

首先，在上述实验中，被单色光照亮的两个狭缝 S_1 和 S_2 ，相当于两个光源，其振动情况完全相同。这样的光源叫做相干光源。不是相干光源发出的光波，不可能出现干涉现象。

第二，我们来分析产生明暗条纹的条件。让我们考察图 4-3-3 中屏上的 P_0 点（ P_0 为从 S_1 、 S_2 连线的中点 O 在光屏上的投影）。由于 P_0 到 S_1 和 S_2 的距离相同，由 S_1 和 S_2 发出的两列光波经历的路程一样，这两列光波的波峰（或波谷）将同时到达 P_0 点，因而在 P_0 点总是波峰跟波峰叠加，或波谷跟波谷叠加（图 4-3-4 a），所以 P_0 点的光得到加强，出现一条亮条纹。

再考察在 P_0 点上方的某一点 P_1 。 P_1 点距 S_1 的距离要比距 S_2 近一些，由 S_1 和 S_2 发出的两列光波到达 P_1 点的路程不相等。

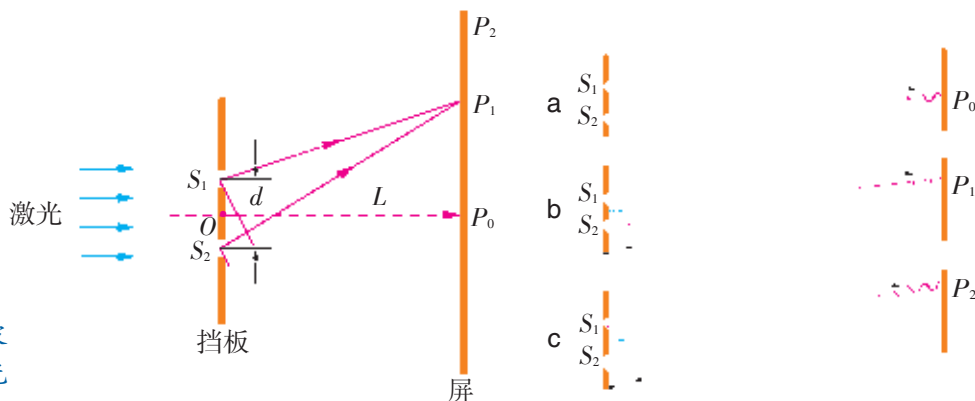


图 4-3-3 双缝干涉原理分析

图 4-3-4 两列光波的叠加

在真空或空气中，一列光波所传播的路程叫做光程；两列光波传播的路程之差叫做这两列光波的光程差。

两列光波的波峰（或波谷）就不一定能同时到达 P_1 点。当路程差（光程差） s 正好是半个波长（图 4-3-4 b）时，两列光波总是波峰跟波谷叠加，两列光波互相削弱，于是这里出现暗条纹。

思考与讨论

1. 如果两个相干光源发出的两列光波到达 P_2 点（图 4-3-4 c）的光程差正好等于波长的整数倍时，这里会出现什么条纹？为什么？

2. 如果两列光波到达某点的光程差正好等于半波长的奇数倍时，该点会出现怎样的条纹？为什么？

通过以上分析，请总结一下，屏上出现明（或暗）条纹的条件。

最后，让我们用不同颜色的单色光或白光做双缝干涉实验，在相同实验条件下（两缝间的距离 d 以及双缝到屏的距离 L 一定），可得到图 4-3-5 所示的实验结果。

请仔细观察这个实验结果，思考并回答下列问题：

1. 红光和蓝光的干涉条纹间距是否相同？哪个的间距大？为什么？

2. 用白光做实验时，中央的亮条纹是什么颜色？这是什么原因？

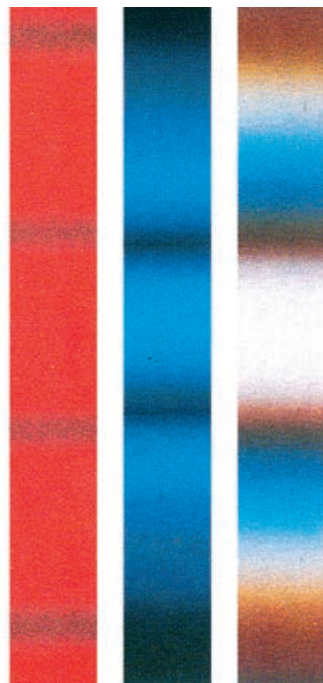


图 4-3-5 红光、蓝光和白光的干涉条纹

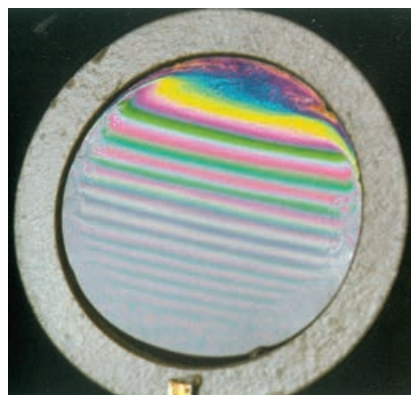


图 4-3-6 肥皂膜的彩色条纹

奇妙的薄膜干涉

将肥皂膜附着在竖直的铁丝圆环上，在阳光下会看到美丽的彩色条纹（图 4-3-6）。

请仔细观察：肥皂膜上的干涉条纹有什么特征？你知道产生彩色条纹的原因吗？

实验探究

研究肥皂膜上的干涉条纹

为了探究肥皂膜上产生彩色条纹的原因，我们先研究入射光是单色光的情况。

在酒精中溶解一些氯化钠，酒精灯焰会发出黄光。在铁丝圈上附着一层肥皂膜，放在酒精灯旁，膜上就会出现灯焰的像（图 4-3-7），像上出现了明暗相间的条纹。

1. 肥皂膜上怎么会出现灯焰的像呢？这个像有什么特点？

2. 怎样解释像上出现的明暗相间的条纹呢？

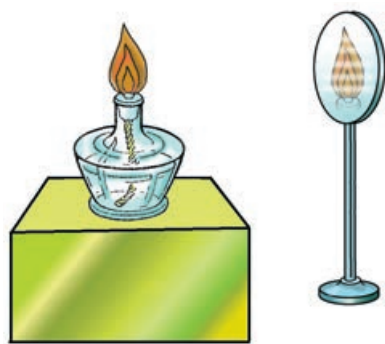


图 4-3-7 灯焰的像有明暗相间的条纹

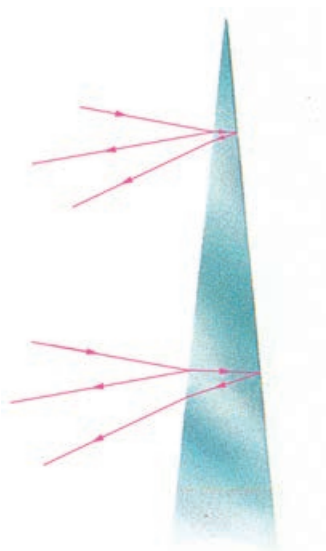


图 4-3-8 液膜前后两个面反射光的干涉

分析与论证

肥皂膜可以被看作是一个棱镜，液膜上的像是液膜前后两个面反射的光形成的。

如图 4-3-8 所示，液膜前后两个面反射的两列光波，是同一个光源发出的光波产生的，符合相干光的条件。液膜受重力作用，上方薄，下方厚。在膜上不同位置，膜上前两个面反射的两列光波的光程差不同。当光程差满足两列光波相互加强条件时，出现亮条纹；而满足相互削弱的条件时，则出现暗条纹。

