



普通高中教科书

物理

WULI

选 择 性 必 修

第一册



上海科学技术出版社

普通高中教科书

物理

选择性必修

第一册

上海科学技术出版社

主 编：蒋最敏 高 景

本册主编：高 景

编写人员：(以姓氏笔画为序)

周上游 於 丰 郑百易 高 景

责任编辑：张 燕 金波艳 李林高

美术设计：房惠平

普通高中教科书 物理 选择性必修 第一册

上海市中小学（幼儿园）课程改革委员会组织编写

出 版 上海世纪出版（集团）有限公司 上海科学技术出版社
（上海市钦州南路71号 邮政编码200235）

发 行 上海新华书店

印 刷 当纳利（上海）信息技术有限公司

版 次 2021年3月第1版

印 次 2021年3月第1次

开 本 890毫米×1240毫米 1/16

印 张 6.75

字 数 147千字

书 号 ISBN 978-7-5478-5294-1/G·1032

定 价 8.70元

版权所有·未经许可不得采用任何方式擅自复制或本产品任何部分·违者必究

如发现印装质量问题或对内容有意见建议，请与本社联系。电话：021-64848025，邮箱：jc@sstp.cn

全国物价举报电话：12315

声明 按照《中华人民共和国著作权法》第二十三条有关规定，我们已尽量寻找原作者支付报酬。原作者如有关于支付报酬事宜可及时与出版社联系。

目 录

第一章 · 动量 1

第一节	相互作用中的守恒量	动量	2
第二节	物体动量变化的原因	动量定理	6
第三节	动量守恒定律		11

第二章 · 机械振动 22

第一节	机械振动	简谐运动	23
第二节	简谐运动的回复力和能量		28
第三节	单摆		32
第四节	受迫振动	共振	38



第三章 · 机械波 44

第一节	机械波的形成和传播	45
第二节	机械波的描述	49
第三节	机械波的反射和折射	54
第四节	机械波的干涉和衍射	57
第五节	多普勒效应	63

第四章 · 光 70

第一节	光的折射	71
第二节	全反射	78
第三节	光的干涉	81
第四节	光的衍射和偏振	87
第五节	激光	92

第一章

动 量

碰撞现象在自然界和生活中普遍存在，如陨石与星球的碰撞、打桩机打桩、台球的母球撞击彩球、空气分子间的碰撞等。碰撞现象是重要的物理现象。无论是宏观还是微观领域，碰撞都是发现新现象、探索新规律的重要手段。在研究物体间相互作用的规律时人们逐步认识到，各种复杂现象的背后蕴藏着某些简单而深刻的原理。科学研究的目标之一就是发现复杂自然现象背后的简单法则。

在必修课程中，我们已经学习了牛顿运动定律和机械能守恒定律。在本章中，将学习并理解冲量和动量的概念，理解动量定理和动量守恒定律，了解物体间碰撞的特点。在学习中，通过猜想、假设与实验，探寻碰撞过程中的守恒量；通过分析碰撞和反冲现象，体会用守恒定律分析问题的方法，加深对不同物理知识之间关系的理解，进一步发展“相互作用”“能量”“系统”和“守恒”的观念，感受物理学理论所描述的自然界的和谐与统一。

第一节 相互作用中的守恒量 动量

在物理学的发展历程中，物理学家逐渐形成了这样的观念：物理学的任务是发现普遍的自然规律；自然过程中包含着某种物理量的不变性，即存在守恒量，是物理规律最基本的表现形式之一。物理学家在探求自然规律的过程中，不断地探寻着不同的守恒量。

能量守恒定律是自然界的普遍规律之一。历史上，“能量守恒”曾不止一次受到质疑。每当出现这样的情况，都伴有新能量形式的发现。例如，摩擦导致运动物体的机械能减小，能量似乎消失了；通电的导线会发热，导线的能量似乎增加了。进一步研究上述现象发现了内能和电能，拓展了能量的内涵，推动了物理学的发展。

众多学者都曾卷入“什么是相互作用中运动的守恒量”的争论。这一争论从 17 世纪末一直延续到了 18 世纪中期。一部分学者认为，守恒量是“以速度及物质之量联合度之”的，即 mv ；另一部分学者认为，这一守恒量应为 mv^2 。这些学者关于何为“相互作用中运动的守恒量”的观点各不相同，但他们的描述均与质量 m 和速度 v 有关。

