



普通高中教科书

# 物理

选择性必修

第一册



山东科学技术出版社

普通高中教科书

# 物理

选择性必修

第一册

主编 廖伯琴



● 山东科学技术出版社

· 济南 ·

主 编：廖伯琴

核心编者：杜明荣 陈 松 田序海 杨学切

青 春 黄国雄 李富强 廖伯琴

统 稿：廖伯琴 杜明荣 杨燕鸣

定 稿：廖伯琴

编务联系：李富强 李洪俊

责任编辑：郑淑娟 杨文静 李宝艳

封面设计：孙 佳

版权所有·请勿擅自用本书制作各类出版物·违者必究

如对教材内容有意愿、建议或发现印装质量问题，请与山东科学技术出版社联系

电话：0531-82098030 电子邮箱：sdkjy@sdcbs.com

## 第1章 动量及其守恒定律

导 入 从天体到微粒的碰撞 .....	2
第1节 动量和动量定理 .....	3
第2节 动量守恒定律及其应用 .....	10
第3节 科学验证：动量守恒定律 .....	18
第4节 弹性碰撞与非弹性碰撞 .....	21



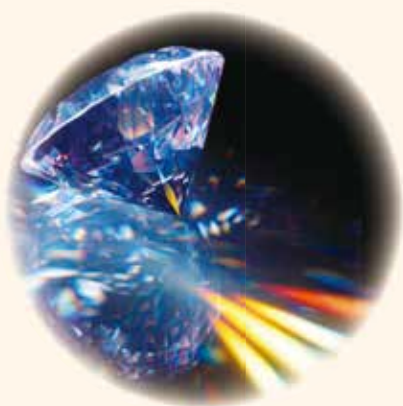
## 第2章 机械振动

导 入 从古代“鱼洗”说起 .....	32
第1节 简谐运动 .....	33
第2节 振动的描述 .....	37
第3节 单 摆 .....	43
第4节 科学测量：用单摆测量重力加速度 .....	46
第5节 生活中的振动 .....	50

## 第3章 机械波

导 入 身边的波 .....	58
第1节 波的形成和描述 .....	59
第2节 波的反射和折射 .....	69
第3节 波的干涉和衍射 .....	73
第4节 多普勒效应及其应用 .....	78





## 第4章 光的折射和全反射

导 入	美妙的彩虹 .....	87
第1节	光的折射 .....	88
第2节	科学测量：玻璃的折射率 .....	94
第3节	光的全反射 .....	97
第4节	光导纤维及其应用 .....	104

## 第5章 光的干涉、衍射和偏振

导 入	神奇的光 .....	111
第1节	光的干涉 .....	112
第2节	科学测量：用双缝干涉测光的波长 .....	119
第3节	光的衍射 .....	122
第4节	光的偏振 .....	127
第5节	激光与全息照相 .....	131





A Newton's cradle with five spheres, each replaced by a realistic image of the Earth, set against a blue sky background with diagonal lines.

# 第1章

# 动量及其守恒定律

导 入 从天体到微粒的碰撞

第1节 动量和动量定理

第2节 动量守恒定律及其应用

第3节 科学验证：动量守恒定律

第4节 弹性碰撞与非弹性碰撞

## ►►本章学业要求

- 能理解冲量、动量、动量定理和动量守恒定律的内涵，知道动量守恒定律的普适性，了解弹性碰撞和非弹性碰撞的特点，能定量分析一维碰撞问题；能用动量定理和动量守恒定律等解释生产生活中的碰撞现象，提出一些参考建议。具有与动量及其守恒定律等相关的比较清晰的相互作用观念和能量观念。——物理观念
- 能在熟悉的问题情境中根据实际情况选择弹性碰撞或非弹性碰撞模型解决物理问题；会用系统和守恒的思想分析物理问题，能对综合性物理问题进行分析 and 推理，获得结论并作出解释；能用证据分析解释弹性碰撞与非弹性碰撞等问题；能从运动定律、动量守恒、能量守恒等不同角度思考物理问题。——科学思维
- 能完成“验证动量守恒定律”等物理实验。能分析物理现象，提出并准确表述在实验中可能出现的物理问题；能在他人帮助下制订实验方案，能说明实验设计的理由，会使用常规实验器材获取数据；能分析数据，验证动量守恒定律，分析实验误差；能撰写规范的实验报告，在报告中能呈现设计的实验表格、数据分析过程及实验结论，能交流实验过程和结果并能进行反思。——科学探究
- 通过对动量守恒定律的理论推导与实验探究，能认识科学探索中的理论与实验研究的重要性，科学定律具有一定的适用条件；有较强的学习物理的兴趣，能做到实事求是；有将所学知识应用于生活实际的愿望，有主动进行科学普及的意识。

——科学态度与责任

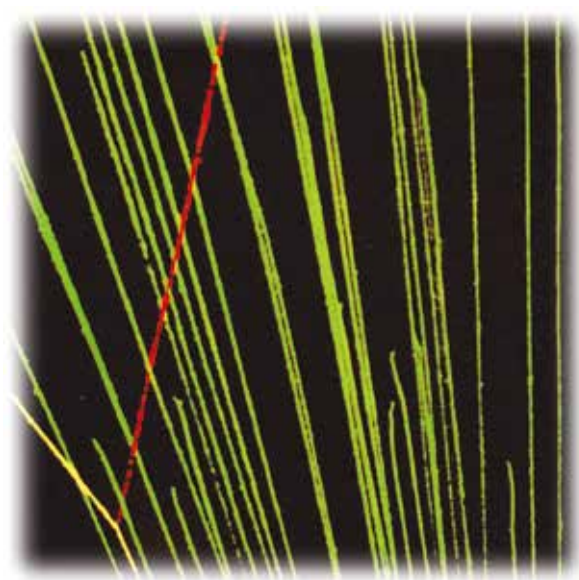
## 导 人

# 从天体到微粒的碰撞

宇宙中运动的天体不时会发生碰撞。人们曾观察到彗星的碎片与木星发生猛烈碰撞。碰撞产生的爆炸，相当于上亿颗原子弹爆炸的威力，在木星上留下的“伤痕”尺度几乎达到地球直径大小。



天体的碰撞



微观粒子的碰撞

相比之下，微观粒子间的碰撞多数情况下则显得悄无声息。通过对微观粒子碰撞的研究，人们发现了质子、中子和中微子等基本粒子，对微观世界的认识不断深入。

自然界的碰撞随处可见。大至宇宙天体，小至微观粒子，都可发生碰撞。那么，碰撞有什么规律呢？本章我们将探讨相关问题。

## 第1节

# 动量和动量定理

碰撞现象在生活中司空见惯。通常，鸡蛋从高处落到坚硬的盘子里会破，但若落在较厚的软垫上还会破吗（图 1-1）？本节我们学习了动量、冲量和动量定理后，便能解释这类现象。

## 1. 动量



图 1-2 游乐场的碰碰车

在游乐场开碰碰车（图 1-2），当运动的车去碰静止的车，若运动的车的总质量越大、车速越大，那么静止的那辆车会被撞得越远。可见，碰撞产生的效果与碰撞物体的质量和速度都有关。



图 1-1 鸡蛋会破吗



## 迷你实验室

### 观察小球的碰撞

如图 1-3 所示，将质量相等的两个钢球  $A$ 、 $B$  并排悬挂起来。把球  $A$  分别拉到不同高度释放，去碰撞静止的球  $B$ ，观察球  $B$  每次上升的最大高度。

将球  $A$  换成质量不同的钢球，分别拉到同一高度释放，再观察球  $B$  每次上升的最大高度。

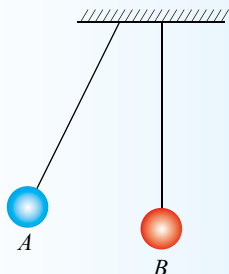


图 1-3 球  $A$  撞向球  $B$

由实验可知，从不同高度释放同一钢球，高度越高，被碰球上升越高；从同样高度释放质量不同的钢球，质量越大，被碰球上升越高。由此可见，对同一被碰球，其上升的高度与碰撞球的质量和碰前速度都有关。



人们在研究碰撞这类问题时，为了更好地说明问题，引入了一个与质量和速度都有关的物理量——动量。物理学中，把物体质量与速度的乘积称为物体的**动量**（momentum），通常用字母  $p$  表示。

$$p = mv$$

动量的单位由质量的单位和速度的单位共同决定。在国际单位制中，动量的单位是千克米每秒，符号为  $\text{kg} \cdot \text{m/s}$ 。动量是矢量，它的方向与物体速度的方向相同。

物体在运动过程中，当速度的大小或方向变化时，动量会发生变化。物体动量的变化量  $\Delta p$  等于物体的末动量  $p_2$  与初动量  $p_1$  的矢量差，即  $\Delta p = p_2 - p_1$ 。动量的变化量也是矢量。

### 例 题

如图 1-4 所示，一质量为 58 g 的网球以 30 m/s 的速率水平向右飞行，被球拍击打后，又以 30 m/s 的速率水平返回。被球拍击打前后，球的动量分别是多少？球的动量的变化量是多少？

#### 分析

根据动量定义可求被击打前后网球的动量。由于球在被击打前后的动量在同一直线上，可利用同一直线上的矢量运算法则计算动量的变化量。

#### 解

选定水平向右为正方向。由题意可知， $m = 58 \text{ g} = 0.058 \text{ kg}$ ， $v_1 = 30 \text{ m/s}$ ， $v_2 = -30 \text{ m/s}$ 。

击打前，球的动量

$$p_1 = mv_1 = 0.058 \times 30 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 1.74 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

球被击打前的动量大小为  $1.74 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ ，方向水平向右。

击打后，球的动量

$$p_2 = mv_2 = 0.058 \times (-30) \text{ kg} \cdot \text{m/s} = -1.74 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

球被击打后的动量大小为  $1.74 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ ，方向水平向左。

球被击打前后动量的变化量

$$\Delta p = p_2 - p_1 = (-1.74 - 1.74) \text{ kg} \cdot \text{m/s} = -3.48 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

球被击打前后动量的变化量大小为  $3.48 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ ，方向水平向左。



图 1-4 击打网球

#### 策略提炼

动量与动量的变化量都是矢量。如果动量的方向都在同一直线上，在选定一个正方向后，已知矢量的方向用正、负号表示，动量及动量的变化量的运算就变为代数运算。



## 讨论

球被击打前后，虽然动量的大小没有变化，但动量的方向发生了改变，因此动量发生了变化。求得动量的变化量为负值，表示其方向与选定的正方向相反。



## 迁移

对同一条直线上的矢量运算，正方向的选定是任意的。例题中，若选定水平向左为正方向，结果又如何？请计算并与例题的结果进行比较。

## 2. 动量定理

由以上例题可知，网球运动员击球时，球拍的作用力使球的动量发生了变化。在生产生活中，物体动量发生变化的现象随处可见。物体动量的变化与哪些因素有关呢？

对于一个质量不变的物体，速度的变化导致动量的变化，而物体速度的变化除了与物体受力情况有关外，还与力作用于物体的时间有关。例如，火车启动时，若牵引力小，则需要较长的时间才能达到正常的行驶速度；若牵引力大，则只需较短的时间便可达到正常的行驶速度。下面我们来推导，在恒力作用的情况下，物体动量的变化量与作用力和时间的定量关系。

设一质量为  $m$  的物体，初速度为  $v_1$ ，初动量  $p_1 = mv_1$ 。在合外力  $F$  的作用下，经过一段时间  $t$ ，速度变为  $v_2$ ，末动量  $p_2 = mv_2$ （图 1-5）。物体的加速度

$$a = \frac{v_2 - v_1}{t}$$

代入牛顿第二定律得

$$F = ma = m \frac{v_2 - v_1}{t}$$

变形得

$$Ft = mv_2 - mv_1$$

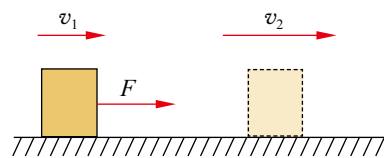


图 1-5 物体动量发生变化示意图

物体动量的变化量既与受到的合外力有关，又与该力的作用时间有关。合外力越大、作用时间越长，物体动量的变化量就越大。可见， $Ft$  这个量反映了力对时间的积累效应。物理学中，把力和力的作用时间的乘积称为这个力的冲量（impulse），通常用符号  $I$  表示。

$$I = Ft$$

冲量也是矢量，它的方向与力的方向相同。在国际单位制中，冲量的单位是牛·秒，符号为  $N \cdot s$ 。

由此， $Ft = mv_2 - mv_1$  还可表示为

$$I = mv_2 - mv_1$$

由上式可知，物体在一过程中所受合外力的冲量等于该物体在此过程中动量的变化量。这称为**动量定理** (theorem of momentum)。

由动量定理可得

$$F = \frac{mv_2 - mv_1}{t}$$

该式表明，作用在物体上的合外力等于物体动量的变化率，这实际上是牛顿第二定律的另一种表述。可进一步证明，在变力作用下，动量定理仍然成立。

### 例题

一个质量为 60 kg 的男孩从高处跳下，以 5 m/s 的速度竖直落地。取重力加速度  $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。

(1) 若男孩落地时屈膝 (图 1-6)，用了 1 s 停下来，则落地时地面对他的平均作用力是多大？

(2) 若男孩落地时没有屈膝，只用了 0.1 s 就停下来，则落地时地面对他的平均作用力又是多大？

### 分析

男孩刚触地时动量方向竖直向下，一段时间内减小到 0，这一过程中地面对脚的作用力是变力。根据动量定理可求出落地时地面对他的平均作用力。

### 解

男孩落地时的受力分析如图 1-7 所示，选定竖直向上为正方向。设地面对他的平均作用力为  $\bar{F}$ ，由题意可知， $m = 60 \text{ kg}$ ， $v_1 = -5 \text{ m/s}$ ， $v_2 = 0$ 。

(1) 男孩从触地到速度减为 0，经历的时间  $t_1 = 1 \text{ s}$ 。由动量定理得

$$\begin{aligned} (\bar{F}_1 - mg) t_1 &= mv_2 - mv_1 \\ \bar{F}_1 &= -\frac{mv_1}{t_1} + mg \\ &= \left( \frac{60 \times 5}{1} + 60 \times 10 \right) \text{ N} = 9.0 \times 10^2 \text{ N} \end{aligned}$$

方向竖直向上。

(2) 男孩从触地到速度减为 0，经历的时间  $t_2 = 0.1 \text{ s}$ 。同理可得，地面对他的平均作用力



图 1-6 落地时屈膝

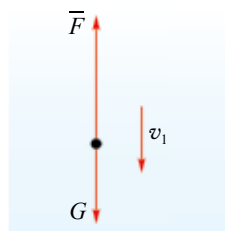


图 1-7 落地时的受力分析

### 策略提炼

在碰撞这类问题中，相互作用力会发生变化，可根据动量定理计算变力的平均值。

运用动量定理分析问题，要注意明确研究对象和过程，正确分析受力和运动的初、末状态；注意动量定理是矢量式，需根据矢量运算法则建立方程。



$$\bar{F}_2 = -\frac{mv_1}{t_2} + mg = \left( \frac{60 \times 5}{0.1} + 60 \times 10 \right) \text{ N} = 3.6 \times 10^3 \text{ N}$$

方向竖直向上。

### 讨论

两种落地方式中，动量的变化量相同，但所经历时间不同。作用时间越短，地面对人的平均作用力越大。因此，人从高处跳下时，为避免受伤，要尽量延长触地后的缓冲时间，以减小地面对人的作用力。由此，你能解释鸡蛋从高处落到软垫上不容易破的原因吗？



### 迁移

在碰撞这类问题中，由于相互作用时间极短，相互作用力会很大，通常可忽略其他较小的力而使问题简化。例如，在前面击打网球的例题中，若球与球拍的接触时间为 0.01 s，球受到球拍击打的平均作用力是多大？



### 科学书屋

#### 关于“运动的量度”的争论

关于“运动的量度”，历史上有两种不同的观点。1644 年，笛卡儿提出“运动不灭原理”：物质的运动有一个固定的量，这个量从来不增加也不减少，并把物体的质量和速度的乘积 ( $mv$ ) 作为物体的“运动量”的量度。而莱布尼茨 (G. Leibniz, 1646—1716) 认为，活力 ( $mv^2$ ) 才是物体的“运动量”的量度。这场著名的争论延续了半个世纪之久。1743 年，法国力学家达朗贝尔 (J. le R. D'Alembert, 1717—1783) 对这场争论给出了“判决”：两种量度是同样有效的。达朗贝尔的“判决”模糊谈到了：动量的变化和力的作用时间有关，活力的变化和力的作用距离有关。直到一百多年后，人们建立了能量转化与守恒定律，才进一步认识到这两种量度的区别。

对某一问题的认识有时会存在不同的观点，科学争论往往可帮助人们从多维的思想方法中得到启迪，从而更深刻、更全面地理解和认识问题。

## 3.碰撞与缓冲的实例分析

由动量定理可见，物体间的相互作用力与物体动量的变化和作用时间有关。既可通过增大物体动量变化量、缩短相互作用时间来增大相互作用力，也可通过减小物体动量变化量、延长相互作用时间来减小相互作用力。例如，冲床冲压工件时，由于冲头动量变化大且冲头与工件的碰撞时间短，在冲头与工件间会产生很大的作用力。冲压工件就是利用了



这种作用力。修路、建房时常用打夯机。打夯时（图 1-8），打夯机将夯锤提到一定高度释放，通过夯锤撞击地面夯实地基。夯锤质量越大、提升高度越高、与地面的撞击时间越短，夯实地面就越有效。为保证驾乘人员的安全，有的汽车在相关部位安装了安全气囊，利用气囊的形变来延长力的作用时间，减轻因剧烈碰撞而造成的对车内人员的伤害（图 1-9）。



图 1-8 打夯



图 1-9 安全气囊的缓冲可减轻伤害



### DIS实验室

#### 验证动量定理

我们可用 DIS 实验装置验证在变力作用下的动量定理。如图 1-10 所示，将力传感器、光电传感器接入电路，将遮光片的宽度和小车质量输入计算机。推动小车使其与力传感器发生碰撞，通过碰撞中相互作用力随时间变化的图像（图 1-11）可得出小车受到的力的冲量，再由光电传感器测量的时间等可得到小车动量的变化量。比较小车受到的力的冲量和动量变化量，验证动量定理。

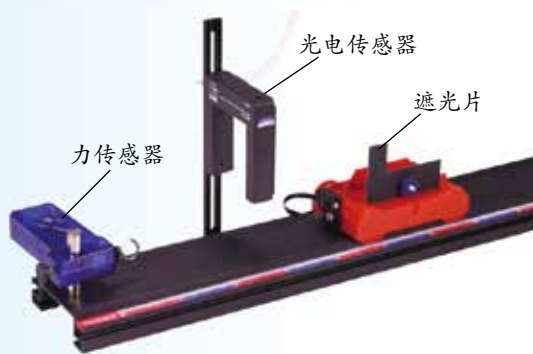


图 1-10 实验装置

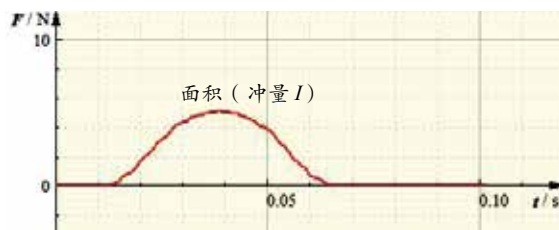
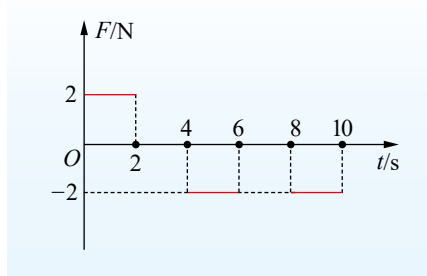


图 1-11 作用力—时间图像



## 节练习<sup>①</sup>

1. 运输易碎器件时，经常在包装箱中填充泡沫塑料；为营救高空坠落者，常会在坠落者下方放置气垫。请解释这样做的理由。
2. 若质量为  $m$  的物体在某时刻的动量大小为  $p$ ，动能为  $E_k$ ，试证明： $p^2 = 2mE_k$ 。
3. 在某轿车的撞击实验中，有一质量为  $60\text{ kg}$  的人体模型坐在驾驶位置，轿车以  $108\text{ km/h}$  的速度撞到坚固的墙，假设该模型与车皆在  $0.2\text{ s}$  内停下。
  - (1) 此模型在水平方向所受力的平均值为多少？
  - (2) 有人认为，在类似事故中，如果人用双手抵住方向盘，便可止住突然向前倾倒的身体。请对上述看法作出评价，并说出你的依据。
4. 一小球从某高处以  $10\text{ m/s}$  的速度竖直向上抛出，落到地面时速度大小为  $20\text{ m/s}$ 。求小球在空中的运动时间。（取重力加速度  $g = 10\text{ m/s}^2$ ，不计空气阻力）
5. 高空作业必须系安全带。如果质量为  $m$  的高空作业人员不慎跌落，从开始跌落到安全带对人刚产生作用力的过程中，人下落的距离为  $h$ （可视为自由落体运动）。此后经历时间  $t$ ，安全带达到最大伸长量，若在此过程中安全带的作用力始终竖直向上，则该段时间内安全带对人的平均作用力大小为多少？请提出关于安全带设计的建议。
6. 一质量为  $1\text{ kg}$  的物体在外力的作用下从静止开始做直线运动，其所受的合外力随时间变化的图像如图所示。求物体分别在  $2\text{ s}$  末、 $6\text{ s}$  末和  $9\text{ s}$  末的速度。
- \*7. 现代切割技术常用的一种“水刀”如图所示。它将水从高压水枪中高速射出，形成很细的水束，用来切割钢板等物体。已知水束的横截面积为  $S$ ，速度为  $v$ ，并垂直射向钢板，若水射上钢板后的速度视为  $0$ ，水的密度为  $\rho$ ，求水对钢板的平均冲击力。



第6题



第7题

请提问

① 本套选择性必修教材的习题，对应不同的学业质量水平，其中题号标有“\*”的习题有一定难度，可根据具体情况选做。

## 第2节

# 动量守恒定律及其应用

物体间的作用总是相互的，如天体相撞、汽车追尾、粒子碰撞等。这些发生相互作用的物体，它们的动量变化会遵循什么样的规律呢？本节我们将学习动量守恒定律及其应用。

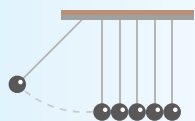
### 1. 动量守恒定律

两个穿滑冰鞋的同学静止站在滑冰场上，不论谁推对方，两人都会向相反方向滑去（图 1-12）。在推动前，两人的动量都为 0；推动后，每个人的动量都发生了变化。那么，他们的总动量在推动前后是否也发生了变化呢？

下面，我们通过实验来作进一步的探究。



图 1-12 互相推动后朝相反方向滑去



### 实验与探究

#### 动量变化规律的实验探索

两个质量相等且带有弹片的滑块装上相同的遮光板，放置在气垫导轨的中部。将两滑块靠在一起并压缩弹片，用细线把它们拴住，两滑块处于静止状态。烧断细线，两滑块被弹片弹开后朝相反方向做匀速运动（图 1-13）。测量遮光板通过光电门的时间，计算滑块的速度。在两滑块弹开前后，它们的总动量变化了吗？

增加其中一个滑块的质量，使其质量是另一个的 2 倍，重复以上实验（图 1-14）。两滑块在弹开前后的总动量会发生变化吗？

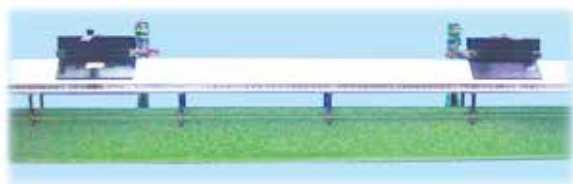


图 1-13 两滑块质量相等时的实验装置

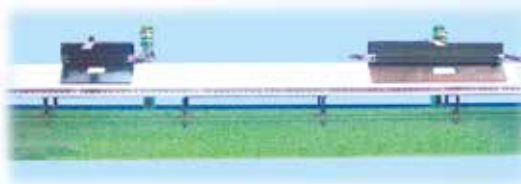


图 1-14 两滑块质量不等时的实验装置

实验结果表明，在气垫导轨上，无论两滑块的质量是否相等，它们在被弹开前的总动量为 0，弹开后的总动量也几乎为 0。这说明气垫导轨上的两滑块在相互作用前后的总动量几乎是不变的。

大量研究表明，一个系统不受外力或者所受合外力为 0 时，这个系统的总动量保持不变。这称为**动量守恒定律**（law of conservation of momentum）。

系统内物体间的相互作用力称为内力，内力不改变系统的总动量。在图 1-12 中，对于两同学构成的系统，他们的相互推力是系统的内力，如果两同学的滑冰鞋与地面的摩擦力可忽略不计，即近似认为系统所受合外力为 0，他们相互推动过程中的动量是守恒的。

动量守恒定律是自然界普遍适用的基本规律之一，不仅低速、宏观领域遵循这一规律，高速（接近光速）、微观（分子、原子的尺度）领域也遵循这一规律。动量守恒定律比牛顿运动定律的适用范围更广。



### 物理聊吧

小船停靠湖边时，如果船还未拴住，人便匆匆上岸，人有可能会掉入水中（图 1-15）。为什么会出现这种情况？试用动量守恒定律解释，并与同学讨论交流。



图 1-15 他能跳上岸吗

为进一步理解动量守恒定律，下面我们通过动量定理进行推导。

如图 1-16 所示，在光滑水平地面上，有质量为  $m_1$ 、 $m_2$  的两小球  $A$ 、 $B$ ，它们分别以速度  $v_1$ 、 $v_2$  同向运动，且  $v_1 > v_2$ 。当球  $A$  追上球  $B$  时，发生碰撞，碰撞后两球的速度都发生了变化，球  $A$ 、球  $B$  的速度分别为  $v_1'$ 、 $v_2'$ 。



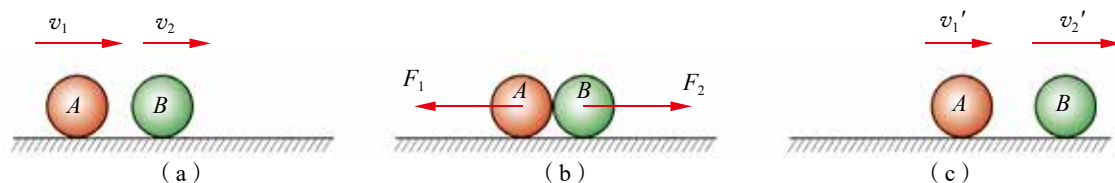


图 1-16 两小球碰撞前后速度变化示意图

用  $F_1$  表示球  $B$  对球  $A$  的作用力，用  $F_2$  表示球  $A$  对球  $B$  的作用力，两球在竖直方向受力平衡。若两球相互作用时间为  $t$ ，则在水平方向有

$$F_1 t = m_1 v_1' - m_1 v_1$$

$$F_2 t = m_2 v_2' - m_2 v_2$$

由牛顿第三定律可知

$$F_2 = -F_1$$

所以

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

整理后，得

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

式中，等号左边是两球碰撞前的总动量，等号右边是两球碰撞后的总动量。上式表明，当系统所受的合外力为 0 时， $A$ 、 $B$  两球在碰撞前后的总动量保持不变。由于两球碰撞过程中的每个时刻都有  $F_2 = -F_1$ ，因此上式对两球碰撞过程中任意时刻的状态都适用，即系统的总动量在整个过程中一直保持不变，在这个过程中动量是守恒的。

虽然系统所受合外力不为 0，但系统所受合外力远小于系统内力时，该系统的总动量可认为近似守恒。可进一步证明，若系统所受合外力不为 0，但在某一方向上受到的合外力为 0，则在该方向上系统的总动量仍然守恒。



## 科学书屋

### 动量守恒定律的发现

历史上，笛卡儿、惠更斯、牛顿等人先后研究过碰撞等问题，建立并完善了动量概念，提出了动量守恒规律。

笛卡儿曾提出“运动量”是由“物质”的多少和“速度”的乘积决定的。惠更斯曾通过碰撞实验研究碰撞现象（图 1-17），由此他提出“两个物体所具有的运动量在碰撞中可以增加或减少，但是它们的量值在同一个方向上的总和保持不变”，他明确指出了动量的方向性和守恒性。牛顿采用质量与速度的乘积定义动量，更加清晰地表述了动量的方向性及其守恒规律。

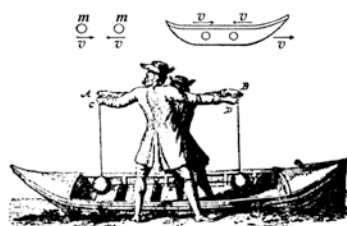


图 1-17 惠更斯论文中研究碰撞现象的原图



## 例题

冬季雨雪天气时，公路上容易发生交通事故。在结冰的公路上，一辆质量为  $1.8 \times 10^3 \text{ kg}$  的轻型货车尾随另一辆质量为  $1.2 \times 10^3 \text{ kg}$  的轿车同向行驶，因货车未及时刹车而发生追尾（即碰撞，图 1-18）。若追尾前瞬间货车速度大小为  $36 \text{ km/h}$ ，轿车速度大小为  $18 \text{ km/h}$ ，刚追尾后两车视为紧靠在一起，此时两车的速度多大？



图 1-18 两车碰撞前后示意图

## 分析

以两车组成的系统为研究对象，该系统受到的外力有重力、支持力和摩擦力。由于碰撞时间很短，碰撞过程中系统所受合外力通常远小于系统内力，可近似认为在该碰撞过程中系统动量守恒。根据动量守恒定律，可求出两车的共同速度。

## 解

设货车质量为  $m_1$ ，轿车质量为  $m_2$ ，碰撞前货车速度为  $v_1$ 、轿车速度为  $v_2$ ，碰撞后两车速度为  $v$ 。选定两车碰撞前的速度方向为正方向。

由题意可知， $m_1 = 1.8 \times 10^3 \text{ kg}$ ， $m_2 = 1.2 \times 10^3 \text{ kg}$ ， $v_1 = 36 \text{ km/h}$ ， $v_2 = 18 \text{ km/h}$ 。

由动量守恒定律得

$$\begin{aligned} m_1 v_1 + m_2 v_2 &= (m_1 + m_2) v \\ v &= \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2} \\ &= \frac{1.8 \times 10^3 \times 36 + 1.2 \times 10^3 \times 18}{1.8 \times 10^3 + 1.2 \times 10^3} \text{ km/h} \\ &= 28.8 \text{ km/h} \end{aligned}$$

所以，刚追尾后两车的速度为  $28.8 \text{ km/h}$ 。

## 讨论

计算结果  $v = 28.8 \text{ km/h}$ ，介于  $v_1$  和  $v_2$  之间且更接近质量大的轻型货车的速度，与实际情况相符。

## 策略提炼

运用动量守恒定律解决问题时，首先应明确研究的系统，在判断系统总动量守恒后，选定正方向，确定初、末状态及各物体的动量，然后列式求解。

在碰撞这类问题中，由于相互作用时间极短，系统所受合外力通常远小于系统内力，系统的总动量近似守恒。



## 迁移

在微观粒子发生碰撞时，运用动量守恒定律还可测量微观粒子的质量。例如，氢原子核的质量是  $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，它以  $1.0 \times 10^7 \text{ m/s}$  的速度与一个原来静止的氦原子核相碰撞，碰撞后以  $6.0 \times 10^6 \text{ m/s}$  的速度被反弹回来，而氦原子核以  $4.0 \times 10^6 \text{ m/s}$  的速度向前运动。求氦原子核的质量。



### 拓展一步

#### 斜碰中的动量守恒

以上讨论的碰撞都是一维碰撞，即碰撞前后的速度方向均在同一直线上，也称为正碰或对心碰撞<sup>①</sup>。如果碰撞前后的速度方向不在同一直线上，这种碰撞称为斜碰。

在图 1-19 所示的台球斜碰中，可把两球视为一个系统，在碰撞过程中，两球相互作用的内力远大于它们受到的外力，因此可近似认为系统的动量守恒。

动量守恒表示系统动量的大小和方向都不变，系统的动量在各方向的分量也是守恒的。对于有的斜碰，即使整个系统的总动量不守恒，也有可能在其方向上的分量是守恒的，人们常常利用这些特点解决问题。

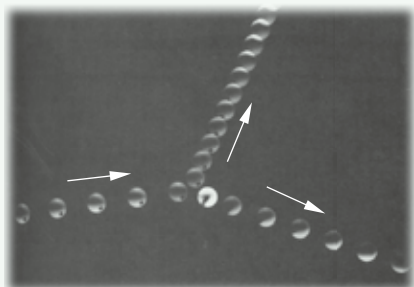


图 1-19 台球的斜碰

## 2. 反冲运动与火箭

将气球充气后松口释放，气球会沿与喷气方向相反的方向飞去（图 1-20）。喷出的空气具有动量，由动量守恒定律可知，气球要向相反方向运动，这就是一种反冲运动。

火箭发射（图 1-21）是典型的反冲运动。火箭点火后，燃料燃烧产生的高速气流从火箭尾部喷出，使火箭向前飞行（图 1-22）。负荷越小、喷气速度越大、燃料越多，火箭能达到的速度就越大。

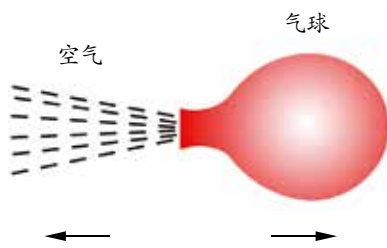


图 1-20 气球反冲运动示意图



图 1-21 火箭发射升空

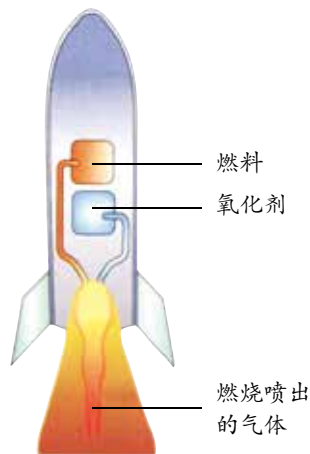


图 1-22 火箭反冲运动示意图

<sup>①</sup> 本套教材以下内容未进行特别说明的碰撞均视为正碰。



### 拓展一步

#### 多级火箭是如何获得更高速度的

火箭的最终速度主要取决于两个条件：一是喷气速度；二是质量比，即火箭开始飞行时的质量与燃料燃尽时的质量之比。

发射人造卫星，需要多级火箭。多级火箭是由单级火箭组成的（图1-23）。发射时，先点燃第一级火箭，它的燃料用完后空壳自动脱离，这时第二级火箭开始工作。空壳的脱离减轻了火箭的质量，因而增大了第二级火箭工作过程中的质量比。第二级火箭在燃料用完以后空壳也自动脱离，接着下一级火箭开始工作。多级火箭的这种工作过程能使火箭达到更高的速度，可用来发射人造卫星、洲际导弹和宇宙飞船等。

火箭技术是国家综合国力的重要体现。我国已多次运用自主研制的火箭成功发射人造卫星和远程导弹，并为其他国家和国际组织提供卫星发射服务，火箭技术位居世界前列。

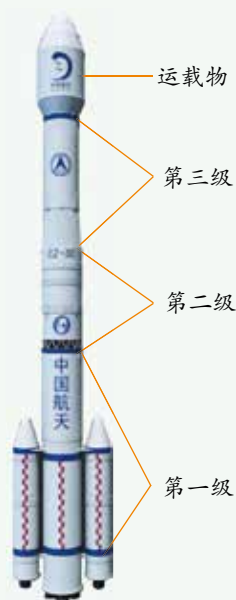


图1-23 多级火箭结构示意图

宇航员无绳太空行走是通过太空服背部的喷气推进装置实现的（图1-24）。该装置有几十个喷管，宇航员利用安装在太空服前面的开关控制喷气，实现朝各个方向的移动。

有的自动喷水装置喷水时，水流的反冲作用可使喷水管旋转起来，这样就能达到多角度喷洒的目的（图1-25）。大型水力发电站用的反击式水轮机也是利用水流的反冲作用而旋转的。



图1-24 宇航员利用喷气装置实现太空行走



图1-25 反冲作用使喷水管旋转



反冲有时也会带来不利影响。例如，射击时子弹向前飞去，枪身会向后反冲，枪身的反冲会影响射击的准确性。用高压水枪灭火时，水高速喷出，高压水枪向后反冲，消防队员必须牢牢抓住水枪将身体稍向前倾以保持平衡。

能理解冲量、动量、动量定理和动量守恒定律的内涵，知道动量守恒定律的普适性；能用动量定理和动量守恒定律等解释生产生活中的碰撞现象，提出一些参考建议。具有与动量及其守恒定律等相关的比较清晰的相互作用观念和能量观念。

——物理观念



### 迷你实验室

#### 制作“水火箭”

“水火箭”不用燃料也能冲向高空。

如图 1-26 所示，剪下一塑料瓶的瓶口部分，粘在另一塑料瓶的瓶底，做成“水火箭”头，在靠近“水火箭”尾部处粘上定向尾翼。取大小合适的橡皮塞，在其中心装上气门芯。在瓶中装入大半瓶水后，用橡皮塞塞紧瓶口。“水火箭”就做好了。

把“水火箭”放在发射架上，用打气筒通过气门芯向瓶内打气。当瓶内空气达到一定压强时，水将橡皮塞冲开并向下高速喷出，由于反冲作用，“水火箭”便会冲向天空。想一想，怎样才能让“水火箭”升得更高？（特别提醒：“水火箭”发射必须在户外进行，不能对准人或建筑物等，要注意安全）

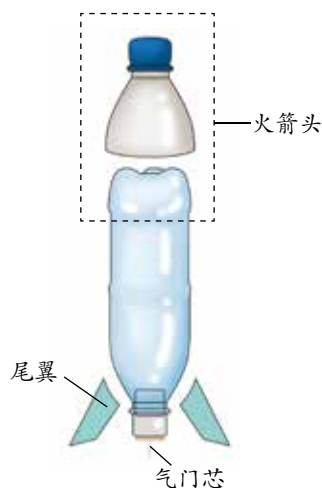


图 1-26 “水火箭”结构示意图



### 节练习

- 如图所示，在光滑的水平面上有一辆平板车，某同学站在车上，想通过敲打车的左端让小车向右不断运动。可行吗？为什么？
- 如图所示，光滑水平面上的两玩具小车中间连接一被压缩的轻弹簧，两手分别按住小车，使它们静止。对于两车及弹簧组成的系统，下列说法正确的是
  - 两手同时放开后，系统总动量始终为 0
  - 两手先后放开后，系统总动量始终为 0
  - 先放开左手紧接着放开右手后，系统总动量向右
  - 先放开左手紧接着放开右手后，系统总动量向左



第 1 题



第 2 题



3. 如图所示, 一只小船静止在水面上, 一人从船尾走到船头。已知人的质量小于船的质量, 若不计水的阻力, 下列说法正确的是

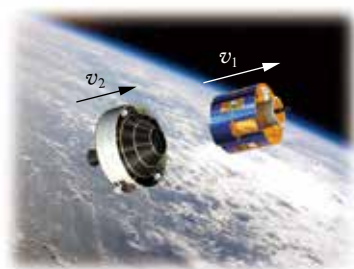


第3题

- A. 人在小船上行走时, 人向前运动快, 小船后退慢
- B. 人在小船上行走时, 人向前运动慢, 小船后退快
- C. 当人停止走动时, 小船继续向后退
- D. 当人停止走动时, 小船也停止后退

4. 两小孩在水平冰面上乘坐碰碰车相向运动。车  $A$  总质量为  $50\text{ kg}$ , 以  $2\text{ m/s}$  的速度向右运动; 车  $B$  总质量为  $70\text{ kg}$ , 以  $3\text{ m/s}$  的速度向左运动。碰撞后车  $A$  以  $1.5\text{ m/s}$  的速度向左运动, 求碰撞后车  $B$  的速度。

5. 如图所示, 一枚火箭搭载着卫星以速率  $v_0$  进入太空预定位置, 由控制系统使箭体与卫星分离。已知卫星质量为  $m_1$ , 箭体质量为  $m_2$ , 分离后箭体以速率  $v_2$  沿火箭原方向飞行。若忽略空气阻力及分离前后系统质量的变化, 求分离后卫星的速率  $v_1$ 。



第5题

6. 两人站在静止于水面、质量为  $M$  的小船上, 当他们从船尾沿相同的方向水平跳出后, 船获得一定的速度。设两人的质量均为  $m$ , 跳出时相对于地面的速度均为  $v$ , 若忽略水的阻力, 请比较两人同时跳出和两人依次跳出两种情况下, 小船所获得的速度大小。



请提问

### 第3节

## 科学验证：动量守恒定律

动量守恒定律是自然界的普遍规律。前面我们通过气垫导轨实验研究了动量守恒定律，下面我们再通过小球的碰撞实验来验证动量守恒定律。

### 实验目的

- (1) 验证动量守恒定律。
- (2) 体会将不易测量的物理量转换为易测量的物理量的实验设计思想。

### 实验器材

斜槽轨道、半径相等的钢球和玻璃球、白纸、复写纸、小铅锤、天平（附砝码）、毫米刻度尺、圆规。

### 实验原理与设计

质量分别为  $m_1$  和  $m_2$  的两小球  $A$ 、 $B$  发生正碰，若碰撞前球  $A$  的速度为  $v_1$ ，球  $B$  静止，碰撞后的速度分别为  $v_1'$  和  $v_2'$ ，根据动量守恒定律，应有： $m_1 v_1 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$ 。

可采用“探究平抛运动的特点”实验中测量平抛初速度的方法，设计实验装置如图 1-27 所示。让球  $A$  从同一位置  $C$  释放，测出不发生碰撞时球  $A$  飞出的水平距离  $l_{OP}$ ，再测出球  $A$ 、 $B$  碰撞后分别飞出的水平距离  $l_{OM}$ 、 $l_{ON}$ ，如图 1-28 所示。只要验证  $m_1 l_{OP} = m_1 l_{OM} + m_2 l_{ON}$ ，即可验证动量守恒定律。说明理由。

### 实验步骤

- (1) 用天平测出两个小球的质量。
- (2) 将斜槽固定在桌边并使其末端水平。在地板上铺白纸和复写纸，通过小铅锤将斜槽末端在纸上的投影记为点  $O$ 。
- (3) 首先让球  $A$  从斜槽点  $C$  由静止释放，落在复写纸上，如此重复多次。



### 安全警示

可将书本等放在小球落点附近，以便于收集下落的小球。请勿乱扔小球，以免伤人。

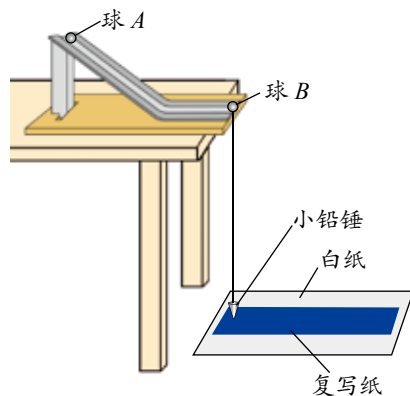


图 1-27 实验装置示意图

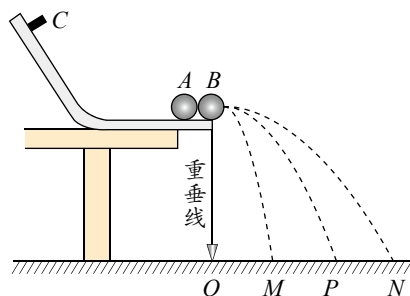


图 1-28 水平距离测量示意图



(4) 再将球  $B$  放在槽口末端，让球  $A$  从点  $C$  由静止释放，撞击球  $B$ ，两球落到复写纸上，如此重复多次。

(5) 取下白纸，用圆规找出落点的平均位置点  $P$ 、点  $M$  和点  $N$ ，用刻度尺测出  $l_{OP}$ 、 $l_{OM}$  和  $l_{ON}$ 。