当用白光照射肥皂膜时，在膜上不同位置，有些满足红光加强的条件，有些满足黄光加强的条件……于是便出现了彩色条纹。

我们常常看到肥皂泡和水面油膜上的彩色花纹，贝壳呈现的彩纹等都与光的干涉有关（图 4-3-9），均为两个面的反射光干涉的结果。

你还能举出一些生活中遇到的光的干涉现象吗？



图 4-3-9 贝壳呈现的彩色

家庭作业与活动

- 能产生干涉现象的两束光是（ ）。
 - 频率相同、振幅相同的两束光
 - 频率相同、相位差恒定的两束光
 - 两只完全相同的灯发出的光
 - 同一光源的两个发光部分发出的光
- 在白光照射下，双缝干涉图样的中央条纹为什么是白的？在其他各级亮条纹中，为什么红色条纹在外侧？
- 对于薄膜干涉，下列认识中正确的是（ ）。
 - 是薄膜前后两个表面反射回来的光叠加的结果
 - 暗纹出现的地方，两个表面反射的光在这里是波谷和波谷相遇叠加
 - 可以在入射光的同一侧观察薄膜干涉条纹
 - 用单色光做光源时，出现平行的明暗条纹，说明整个膜的厚度相同
- 无色的肥皂液，吹出的肥皂泡却为什么是彩色的？
- 取两块平板玻璃，用手指把它们紧紧捏在一起，会从玻璃板面上看到许多彩色花纹。改变用力的大小，花纹的颜色和形状也随之改变。请试一试，并思考产生这一现象的原因。

4.4 用双缝干涉仪测量光的波长

1801年,托马斯·杨虽然成功地做了证实光的波动说的双缝干涉实验,但并没有被科学界所承认。有一位牛顿微粒学说派的学术权威说,托马斯·杨的实验“没有任何价值”、“称不上实验”,干涉原理“荒唐”和“不合逻辑”……托马斯·杨并没有因这些攻击而气馁,仍坚持他的研究,并于1803年,第一次用这个实验测出了光波的波长,再次肯定了光的波动性。

本节将采用与托马斯·杨类似的实验方法,测量光波的波长。

学习使用双缝干涉仪

图4-3-1是用于测量光的波长的双缝干涉仪。请先仔细对照下面的说明书弄清楚它的结构和使用方法。

双缝干涉仪使用说明书(摘要)

一、结构

双缝干涉仪结构如图4-3-1所示。遮光筒直径约6 cm,长约1 m。测微目镜置于屏后,用于测量干涉条纹间的距离。

二、原理

光源发出的光通过滤色片成为单色光,然后通过单缝成为线光源,经双缝便产生稳定的干涉图样,可以在屏上看到条纹。由于双缝间的距离 d 已知,双缝到屏的距离 L 可以用米尺测出,相邻两条亮(暗)纹中心间的距离 Δx 可用测微目镜测出,根据公式 $\lambda = \frac{d \Delta x}{L}$,便可计算出该单色光的波长。

三、调整共轴

把遮光筒水平放在光具座上,筒的一端装有双缝,另一端装有毛玻璃屏。取下单缝和双缝,打开光源,调节光源的高度和方向,使光源发出的光能够沿着遮光筒的轴线照亮屏。然后放好单缝和双缝,单

缝和双缝间的距离为5~10 cm,要注意使单缝与双缝相互平行,缝的中心大致位于遮光筒的轴线上(这个调整过程称为调节共轴)。经过上述调整,就可以看到光的干涉图样了。

四、测微目镜的使用方法

测微目镜如图4-3-1所示。它由刻度板、目镜、手轮等构成。转动手轮,刻度板会左右移动。

1. 测量时,应使刻度板中心刻线对准视场中某条纹的中心(图4-4-1 a),记下此时手轮上的示数。

2. 转动手轮,使刻度板中心刻线对准另一条纹的中心,记下此时手轮上的示数。两次读数之差就是两条纹间的距离。由于条纹间距 Δx 很小,为了减小测量误差,可采用测出 n 条亮(暗)纹间的距离 s (图4-4-1 b),则相邻两条亮(暗)纹间的距离 $\Delta x = \frac{s}{n-1}$ 。

3. 由于测微目镜的螺杆存在间隙, 手轮在向左或向右转时对准同一个目标, 读数会稍有差异。为了避免这种差异, 在测

量两点间距离时, 应该先移动过头, 再回转动, 在同一移动方向下读数。

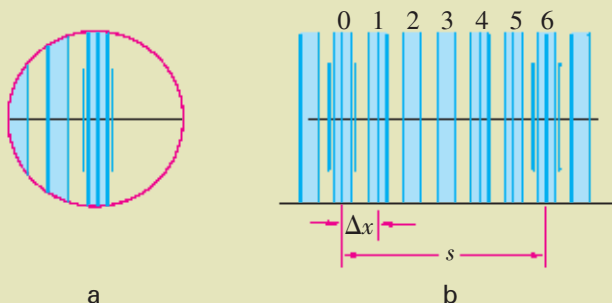


图 4-4-1 测量条纹的间距

测量波长公式的推导

分析与论证

说明书的“原理”部分中提到的公式 $\lambda = \frac{d\Delta x}{L}$, 是怎样得到的呢? 下面让我们来进行推导。

如图 4-4-2 所示, 双缝间的距离为 d , 取 P_0 为坐标原点, 屏上任一点 P 的坐标为 x , 从狭缝 S_1 到 P 的距离 $S_1P = L_1$, 从 S_2 到 P 的距离 $S_2P = L_2$ 。由勾股定理可得

$$L_1^2 = L^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2 \quad (1)$$

$$L_2^2 = L^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2 \quad (2)$$

(2) 式减 (1) 式, 得

$$(L_2 - L_1)(L_2 + L_1) = 2dx$$

$L_2 - L_1$ 即两列光波的光程差 ΔL 。

当屏离双缝较远、 P 点离 P_0 点较近时, 满足条件 $L \gg d$ 、 $L \gg x$, 则 $L_1 + L_2 \approx 2L$, 上式成为

$$\Delta L \approx \frac{dx}{L}$$

于是干涉条纹的坐标为

$$x = \frac{L}{d} \Delta L$$

当 $\Delta L = k\lambda$ ($k = 0, 1, 2, 3, \dots$) 时, 屏上满足 $x = \pm k \frac{L}{d} \lambda$ 的