► 寻找碰撞过程中的守恒量

以水平气垫导轨上的两个滑块为研究对象，用频闪技术拍摄滑块的运动过程，测量它们的质量和碰撞前后的速度，探寻这个守恒量是质量与速度的乘积 mv ，还是质量与速度平方的乘积 mv^2 。考虑到碰撞涉及两个物体的质量，以及它们碰撞前、后的速度，我们从最简单的情况开始实验探索。

如图 1-1 所示，选择两个质量均相等的滑块 A 和 B 置于水平导轨上，滑块 B 前端装有轻质弹簧。推动滑块 A，使其与静止的滑块 B 碰撞。分别测量两滑块碰撞前、后的速度。实验结果如表 1-1 所示。

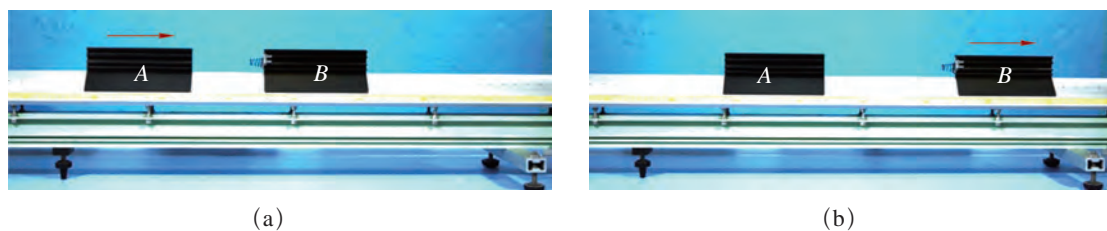


图 1-1 实验图（一）

表 1-1 实验数据记录表（一）

滑块质量 $m_A = m_B = 0.207\text{ kg}$

物理量	$v_A/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_B/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$m_A v_A/(\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$m_B v_B/(\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$m_A v_A^2/(\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2})$	$m_B v_B^2/(\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2})$
碰撞前	0.362	0	7.49×10^{-2}	0	2.71×10^{-2}	0
碰撞后	0	0.358	0	7.41×10^{-2}	0	2.65×10^{-2}

本次实验中，每个滑块的质量与速度的乘积 mv 、质量与速度平方的乘积 mv^2 在碰撞前后均发生变化。对数据做进一步分析发现，两个滑块的 mv 之和与 mv^2 之和在碰撞前后几乎不变。这个实验结果提示我们两个滑块碰撞前后的 mv 之和、 mv^2 之和均有可能是碰撞中的守恒量。

改变实验中的碰撞方式，使碰撞后 A 、 B 两滑块一起运动。
如图 1-2 所示，仍选用质量均为 0.207 kg 的 A 、 B 两个滑块，在两滑块相对的面上固定尼龙搭扣，一旦搭扣互相接触，两滑块将粘在一起。碰撞前滑块 B 静止，滑块 A 向右运动与滑块 B 碰撞，实验结果如表 1-2 所示。

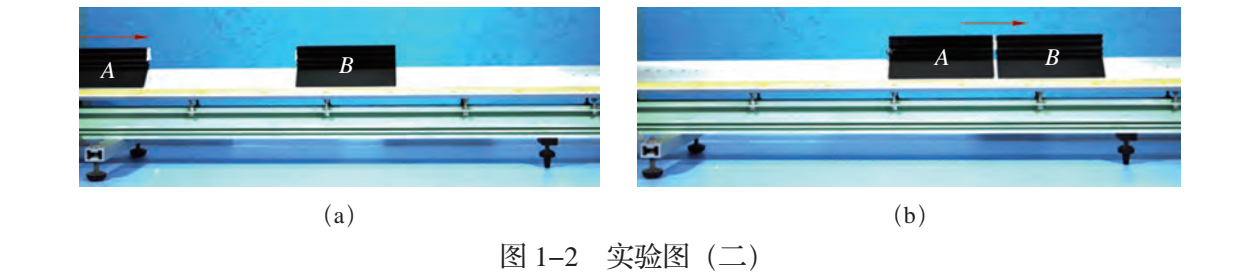


表 1-2 实验数据记录表（二）

滑块质量 $m_A = m_B = 0.207\text{ kg}$

物理量	$v_A/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_B/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$(m_A v_A + m_B v_B)/(\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$(m_A v_A^2 + m_B v_B^2)/(\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2})$
碰撞前	0.342	0	7.08×10^{-2}	2.42×10^{-2}
碰撞后	0.168	0.168	6.96×10^{-2}	1.17×10^{-2}