(6) 改变点  $C$  位置，重复上述实验步骤。

### 数据分析

将测量的数据记入你设计的表格中，并分析数据，形成结论。

### 实验结论

写出实验结论。

### 讨论

碰撞前后球  $A$ 、球  $B$  的动量是怎样变化的？从中可得出什么结论？分析该实验中实验误差的主要来源，并提出减小实验误差的方法。除气垫导轨和小球碰撞实验外，你还能想到其他实验方案吗？

能分析物理现象，提出并准确表述在实验中可能出现的物理问题；能在他人帮助下制订实验方案，能说明实验设计的理由，会使用常规实验器材获取数据；能分析数据，验证动量守恒定律，分析实验误差；能撰写规范的实验报告，在报告中能呈现设计的实验表格、数据分析过程及实验结论，能交流实验过程和结果并能进行反思。

注意提升实验设计能力、数据分析能力和科学论证能力。

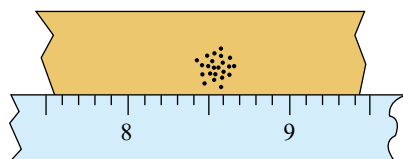
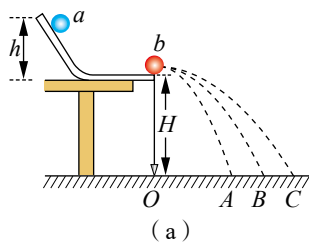
——科学探究

素养提升



## 节 练 习

1. 请撰写“验证动量守恒定律”的实验报告。注意在报告中呈现设计的实验表格、数据分析过程及实验结论。
2. 在“验证动量守恒定律”实验中，实验装置示意图如图(a)所示。请完成下列题目：



第2题

- (1) 本实验必须满足的条件是\_\_\_\_\_。
  - A. 斜槽轨道的斜面必须是光滑的
  - B. 斜槽轨道末端的切线是水平的
  - C. 球  $a$  每次都要从同一高度由静止释放
  - D. 碰撞的瞬间，球  $a$  与球  $b$  的球心连线与轨道末端的切线平行
- (2) 本实验必须测量的物理量有\_\_\_\_\_。
  - A. 斜槽轨道末端到水平地面的高度  $H$
  - B. 球  $a$ 、 $b$  的质量  $m_a$ 、 $m_b$



C. 球  $a$ 、 $b$  的半径  $r$

D. 球  $a$ 、 $b$  离开斜槽轨道末端后平抛飞行的时间  $t$

E. 记录纸上点  $O$  到  $A$ 、 $B$ 、 $C$  各点的距离

F. 球  $a$  的固定释放点到斜槽轨道末端水平部分间的高度差  $h$

(3) 按照本实验方法, 验证动量守恒定律的关系式是\_\_\_\_\_。

(4) 为测定未放球  $b$  时球  $a$  落点的平均位置, 把刻度尺的 0 刻度线跟记录纸上的点  $O$  对齐, 图 (b) 给出了球  $a$  落点附近的情况。由图可得  $OB$  距离应为\_\_\_\_\_ cm。

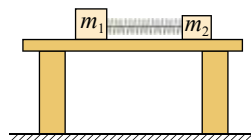
(5) 若再测得  $OA = 2.68$  cm,  $OC = 11.50$  cm, 已知  $a$ 、 $b$  两球的质量比为 2 : 1, 则系统碰撞后总动量  $p'$  与碰撞前总动量  $p$  的百分误差  $\left| \frac{p' - p}{p} \right| \times 100\% =$ \_\_\_\_\_ %。(结果保留 2 位有效数字)

3. 如图所示, 某同学把两块大小不同的木块用细线连接, 中间夹一被压缩的轻弹簧。将这一系统置于光滑的水平桌面上, 烧断细线, 观察木块的运动情况, 进行必要的测量, 验证木块间相互作用时动量守恒。

(1) 该同学还必须准备的器材是\_\_\_\_\_。

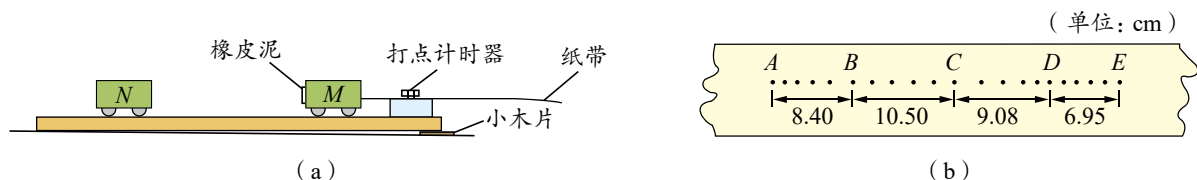
(2) 需要直接测量的数据是\_\_\_\_\_。

(3) 用所得数据验证动量守恒定律的关系式是\_\_\_\_\_。



第3题

4. 某同学设计了一个用打点计时器验证动量守恒定律的实验, 实验装置如图 (a) 所示。在小车  $M$  的前端粘有橡皮泥, 给小车一初速度使之做匀速运动, 之后与原来静止的小车  $N$  相碰并粘成一体, 二者继续做匀速运动。在小车  $M$  后连接着纸带, 打点计时器使用电源的频率为 50 Hz, 长木板一端垫着小木片以平衡摩擦力。



第4题

(1) 若已得到打点纸带并测得各计数点间距如图 (b) 所示。A 为运动起点, 则应选择\_\_\_\_\_段来计算小车  $M$  碰撞前的速度, 应选择\_\_\_\_\_段来计算小车  $M$  和小车  $N$  碰撞后的共同速度。(均选填 “AB” “BC” “CD” 或 “DE”)

(2) 已测得小车  $M$  的质量  $m_1 = 0.40$  kg, 小车  $N$  的质量  $m_2 = 0.20$  kg, 由以上测量结果可得系统碰撞前总动量为\_\_\_\_\_ kg · m/s, 碰撞后总动量为\_\_\_\_\_ kg · m/s。由此得出结论:\_\_\_\_\_。

请提问

## 第4节

# 弹性碰撞与非弹性碰撞

碰撞是自然界中常见的现象。物体碰撞后可能的运动状态多种多样，这些不同类型的碰撞中除了系统动量守恒之外，能量变化又有什么特点？本节我们将学习不同类型的碰撞。

## 1. 不同类型的碰撞

碰撞时，因相互作用时间很短，碰撞物体间的作用力远大于外力，系统的动量可认为是守恒的。但从能量转化角度看，机械能可能有损失。人们根据碰撞中机械能是否有损失，把碰撞分为弹性碰撞和非弹性碰撞。

若碰撞过程中系统的机械能守恒，即碰撞前后系统的总动能相等，这种碰撞称为弹性碰撞，又称完全弹性碰撞。通常，分子、原子以及更小的粒子间的碰撞可视为弹性碰撞。生活中，有些碰撞可视为弹性碰撞，如台球发生碰撞时，动能的损失很小，可忽略不计，通常也将其视为弹性碰撞（图 1-29）。

一般情况下，在碰撞过程中系统的机械能并不守恒，总有一部分机械能损失掉，转化为其他形式的能。物理学中，把这种机械能有损失的碰撞称为非弹性碰撞。非弹性碰撞中，如果碰撞后物体结合在一起，系统的动能损失最大，这种碰撞称为完全非弹性碰撞。

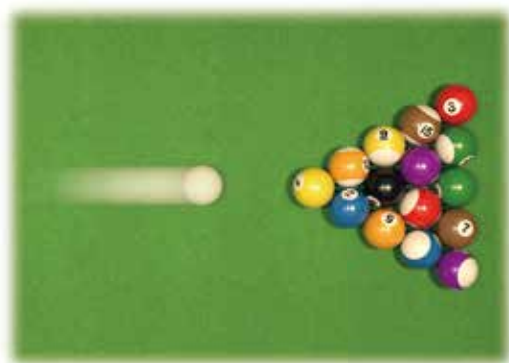
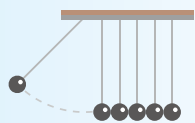


图 1-29 台球碰撞可视为弹性碰撞

## 2. 弹性碰撞

在上节中，对两小球的碰撞进行了初步探究，下面通过对两钢球碰撞的研究，深入探讨弹性碰撞的特点。



### 实验与探究

#### 弹性碰撞的实验研究

##### 实验1：质量相等的两个钢球的碰撞

把两个质量相等的钢球并排挂在一起（图1-30），球B静止，把球A拉到某一高度释放，球A摆到最低点时与球B正碰。碰撞后球A和球B会怎样运动？

实验中，记下球A释放的位置和碰撞后球A和球B摆至最大高度时的位置。改变球A拉起的高度，重复实验。

两球质量相等时，碰撞有什么特点？

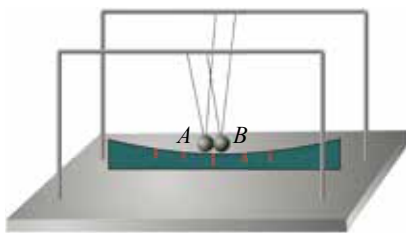


图1-30 实验装置示意图

##### 实验2：质量不相等的两个钢球的碰撞

(1) 把球A换成质量更大的钢球，球B静止，把球A拉至某一高度释放并与球B正碰，观察碰撞情况。改变球A拉起的高度，重复实验。被碰球质量较小时，碰撞有什么特点？

(2) 球A静止，把球B拉至某一高度释放并与球A碰撞，观察碰撞情况。改变球B拉起的高度，重复实验。被碰球质量较大时，碰撞有什么特点？

在实验1中，质量相等的两个钢球相碰撞，碰撞后球A立即停下，而球B几乎摆到球A原来的高度。在实验2中，当被碰球质量较小时，碰撞后A、B两球都向前运动；当被碰球质量较大时，碰撞后球B会反弹而球A向前运动。为什么会出现这种情况呢？

设球A和球B的质量分别为 $m_1$ 、 $m_2$ ，碰撞前球A的速度为 $v_1$ ，球B静止（图1-31），碰撞后球A和球B的速度分别为 $v_1'$ 、 $v_2'$ 。两球的碰撞可视为弹性碰撞，碰撞过程中动量守恒，碰撞前后动能相等。因此

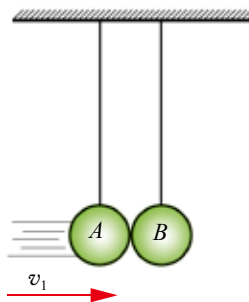


图1-31 球A碰撞球B示意图

$$m_1 v_1 = m_1 v_1' + m_2 v_2' \quad ①$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 \quad ②$$

由①式得

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

由②式得

$$m_1 (v_1^2 - v_1'^2) = m_2 v_2'^2$$

联立以上两式得

$$v_1' + v_1 = v_2'$$



由上面关系式可解得

$$v_1' = \frac{(m_1 - m_2)v_1}{m_1 + m_2}, \quad v_2' = \frac{2m_1v_1}{m_1 + m_2}$$

由以上结果可解释探究实验中的结论:

当两球质量相等, 即  $m_1 = m_2$  时,  $v_1' = 0$ ,  $v_2' = v_1$ , 碰撞后球 A 速度为 0, 而球 B 的速度与碰撞前球 A 的速度相等。

当质量大的球碰质量小的球, 即  $m_1 > m_2$  时,  $v_1' > 0$ ,  $v_2' > 0$ , 表示碰撞后两球都向前运动。

当质量小的球碰质量大的球, 即  $m_1 < m_2$  时,  $v_1' < 0$ ,  $v_2' > 0$ , 表示碰撞后质量小的球被反弹回来。

弹性碰撞规律在研究微观粒子的碰撞中有着重要的应用。英国物理学家查德威克 (J. Chadwick, 1891—1974) 在发现中子的过程中, 就是应用了弹性碰撞模型, 根据实验数据计算出了中子的质量。



### 拓展一步

#### 两个运动的小球发生弹性碰撞后的速度

如图 1-32 所示, 在光滑水平地面上有质量为  $m_1$ 、 $m_2$  的两球, 分别以速度  $v_1$ 、 $v_2$  ( $v_1 > v_2$ ) 运动。两球发生对心弹性碰撞后速度分别为  $v_1'$ 、 $v_2'$ 。根据两球在碰撞过程中动量守恒和碰撞前后动能相等, 可得

$$\begin{aligned} m_1v_1 + m_2v_2 &= m_1v_1' + m_2v_2' \\ \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 &= \frac{1}{2}m_1v_1'^2 + \frac{1}{2}m_2v_2'^2 \end{aligned}$$

由以上两式可解得

$$\begin{aligned} v_1' &= \frac{(m_1 - m_2)v_1 + 2m_2v_2}{m_1 + m_2} \\ v_2' &= \frac{(m_2 - m_1)v_2 + 2m_1v_1}{m_1 + m_2} \end{aligned}$$

请讨论: (1) 当两球质量相等时, 两球碰撞后的速度变化情况; (2) 当两球质量差异较大且  $v_2 = 0$  时, 两球碰撞后的速度变化情况。

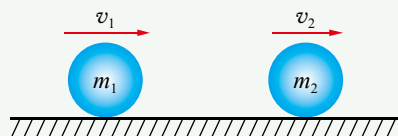


图 1-32 两运动小球示意图

## 3. 非弹性碰撞

非弹性碰撞存在机械能损失。如奔跑中的足球运动员之间发生的碰撞、彗星与木星的碰撞等, 都会有机械能的损失, 为非弹性碰撞。若碰撞后物体都以共同速度运动, 碰撞中机械能损失最大, 为完全非弹性碰撞。



## 例 题

如图 1-33 所示, 打桩机重锤的质量为  $m_1$ , 从桩帽上方某高处由静止开始沿竖直方向自由落下, 打在质量为  $m_2$  的钢筋混凝土桩子上 (包括桩帽)。锤与桩发生碰撞的时间极短, 碰撞后二者以相同速度一起向下运动将桩打入地下。若碰撞前锤的速度为  $v_0$ , 求锤与桩所组成的系统碰撞后的动能及碰撞过程中损失的动能。

## 分析

锤与桩碰撞过程中, 虽然锤与桩组成的系统受到重力和地对桩的阻力, 合外力不为 0, 但因碰撞时间极短, 二者相互作用的内力远大于外力, 系统的动量可视为守恒。碰撞后二者速度相同, 属于完全非弹性碰撞。可用动量守恒定律结合能量关系求解。

## 解

设锤与桩碰撞后的速度为  $v$ , 选定竖直向下为正方向。由动量守恒定律得

$$m_1 v_0 = (m_1 + m_2) v$$

所以

$$v = \frac{m_1}{m_1 + m_2} v_0$$

碰撞后该系统的动能

$$E_k = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) v^2 = \frac{m_1^2 v_0^2}{2 (m_1 + m_2)}$$

系统损失的动能

$$E_{\text{损}} = \frac{1}{2} m_1 v_0^2 - \frac{1}{2} (m_1 + m_2) v^2 = \frac{m_1 m_2 v_0^2}{2 (m_1 + m_2)}$$

## 讨论

由以上表达式可见, 在  $v_0$  和  $m_2$  一定时,  $m_1$  越大, 碰撞后锤和桩的动能越接近碰撞前锤的动能。因此, 在桩不被打坏的前提下, 锤的质量越大, 打桩的效果越好。在该问题中, 若知道桩被打进的深度, 你能求出泥土对桩的平均阻力吗?

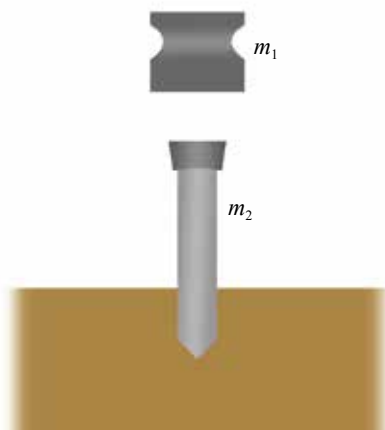


图 1-33 打桩示意图

## 策略提炼

解决此类问题时, 需将实际情境中的碰撞抽象为相应的碰撞模型, 再从动量、能量的角度, 用相关公式求解。

在碰撞问题中, 由于相互作用时间极短, 且外力远小于内力, 可认为系统的动量守恒, 碰撞过程中物体所发生的位移也可忽略不计, 即认为碰撞在原地发生、原地结束。

能在熟悉的问题情境中根据实际情况选择弹性碰撞或非弹性碰撞模型解决物理问题; 会用系统和守恒的思想分析物理问题, 能对综合性物理问题进行分析 and 推理, 获得结论并作出解释; 能用证据分析解释弹性碰撞与非弹性碰撞等问题; 能从运动定律、动量守恒、能量守恒等不同角度思考物理问题。

——科学思维



## 迁移

如图 1-34 所示, 质量均为  $m$  的物体  $B$ 、 $C$  静止在光滑水平面的同一直线上, 一质量为  $m_0$  的子弹  $A$  以速度  $v$  射入物体  $B$  并嵌入其中。随后它们与  $C$  发生弹性碰撞, 求碰撞后  $B$ 、 $C$  的速度。

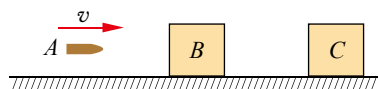


图 1-34 子弹射向物体  $B$  示意图

## 迷你实验室

### 牛顿摇篮

图 1-35 所示的装置常称为“牛顿摇篮”, 让这些球碰撞, 可出现有趣的现象。若拉起最左端一球, 由静止释放, 则会把最右端一球撞出, 其他球静止不动; 若拉起左端两球同时释放, 则会把右端两球撞出, 其他球静止不动。请试着拉起更多的球同时释放, 看看撞击后会有怎样的结果。

若没有“牛顿摇篮”, 你还可利用质量、体积都相同的多粒玻璃珠按照如图 1-36 所示的方法试一试。当将一粒玻璃珠弹向一排整齐紧挨的玻璃珠时, 最外边的那颗玻璃珠会被弹出。

你能解释出现这些现象的原因吗?

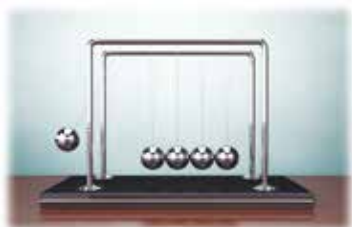


图 1-35 牛顿摇篮



(a)



(b)

图 1-36 弹玻璃珠



## 节练习

- 质量相等的两小球以相同的速率相向运动, 发生正碰后都以原速率向相反方向运动。这属于什么碰撞? 为什么?
- 我国女子短道速滑队多次在国际大赛上摘金夺银, 为祖国赢得荣誉。在某次 3 000 m 接力赛中, “接棒”的运动员甲提前站在“交棒”的运动员乙前面, 并且开始向前滑行, 待乙追上甲时, 猛推甲一把, 使甲获得更大的速度向前冲出, 如图所示。在乙推甲的过程中, 忽略运动员与冰面间在水平方向上的相互作用, 则
  - 甲对乙的冲量一定等于乙对甲的冲量
  - 甲、乙的动量变化一定大小相等、方向相反
  - 甲的动能增加量一定等于乙的动能减少量
  - 甲和乙组成的系统机械能守恒

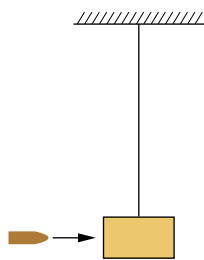


第 2 题

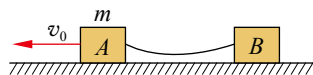
- 质量为  $1\text{ kg}$  的物体  $A$  在光滑水平面上以  $6\text{ m/s}$  的速度与质量为  $2\text{ kg}$ 、速度为  $2\text{ m/s}$  的物体  $B$  发生正碰。碰撞后  $A$ 、 $B$  两物体的速度可能值为  
 A.  $v_A = 5\text{ m/s}$ ,  $v_B = 2.5\text{ m/s}$                       B.  $v_A = 2\text{ m/s}$ ,  $v_B = 4\text{ m/s}$   
 C.  $v_A = -4\text{ m/s}$ ,  $v_B = 7\text{ m/s}$                       D.  $v_A = 7\text{ m/s}$ ,  $v_B = 1.5\text{ m/s}$
- 在某次冰壶比赛中, 运动员将一冰壶推出, 一段时间后以  $0.4\text{ m/s}$  的速度与对方静止的冰壶发生正碰, 碰撞后以  $0.1\text{ m/s}$  的速度继续向前滑行。若两冰壶质量相等, 对方冰壶获得的速度为多大?
- 有一质量为  $6.64 \times 10^{-27}\text{ kg}$ 、速度为  $v$  的  $\alpha$  粒子与一质量为  $3.32 \times 10^{-26}\text{ kg}$  的静止氦核发生正碰。若碰撞是弹性碰撞, 试证明碰撞后氦核具有的速度约为  $\frac{v}{3}$ 。

- 沙摆是一种用来测量子弹速度的简单装置。如图所示, 将质量为  $M$  的沙箱用长为  $l$  的细绳悬挂起来, 一颗质量为  $m$  的子弹水平射入沙箱 (未穿出), 使沙箱发生摆动。测得沙箱最大摆角为  $\alpha$ , 求子弹射击沙箱时的速度。请陈述这样测试的原理。
- 如图所示, 光滑水平直轨道上两滑块  $A$ 、 $B$  用橡皮筋连接,  $A$  的质量为  $m$ 。开始时橡皮筋松弛,  $B$  静止, 给  $A$  向左的初速度  $v_0$ 。一段时间后,  $B$  与  $A$  同向运动发生碰撞并粘在一起。碰撞后的共同速度是碰撞前瞬间  $A$  的速度的  $2$  倍, 也是碰撞前瞬间  $B$  的速度的  $\frac{1}{2}$ 。求:

- (1)  $B$  的质量;
- (2) 碰撞过程中  $A$ 、 $B$  系统机械能的损失。



第6题



第7题

请提问





## 章末练习

### 科学认知

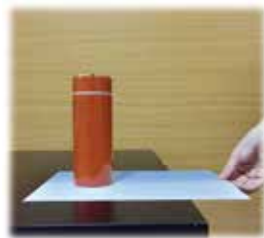
1. 如图所示, 某同学要把压在水杯下的纸抽出来。第一次他将纸迅速抽出, 水杯几乎不动; 第二次他将纸较慢地抽出, 水杯却被拉动了。请解释此现象。
2. 一位质量为  $m$  的运动员由下蹲状态向上起跳, 经时间  $\Delta t$ , 身体伸直并刚好离开地面, 速度为  $v$ 。在此过程中, 地面对他的支持力的冲量及所做的功分别为

A.  $mv + mg \Delta t, \frac{1}{2} mv^2$

B.  $mv + mg \Delta t, 0$

C.  $mv, \frac{1}{2} mv^2$

D.  $mv - mg \Delta t, 0$

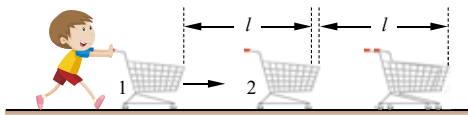


第 1 题

3. 半径相等的两小球  $a$  和  $b$ , 在光滑水平面上沿同一直线相向运动并发生正碰。若球  $a$  的质量大于球  $b$  的质量, 碰撞前两球的动能相等, 碰撞后两球的运动状态可能是
  - A. 球  $a$  的速度为 0, 球  $b$  的速度不为 0
  - B. 球  $b$  的速度为 0, 球  $a$  的速度不为 0
  - C. 两球的速度均不为 0
  - D. 两球的速度方向均与原方向相反, 动能仍相等
4. 蹦床运动有“空中芭蕾”之称。某次蹦床比赛中, 质量为  $m$  的运动员从最高点自由下落  $h$  后触蹦蹦床。此后, 经时间  $t$  运动员达到最低点。若在此过程中蹦蹦床给运动员的作用力始终竖直向上, 该时间段内蹦蹦床对运动员的平均作用力大小为多少?
5.  $A$ 、 $B$  两物体沿同一直线相向运动。物体  $A$  的速度大小是  $6 \text{ m/s}$ , 物体  $B$  的速度大小是  $2 \text{ m/s}$ , 碰撞后两物体都沿各自原方向的反方向运动, 速度大小都是  $4 \text{ m/s}$ 。求  $A$ 、 $B$  两物体的质量之比。
6. 如图所示, 质量为  $m$  的子弹, 以水平初速度  $v_0$  射入静止在光滑水平面上质量为  $M$  的长木块内, 并嵌入其中。若木块对子弹的平均阻力为  $f$ , 求子弹射入木块的深度。
7. 如图所示, 静置于水平地面的两辆手推车沿一直线排列, 质量均为  $m$ , 人在极短的时间内给第一辆车一水平冲量使其运动, 当车运动了距离  $l$  时与第二辆车相碰, 两车以共同速度又运动了距离  $l$  时停止。车运动时受到的摩擦阻力恒为车所受重力的  $k$  倍, 重力加速度为  $g$ , 车与车之间仅在碰撞时发生相互作用, 碰撞时间很短, 忽略空气阻力。求人给第一辆车水平冲量的大小。



第 6 题



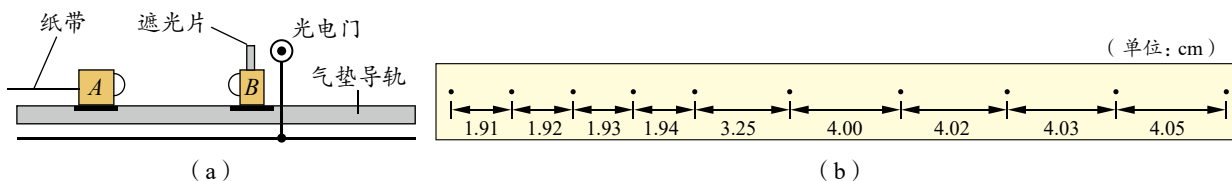
第 7 题

- \*8. 英国物理学家查德威克通过实验测出某种不带电的“未知粒子”的质量几乎与质子的质量相等, 进而发现这就是中子。其测量思路是: 通过该粒子与其他已知原子核发生弹性碰撞, 测量碰撞后原子核的速度, 可间接测出该粒子的质量。测量结果如下: 用初速度一定的该粒子与静止的氢原子核碰撞后, 氢原子核的最大速度是  $3.3 \times 10^7 \text{ m/s}$ ; 该粒子与静止的氮原子核碰撞后, 氮原子核的最大速度是  $4.7 \times 10^6 \text{ m/s}$ 。已知氮原子核的质量  $m_N$  是氢原子核质量  $m_H$  的 14 倍。试计算该“未知粒子”的质量  $m$  (用  $m_H$  表示)。



### 科学探究

9. 有研究者用下列方式验证动量守恒定律。如图(a)所示,在气垫导轨上有A、B两个滑块,滑块A和B相对的侧面皆有弹簧片,滑块A左侧与连接打点计时器的纸带相连,滑块B上端固定有遮光片,光电计时器可记录遮光片通过光电门的时间。实验测得滑块A的质量 $m_1 = 0.310 \text{ kg}$ ,滑块B的质量 $m_2 = 0.108 \text{ kg}$ ,遮光片的宽度 $d = 1.00 \text{ cm}$ ;打点计时器所用交流电源的频率 $f = 50 \text{ Hz}$ 。将光电门固定在滑块B的右侧,启动打点计时器,给滑块A一向右的初速度,使它与滑块B相碰撞;碰撞后光电计时器显示的时间 $\Delta t_B = 3.500 \text{ ms}$ ,碰撞前后打出的纸带如图(b)所示。



第9题

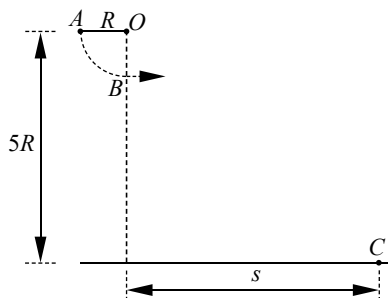
若实验允许的相对误差绝对值 $\left( \left| \frac{\text{碰撞后总动量} - \text{碰撞前总动量}}{\text{碰撞前总动量}} \right| \times 100\% \right)$ 最大为5%,本实验是否在误差范围内验证了动量守恒定律?请写出运算过程。

### 科学辨析

10. 杂技表演中,在一个平躺的人身上压一块大而重的石板,另一人以大锤猛力击石,石裂而人未伤。请解释原因。有人建议用很厚的棉被代替石板,从而使冲击力减小而更加安全。你认为这样可行吗?请说明理由。

### 温故知新

11. 如图所示,一对杂技演员(都视为质点)乘秋千(秋千绳处于水平位置)从点A由静止出发绕点O下摆,当摆到最低点B时,女演员在极短时间内将男演员沿水平方向推出,然后自己刚好能回到高处A。已知男演员质量 $m_1$ 和女演员质量 $m_2$ 之比为2:1,秋千的质量不计,秋千的摆长为R,男演员落地点C比点O低5R。求点C与点O的水平距离s。
12. 请根据第1章(动量及其守恒定律)的内容,结合你的理解,画出概念图。



第11题



### 我的学习总结



## 单元自我检测

一、选择题（本题共 5 小题。在每小题给出的四个选项中，第 1 ~ 3 题只有一项符合题目要求，第 4、5 题有多项符合题目要求）

- A. 减小篮球的动量的变化量  
B. 减小篮球对手的作用力的冲量  
C. 减小篮球的动量的变化率  
D. 减小篮球的动能的变化量



3. 质量相同的甲、乙两人站在光滑的冰面上, 甲的手中拿有一个球。甲将球抛给乙, 乙接到后, 又抛给甲, 如此反复多次, 最后球落在乙的手中。此时甲、乙两人的速率关系是
- A. 甲、乙两人速率相等                      B. 甲速率大
- C. 乙速率大                                      D. 两人仍保持静止状态

- 
- A diagram showing a green rectangular cart of mass  $M$  on wheels, moving to the right with velocity  $v$ . Inside the cart, a small sphere of mass  $m_0$  is suspended by a vertical string. To the right of the cart, on the same horizontal surface, is a yellow rectangular block of mass  $m$ .

A. 小车、物体、小球的速度都发生变化，三者构成的系统动量守恒，机械能守恒

- 

### 第5题

6. 用如图所示的“碰撞实验器”可研究两个小球在轨道水平部分碰撞前后的动量关系, 进而验证动量守恒定律。

- 

29

接下来要完成的必要步骤是\_\_\_\_\_。

- A. 用天平测量两个小球的质量  $m_1$ 、 $m_2$
- B. 测量小球  $m_1$  开始释放时的高度  $h$
- C. 测量抛出点距地面的高度  $H$
- D. 分别找到  $m_1$ 、 $m_2$  碰撞后平均落点的位置  $M$ 、 $N$
- E. 测量平抛射程  $OM$ 、 $ON$

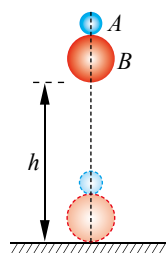
(2) 若两球碰撞前后的动量守恒, 其表达式可表示为 \_\_\_\_\_ [ 用 (1) 中测量的量表示 ]。

(3) 经测定,  $m_1 = 45.0 \text{ g}$ ,  $m_2 = 7.5 \text{ g}$ , 小球落点的平均位置距点  $O$  的距离  $OM = 35.20 \text{ cm}$ 、 $OP = 44.80 \text{ cm}$ 、 $ON = 55.68 \text{ cm}$ 。碰撞前后  $m_1$  的动量分别为  $p_1$  与  $p_1'$ , 则  $p_1 : p_1' = \underline{\hspace{2cm}} : 11$ ; 若碰撞结束时  $m_2$  的动量为  $p_2'$ , 则  $p_1' : p_2' = 11 : \underline{\hspace{2cm}}$ 。实验结果说明, 碰撞前后总动量的比值  $\frac{p_1}{p_1' + p_2'} = \underline{\hspace{2cm}}$ 。

7. 如图所示, 某同学在练习用头颠球。若足球被头顶起, 每次上升高度都约为  $30 \text{ cm}$ , 足球的质量为  $420 \text{ g}$ , 球与头的作用时间为  $0.1 \text{ s}$ 。不计空气阻力, 取重力加速度  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , 求足球对该同学头部的平均作用力大小。
8. 如图所示, 两质量分别为  $m$  和  $M$  的弹性小球  $A$ 、 $B$  叠放在一起, 从高度为  $h$  处自由下落。 $h$  远大于两小球半径, 落地瞬间球  $B$  先与地面碰撞, 后与球  $A$  碰撞。所有碰撞都视为弹性碰撞且都发生在竖直方向上, 碰撞时间均很短。求球  $A$  能上升的最大高度。



第 7 题



第 8 题



## 单元自我评价

回顾本单元的学业要求和所学内容, 结合本次单元自我检测和平时学习情况进行自我评价, 写一篇“单元自我评价”报告。说说你学会了什么、存在什么问题及今后努力的方向等。



# 第2章

# 机械振动

导 入 从古代“鱼洗”说起

第1节 简谐运动

第2节 振动的描述

第3节 单 摆

第4节 科学测量：用单摆测量  
重力加速度

第5节 生活中的振动

## ►►本章学业要求

●能认识简谐运动的特征，能用公式和图像描述简谐运动，知道单摆周期与摆长、重力加速度的定量关系，能了解受迫振动、共振等的内涵；能说明与简谐运动、受迫振动及共振有关的生产生活中的一些应用实例，能解释一些机械振动现象。具有与机械振动相关的运动观念、相互作用观念和能量观念。

——物理观念

●能在熟悉的问题情境中运用简谐运动、弹簧振子和单摆等物理模型解决机械振动的问题；能分析与机械振动相关的问题，通过推理得出结论并能解释；能用与机械振动相关的证据解释生产生活中的机械振动现象；能从相互作用和能量等不同角度认识机械振动，能质疑他人的观点。

——科学思维

●能完成“用单摆测量重力加速度的大小”等实验。能分析相关事实，提出并准确表述在实验中可能出现的物理问题；能在他人帮助下制订实验方案，能选用实验器材进行实验，获得实验数据，能注意减小实验误差；能分析数据，测得重力加速度的大小；能撰写规范的实验报告，在报告中能呈现设计的实验表格、数据分析过程及实验结论，能反思评估关于重力加速度的不同测量方法。

——科学探究

●通过比较重力加速度的不同测量方法，能认识到物理实验方法是多元的，需要创新；在合作中能尊重他人，也能坚持原则；能关注我国古代在机械振动方面的一些技术应用。

——科学态度与责任



## 导 人

# 从古代“鱼洗”说起

我国汉代有一种被称为“鱼洗”的铜盆，盆的边缘有两个耳环，盆底有浮雕的鱼等。盆内注入适量清水，当用潮湿的双手有节奏地来回摩擦两个耳环时，伴随着鱼洗发出的铮铮声，盆中喷出泉涌般的水柱，令人惊叹不已！



鱼洗



为什么不喷水呢

经验丰富者掌握节奏，用手在鱼洗耳环上摩擦几下，盆会像受撞击一样振动起来，水也随之喷出；而初试者往往费九牛二虎之力，也无法让鱼洗喷水。鱼洗喷水的奥秘在哪里？与机械振动有什么关联？

## 第1节

# 简谐运动

微风吹过，树上的枝条来回摇摆；轻轻一推，有趣的秋千来回荡起（图 2-1）……这些物体的运动有什么共同特点？又应如何研究这类运动呢？本节我们将初步了解机械振动，学习最基础的振动——简谐运动。



图 2-1 荡起的秋千

## 1. 机械振动

物理学中，将物体（或物体的某一部分）在某一位置附近的往复运动称为**机械振动**（mechanical vibration），简称振动，这个位置称为**平衡位置**（equilibrium position）。

一切发声的物体都在振动。有的振动比较简单，如音叉的振动；有的振动比较复杂，如蜜蜂翅膀抖动和古筝琴弦振动等（图 2-2）。机械振动是一种常见的运动。



(a) 音叉



(b) 蜜蜂



(c) 古筝

图 2-2 不同物体的振动

振动是怎样产生的呢？我们以古筝琴弦的振动为例进行定性分析。如图 2-3 所示，演奏前，琴弦所受合力为 0，静止于平衡位置。演奏时拨动琴弦，使其偏离平衡位置。由于形变，琴弦产生一个指向平衡位置的弹力  $F$ 。如果琴弦在平衡位置的左方，则弹力的方向向右，指向平衡位置；如果琴弦在平衡位置的右方，则弹力的方向向左，也指向平衡位置。总之，只要琴弦偏离平衡位置，它总会受

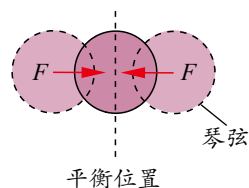


图 2-3 琴弦振动时弹力方向示意图

到指向平衡位置的弹力。这种总是指向平衡位置的力称为**回复力**（restoring force）。正是回复力的作用，使琴弦来回振动。

回复力可由振动物体受到的某一个力来提供，也可由振动物体受到的几个力的合力来提供。回复力是产生振动的条件，它使物体总是在平衡位置附近振动。平衡位置是指物体所受回复力为 0 的位置。

## 2. 简谐运动及其特征

我们从弹簧振子的振动入手，进一步探究振动的特征。

弹簧振子是一种理想模型。弹簧一端固定，另一端连接一个可视为质点的物体，不计弹簧质量，物体置于光滑水平面上，这样构成的振动系统称为**弹簧振子**（spring oscillator）。

如图 2-4 所示，物体处于平衡位置  $O$  时，弹簧为原长，物体所受的弹力为 0；将物体向右拉至  $B$  后由静止释放，由于弹簧被拉长，会对物体施加向左的指向平衡位置的弹力，使物体向平衡位置运动；到达平衡位置时，物体所受弹力为 0，但由于惯性，会继续向左运动并挤压弹簧，弹簧对物体施加向右的指向平衡位置的弹力，阻碍其继续向左运动，直至速度减小为 0，到达位置  $C$  处；此后，在弹力的作用下，物体改变运动方向，返回位置  $B$ ……物体就这样在平衡位置附近往复运动，形成振动。物体所受弹簧的弹力提供了回复力。

取平衡位置  $O$  为  $x$  轴的原点，向右为  $x$  轴的正方向。根据胡克定律，物体所受回复力

$$F = -kx$$

式中， $k$  是弹簧的劲度系数， $x$  是物体相对平衡位置的位移，负号表示力与位移的方向相反。

像弹簧振子这样，物体所受回复力的大小与位移大小成正比，方向总是与位移方向相反的运动称为**简谐运动**（simple harmonic motion）。

设物体质量为  $m$ ，根据牛顿第二定律，其加速度

$$a = \frac{F}{m} = -\frac{k}{m}x$$

由此可见，简谐运动的加速度具有大小与位移大小成正比、方向与位移方向相反的特征。

从能量角度看，由于弹簧振子在振动过程中只有弹簧的弹力做功，系统的动能和弹性势能相互转换，机械能守恒。

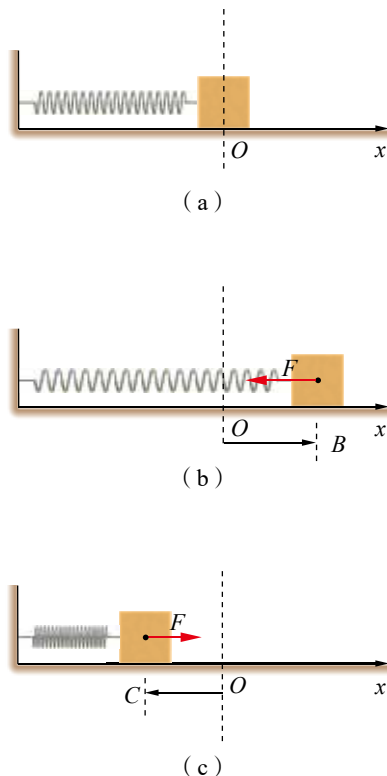


图 2-4 弹簧振子振动示意图



## 物理聊吧

一小球做简谐运动，相继经过图 2-5 所示的位置。试根据图示，判断小球在此振动过程中的位移、回复力、加速度、速度、动能和弹簧的弹性势能分别是如何变化的，填入表 2-1 中。

表2-1 小球简谐运动情况记录表

小球位置	$O \rightarrow B$	$B \rightarrow O$	$O \rightarrow C$	$C \rightarrow O$
位移 $x$				
回复力 $F$				
加速度 $a$				
速度 $v$				
动能 $E_k$				
弹性势能 $E_p$				

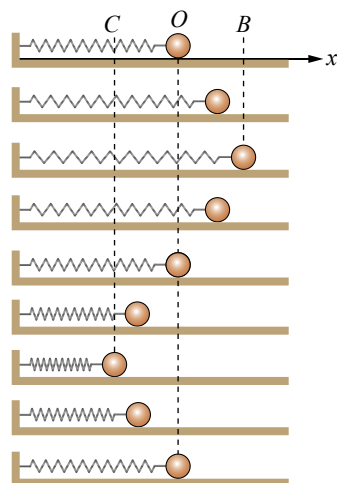


图 2-5 小球简谐运动示意图

将你的结论与其他同学的结论进行比较，找出以上各物理量分别在小球运动至何处时最大，何处时最小。



## 拓展一步

### 竖直方向的弹簧振子

如图 2-6 所示，在弹簧下端挂一重物，上端固定在支架上，这就构成了竖直方向的弹簧振子。重物在竖直方向受到弹力和重力作用，这两个力的合力充当弹簧振子的回复力。当重物处于点  $O$  时，重力和弹力相互平衡，因此点  $O$  是弹簧振子的平衡位置。将重物向下拉一段距离，然后松手，重物便沿竖直方向振动起来。

假设重物所受的重力为  $G$ ，弹簧的劲度系数为  $k$ ，重物处于平衡位置时弹簧的伸长量为  $x_1$ ，则

$$G = kx_1$$

设重物向下偏离平衡位置的位移为  $x$  时，弹簧的伸长量为  $x_2$ ，则

$$x = x_2 - x_1$$

取竖直向下为正方向，则此时弹簧振子的回复力

$$F = G - kx_2 = kx_1 - kx_2 = -kx$$

所以，竖直方向的弹簧振子的运动是简谐运动。

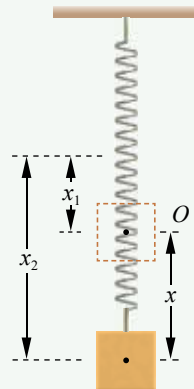


图 2-6 竖直方向的弹簧振子



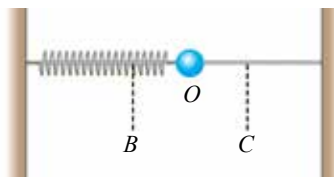


### 节 练 习

1. 滑板运动非常有趣。如图所示，某同学踩着滑板在弧形滑道的内壁来回滑行。滑板的这种运动可视为振动吗？若可以，它的平衡位置在哪里？
2. 有同学认为，如图所示的弹簧振子在振动过程中，小球所受到的力除了重力、支持力和弹簧的弹力外，还受到回复力。这种看法正确吗？请说明理由。

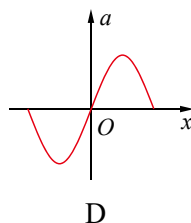
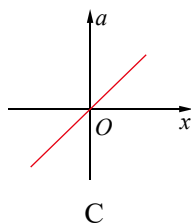
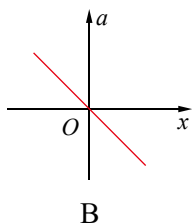
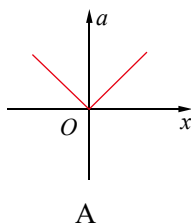