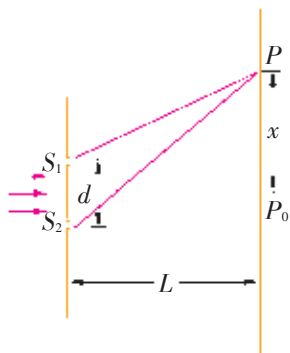


图 4-4-2 推导波长公式示意图

地方出现亮条纹。

$k = 0$ 时, $x = 0$, 为中央亮纹; $k = 1, 2, 3, \dots$ 时, 分别为中央亮纹两边的第 1 条、第 2 条、第 3 条……亮纹。

当 $\Delta L = (2k-1)\frac{\lambda}{2}$ ($k = 1, 2, 3, \dots$) 时, 屏上满足下述条件,
 $x = \pm (2k-1)\frac{L}{d} \cdot \frac{\lambda}{2}$ 的地方出现暗条纹。

当 $k = 1, 2, 3, \dots$ 时, 分别为中央亮纹两边的第 1 条、第 2 条、第 3 条……暗纹。

相邻两条亮条纹 (暗条纹) 中心之间的距离是

$$\Delta x = \frac{L}{d}\lambda$$



学生必做实验 用双缝干涉实验测量光的波长

设计实验

根据理论推出的波长公式 $\lambda = \frac{d\Delta x}{L}$ 中, 双缝间的距离 d 为已知, 双缝到屏的距离 L 可用米尺测量, 相邻两条亮条纹 (或暗条纹) 中心间的距离 Δx 可用测微目镜测出, 代入波长公式便可计算出该单色光的波长。

思考讨论

1. 根据获得的实验器材, 测算波长的公式中, 哪些是可以改变的? 哪些是难以改变的?
2. 实验过程中应记录哪些数据?

进行实验与收集证据

1. 安装器材: 如图 4-4-3 所示, 在光具座上依次安装白炽灯、滤光片、单缝、双缝干涉仪 (遮光筒: 一端装双缝, 另一端装毛玻璃屏)。

2. 调整共轴: 取下单缝和双缝, 打开光源, 调节光源的高度和方向, 使光源发出的光能够沿着遮光筒的轴线把屏照

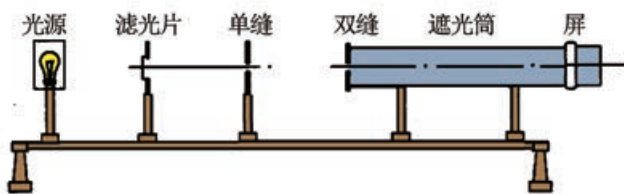


图 4-4-3 双缝干涉实验装置示意图

亮。然后安放单缝和双缝，注意单缝和双缝相互平行，间距为 5~10 cm，缝的中心大致位于遮光筒的轴线上。

3. 用测微目镜测出 n 条亮（暗）纹间的距离 s ，则相邻两条亮（暗）纹间的距离 $\Delta x = \frac{s}{n-1}$ 。

4. 多测几次，取其平均值，得出所测单色光的波长。

5. 运用同样的方法，选用两种不同颜色的滤光片，测量相应单色光的波长。

实验时，选用几种不同颜色的滤光片，测定相应的单色光的波长。重复几次实验。请自行设计表格并做好记录。

分析论证

请比较分析用不同颜色的滤光片所得到的实验数据，在忽略误差的情况下，可以得到怎样的实验结论？

可见，不同色光的波长不同，相应干涉条纹的间距也不同。白光是由多种色光组成的，所以白光的干涉条纹是彩色的。

家庭作业与活动

1. 在光的双缝干涉实验中，下列说法中正确的是（ ）。

- A. 若使双缝间距离变小，则条纹间隔变宽
- B. 若使屏与双缝间距离变小，则条纹间隔变宽
- C. 若将入射光由绿光改为红光，则条纹间隔变宽
- D. 若将入射光由绿光改为紫光，则条纹间隔变宽

2. 在杨氏干涉实验中，波长为 632 nm 的激光射在间距为 0.02 cm 的双缝上。求距缝 180 cm

处光屏上所形成的干涉条纹的间距。

3. 若双缝的间距为 0.45 cm，距缝 120 cm 的光屏上所形成的干涉条纹的间距为 0.15 mm。求光源的波长并说明是什么颜色的光。

4. 使低气压水银弧光灯所发出的光照射间距为 0.4 mm 的双缝，在离开双缝 1.5 m 远的屏幕上得到一组干涉条纹，从中央往外数第 1 条和第 5 条暗条纹之间的距离为 8.4 mm。求灯所发出的光的波长。

4.5 光的衍射

研究光的衍射现象

水波能绕过障碍物发生衍射，光是电磁波，在一定条件下也能看到光的衍射现象。

实验探究

观察光的衍射现象

1. 将双缝干涉仪上的双缝换成单缝，用测微目镜观察屏上的图样。
2. 随着单缝由宽变窄，亮线发生怎样的变化？你能看到如图 4-5-1 所示的情况吗？这种变化说明什么？
3. 单缝衍射图样的中央亮条纹与两侧亮条纹之间的情况，与光的干涉图样有什么不同？

光在传播过程中遇到障碍物时，绕过障碍物偏离直线传播的现象，叫做光的衍射 (diffraction) 现象。当孔小到一定程度时，光通过小孔也会发生衍射现象。图 4-5-2 是在实验中拍摄到的红光的圆孔衍射照片。

通过以上实验，请总结一下，光产生明显衍射现象的条件是什么？

当缝或孔以及物体的宽度远大于入射光的波长时，衍射现象不明显，可以认为光沿直线传播。在很多情况下，由于障碍物、摄影器材孔径都远大于光的波长，因此较难看到光的衍射现象。

下面用惠更斯原理解释光的衍射现象。

分析与论证

在上一节中，我们用光波的叠加分析了双缝干涉图样。光的衍射图样也是光波叠加的结果。在光的单缝和圆孔衍射图样中，都有一些亮条纹，这是来自单缝（或圆孔）的光波波面上不同点的子波叠加后加强的结果；暗条纹是子波叠加后削弱所致。因此，从本质上讲，衍射和干涉并没有区别，但一般来说，人们常把几个分立光束的相干叠加叫做干涉；而把波面无穷多个子波的相干叠加称为衍射。例如，双缝干涉是来自两个缝的光波的相干叠加；单缝衍射是来自单缝波面上无穷多个子波的相干叠加。