在本次实验中， A 、 B 两个滑块的质量与速度的乘积 mv 之和在碰撞前后几乎没有发生变化，但质量与速度平方的乘积 mv^2 之和明显减小。可见， mv^2 不可能是碰撞中的守恒量。

为了进一步研究 mv 之和是不是碰撞中的守恒量，应考虑更为一般的情况。
如图 1-3 所示，选用两个质量不等的滑块 m_A 和 m_C ， $m_A = 0.207\text{ kg}$ ， $m_C = 0.104\text{ kg}$ 。碰撞前两滑块相向运动，滑块 A 向右运动，速度 v_A 的大小为 0.544 m/s ，滑块 C 向左运动，速度 v_C 的大小为 0.387 m/s ；碰撞后两滑块弹开，滑块 A 向左运动，速度大小为 0.069 m/s ，滑块 C 向右运动，速度大小为 0.832 m/s 。

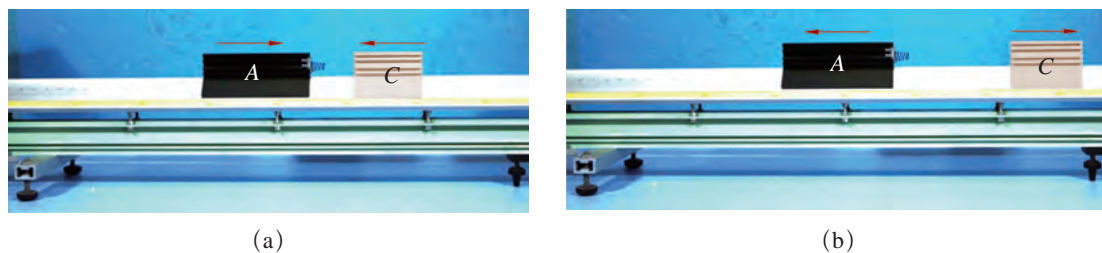


图 1-3 实验图 (三)

自主活动

将第三次实验的数据填入表 1-3, 讨论 A、C 两滑块碰撞前后质量与速度的乘积 mv 之和是否保持不变。

表 1-3 实验数据记录表 (三)

$m_A = \underline{\hspace{2cm}}$ kg, $m_C = \underline{\hspace{2cm}}$ kg

物理量	$v_A/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_C/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$m_A v_A/(\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$m_C v_C/(\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$(m_A v_A + m_C v_C)/(\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
碰撞前					
碰撞后					

分析表 1-3 中的数据可知, 两滑块碰撞前后质量与速度乘积 mv 的矢量和基本保持不变。

综合上述实验结果可以猜想, 在碰撞中的守恒量可能是 mv 的矢量和。

在物理学中, 把物体的质量与速度的乘积称为**动量 (momentum)**, 用符号 p 表示。

$$p = mv$$

在国际单位制中, 动量的单位是千克·米/秒 ($\text{kg}\cdot\text{m/s}$)。

动量是一个矢量, 它的方向与速度的方向相同。

大量实验表明, 在一定条件下, 相互作用的两物体动量的矢量和是守恒量。

问题与思考

1. 列举学过的物理量中的守恒量, 这些物理量的守恒是否有前提?
2. 某同学乘坐摩天轮随座舱在竖直平面内做匀速圆周运动。在摩天轮转动一周的过程中, 该同学的动量是否变化?
3. 一名高中生骑自行车上学, 估算他以正常速度骑行时的动量。

4. 质量为 1.2 t 的家用轿车，其 0~100 km/h 直线加速阶段的 $v-t$ 图像如图 1-4 所示。该车在第 2.5 s 至第 4.5 s 的时间间隔内动量变化了多少？