第1题

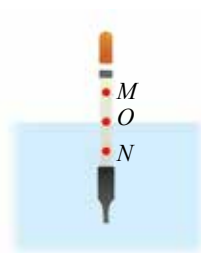


第2题

3. 关于简谐运动，下列说法正确的是
  - A. 物体所受的回复力始终指向平衡位置，方向不变
  - B. 如果物体的速度越来越大，加速度一定越来越小
  - C. 在恒力作用下，物体不可能做简谐运动
  - D. 物体的加速度方向和速度方向有时相同，有时相反
4. 做简谐运动的弹簧振子，当它每次经过同一位置时，下列物理量相同的是
  - A. 速度
  - B. 加速度
  - C. 动能
  - D. 动量
5. 做简谐运动的物体，其加速度  $a$  随位移  $x$  变化的规律应是



6. 某鱼漂的示意图如图所示， $O$ 、 $M$ 、 $N$ 为鱼漂上的三个点。当鱼漂静止时，水面恰好过点  $O$ 。用手将鱼漂向下压，使点  $M$  到达水面，松手后，鱼漂会上下运动，上升到最高处时，点  $N$  到达水面。不考虑阻力的影响，下列说法正确的是
  - A. 鱼漂的运动是简谐运动
  - B. 点  $O$  过水面时，鱼漂的速度最大
  - C. 点  $M$  到达水面时，鱼漂具有向下的加速度
  - D. 鱼漂由上往下运动时，速度越来越大



第6题

请提问



## 第2节

# 振动的描述

说话或唱歌时，用手摸着喉部，能感觉到声带的振动（图 2-7）。声音大小发生变化，声带的振动也有变化。一般情况下，女生的音调比男生高。这些现象表明振动具有不同的特征。如何科学地描述振动呢？本节我们将学习描述振动特征的物理量，并用图像和公式描述简谐运动。



图 2-7 感受声带的振动

### 1. 振动特征的描述

#### （1）振幅

既然振动是来回往复的运动，物体离开平衡位置的位移存在最大值。物理学中，把振动物体离开平衡位置的最大距离称为**振幅**（amplitude），用  $A$  表示。振幅是表示振动强弱的物理量。如图 2-8 所示，物体以点  $O$  为平衡位置在  $B$ 、 $C$  间做简谐运动，振子的振幅就等于线段  $OB$  或  $OC$  的长度。

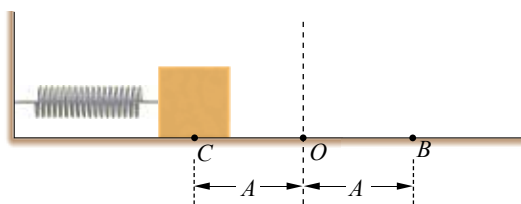


图 2-8 弹簧振子的振幅示意图

声音大小由发声体振动的振幅决定，振幅越大，发出的声音就越大。当声音增大时，用手摸着喉部，就能感觉到声带振动增强。生产生活中，我们也常常利用增大振幅的方法来增大音量。例如，扬声器纸盆振动的振幅越大，音量越大（图 2-9）。



图 2-9 随扬声器纸盆振动而跳动的泡沫

#### （2）周期和频率

振动的另一特点是周期性。所谓周期性，就是振动物体经过一段时间之后又重新回到原来状态，而且这种情况有规律地出现。图 2-8 中，做简谐运动的物体由点  $B$  经过点  $O$  到

达点  $C$ ，再由点  $C$  经过点  $O$  返回点  $B$ ，重新回到原来状态，我们就说物体完成了一次全振动。物体完成一次全振动所经历的时间称为**周期**（period）。周期是表示振动快慢的物理量。

振动的快慢还可用频率表示。在一段时间内，物体完成全振动的次数与这段时间之比称为**频率**（frequency）。频率的单位是赫兹，符号为 Hz。

我们常用  $T$  表示周期，用  $f$  表示频率。周期和频率之间的关系为

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

物体振动周期越短，频率越高，表明物体振动越快；物体振动周期越长，频率越低，表明物体振动越慢。

振幅反映振动的强弱，周期、频率则反映振动的快慢。那么，物体振动的周期、频率与振幅有关吗？

大量研究表明，若物体仅在回复力作用下振动时，振动的周期、频率与振幅的大小无关，只由振动系统本身的性质决定。其振动的周期（或频率），称为固有周期（或固有频率）。固有周期和固有频率是振动系统本身的属性，与物体是否振动无关，如一面锣、一根绷紧的弦、一座桥梁、一幢楼宇都具有各自的固有周期和固有频率。

发声体的固有频率不同，发出声音的音调也不同。例如，一般情况下，女生声带振动的固有频率比男生大，因此女生的音调比男生高。钢琴能发出高低不同的声音，是每根琴弦的固有频率不同，弹奏时键槌击打不同的弦的缘故（图 2-10）。



图 2-10 钢琴的键槌击打琴弦

## 2. 简谐运动的位移图像

用振幅、周期和频率来描述简谐运动，只能从整体上把握振动的强弱和快慢程度。然而，做简谐运动物体的运动情况每时每刻都在变化，我们可用位移—时间图像形象直观地描述位移随时间变化的情况。

以弹簧振子的简谐运动为例。表 2-2 是一个周期内某弹簧振子的位移随时间变化的数据。

表 2-2

某弹簧振子的位移随时间变化的数据

$t/s$	0	0.08	0.16	0.24	0.32	0.40	0.48	0.56	0.64	0.72	0.80	0.88	0.96
$x/cm$	0	5.00	8.66	10.00	8.66	5.00	0	-5.00	-8.66	-10.00	-8.66	-5.00	0



建立平面直角坐标系，横坐标表示时间  $t$ ，纵坐标表示弹簧振子相对于平衡位置的位移  $x$ 。根据数据所得的图像（图 2-11）为弹簧振子做简谐运动的位移—时间图像，也称为振动图像。

振动图像还可通过实验的方法直接描绘出来。

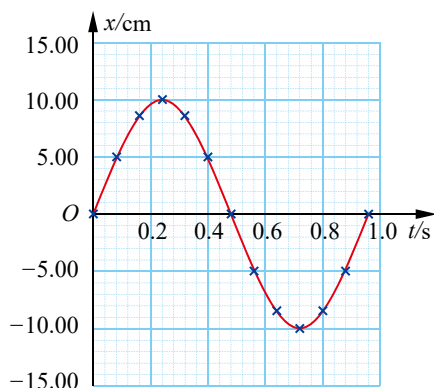


图 2-11 弹簧振子做简谐运动的位移—时间图像



### 迷你实验室

#### 描绘简谐运动的振动图像

如图 2-12 所示，弹簧和小球分别套在光滑横杆上，弹簧左端与小球相连，右端固定在支架上，形成一个弹簧振子。在球底部固定一毛笔头，笔头下放一纸板。使小球偏离平衡位置并释放，其振动可视为简谐运动。沿图示方向匀速拉动纸板，笔头会在纸板上画出一图像。请分析该图像。

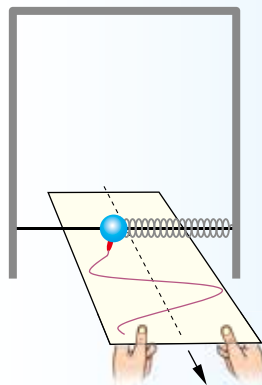


图 2-12 弹簧振子的振动图像

毛笔所画图像可视为小球在振动过程中的位移—时间图像。

实验和理论都表明，简谐运动的振动图像是一条正弦（或余弦）曲线，它能直观地表示做简谐运动物体的位移随时间按正弦（或余弦）规律变化的情况。在振动图像上还可表示出振幅  $A$  和周期  $T$ 。曲线在纵轴方向上的最大值等于振幅  $A$ ，相邻两个相同状态间隔的时间等于周期  $T$ （图 2-13）。

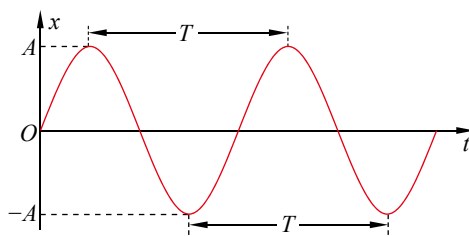


图 2-13 简谐运动的振动图像

## 3. 简谐运动的位移公式

如果以平衡位置为坐标原点，用  $x$  代表振动物体偏离平衡位置的位移，以物体沿  $x$  轴正方向运动至平衡位置的时刻作为计时零点，由简谐运动的图像可知物体的位移  $x$  与时间  $t$

之间的关系可表达为

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

上式称为简谐运动的位移公式。

为了更好地理解简谐运动的位移公式，我们来观察下面的实验。

图 2-14 是演示匀速圆周运动与简谐运动关系的实验示意图。固定在竖直圆盘上的小球  $P$  随着圆盘以角速度  $\omega$  做匀速圆周运动，一束平行光自上而下照射小球，在圆盘下方的屏上可观察到小球投影的运动。小球投影以圆盘圆心在屏上的投影为平衡位置，以小球做圆周运动的半径为振幅（用  $A$  表示），来回振动。

若以圆盘圆心  $O$  的投影为坐标原点，建立如图 2-15 所示的坐标系，以小球  $P$  在圆盘最上端的时刻作为计时零点，则小球  $P$  在  $x$  轴上的投影偏离点  $O$  的位移随时间变化的关系为  $x = A \sin \omega t$ 。将此公式与简谐运动的位移公式对比，不难发现小球在屏上投影的运动为简谐运动。角速度  $\omega$  常被称为简谐运动的圆频率，它与简谐运动周期之间的关系为

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

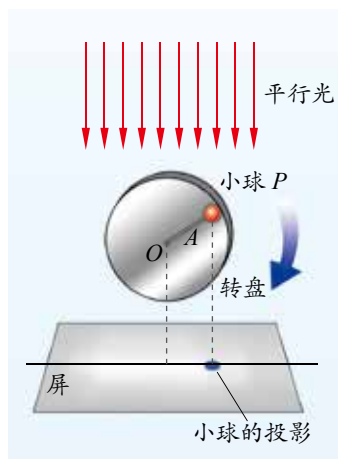


图 2-14 实验示意图

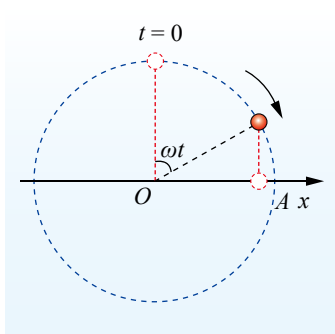


图 2-15 小球顺时针做圆周运动时其投影运动示意图

## 例题

某弹簧振子做简谐运动，其位移随时间变化的关系式为  $x = A \sin \frac{\pi}{4} t$ ，单位为 cm，则弹簧振子

- A. 第 1 s 末与第 3 s 末的位移相同
- B. 第 1 s 末与第 3 s 末的速度相同
- C. 第 3 s 末至第 5 s 末的位移方向都相同
- D. 第 3 s 末至第 5 s 末的速度方向都相同

## 分析

(1) 位移可通过位移公式求解

判断  $t$  时刻的位移，可将时间  $t$  代入关系式  $x = A \sin \frac{\pi}{4} t$  计算。将  $t = 1$  s 和  $t = 3$  s 代入关系式，可求得两时刻位移相同，A 正确。





## (2) 速度可通过位移图像求解

根据位移关系式画出  $x-t$  图像, 将该图像与弹簧振子振动过程对比, 可得如图 2-16 所示的对应图像。

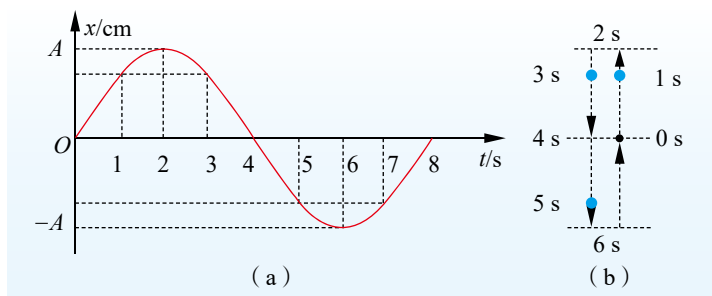


图 2-16  $x-t$  图像与弹簧振子振动过程的对应

第 1 s 末弹簧振子向正方向运动, 远离平衡位置, 而第 3 s 末弹簧振子向负方向运动, 靠近平衡位置, 两个时刻的速度方向相反, B 错误。

第 3 s 末至第 5 s 末的速度方向一直为负, D 正确。

从图像还可看出, 第 3 s 末至第 4 s 末的位移方向为正, 第 4 s 末至第 5 s 末的位移方向为负, C 错误。

所以, 答案为 AD。

### 讨论

做简谐运动物体的位移随时间变化情况, 可通过将时间代入位移公式计算进行判断; 还可通过  $x-t$  图像进行判断。速度随时间变化情况, 可根据  $x-t$  图像判断出物体运动的方向, 再结合振动过程速度的变化特征进行判断; 还可由  $x-t$  图像的切线斜率进行判断。请列举并说明你运用上述判断方法的案例。



## 迁移

简谐运动的  $x-t$  图像还包含了加速度和回复力等信息。请分析上述例题第 3 s 末与第 5 s 末弹簧振子的加速度、受到的回复力、动能和系统的弹性势能是否相同。



## 拓展一步

### 简谐运动的相位

将两个相同的弹簧振子拉离平衡位置, 然后同时释放。两个振子总是同时到达平衡位置和位移最大处, 即总是步调一致 (同步)。

将一个振子拉伸, 另一个振子推压, 然后同时释放, 两个弹簧振子运动的步调正好相反 (图 2-17)。

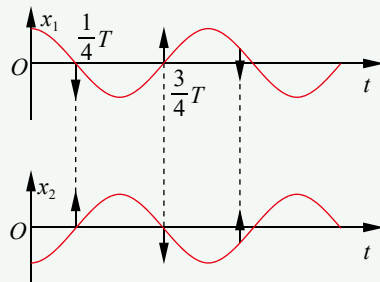


图 2-17 两个振动步调相反的简谐运动图像对比

因此,要详细地描述简谐运动,除了振幅和周期外,还需要引入“相位”的概念。一般情况下,位移与时间的关系式可写成

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0)$$

式中,  $\omega t + \varphi_0$  是简谐运动的相位,  $\varphi_0$  是简谐运动的初相位。

我们常通过计算两个简谐运动的相位差来比较两个振动的先后顺序。当两个振动的相位差是  $2\pi$  的整数倍时,两个振动的步调一致;当两个振动的相位差为  $\pi$  的奇数倍时,两个振动的步调正好相反。

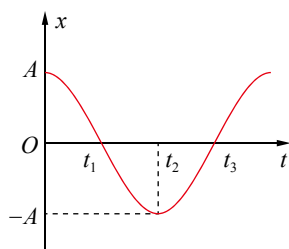


### 节 练 习

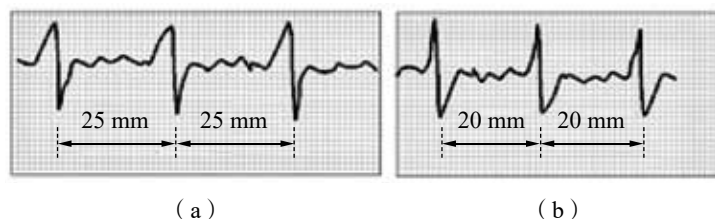
- 如图所示,将三根粗细不同的橡皮筋绕到杯子上,做成一个“弦乐器”。橡皮筋不要相互接触。分别拨动每根橡皮筋,找出哪根发出的声音音调最低,哪根发出的声音音调最高。橡皮筋振动的频率可能与哪些因素有关?与振幅有关吗?
- 一质点做简谐运动的  $x-t$  图像如图所示。下列说法正确的是
  - 该图像是从平衡位置开始计时画出的
  - $t_1$  时刻振子正通过平衡位置向正方向运动
  - $t_2$  时刻振子的位移最大
  - $t_3$  时刻振子正通过平衡位置向正方向运动
- 心电图仪通过一系列的传感手段,可将与人心跳对应的生物电流情况记录在匀速运动的坐标纸上。医生通过心电图,测量相邻两波峰间隔的时间,便可计算出 1 min 内人心脏跳动的次数(即心率)。同一台心电图仪正常工作时测得被检者甲、乙的心电图分别如图(a)(b)所示。若医生测量时记下被检者甲每分钟心跳 60 次,则可推知乙每分钟心跳的次数和这台心电图仪输出坐标纸的走纸速度大小分别为
  - 48 次, 25 mm/s
  - 48 次, 36 mm/s
  - 75 次, 45 mm/s
  - 75 次, 25 mm/s



第 1 题



第 2 题



第 3 题

- 关于固有频率,下列说法正确的是
  - 振幅越大,固有频率越小
  - 所有物体的固有频率都相同
  - 物体不振动时,固有频率为 0
  - 固有频率是由振动系统本身决定的
- 小王在湖边欲乘游船,当日风浪较大,游船上下浮动。若把游船浮动简化成竖直方向的简谐运动,则其振幅为 20 cm,周期为 3.0 s。当船上升到最高点时,甲板刚好与码头地面平齐。在地面与甲板的高度差不超过 10 cm 时,游客能舒服地登船。求在一个周期内,小王能舒服地登船的时间有多少。
- \*6. 一质点在平衡位置  $O$  附近做简谐运动。从它经过平衡位置起开始计时,经 0.13 s,质点第一次通过点  $M$ ;再经 0.1 s,质点第二次通过点  $M$ 。质点振动周期的可能值为多大?

## 第3节

# 单摆

生活中，我们常看到一些小振幅的摆动现象，类似做简谐运动。例如，当摆钟（图 2-18）的摆做小振幅的摆动时，可近似视为做简谐运动。这种摆动为什么可视为简谐运动？本节我们将在建立单摆模型的基础上，学习单摆振动的规律。

### 1. 单摆的振动

把一根不能伸长的细线上端固定，下端拴一个小球，线的质量和球的大小可忽略不计，这种装置称为**单摆**（simple pendulum）。单摆是一种理想化模型。如图 2-19 所示，当摆球静止于点  $O$  时，球所受重力和线对球的拉力彼此平衡。把球拉离点  $O$  由静止释放，球沿着以位置  $O$  为中心的一段圆弧  $BC$  做往复运动，点  $O$  是单摆振动的平衡位置。当球沿圆弧运动到某点  $P$  时，球所受拉力  $T$  与重力  $G$  在摆线方向上的分力  $F'$  的合力提供向心力，不影响球运动的速度大小；重力沿圆弧切线方向的分力  $F$  则会改变球沿圆弧运动的速度大小。当球处于平衡位置右侧时， $F$  指向左方；当球处于平衡位置左侧时， $F$  指向右方。可见，重力沿圆弧切向的分力  $F$  提供了使球沿圆弧振动的回复力。

在摆角很小的情况下（通常  $\theta < 5^\circ$ ）， $\sin \theta \approx \frac{x}{l}$ ， $F$  可表示为

$$F = -mgsin \theta \approx -\frac{mg}{l}x$$

式中， $l$  为摆长， $x$  为摆球离开平衡位置的位移，负号表示  $F$  的方向与位移  $x$  的方向相反。

对一个确定的单摆来说， $m$ 、 $l$ 、 $g$  是一定的， $\frac{mg}{l}$  是一个常数。上式表明，在摆角很小的情况下，单摆所受回复力大小与摆球位移大小成正比，方向与摆球位移方向相反。由此可知，在摆角很小的情况下，单摆的振动可近似视为简谐运动。



图 2-18 摆钟

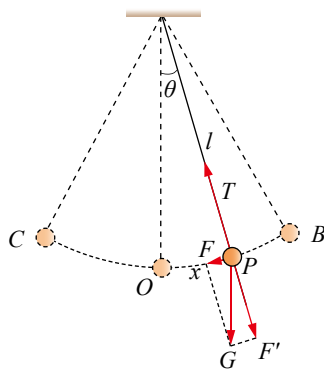


图 2-19 单摆受力分析示意图



## 物理聊吧

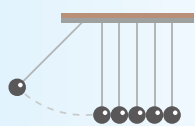
简谐运动可用振动图像描述。你能用简单可行的实验方法画出单摆做简谐运动的振动图像吗？请设计方案，先与同学讨论交流方案的可行性，再动手做一做。

## 2. 单摆的周期

观察周围现象，你会发现生活中有些摆周期较小，有些摆周期较大。同学们还可自己做一个单摆，测出其周期，并与其他同学所做的单摆进行比较。你会发现，不同单摆的周期往往不同。单摆的周期由哪些因素决定呢？

我们可这样猜想：可能与单摆装置本身有关，如摆球质量、摆长；还可能与振幅有关……

下面我们采用控制变量法来进行相关探究。



## 实验与探究

## 探究影响单摆振动周期的因素

取两个摆长和摆球质量都相等的单摆（图 2-20），将两摆球拉离平衡位置，其中一个摆球拉到摆角约  $4^\circ$  处，另一个摆球拉到摆角约  $2^\circ$  处，皆由静止释放。比较两个单摆的周期，探究周期与振幅的关系。

取两个摆长相等、摆球质量不等的单摆，将两摆球拉至相同的摆角，由静止释放。比较两个单摆的周期，探究周期与摆球质量的关系。

取两个摆长不等、摆球质量相等的单摆，将两摆球拉至相同的摆角，由静止释放。比较两个单摆的周期，探究周期与摆长的关系。

请重复以上实验，自行设计表格，记录并分析数据，你可得出什么结论？

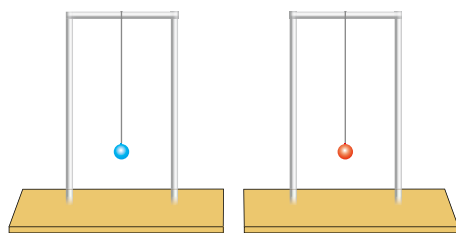


图 2-20 实验装置示意图

进一步研究表明，单摆做简谐运动的周期  $T$  与摆长  $l$  的算术平方根成正比，与重力加速度  $g$  的算术平方根成反比，关系式可表示为

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

上式称为单摆周期公式，是荷兰物理学家惠更斯首先提出的。



在同一地点，重力加速度是一定的，摆长相等的单摆具有相同且恒定不变的振动周期，单摆周期与振幅及摆球质量皆无关。人们利用单摆的这一性质来计量时间，制成了摆钟。如果能测出单摆的摆长和周期，也可利用单摆的周期公式测量当地的重力加速度。

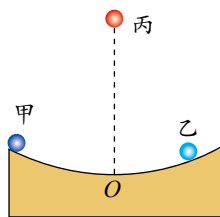
能在熟悉的问题情境中运用简谐运动、弹簧振子和单摆等物理模型解决机械振动的问题；能分析与机械振动相关的问题，通过推理得出结论并能解释；能用与机械振动相关的证据解释生产生活中的机械振动现象；能从相互作用和能量等不同角度认识机械振动，能质疑他人的观点。

——科学思维

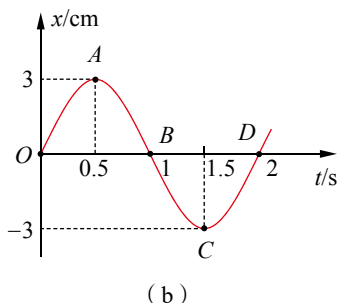
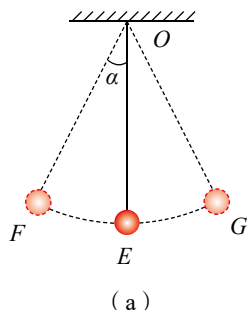


## 节 练 习

- 关于单摆做简谐运动，下列说法正确的是
  - 经过平衡位置时所受的合力为 0
  - 经过平衡位置时所受的回复力为 0
  - 回复力是重力和摆线拉力的合力
  - 回复力是重力沿圆弧切线方向的分力
- 甲、乙两个单摆在同一地点做简谐运动，当甲摆振动 20 次时，乙摆振动了 40 次。求甲、乙两摆的振动周期之比和摆长之比。
- 如图所示，光滑圆槽的半径  $R$  远大于小球运动的弧长。甲、乙、丙三个小球（均可视为质点）同时由静止释放，开始时，甲球比乙球离槽最低点  $O$  远些，丙球在槽的圆心处。请比较它们第一次到达点  $O$  的先后顺序，并说明理由。
- 已知在月球上重力加速度约为  $1.6 \text{ m/s}^2$ 。若做一单摆，使其在月球上的振动周期为  $2.0 \text{ s}$ ，那么摆长应为多少？
- 某单摆及其振动图像如图所示。
  - 若取从  $E$  指向  $G$  为正方向， $\alpha$  为最大摆角，则图像中点  $O$ 、 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  分别对应单摆中的哪个位置？一个周期内回复力为正且减小、并与速度同方向的时间范围是多少？势能增加且速度为正的时间范围是多少？
  - 单摆摆球多次通过位置  $E$  时，哪些相关物理量发生了变化？
  - 单摆的摆长是多少？（取重力加速度  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ， $\pi^2 = 10$ ）



第 3 题



第 5 题

- 某同学用单摆测定一座山的海拔，在山顶上他测得摆长为  $l$  的单摆做简谐运动的周期为  $T$ 。已知引力常量为  $G$ ，地球质量为  $M$ ，地球半径为  $R$ 。求山顶的海拔。



## 第4节

# 科学测量：用单摆测量重力加速度

物理量的测量通常有多种方法。我们已学过用打点计时器或频闪照相来测量重力加速度。下面，我们通过单摆来测量重力加速度的大小。

### 实验目的

- (1) 用单摆测量重力加速度。
- (2) 会使用秒表测量时间。
- (3) 能分析实验误差的来源，并能采用适当方法减小测量误差。

### 实验器材

长约 1 m 的细线、开有小孔的金属小球、带有铁夹的铁架台、刻度尺、秒表、游标卡尺。

### 实验原理与设计

单摆做简谐运动时，由周期公式  $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ ，可得  $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$ 。因此，测出单摆摆长和振动周期，便可计算出当地的重力加速度。

用秒表测量 30 ~ 50 次全振动的时间，计算平均做一次全振动的时间，得到的便是振动周期。

### 实验步骤

(1) 取长约 1 m 的细线，细线的一端连接小球，另一端用铁夹固定在铁架台上，让摆球自由下垂，如图 2-21 所示。

(2) 用刻度尺测摆线长度  $l_{\text{线}}$ ，用游标卡尺测小球的直径  $d$ 。测量多次，取平均值，计算摆长  $l = l_{\text{线}} + \frac{d}{2}$ 。

(3) 将小球从平衡位置拉至一个偏角小于  $5^\circ$  的位置并由静止释放，使其在竖直面内振动。待振动稳定后，从小球经过平衡位置时开始用秒表计时，测量  $N$  次全振动的时间  $t$ ，则周期  $T = \frac{t}{N}$ 。如此重复多次，取平均值。



### 安全警示

按操作规程使用秒表、游标卡尺等器材，轻拿轻放金属小球等，不要随意甩动小球，以免伤人。

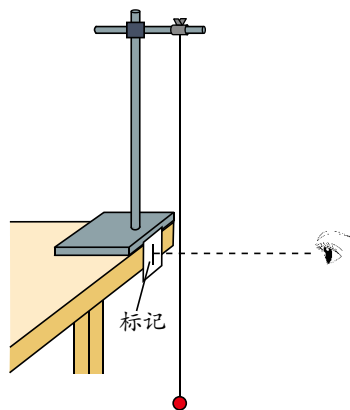


图 2-21 实验装置示意图



(4) 改变摆长，重复实验多次。

(5) 将每次实验得到的  $l$ 、 $T$  代入  $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$  计算重力加速度，取平均值，即为测得的当地重力加速度。

### 数据分析

将测量的数据记入你设计的表格中，并分析数据，形成结论。

### 实验结论

写出实验结论。

### 讨论

(1) 通过哪些方式可使小球的运动更加接近简谐运动？

(2) 为什么要从平衡位置开始计时、计数？为什么不用秒表直接测量一次全振动的时间作为周期？除秒表外，测量时间还可选用哪些器材？

(3) 你还能用什么方法测量重力加速度？

能分析相关事实，提出并准确表述在实验中可能出现的物理问题；能在他人帮助下制订实验方案，能选用实验器材进行实验，获得实验数据，能注意减小实验误差；能分析数据，测得重力加速度的大小；能撰写规范的实验报告，在报告中能呈现设计的实验表格、数据分析过程及实验结论，能反思评估关于重力加速度的不同测量方法。

注意提升实验测量能力与误差分析能力。  
——科学探究

素养提升



### 物理聊吧

除了用公式法处理数据外，还可用图像法处理数据。图 2-22 是某同学作出的  $T^2-l$  图像，如何从图像中求出重力加速度？请与同学交流你的想法。

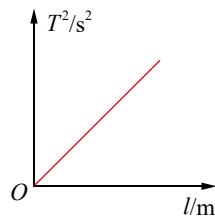


图 2-22 单摆的  $T^2-l$  图像



### 科学书屋

#### 秒表

秒表可分为机械秒表和电子秒表。机械秒表有大、小两个表盘（图 2-23），秒针沿大表盘转动，分针沿小表盘转动。通常，秒针转一圈所用的时间为 30 s，最小分度为 0.1 s。秒针每转过一圈，分针相应转过半格。分针和秒针所指示的时间之和为所测的时间。图中，分针转过半格，即示数为 30 s，秒针示数为 3.4 s，故所测时间为 33.4 s。秒针的转动是通过齿轮传动的，不可能停在两格中间，所以



图 2-23 机械秒表

不需要估读。秒表上方的按钮起着控制指针走动和扭紧发条的作用。使用时先扭紧发条，按下按钮，秒表开始计时；再按下按钮，秒表停止计时，进行读数；再按一次，秒表回零，准备下一次计时。

电子秒表采用液晶数字显示时间。通常，按一下 START/STOP 按钮，开始自动计时；再按一下，停止计时并显示出所记录的时间；然后按 LAP/RESET 键回零。手机一般也有秒表的计时功能（图 2-24）。

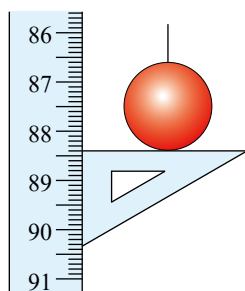


图 2-24 手机的秒表计时



### 节 练 习

1. 请撰写“用单摆测量重力加速度的大小”的实验报告。注意在报告中呈现设计的实验表格以及数据分析过程和实验结论，讨论重力加速度的不同测量方法的特点。
2. 在“用单摆测量重力加速度的大小”实验中，某同学发现他测出的重力加速度值总是偏小，可能有哪些原因？
3. 一位同学用单摆测量重力加速度，他将单摆挂起后，进行了如下操作。请指出下列步骤中遗漏或错误的地方，并加以改正。
  - (1) 测摆长  $l$ ：用刻度尺量出摆线的长度。
  - (2) 测周期  $T$ ：将小球拉起，由静止释放，在小球某次通过最低点时，按下秒表开始计时，同时将本次通过最低点记为第 1 次；接着一直数到小球第 60 次通过最低点时，按下秒表停止计时；读出这段时间  $t$ ，算出单摆的周期  $T = \frac{t}{60}$ 。
  - (3) 将所测得的  $l$  和  $T$  代入公式  $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ ，算出  $g$ ，将其作为实验结果写入报告中。
4. 在做“用单摆测量重力加速度的大小”实验时，如果已知小球直径为 1.80 cm，让刻度尺的 0 刻度线对准摆线的悬点，摆线竖直下垂，下端刻度如图 (a) 所示，那么单摆的摆长是 \_\_\_\_\_ m。若测定 40 次全振动的时间如图 (b) 中秒表所示，则秒表读数是 \_\_\_\_\_ s，单摆的振动周期是 \_\_\_\_\_ s。由此得到的重力加速度  $g =$  \_\_\_\_\_  $\text{m/s}^2$ 。



(a)



(b)

第 4 题



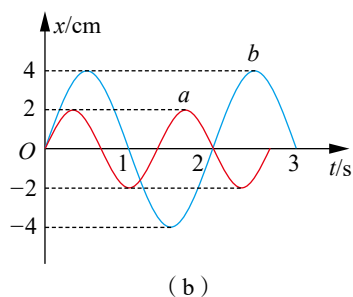
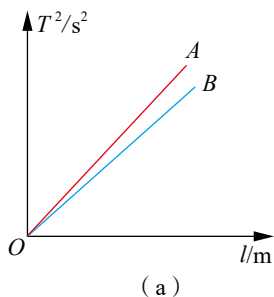
5. 某同学在做“用单摆测量重力加速度的大小”实验时，测量了5种不同摆长情况下单摆的振动周期，记录数据如下：

摆长 $l/\text{m}$	0.500 0	0.800 0	0.900 0	1.000 0	1.200 0
周期 $T/\text{s}$	1.42	1.79	1.90	2.00	2.20
$T^2/\text{s}^2$	2.02	3.20	3.61	4.00	4.84

- (1) 根据表中数据画出  $T^2-l$  图像；
  - (2) 求此图像的斜率；
  - (3) 由此图像求重力加速度。
6. 北京和广州的两位同学，分别探究单摆的周期  $T$  与摆长  $l$  的关系，通过网络交流绘制了  $T^2-l$  图像，如图 (a) 所示。

(1) 北京的同学所测实验结果可能对应的图像是  $A$  和  $B$  中的哪一个？请说明理由。

(2) 广州的同学还绘制了不同摆长的单摆的振动图像，如图 (b) 所示。由图可知两单摆摆长之比  $\frac{l_a}{l_b}$  为多少？



第6题

请提问





## 第5节

# 生活中的振动

振动现象在自然界和日常生活中广泛存在。弹簧振子和单摆皆属于理想模型，振动过程中系统的机械能守恒，振幅不变。然而，实际生活中的各类振动，往往存在振动阻力或其他外力的影响。这种情况下，物体振动有怎样的特点呢？本节我们将学习阻尼振动、受迫振动以及共振的相关知识。

### 1. 阻尼振动

对于一个振动系统，若振动物体偏离平衡位置后，仅在回复力作用下振动，这种振动就是自由振动。在实际振动过程中，由于存在阻力，振动物体需不断克服阻力做功，系统的机械能不断减小，导致振幅不断减小，直至停止振动。物理学中，把振幅不断减小的振动称为**阻尼振动**（damped vibration）。图 2-25 是一种阻尼振动装置及其振动图像，由于水的阻力作用，物体的振幅逐渐减小。

在生产生活中，如果想让物体尽快停止振动，需增大阻力。例如，汽车在凹凸不平的路面行驶时会发生剧烈振动，通过减震器（图 2-26）增大阻力，可使振动很快停止。仪表的指针在指示测量结果时常左右摆动，很难准确读数。可让指针摆动时受到适当的阻力，使之迅速停下来，以便于读数。

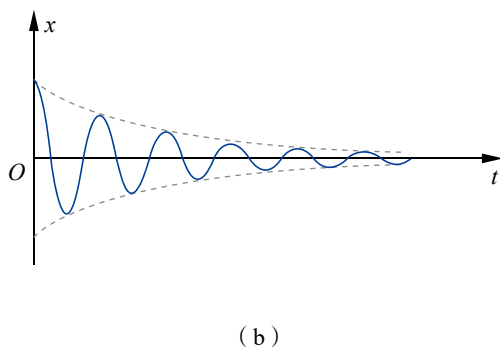
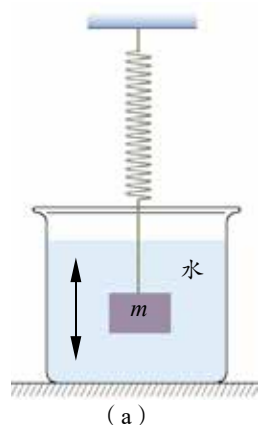


图 2-25 一种阻尼振动装置及其振动图像



图 2-26 汽车上的减震器

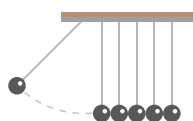
有时我们希望物体在某一段时间内的运动接近简谐运动，则应减小阻力。例如，我们隔一段时间对摆钟进行清洗，并在轴承中加润滑油，这都是为了减小阻力。



## 2. 受迫振动与共振

在实际的振动过程中，阻力总是客观存在的，只能设法减小而不能完全消除。所以，实际的振动如果没有能量的不断补充，最终会停下来。为了获得稳定的振动，通常需要给振动物体施加一个周期性的外力。例如，通电后，电磁打点计时器的振动片在永久磁铁的周期性外力作用下才会上下振动。这种周期性的外力称为驱动力（或强迫力）。在周期性外力作用下产生的振动称为**受迫振动**（forced vibration）。

受迫振动的周期和振幅遵循什么规律呢？



### 实验与探究

#### 影响受迫振动周期的因素

安装好实验装置（图 2-27）。匀速转动摇把，摇把对弹簧振子施加周期性的驱动力，使振子做受迫振动，驱动力的周期与摇把转动的周期相同。

先让弹簧振子做自由振动，测量它的固有周期。然后转动摇把，记录摇把转动的周期。待弹簧振子振动稳定后，再记录弹簧振子做受迫振动的周期。改变摇把的转速，重复上述实验步骤。

将弹簧振子做受迫振动的周期与弹簧振子的固有周期、摇把转动的周期进行比较，找出弹簧振子做受迫振动的周期变化规律。

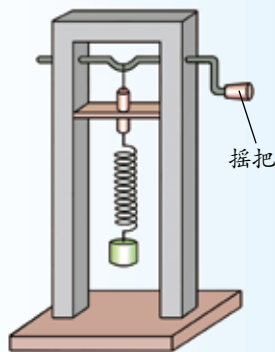


图 2-27 实验装置示意图

大量实验研究表明，物体做受迫振动时，振动稳定后的周期（或频率）总等于驱动力的周期（或频率），与物体的固有周期（或固有频率）无关。

在上述实验中，我们会发现，摇把转动的周期越接近弹簧振子的固有周期，弹簧振子做受迫振动的振幅就越大。因此，我们猜想：物体做受迫振动时，驱动力的周期会对振幅产生一定的影响。下面我们通过实验进一步探究二者之间的关系。



### 迷你实验室

#### 共振现象

在支架上拴一条水平细绳，绳上间隔悬挂一些单摆（图 2-28），其中摆 A 和摆 D 的摆长相等（固有周期相同）。

将摆 A 拉离平衡位置，由静止释放后，摆 A 的摆动通过张紧的细绳对其他摆施加了一个周期

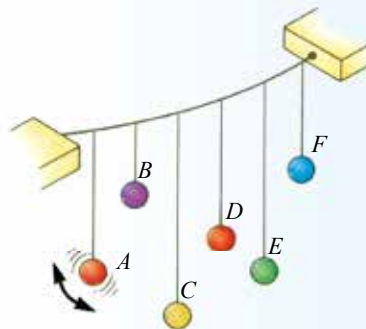


图 2-28 实验装置示意图

性驱动力，且驱动力的周期等于摆  $A$  的固有周期，其他摆在此驱动力的作用下做受迫振动。

一段时间后，可发现固有周期与摆  $A$  周期相差越小的摆振幅越大，与摆  $A$  周期相同的摆  $D$  的振幅最大。

上述实验表明，物体做受迫振动时，驱动力的周期（或频率）与物体的固有周期（或固有频率）相差越小，受迫振动的振幅就越大（图 2-29）。当驱动力的周期（或频率）与物体的固有周期（或固有频率）相等时，受迫振动的振幅达到最大，这种现象称为**共振**（resonance）。

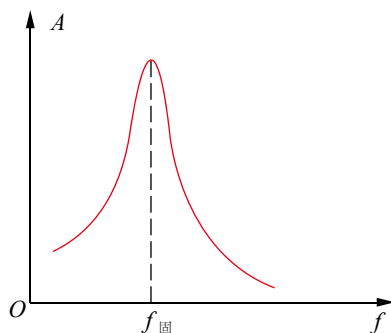


图 2-29 受迫振动的振幅与驱动力频率的关系



### 物理聊吧

荡过秋千的人都有这种经验：轻推一下使它微微摆动后，只要按照它的固有频率周期性地施加推力，尽管每次的推力都很小，经过一段时间，秋千也会荡得很高（图 2-30）。这是为什么？请与同学讨论交流。



图 2-30 秋千的摆动

## 3. 共振的应用与防止

### （1）共振的应用

在生产生活中，共振现象很常见。例如，路面共振破碎机是一种路面破碎机械，用于旧水泥路面的破碎（图 2-31）。它的原理是通过调节振动锤头的振动频率，使其等于或接近水泥路面的固有频率，从而使锤头下的水泥路面因局部范围产生共振而被击碎。这种路面共振破碎机具有破碎效率高、破碎深度大等特点。



图 2-31 路面共振破碎机破碎路面



音叉共鸣箱（图 2-32）也是应用共振的一个典型例子。把某一频率的音叉插在一端开口的共鸣箱上，当敲击音叉使它振动时，箱内的空气柱能产生共振，发出较响的声音，这种现象称为共鸣。共鸣是一种声共振现象。一些乐器如吉他、二胡、小提琴等，为增大音量，都带有一个共鸣箱。



图 2-32 音叉共鸣箱



## 科学书屋

### 利用共振粗略测量机器振动频率

如图 2-33 所示，把一些固有频率不同的钢片装在同一个支架上，可制成能粗略测量机器振动频率的装置。将该装置与工作着的机器紧密接触，机器的振动会引起固有频率与机器振动频率最接近的那个钢片产生较大的振幅。读出这个钢片的固有频率，就可粗略了解机器的振动频率。

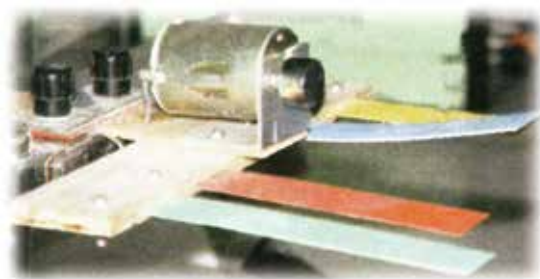


图 2-33 粗测机器的振动频率

## (2) 共振的防止

有些情况下共振会造成严重后果。例如，轮船航行时，常会受到周期性的海浪冲击而摆动，如果海浪冲击力的频率与轮船的固有频率相同，就会发生共振，轮船可能会剧烈摇摆甚至倾覆。人们常通过改变轮船的航向和速率，使海浪冲击力的频率与轮船的固有频率相差很大，以此防止共振发生。集体列队经过桥梁时要便步走，以防对桥梁形成的周期性驱动力使桥梁发生共振。许多机电设备，如车床、磨床、电锯等，工作时都会伴随不同程度的振动，要防止它们产生共振现象。

科学研究表明，人体各个部位的固有频率不同，如大脑的固有频率为  $8 \sim 12 \text{ Hz}$ ，人的内脏器官的固有频率为  $4 \sim 8 \text{ Hz}$ 。人们在生产生活中接触的各种外界振动源，很容易引起人体器官的共振，对人体造成伤害。因此，接近振动源时，应该设法防止共振对身体造成不良影响。

能认识简谐运动的特征，能用公式和图像描述简谐运动，知道单摆周期与摆长、重力加速度的定量关系，能了解受迫振动、共振等的内涵；能说明与简谐运动、受迫振动及共振有关的生产生活中的一些应用实例，能解释一些机械振动现象。具有与机械振动相关的运动观念、相互作用观念和能量观念。

——物理观念

素养提升

**物理在线** 同学们可到科技馆或上网查询，调研“鱼洗”等与共振有怎样的联系，进一步了解共振在生产生活中的应用与防止。





### 科学书屋

#### 塔科马海峡大桥的垮塌

桥梁，特别是悬索桥，很容易受到风力的侵害。1940年，美国建成了塔科马海峡大桥。然而，几个月后，该桥在实际风速不到设计风速限值三分之一的风力袭击下遭到破坏而垮塌（图2-34）。

从目击者的描述及拍摄的影像可看出，事故的原因是风力引起的强烈振动。这一事故使人们更加重视建筑的风致振动问题。



图2-34 塔科马海峡大桥垮塌瞬间

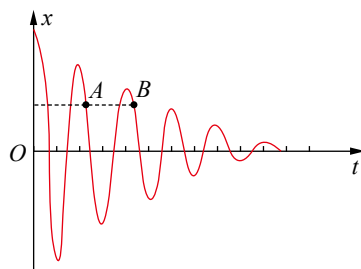


### 节练习

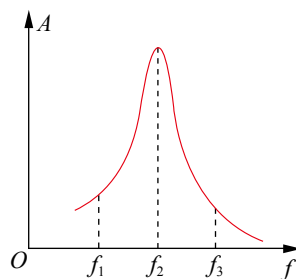
- 我国古代有不少巧妙利用共振现象的记录。例如，在《墨子》中记载：“令陶者为罍，容四十斗以上，固顺之以薄鞞革，置井中，使聪耳者伏罍而听之，审知穴之所在，凿穴迎之。”请查询相关内容，谈谈你对此段话的理解。
- 某单摆做阻尼振动的振动图像如图所示。请根据图像比较A、B对应时刻，摆球具有的动能、重力势能和机械能的大小，并说明理由。
- 正在运转的机器，当其飞轮以角速度 $\omega_0$ 匀速转动时，机器的振动并不强烈；切断电源，飞轮的转动逐渐慢下来，在某一小段时间内机器却发生了强烈的振动；此后，飞轮转速继续变慢，机器的振动也随之减弱。在机器停下来之后，若重新启动机器使飞轮转动的角速度从0较缓慢地增大到 $\omega_0$ ，在这一过程中
  - 机器不一定会发生强烈振动
  - 机器一定会发生强烈振动
  - 若机器发生强烈振动，则当时飞轮角速度为 $\omega_0$
  - 若机器发生强烈振动，则当时飞轮角速度肯定小于 $\omega_0$
- 一弹簧振子做受迫振动时的振幅与驱动力频率的关系如图所示。下列说法正确的是
  - 假如让振子自由振动，它的频率为 $f_2$
  - 驱动力的频率为 $f_2$ 时，振子处于共振状态
  - 驱动力的频率为 $f_3$ 时，振子的振动频率为 $f_3$
  - 振子做自由振动时，频率可能为 $f_1$ 、 $f_2$ 和 $f_3$
- 在接近收费口的道路上安装了若干条凸起于路面且与车辆行驶方向垂直的减速带，减速带间距为10 m，当车辆经过减速带时会产生振动。若某汽车的固有频率为1.25 Hz，当该车以多大速度行驶在此减速区时颠簸得最厉害？
- 上海中心大厦高632 m，上面安装有重达1 000 t的风阻尼器。请查阅相关资料，了解它的作用及工作原理。



第1题



第2题



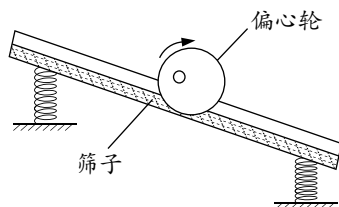
第4题



## 章末练习

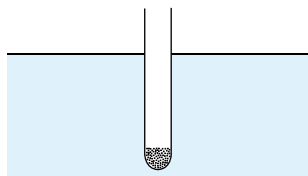
### 科学认知

- 如图所示,把一个筛子用弹簧支起来,筛子上有一个电动偏心轮,它每转一周,会给筛子一个驱动力,这样就做成了一个共振筛。筛子做自由振动时,完成10次全振动用时15 s。在某电压下,电动偏心轮的转速是36 r/min。已知增大电压可使偏心轮的转速提高,增加筛子质量可使筛子的固有周期增大。要使筛子的振幅增大,可采用哪些方法?请说明理由。

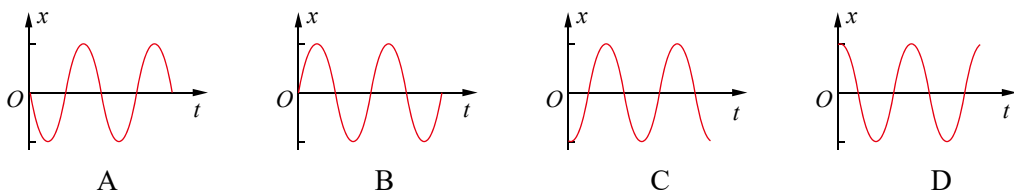


第1题

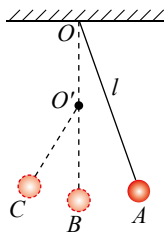
- 如图所示,装有砂粒的试管竖直静浮于水中。将试管竖直提起少许,然后由静止释放并开始计时,在一定时间内试管在竖直方向近似做简谐运动。若取竖直向上为正方向,下列描述试管振动的图像可能正确的是



第2题

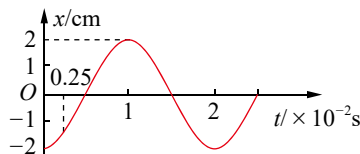


- 某质点做简谐运动。从该质点经过某一位置时开始计时,则
  - 当质点再次经过此位置时,经过的时间为一个周期
  - 当质点的速度再次与零时刻的速度相同时,经过的时间为一个周期
  - 当质点的加速度再次与零时刻的加速度相同时,经过的时间为一个周期
  - 当质点经过的路程为振幅的4倍时,经过的时间为一个周期
- 如图所示,一单摆悬于点O,摆长为 $l$ ,在点O正下方的点O'处钉一颗钉子,且使 $OO' = \frac{l}{2}$ 。将摆球拉至A处由静止释放,摆球将在A、B、C间来回振动。若振动过程中摆线与竖直方向的夹角均小于 $5^\circ$ ,此单摆的周期为多大?