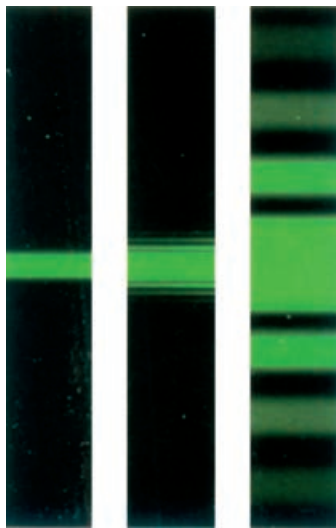


图 4-5-1 单缝由宽变窄时屏上的图样变化

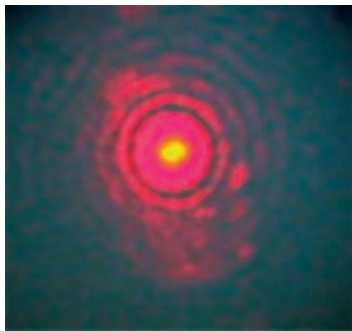


图 4-5-2 红光的圆孔衍射照片

身边的光衍射现象

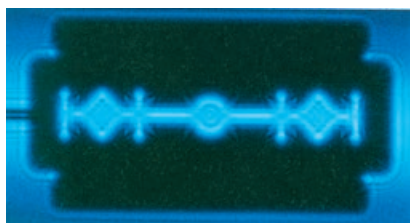


图 4-5-3 蓝光经过刀片边缘时的衍射

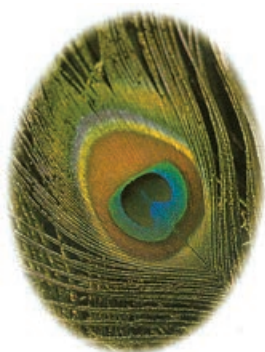


图 4-5-4 孔雀羽毛上的衍射现象

在日常生活中，我们也有机会看到光的衍射现象。图 4-5-3 是蓝光经过刀片的边缘时所发生的衍射现象；雨天的晚上，透过眼镜片上的水滴看路灯，水滴的边缘就有衍射条纹。夜观星空，月亮、行星和恒星按光的直线传播规律在我们视网膜上成像，如果我们眯缝着眼睛去观察它们时，都会在视网膜上形成衍射斑。

请在夜晚观察星空，分析当我们眯缝着眼睛时看到的星球是什么样的。

孔雀的羽毛为什么会色彩斑斓？原因是孔雀羽毛上有很多细缝，在自然光（各种颜色的光的混合）的照射下，就产生了衍射现象（图 4-5-4）。

你还能列举生活中光的衍射的事例吗？

家庭作业与活动

- 把游标卡尺的两个刀口充分靠近，通过由此形成的狭缝观看发光的日光灯，记录所看到的花样。
- 下列现象中属于光的衍射现象的是（ ）。
 - 太阳光通过透明的装满水的金鱼缸后在地面上形成彩色光带
 - 通过遮光板上的小孔观察远处明亮的电灯，看到电灯周围有一圈彩色光环
 - 油滴滴在潮湿水泥路面上形成油膜，在阳光照射下油膜上有一圈圈的彩色光环
 - 吹出的肥皂泡上出现彩色条纹
- 某研究性学习小组用激光束照射圆孔和不透明圆板后，分别得到如图 4-5-5 所示的衍射图样，据此可以判断出（ ）。
 - a、b 图都是光线射到圆孔后的衍射图样，a

图中孔的直径较大

- a、b 图都是光线射到圆板后的衍射图样，b 图中板的直径较大
- a 图是光线射到圆孔后的衍射图样，b 图是光线射到圆板后的衍射图样
- b 图是光线射到圆孔后的衍射图样，a 图是光线射到圆板后的衍射图样

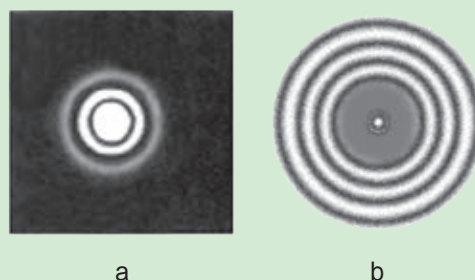


图 4-5-5

4.6 光的偏振与立体电影

你看过立体电影吗？当你戴上一副特制的眼镜，开始欣赏立体电影时，隆隆的火车向你驶来，飞机从头顶呼啸而过……



图 4-6-1 立体电影的视觉效果



图 4-6-2 戴上特制的眼镜看立体电影

看立体电影时为什么要戴上一副特制的眼镜？这种特制的眼镜到底有什么作用？

这些问题都与光的偏振有关。

感知光的偏振现象

实验探究

透过偏振片观察图形

取两副由偏振片制作的太阳镜（也可以取两块偏振片），观看书或杂志上的彩图。直接观察彩图和透过偏振片观察有什么不同？

如图 4-6-3 所示，将两块偏振片叠放在一起，其中的一块不动，另一块旋转，观察图案的变化情况。

你发现有看不到图案的情况吗？



图 4-6-3 透过偏振片看到的图案

探究偏振片的原理

分析与论证

用偏振片观察物体时，为什么会发生上述现象呢？这与光是横波有关。为此，我们先研究绳波通过狭缝的情况。

绳波是横波。如果狭缝与振动方向平行，则振动可以通过狭缝继续向前传播；如果狭缝与振动方向垂直，振动就被狭缝挡住，不能向前传播（图 4-6-4 a）。狭缝的方向叫做透振方向。

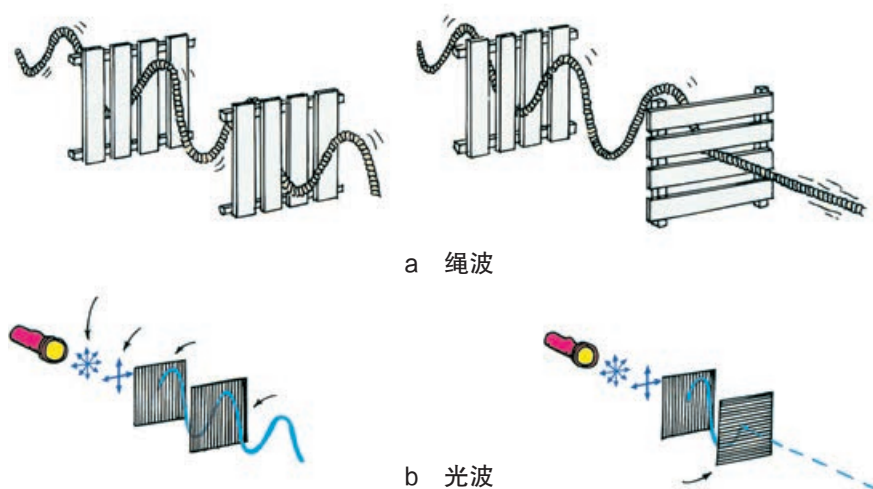


图 4-6-4 横波通过狭缝的情况

请思考：若用细软的长条弹簧穿过带有狭缝的木板，用手前后推拉弹簧，形成纵波，则该波能不能通过狭缝继续向前传播？

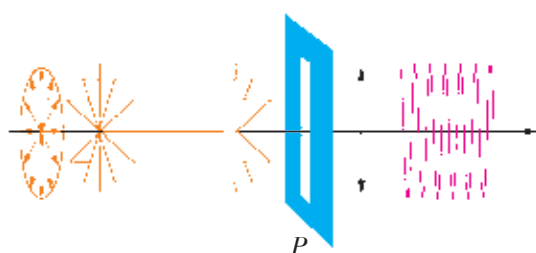
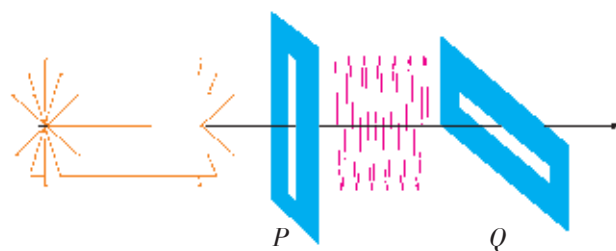
对于光来说，偏振片相当于狭缝，能让光通过的振动方向是确定的。光波与绳波相类似（图 4-6-4 b），光能通过与其振动方向相同的狭缝，而不能通过与其振动方向相垂直的狭缝。由此可知，光是一种横波。