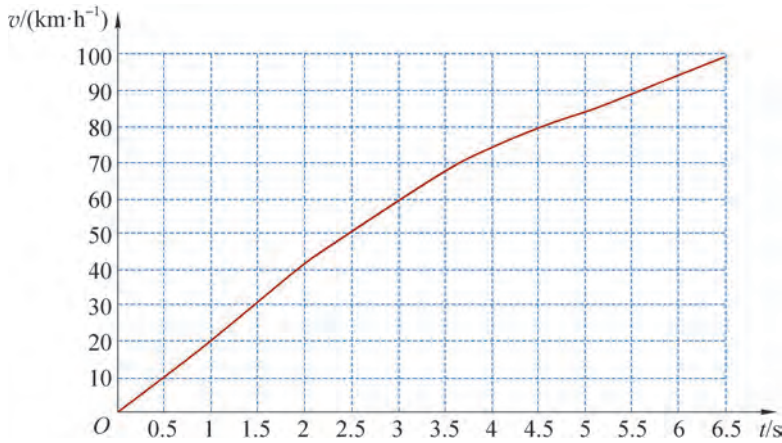


图 1-4

5. 如图 1-5 所示，一只质量为 0.18 kg 的垒球，以 25 m/s 的速度飞来，被运动员以 40 m/s 的速度反向击回。击球前后垒球动量的变化量为多大？



图 1-5

6. 如图 1-6 所示，两个形状相同的小球 A、B，质量分别为 20 g 和 10 g，用等长的细线悬挂在同一高度。第一次保持 B 球竖直悬挂，将 A 球拉至某高度由静止释放；第二次保持 A 球竖直悬挂，将 B 球拉开，从相同高度由静止释放。两球两次碰撞前后的速度如表 1-4 所示。



图 1-6

表 1-4

碰撞情况	碰撞前 A 的速度 v_A	碰撞前 B 的速度 v_B	碰撞后 A 的速度 v_A'	碰撞后 B 的速度 v_B'
A 碰 B	1 m/s	0	0.33 m/s	1.33 m/s
B 碰 A	0	1 m/s	0.66 m/s	-0.33 m/s

根据上述实验数据，能否得出“碰撞过程中守恒的物理量就是动量”的结论？

第二节 物体动量变化的原因 动量定理

通过碰撞实验寻找相互作用中的守恒量时发现,碰撞前后两个物体动量的矢量和不变,但每个物体的动量都发生了变化。单个物体动量发生变化的原因是什么?

► 冲量

推动一辆质量为 m 的小车,使其由静止开始加速到速度 v ,小车的动量由 0 增加为 mv 。由牛顿运动定律可知,若由一名儿童用较小的力推动该车,所需的时间较长;换由一位成人用较大的力推,则所需时间较短。可见,物体动量的变化不仅与作用力有关,还与力的作用时间有关。

假设小车仅在水平恒力 F 的作用下,沿光滑的水平地面做匀加速直线运动,从 t_0 到 t ($\Delta t = t - t_0$),速度由 v_0 增加到 v ,则动量由 mv_0 增大到 mv 。以小车为研究对象,设小车加速度为 a ,由牛顿第二定律和运动学知识可知

$$F = ma$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v - v_0}{t - t_0}$$

整理可得

$$F(t - t_0) = mv - mv_0 = p - p_0$$

即

$$F\Delta t = p - p_0$$

p_0 和 p 分别表示加速过程始、末两个状态小车的动量。

上式表明,小车动量的变化由作用力 F 和作用时间 Δt 共同决定,只要两者的乘积 $F\Delta t$ 相同,小车动量的变化就相同。

在物理学中,把作用力与其作用时间的乘积称为**冲量 (impulse)**,用符号 I 表示。

$$I = F\Delta t$$

冲量是矢量,它的方向与力 F 的方向一致。在国际单位制中,冲量的单位是牛顿·秒,符号为 $\text{N}\cdot\text{s}$ 。

利用上式可直接计算恒力的冲量。以力 F 为纵轴,时间 t 为横轴作 $F-t$ 图像,若 F_0 为恒力,图像为平行于横轴的直线,如图 1-7 所示,直线与横轴所围面积可表示 $0 \sim t_1$ 时间内力 F_0 的冲量大小。