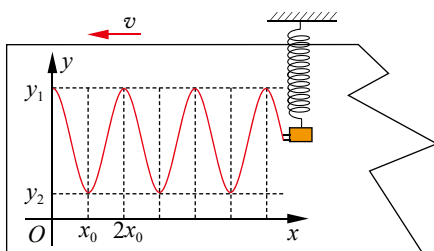
第4题

- 一水平弹簧振子做简谐运动,其位移随时间变化的关系如图所示。



第5题

- 求 $t = 0.25 \times 10^{-2}$  s时的位移。
  - 从 $t = 1.5 \times 10^{-2}$  s到 $t = 2 \times 10^{-2}$  s这段时间内,振子的位移、受到的回复力、速度、动能和弹簧的弹性势能如何变化?
  - 从 $t = 0$ 到 $t = 8.5 \times 10^{-2}$  s这段时间内,质点的路程为多大?
- 一竖直悬挂的弹簧振子,下端装有一记录笔,在竖直面内放置一记录纸。当振子上下振动时,以速率 $v$ 水平向左拉动记录纸,记录笔在纸上留下如图所示的图像。 $y_1$ 、 $y_2$ 、 $x_0$ 、 $2x_0$ 为纸上印迹的位置坐标。求该弹簧振子振动的周期和振幅。

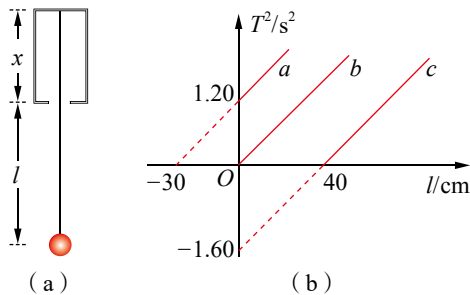


第6题

- \*7. 一单摆在地面处的摆动周期与其在某矿井底部的摆动周期的比值为  $k$ 。设地球的半径为  $R$  并假定其密度均匀, 已知质量均匀分布的球壳对壳内物体的引力为 0, 求矿井的深度  $d$ 。

### 科学探究

8. 将一单摆竖直悬挂于一深度未知且开口向下的小筒中, 单摆的下部露于筒外, 如图 (a) 所示。将摆球拉离平衡位置一个小角度后由静止释放, 设单摆摆动过程中悬线不会碰到筒壁。如果本实验的长度测量工具只能测量筒的下端口到摆球球心的距离  $l$ , 并通过改变  $l$  测出对应的摆动周期  $T$ , 作出  $T^2-l$  图像, 那么可通过此图像得出小筒的深度  $x$  和当地的重力加速度  $g$ 。



第 8 题

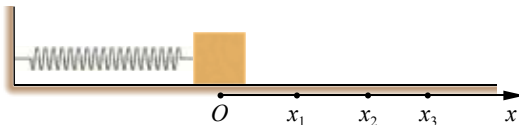
- (1) 若有游标卡尺、秒表、天平、毫米刻度尺几种测量工具, 则本实验所需的测量工具为 \_\_\_\_\_。
- (2) 实验中所得到的  $T^2-l$  图像应是如图 (b) 所示  $a$ 、 $b$ 、 $c$  中的 \_\_\_\_\_。
- (3) 由图像可知, 小筒的深度  $x =$  \_\_\_\_\_ m, 当地的重力加速度  $g =$  \_\_\_\_\_  $\text{m/s}^2$ 。

### 科技交流

9. 21 世纪, 正在蓬勃发展的信息技术、纳米材料、航天科学技术等大量应用了共振技术。请同学们通过网络、图书馆查阅相关资料, 找出几个与共振有关的典型例子, 写一篇科技论文, 然后相互交流。

### 温故知新

- \*10. 如图所示, 弹簧的一端固定, 另一端连接一个物块 (可视为质点), 弹簧质量不计。物块的质量为  $m$ , 在水平桌面上沿  $x$  轴运动。以弹簧原长时物块的位置为坐标原点  $O$ , 当弹簧的伸长量为  $x$  时, 物块所受弹簧弹力大小  $F=kx$ ,  $k$  为常量。



第 10 题

- (1) 请画出  $F$  随  $x$  变化的图像, 并根据  $F-x$  图像求物块沿  $x$  轴从点  $O$  运动到位置  $x$  的过程中弹力所做的功。
- (2) 物块由  $x_1$  向右运动到  $x_3$ , 然后由  $x_3$  返回到  $x_2$ 。求在这个过程中弹力所做的功及弹性势能的变化量。



### 我的学习总结



# 第3章

## 机械波

导 入 身边的波

第1节 波的形成和描述

第2节 波的反射和折射

第3节 波的干涉和衍射

第4节 多普勒效应及其应用

### ▶▶ 本章学业要求

● 能了解波、横波和纵波的内涵，能理解波速、波长和频率的定量关系，能认识波的反射、折射、干涉、衍射及多普勒效应等现象；能解释身边与机械波有关的物理现象。具有与机械波相关的运动与相互作用观念和能量观念。——物理观念

● 能在熟悉的问题情境中运用简谐波模型解释机械波的问题；能分析与机械波相关的问题，通过推理得到结论并能解释；能通过波的干涉、衍射规律等来说明机械波的波动性；能从相互作用和能量等不同角度认识机械波，能质疑他人的观点。

——科学思维

● 能观察并探究有关机械波的实验现象，提出并较准确表述可探究的物理问题；能自主观察一些与机械波相关的实验现象，收集证据，形成结论；能用与机械波相关的物理知识解释所观察的现象；能与他人协作，共同探究感兴趣的物理问题。

——科学探究

● 能认识物理研究是对自然现象进行抽象的创造性工作；有自主学习物理、探索身边的物理问题的兴趣；能关注本地区的一些科学普及活动。——科学态度与责任



## 导 人

# 身边的波

各式各样的波就在我们身边。池塘里碧波荡漾、大海中波浪滔天，这是看得见的水波；音乐厅琴声缭绕使人心潮激荡，这是听得到、看不见的声波；地震时房屋倒塌、桥梁断裂，这源于破坏力极大的地震波。除此之外，还有五彩斑斓的光波、传递信息的无线电波等。像水波、声波、地震波那样传播时需要介质的波属于机械波；光波、无线电波在真空中也能传播，传播时不需要介质，这些波属于电磁波。



池塘里——碧波荡漾



音乐厅——声波缭绕

本章，我们学习机械波。机械波有什么特点？它们在传播过程中有什么规律？人们又是如何利用这些规律的呢？

下面，让我们共同去揭开机械波的奥秘吧！



## 第1节

# 波的形成和描述

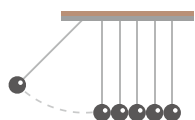
随着一滴滴晶莹剔透的水珠落向平静的水面，水面上出现了一圈圈的波纹，逐渐向远处扩散开来（图 3-1）。波是怎样形成与传播的？本节我们将学习波的形成、分类及描述波的物理量。



图 3-1 美丽的水波

## 1.波的形成与传播

波是怎样形成的？让我们先观察下面的实验。



### 实验与探究

#### 波的形成

如图 3-2 所示，把软绳的一端系在墙上，用手抓住绳子的另一端上下振动，可看见沿绳传播的波。



图 3-2 振动绳子形成波

实验表明，当绳的一端在手的作用下振动时，绳上的各点都会受到影响并随之振动起来，于是在绳上形成波。同样，水面上某点的连续振动沿水面传播，就形成了水波。声带振动在空气中传播形成声波，地球内部的运动在地壳中传播形成地震波。这里，振动的绳端、水面上的振动点、振动的声带、地震的震源等称为波源。绳、水、空气、地壳等都是传播波的物质，称为介质。机械振动在介质中传播形成的波称为**机械波**（mechanical wave），简称波。波源和介质是形成机械波的条件。

机械振动在介质中是怎样传播的？我们以绳波为例来说明。设想把绳分成许多小的部分，每一小部分可视为质点，相邻两质点间有相互作用。如图 3-3 所示，质点 1 在外力作用下振动后，会带动质点 2 振动，只是质点 2 的振动要比质点 1 滞后一些。这样，前一个质点的振动总是带动后一个质点振动，依次带动下去，振动也就由发生区域向远处传播。各质点依次振动，在同一时刻各质点的空间位置不同，因此从整条绳看就形成了凸凹相间的波形，波形随时间沿传播方向传播出去，从而形成了波。

在前面的实验探究中，若在绳上系一根红丝带，红丝带只上下振动，并不随波前进。由此可见，机械波向外传递的是机械振动这种运动形式，介质中每个质点仅在平衡位置附近振动，并不随波向前移动。这有些像球场看台上的精彩人浪，人浪不断移动，但每个观众只需择时站立举手即可。舞台表演的波动，每个舞者也只需做上下动作即可（图 3-4）。

介质中本来静止的质点，随着波的传播而发生振动，表明这些振动质点获得了能量，这个能量是从波源通过前面的质点依次传来的。所以，波在传递振动的同时，也将波源的能量传递出去。若持续给波源提供能量，就能持续以波的形式把波源的能量传递出去。因此，波也是传递能量的一种方式。

## 2. 波的分类

根据质点的振动方向和波的传播方向之间的关系，可把机械波分为横波和纵波两类。

当波在绳上沿水平方向传播时，绳上各质点做上下振动，二者的方向相互垂直。物理学中，把质点的振动方向与波的传播方向垂直的波称为**横波**（transverse wave）。横波凸起的最高处称为波峰，凹下的最低处称为波谷（图 3-5）。

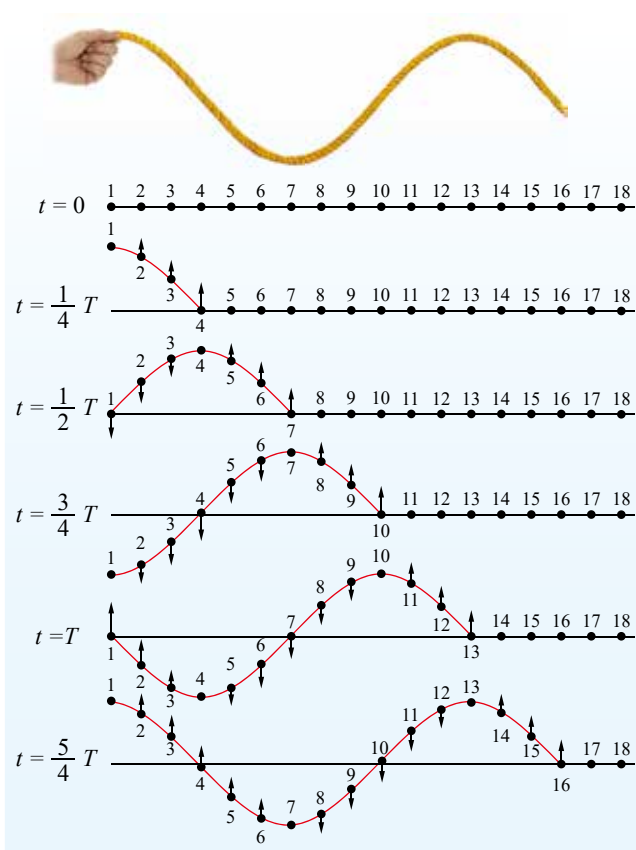


图 3-3 波形形成示意图



图 3-4 舞台表演的波动

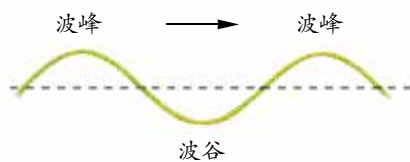


图 3-5 绳上形成横波示意图



如果我们在长弹簧的一端沿着其轴线方向来回推拉，就会在弹簧中看到波动现象，这个波动情景与绳波的波动不同。弹簧会形成密集的部分和稀疏的部分，弹簧分布最密的地方称为密部，分布最疏的地方称为疏部，密部和疏部相间地从一端传到另一端形成波，弹簧内部的质点在波的传播方向上回来振动。物理学中，把质点的振动方向与波的传播方向在同一直线上的波称为**纵波**（longitudinal wave，图 3-6）。声波就是纵波。在空气中，发声物体的振动会使它周围的空气发生疏密变化，这种疏密相间的状态向外传播便形成了声波（图 3-7）。

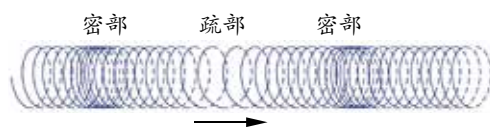


图 3-6 弹簧上形成纵波示意图

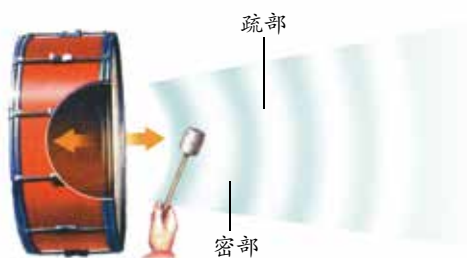


图 3-7 鼓面振动形成声波示意图

## 迷你实验室

### 会跳舞的火焰

如图 3-8 所示，将一支燃烧的蜡烛放在音响喇叭的纸盆前，让音响播放音乐，开大音量，蜡烛的火焰会随着音乐来回摆动，就像在跳舞一样。请思考蜡烛火焰的摆动与纵波有什么联系。

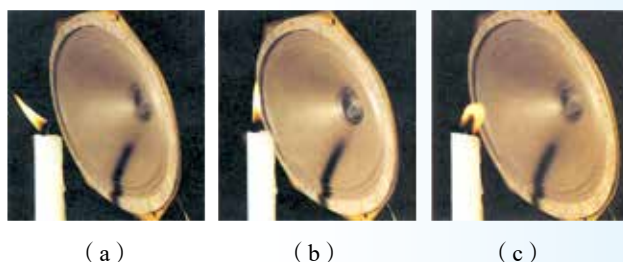


图 3-8 会跳舞的火焰

有的波，既包含横波，又包含纵波，如地震波。在震中附近，横波引起地面水平晃动，纵波引起地面上下颠簸。因为纵波在地球内部的传播速度大于横波，所以地震时，人们一般先感觉到上下颠簸，然后才感觉到有很强的水平晃动。横波是地震造成破坏的主要原因。

## 3. 波的描述

波在介质中传播时，各质点都在平衡位置附近振动，而整个波形不断地向前传播。如何描述一列波的运动情况呢？

### (1) 波的图像

若在绳波传播的某个时刻拍下照片，就能得到该时刻的波形[图3-9(a)]。这个波形是由同一时刻具有不同位移的绳上各质点组成的。用横坐标 $x$ 表示沿波传播方向上各个质点的平衡位置，用纵坐标 $y$ 表示各个质点离开平衡位置的位移，规定位移方向向上为正值。在坐标平面内，以某一时刻各个质点的 $x$ 、 $y$ 值描出各对应点，再把这些点用平滑曲线连接起来，就得到该时刻波的图像，也称波形曲线或波形。在波的图像上，通常用箭头标出波的传播方向[图3-9(b)]。对于横波，波的图像与波的形状一致。波的图像反映了介质中的各个质点在某一时刻的位移情况。通过某一时刻波的图像，可直接得到各个质点在该时刻的位移。

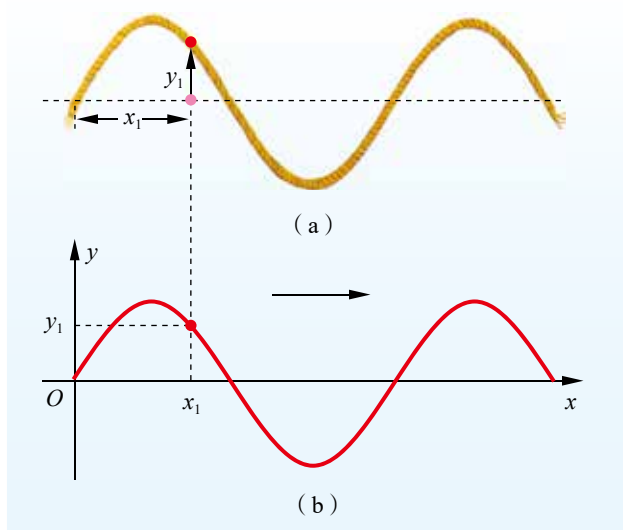


图3-9 横波的波形和图像

波源做简谐运动时，在各个时刻波的图像是一条正弦（或余弦）曲线，这种波称为**简谐波**（simple harmonic wave）。它是一种最基本、最简单的波，其他复杂的波可视为由若干个简谐波合成。



### 物理聊吧

简谐运动的图像是一条正弦（或余弦）曲线；横波中的各质点做简谐运动时，其图像也是一条正弦（或余弦）曲线。如图3-10所示的两图像中，一个是振动图像，另一个是波的图像，你能将它们区分开来吗？它们的物理意义分别是什么？请说出理由，并与同学讨论交流。



图3-10 振动图像与波的图像

### (2) 波的特征

在研究波动时，我们常关注的是波的传播快慢、相邻波峰或相邻波谷的距离以及波传播这段距离所需的时间。因此，我们需要引入一些新的物理量来描述这些特征。





在观察一列横波沿绳传播时，我们发现质点都在自己的平衡位置附近做周期性的振动，如图 3-3 所示。各质点的振动周期相同，都等于波源的振动周期，这个周期就是波的周期，用  $T$  表示。介质中质点振动的频率就是波的频率，用  $f$  表示。波的周期和频率互为倒数，即

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

进一步观察可知，图 3-3 中的质点 1 和质点 13 之间正好出现一个完整的波形。随着振动的继续传播，这两个质点的振动步调完全一致；在振动过程中的任意时刻，它们相对平衡位置的位移总是相同。两个相邻的、相对平衡位置的位移和振动方向总是相同的质点间的距离，称为**波长**（wavelength），用  $\lambda$  表示。在横波中，两个相邻波峰（或波谷）之间的距离等于波长（图 3-11）；在纵波中，两个相邻密部（或疏部）中央的距离等于波长（图 3-12）。

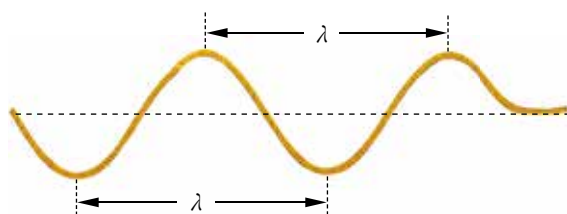


图 3-11 横波的波长

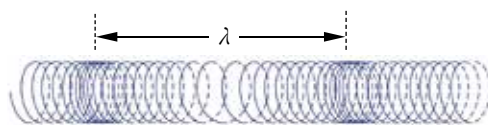


图 3-12 纵波的波长



### 物理聊吧

在图 3-13 中，有同学认为点  $M$  和点  $N$  是位移相同的两个质点，它们之间的距离就等于该波的波长；另有同学认为，位移总是相同的点  $M$  和点  $P$  之间的距离才等于波长。这两位同学的观点对吗？请说出理由，并与同学讨论交流。

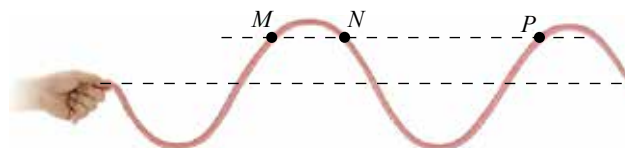


图 3-13 怎样确定一个波长

物理学中，将振动传播的距离与传播时间之比称为**波速**（wave speed）。由图 3-3 可见，经过一个周期，振动在介质中传播的距离等于一个波长。由此，可得到波速

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

或

$$v = \lambda f$$



通常，机械波在介质中的波速是由介质本身的性质决定的。在不同的介质中，波速是不同的。下表列出了 0℃ 时声波在几种介质中的波速。

表3-1 0℃ 时声波在几种介质中的波速

介质	空气	水	橡胶	软木	铜	铁
波速 $v/(m \cdot s^{-1})$	332	1 450	30 ~ 50	430 ~ 530	3 800	4 900

波速与波长、频率的关系式虽然是从机械波得到的，但对于我们今后要学习的电磁波同样适用。

### 例 题

停在水面上的两艘船相距 24 m。一列水波在湖面上传播开来，使船每分钟上下振动 20 次。当甲船位于波峰时，乙船位于波谷，这时两船之间还有另一个波峰，如图 3-14 所示。若将水波视为横波，求这列水波的波长和波速。

#### 分析

根据甲、乙两船之间的水波波形图，可求出水波的波长；再根据船的振动情况可求出水波的频率；利用波长和频率，便可根据公式  $v = \lambda f$  求出波速。

#### 解

由题意可知，甲、乙两船之间的距离等于 1.5 个波长。

$$\text{这列水波的波长 } \lambda = \frac{24}{1.5} \text{ m} = 16 \text{ m}$$

$$\text{这列水波的频率 } f = \frac{20}{60} \text{ Hz} = \frac{1}{3} \text{ Hz}$$

$$\text{则波速 } v = \lambda f = 16 \times \frac{1}{3} \text{ m/s} = 5.3 \text{ m/s}$$

#### 讨论

质点振动在介质中的传播形成波。解决波的传播问题，通常需要将局部质点的振动情况与波传播的情况相结合。

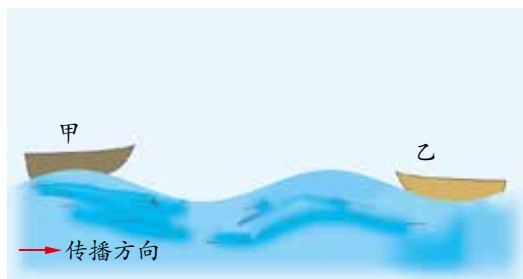


图 3-14 两船分别位于波峰与波谷示意图

#### 策略提炼

从生活情境出发构建物理模型，是解决物理问题的重要方法。

本题中首先要根据实际情境将水波简化为简谐波模型，画出波形图，再由甲、乙两船在波形图中对应的位置确定二者间的波形，求出波长。将船的振动简化为简谐运动，据此求出波的频率。由波速与波长、频率的关系式求出波速。



## 迁移

机械波的波长与波源的频率及波速有关。一般情况下，机械波在介质中的波速仅由介质决定。

敲击频率为 256 Hz 的音叉产生的声波，在空气中传播时波长为 1.32 m。若换成频率为 2 048 Hz 的音叉，波长变为多少？



## 例题

图 3-15 (a) 是一列简谐横波在  $t = 2$  s 时的图像，图 3-15 (b) 是这列波中质点  $P$  的振动图像，求该波的传播速度和传播方向。

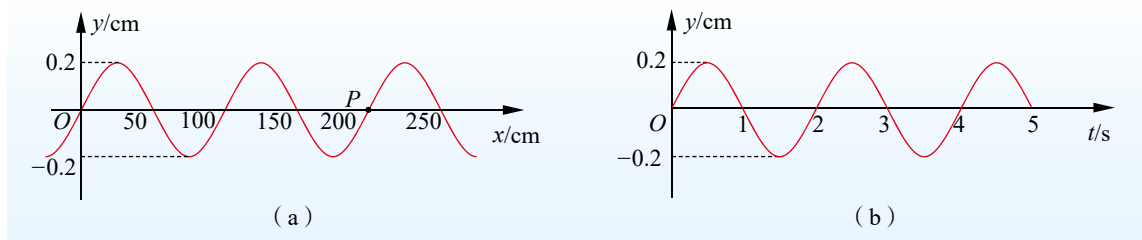


图 3-15 简谐横波的图像和质点  $P$  的振动图像

### 分析

由波的图像可得出波长，由质点  $P$  的振动图像可得出振动周期，即波的周期。根据  $v = \frac{\lambda}{T}$ ，可求出波速大小。由振动图像可知，在  $t = 2$  s 时质点  $P$  向上振动。结合波的图像可知，经短暂时间，质点  $P$  运动到  $P'$  位置，如图 3-16 所示。因简谐横波在传播时波形沿传播方向平移，此时的波形过点  $P'$ （图中蓝线）。比较波形变化，可判断该波沿  $x$  轴负方向传播。

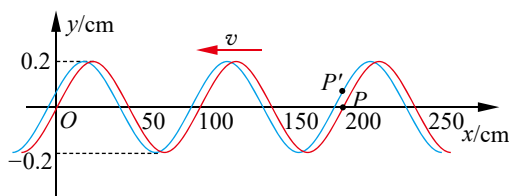


图 3-16 质点振动与波形传播的关系

### 解

由图 3-15 (a) 可知，这列波的波长  $\lambda = 100$  cm；  
由图 3-15 (b) 可知，这列波的周期  $T = 2$  s。

根据公式 
$$v = \frac{\lambda}{T}$$

可得波速 
$$v = 50 \text{ cm/s}$$

由图 3-15 (b) 可知，质点  $P$  在  $t = 2$  s 时向上运动，故这列波沿  $x$  轴负方向传播。



### 策略提炼

通过介质中质点振动与波形传播的关系，可由质点的振动情况确定波的传播情况，也可由波的传播情况确定质点的振动情况。

### 讨论

由波的形成过程理解质点振动与波形传播之间的关系是解决问题的关键。图 3-16 中，若还知道该波沿  $x$  轴负方向传播的距离，你能否确定该过程中质点  $P$  振动所经历的时间？



### 迁移

如图 3-17 所示，一列简谐横波沿  $x$  轴正方向传播，蓝线为  $t_1 = 0$  时波的图像，红线为  $t_2 = 0.01$  s 时波的图像。已知周期  $T > 0.01$  s，请判断 0.01 s 时质点  $P$  振动的方向，并求出波速。

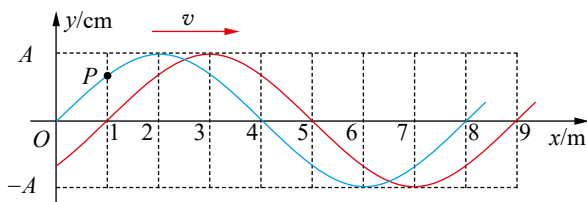


图 3-17 简谐横波的图像

能在熟悉的问题情境中运用简谐波模型解释机械波的问题；能分析与机械波相关的问题，通过推理得出结论并能解释；能从相互作用和能量等不同角度认识机械波，能质疑他人的观点。

——科学思维



### 素养提升



### 科学书屋

#### 引力波

在爱因斯坦的广义相对论中，引力被认为是时空弯曲的一种效应。这种弯曲时空是由质量的存在而导致的。通常而言，在一个给定的体积内，包含的质量越大，在这个体积边界处所导致的时空曲率越大（图 3-18）。当一个有质量的物体在时空中运动的时候，曲率变化反映了这个物体的位置变化。在某些特定环境之下，加速物体能使曲率产生变化，并且能以波的形式向外以光速传播。这种传播现象称为引力波，它以引力辐射的形式传输能量。

同学们可举办一个关于引力波的讨论会，通过查阅资料和讨论交流了解更多有关引力波的知识。

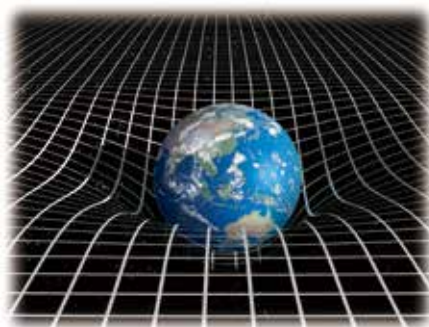


图 3-18 质量导致时空弯曲假想图

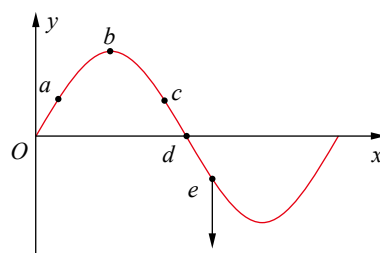


## 节 练 习

1. 某同学跟朋友们打篮球时，篮球掉进了球场旁边的湖水里。该同学想向湖中丢一石块激起水波，让篮球随水波漂回岸边。该同学的想法能实现吗？为什么？

2. 一列简谐横波沿  $x$  轴传播，在某时刻波的图像如图所示。已知此时质点  $e$  的运动方向向下，则

- A. 此波沿  $x$  轴正方向传播  
B. 质点  $c$  此时向下运动  
C. 质点  $a$  将比质点  $b$  先回到平衡位置  
D. 质点  $d$  振幅为 0



第2题

3. 用手握住较长软绳的一端连续上下抖动，形成一列简谐横波。某一时刻的波形如图所示，绳上  $a$ 、 $b$  两质点均处于波峰位置。

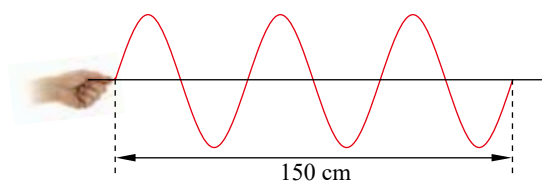
下列说法正确的是

- A.  $a$ 、 $b$  两质点之间的距离为半个波长  
B.  $a$ 、 $b$  两质点振动开始时刻相差半个周期  
C. 质点  $b$  完成的全振动次数比质点  $a$  多一次  
D. 质点  $b$  完成的全振动次数比质点  $a$  少一次



第3题

4. 抖动绳子的一端，绳子每秒钟做两次全振动，产生如图所示的横波。求绳上横波的频率、波长和波速，并画出 1.25 s 后的波形图。若要增大绳波的波长，抖动绳子的频率该如何改变？
5. 有人用下列方法测量声音的传播速率。如图所示，两只船相距 14 km，一只船上的实验员向水里放一口钟，当她敲钟时，船上的火药同时发光；另一只船上的实验员向水里放一个听音器，他看到火药发光后 10 s，听到了水下的钟声。请根据这些数据计算水中的声速。



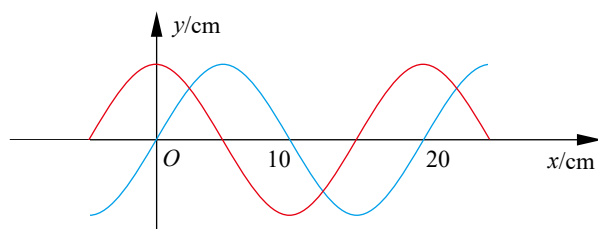
第4题



第5题

6. 如图所示，蓝线是一列正弦波在某一时刻的图像，经过 0.5 s 后，其图像如图中红线所示。已知该波的周期  $T$  大于 0.5 s。

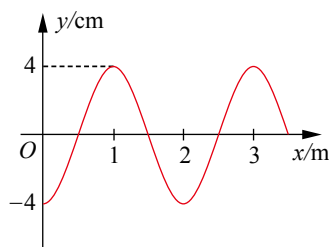
- (1) 若波向  $x$  轴正方向传播，求该波的波速和周期；  
(2) 若波向  $x$  轴负方向传播，求该波的波速和周期。



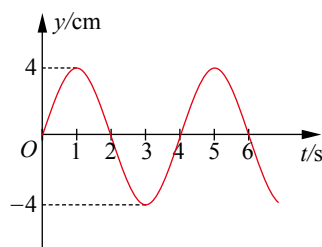
第6题

7. 图(a)为一列简谐横波在  $t = 2\text{ s}$  时的波形图, 图(b)为介质中平衡位置在  $x = 1.5\text{ m}$  处质点的振动图像,  $P$  是平衡位置为  $x = 2\text{ m}$  的质点。求:

- (1) 波的传播方向及波速;
- (2) 前  $2\text{ s}$  内质点  $P$  运动的路程。



(a)

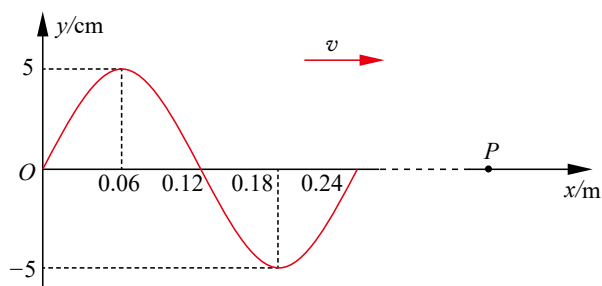


(b)

第7题

8. 如图所示, 一列水平向右传播的简谐横波, 波速大小  $v = 0.6\text{ m/s}$ , 质点  $P$  的平衡位置坐标  $x = 0.96\text{ m}$ 。某时刻该波刚好传到距点  $O$   $0.24\text{ m}$  的位置, 从该时刻开始计时。

- (1) 经过多长时间, 质点  $P$  第一次到达波峰?
- (2) 经过多长时间, 质点  $P$  第二次到达波谷? 当质点  $P$  第二次到达波谷时, 质点  $P$  通过的路程及在该时刻的位移为多少?