类比是常用的思维方法之一。这里用绳波与光波类比，说明了光波是横波。

太阳、电灯等普通光源发出的光，包含着在垂直于传播方向沿一切方向上振动的光，而且沿着各个方向振动的光波的强度都相同，这种光叫做自然光。如图 4-6-5 所示，自然光传播到偏振片 P 时，只有跟偏振片的透振方向相同的光振动才可以透过。这种只有沿特定方向振动的光叫做偏振光（polarized light）。如图 4-6-6 所示，偏振片 P 和 Q 的偏振方向互相垂直，当从 P 出来的偏振光传播到偏振片 Q ，由于偏振光的振动方向跟偏振片 Q 的透振方向垂直，偏振光就不能通过了。

在上述实验中，当两块偏振片的透振方向相互垂直时，我们透过这两片偏振片就看不到书上的图案了。

除自然光外，我们通常看到的绝大部分光都是不同程度的偏振光。自然光在玻璃、水面、木质桌面等表面反射时，反射

图 4-6-5 自然光通过偏振片 P 成为偏振光图 4-6-6 偏振光不能通过偏振片 Q

光和折射光都是偏振光。

请通过偏振片观察自然光和经玻璃表面反射来的自然光(灯光或日光)，转动偏振片，你观察到的明暗变化有什么不同？为什么？

用照相机拍摄水池中的游鱼时，由于水面反射光的干扰，影像会不清楚。在镜头前装一片偏振片，并使它的透射方向跟反射光的偏振方向垂直，影像就变得清晰。请试一试。

偏振现象在生产生活中的应用

立体电影

观察物体时，左右两眼得到的外界图像是有差别的，这叫做双眼视差。人们观察物体时，产生立体感的主要原因是两眼的视差。

在拍摄立体电影时，用左右并排的两个镜头（相当于人的两只眼睛）同时拍摄，两组胶片上的景物也略有差别。放映时，用两台放映机同步放映这两组胶片（图 4-6-7），且在两个放映镜头前各装一块偏振片，并使它们的透振方向互相垂直。这样，就形成两束振动方向相互垂直的偏振光。这两束偏振光投射到银幕上再反射出来，偏振方向仍然相互垂直。

观看立体电影时，观众戴的偏振眼镜是一对透振方向相互垂直的偏振片。每只眼睛只看到相应的偏振光图像，这样就会像直接观看物体一样产生立体感。这就是立体电影的原理（图 4-6-8）。

请思考：假如你不戴偏振眼镜看立体电影，会看到什么样的图像？戴上偏振眼镜但闭上一只眼睛看还能有立体效果吗？

以上介绍的立体电影亦称为 3D 电影。4D 电影是在 3D 电影的基础上，加上观众周边环境的各种特效，称之为 4D。环境特效一般指闪电、刮风、下雨、降雪、烟雾、泡泡、振动等的多项模拟。

液晶显示屏

许多电视机、广告牌、电脑、手机、数字显示式电子手表、电子计算器都用液晶显示屏。液晶显示的原理涉及液晶的特性和光的偏振知识，我们将在后续课程中进一步学习。

液晶显示屏分辨率高、寿命长、功耗低、无辐射，因而受到人们的青睐。



图 4-6-7 两台放映机同步放映

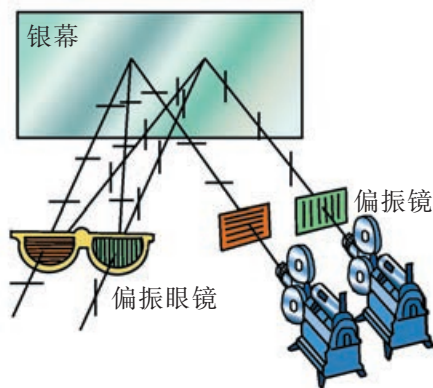


图 4-6-8 立体电影的原理



图 4-6-9 液晶显示屏

家庭作业与活动

1. 汽车在夜间行驶时，遇到迎面开来的汽车，对面车灯射来的亮光常常使驾驶员看不清路面，容易发生交通事故。请应用光的偏振知识解决这个问题。
2. 如图 4-6-10 所示，让太阳光或白炽灯光通过偏振片 P 和 Q ，以光的传播方向为轴旋转偏振片 P 或 Q ，可以看到透射光的强度会发生变化，这是光的偏振现象。这个实验表明（ ）。
 - A. 光是电磁波
 - B. 光是一种横波
 - C. 光是一种纵波

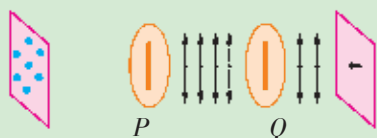


图 4-6-10

3. 如图 4-6-11 所示，电灯 S 发出的光先后经过偏振片 A 和 B ，人眼在图中 P 处迎着光入射方向看，却看不到亮光，则（ ）。
 - A. 图中 a 光是偏振光
 - B. 图中 b 光是偏振光
 - C. 将偏振片 B 转过 180° ，将在 P 处看到光

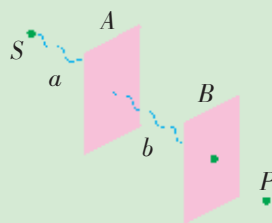


图 4-6-11

- D. 将偏振片 A 转过 90° ，将在 P 处看到光
4. 图 4-6-12 是观察光的偏振现象的示意图。其中第一片偏振片 A 叫做起偏器，其作用是 _____；第二片偏振片 B 叫做检偏器，其作用是 _____。当 B 相对于 A 转动时，会看到透射光强度 _____（选填“不变”或“变化”）。

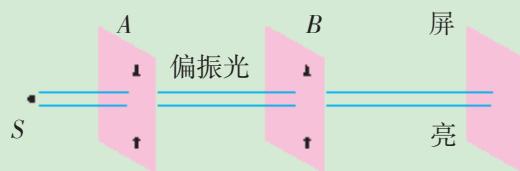


图 4-6-12

5. 透过一片偏振片观察电灯、蜡烛、月亮、反光的黑板，当以入射光线为轴转动偏振片时，请说说看到的现象有何不同。

4.7 激光

激光 (laser) 早已进入我们生活的方方面面。计算机读取光盘上的信息, 我们打长途电话、听 CD 唱片、看 DVD 电影、制作全息图像防伪标志 (图 4-7-1) 等, 都用到了激光。商店里每一种商品上都有一组按一定规则排列的粗细不同的黑色线条, 这就是此商品的条码 (图 4-7-2)。售货员用条码扫描仪发出的激光对着条码扫一下, 由于黑条、空白条对激光的反射能力不同, 这一商品条码所反射的激光就把其信息输入电脑, 商品的名称、价格就显示在收银机的屏幕上了。

激光的特性

自 20 世纪 60 年代发明了第一台红宝石激光器以来, 各种各样的激光器 (图 4-7-3) 相继问世, 它们可以产生不同功率、不同波长的激光。激光有哪些特性呢?