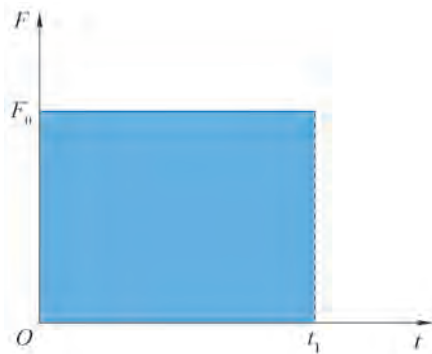


图 1-7 恒力的 $F-t$ 图像

大家谈

如果物体受到一个大小随时间变化的力的作用，力随时间变化的关系如图 1-8 所示，如何确定这个力的冲量？

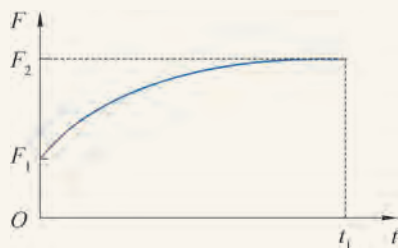


图 1-8 某个变力的 $F-t$ 图像

► 动量定理

在实际情况下，物体往往在某一时间段 Δt 内受到多个力的作用，这些力在 Δt 时间内的共同作用效果与其合力在这段时间内的作用效果相同。因此，物体在 Δt 时间内动量的变化等于其所受合力 $F_{\text{合}}$ 在这段时间内的冲量，即

$$F_{\text{合}} \Delta t = p - p_0$$

这一关系称为**动量定理**（theorem of momentum）。

上述动量定理的推导是从物体在恒力作用下的特殊情形中得出的结论。变力作用下物体的动量变化是否也遵循动量定理？

自主活动

如图 1-9 所示，①为力传感器，②为光电门传感器，③为装有挡光片和弹性圈的小车，④为水平导轨。推动小车，使弹性圈与固定的力传感器碰撞，利用力传感器获得小车受到的力与作用时间的关系，光电门传感器测得碰撞前、后小车的速度。根据所得数据，验证动量定理。

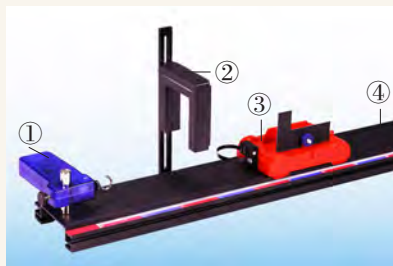


图 1-9 验证动量定理

在上述活动中，小车虽然受到变力作用，但动量定理依然成立。

进一步的研究表明，物体在变力作用下动量定理也成立。

示例 高空抛物存在极大的安全隐患，即使从楼上落下一枚小小的鸡蛋，也可能把路上的行人砸伤。假设鸡蛋撞击地面的持续时间约为 0.01 s ，估算一枚由 7 楼自由下落的鸡蛋对地面的平均冲击力有多大。

分析：根据实际情况，估算鸡蛋的质量和下落高度。由自由落体运动的规律或机械能守恒定律得鸡蛋触地前的速度。以鸡蛋为研究对象，分析鸡蛋的受力情况，用动量定理估算鸡蛋在触地过程中撞击地面的平均作用力。

解：通常 500 g 鸡蛋约有 8 枚，则 1 枚鸡蛋的质量 m 约为 0.06 kg。一般住宅楼的层高约为 3 m，则鸡蛋下落的高度 h 约为 18 m。由于下落距离不大，可以忽略鸡蛋下落时的空气阻力，则可将鸡蛋下落的过程看作自由落体运动。重力加速度 g 取 10 m/s^2 。

以鸡蛋为研究对象，设鸡蛋触地前的速度为 v_1

$$v_1 = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 10 \times 18} \text{ m/s} \approx 19 \text{ m/s}$$

触地过程中，鸡蛋受到地面作用力 \bar{F}_N 和重力 G 的作用，受力分析如图 1-10 所示。

鸡蛋触地，在合外力 $F_{\text{合}}$ 的作用下，它的速度在 $\Delta t = 0.01 \text{ s}$ 内由 v_1 减小到零。取竖直向上为正方向，以鸡蛋为研究对象，在鸡蛋触地到速度为零的过程中，速度方向与正方向相反，其初动量为 $-mv_1$ ，末动量为零。再由动量定理

$$F_{\text{合}} \Delta t = mv - mv_0$$

$$(\bar{F}_N - G) \Delta t = 0 - (-mv_1)$$

得
即

$$\begin{aligned} \bar{F}_N &= \frac{mv_1}{\Delta t} + G \\ &= \left(\frac{0.06 \times 19}{0.01} + 0.06 \times 10 \right) \text{ N} \\ &= 114.6 \text{ N} \end{aligned}$$