第8题

请提问



## 第2节

# 波的反射和折射

在北京天坛公园内，有一处著名的古建筑——回音壁（图 3-19）。一个人对着墙说话，声波会沿着墙壁传到一二百米远处被另一个人听到，而且声音悠长，非常神奇。为什么会出现这样的现象？

本节我们将学习波在传播过程中出现的反射和折射现象。

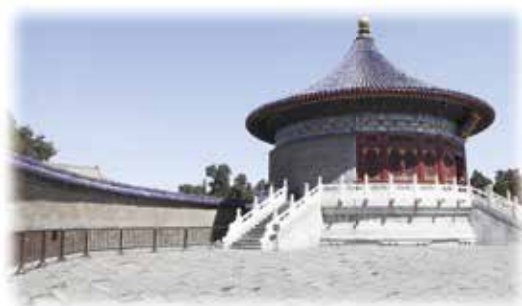


图 3-19 天坛公园内的回音壁

## 1. 波的反射

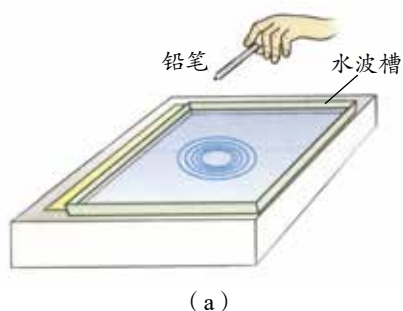
作为一种运动的形式，波既具有一般运动的普遍规律，又具有区别于其他运动形式的特殊规律。现在，我们一起来学习与波的传播特性有关的现象和规律。



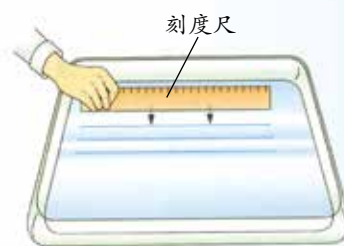
### 水波实验

（1）取一水波槽，在槽里倒入约 2 cm 深的水。用铅笔笔头持续触动槽中心的水面，保持大约每秒触动两次的速率，可产生水波 [图 3-20 (a)]。

（2）将刻度尺横放，在槽中水面上来回推动，也会不断地产生水波 [图 3-20 (b)]。请描述你所观察到的波形。



(a)



(b)

图 3-20 水波槽中产生水波示意图

如何描述这两种波呢？通常，我们把从波源发出的波经过相同传播时间到达的各点所组成的面，称为**波阵面**或**波面**（wave surface）。实验中产生的水波，每一道水波纹就是一个波面。波面是球面的波称为球面波，波面是平面的波称为平面波。用来表示波的传播方向的线称为波线，波线与各个波面总是垂直的（图 3-21）。

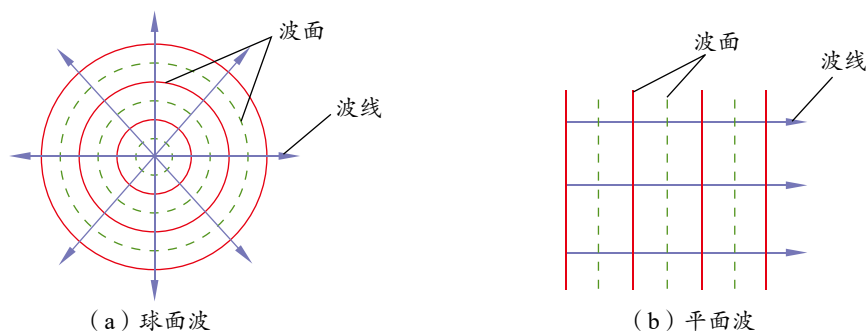


图 3-21 波面和波线

波在均匀介质中传播时，波面的形状不变，波线保持为直线，波的传播方向也不变。当波从一种介质传播到另一种介质表面时，又是怎样的情形呢？我们通过一个实验来观察。



### 迷你实验室

#### 水波的反射

如图 3-22 所示，在水波槽中放一块长木板，用振动片激发产生水波，使水波的传播方向与长木板约成  $45^\circ$  角。可以看到，从波源发出的水波遇到长木板后，波的传播方向发生了变化。

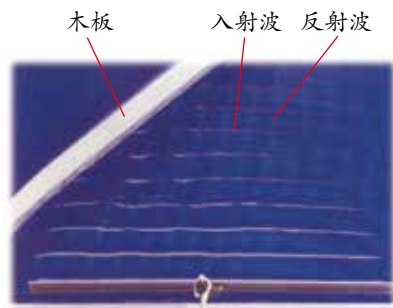


图 3-22 水波反射实验

实验发现，从波源发出的水波向前传播，遇到长木板后产生反射，水波向右传播。物理学中，把波从一种介质传播到另一种介质表面时，返回原来介质传播的现象称为**波的反射**（reflection of wave）。回音壁就是利用了声波的多次反射。在空旷的山谷能听见回音，也是声波的反射现象。

波在遇到障碍物发生反射时，入射波的波线与反射面法线的夹角称为入射角，反射波的波线与反射面法线的夹角称为反射角。实验表明，反射波的波长、频率和波速都与入射波的相同。波的反射遵循反射定律：反射波的波线、入射波的波线和法线在同一平面内，反射波的波线和入射波的波线分别位于法线两侧，反射角等于入射角（图 3-23）。

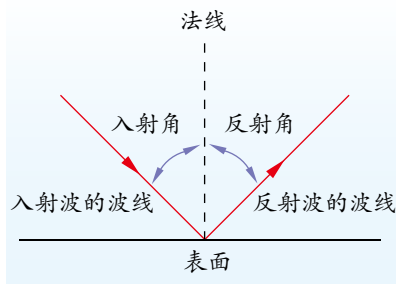


图 3-23 波反射示意图



## 声 呐

声呐是一种声音导航和测距系统，它利用了声波反射的原理。声呐装置发出一束在水中传播的声波，当声波碰到障碍物时，就被反射回来。反射的声波被声呐装置检测到，通过测量声波从发射到返回经历的时间便可计算出声波传播的距离，从而间接测得物体的位置。

声呐被广泛应用于鱼群探测（图 3-24）、海洋石油勘探、船舶导航、水文测量和海底地质地貌的勘测等方面。

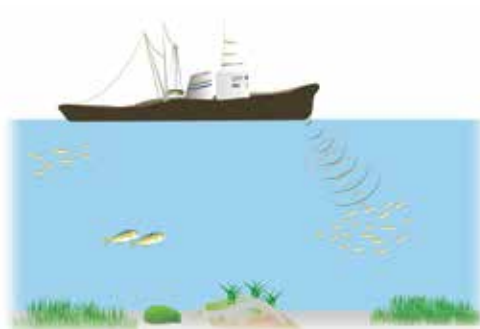


图 3-24 声呐探测鱼群示意图

## 2. 波的折射

波从一种介质进入另一种介质时，波线会偏折。物理学中，我们把波在传播过程中，由一种介质进入另一种介质时传播方向发生偏折的现象，称为**波的折射**（refraction of wave）。

如图 3-25 所示，在波的折射中，入射波的波线与法线的夹角称为入射角，用  $i$  表示；折射波的波线与法线的夹角称为折射角，用  $r$  表示。进一步的研究表明，入射角和折射角与波速之间有如下关系

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

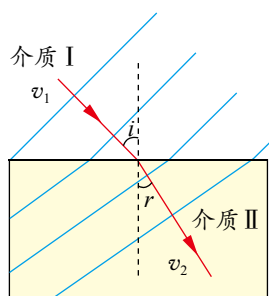


图 3-25 波折射示意图

式中， $v_1$  和  $v_2$  分别是波在介质 I 和介质 II 中的波速。



### 拓展一步

#### 惠更斯原理

在总结了许多实验现象的基础上，荷兰物理学家惠更斯提出：介质中波面上的每一个点，都可视为一个新的波源。这些新波源发出子波，经过一定时间后，这些子波的包络面就构成下一时刻的波面。这就是惠更斯原理。所谓包络面，就是某时刻与所有子波波面相切的曲面。

根据惠更斯原理，我们可解释球面波的波面是如何形成的。如图3-26所示，点波源 $O$ 发出的波在 $t$ 时刻的波面是一个球面 $S$ ，该球面上的每一个点都可视为一个新的点波源，它们各自发出球面子波，下一时刻 $(t + \tau)$ 新的波面 $S'$ ，就是与这些子波波面相切的包络面。

用惠更斯原理能很好地解释波的反射规律和折射规律。

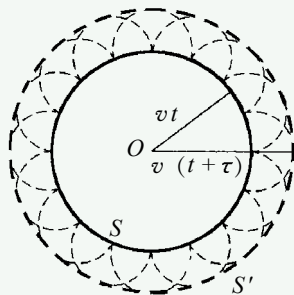


图3-26 球面波波面形成示意图

## 节 练 习

- 某旅游者走过一个山谷，他拍手后经过0.5 s听到右侧山坡反射回来的声音，经过1.5 s听到左侧山坡反射回来的声音。这个山谷的宽度大约是多少？（声音在空气中的传播速度约为340 m/s）
- 下列说法正确的是
  - 潜艇利用声呐探测周围物体的分布情况，利用了波的反射原理
  - 隐形飞机的表面涂上特殊隐形物质，是为了减少波的反射，从而达到隐形的目的
  - 雷声轰鸣不绝是声波的多次反射形成的
  - 水波从深水区传到浅水区时传播方向发生改变的现象，是波的折射现象
- 一列机械波从一种介质进入另一种介质时，传播方向发生了偏折。下列相关物理量也会发生变化的是
  - 波速
  - 波长
  - 频率
  - 周期
- 天空中有一片近似等高的浓云层，为了测量云层的高度，在水平地面上与观测者的距离为 $d = 3.0$  km处进行一次爆炸，观测者听到由空气直接传来的爆炸声与由云层反射回来的爆炸声时间上相差 $\Delta t = 6.0$  s。试估算云层下表面的高度。（已知空气中的声速 $v = \frac{1}{3}$  km/s）

请提问

## 第3节

# 波的干涉和衍射

让两个接入同一信号源的扬声器同时播放某一频率的正弦波信号，你会发现在某些位置听到的声音强，而在某些位置听到的声音弱。你知道这是为什么吗？我们还常有“闻其声而不见其人”的体验。这又是为什么呢？学习了波的叠加原理以及波的干涉和衍射现象后，你便能解释这些现象。

### 1. 波的叠加原理

我们时常会看见这样的现象：几列在水面上传播的波相遇时，波形会发生变化（图 3-27），有时几乎很难辨别出它们原来的形态。然而，这些波一旦脱离接触，又会恢复原来的形态。为什么会产生这样的现象呢？为了便于分析，我们先做一个实验。



图 3-27 水波相遇



#### 迷你实验室

##### 波的叠加的演示

如图 3-28 所示，两位同学分别握着长绳的一端上下抖动，使长绳产生两列相向传播的波。仔细观察两列波相遇时和相遇后各自的运动。



图 3-28 两列相向传播的波示意图



由实验可看出，两列波相遇时，波形会发生变化；相遇后，这两列波又保持原来各自的形态继续传播（图 3-29）。大量研究表明，几列波在介质中传播，相遇后仍能保持各自原有的运动特征（波长、频率、振幅等）不变并继续传播，就像没有与其他波相遇过一样。在相遇的区域里，介质中的质点同时参加相遇的波列的振动，质点的位移等于相遇波列单独存在时在该处引起的位移的矢量和，这在物理学中称为**波的叠加原理**（superposition principle of wave）。

## 2. 波的干涉现象

下面我们通过实验认识一种特殊的波的叠加现象——波的干涉。

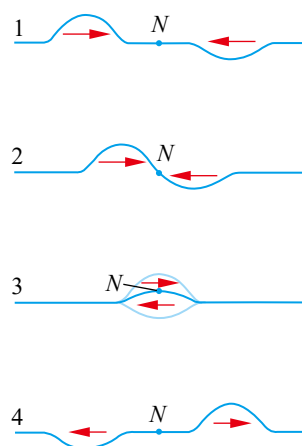
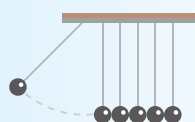


图 3-29 两列波相遇示意图



### 实验与探究

#### 水波的干涉现象

图 3-30 是一个水波槽，在振动棒上固定两个小球，让小球刚刚接触到水波槽内的水面。当振动棒带动两个小球振动时，会产生振动方向、振动频率都相同的两列水波。观察这两列波叠加时的现象。

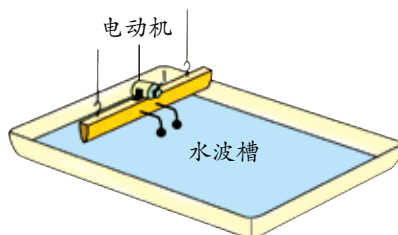


图 3-30 水波干涉实验示意图

由上面的实验可得到如图 3-31 所示的波的叠加图样：在振动的水面上，出现了一条条从两个波源中间扩散开的相对平静的区域和剧烈振动的区域，这两种区域相互间隔，并且出现的位置是固定的。我们把振动频率和振动方向相同的两列波叠加后，振动加强和振动减弱的区域互相间隔、稳定分布的现象，称为**波的干涉**（interference of wave），形成的图样称为干涉图样。



图 3-31 水波的干涉图样

波的干涉现象是怎样产生的呢？我们可用波的叠加原理解释。图 3-32 为某时刻两列水波相遇时的干涉示意图，图中  $S_1$ 、 $S_2$  为两个频率和振动方向相同的波源，实线表示波峰，虚线表示波谷。图中红点处表示两列波的波峰与波峰相叠加，绿点处表示波谷与波谷相叠加，这些位置的振动都得到加强。如果两列水波的频率相同，那么再经过  $\frac{T}{2}$ ，两列



波的叠加又使这些质点同时到达波谷（或波峰），因此这些质点的振动始终是加强的，这些区域就成为振动加强区。图中画“×”处是一列波的波峰与另一列波的波谷相叠加，该处质点的振动减弱，并且始终是减弱的，这些点就形成了振动减弱区。这样，就形成振动加强区与振动减弱区相间隔存在的稳定的干涉图样。**只有频率和振动方向相同的波才可能互相干涉。**

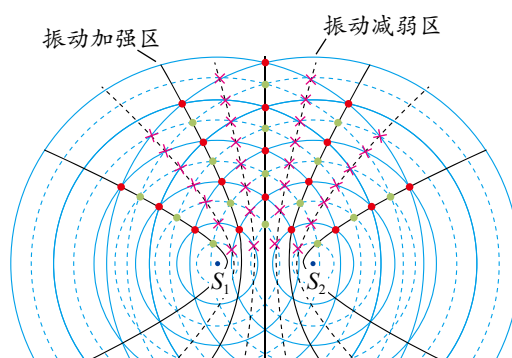


图 3-32 波的干涉示意图

水波、声波、电磁波等都能产生干涉，干涉现象是波的重要特征之一。两个接入同一信号源的扬声器同时播放某一频率的正弦波信号时，在某些位置听到的声音强，而在某些位置听到的声音弱。你现在能解释这个现象了吗？



### 物理聊吧

仔细观察图 3-32 会发现，到两波源的距离之差等于波长整数倍的点，振动都加强；而到两波源的距离之差等于半波长奇数倍的点，振动都减弱。这是为什么呢？你能否写出振动加强（减弱）的质点到两波源的距离之差与波长的关系表达式？



### 拓展一步

#### 驻波

两个能产生干涉的波源发出振幅相同的两列波，在同一直线上沿相反方向传播，由于叠加而形成的波称为驻波。驻波上有些点始终不振动，称为波节；有些点始终振幅最大，称为波腹（图 3-33）。弦乐器和管乐器等都是因产生驻波而发声的。当弦线上形成驻波时，弦线的长度应满足  $l = n \frac{\lambda}{2}$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ )。

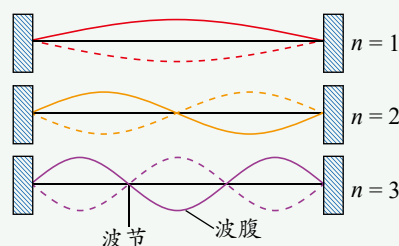


图 3-33 驻波波节与波腹示意图

## 3. 波的衍射现象

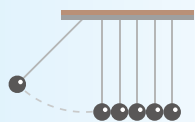
向平静的水面投一块小石子，水面会形成一圈圈美丽的波纹。这些波纹遇到露出水面的石块会产生怎样的现象呢？如果石块较大，水波会被反射回来；如果石块较小，水波

会绕过石块继续向前传播，好像石块并不存在一样。波绕过障碍物或通过孔隙继续传播的现象，称为**波的衍射** (diffraction of wave)。图 3-34 为水波通过蓄水池入口时产生衍射的情景。水波通过桥洞时发生衍射，会绕过桥墩继续向前传播。

下面我们通过实验进一步认识波的衍射现象。



图 3-34 水波的衍射



### 实验与探究

#### 水波的衍射现象

如图 3-35 所示，在水波槽中放入两块挡板，挡板间留一狭缝，调节挡板位置，可改变狭缝宽度。现产生持续的平面波，且波长保持不变，观察下列两种情况下水波通过狭缝时的实验现象。

- (1) 调节狭缝的宽度，使其远大于水波的波长；
- (2) 调节狭缝的宽度，使其接近水波的波长。

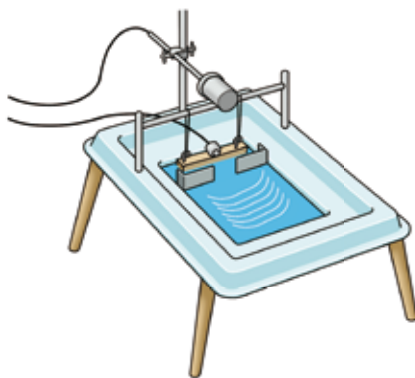


图 3-35 水波衍射实验示意图

图 3-36 呈现的是同一波长的水波经过不同宽度狭缝时的现象。从图中可看出，当狭缝的宽度远大于水波的波长时，没有明显的衍射现象；当狭缝的宽度接近水波的波长时，水波通过狭缝后成为近似于点波源发出的波，衍射现象更加明显。进一步实验证明，当障碍物或狭缝的尺寸跟波长相差不大，或者比波长更小时，才能观察到明显的衍射现象。

衍射是波特有的现象。不仅水波能产生衍射现象，一切波都能产生衍射现象。“闻其声而不见其人”的现象就与声波的衍射有关。人耳听到的声音频率范围是  $20 \sim 20\,000\text{ Hz}$ ，对应的声波波长为  $17 \sim 0.017\text{ m}$ ，与一般障碍物的尺寸相当，因此声波可绕过一般障碍物，传播到障碍物另一侧。



(a) 狭缝宽度远大于水波波长时



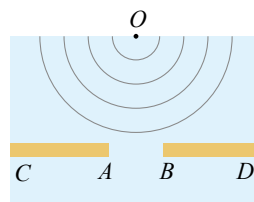
(b) 狭缝宽度接近水波波长时

图 3-36 水波经过不同狭缝时的现象

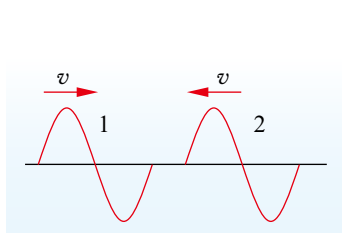


## 节练习

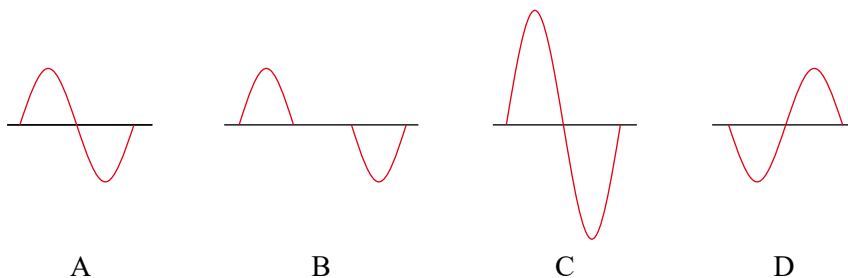
1. 拍摄干涉图样照片时, 照片显示的干涉图样中的振动加强区与振动减弱区是否与拍摄时间无关?
2. 观察水波衍射的实验装置示意图如图所示。AC 和 BD 是两块挡板, 两板间有一狭缝 AB, O 是波源。图中已画出波源所在区域波的传播情况, 每两条相邻的波纹 (图中曲线) 之间的距离表示一个波长。如何使衍射现象更明显? 为什么?
3. 如图所示, 两列相同的波沿一直线相向传播。当它们相遇时, 波形可能是下列四种波形图中的



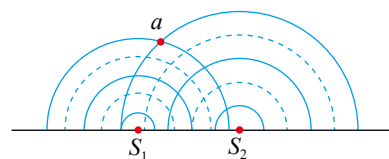
第2题



第3题



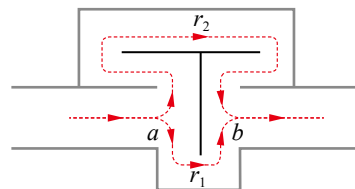
4. 两波源  $S_1$ 、 $S_2$  在水波槽中形成的波形示意图如图所示, 其中实线表示波峰, 虚线表示波谷。波源  $S_1$  形成的波的波长比波源  $S_2$  形成的短, 则
  - A. 在两波相遇的区域中会产生干涉
  - B. 在两波相遇的区域中不会产生干涉
  - C. 点 a 的振动始终加强
  - D. 点 a 的振动始终减弱
5. 两列振动方向相同、振幅分别为  $A_1$  和  $A_2$  的波发生干涉现象。下列说法正确的是
  - A. 波峰与波谷相遇处, 质点的振幅为  $|A_1 - A_2|$
  - B. 波峰与波峰相遇处, 质点离开平衡位置的位移始终为  $A_1 + A_2$
  - C. 波峰与波谷相遇处, 质点的位移总是小于波峰与波峰相遇处质点的位移
  - D. 波峰与波峰相遇处, 质点的振幅一定大于波峰与波谷相遇处质点的振幅



第4题

- \*6. 消除噪声污染是当前环境保护的一个重要课题。干涉型消声器可用来消弱高速气流产生的噪声。它的结构及气流运行情况如图所示, 产生的波长为  $\lambda$  的声波沿水平管道自左向右传播。在声波到达 a 处时, 分成两束相干波, 它们分别通过  $r_1$  和  $r_2$  的路程, 再在 b 处相遇。要达到消弱噪声的目的, 路程差  $\Delta r = r_2 - r_1$  应为

- A. 波长的整数倍
- B. 波长的奇数倍
- C. 半波长的奇数倍
- D. 半波长的偶数倍



第6题

请提问





## 第4节

# 多普勒效应及其应用

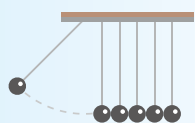
你是否注意过这样的现象？当救护车鸣笛从你身边飞速驶过时，听到的鸣笛声的音调会发生变化。救护车向你驶来时，音调变高；离你而去时，音调变低（图 3-37）。听到的声音的音调为什么会发生变化？学习了多普勒效应后，你便能解释其中的现象。



图 3-37 救护车驶过时听到的音调变化示意图

### 1. 多普勒效应

上述问题中，救护车鸣笛声的频率并没有变化，只是由于救护车与地面观察者之间发生了相对运动，从而使观察者接收到的声波频率发生了变化。这种因波源与观察者之间有相对运动而使观察者接收到的波的频率发生变化的现象，称为**多普勒效应**（Doppler effect），它是奥地利科学家多普勒（C. Doppler，1803—1853）发现的。



### 实验与探究

#### 多普勒效应

用蜂鸣器等器材制作一个发声装置，可演示多普勒效应。为了保证安全，可将发声装置装入网球中，用结实的绳子捆绑好并在室外进行实验。

甲同学站在某位置，手持系有发声装置的绳子一端，使发声装置在头顶上空快速转动（图 3-38）。此时，乙同学站在离甲同学几米之外的位置上静止不动。甲、乙两同学听到蜂鸣器发出的声音音调有什么变化？

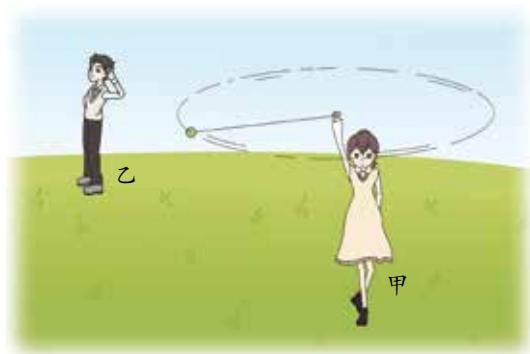


图 3-38 多普勒效应实验示意图



如何解释多普勒效应呢?

波源每完成一次全振动,便向外发出一个波长的波;而波源的频率等于单位时间(如1 s)内波源完成全振动的次数,所以波源振动的频率等于单位时间内波源向外发出完整的波的个数。对观察者来说,他接收到的波的频率等于他在单位时间内接收到的完整的波的个数。

当波源和观察者都不动时,波源1 s内发出几个完整的波,观察者在1 s内就接收到几个完整的波。在这种情况下,观察者接收到的波的频率等于波源的频率。而当波源与观察者之间有相对运动时,观察者接收到的波的频率就不再等于波源的频率。

首先假设波源 $S$ 静止不动,观察者以一定的速度 $v_0$ 向靠近波源的方向运动(图3-39)。在1 s内,观察者向着波源移动了一段距离,与观察者不动的情况相比较,观察者在1 s内接收到的完整的波的个数就会增多,也就是接收到的波的频率增大。

同样道理,当观察者远离波源时,在单位时间内接收到的完整的波的个数就会减少,也就是接收到的波的频率减小。

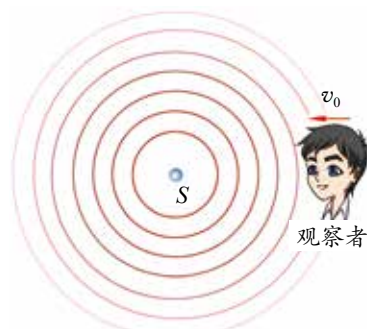


图3-39 波源不动、观察者运动示意图



## 迷你实验室

### 模拟多普勒效应

为了进一步理解多普勒效应,可做这样一个模拟实验(图3-40):让一队人沿街行走,当观察者站在街旁不动时,每秒钟有三个人从他身边经过。这种情况下,观察者接收到的“频率”是每秒三人。如果观察者逆着队伍前进方向行走,那么每秒内与观察者相遇的人数就会增加,也就是观察者接收到的“频率”增大。这种情景与观察者逆着波的传播方向走向波源的情况是相似的。如果观察者顺着队伍前进方向行走,又是怎样的情景呢?



图3-40 模拟实验示意图

如果观察者静止不动,波源运动,观察者接收到的波的频率又如何变化呢?

如图3-41所示,波源 $S$ 发出球面波,球面波的每一波面的球心就是发出该波时波源所在的位置。当波源不运动时,波纹间距是均匀的;而当波源向右运动时,相当于波面的球心向右运动,波源右方的波面变得密集,波长变短;波源左方的波面变得稀疏,波长变长。因此,

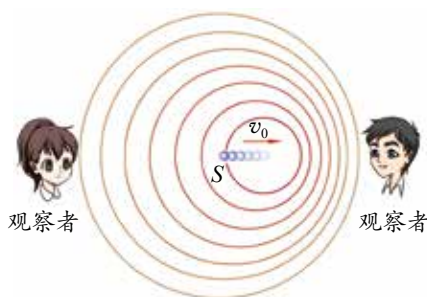


图3-41 观察者不动、波源运动示意图

在波源右方的观察者，单位时间内接收到完整的波的个数就增多，即接收到的频率增大。同理，在波源左方，观察者接收到的频率减小。现在，你能解释为什么听到的救护车鸣笛声的音调会发生变化了吗？

总之，当波源与观察者没有发生相对运动时，观察者接收到的波的频率不变，即等于波源的频率；当波源与观察者相互接近时，观察者接收到的波的频率增大；当波源与观察者相互远离时，观察者接收到的波的频率减小。光波、无线电波、微波等都能发生多普勒效应，多普勒效应是波共有的特征。

## 2. 多普勒效应的应用

多普勒效应在生产生活中有着广泛应用。

交通警察可使用多普勒测速仪（图 3-42）测定汽车的行驶速度，判断车辆是否超速。测速仪向行进的汽车发射某个频率的无线电波，无线电波遇到车辆发生反射，车辆相当于反射波的波源。测速仪接收到反射波，通过分析反射波的频率就可显示出车辆的行驶速度。

医学上用来诊断人体心脏、血管等疾病的彩色超声多普勒诊断仪（图 3-43），其基本工作原理也利用了多普勒效应。医生先用其向人体组织发射高频率的超声波，



图 3-42 多普勒测速仪

再根据接收的反射超声波频率变化来测定心脏跳动、血管血流快慢等情况，依此对病变作出诊断。

电磁波的多普勒效应为跟踪目的物（如导弹、云层等）提供了一种简便的方法。当目的物从远处飞向地面监测站上空，或从地面监测站上空飞向远处时，如果监测站不断发射恒定频率的电磁波，由于多普勒效应，地面监测站接收到的反射波频率会发生相应的变化。根据这种变化，就可确定目的物的距离、方位、速度等。这在军事、航天、气象预报等领域有着广泛的应用。



图 3-43 彩色超声多普勒诊断仪

能了解波、横波和纵波的内涵，能理解波速、波长和频率的定量关系，能认识波的反射、折射、干涉、衍射及多普勒效应等现象；能解释身边与机械波有关的物理现象。具有与机械波相关的运动与相互作用观念和能量观念。

——物理观念



## 节 练 习

1. 一艘渔船向鱼群发出超声波。若鱼群正向渔船靠近，则被鱼群反射回来的超声波与渔船发出的超声波相比，其频率如何变化？请说明理由。
2. 关于多普勒效应，下列说法正确的是
  - A. 多普勒效应是由波的干涉引起的
  - B. 多普勒效应说明波源的频率在发生改变
  - C. 多普勒效应是由波源与观察者间的相对运动引起的
  - D. 只有声波可产生多普勒效应
3. 根据多普勒效应，下列说法正确的是
  - A. 当波源与观察者有相对运动时，观察者接收到的频率一定与波源发出的频率相同
  - B. 当波源与观察者同向运动时，观察者接收到的频率一定比波源发出的频率低
  - C. 当波源与观察者相向运动时，观察者接收到的频率一定比波源发出的频率高
  - D. 当波源与观察者背向运动时，观察者接收到的频率一定比波源发出的频率低
- \*4. 公路巡警驾驶巡警车在高速公路上以  $100\text{ km/h}$  的恒定速度巡查，该路段限速为  $100\text{ km/h}$ 。巡警车向前方在同一直车道上行驶的轿车发出一个已知频率的电磁波，如果该电磁波被轿车反射回来时，巡警车接收到的电磁波的频率比发出时的低，该轿车是否超速？请说明理由。

请提问







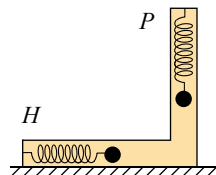
## 章末练习

### 科学认知

- 小王不停地把手指插入水池中,使水面产生圆形水波。当他的手指运动频率加快时,产生的波的频率、波速和波长会如何变化?请说明理由。
- 一种简易地震仪由竖直弹簧振子 $P$ 和水平弹簧振子 $H$ 组成,如图所示。在一次地震中,地震波中的横波和纵波传播速率分别约为 $3.5\text{ km/s}$ 和 $7\text{ km/s}$ ,震源在地震仪下方,观察到两振子开始振动的时间相差 $5\text{ s}$ 。

(1) 哪个振子先开始振动?

(2) 震源距地震仪距离为多少?



第2题

- 如图所示,蝙蝠可在洞穴中来去自如,利用的就是“超声脉冲导航”。这种超声脉冲是持续 $1\text{ ms}$ 或不到 $1\text{ ms}$ 的短促发射,且每秒重复发射多次。若蝙蝠垂直飞向墙面的过程中,发出频率为 $39\ 000\text{ Hz}$ 的超声脉冲,则



第3题

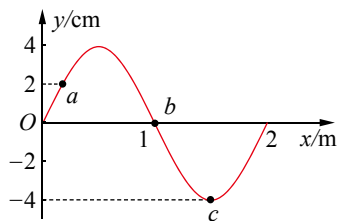
- 墙壁接收到的超声脉冲频率等于 $39\ 000\text{ Hz}$
- 蝙蝠接收到从墙壁反射回来的超声脉冲频率等于墙壁接收的频率
- 蝙蝠接收到从墙壁反射回来的超声脉冲频率大于墙壁接收的频率
- 蝙蝠接收到从墙壁反射回来的超声脉冲频率等于 $39\ 000\text{ Hz}$

- 一列沿 $x$ 轴正方向传播的简谐横波在 $t=0$ 时刻的图像如图所示,波源周期为 $1\text{ s}$ 。下列说法正确的是

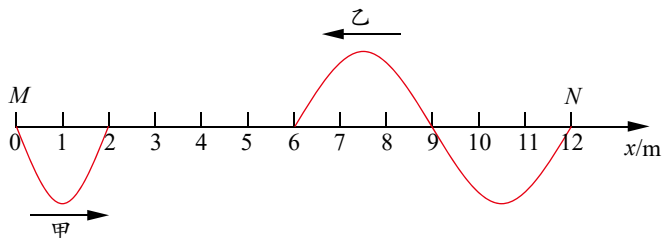
- 质点 $b$ 的振幅为 $0$
- 经过 $0.25\text{ s}$ ,质点 $b$ 沿 $x$ 轴正方向移动 $0.5\text{ m}$
- 从 $t=0$ 时刻起,质点 $c$ 比质点 $a$ 先回到平衡位置
- 在 $t=0$ 时刻,质点 $a$ 、 $c$ 所受的回弹力大小之比为 $1:2$

- 甲、乙两列横波在同一介质中分别从波源 $M$ 、 $N$ 两点沿 $x$ 轴相向传播,波速为 $2\text{ m/s}$ ,振幅相同。某时刻的图像如图所示,则

- 甲、乙两列波的起振方向相反
- 甲、乙两列波的频率之比为 $3:2$
- 再经过 $3\text{ s}$ ,平衡位置在 $x=7\text{ m}$ 处的质点振动方向向下
- 再经过 $3\text{ s}$ ,两波源间(不含波源)有 $5$ 个质点位移为 $0$



第4题



第5题

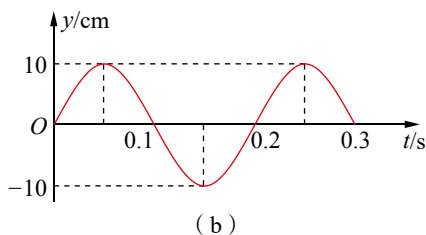
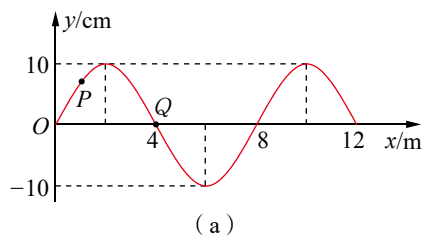
- 图(a)为一列简谐横波在 $t=0.10\text{ s}$ 时刻的图像, $P$ 是平衡位置在 $x=1.0\text{ m}$ 处的质点, $Q$ 是平衡位置在 $x=4.0\text{ m}$ 处的质点;图(b)为质点 $Q$ 的振动图像。下列说法正确的是

- 在 $t=0.25\text{ s}$ 时,质点 $P$ 的加速度方向与 $y$ 轴正方向相同
- 从 $t=0.10\text{ s}$ 到 $t=0.25\text{ s}$ ,该波沿 $x$ 轴负方向传播了 $6\text{ m}$



C. 从  $t = 0.10 \text{ s}$  到  $t = 0.25 \text{ s}$ , 质点  $P$  通过的路程为  $30 \text{ cm}$

D. 质点  $Q$  做简谐运动的表达式为  $y = 0.10 \sin 10\pi t$ , 单位为  $\text{cm}$



第 6 题

7. 一列简谐横波沿直线传播。某时刻该列波上正好经过平衡位置的两质点相距  $6 \text{ m}$ , 且这两质点之间的波峰只有一个, 求该简谐波波长的可能值。

\*8. 一列简谐横波在介质中沿  $x$  轴正方向传播, 波长不小于  $10 \text{ cm}$ 。  $O$  和  $A$  是介质中平衡位置分别位于  $x = 0$  和  $x = 5 \text{ cm}$  处的两个质点。  $t = 0$  时开始观测, 此时质点  $O$  的位移  $y = 4 \text{ cm}$ , 质点  $A$  处于波峰位置;  $t = \frac{1}{3} \text{ s}$  时, 质点  $O$  第一次回到平衡位置;  $t = 1 \text{ s}$  时, 质点  $A$  第一次回到平衡位置。求:

(1) 简谐波的周期、波速和波长;

(2) 质点  $O$  的位移随时间变化的关系式。

\*9. 在学校运动场  $50 \text{ m}$  直跑道的两端, 分别安装了由同一信号发生器带动的两个相同的扬声器。两个扬声器连续发出波长为  $5 \text{ m}$  的声波。一同学从该跑道的中点出发, 向某一端点缓慢行进  $10 \text{ m}$ 。在此过程中, 他听到扬声器的声音由强变弱的次数为多少?

### 科学辨析

10. 如图所示, 天文学家观察到, 来自遥远星体的光比来自较近星体同物质发出的光, 波长会变长。由此, 天文学家得出结论: 遥远星体正在远离地球。请据多普勒效应解释一下这是为什么。



第 10 题

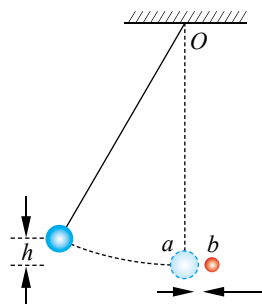
### 温故知新

11. 如图所示, 摆球  $a$  小角度向右摆动到最低点时, 恰好与一沿水平方向向左运动的黏性小球  $b$  发生碰撞, 并粘在一起, 且摆动平面不变。已知碰撞前球  $a$  摆动的最高点与最低点的高度差为  $h$ , 摆动的周期为  $T$ , 球  $a$  质量是球  $b$  质量的 5 倍。碰撞前, 球  $a$  在最低点的速度是球  $b$  速度的  $\frac{1}{2}$ 。求:

(1) 碰撞后, 摆球第一次运动到最高点的时间;

(2) 碰撞后, 摆球的最高点与最低点的高度差。

12. 请根据第 2 章 (机械振动) 和第 3 章 (机械波) 的内容, 结合你的理解, 画出概念图。

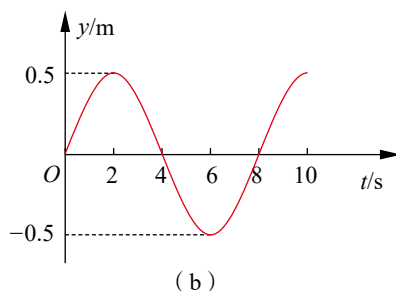
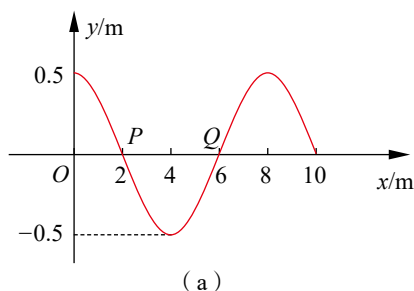


第 11 题

# 单元自我检测

一、选择题（本题共 5 小题。在每小题给出的四个选项中，第 1 ~ 3 题只有一项符合题目要求，第 4、5 题有多项符合题目要求）

- 做简谐运动的弹簧振子，当它每次经过同一位置时，可能不同的物理量是  
A. 位移      B. 速度      C. 加速度      D. 回复力
- 某质点做简谐运动，其位移随时间变化的关系式为  $x = 5\sin \frac{\pi}{4}t$ ，单位为 cm。下列关于该质点运动情况的说法正确的是  
A. 质点做简谐运动的振幅为 10 cm      B. 质点做简谐运动的周期为 4 s  
C. 在  $t = 4$  s 时，质点的速度最大      D. 在  $t = 4$  s 时，质点的加速度最大
- 图 (a) 为一列简谐横波在某一时刻的图像，P、Q 两质点的横坐标分别为  $x_P = 2$  m 和  $x_Q = 6$  m；图 (b) 为质点 Q 从该时刻开始计时的振动图像。下列说法正确的是

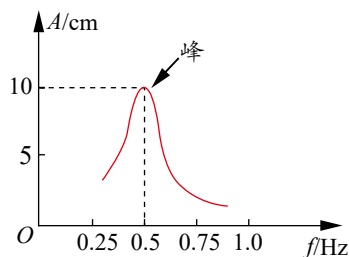


第 3 题

- 该波沿  $x$  轴正方向传播，波速为 1 m/s
- 质点 P 经 4 s 振动的路程为 4 m
- 此时刻质点 P 的速度沿  $y$  轴正方向
- 质点 P 在  $t = 2$  s 时，速度为 0

- 一单摆做受迫振动，其共振曲线如图所示，则

- 此单摆的固有周期为 2 s
- 此单摆的摆长约为 1 m
- 若摆长增大，则单摆的固有频率增大
- 若摆长增大，则共振曲线的峰将向右移动



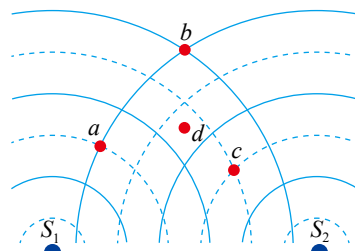
- 如图所示， $S_1$ 、 $S_2$  是两个相干波源，它们振动同步且振幅不同。实线和虚线分别表示在某一时刻它们所发出的波的波峰和波谷。与  $S_1$ 、 $S_2$  共面的 a、b、c、d 四点中，b、d 位于  $S_1$  与  $S_2$  的连线的垂直平分线上。关于 a、b、c、d 四点的振动情况，下列说法正确的是

- 质点 a 振动最弱，质点 b、c 振动最强，质点 d 振动介于最强与最弱之间

- 质点 a 振动最弱，质点 b、c、d 振动最强

- 该时刻质点 a 的位移为 0，质点 b、c、d 的位移均为最大

- 再过  $\frac{T}{4}$  后的时刻，a、b、c 三个质点都将处于各自的平衡位置

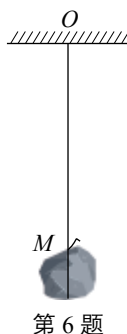


## 二、非选择题

6. 小李同学想在家里做“用单摆测量重力加速度的大小”的实验，但没有合适的摆球。他找到了一块大小为 3 cm 左右、外形不规则的大理石石块代替小球。他设计了以下实验步骤：

- 如图所示，用细线将石块系好，结点为  $M$ ，将细线的上端固定于点  $O$ 。
- 用刻度尺测量  $OM$  间细线的长度  $l$  作为摆长。
- 将石块拉至一个大约  $30^\circ$  的角度，然后由静止释放。

D. 从石块摆到最高点时开始计时，测出 50 次全振动的总时间  $t$ ，由  $T = \frac{t}{50}$  得出周期。



(1) 以上实验步骤中有错误的是 \_\_\_\_\_，理由是 \_\_\_\_\_。

(2) 若该同学用  $OM$  的长  $l$  作为摆长，这样做引起的系统误差将使重力加速度的测量值比真实值 \_\_\_\_\_ (选填“偏大”或“偏小”)。

(3) 如果该同学改正了错误，改变  $OM$  间细线的长度后做了两次实验，记下每次相应的细线长度  $l_1$ 、 $l_2$  和周期  $T_1$ 、 $T_2$ ，则由上述四个量得到的重力加速度  $g$  的表达式是 \_\_\_\_\_。

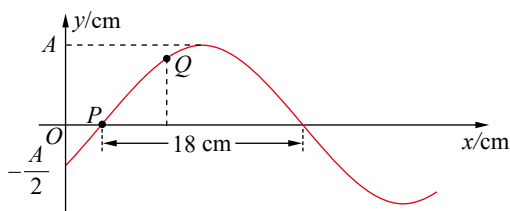
7. 如图所示，小提琴琴弦上的波速不仅与弦绷紧的程度有关，还取决于弦的单位长度的质量。如果弦的张力为  $F$ ，弦单位长度的质量为  $\mu$ ，则波速为  $v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$ 。现有一根长为 5.30 m 的弦，质量为 15.0 g。若该弦形成 125 Hz 的波的波长为 120.0 cm，则弦的张力应该为多大？



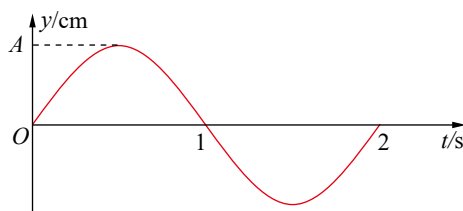
8. 一列简谐横波在  $t = \frac{1}{3}$  s 时的图像如图 (a) 所示， $P$ 、 $Q$  是介质中的两个质点，图 (b) 是质点  $Q$  的振动图像。求：

(1) 波速及波的传播方向；

(2) 质点  $Q$  的平衡位置的坐标。



(a)



(b)

第8题



## 单元自我评价

回顾本单元的学业要求和所学内容，结合本次单元自我检测和平时学习情况进行自我评价，写一篇“单元自我评价”报告。说说你学会了什么、存在什么问题及今后努力的方向等。



# 第4章

# 光的折射 和全反射

导 入 美妙的彩虹

第1节 光的折射

第2节 科学测量：玻璃的折射率

第3节 光的全反射

第4节 光导纤维及其应用

## ►►本章学业要求

- 能理解光的折射定律的内涵，了解光的全反射现象等；能解释身边的光的折射与全反射现象，能说明光纤技术在生产生活中的应用。具有与光的折射和全反射相关的运动与相互作用观念和能量观念。

——物理观念

- 能用光线模型探索生活中光的折射与全反射问题；能分析与光的折射和全反射相关的问题，通过推理获得结论并作出解释；能用与光的折射和全反射相关的证据解释生活中光传播的问题；能从不同角度思考光传播的问题，能质疑他人的观点。

——科学思维

- 能完成“测量玻璃的折射率”等物理实验。能分析相关事实，提出并准确表述在实验中可能出现的物理问题；能在他人帮助下制订实验方案，能用玻璃砖等相关器材收集数据；能分析数据，测得玻璃的折射率；能撰写规范的实验报告，在报告中能呈现设计的实验表格、数据分析过程及实验结论，能有效陈述并讨论交流实验过程中的问题。

——科学探究

- 通过光纤技术的应用，能体会物理技术应用对人类生活与社会发展的影响；有学习物理、服务社会的志趣；能为科学家在光纤方面的伟大成果而感到自豪。

——科学态度与责任



## 导 人

# 美妙的彩虹

当大雨荡涤了空中的尘埃，阳光重新普照大地，天边往往会出现美丽的彩虹。彩虹色彩斑斓——红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫，它来得悄无声息，去得无影无踪，带有一丝神秘。

彩虹有时也会出现于流水激起的水雾中。飞流直下的瀑布撞击岩石、水面，形成白色的水雾，在阳光照射下，彩虹若隐若现，给大自然增添了俏丽与神奇。



天上的彩虹



人造的“彩虹”

彩虹不仅仅属于大自然。只要用一块玻璃三棱镜对着一束太阳光，大自然的神奇就会重现。

彩虹是如何形成的？其中含有哪些光学知识？学习本章后便能找到答案。

## 第1节

# 光的折射

我们知道，光从一种介质斜射入另一种介质时，传播方向会改变，发生折射现象。图 4-1 是一束光通过平行玻璃砖的照片。光由空气射入玻璃，再通过玻璃射入空气，出射光为什么总与入射光平行？这需要通过进一步认识折射规律后才能回答。本节我们将通过实验，探究光的折射定律。

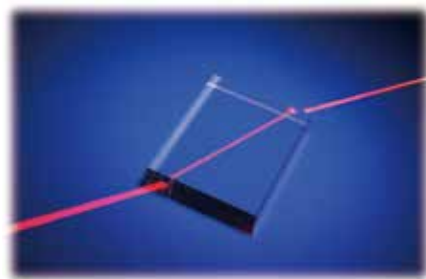


图 4-1 一束光通过平行玻璃砖

### 1. 探究折射角与入射角的关系

我们知道，折射光线、入射光线和法线在同一平面内，折射光线和入射光线分别位于法线两侧（图 4-2，光的折射和反射同时发生，此图未画出反射光线，后面的光路图仅画需讨论的光线）。折射角和入射角之间有着怎样的定量关系呢？下面我们通过实验来探究。

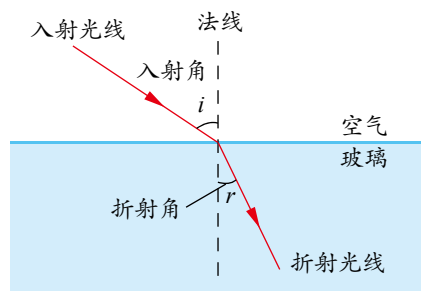
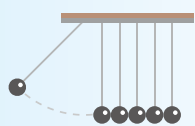


图 4-2 光的折射示意图



### 实验与探究

#### 探究折射角与入射角的关系

(1) 如图 4-3 所示，往水槽内注水，让水面与量角器的  $90^\circ$  刻度线重合。

(2) 使激光发射器发出的光沿盘面斜射到水面并进入水中，光线过量角器的  $0$  刻度线与水面的交点。观察光的传播方向及入射光、折射光和法线的位置关系。

(3) 保持光在水面的入射点不变，不断改变入射光的方向，观察折射光的方向如何变化。记录相应的入射角和折射角。分析这些数据，你能得出什么结论？

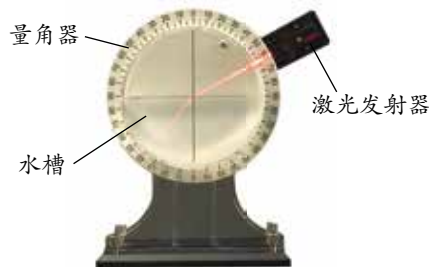


图 4-3 实验装置



## 2.光的折射定律

由实验数据可知，入射角增大，折射角也增大，但折射角与入射角之间不是简单的正比关系。通过计算，发现入射角的正弦与对应折射角的正弦之比几乎相等。

1621年，荷兰科学家斯涅耳（W. Snell, 1580—1626）发现了折射角与入射角之间的关系：**入射角的正弦与折射角的正弦之比是一个常数**。如果用  $n$  来表示这个比例常数，则有

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

这个关系称为光的**折射定律**（refraction law），也叫**斯涅耳定律**。

用不同的介质做实验，这个常数不同，说明常数  $n$  是与介质有关的物理量。物理学中，把光从真空斜射入某种介质发生折射时，入射角  $i$  的正弦与折射角  $r$  的正弦的比值  $n$ ，称为这种介质的**折射率**（refraction index），也称绝对折射率。研究表明，空气对光传播的影响很小，一般情况下可近似作为真空处理。下表列出了几种常见物质的折射率。

表4-1 钠黄光照射下的几种常见物质的折射率

物质	折射率	物质	折射率
金刚石	2.42	酒精	1.36
玻璃	1.50 ~ 2.00	水	1.33
水晶	1.54 ~ 1.56	冰	1.31
有机玻璃	1.50	空气	1.000 3

与反射现象一样，在折射现象中，光路也是可逆的。图 4-2 中，如果让光逆着折射光方向从玻璃射向界面，折射光会逆着入射光方向射向空气（图 4-4）。

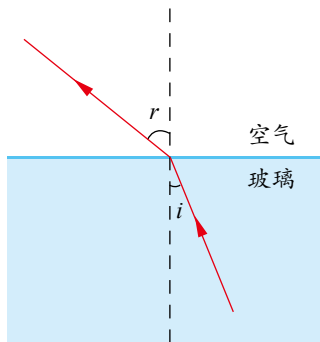


图 4-4 光路可逆示意图



### 物理聊吧

根据光路可逆原理，还可得出当光从介质射入真空或空气时入射角与折射角的关系。结合图 4-4 所示的光路图，写出该关系式，并与同学讨论交流。



## 例 题

如图 4-5 所示, 透过玻璃砖看字母, 字母会显得高一些。假设玻璃砖的厚度为  $H$ , 玻璃的折射率  $n = 1.5$ 。如果垂直于玻璃砖向下看, 字母的视深是多少?