实验探究

研究激光的特性

取激光笔一支、手电筒一个。观察比较普通光和激光经三棱镜折射后的传播情况。

激光与手电筒的光柱在传播方向、颜色、亮度等方面有什么不同?

根据以上实验观察, 你能总结出激光有哪些特点吗?

激光的第一个特点是单色性好、相干性好。所谓单色性好, 就是频率单一。频率严格单一、且在同一个方向上偏振的光能产生稳定的干涉现象。激光是一种很好的相干光。

激光的第二个特点是方向性好, 或者说平行度好。激光在传播很远的距离后仍不会像普通光那样发散得很开。激光的发散角只有 0.06° 。

激光的第三个特点是亮度高, 它可以在很小的空间和很短的时间内聚集起大到难以想象的能量。如果把强大的激光束会聚起来照射在物体上, 其功率密度将达到 10^{24} W/cm^2 , 是太阳表面功率密度的 10^{14} 倍! 它可以使物体的被照部分在不到 10^{-3} s 的时间内产生几千万度的高温, 最难熔化的物质也会瞬间化成气体。



图 4-7-1 激光防伪标志



图 4-7-2 商品的条码

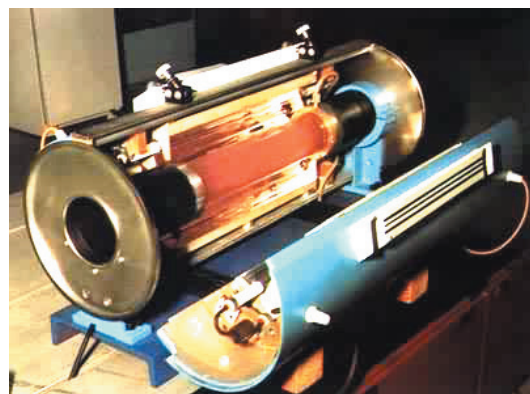


图 4-7-3 激光器

注意：严禁将激光直接照射人眼！

激光的应用

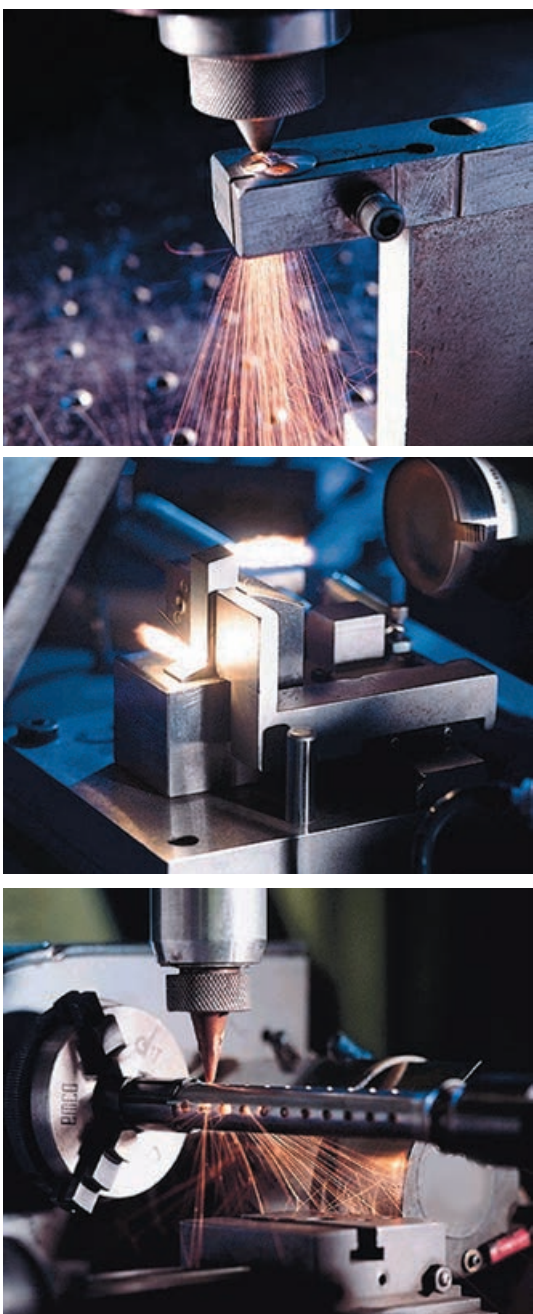


图 4-7-4 激光在工业方面的应用

由于激光是很好的相干光，因此可在各种干涉仪中作为相干光源，用于长度、频率、转角等物理量的精密计量，并用来记录和再现全息照相。

由于激光能像无线电波那样进行调制，因此可以用来传递信息。光纤通信就是用激光在光导纤维中传递信息的技术。具有色彩鲜明、尺寸可调、摆放灵活、节能环保、寿命长等特点的激光电视也将问世。

由于激光平行度好，可以会聚到很小的一点上，因此可用于读出 VCD 机、CD 机或计算机光盘上记录的信息。由于会聚点很小，光盘记录信息的密度就很高。光盘技术是利用激光和计算机存储信息的新技术。

激光平行度好的特点还使它可以用来进行精确的测距。对准目标发出一个极短的激光脉冲，测量发射脉冲和收到回波的时间间隔，就可以求出发射点与目标的距离。用于工程测量的激光经纬仪已经普及。在军事上，激光的这个特点可用于反坦克导弹、精确炸弹的制导。激光测距雷达不仅可以测量距离，而且能根据多普勒效应测出目标的运动速度。激光的准直特点可用于开挖隧道，组装大型客机和监测水坝、桥梁的平直度。

激光的亮度高，可以用来切割布料、汽车钢板等各种材料（图 4-7-4），可以对金属表面进行热处理，焊接金属、陶瓷等难熔材料，以及在宝石轴承等硬质材料上打孔。医学上可以用激光作“光刀”来切开皮肤、切除肿瘤，其好处是出血少、不易感染；还可以用激光“焊接”剥落的视网膜、修正角膜和治疗近视眼等。目前，我国及一些发达国家正在用最强大的激光器试验激光核聚变。