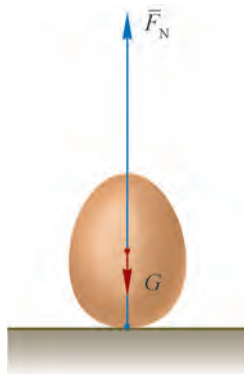


图 1-10 鸡蛋触地时的受力分析

地面对鸡蛋作用力的反作用力即为鸡蛋对地面的作用力。由此可知，鸡蛋落地时对地面平均冲击力的大小约为 114.6 N。

由 7 楼自由下落的鸡蛋对地面的平均冲击力与 10 kg 物体受到的重力相当。因此，“高空抛物”存在极大的危险。

拓展视野

在很短时间内大小随时间剧烈变化的作用力称为冲力。图 1-11 中曲线与时间轴包围的面积即为冲力的冲量。

由于冲力在极短时间内由零达到最大值后又很快减小为零，通常无法直接用力与时间的乘积计算其冲量。设想存在一个恒力 \bar{F} ，它在相同时间内的冲量与冲力的冲量相等，如图 1-11 所示。该恒力改变动量的效果与冲力相同，反映了冲力在该段时间内的平均作用效果，称为平均冲力。

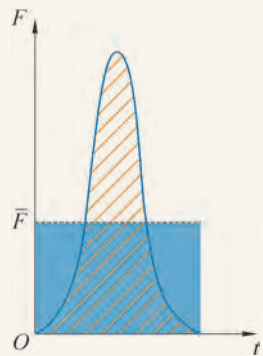


图 1-11 冲力的 $F-t$ 图像

鸡蛋触地过程中，地面对鸡蛋的作用力远大于鸡蛋所受到的重力（约为 0.6 N）。对于碰撞、冲击等相互作用过程，计算平均冲力时往往可以忽略重力的影响。

问题与思考

1. 当人从高处跳下双脚接触地面时, 会本能地弯曲以减小人与地面间的冲击力, 类似的现象称为“缓冲”。用动量定理解释其中的原因。
2. 质量为 2 kg 的物体在合力 F 作用下由静止开始运动, 合力 F 随时间 t 变化的图像如图 1-12 所示, 求物体在 4 s 末的速度。

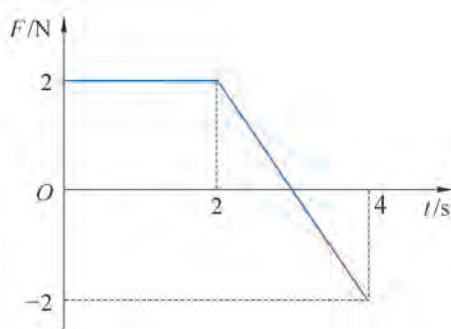


图 1-12

3. 质量为 1.0 kg 的小球从离地面 5.0 m 高处自由下落至地面, 与地面碰撞后反弹, 小球反弹的最大高度为 3.2 m 。设小球与地面碰撞时间为 0.1 s , 忽略空气阻力的影响, 小球受到地面的平均冲力为多大? (g 取 10 m/s^2)
4. 冲量和功均与力有关, 也与过程有关。冲量和功有哪些区别?
5. 长为 l 的轻绳, 一端固定在水平面上, 另一端连着质量为 m 的质点, 使质点在水平面上做周期为 T 的匀速圆周运动。在 $\frac{1}{4}T$ 内质点所受绳子拉力的冲量和质点所受重力的冲量分别为多少?
6. 某同学打算通过如图 1-13 所示的装置测量小车在水平导轨上受到的摩擦力。图中 A 、 B 分别为位移传感器的发射端和接收端, 可测量小车速度大小随时间的变化; C 为力传感器, 可测量小车受到的拉力 F 的大小。水平细线一端连接小车上的力传感器, 另一端跨过定滑轮连接钩码。钩码由静止释放后, 细线带动小车从静止开始在轨道上运动至钩码着地, 此后, 小车继续沿轨道向前运动一段距离后静止。实验测得的 $F-t$ 图像如图 1-14 (a) 所示, 图中 t_2 为小车静止的时刻。