## 分析

在图 4-6 中, 用点  $O$  表示字母上的某一点,  $OA$  和  $OB$  是从点  $O$  射向玻璃砖上表面的光, 光经折射后进入人眼, 人感觉它们是从玻璃中的点  $D$  射出的,  $D$  即为眼睛看到的点  $O$  的像,  $AD$  就是字母的视深  $h$ , 实际深度为  $H$ 。

## 解

光由玻璃进入空气, 由光的折射定律

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{1}{n}$$

及几何关系

$$\sin i = \frac{AB}{OB}, \quad \sin r = \frac{AB}{BD}$$

$$\text{得 } n = \frac{OB}{BD}$$

因为  $OB$  很靠近  $OA$ , 所以  $OB \approx OA$ ,  $BD \approx AD$

$$\text{因此 } n \approx \frac{OA}{AD} = \frac{H}{h}$$

$$h \approx \frac{H}{n} = \frac{2}{3}H$$

故垂直于玻璃砖向下看, 字母的视深是  $\frac{2}{3}H$ 。

## 讨论

从计算结果可见, 透过玻璃砖看到字母的深度比实际的浅, 这与我们生活经验相吻合。由此, 你能解释水中的筷子看起来像被“折弯”了这类现象吗?



图 4-5 字母看起来高低不一

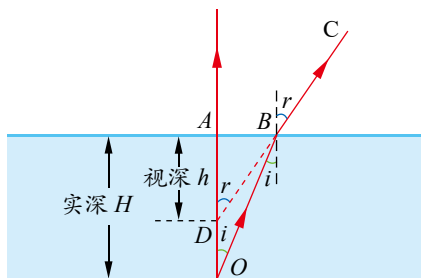


图 4-6 光路分析示意图

## 策略提炼

解决光的传播问题, 通常要先画出规范的光路图, 再运用光的传播规律和几何知识等列方程求解, 有时还会用到一些近似处理方法。物体发出或反射的光, 经介质折射(或反射)后, 其反向延长线的交点, 就是人们所看到物体的虚像。

## 迁移

画光路图分析光的传播过程, 需正确画出入射点、法线、入射光线和折射光线等。例如, 半径为  $R$  的玻璃半圆柱体, 横截面如图 4-7 所示, 圆心为点  $O$ ,  $AO$  为与底面垂直的半径。一束红光沿截面射向圆柱面, 方向与底面垂直, 入射点为  $B$ ,  $\angle AOB = 60^\circ$ 。已知该玻璃对红光的折射率  $n = \sqrt{3}$ , 光线经柱面折射后与底面的交点到点  $O$  的距离是多少? 请画出光路图并求解。

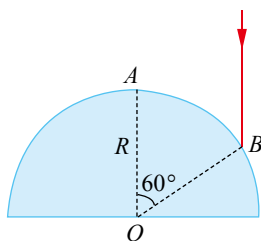


图 4-7 光线传播示意图



### 折射定律的发现

关于光的折射实验的记载，最早的应是古希腊天文学家托勒密做的光的折射实验。托勒密认为，对于确定的两种介质，入射角和折射角之比是恒定的。到了17世纪，开普勒指出，托勒密的假定只有在入射角较小时才与实验结果大致相符，他试图找到精确的折射规律，但没有成功。

1621年，荷兰科学家斯涅耳（图4-8）注意到水中物体看起来比实际浅的现象，他试图揭开其中的奥秘。在前人工作的基础上，他对折射现象作了进一步的研究后指出：入射角的正弦与折射角的正弦的比值对于确定的两种介质来说是一个常数。斯涅耳并没有公开他的结论，这个定律是后来人们在整理他的手稿时才发现的。首次把折射定律表述为今天这种形式的是笛卡儿，而费马首先从理论的角度证明了折射定律。



图4-8 斯涅耳

斯涅耳的发现为几何光学的发展奠定了理论基础。为了纪念斯涅耳，折射定律又称为斯涅耳定律。

## 3. 折射率

折射率是反映介质光学性质的一个物理量，它反映了光从空气斜射入介质（或从介质斜射入空气）时偏折的程度。折射率越大，介质使光偏离原来传播方向的程度就越大。例如，光从真空中以一定的入射角分别斜射入玻璃和水时，由  $\frac{\sin i}{\sin r} = n$  可知，对于折射率较大的玻璃来说，折射角较小，即光偏离原来传播方向的程度较大 [图4-9(a)]。同样，当光分别从玻璃和水中以一定的入射角斜射入真空时，由  $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{1}{n}$  可知，对于折射率较大的玻璃来说，折射角较大，即玻璃使光偏离原来传播方向的程度也较大 [图4-9(b)]。

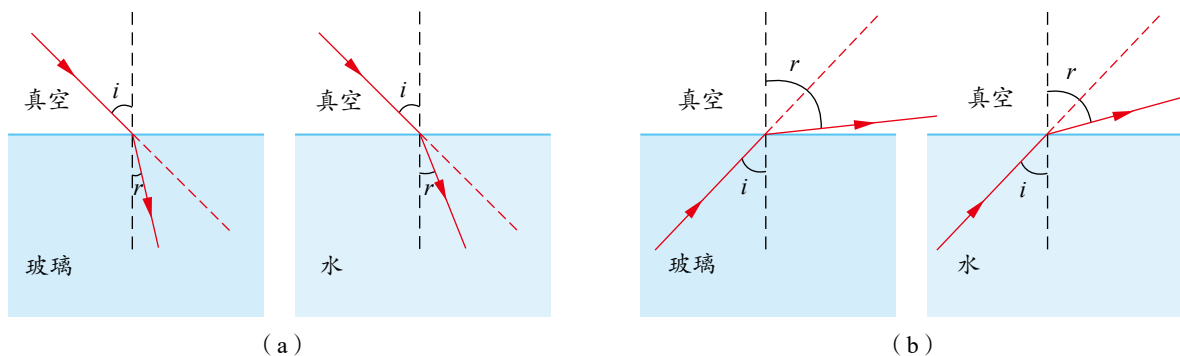


图4-9 不同介质中光偏折示意图

理论和实验研究都表明,某种介质的折射率,等于光在真空中的传播速度  $c$  与光在这种介质中的传播速度  $v$  之比,即

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

从上式可看出,光在介质中的传播速度越小,对应介质的折射率越大。

不同颜色的光在同一种介质中的传播速度不相同,折射率也不相同。在同一种介质中,红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫等色光,红光的传播速度最大,折射率最小;紫光的传播速度最小,折射率最大。当一束白光射入三棱镜时,由于白光中不同色光的折射率不同,偏折程度就不同,紫光偏折程度最大,红光偏折程度最小,经三棱镜折射后,会出现色散现象(图4-10)。



图4-10 色散现象示意图

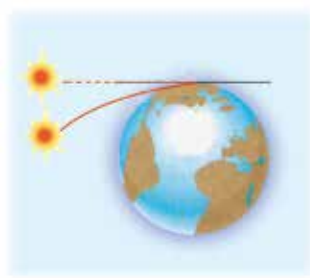


### 物理聊吧

早晨,当我们看到太阳刚刚升出地平线时,实际上太阳还在地平线以下(图4-11)。请解释这一现象。



(a)



(b)

图4-11 太阳升出地平线情景及分析示意图



### 拓展一步

#### 绝对折射率和相对折射率

在折射现象中,设光由介质1进入介质2,这时的折射率称为介质2对介质1的相对折射率,通常用  $n_{21}$  表示。此时,折射定律应写成

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n_{21}$$

相对折射率与绝对折射率的关系为

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$$

式中,  $n_1$  和  $n_2$  是介质1和介质2的绝对折射率。由上面公式还可得出折射定律的另一种表达形式

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r$$

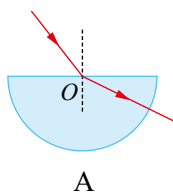


## 节 练 习

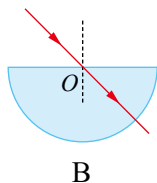
1. 如图所示, 透过平行玻璃砖看铅笔, 感觉铅笔断开了。请画出光路图并作出解释。
2. 下面是某单色光由空气射入半圆形玻璃砖, 再由玻璃砖射入空气的光路图。点  $O$  是半圆形玻璃砖的圆心。可能正确的光路图是



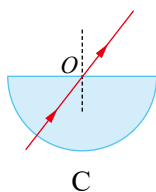
第1题



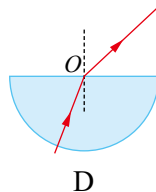
A



B

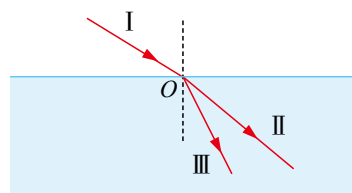


C



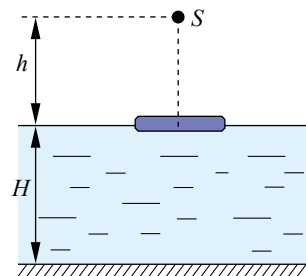
D

3. 如图所示, 一束由两种单色光组成的复色光 I 从空气中射向水面, 进入水面后变成 II、III 两束光, 折射角分别为  $\alpha$  和  $\beta$ , 且  $\alpha > \beta$ 。下列说法正确的是



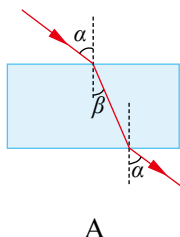
第3题

- A. 若光束 II 是蓝光, 光束 III 有可能是紫光
  - B. 若光束 II 是紫光, 光束 III 有可能是蓝光
  - C. 光束 II 与光束 III 在水中的速率之比  $v_1 : v_2 = \sin \beta : \sin \alpha$
  - D. 光束 II 与光束 III 在水中的波长之比  $\lambda_1 : \lambda_2 = \sin \beta : \sin \alpha$
4. 一束光从空气斜射入两面平行的玻璃砖的一个平面, 再从另一平行平面射出。试证明出射光与入射光平行。
  5. 如图所示, 在水面上放一块半径为  $r$  的圆形木板, 木板的正上方  $h$  处放一个点光源  $S$ , 测出光射到水面下深  $H$  处的底部形成的圆形阴影半径  $R$  的大小, 即可求出水的折射率。若测得  $r = 8 \text{ cm}$ ,  $h = 6 \text{ cm}$ ,  $H = 16 \text{ cm}$ ,  $R = 20 \text{ cm}$ , 水的折射率为多少?

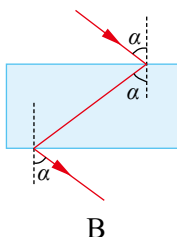


第5题

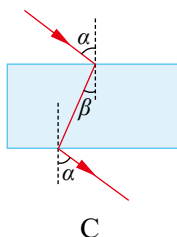
- \*6. 人们针对某些电磁波设计制作的人工材料, 其折射率可为负值 ( $n < 0$ ), 称为负折射率材料。在空气中, 这类材料的入射角  $i$  与折射角  $r$  依然满足  $\frac{\sin i}{\sin r} = n$ , 但是折射线与入射线位于法线的同一侧 (此时折射角取负值)。若该材料对于电磁波的折射率  $n = -1$ , 能正确反映电磁波穿过该材料的传播路径的示意图是



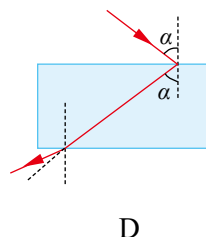
A



B



C



D



## 第2节

# 科学测量：玻璃的折射率

折射率是光学材料的重要指标。例如，在制造汽车挡风玻璃时，对折射率和形状都有十分严格的要求；在钻石鉴定过程中，常常根据折射率的大小来判断钻石的真伪（图 4-12）。如何测量介质的折射率？本节我们将学习用简便的方法测量玻璃的折射率。

### 实验目的

- (1) 测量玻璃的折射率。
- (2) 学习用插针法确定光路。

### 实验器材

木板、白纸、玻璃砖、大头针、图钉、刻度尺、量角器、铅笔。

### 实验原理与设计

当光从空气射入玻璃时，根据折射定律  $\frac{\sin i}{\sin r} = n$ ，测出入射角  $i$  和折射角  $r$ ，就可计算出玻璃的折射率。

如图 4-13 所示，透过玻璃砖观察大头针  $P_1$ 、 $P_2$ ，调整视线方向，直到  $P_2$  的像挡住  $P_1$  的像。再在观察者同一侧依次插入大头针  $P_3$ 、 $P_4$ ，使  $P_3$  挡住  $P_1$ 、 $P_2$  的像， $P_4$  挡住  $P_3$  和  $P_1$ 、 $P_2$  的像。这样， $P_1$ 、 $P_2$  以及  $P_3$ 、 $P_4$  的连线分别代表入射光和经玻璃砖折射后射出的光，由此便可画出光路图并测出入射角和折射角。

### 实验步骤

(1) 把白纸固定在木板上，再将玻璃砖放在白纸上。用铅笔描出界面  $aa'$ 、 $bb'$ ，利用两枚大头针确定入射光的方向 [图 4-14 (a)]。



图 4-12 真是钻石吗

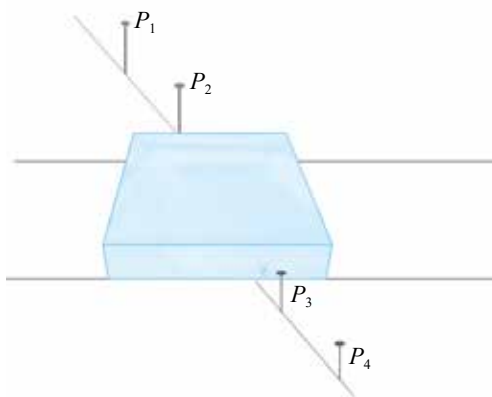


图 4-13 测量玻璃折射率示意图



### 安全警示

实验中使用大头针时要小心且不能乱放，以免误伤自己或他人。对玻璃器材等也需轻拿轻放。不要用手和铅笔直接接触玻璃砖的光学面，以免弄脏。



(2) 用两枚大头针在玻璃砖的另一侧确定出射光的方向 [图 4-14 (b)]。

(3) 取走玻璃砖，根据入射光和出射光的方向确定入射点  $O$  和出射点  $E$ ，连接  $OE$  即为玻璃砖内部的折射光。画出过入射点  $O$  的法线  $NN'$  [图 4-14 (c)]。

(4) 根据画出的光路图测量入射角  $i$ 、折射角  $r$ ，填入设计的表格中。计算玻璃的折射率  $n = \frac{\sin i}{\sin r}$ 。

(5) 重复以上实验步骤多次，最后求出玻璃折射率的平均值。

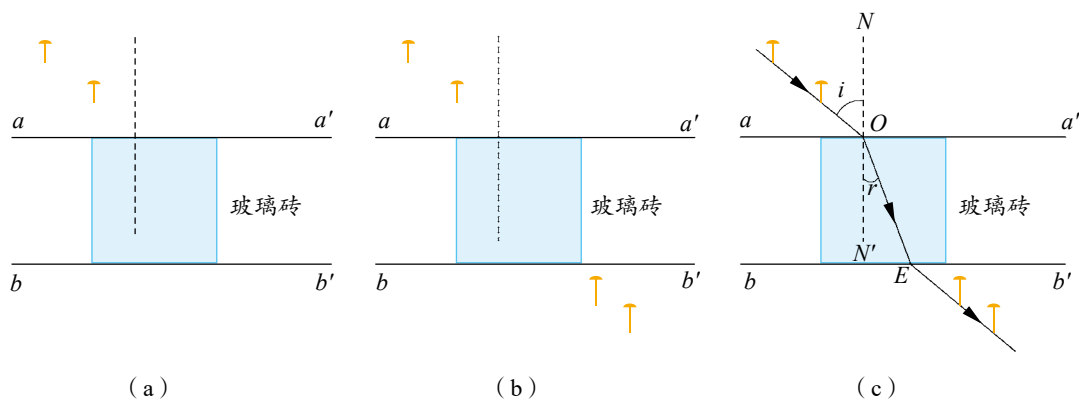


图 4-14 测量玻璃折射率示意图

### 数据分析

将测量的数据记入你设计的表格中，分析数据，形成结论。

### 实验结论

写出实验结论。

### 讨论

(1) 为减小测量误差，选择玻璃砖时，宽度宜大些还是小些？还可采取哪些措施？为什么？

(2) 如果实验中采用的不是两面平行的玻璃砖，而是用三棱镜或半圆形玻璃砖，能否测出相应的折射率？请说明理由。

能分析相关事实，提出并准确表述在实验中可能出现的物理问题；能在他人帮助下制订实验方案，能用玻璃砖等相关器材收集数据；能分析数据，测得玻璃的折射率；能撰写规范的实验报告，在报告中能呈现设计的实验表格、数据分析过程及实验结论，能有效陈述并讨论交流实验过程中的问题。

注意提升实验设计能力、实验测量能力与误差分析能力。

——科学探究

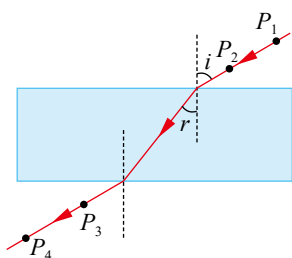
素养提升



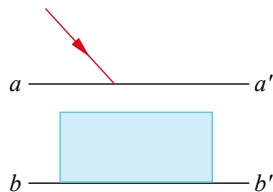
## 节 练 习

1. 请撰写“测量玻璃的折射率”的实验报告。注意在报告中呈现设计的实验表格、数据分析过程及实验结论。
2. 在“测量玻璃的折射率”实验中，还可用图像法求玻璃的折射率。请根据你在实验中的测量数据，描绘出  $\sin i$  与  $\sin r$  的关系图像，并求出玻璃的折射率。

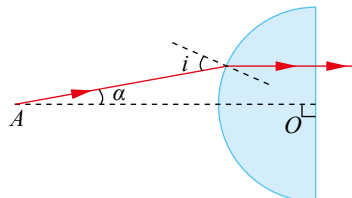
3. 如图所示, 关于用插针法测量玻璃折射率的实验, 下列说法正确的是
- A.  $P_1$ 、 $P_2$  及  $P_3$ 、 $P_4$  之间的距离适当大些, 可提高准确度
  - B.  $P_1$ 、 $P_2$  及  $P_3$ 、 $P_4$  之间的距离取得小些, 可提高准确度
  - C. 入射角  $i$  适当大些, 可提高准确度
  - D. 入射角  $i$  越大, 准确度越高
4. 某同学做“测量玻璃的折射率”实验, 操作时将玻璃砖的界线  $aa'$ 、 $bb'$  画好后误用了另一块宽度稍窄的玻璃砖, 如图所示。实验中除用原界线外, 其他操作都正确, 这样测得的玻璃折射率与真实值相比是偏大还是偏小? 为什么?
5. 利用激光可测量玻璃的折射率。在如图所示的光路中,  $A$  为激光的出射点,  $O$  为半圆形玻璃砖横截面的圆心,  $AO$  过半圆顶点。从点  $A$  发出的光束与  $AO$  成  $\alpha$  角, 以入射角  $i$  入射到半圆弧上, 出射光平行于  $AO$ , 求此玻璃的折射率。



第3题

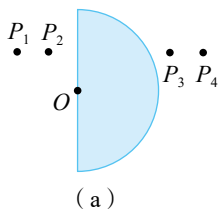


第4题

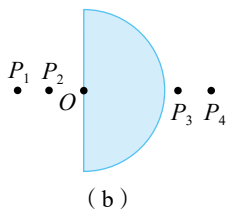


第5题

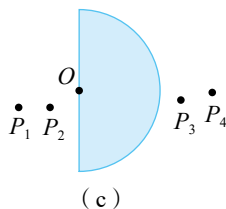
6. 用插针法测定透明玻璃的折射率时,  $O$  为半圆形玻璃砖截面的圆心, 使入射光跟玻璃砖的平面垂直, 在如图所示的四个图中,  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  和  $P_4$  是学生实验插针的结果。



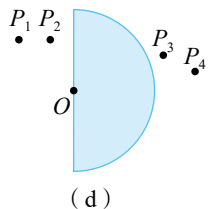
(a)



(b)



(c)

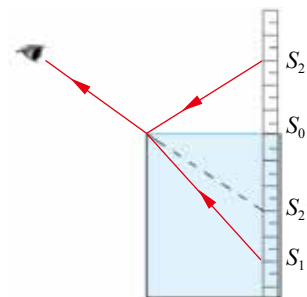


(d)

第6题

- (1) 在这四个图中, 肯定把针插错了的是\_\_\_\_\_。
- (2) 在这四个图中, 可比较准确地测出玻璃折射率的是\_\_\_\_\_。在该图中画出光路图, 并标出需要测量的折射角和入射角。计算玻璃折射率的公式是\_\_\_\_\_。

7. 如图所示, 用一个不透明的圆柱筒和一把长刻度尺就可测定透明液体的折射率。请简述测量原理, 并在课外活动时间用它测量盐水(或糖水)的折射率, 看看它们的浓度与折射率之间有什么关系。



第7题

请提问



## 第3节

# 光的全反射

远方有一湾美丽的湖水，走向前去，那里却是一片荒漠，这是一种蜃景现象（图 4-15）。蜃景是怎样形成的？熏黑的铁球放入水中，为什么看上去会变得锃亮（图 4-16）？学习了光的全反射，你便能发现其中的奥秘。



图 4-15 荒漠上的蜃景



图 4-16 水中锃亮的铁球

## 1. 全反射及其产生条件

什么是全反射现象呢？下面我们通过实验来说明。



### 观察全反射现象

准备好一块半圆形玻璃砖、光屏和激光光源。如图 4-17 所示，用一束激光沿半圆形玻璃砖的半径射到直边上，让入射角由 0 逐渐增大，观察折射光和反射光，你会看到什么现象？

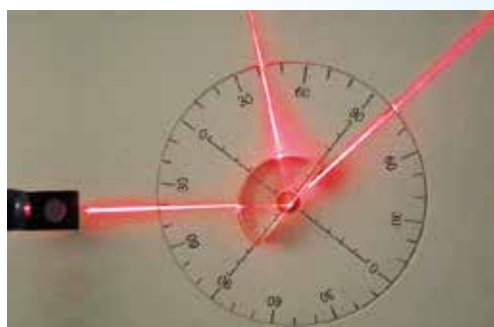


图 4-17 观察全反射现象



由上面的实验可见，光从玻璃入射到空气中时，折射角大于入射角，入射角逐渐增大，反射光变强，折射光变弱，当入射角增大到一定程度时，折射光完全消失，全部光都被反射回玻璃内。这种现象称为全反射现象，简称**全反射**（total reflection）。

在以上实验中，刚好发生全反射时的入射角，称为全反射的**临界角**（critical angle）。当入射角趋近于临界角时，折射角趋近于  $90^\circ$ ，折射光强度趋近于 0，反射光强度与入射光强度几乎相等。当入射角大于等于临界角时，就会发生全反射（图 4-18）。

光由不同的介质射入真空或空气时，临界角不同。根据折射定律，光从折射率为  $n$  的某种介质进入真空或空气时的临界角  $C$  应满足

$$\frac{\sin C}{\sin 90^\circ} = \frac{1}{n}$$

即

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

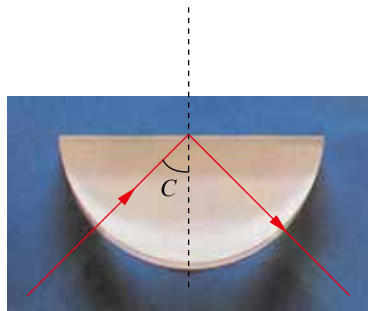


图 4-18 全反射示意图

根据公式  $\sin C = \frac{1}{n}$  可求出不同介质的临界角。钻石的临界角约为  $24.4^\circ$ ，水的临界角约为  $48.8^\circ$ ，而玻璃因制造材料的不同，临界角有较大的差异，一般在  $30^\circ \sim 42^\circ$ 。介质的临界角越小，就越容易发生全反射。

上述实验中看到的全反射现象，是光从玻璃射入空气时产生的。如果光从空气射入玻璃，其折射角小于入射角，入射角再大，折射角也不会达到  $90^\circ$ ，折射光始终存在，不会发生全反射现象。光只有从折射率较大的介质射入折射率较小的介质时，才可能发生全反射现象。

对两种不同的介质，折射率较小的介质称为**光疏介质**（optically thinner medium），折射率较大的介质称为**光密介质**（optically denser medium）。例如，水晶与水相比，水晶为光密介质，水为光疏介质；水与空气相比，水为光密介质，空气为光疏介质。发生全反射的条件是：**光由光密介质射入光疏介质，且入射角大于等于临界角**。例如，当光从水晶射入水时可能发生全反射，而光从水射入水晶时就不会发生全反射。

### 例 题

一束单色光从玻璃射入空气。已知玻璃的折射率  $n = 1.53$ ，当入射角分别为  $50^\circ$ 、 $30^\circ$  时，光能否发生折射？若能，折射角为多大？

#### 分析

先根据玻璃的折射率求出临界角，再比较入射角与临界角的大小，判断是否会出现全反射现象。若出现全反射现象，折射光消失；若没有出现全反射现象，根据光的折射定律求解。



## 解

光由玻璃射入空气，是由光密介质射入光疏介质，其临界角满足

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

代入数值得  $C = 40^\circ 50'$

当  $i = 50^\circ$  时,  $i > C$ , 所以光将发生全反射, 不会发生折射;

当  $i = 30^\circ$  时,  $i < C$ , 所以光进入空气中发生折射现象。

由折射定律

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{1}{n}$$

代入数值得  $r = 49^\circ 54'$



## 策略提炼

光从其他介质射入真空或空气中, 需比较入射角与临界角的大小, 判断是否出现全反射现象。

## 讨论

玻璃的临界角一般在  $30^\circ \sim 42^\circ$ , 题中关于全反射的判断结果是合理的。发生折射时, 所求得折射角大于入射角, 结果合理。



## 迁移

临界角与光的颜色有关。某小区喷水池底部装有不同颜色的LED灯(可视为点光源), 可在水面形成不同颜色的光斑(图4-19)。若水池底部水平, 水面平静, 红光与紫光在水面形成的光斑面积哪个更大?

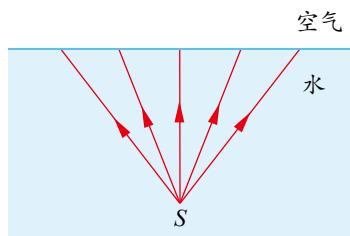


图4-19 水面光斑形成示意图



## 迷你实验室

## “消失”的硬币

在桌子上放一枚硬币, 取一只玻璃杯, 里面盛满水, 然后把玻璃杯压在硬币上(图4-20)。从杯壁看去, 硬币不见了。但是从杯口向下望, 硬币还在那里。

给玻璃杯底蘸上一些水, 再从杯壁看去, 你会发现什么不同? 请解释此现象。

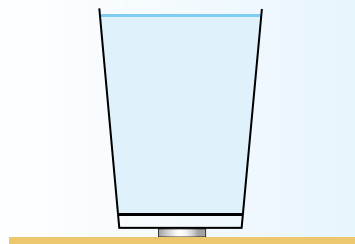


图4-20 实验装置示意图

## 2. 全反射现象

全反射是自然界常见的现象。当熏黑的铁球放入水中时，球面和水之间形成空气层。日光从水照射到空气层时，会有部分光发生全反射，球看上去就变得锃亮了。同理，鱼缸中上升的气泡亮晶晶的，也是由于光射到气泡上发生了全反射（图 4-21）。

在荒漠里看到的蜃景也是一种全反射现象。太阳照到沙地上，接近地面的热空气比上层空气的密度小，折射率也小。从远处物体射向地面的光，进入折射率较小的热空气层时被折射。当入射角大于临界角时发生全反射，人们逆着反射光看去，就会看到远处物体的倒景（图 4-22）。炎热的夏天，在公路上向远处看去，有时路面显得格外明亮光滑，就像被水淋过一样（图 4-23），你能解释这种现象吗？

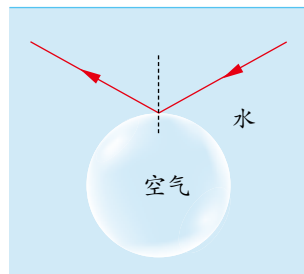


图 4-21 发生全反射示意图

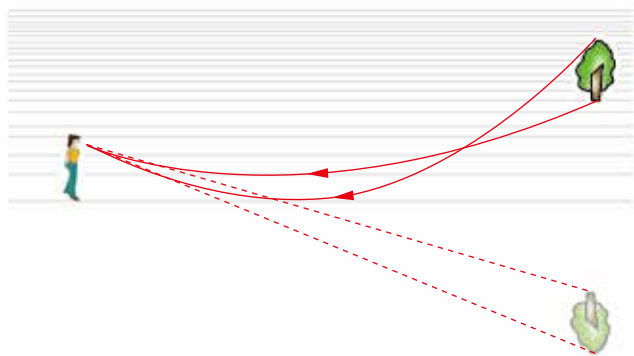


图 4-22 产生蜃景示意图



图 4-23 夏天公路远处像被水淋过

全反射有着重要应用。全反射棱镜的截面为等腰直角三角形。当光垂直于  $AB$  面射向棱镜时，光会沿着入射方向进入棱镜，射到  $AC$  面上。由于入射角等于  $45^\circ$ ，大于玻璃的临界角，光在  $AC$  面上发生全反射，沿着垂直于  $BC$  面的方向射出棱镜，使光的传播方向改变了  $90^\circ$ （图 4-24）；用同样的分析方法可知，当光垂直于  $AC$  面射入棱镜时，在两个直角边的界面都会发生全反射，使光的传播方向改变了  $180^\circ$ （图 4-25）。

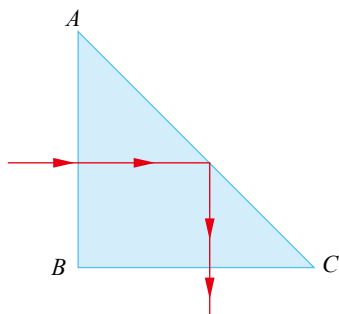


图 4-24 光传播方向改变  $90^\circ$  示意图

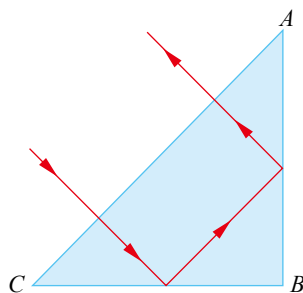


图 4-25 光传播方向改变  $180^\circ$  示意图



全反射棱镜的反射性能比镀银的平面镜更好，精密的光学仪器常用它代替镀银平面镜来反射光，如全反射棱镜应用于潜望镜等（图4-26）。

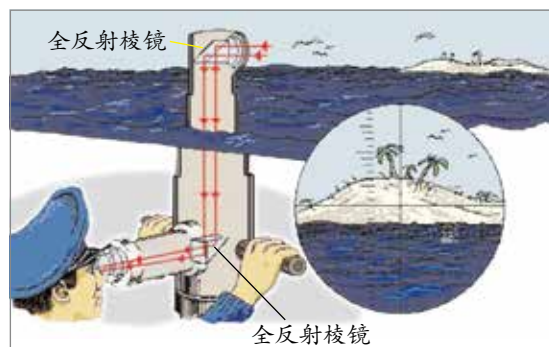


图4-26 潜望镜示意图



### 物理聊吧

美妙的彩虹，常引发人们产生美好的联想，被比喻为“天空的微笑”“相会的彩桥”等。通常能看见的彩虹是红色在外、紫色在内，这被称为“虹”。有时还能看见一组相对“虹”而言颜色较淡的彩色圆弧，红色在内、紫色在外，这被称为“霓”（图4-27）。

根据图4-28，与同学讨论交流：

- （1）什么情况下看见虹，什么情况下看见霓？
- （2）为什么现在很难看到天空中的彩虹？
- （3）你对环境保护有什么设想？



图4-27 美丽的彩虹

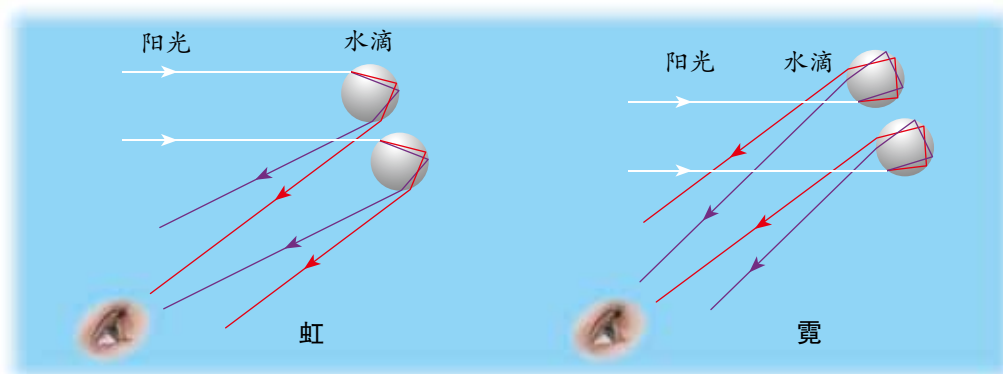


图4-28 虹霓产生示意图





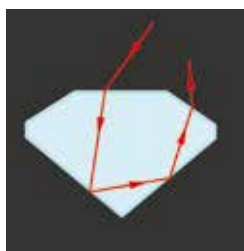
#### 钻石的打磨与全反射

打磨成多面体的钻石能闪闪发光，是射到钻石背面的光全部被反射回来的缘故（图4-29）。为了使钻石能发生全反射，需要将其表面打磨成特定的角度，使射到钻石背面的光的入射角大于其临界角  $24.4^\circ$ 。

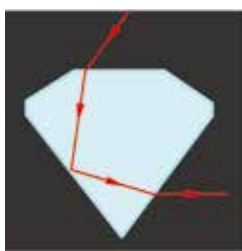
在图4-30中，图（a）是打磨合适的一种式样，而图（b）（c）分别是打磨得太深、太浅的情况，这样光会从其侧面或者底面射出，使钻石失去光泽。



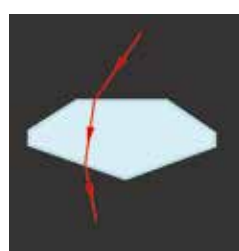
图4-29 全反射使钻石光彩夺目



(a)



(b)



(c)

图4-30 钻石打磨成不同的式样，对光的作用效果不同



#### 节练习

1. 自行车尾灯用透明介质制成，其外形如图所示。请说明自行车尾灯在夜晚被灯光照射时特别明亮的原因。
2. 夏天的傍晚，在平静无风的海面上有时会看到山峰、船舶、楼台等出现在远方的空中，这就是海市蜃楼现象，如图所示。请解释该现象，并比较海市蜃楼与沙漠蜃景的差异。



第1题



第2题

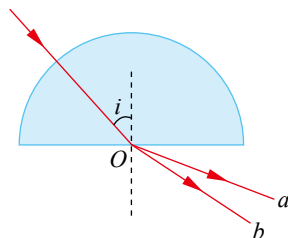


3. 光由某种介质射向与空气的分界面，当入射角大于或等于  $45^\circ$  时，折射光消失。由此，可判断这种介质的折射率是

A.  $\frac{\sqrt{2}}{2}$       B.  $\sqrt{2}$       C.  $\frac{1}{2}$       D. 2

4. 如图所示，包含红、蓝两种颜色的一束复色光沿半径方向射向一块半圆形玻璃砖。在玻璃砖底面的入射角为  $i$ ，经折射后射出到空气中。下列说法正确的是

A. 在玻璃砖中， $a$  光的传播速度小于  $b$  光的传播速度  
 B.  $a$  光为红光， $b$  光为蓝光  
 C. 玻璃砖材料对  $a$  光的折射率小于对  $b$  光的折射率  
 D. 若改变光束的入射方向使  $i$  角逐渐变大，则  $a$  光的折射光首先消失



第4题

5. 如图所示，一块半圆形玻璃砖，其横截面是半径为  $R$  的半圆， $AB$  为半圆的直径， $O$  为圆心。玻璃的折射率  $n = \sqrt{2}$ 。

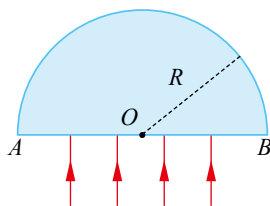
(1) 平行光垂直射向玻璃砖的下表面。若光到达上表面后，都能从上表面射出，则入射光束在  $AB$  上的最大宽度为多少？

(2) 一束光在点  $O$  左侧与  $O$  相距  $\frac{\sqrt{3}}{2}R$  处垂直于  $AB$  从下方入射，求

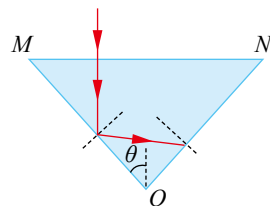
此光从玻璃砖上表面射出时的位置。

6. 如图所示，某同学想把剖面  $MON$  为等腰三角形的玻璃砖加工成“玻璃钻石”。已知顶角  $\angle MON = 2\theta$ ，该玻璃砖材料的折射率  $n = 2$ 。现有一束光垂直于  $MN$  边入射。

(1) 为了使该光在  $OM$  边和  $ON$  边都能发生全反射，求  $\theta$  的取值范围；  
 (2) 若  $\theta = 42^\circ$ ，试通过计算说明该光第一次返回  $MN$  边能否射出。



第5题



第6题

请提问



## 第4节

# 光导纤维及其应用

物理学家提出用光导纤维实现高效传输信息的设想，由此引发了一场光纤通信的革命，推动了高速互联网等现代通信的发展。光导纤维是什么？为何能高效传输信息？本节我们将学习光导纤维的工作原理及其应用。

### 1. 光导纤维的工作原理

把石英玻璃拉成直径几微米到几十微米的细丝（图 4-31），再包上折射率比它小的材料，就制成了**光导纤维**，简称**光纤**（optical fiber）。为了说明它的工作原理，我们先来做一个小实验。



图 4-31 光纤与针眼大小的比较



### 迷你实验室

#### 模拟光纤实验

如图 4-32 所示，在暗室里放置一个容器，并在其侧面靠下的位置开一个小孔。在容器中装入水，水从容器的小孔自由流出。使一束细光束沿水平方向从小孔对面一侧射入水中，你会发现什么现象？



图 4-32 模拟光纤实验



由实验可见，有部分光会顺着这股水流弯曲传播，这是光的全反射所致。如果在实验中用的不是水流，而是上面提到的光纤，我们同样会看到，光一直在光纤中传播，直到从光纤另一端射入空气。

光纤一般由折射率较高的玻璃内芯和折射率较低的外层透明介质组成。光在光纤内传播时，由光密介质 ( $n_1$ ) 入射到光疏介质 ( $n_2$ )，若入射角  $i \geq C$ ，光会在光纤内不断发生全反射。光束在光纤中从一端传到另一端，不会在中途漏射出来 (图 4-33)。实际上，光纤材料的折射率是多层渐变的，通常把若干根光纤集成一束，制成光缆 (图 4-34)。

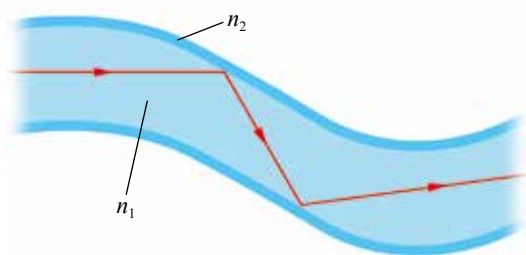


图 4-33 光在光纤内传输示意图



图 4-34 光缆

## 2. 光纤通信

光纤通信是光纤的一个重要应用。光纤通信中，先将传送的信息转换为光信号，通过光纤将光信号传输到接收端，接收端再将光信号还原为原信息 (图 4-35)。光纤网是信息社会的重要基石，“光纤到户”是信息社会的重要标志。

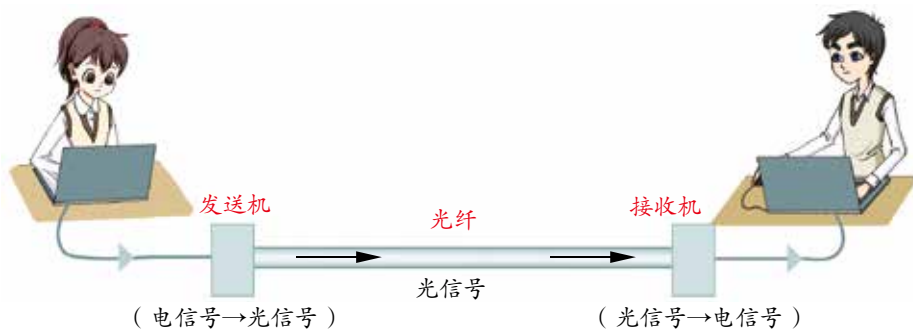


图 4-35 光纤通信示意图

利用光缆构成的电视网，能同时传送上千套电视节目的信号，使人们可选择收看各种各样的电视节目。许多光纤通信设备已在舰艇、飞机上安装使用；将光缆引入家庭，可将



电视、电话、计算机和传真机结合在一起，发挥更大的作用。光缆大大增加了声音、图像和数据量的传输，其通信容量远大于电缆（图 4-36）。



图 4-36 光缆中的一根光纤的通信容量相当于一束电缆

能理解光的折射定律的内涵，了解光的全反射现象等；能解释身边的光的折射与全反射现象，能说明光纤技术在生产生活中的应用。具有与光的折射和全反射相关的运动与相互作用观念和能量观念。