农业专家用激光照射种子；物理学家用激光探索物质的奥秘；化学家把激光用于控制化学反应，进行化学分析，甚至还可以裁剪分子；核科学家则用激光分离铀的同位素。

多学一点

全息照相

早在 1948 年，英国物理学家伽柏（D. Gabor）就提出了全息照相的原理。1960 年以后出现了激光，它相干性好、强度大，自然成为全息照相的十分理想的光源，全息技术由此进入一个新阶段，发展非常迅速。

全息照相的工作原理如图 4-7-5 所示。一束激光通过分光镜分成两束光。一束光经透镜扩束照射到物体上，经物体反射

再照射到感光底片上,这部分光叫做物光。另一束光直接投射到感光底片上,这部分光叫做参考光。物光和参考光在感光片上叠加时形成干涉条纹,被摄物体反射光中的全部信息以不同浓黑程度和不同疏密分布的干涉条纹形式记录下来。

全息照片和普通照片截然不同,上面并没有像普通照片那样的具体景象,只有通过高倍显微镜才能看到上面有浓黑程度不同、疏密程度不同的干涉条纹。

要看到被摄物体的像,必须用一束与参考光的波长和传播方向完全相同的光束照射全息照片才行(这一光束叫做再现光)。再现光照到全息照片上,就会发生衍射,再现出原来的物光波。这样,在拍摄时放置物体的地方就能看到与原物形象完全一样的立体虚像,有视差,有纵深感。观察者从不同角度观察时,就好像面对原物一样,可以看到它不同的侧面,甚至在一个角度被遮住的东西也可以在另一个角度看到它。

有趣的是,如果取全息照片的一个碎片,用它仍能看到原物的全部形象,只是观察者要多移动(图4-7-6)。全息照相用激光拍摄,用激光再现。

若用白光去照射全息照片,则出现一片彩虹似的模糊光。图4-7-1所示的防伪标志就是彩虹全息照片,它在自然光照射下会再现所拍摄物体的形象。

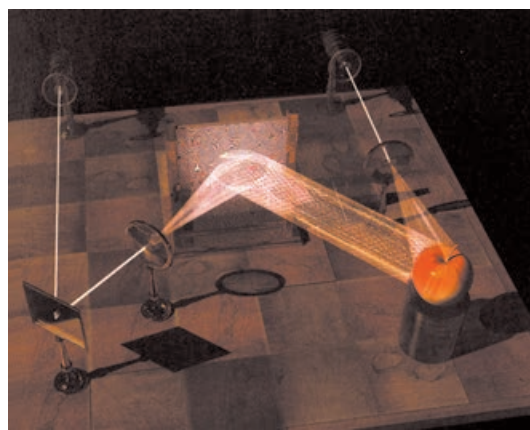


图 4-7-5 全息照相原理

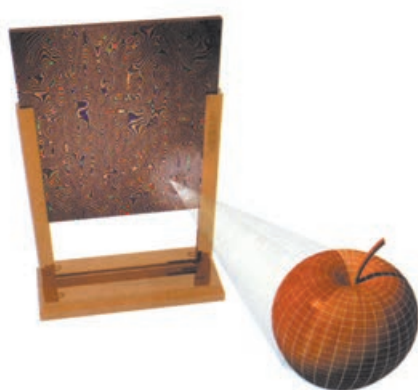


图 4-7-6 全息影像再现

家庭作业与活动

1. 纳米技术是跨世纪的新技术,将激光束的宽度集中到纳米范围内,可修复人体已损坏的器官,可对 DNA 分子进行超微型基因修复。在该技术中,人们主要利用了激光的()。
A. 单色性 B. 单向性
C. 高亮度 D. 杀菌作用
2. 脉冲激光器的耗电功率为 $2 \times 10^3 \text{ W}$,每秒输出 10 个光脉冲,每个脉冲持续的时间为 $1.0 \times 10^{-8} \text{ s}$,携带的能量为 0.2 J,则每个脉冲的功率为 _____ W,该激光器将电能转化为激光能量的效率为 _____。

第4章 家庭作业与活动

A 组

1. 下列在生活中常常看到的自然现象，分别属于什么光学现象？

- (1) 漂浮在水面上的油花呈现彩色；
- (2) 透过尼龙纱巾看发光的电灯，可看到比纱巾方孔大的彩色网络；
- (3) 夏天早晨草地上露水在阳光照射下出现彩色光点。

2. 如图 4-A-1 所示是一种自行车塑料尾灯的截面图，这种尾灯中并没有灯泡，夜间行驶时，后方来的汽车灯光照到这种尾灯上时，尾灯就变得十分明亮，引人注目。这种灯的原理是利用了（ ）。

- A. 光的全反射 B. 光的折射
C. 光的色散 D. 光的干涉



图 4-A-1

3. 雨后公路的积水上漂着薄薄的油层，看上去有许多彩色花纹，其中有一条绿色花纹与一条蓝色花纹相邻。在这两条花纹处，哪里的油层更薄些？为什么？
4. 在双缝干涉实验中，如果将其中一条缝遮住，那么，在屏上看到的情况是（ ）。
- A. 只剩下一条亮纹
B. 仍有原来的干涉条纹，但亮度变暗
C. 有明暗相间的条纹，但中央亮纹亮且宽，其余亮纹亮度迅速减弱
D. 有明暗相间的条纹，但宽度相同，条纹变窄
5. 下列对衍射现象的描述中正确的是（ ）。
- A. 用白光做衍射实验时，得到的亮纹是彩色的

- B. 刮胡须的刀片的影子边缘模糊不清
C. 用圆屏作障碍物，影的中心全是暗斑
D. 窄缝衍射图样的中心条纹最亮、最宽

6. 当戴上偏振眼镜观察水面时，能够清楚地看到水中的游鱼，试解释其中的道理。

7. 在图 4-A-2 中，人眼隔着偏振片 B、A 去看一只发光的电灯泡 S，一点透射光都看不到。那么，下列说法中正确的是（ ）。

- A. 使 A 和 B 同时转过 90° ，仍然一点光都看不到
B. 仅使 B 转过 90° 过程中，看到光先变亮后变暗
C. 仅使 B 转过 90° 过程中，看到光逐渐变亮
D. 仅使 A 转动时，始终看不到透射光

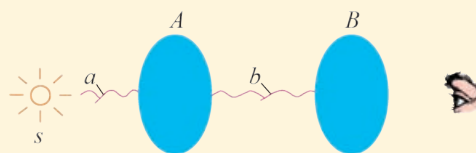


图 4-A-2

8. 请说说激光与普通光相比有哪些特点，举一些激光应用的实例。

B 组

1. 某些特定环境下照相时，常在照相机镜头前装一片偏振滤光片使景像清晰，关于其原理，下列说法中正确的是（ ）。

- A. 增强透射光的强度
B. 减弱所拍摄景物周围反射光的强度
C. 减弱透射光的强度
D. 增强所拍摄景物周围反射光的强度

2. 如图 4-B-1 所示，AB 为一长 $L = 30 \text{ km}$ 的光导纤维，一束光线从端面 A 射入，在侧面发生全反射，最后从 B 端面射出。已知光导纤维的折射率 $n = 1.35$ ，光线从纤维内侧面射向外射出时，临界角的正弦值为 0.9。设在侧面发生全反射

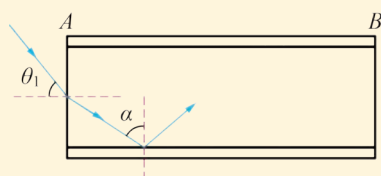


图 4-B-1

的光线从 A 端传播到 B 端所需时间为 t , 求 t 的最小值和最大值。

3. 在测量玻璃折射率的实验中:

(1) 某同学做实验插针的步骤如下:

- 在表示入射光线的 AO 上插上大头针 P_1 和 P_2 ;
- 通过玻璃砖观察 P_1 和 P_2 , 调整视线, 直到 P_1 的像被 P_2 的像挡住;
- 在观察一侧插上大头针 P_3 和 P_4 , 并记下 P_3 和 P_4 的位置。

这位同学在教学中的重要疏漏是_____。

- (2) 以通过 $P_1 P_2$ 的直线与玻璃砖的交点 O 为圆心, 以某一适当长度 R 为半径画圆。与 OA 交于 P , 与 OO' 的延长线交于 Q , 从 P 和 Q 分别作玻璃砖界面的法线 NN' 的垂线, P' 和 Q' 分别为垂足, 如图 4-B-2 所示, 用刻度尺量得 $PP' = 45 \text{ mm}$, $QQ' = 30 \text{ mm}$ 。则玻璃砖的折射率的表达式为_____, 折射率的值为_____。

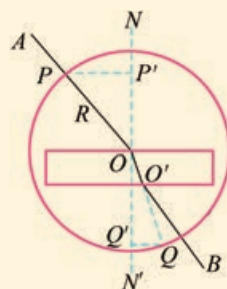


图 4-B-2

4. 图 4-B-3 a 是利用双缝干涉仪测量单色光波长的实验装置示意图。滤光片的作用是_____, 单缝的作用是_____, 双缝的作用是_____, 单缝和双缝之间的方向关系是_____。某同学在做该实验时, 第一次分划板中心刻度对齐 A 条纹中心时 (图 4-B-3 b), 游标卡尺的示数如图 4-B-3 c 所示。第二次分划板中心刻度对齐 B 条纹中心时 (图 4-B-3 d), 游标卡尺的示数如图 4-B-3 e 所示, 已知双缝间距为 0.5 mm , 从双缝到屏的距离为 1 m , 则图 4-B-3 c 游标卡尺的示数为_____ mm , 图 4-B-3 e 游标卡尺的示数为_____ mm 。实验时测量多条干涉条纹宽度的目的是_____, 所测单色光波长为_____ m 。

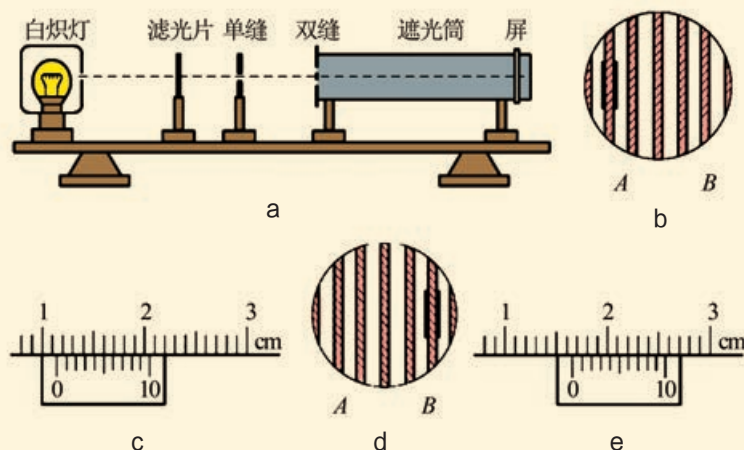


图 4-B-3

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（选择性必修1）》的学习。在那些激动人心的探索活动中，你和你的同学经受了困难的考验，也享受了成功的喜悦。在学完本书后，你一定想让同学们分享自己的研究成果。那么，就让我们开一个“课题研究成果报告会”吧！

你可以把你平时做过的最满意的课题拿来，再作进一步的研究，取得更有意义的成果，到这个报告会上去展示；你也可以从下面的研究课题示例中，选择你感兴趣的课题，自己

一人或与同学合作进行研究。当然，你还可以自选其他课题进行研究。

在这个报告会上，也许没有鸿篇大论，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

应用动量定理和动量守恒定律研究体育运动

你可以从球类、田径、游泳等项目中，选择你熟悉和喜爱的一项运动，用动量定理或动量守恒定律进行分析研究，并通过典型案例，说明如何提高运动成绩。这项研究需要在物理老师和体育老师的共同指导下进行。

设计简易地震仪

访问当地气象部门或地震研究所，查阅有关资料，了解地震仪的简单工作原理，结合所学的机械振动和机械波方面的知识，制作一个简易的地震仪。通过模拟地震实验，检测一下你设计的地震仪的工作性能。

设计利用多普勒效应的实用装置

根据多普勒效应，请你和同学们思考讨论一下，设

计一种利用多普勒效应的实用装置。

光的广泛应用

光是人类生活的必需物质，请你通过社会调查、查阅资料和切身感受，以“光的广泛应用”或者“假如没有光……”为题，写一篇体会文章，在班上交流评价。

彩虹全息的基本特性

彩虹全息是全息术的一种，能够在自然光的条件下再现彩色形象。现在，彩虹全息技术已经广泛应用于生产和生活之中。请查阅有关资料，了解彩虹全息的拍摄过程和基本原理。

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 路文艳

本册主要作者：吴晓明、李文波、谢步时、李志棣、路文艳、郭怀中

本教科书于2004年首次出版，当时参加本册书有关内容编写的人员还有：王高、母小勇、张永兴、张有光等。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。

编者

2018年8月

PUTONG GAOZHONG JIAOKESHU WULI

普通高中教科书
物理 选择性必修
第一册

上海科技教育出版社有限公司出版发行
(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 6.5
2019年7月第1版 2021年12月第4次印刷
ISBN 978-7-5428-7043-8/G·4085
定价:7.83元

批准文号:琼发改费管[2019]845号 举报电话:12358

ISBN 978-7-5428-7043-8



9 787542 870438 >



致力于用榜样的力量提升学生成绩的共享家教平台

中国家庭教育学会荣誉会员单位

985/211 大学生 1对1 上门辅导

找家教就像叫“代驾”一样简单
家长们都在偷偷用的家教预约神器

记得拍照留存哦



扫码关注 预约上门

关注送200元优惠券

小初高全科辅导

学霸云集任您挑

学历真实可担保



与优秀大学生同行，激发孩子无限潜能



微信搜索公众号：365优教网

咨询热线：4000-711-365

YOUJ 优教

既是找老师，更是找榜样

家教老师全国招募中