通过光纤技术的应用，能体会物理技术应用对人类生活与社会发展的影响；有学习物理、服务社会的志趣；能为科学家在光纤方面的伟大成果而感到自豪。

——物理观念，科学态度与责任

素养提升



### 光纤的其他应用

光纤在形状弯曲的情况下也能传递图像，这使一些光学系统结构简化。光纤作为一种性能优良的光学元件，不但在光纤通信和图像信息处理领域发挥着重要的作用，而且在光学仪器和电子器件制造方面得到了广泛的应用。

图 4-37 是医用光纤内窥镜，它包括成像、传像和观察记录几个部分。一种高强度的光通过光纤束的传光束送到内窥镜探头，并通过导光孔照亮被观测物体。被观测物体的像由观察窗入射，经物镜成像，由光纤束送到目镜和照相机。光纤在医学上的成功应用，使激光能随各种体腔镜进入人体体腔内部，施行直视手术。

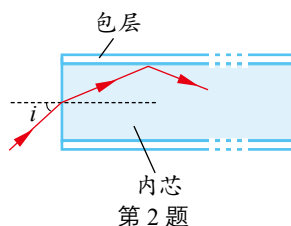
随着科学技术的不断发展，光纤的应用将越来越广泛，它必将对人们的生产生活方式产生深远影响。



图 4-37 医用光纤内窥镜

### 节练习

1. 与其他电信号传输系统相比，光纤具有哪些优势？请举例说明。
2. 如图所示，光纤由折射率不同的内芯和包层构成，光以入射角  $i$  从光纤的端面入射，并能在内芯中传播。内芯的折射率与包层的折射率哪个更大？入射角可以是任意值吗？为什么？





3. “水流导光”实验装置如图所示。长直开口透明塑料瓶内装有适量清水，在其底侧开一小孔，水从小孔流出，形成弯曲不散开的水流，用细激光束透过塑料瓶水平射向该小孔，观察到激光束没有完全被限制在水流内传播。下列操作中，能使激光束完全被限制在水流内传播的是

A. 增大激光的强度                      B. 向瓶内加适量清水  
C. 改用频率更低的激光                D. 改用折射率更小的液体

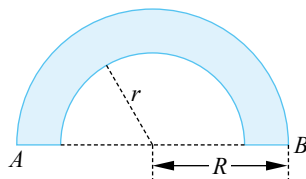
4. 如图所示，空气中有一横截面为半圆环的均匀透明柱体，其内圆半径为  $r$ ，外圆半径为  $R$ ， $R = \sqrt{2}r$ 。现有一束单色光垂直于水平端面  $A$  射入透明柱体，只经过两次全反射就垂直于水平端面  $B$  射出。设透明柱体材料的折射率为  $n$ ，光在透明柱体内传播的时间为  $t$ ，真空中的光速为  $c$ ，则

A.  $n$  可能为  $\sqrt{3}$                       B.  $n$  可能为 2  
C.  $t$  可能为  $\frac{2\sqrt{3}r}{c}$                       D.  $t$  可能为  $\frac{4.8r}{c}$

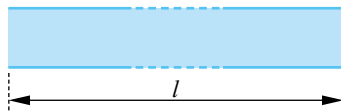
5. 如图所示，一根长为  $l$  的直光纤，它的折射率为  $n$ 。光从它的一个端面射入，从另一端面射出，所需的最长时间为多久？（真空中的光速为  $c$ ）



第3题



第4题



第5题

请提问





## 章末练习

### 科学认知

1. 在刚下过雨的黄昏，你朝哪个方向可看得到彩虹？请解释原因。
2. 某科技馆内有一个半径为  $R$  的半圆柱形透明体，其俯视图如图所示。为估测该透明体材料的折射率，某同学进行了如下实验：用激光笔从右侧沿垂直于直径  $AB$  方向朝透明体射入，保持入射方向不变，入射点由圆心  $O$  处缓慢向  $A$  处移动，观察到从圆弧面上射出的光逐渐减弱。当入射点到达  $C$  处时，恰好看不到光从圆弧面上  $D$  处射出，测得  $OC = 0.6R$ 。由此，可求出透明体材料的折射率为

- A.  $\frac{3}{5}$       B.  $\frac{5}{4}$       C.  $\frac{4}{3}$       D.  $\frac{5}{3}$

3. 人造树脂是眼镜镜片常用的材料。如图所示，一束光照射在人造树脂立方体上，经折射后，射在桌面上的点  $P$ 。已知光的入射角为  $30^\circ$ ， $OA = 5 \text{ cm}$ ， $AB = 20 \text{ cm}$ ， $BP = 12 \text{ cm}$ ，求该人造树脂材料的折射率  $n$ 。

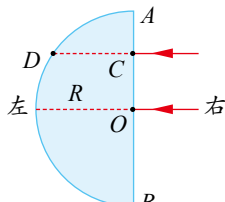
4. 现在高速公路上的标志牌表面大都有“反光膜”。夜间行车时，它能把车灯射出的光逆向返回，使标志牌上的字特别醒目。这种“反光膜”是用球体反射元件制成的，反光膜内均匀分布着一层直径为  $10 \mu\text{m}$  的小玻璃珠，所用玻璃的折射率为  $\sqrt{3}$ 。如图所示，为使从车灯射出的入射光经玻璃珠折射、反射、再折射后恰好与入射光平行，第一次入射的入射角应是多少？

5. 如图所示，某单色光以  $45^\circ$  角入射到等腰三棱镜的一个侧面  $AB$  上，测得其折射角是  $30^\circ$ 。已知光速为  $c$ ，求：

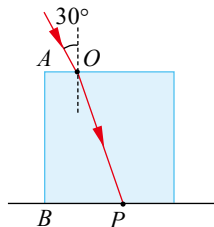
- (1) 此单色光在该三棱镜中的速度；
- (2) 当此折射光在三棱镜内的另一侧面  $AC$  上刚好发生全反射时，三棱镜的顶角  $A$  的大小。

6. 如图所示，空气中有一折射率为  $\sqrt{2}$  的玻璃柱体，其横截面是圆心角为  $90^\circ$ 、半径为  $R$  的扇形  $OAB$ 。平行光平行于横截面，以  $45^\circ$  入射角照射到  $OA$  上，若只考虑首次入射到圆弧  $AB$  上的光，则  $AB$  上有光透出部分的弧长为多长？

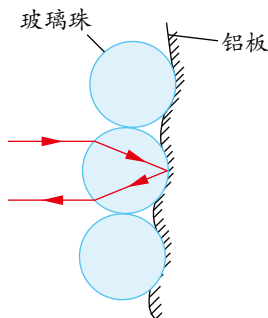
7. 如图所示，一束光从空气中垂直射到棱镜界面  $BC$  上，棱镜材料的折射率为  $\sqrt{2}$ 。这束光离开棱镜时与界面的夹角为多大？



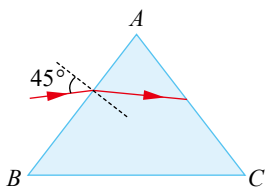
第2题



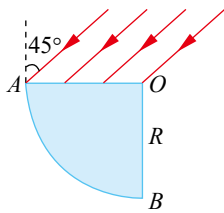
第3题



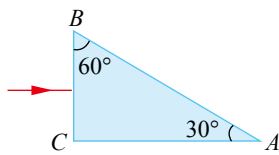
第4题



第5题



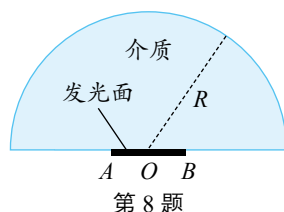
第6题



第7题



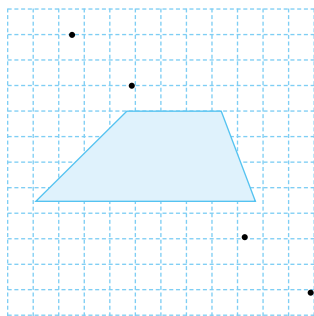
8. 电视机遥控器中有一个发光二极管, 它发出红外光来控制电视机的各种功能。已知这种发光二极管的发光面  $AB$  是直径为  $2\text{ mm}$  的圆盘, 封装在折射率  $n=2.5$  的半球形介质中, 其圆心位于半球的球心点  $O$ , 如图所示。为确保发光面发出的红外光第一次到达半球面时都不发生全反射, 半球形介质的半径  $R$  至少应为多大?



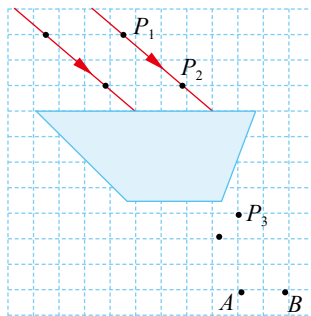
第8题

### 科学探究

9. 在“测量玻璃的折射率”实验中, 某同学经正确操作插好了4枚大头针, 如图(a)所示。
- (1) 请在坐标纸中画出完整的光路图。
  - (2) 对你画出的光路图进行测量和计算, 求得该玻璃的折射率  $n = \underline{\hspace{2cm}}$ 。(结果保留3位有效数字)
  - (3) 为了观测光在玻璃不同表面的折射现象, 某同学做了两次实验, 经正确操作插好了8枚大头针, 如图(b)所示。图中  $P_1$  和  $P_2$  是同一入射光上的2枚大头针, 其对应出射光上的2枚大头针是  $P_3$  和  $\underline{\hspace{2cm}}$  (选填“A”或“B”)。



(a)

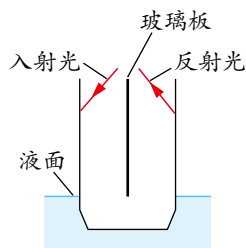


(b)

第9题

### 科学辨析

10. 如图所示, 有人设计的光液面传感器有一个试管模样的玻璃管, 中央插一块两面反光的玻璃板, 入射光在玻璃管内壁与玻璃板之间来回发生反射, 进入玻璃管底部, 然后在另一侧反射而出(与光纤原理相同)。当透明液体的折射率大于管壁玻璃的折射率时, 便可通过监测出射光的强弱来判定玻璃管被液体包围的情况, 从而了解液面的高度。请分析其工作原理。



第10题

### 科技交流

11. 光纤在生产生活中的应用非常广泛。请通过网络、图书馆等收集资料, 写一篇科技小论文, 论述光纤在某一方面的应用。

### 温故知新

12. 平衡位置位于原点  $O$  的波源发出一列简谐横波, 波在均匀介质中沿  $x$  轴水平传播,  $P$ 、 $Q$  为  $x$  轴上的两个点(均位于  $x$  轴正方向),  $P$  与  $O$  的距离为  $35\text{ cm}$ , 此距离介于1倍波长与2倍波长之间。已知波源自  $t=0$  时由平衡位置开始向上振动, 周期  $T=1\text{ s}$ , 振幅  $A=5\text{ cm}$ 。当波传到点  $P$  时, 波源恰好处于波峰位置。此后再经过  $5\text{ s}$ , 平衡位置在  $Q$  处的质点第一次处于波峰位置。求:
- (1)  $P$ 、 $Q$  之间的距离;
  - (2) 从  $t=0$  开始, 到平衡位置在  $Q$  处的质点第一次处于波峰位置时, 波源在振动过程中通过的路程。



# 第5章

# 光的干涉、衍射和偏振

导 入 神奇的光

第1节 光的干涉

第2节 科学测量：用双缝干涉测光的波长

第3节 光的衍射

第4节 光的偏振

第5节 激光与全息照相

## ►►本章学业要求

●能了解光的干涉、衍射和偏振的内涵，能了解激光的特性；能解释生产生活中有关光的干涉、衍射和偏振的现象，能说明激光技术在生产生活中的应用。具有与光的干涉、衍射和偏振相关的运动与相互作用观念和能量观念。——物理观念

●能将光的干涉、衍射和偏振等与光波模型联系起来；能分析与光的干涉、衍射和偏振相关的光的波动性问题；能用与光的干涉、衍射和偏振相关的证据解释生活中光的波动性问题；能从不同角度思考光的波动性问题，知道质疑与创新是非常重要的。——科学思维

●能完成“用双缝干涉实验测光的波长”等实验。能分析实验现象，提出并准确表述在实验中可能出现的物理问题；能在他人帮助下制订实验方案，会解释实验原理，能使用双缝干涉仪等器材收集数据；能分析双缝干涉条纹等信息，测得光的波长；能撰写规范的实验报告，在报告中能呈现设计的实验表格、数据分析过程及实验结论，能有效陈述并讨论交流实验过程中的问题。——科学探究

●通过双缝干涉实验，能体会物理实验器材的创新对科学测量有推进作用；有学习物理的内在动机与热情，能感受物理学之美；能认识科学普及的重要性，能在科学普及活动中发挥积极的作用。——科学态度与责任





## 导 人

# 神奇的光

你可能不止一次地吹过肥皂泡。当肥皂泡在身边飞舞的时候，你是否注意过它上面那变幻不定的奇异色彩？夜晚的激光音乐喷泉中，随旋律高低起伏的喷泉和五光十色的酷炫激光，给夜景增添了一些妩媚的色彩。其中的激光究竟是什么？



五光十色的肥皂泡



神奇的玻璃珠

各种形态的神奇玻璃珠，五彩斑斓，美丽非凡，这张照片是如何拍摄的？看立体电影时，你会感到高速行驶的火车向你迎面冲来，彩色的气球从屏幕飞向你的头顶……立体电影为什么能产生如此逼真的效果？

在这一章中，我们将探讨与神奇的光有关的问题。

## 第1节

# 光的干涉

干涉、衍射和偏振是波特有的现象，光是否也会产生这些现象？本节我们将探讨光的干涉现象。

## 1.光的干涉及其产生条件

我们曾观察过水波的干涉现象，用音叉很容易实现声波的干涉。那么，当两束光相遇时，是否会产生干涉现象呢？下面我们通过实验来进行探索。



### 迷你实验室

#### 双缝干涉现象

将一束激光照射到双缝上，光通过双缝后照射到光屏上（图 5-1），可观察到屏上出现明暗相间的条纹（图 5-2）。

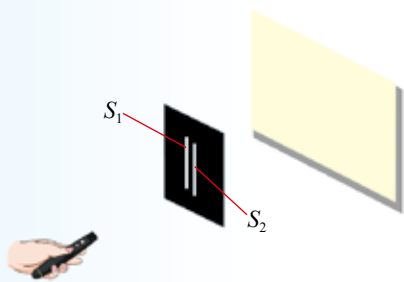


图 5-1 双缝干涉实验装置示意图



图 5-2 双缝干涉的干涉图样

激光光源发出的光，同时投射到缝  $S_1$  和缝  $S_2$  上，被分成两列光波。这两列光波振动频率、振动方向都相同，在双缝后相遇，出现振动加强和减弱相间的区域，在屏上就出现了明暗相间的干涉条纹。可见，两束光相遇时，如果满足一定的条件，也会产生干涉现象。研究表明，**要使两列光波相遇时产生干涉现象，两列光波必须具有相同的频率和振动方向**。干涉是波特有的一种现象，光确实具有波的特性。



1801年,英国物理学家托马斯·杨(T. Young, 1773—1829)首次在实验室成功进行了光的干涉实验,即著名的杨氏双缝干涉实验。双缝干涉实验示意图如图5-3所示。

在一个房间里同时开两盏白炽灯,是看不到干涉现象的。因为白炽灯的一根钨丝中包含大量的钨原子,这些原子发出的光波的频率、振动方向多种多样,发出光波的时间也各有先后,这样叠加在一起只能形成一片均匀的亮光,看不出有规则的干涉图样。

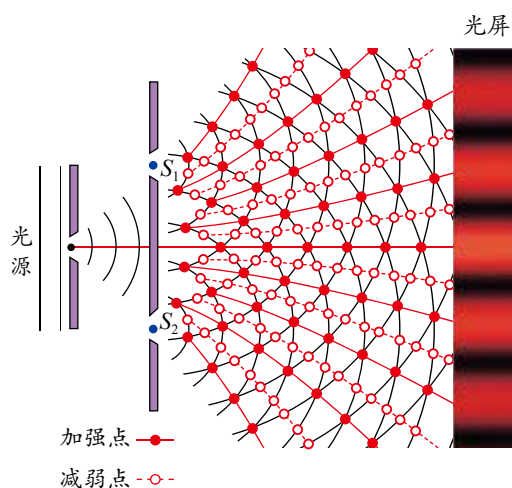


图5-3 双缝干涉实验示意图



### 拓展一步

#### 光的相干条件

两列光波产生干涉的条件,除光波的频率和振动方向必须相同之外,还要求振动必须保持恒定的相位差。如果两列光波的频率和振动方向都相同,但相位差变化不定,这样的两列光波叠加也不可能产生出稳定的干涉图样。

人们把频率相同、振动方向相同和相位差恒定这三个条件称为光的相干条件,符合这三个条件的光源称为相干光源。

## 2. 光的双缝干涉公式

两列光波产生干涉时,为什么会在光屏上出现明暗相间的条纹呢?

如图5-4所示,在光屏的中心取一个点 $P_0$ ,使它到缝 $S_1$ 和缝 $S_2$ 的距离相等。当从缝 $S_1$ 和缝 $S_2$ 发出的振动情况相同的两列光波经过相等的路程到达点 $P_0$ 时,必然是两列光波的波峰(或波谷)同时到达点 $P_0$ 。这样,两列光波叠加的结果是该点的光总是得到加强,因此该点就出现亮条纹。

如果我们在点 $P_0$ 的上方取一个点 $P$ ,使缝 $S_1$ 和缝 $S_2$ 到点 $P$ 的距离之差 $\Delta r$ 正好是光波的半个波长(即 $\Delta r = \frac{1}{2}\lambda$ ),那么两列光波必然是一列波的波峰(或波谷)与另一列波的波谷(或波峰)同时到达点 $P$ 。这样,两列光波叠加的结果是该点的光总是减弱,因此该点就出现暗条纹。如果我们在点 $P$ 的上方再取一

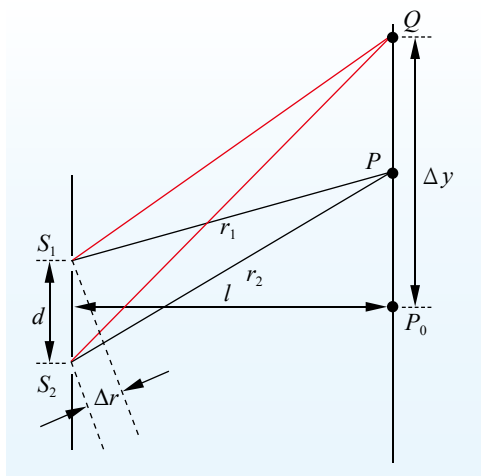


图5-4 双缝干涉条纹分析示意图

个点  $Q$ ，使缝  $S_1$  和缝  $S_2$  到点  $Q$  的距离之差  $\Delta r$  正好是光波的一个波长（即  $\Delta r = \lambda$ ），那么两列光波也是波峰（或波谷）同时到达点  $Q$ ，叠加的结果是该点的光总是得到加强，因此该点也出现亮条纹。

依此类推，如果两列光波到达某点时，路程差  $\Delta r$  为波长的整数倍，即满足  $\Delta r = \pm n\lambda$  ( $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ) 时，这两列光波互相加强，在那里就出现亮条纹；反之，如果两列光波到达某点时，路程差  $\Delta r$  为半个波长的奇数倍，即满足  $\Delta r = \pm (2n+1)\frac{\lambda}{2}$  ( $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ) 时，就出现暗条纹。这样，在屏上就形成了明暗相间的干涉图样。

研究表明，在双缝干涉实验中，相邻两条亮条纹或暗条纹中心间距

$$\Delta y = \frac{l}{d} \lambda$$

式中， $\lambda$  为光波的波长， $d$  为双缝间距离， $l$  为双缝到光屏的距离。由上式可见，当  $d$  和  $l$  一定时， $\lambda$  越大，条纹中心间距  $\Delta y$  就越大。由该公式，我们可通过测量  $\Delta y$ 、 $d$  和  $l$  得出光波的波长  $\lambda$ 。



### 物理聊吧

同一实验装置，用不同的色光来做双缝干涉实验，所产生的干涉条纹是不同的。图 5-5 是由三种色光产生的干涉条纹，请比较它们有什么异同，并说明原因。

谈谈你的认识，并与同学讨论交流。



(a) 红光



(b) 蓝光



(c) 白光

图 5-5 三种色光产生的干涉条纹示意图

### 例题

用橙色光做双缝干涉实验时，测得双缝间的距离为  $0.1 \text{ cm}$ ，双缝挡板与光屏间的距离为  $205 \text{ cm}$ ，第 1 条亮线与第 5 条亮线中心间距为  $0.5 \text{ cm}$ 。求橙色光的波长和频率。

#### 分析

通过第 1 条纹和第 5 条纹的距离可求得相邻条纹的间距，再通过双缝干涉条纹间距的公式即可得到光的波长，然后通过波长与频率的关系可求得频率。





解

$$\text{已知 } l = 205 \text{ cm}, d = 0.1 \text{ cm}, \Delta y = \frac{0.5}{4} \text{ cm}$$

$$\lambda = \frac{d}{l} \Delta y = \frac{0.1}{205} \times \frac{0.5}{4} \text{ cm}$$

$$= 6.1 \times 10^{-5} \text{ cm} = 6.1 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8}{6.1 \times 10^{-7}} \text{ Hz} = 4.9 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

讨论

在空气中, 橙光的波长范围为  $597 \sim 622 \text{ nm}$ , 计算结果合理。不同波长的光波, 引起人眼的颜色感觉不同。在可见光中, 红光波长最长, 紫光波长最短。请查阅相关资料, 了解不同颜色可见光的波长范围。

## 策略提炼

机械波中波长、频率与波速间的关系  $v = \lambda f$ , 对光波仍然适用。光在真空中的传播速度为  $c$ 。光在介质中的传播速度, 可通过  $v = \frac{c}{n}$  计算。



## 迁移

如果我们将整个实验装置放入折射率大于 1 的介质中, 保持  $d$  和  $l$  不变化, 条纹间距会发生变化吗?



## 拓展一步

## 光程与双缝干涉的条纹间距

光在不同介质中的传播速度不同。如果光在某介质中沿直线传播的距离为  $l$ , 经历时间为  $t$ , 传播速度为  $v$ , 则

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

再由折射率公式

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

得

$$t = \frac{nl}{c}$$

我们把  $nl$  称为光程, 用  $\delta$  表示。如果光在真空中或空气中传播,  $n = 1$ , 则光程和路程相等。光程可理解为在相同时间内光在真空中传播的距离。

在双缝干涉实验中, 相邻两条亮纹或暗纹中心间距可由光程差推出。如图 5-6 所示, 若单色光在真空中波长为  $\lambda$ , 两孔间距为  $d$ , 小孔至屏的距离为  $l$ , 相邻条纹间距为  $\Delta y$ , 介质折射率为  $n$ , 振动情况相同的两光源到点  $P$  的光程差为

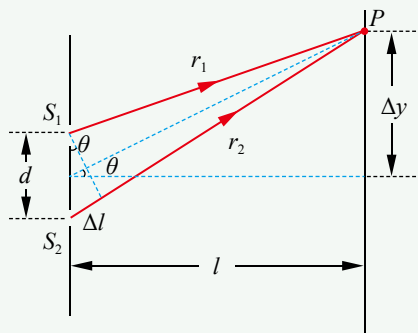


图 5-6 双缝干涉条纹分析示意图

$$\Delta l = nr_2 - nr_1 = nd \sin \theta$$

由于  $\theta$  很小

$$\sin \theta \approx \tan \theta = \frac{\Delta y}{l}$$

点  $P$  出现第一条亮纹，其光程差为一个波长，即

$$\Delta l = \lambda$$

所以，相邻条纹间距

$$\Delta y = \frac{l}{nd} \lambda$$

在真空或空气中， $n = 1$

$$\Delta y = \frac{l}{d} \lambda$$

### 3. 薄膜干涉及其应用

光的干涉现象就在我们身边，色彩斑斓的肥皂泡、五颜六色的油膜（图 5-7）等，都与光的干涉有关。如何解释这些现象呢？下面先看一个小实验。



图 5-7 油膜上的干涉现象



#### 迷你实验室

##### 肥皂液膜上的干涉

在酒精灯灯芯上撒一些食盐，灯焰能发出明亮的黄光。把铁丝圈在肥皂液中蘸一下，使铁丝圈挂上一层薄薄的液膜，用酒精灯的黄光照射液膜，液膜反射的光能使我们看到灯焰的像（图 5-8）。为什么灯焰的像会出现明暗相间的横条纹？

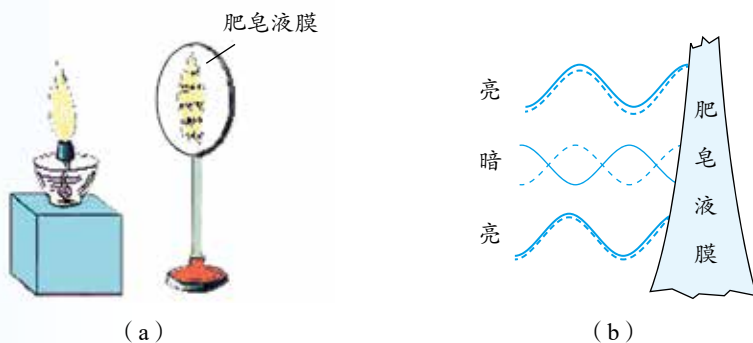


图 5-8 薄膜干涉示意图

灯焰的像是液膜前后两个面反射的光形成的，这两列光波的频率相同，能发生干涉。竖直放置的肥皂液膜受到重力的作用，下面厚，上面薄，在液膜上不同的地方，来自前后



两个液面的反射光所走的路程不同。这两列波在一些地方叠加后互相加强，于是出现了亮条纹；在另一些地方叠加后互相削弱，于是出现了暗条纹。这一类由薄膜两个面反射的光波相遇而产生的干涉现象称为**薄膜干涉**（film interference）。用不同波长的单色光做这个实验，条纹的间距是不一样的。如果用白光照射肥皂液膜，由于各色光干涉后的条纹间距不同，液膜上就会出现彩色条纹。平时我们看到的蚌壳内表面透明薄膜上呈现出各种色彩，有些昆虫薄而透明的翅翼上出现彩色光带，有透明薄膜保护层的激光唱片呈现彩色……都是薄膜干涉现象。

两块叠放在一起的玻璃板之间存在很薄的一层空气薄膜，光波分别在与该空气薄膜接触的两玻璃面上反射。当这两部分反射光相遇时，也会产生薄膜干涉，形成干涉条纹。轻压玻璃板，被压处空气薄膜的厚度会变化，从而导致干涉条纹弯曲变形（图 5-9）。我们可利用这一特点来检查平面的平整程度：如图 5-10 所示，在被测平面上放一个透明的标准平面样板，在样板的一端垫一个薄片，使标准平面和被测平面之间形成一个楔形空气薄膜；再用单色光照射样板，这时分别从空气薄膜上、下两表面反射的两列光波就会发生干涉。如果被测表面是平的，干涉条纹就是一组平行的直条纹；如果干涉条纹发生弯曲，就表明被测表面不平。这种测量的精度可达  $10^{-8}$  m。

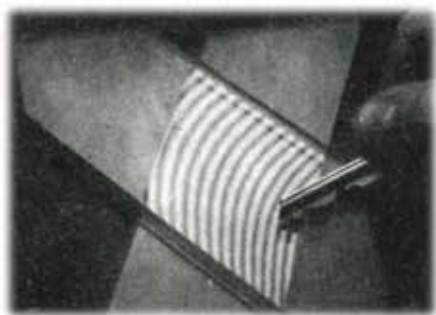


图 5-9 轻压玻璃板导致干涉条纹变形

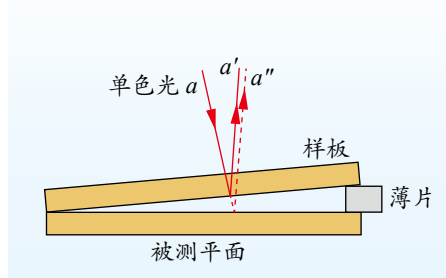


图 5-10 检查平面平整程度示意图



### 光学镜头上的增透膜

在照相机、望远镜等光学仪器设备中，要用到许多透镜、棱镜。光在通过这些元器件时，在每一个表面上都会发生一部分反射，从而导致透过这些元器件的光能量减少。为了降低光能损失，人们在这些元器件的表面镀上透明的薄膜，即增透膜（图 5-11），如氟化镁薄膜。增透膜两个表面的反射光所通过的光程差等于半个波长，这样反射回来的光会因产生干涉而相互抵消，增加了透射光的能量。增透膜不仅能有效减少光能损失，而且由于薄膜的材料比玻璃更耐磨，还能有效地保护镜头的光滑表面不被磨损。



图 5-11 相机镜头上的增透膜

### 节练习

1. 如图所示，一铁丝环中有肥皂液膜，当日光照射肥皂液膜时会出现彩色条纹。请分析原因。

2. 用白光做双缝干涉实验时，多数亮纹都是彩色的，为什么中间的一条亮纹是白色的？

3. 在如图所示的双缝干涉实验中，用波长  $\lambda = 600 \text{ nm}$  的橙色光照射，在光屏中心点  $P_0$  呈现亮条纹。若点  $P_0$  上方的点  $P$  到  $S_1$ 、 $S_2$  的路程差恰为  $\lambda$ ，现改用波长为  $400 \text{ nm}$  的紫光照射，则

A.  $P_0$  和  $P$  都呈现亮条纹

B.  $P_0$  为亮条纹， $P$  为暗条纹

C.  $P_0$  为暗条纹， $P$  为亮条纹

D.  $P_0$  和  $P$  都呈现暗条纹

4. 用干涉法检查厚玻璃板  $b$  的上表面是否平整的装置如图所示。干涉条纹是由某两个表面反射的光叠加产生的，这两个表面是

A.  $a$  的上表面、 $b$  的下表面

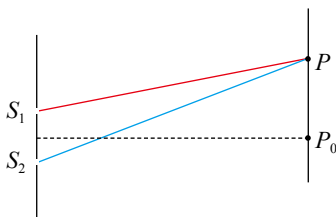
B.  $a$  的上表面、 $b$  的上表面

C.  $a$  的下表面、 $b$  的上表面

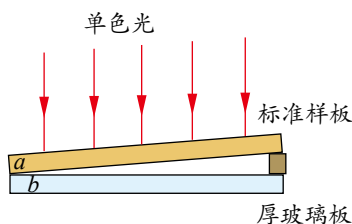
D.  $a$  的下表面、 $b$  的下表面



第1题



第3题



第4题

5. 在双缝干涉实验中，分别用红色和绿色的激光照射同一双缝，在双缝后的屏幕上，红光的干涉条纹间距与绿光的干涉条纹间距哪个更大？若实验中红光的波长为  $630 \text{ nm}$ ，双缝与屏幕的距离为  $1.00 \text{ m}$ ，测得第1条到第6条亮条纹中心间的距离为  $10.5 \text{ mm}$ ，双缝之间的距离有多大？

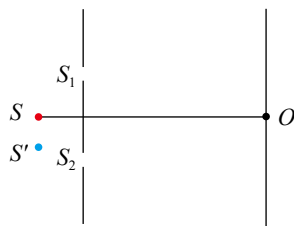
\*6. 如图所示，在双缝干涉实验中，若单色光源  $S$  到两缝  $S_1$ 、 $S_2$  距离相等，则屏上中央亮条纹位于图中  $O$  处。现将光源  $S$  向下移动到示意图中的  $S'$  位置，则

A. 中央亮条纹向下移动，且条纹间距不变

B. 中央亮条纹向上移动，且条纹间距不变

C. 中央亮条纹向下移动，且条纹间距增大

D. 中央亮条纹向上移动，且条纹间距增大



第6题

请提问



## 第2节

# 科学测量：用双缝干涉测光的波长

光的干涉现象证实光是一种波。不同颜色的光的波长不同，如何测量光的波长呢？本节我们将通过双缝干涉实验来测量不同色光的波长。

### 实验目的

- (1) 用双缝干涉实验装置测量光的波长。
- (2) 学习测量微小距离的方法。

### 实验器材

光具座、双缝干涉仪〔由光源、滤光片、单缝、双缝、遮光筒、毛玻璃屏、测量头（图 5-12）组成〕、学生电源。

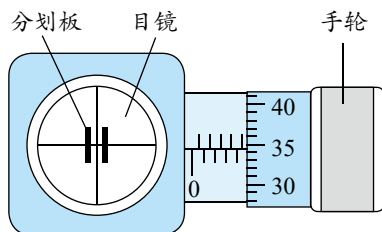


图 5-12 测量头示意图

### 实验原理与设计

根据双缝干涉的条纹间距公式可得  $\lambda = \frac{d}{l} \Delta y$ ，分别测量  $d$ 、 $l$  和  $\Delta y$ ，可求得光波波长。条纹的间隔太密，直接测量相邻条纹间距误差较大。请想一想，如何较准确地测量出相邻两条亮条纹（或暗条纹）的间距？

### 实验步骤

(1) 如图 5-13 所示，在光具座上把各光学元件装配好。从遮光筒上取下双缝，打开电源，调节光源的高度，直到光束能沿遮光筒的轴线射到毛玻璃屏的中心。放上单缝和双缝，使它们的距离为 5 ~ 10 cm，并保持缝相互平行。注意各光学元件中心应大致位于遮光筒的轴线上。

### 方法点拨

测量头由分划板、目镜、手轮等构成。测量头上手轮的读数可按螺旋测微器或游标卡尺的读数方法读取。



### 安全警示

避免眼睛长时间直视光源。双缝干涉仪是比较精密的仪器，应轻拿轻放，以免损坏。

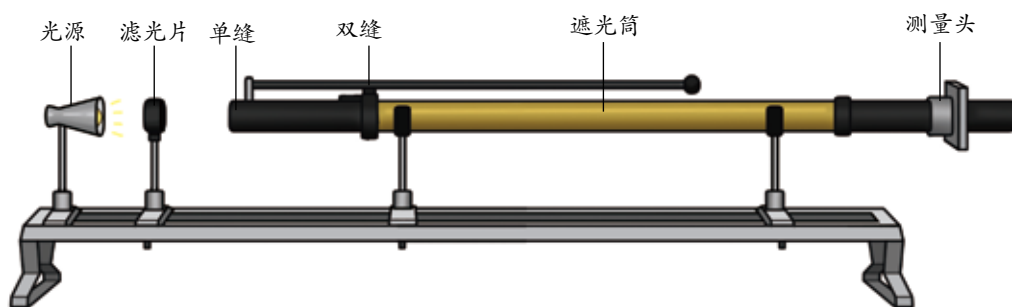


图 5-13 测量光波长的实验装置

(2) 观察光屏上的白光干涉条纹的特点。给光源加上不同的滤光片，看条纹的色彩、间距发生了什么变化，相邻亮条纹（或暗条纹）的间距是否相等。

(3) 记下双缝间的距离  $d$  和双缝到光屏的距离  $l$ 。

(4) 转动手轮，先使分划板中心刻线对准某条亮条纹中心，如图 5-14 所示，记下此时的读数。继续转动手轮，使分划板中心刻线移过  $n$  条条纹，对齐另一亮条纹中心，再记下此时的读数。转动手轮进行测量时，一次测量中不要反向旋转。

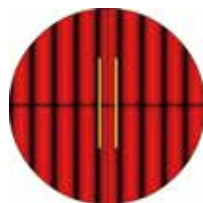


图 5-14 测条纹间距

(5) 把测量结果记录在数据表格中，算出两次读数之差，并求出相邻亮条纹（或暗条纹）的平均间距  $\Delta y$ 。求出光的波长。

### 数据分析

将测量的数据记入你设计的表格中，并分析数据，形成结论。

### 实验结论

写出实验结论。

### 讨论

想一想，影响干涉条纹间距的因素有哪些？

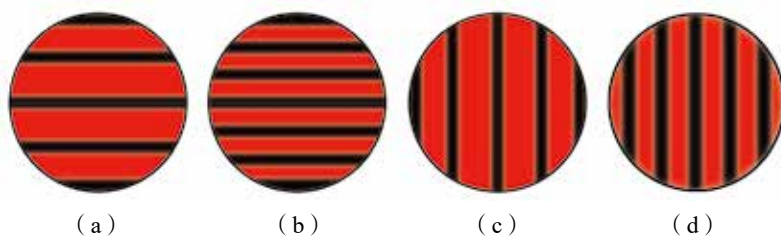
能分析实验现象，提出并准确表述在实验中可能出现的物理问题；能在他人帮助下制订实验方案，会解释实验原理，能使用双缝干涉仪等器材收集数据；能分析双缝干涉条纹等信息，测得光的波长；能撰写规范的实验报告，在报告中能呈现设计的实验表格、数据分析过程及实验结论，能有效陈述并讨论交流实验过程中的问题。

注意提升实验操作能力与实验数据读取能力。

——科学探究

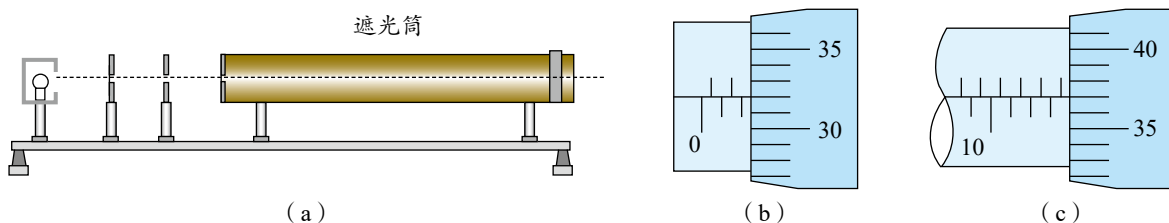
## 节 练 习

1. 请撰写“用双缝干涉实验测量光的波长”的实验报告。注意在报告中呈现设计的实验表格、数据分析过程及实验结论，讨论实验过程中出现的问题。
2. 在“用双缝干涉实验测量光的波长”实验中，一同学经调节后使单缝与双缝在竖直方向相互平行。若该同学先后分别用间距  $d_1 = 0.20 \text{ mm}$  和  $d_2 = 0.25 \text{ mm}$  的双缝来完成实验，其他条件不变，你认为观察到的单色光的干涉条纹是下面哪些图像？其中对应双缝间距  $d_1$  的是下面哪个图像？



第2题

3. 用  $a$  和  $b$  两种单色光依次在同一双缝干涉装置上做实验，在屏上观察到  $a$  光的干涉条纹间距较大，则
- $a$  光波长较短
  - 水对  $a$  光的折射率较大
  - $a$  光在水中的传播速度较大
  - $a$  光从水中射向空气时，全反射临界角较小
4. 现有毛玻璃屏  $A$ 、双缝  $B$ 、白光光源  $C$ 、单缝  $D$ 、透红光的滤光片  $E$  几种光学元件，要把它们放在图 (a) 所示的光具座上组装成双缝干涉实验装置，用以测量红光的波长。
- (1) 将白光光源  $C$  放在光具座最左端，再依次放置其他光学元件。由左至右，各光学元件的排列顺序应为  $C$ 、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、 $A$ 。
- (2) 本实验的步骤有：
- 取下遮光筒左侧的元件，调节光源高度，使光束能直接沿遮光筒轴线把屏照亮。
  - 按合理顺序在光具座上放置各光学元件，并使各元件的中心位于遮光筒的轴线上。
  - 用刻度尺测量双缝到屏的距离。
  - 用测量头测量第 1 条亮条纹到第  $n$  条亮条纹间的距离。
- 在操作步骤 B 时还应注意 \_\_\_\_\_ 和 \_\_\_\_\_。
- (3) 将测量头的分划板中心刻线与某条亮条纹中心对齐，将该亮条纹定为第 1 条亮条纹，此时手轮上的示数如图 (b) 所示。同方向转动手轮，使分划板中心刻线与第 6 条亮条纹中心对齐，记下此时图 (c) 中手轮上的示数为 \_\_\_\_\_ mm，求得相邻亮条纹的间距  $\Delta y$  为 \_\_\_\_\_ mm。
- (4) 已知双缝间距  $d = 2.0 \times 10^{-4}$  m，测得双缝到屏的距离  $l = 0.700$  m，由计算式  $\lambda =$  \_\_\_\_\_，求得所测红光波长为 \_\_\_\_\_ nm。



第4题

请提问



## 第3节

# 光的衍射

光会不会像水波一样在遇到障碍物后出现衍射现象呢？本节我们将通过实验来认识光的衍射现象。

### 1. 衍射现象

如图 5-15 所示，用一束激光照射大小不一的小孔，观察光屏上出现的现象。实验表明，当圆孔足够小时，可观察到屏上出现了明暗相间的圆环，说明光已传播到原来应是阴影的地方。这些现象用光的直线传播无法解释，这种光绕过障碍物偏离直线传播的现象称为**光的衍射**（diffraction of light）。

产生衍射现象时，来自小孔不同位置的光在屏上相遇叠加，有的相互加强，有的相互减弱，形成明暗相间的衍射图样。如果用单缝代替圆孔（图 5-16），当缝较宽时，光沿着直线方向通过狭缝，在屏上形成一条与单缝相似的亮条纹；单缝宽度逐渐减小时，亮条纹的宽度反而增大了，这表明光没有沿直线传播，它绕过了缝的边缘，传播到比单缝更宽的地方。

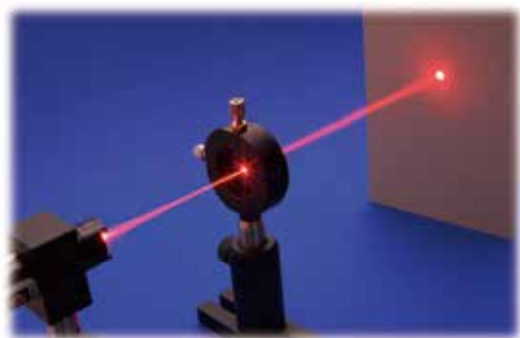


图 5-15 圆孔衍射

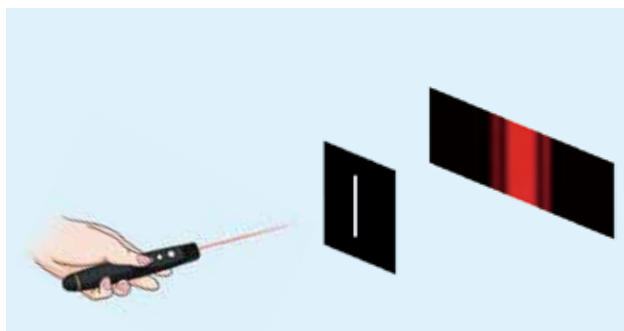


图 5-16 单缝衍射



图 5-17 是用单缝产生的衍射图样，其中图 5-17 (a) 是红光通过单缝时产生的衍射图样，图 5-17 (b) 是白光通过单缝时产生的衍射图样。

与机械波的衍射相似，光的明显衍射也是有条件的。只有当障碍物或孔的尺寸接近光的波长时，衍射才是明显的。可见光的波长范围通常是  $4.0 \times 10^{-7} \sim 7.6 \times 10^{-7} \text{ m}$ ，而光所遇到的一般物体的线度都比它的波长大得多，所以在日常生活中很难看到光的衍射现象。只有在光照射到像小孔、狭缝、针尖这样细小的器件上时，我们才可能观察到衍射现象以及它所产生的衍射图样。

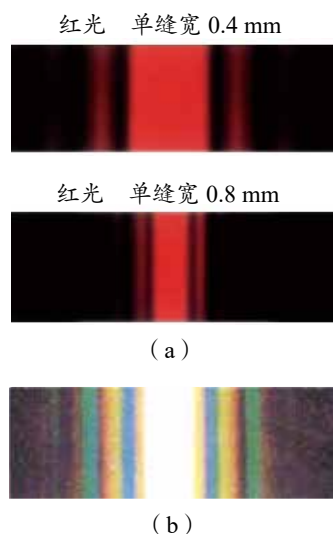


图 5-17 单缝衍射图样



### 迷你实验室

#### 刀片边缘的衍射

如图 5-18 所示，让一束光通过剃须刀片，仔细观察，剃须刀片边缘有条纹出现，这就是光在刀片边缘处产生的衍射现象。经研究发现，不仅小孔、狭缝能使光产生衍射，不同形状的各种障碍物都可能使光产生衍射，并在边缘呈现明暗相间的衍射图样，从而使其影像的轮廓变得模糊不清。



图 5-18 刀片边缘的衍射现象



### 科学书屋

#### 泊松亮斑

1818 年，法国科学院为鼓励对衍射问题的研究，悬赏征集这方面的论文。当时年轻的物理学家菲涅耳按照波动说深入研究了光的衍射，在论文中提出了解决衍射问题的数学方法。作为评委之一的法国科学家泊松，按照菲涅耳的理论计算了光在圆盘后的影像问题。他发现，如果该理论成立，那么在一定条件下，影的中心应该出现一个亮斑。泊松认为这是非常荒谬可笑的，并声称驳倒了光的波动说。菲涅耳等人立即对此进行实验，不久，菲涅耳和物理学家阿拉果在实验中观察到了这个亮斑（图 5-19）。这样，泊松的计算反而支持了光的波动说。后人为了纪念这个有意义的事件，把这个亮斑称为泊松亮斑。



图 5-19 泊松亮斑



## 2. 衍射对分辨本领的影响

光通过足够小的孔时，会因衍射而明显地偏离直线传播方向，并产生衍射图样。这一现象对显微镜、望远镜等精密光学仪器的设计产生了直接影响。由两个相邻的点光源  $S_1$  和  $S_2$  发出的光，通过小孔后分别在屏上形成两个像  $I_1$  和  $I_2$  [图 5-20 (a)]，这两个像实际上是光源  $S_1$  和  $S_2$  的衍射图样。如果换用更小的圆孔，保持  $S_1$  和  $S_2$  之间的距离和其他条件都不变，则会发现衍射现象更加明显而使屏上两个衍射图样变得更大 [图 5-20 (b)]。当圆孔足够小时，屏上的两个衍射图样会出现部分重叠，使两个光源在屏上所成的像变得难以分辨。当一个圆斑像的中心刚好落在另一个圆斑像的边缘上时，我们称这两个像刚好能被分辨。

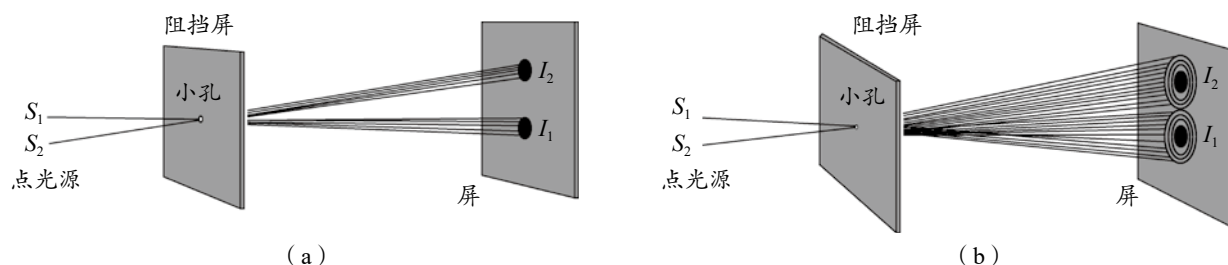


图 5-20 点光源  $S_1$ 、 $S_2$  通过小孔成像示意图

光学仪器上的透镜相当于一个圆孔。一个光学仪器的分辨本领，就是这个仪器能把彼此靠近的物体的像分离开来的能力。透镜的直径越小，产生的衍射现象越明显，分辨本领就越低。光学仪器是不可以通过增大仪器的放大率来提高它的分辨本领的。增大放大率后，虽然放大了像点之间的距离，但每个像的衍射斑也被放大了。原来不能分辨的物体，放得再大，仍不能被我们的眼睛或照相底片所分辨。



### 科学书屋

#### 显微镜、望远镜的分辨本领与衍射有关

显微镜（图 5-21）物镜的直径一般都比较小，衍射造成的影响比较明显，使它的分辨本领受到限制。

提高显微镜的放大倍数只会使东西看起来更大些，但不能使分辨本领提高。如果有两个靠得很近的物体，在显微镜上成的像超过了由衍射现象所决定的分辨极限，即使采用很好的透镜来提高显微镜的放大倍数，也是徒劳无益



图 5-21 显微镜



的。所以，要有效地提高分辨本领，应选用波长更短而不容易发生衍射现象的电子显微镜或离子显微镜。

对于望远镜，因受到衍射现象的影响，不管物镜是透镜还是反射镜，尺寸越大，分辨本领就越好。现代天文台中所用的大口径天文望远镜多数是反射式望远镜，因为反射镜可做得更大，使望远镜的分辨本领更强大（图 5-22）。



图 5-22 中国科学院国家天文台兴隆观测站 2.16 m 口径反射式天文望远镜

### 3. 衍射光栅

1821 年，德国物理学家夫琅禾费（J. Fraunhofer, 1787—1826）利用衍射原理制造了一种光学器件：在两个螺杆上绷上许多平行的细金属线，或者在玻璃片上刻上许多均匀的细槽。因为它有类似栅栏的形状，所以被称为**衍射光栅**（diffraction grating）。衍射光栅可分为透射光栅和反射光栅。

典型的透射光栅在 1 mm 的玻璃板上刻有数百条细槽，这些细槽互相平行，距离相等，整齐地排列在一起。光栅的每一条狭缝都能在接收屏上的同一位置产生单缝衍射图样。不同狭缝产生的光是相干的，必定产生干涉，形成明暗相间的条纹。所以，在接收屏上得到的光栅衍射图样是单缝衍射和多缝干涉的共同结果。

研究表明，多缝干涉的结果使光栅衍射的亮条纹的宽度比单缝衍射时窄得多。这样，我们就可在几乎黑暗的背景上看到一系列又细又亮的条纹。光栅的这一特点，使它成为科学实验和技术应用中一种常用的重要光学器件。

复色光经光栅衍射后会彼此分开，如白光经过光栅后能被分解并形成彩色条纹。由此，光栅作为分光器件，常被用于单色仪和光谱仪中。利用这一现象，人们通过光栅拍摄灯光时，会得到一种奇妙的效果（图 5-23）。另外，孔雀细密的羽毛就像有规律地排列在一起的反射光栅（图 5-24），使多束反射光相互干涉，也可形成闪烁绚丽的色彩。



图 5-23 通过光栅拍摄的灯光

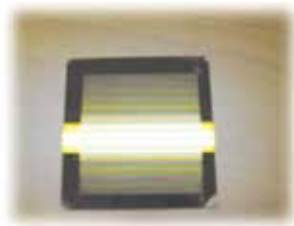


图 5-24 细密羽毛形成光栅



## 节 练 习

1. 通过两个手指间的狭缝来观察光源，当狭缝宽度逐渐减小时，会观察到什么现象？请试一试，并作出解释。
2. 两人分别站在一堵墙的两侧，彼此看不见却能相互对话，这是为什么？
3. 光波发生干涉现象时产生干涉图样，发生衍射现象时产生衍射图样。请观察对比双缝干涉图样与单缝衍射图样，看看它们有什么区别。
4. 如图所示，让太阳光通过窗上的小孔射进漆黑的室内，并落在光滑的反射面（如玻璃、瓷碗、镀铬器件或涂有油漆的门窗等）上。这时，你眯着眼并迎着反射方向看去，不但能看到反射面上的白点（太阳虚像），同时还能看到在它的两旁出现一排对称的彩带。眼缝越细，这种现象越显著。请分析原因。



第4题

请提问



## 第4节

# 光的偏振

光的干涉和衍射现象都清楚地表明光是一种波，光波是横波还是纵波呢？本节我们将学习光的偏振现象。

### 1. 偏振现象

我们先来分析机械波中的一个实例。如图 5-25 所示，将细绳穿过一块纸板，固定细绳的一端，手持另一端上下振动，形成绳波。当纸板的狭缝与绳波质点的振动方向一致时，绳波不受阻碍地向前传播。但当纸板的狭缝与绳波质点的振动方向垂直时，绳波受阻碍而不能通过狭缝。这种现象只有横波才会出现。若将绳换成弹簧并让其一端振动形成纵波，由于弹簧中质点振动的方向与传播方向在同一条直线上，不论狭缝的方向如何，纵波都能向前传播。

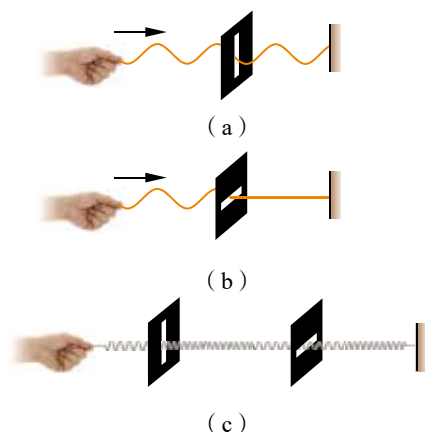


图 5-25 机械波通过狭缝示意图

横波的振动方向垂直于波的传播方向，振动方向与传播方向构成一个平面（振动面），横波还存在各种可能的振动面，如形成绳波的波源振动方向不同，形成波的振动面可能竖直、水平、倾斜。如果横波只沿着某一特定的方向振动，就会出现波的**偏振**（polarization），这是只有横波才有的特性。因为纵波的振动方向与传播方向始终在同一直线上，所以纵波不会出现偏振现象。

光能否产生偏振现象呢？



### 迷你实验室

#### 光的偏振实验

如图 5-26 所示，透过两块偏振片  $P$ 、 $Q$  观察日光或灯光。保持  $P$  不动，旋转  $Q$ ，观察光强的变化。

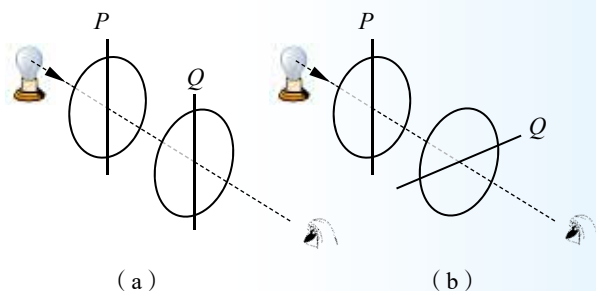


图 5-26 光的偏振实验示意图

当光依次通过两块偏振片  $P$  和  $Q$ ,  $P$  固定不动, 转动  $Q$ , 我们会发现, 随着  $Q$  的取向不同, 透射光的强度会发生变化。当  $Q$  处于某一位置时, 透射光的强度最大 [图 5-26(a)]; 由此转过  $90^\circ$ , 透射光的强度为 0, 光完全被  $Q$  遮挡 [图 5-26(b)]。若继续转过  $90^\circ$ , 透射光的强度又变为最大。

该现象与图 5-25 中绳波通过狭缝的现象十分相似。偏振片是只让某一方向振动的光通过的一种光学元件。通常把这个透光方向称为偏振片的透振方向。偏振片的作用类似于图 5-25 中的狭缝。该现象表明, 光是一种横波。

任何普通光源都是由大量原子、分子组成的, 它们发出的光就是这些原子、分子发光的总和。就单个原子的发光来说, 它在各个瞬间所发光波的振动方向时刻在变化着。而普通光源中的大量原子发光时又是互不相关的, 从总体上来说, 在垂直于传播方向的平面内, 光波可沿任何方向振动, 光振动在平面内的分布是大致均匀的, 这样的光称为自然光 (图 5-27)。

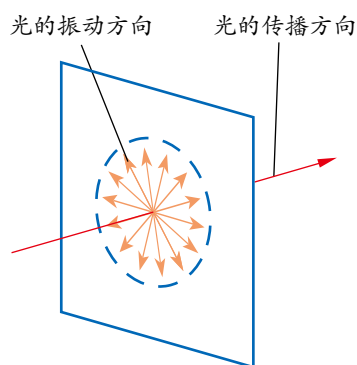


图 5-27 自然光示意图

自然光通过偏振片后, 只有振动方向与透振方向一致的那些光波才能完全通过, 而振动方向与透振方向垂直的光波则完全不能通过。因此, 让自然光通过偏振片, 就能获得偏振光。这种光的振动方向与透振方向平行, 也称为线偏振光。用于获得偏振光的偏振片称为起偏器。为了检查通过起偏器的光是不是偏振光, 可在起偏器后面再放一个偏振片, 这个偏振片称为检偏器。如图 5-28 所示, 当起偏器与检偏器的透振方向互相平行和互相垂直时, 偏振光能完全通过和完全不能通过的情况。如果我们将起偏器固定, 将检偏器逐渐旋转  $90^\circ$ , 就可看到所透过的光的强度也随之发生变化。

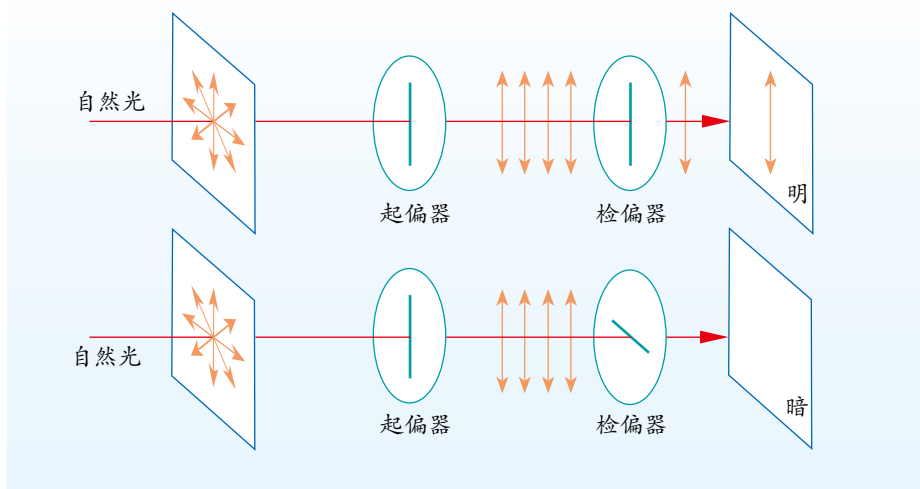


图 5-28 起偏和检偏示意图





### 自然界中的起偏器

在自然界中，存在着各种各样的天然反射镜起偏器，如江河或海洋的水面、皮革、鱼鳞、毛发等。自然光经过水面的反射后能产生偏振光。太阳光经过行星表面反射后，如果变成了偏振光，就说明这个行星表面一定有水或其他光滑物质覆盖。根据这一原理，天文学家发现金星表面有一层明显的光滑物质，可能是冰晶或水滴。另外，利用偏振光技术，天文学家还探得土星光环是由冰晶组成的。

## 2. 偏振现象的应用

偏振现象在生产生活中有很多应用。人之所以能看出景物有立体感，是因为人的两只眼睛从不同的视角看到的景物略有差别。如果看过立体电影（图 5-29），你就会知道，立体电影中的人好像就在我们身边，电影中的飞机好像向着我们呼啸而来。为什么会有这样神奇的效果呢？奥秘就在我们看电影时戴的那副眼镜上。这类眼镜通常是偏振镜（图 5-30），通过偏振镜的光是偏振光。立体电影是用两个镜头从如人眼那样的两个不同方向同时拍摄下景物的像，制成两组电影胶片；通过两架放映机将两组胶片同步放映，使这略有差别的两幅图像重叠在银幕上。这时，如果用眼睛直接观看，看到的画面是不清晰的。如果在每架放映机前装一块偏振片，从两架放映机射出的光通过偏振片后，就成了偏振光。由于这两架放映机前的偏振片的透振方向互相垂直，产生的两束偏振光的偏振方向也互相垂直。观众戴上偏振镜观看电影时，每只眼睛只看到相应的偏振光图像，这样就会产生立体感。这就是立体电影的原理。



图 5-29 立体电影的效果



图 5-30 偏振镜

因为水面反射光的干扰，用普通的照相机镜头不容易清晰地拍出水中的鱼。反射光中存在大量的偏振光，使用偏振镜可减少反射光的干扰（图 5-31）。

人们发现，当偏振光通过受力的塑料或玻璃时，偏振方向会发生变化，这一现象可帮助我们检查力的分布情况。例如，为了设计机械工件、车辆、桥梁或水坝，可用透明塑料板模拟它们的形状，并根据实际工作状况按比例加上作用力，然后利用上述原理就可显示出力的分布情况（图 5-32），从而为设计和制造提供重要参数。本章“导入”中玻璃珠的照片，实际上就是将熔化的玻璃滴入水中，然后放在两个相互垂直的偏振片间拍摄的。



(a) 使用前

(b) 使用后

图 5-31 使用偏振镜前后的拍摄效果对比



图 5-32 汽车模型显示的应力分布



### 节 练 习

1. 将两片偏振片（如看立体电影时用的镜片）叠放在一起，放在报纸或书本上，旋转其中的一片，观察有什么现象发生。你能解释这一现象吗？
2. 将两个紧靠在一起的偏振片放在一盏灯的前面，此时没有光通过。如果将其中的一个偏振片逐渐旋转  $180^\circ$ ，在旋转过程中，透过偏振片的光
  - A. 先增强，然后又减弱到零
  - B. 先增强，然后减弱到非零的最小值
  - C. 在整个过程中都增强
  - D. 先增强，再减弱，然后又增强
3. 我们常看到在柏油马路和湖面上反射的耀眼的眩光，它会使人视觉疲劳。戴上一种由偏振片制成的太阳镜，可解决眩光问题。请查阅资料，分析这种太阳镜能解决眩光问题的原理。
4. 用偏振片观察各种光的偏振情况，特别是蔚蓝色的天空、水面和玻璃面的反射光、桌面的反射光，验证有关偏振光的结论，并写一篇相关的观察日记。

请提问



## 第5节

# 激光与全息照相

为了突破天然光源的限制，人们制造出了各种各样的人造光源，如煤油灯、白炽灯、日光灯、高压钠灯……20 世纪初，科学家研究出激光等很多新的光源，人类开始步入现代新光源的广阔天地。激光有什么特点？又有哪些应用？本节我们将学习激光与全息照相的内容。

### 1. 激光及其特性

1960 年 5 月 15 日，美国物理学家梅曼正在进行一项重要的实验。他的实验装置里有一根人造红宝石棒。突然，一束深红色的亮光从装置中射出，它比太阳表面还要亮！这是一种完全新型的光，是科学家渴望多年而自然界中并不存在的光！它被命名为**激光**（laser），产生激光的装置被称为**激光器**（图 5-33）。激光和激光器是 20 世纪最重大的科学发明之一。

激光是原子受激辐射产生的光，激光光束中所有光子的频率一致、相位一致、偏振方向一致、传播方向一致，所以激光具有单色性好、方向性强、亮度高等特点。

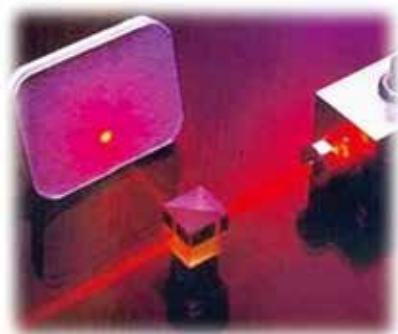


图 5-33 红宝石激光器发出的激光



#### 拓展一步

##### 激光产生的原理

按照玻尔理论，原子是由原子核和电子组成的，电子在核外的一定轨道上绕原子核运动，电子在不同轨道上运动时原子具有不同的能量。

当外来光子的能量等于原子相应的能级差时，就会把原子从低能态激发到高能态，这个过程称为受激吸收跃迁。处在激发态的原子会自发跃迁到低能态，同时发出光辐射，这个过程称为自发辐射跃迁。

1916 年，爱因斯坦在研究光辐射与原子相互作用时发现，除了上述两种过程之

外，还存在第三种过程——受激辐射跃迁，即在外来光子的作用下，处在高能态的原子向低能态跃迁，并同时发射出能量相同的光子（图 5-34）。受激辐射跃迁产生的光子具有如下特性：频率、相位、传播方向、偏振方向都与诱导产生这种跃迁的光子相同。这就是激光产生的基本原理。

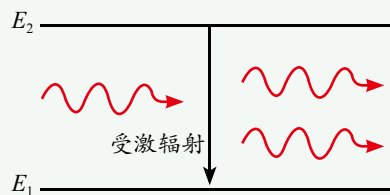


图 5-34 激光产生的原理示意图

## 2. 激光的应用

激光具有普通光所不具备的特点：单色性好，激光发射的各个光子频率相同，因此激光是很好的单色光源；相干性好，因为受激辐射的光子在相位上一致，所以激光的空间相干性很好；方向性好，激光束的发散角很小，几乎是一条平行的光束；亮度高，激光的亮度可比普通光源高出上千倍，是目前最亮的光源。强激光甚至可产生上亿摄氏度的高温。这些特点使激光在人们的生产生活和科学研究中有着广泛的应用。

欣赏由 DVD 播放的音乐和影片、激光音乐喷泉、舞台灯光布景时，激光在为你服务；在联网的计算机上，通信系统中的激光帮你收发电子邮件；在超级市场里，激光在购买商品的条形码上扫描（图 5-35），以便结算账目；在医院里，各式激光器可帮助医生治疗疾病；在军事领域，激光在制导炸弹、测量距离（图 5-36）、跟踪目标、传递军事情报中发挥作用……

许多用其他技术无法做到的事情，用激光则可能实现。例如，用激光实现热核聚变，用激光研究引力波，用激光夹住和移动细胞，用激光显示电子流动轨迹，等等。



图 5-35 用激光扫描条形码

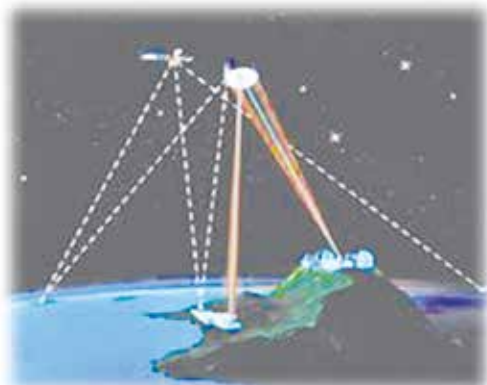


图 5-36 激光测量示意图

## 3. 全息照相

1948 年，英国物理学家伽柏（D. Gabor，1900—1979）提出了全息照相的设想：利用两束光的干涉条纹记录被摄物体，记录干涉条纹的底板经过适当处理后，会再现一个逼真的像。由于当时没有足够强的单色光源，实验结果不甚理想。





激光的发明和普及，使全息照相获得了很大的发展，伽柏也因对全息照相的研究获得了1971年诺贝尔物理学奖。

全息照相是应用光的干涉实现的。如图5-37所示，作为光源的激光被分成两部分：一部分通过凹透镜发散后射到胶片上；另一部分射向一个平面镜，经反射后通过另一个凹透镜发散后射向被拍摄的物体。该物体把光反射到胶片上，并与第一束光发生干涉，两束光干涉的结果就在胶片上记录下被拍摄物体的三维图像信息，这就是全息照片（图5-38）。

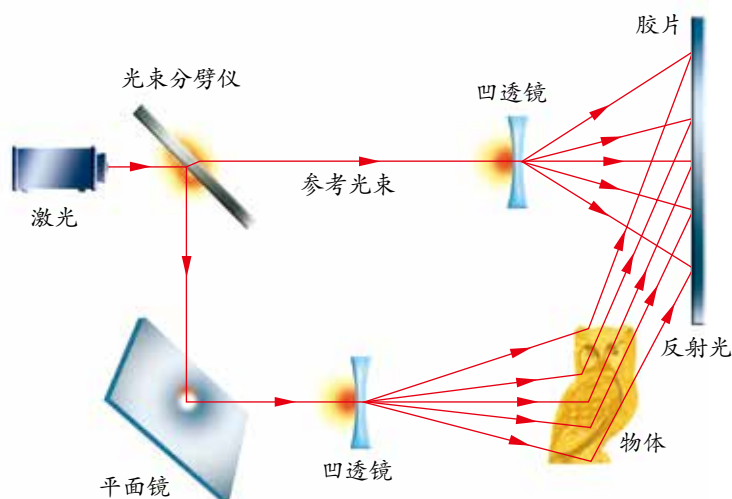


图 5-37 全息照相原理示意图



图 5-38 全息照片

在音像店或书店你可能会发现有些音像制品或杂志封面上的图像好像在跟着你移动，这些图像就是全息照片。全息照相与普通照相相比有如下几个突出特点：观察再现的图像时，看到的三维立体图像和原来的物体几乎一模一样；如果发现一个物体部分被遮挡了，你只要改变一下角度，便能观察到被遮挡的部分；如果一张全息照片的大部分被损坏或丢失，只留下一小部分，从这一小部分照片仍可再现原物的全貌；可在同一张底片上记录多张图像，再现时可在不同的角度分别观察到多个不同的像而不互相干扰。

能了解光的干涉、衍射和偏振的内涵，能了解激光的特性；能解释生产生活中有关光的干涉、衍射和偏振的现象，能说明激光技术在生产生活中的应用。具有与光的干涉、衍射和偏振相关的运动与相互作用观念和能量观念。

有学习物理的内在动机与热情，能感受物理学之美；能认识科学普及的重要性，能在科学普及活动中发挥积极的作用。

——物理观念，科学态度与责任



## 节 练 习

1. 激光有以下特点：频率单一、相干性好、方向性好，可在很小空间、很短时间内集中大量能量，所以亮度高。全息照相、激光雷达、切割金属各是应用了激光的什么特性？
2. 一张光盘可记录几亿个字节，其信息量相当于数千本十多万字的书，其中一个重要原因就是光盘上记录信息的轨道可做得很密，1 mm 的宽度至少可容纳 650 条轨道。这是应用了激光的什么特性？
3. 简述全息照相的原理，说明全息照片与普通照片的不同。
4. 查阅资料，说说激光的应用前景，写一篇科普小论文。





### 章末练习

#### 科学认知

- 用单色红光做杨氏双缝干涉实验，在光屏上会出现明暗相间的条纹。
  - 请画出光波通过狭缝后传播的示意图，并解释为什么屏上会出现明暗相间的条纹。
  - 若用蓝光代替红光，干涉条纹的间距会发生什么变化？为什么？
- 观察水面上的油膜，发现色彩会不断地运动变化，如图所示。请解释出现该现象的原因。
- 在观察光的衍射现象的实验中，保持缝到光屏的距离不变，增加缝宽，屏上衍射条纹间距将如何变化？该现象表明，光沿直线传播只是一种近似规律。在什么情况下光才可视作沿直线传播？
- 白光通过双缝后产生的干涉条纹是彩色的，原因是不同色光的
  - 传播速度不同
  - 强度不同
  - 振动方向不同
  - 频率不同
- 光的偏振现象说明光是横波。下列现象中，能反映光的偏振特性的是
  - 一束自然光相继通过两个偏振片，以光束为轴旋转其中一个偏振片，透射光的强度发生变化
  - 一束自然光在玻璃、水面、木质桌面等表面反射时，反射光和折射光都是偏振光
  - 日落时分，拍摄水面下的景物，在照相机镜头前装上偏振滤光片可使成像更清晰
  - 通过手指间的缝隙观察日光灯，可看到彩色条纹
- 在双缝干涉实验中，钠灯发出波长为  $589\text{ nm}$  的光，在距双缝  $1.00\text{ m}$  的屏上形成干涉图样。图样上相邻两亮条纹中心间距为  $0.350\text{ cm}$ ，则双缝的间距是多少？



第2题

#### 科学探究

- 在“用双缝干涉实验测量光的波长”实验中，某同学对实验装置进行调节并观察实验现象。
  - 图(a)(b)是光的条纹形状示意图，其中干涉图样是\_\_\_\_\_。



(a)



(b)

第7(1)题

- 下述现象中，能观察到的是\_\_\_\_\_。
  - 将滤光片由蓝色的换成红色的，干涉条纹间距变宽
  - 将单缝向双缝移动一小段距离后，干涉条纹间距变宽
  - 换一个两缝之间距离较大的双缝，干涉条纹间距变窄
  - 去掉滤光片后，干涉现象消失

#### 科技交流

- 劈尖干涉是一种薄膜干涉，其装置如图(a)所示。将一块平板玻璃放置在另一平板玻璃之上，在一端夹入两张纸片，从而在两玻璃表面之间形成一个劈形空气薄膜。当单色光垂直入射后，

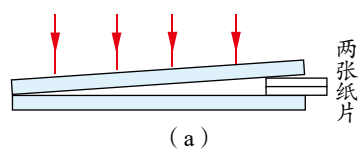


从上往下看到的干涉条纹如图(b)所示。干涉条纹有如下特点：①任意一条亮条纹或暗条纹所在位置下面的薄膜厚度相等；②任意相邻亮条纹或暗条纹所对应的薄膜厚度差恒定。

(1) 请解释上述特点产生的原因；

(2) 请查阅资料，了解劈尖干涉在生产生活中的应用，并与同学交流。

9. 了解英国物理学家托马斯·杨对物理学的贡献。根据你收集的信息，请评价他对光本性的研究的影响。



(a)



(b)

第8题

### 温故知新

10. 两束平行单色光  $a$ 、 $b$  垂直于  $PQ$  面射入截面为直角三角形的棱镜  $PQM$ ，从另一面  $PM$  射出时的光束为  $a'$ 、 $b'$ ，如图所示。

下列说法正确的是

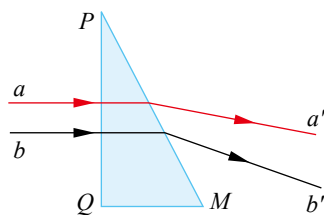
A.  $b$  光在棱镜中传播速度较大

B.  $b$  光的频率大于  $a$  光的频率

C. 在完全相同的条件下做双缝干涉实验， $a$  光对应的干涉条纹间距较宽

D. 在其他条件不变的情况下，当顶角  $P$  增大时， $b$  光一定不会再  $PM$  面上发生全反射

11. 请根据第4章（光的折射和全反射）和第5章（光的干涉、衍射和偏振）的内容，结合你的理解，画出概念图。



第10题



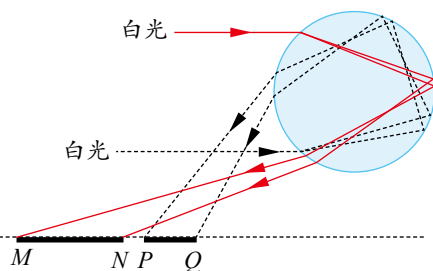
### 我的学习总结



# 单元自我检测

一、选择题（本题共 5 小题。在每小题给出的四个选项中，第 1 ~ 3 题只有一项符合题目要求，第 4、5 题有多项符合题目要求）

- 用手捏紧叠在一起的两块平板玻璃时，若板间存在薄空气层，从平板玻璃的上表面常会看到彩色条纹。产生这一现象的原因是  
A. 光的折射                      B. 光的衍射  
C. 光的干涉                      D. 光的偏振
- 虹和霓是太阳光在水珠内分别经过一次和两次反射后出射形成的，可用白光照射玻璃球来说明。两束平行白光照射到透明玻璃球后，在水平的白色桌面上会形成  $MN$  和  $PQ$  两条彩色光带，光路如图所示。点  $M$ 、 $N$ 、 $P$ 、 $Q$  的颜色分别为  
A. 红、紫、红、紫              B. 紫、红、红、紫  
C. 红、紫、紫、红              D. 紫、红、紫、红



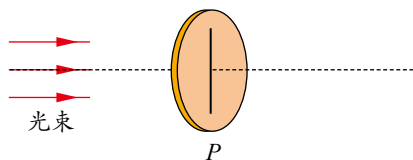
第 2 题

- 如图所示，口径较大、装满水的薄壁圆柱形玻璃缸底有一发光小球，则  
A. 小球必须位于缸底中心才能从缸壁被看到  
B. 小球所发的光能从水面任何区域射出  
C. 小球所发的光从水中进入空气后频率变大  
D. 小球所发的光从水中进入空气后波长变大



第 3 题

- 如图所示， $P$  是偏振片，透振方向为竖直方向。下列四种入射光束中，照射时能在  $P$  的另一侧观察到透射光的是  
A. 太阳光  
B. 沿竖直方向振动的光  
C. 沿水平方向振动的光  
D. 沿与竖直方向成  $45^\circ$  角振动的光

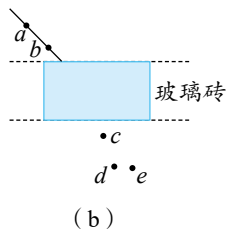
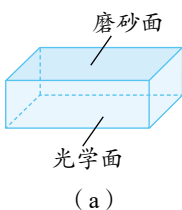


第 4 题

- 关于杨氏双缝干涉实验，下列说法正确的是  
A. 若用白光作为光源，屏上将呈现黑白相间的条纹  
B. 若用红光作为光源，屏上将呈现红黑相间的条纹  
C. 若用红光照射一条狭缝，用紫光照射另一条狭缝，屏上将呈现干涉条纹  
D. 若用紫光作为光源，遮住其中一条狭缝，屏上将呈现间距不等的条纹

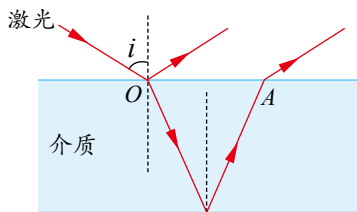
## 二、非选择题

- 光学实验用的长方体玻璃砖如图 (a) 所示，它的 \_\_\_\_\_ 面不能用手直接接触。在用插针法测定玻璃折射率的实验中，两位同学绘出的玻璃砖和三个针孔  $a$ 、 $b$ 、 $c$  的位置相同，且插在  $c$  位置的针正好挡住插在  $a$ 、 $b$  位置的针的像，但第四个针孔的位置不同，分别为  $d$ 、 $e$  两点，如图 (b) 所示。计算折射率时，用点 \_\_\_\_\_ 得到的值较小，用点 \_\_\_\_\_ 得到的值是合理的。（均选填“ $d$ ”或“ $e$ ”）

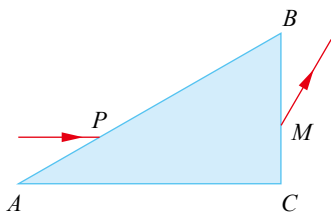


第 6 题

7. 如图所示，一束激光从点  $O$  由空气射入厚度均匀的介质，经下表面反射后，从上表面的点  $A$  射出。已知入射角为  $i$ ， $A$  与  $O$  相距  $l$ ，介质的折射率为  $n$ ，光在空气中的传播速度为  $c$ ，求光在介质中的传播时间  $t$ 。
8. 如图所示，三棱镜的横截面为直角三角形  $ABC$ ， $\angle A = 30^\circ$ 。一束平行于  $AC$  边的光自  $AB$  边的点  $P$  射入三棱镜，在  $AC$  边发生反射后从  $BC$  边的点  $M$  射出。若光在点  $P$  的入射角和在点  $M$  的折射角相等，求三棱镜材料的折射率。



第 7 题



第 8 题



## 单元自我评价

回顾本单元的学业要求和所学内容，结合本次单元自我检测和平时学习情况，根据下表左列的提示，进行自我评价，在表中填写学会了什么、存在什么问题、今后努力的方向等相关内容。

所学内容	我学会的	存在问题	努力方向
物理概念 规律及应用			
模型建构 科学推理 科学论证 质疑创新			
问题 证据 解释 交流			
科学本质 科学态度 社会责任			



# 后 记

21 世纪初我国启动基础教育课程改革，迄今已十余年。我们根据《普通高中物理课程标准（实验）》（2003 版）编写的普通高中课程标准实验教科书《物理》在实验区已使用十余年。随着基础教育课程改革的深入，修订后的《普通高中物理课程标准（2017 年版）》（以下简称《标准》）已由教育部正式颁布，因此，实验版教科书《物理》也应随之修订。根据国家大政方针和《标准》的要求，在对一线教师大规模问卷调查及深入访谈的基础上，基于多年教科书研究、编写和实践的积淀，教科书编写组对实验版教科书进行了全面修订。

本次修订后的普通高中物理课程标准修订版教科书的整体架构如图所示。

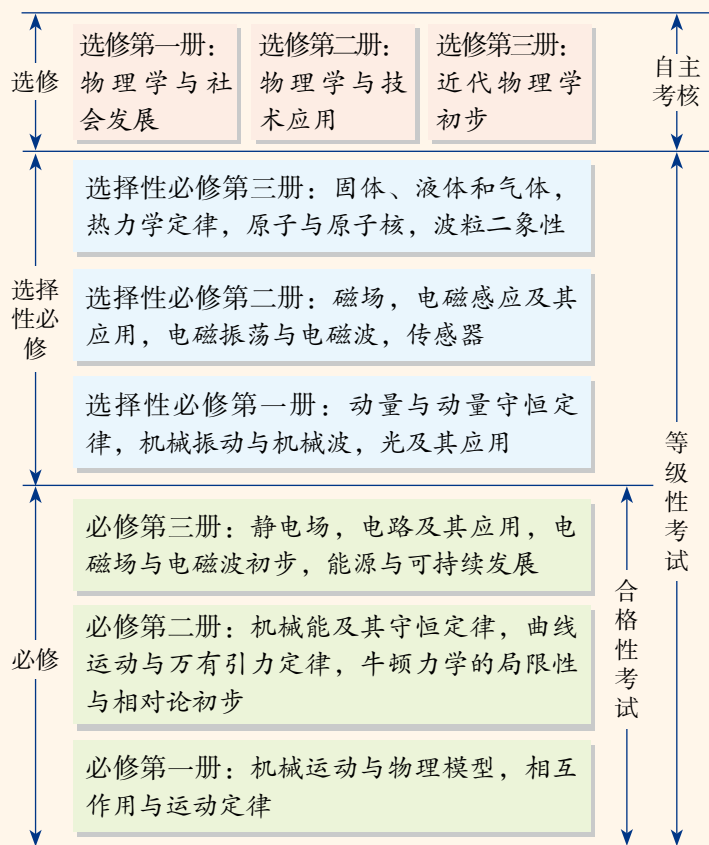
总体来看，修订版教科书具有如下特点：

1. 立意更高，促进学生物理学科核心素养的达成。不仅继承实验版教科书注重落实三维课程目标的特点，而且更加注重体现物理教科书的育人功能，以“素养提升”“本章学业要求”等栏目导向，有效促进教学方式的改进，提升学生物理学科核心素养。

2. 寓意更深，注重从情境走向物理，从物理走向社会的内涵。不仅继承实验版教科书注重联系实际的特点，而且强调问题情境与物理内容的相互呼应。通过“以惑为诱、以问促学”的内容设计，培养学生的物理自然观和建模、推理、论证及质疑能力。

3. 更重实践，强调概念构建过程，注重探究能力的培养。不仅继承实验版教科书的实验栏目，而且注重凸显物理实验的育人功能。通过“学生必做实验”“实验探究”“迷你实验室”“DIS 实验室”等实验版块，以“引导、递进、开放”的精巧设计，培养学生的问题、证据、解释及交流方面的探究能力。

4. 更富逻辑，结构更完善，更符合教育教学规律。不仅继承了实验版教科书结构上注重逻辑的特点，而且通过“方法点拨”“策略提炼”“拓展一步”等栏目，进一步升华学



修订后整套教科书的基本架构

习内容，同时注重难点分解、台阶降低、逐步到位，关注了学生的认知特点。

5. 更重评价，发挥习题功能，促进学生全面发展。改进实验版教科书在习题设计方面的不足，基于物理学科核心素养和学业质量要求，分层设计“节练习”“章末练习”“单元自我检测”，更好发挥习题的功能，促进对核心素养测试的探索。

6. 更加拓展，反映物理学对人类生活及社会发展的影响。不仅继承实验版教科书从物理走向社会的特点，而且注重通过“科学书屋”“物理聊吧”等栏目培养学生的学习兴趣、人文情怀，及节约能源、保护环境的科学态度与社会责任感。

7. 臻于精致，体现“以学生发展为本”的理念。不仅继承实验版教科书图文并茂的特点，而且更加美观、适用，从结构确定、内容纳入、栏目设计、图片选用到版式推敲等多方面皆精雕细琢，旨在全力打造高质量的一流物理教科书。

编写组凝聚了高校学科专家、省市物理教研员、中学教学名师、考试评价专家、国际物理教科书研究者等研究力量，具有高校研究平台与中学教学积累的综合优势。各类课题研究、理论探索、国际比较等，使教科书修订具有研究基础、国际视野，能让物理教科书的质量提升到更高的水平。中学各级教学名师丰富的实践经验、珍贵的教学心得，为教科书修订中落实以学生发展为本的教学理念搭建了接地气的脚手架、扎实的一线平台，让修订版教科书更符合教学实际。

本教科书编写组主要成员及分工如下：全套教科书主编为廖伯琴；本册核心编者有杜明荣、陈松、田序海、杨学切、青春、黄国雄、李富强、廖伯琴；本册由廖伯琴、杜明荣、杨燕鸣统稿，由廖伯琴定稿；全套教科书编务联系工作由李富强、李洪俊负责。

教科书的修订是一系统工程，需各方力量支持。参与本次修订版教科书编写、讨论、审读、组织试教或作出前期贡献的老师还有：李勇、程力、高山、周智良、宋树杰、王宪收、林伟庆、罗基鸣、黄晓标、梅家焯、谢德胜、林明华、刘林、许华忠、冯庆、邓磊、蒋小平、刘健智、廖元锡、冯华、蒋敏、李太华、张正严、翟厚岚、洪正平、梁雷、贺晓霞、张修文、梁一平、林钦、李晶晶、王文祥、董茂寅、宋协俊、邹建光、时玉义、马凤喜、吴新田、侯辰虎、郑玉峰、程美贵、冯连奎、曹国莹、岳志国、姜妮、欧剑雄、严士线、彭罡、张庆贵、吴双飞、刘新选、黄巧曦、吴寒平、李勇顺、黄惠菁、赵保钢、刘晓玲、林杰、罗国忠、朱霞、覃朝玲、张滨、黄懋恩、王崇渝等。张书迪女士为本教科书设计图标，并在版式设计方面提出若干建议。

本次修订得到众多专家、学者、教研员、教师、学生以及家长的热诚帮助，得到了山东科学技术出版社的鼎力支持。在此，我们特向提供帮助的各方人士表示由衷感谢！修订后的教科书将很快进入中学课堂，我们恳请各方人士不吝赐教。

挑战与发展共存！我们期待批评，也期待各位的支持。谢谢！

主编 廖伯琴

2019年10月于西南大学荟文楼





# 物理

## WU LI

普通高中教科书

物 理

选择性必修 第一册

PUTONG GAOZHONG JIAOKESHU  
WULI XUANZEXING BIXIU DI-YI CE

主 编 廖伯琴

主管单位：山东出版传媒股份有限公司

出 版 者：山东科学技术出版社

地址：济南市市中区英雄山路189号  
邮编：250002 电话：(0531) 82098088  
网址：www.lkj.com.cn  
电子邮箱：sdlkj@sdcbsm.com

发 行 者：山东新华书店集团有限公司

地址：济南市市中区英雄山路189号  
邮编：250002 电话：(0531) 82797666

印 刷 者：山东新华印刷厂潍坊厂

地址：潍坊市潍州路738号  
邮编：261031 电话：(0536) 2116806

规格：大16开(210 mm × 297 mm) 印张：9 字数：207千字  
版次：2019年12月第1版 2021年11月第5次印刷

ISBN 978-7-5331-9987-6 定价：10.27元

价格批准文号：鲁发改价格核(2021)609017 举报电话：12345

物理 必修 第一册  
物理 必修 第二册  
物理 必修 第三册  
物理 选择性必修 第一册  
物理 选择性必修 第二册  
物理 选择性必修 第三册



绿色印刷产品