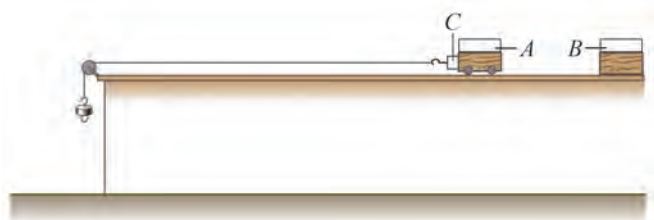


图 1-13

- (1) 在图 1-14 (b) 中画出小车运动的 $v-t$ 图像的大致形状。
- (2) 根据牛顿运动定律、动能定理、动量定理均可实现小车所受摩擦力的测量，测量的方案如何？分别需要从图像中获取哪些信息？补全表 1-5。

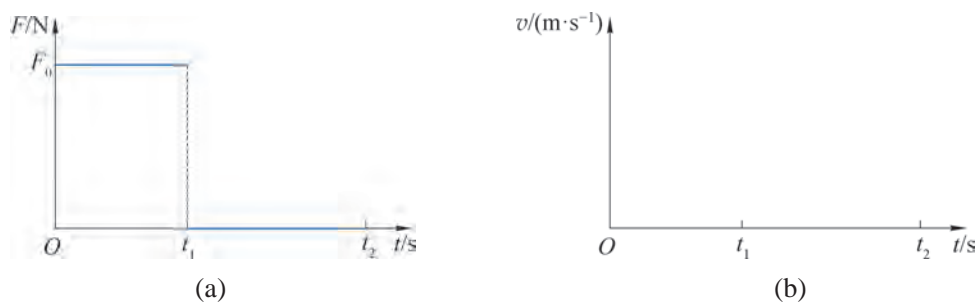


图 1-14

表 1-5

原理	测量的物理量及相应符号	阻力与所测物理量的关系
牛顿运动定律		
动能定理		
动量定理		

第三节 动量守恒定律

物体间的作用是相互的,作用力与反作用力的冲量会同时引起相互作用物体的动量的变化。几个有相互作用的物体构成一个系统。系统外的物体对系统内物体的作用力称为**外力 (external force)**,系统内物体间的相互作用力称为**内力 (internal force)**。

在寻找碰撞过程守恒量的实验中,两个相互作用的滑块构成了一个系统,两个滑块碰撞过程中的相互作用即为系统内力。在实验中,滑块在水平方向受到的阻力可以忽略不计,因此系统所受外力的合力为零。实验结果提示我们,系统不受外力,系统内物体动量的矢量和是守恒量。若系统受到外力作用,其动量的矢量和还是守恒量吗?

► 动量守恒定律

两个质量为 m_1 、 m_2 沿同一直线运动的物体构成一个系统。两物体分别受到外力 F_1 和 F_2 的作用,它们之间的相互作用力分别为 $F_{1内}$ 和 $F_{2内}$,各力的作用时间均为 Δt ;在相互作用的始、末时刻, m_1 的速度为 v_{10} 和 v_1 , m_2 的速度为 v_{20} 和 v_2 。

以 m_1 为研究对象,其受到 F_1 与 $F_{1内}$ 的作用,根据动量定理,有

$$(F_1 + F_{1内})\Delta t = m_1 v_1 - m_1 v_{10}$$

以 m_2 为研究对象,其受到 F_2 与 $F_{2内}$ 的作用,根据动量定理,有

$$(F_2 + F_{2内})\Delta t = m_2 v_2 - m_2 v_{20}$$

由牛顿第三定律

$$F_{1内} = -F_{2内}$$

由此可得

$$(F_1 + F_2)\Delta t = (m_1 v_1 + m_2 v_2) - (m_1 v_{10} + m_2 v_{20})$$

上式中,等式右边的两项分别为两物体相互作用前、后的动量之和,即系统始、末状态的动量。由此可知,系统动量的变化是受到外力作用的缘故。

如果系统所受到的外力之和为零,即 $F_1 + F_2 = 0$,则有 $(m_1 v_1 + m_2 v_2) - (m_1 v_{10} + m_2 v_{20}) = 0$,即

$$m_1 v_{10} + m_2 v_{20} = m_1 v_1 + m_2 v_2$$

由此可知,当 m_1 、 m_2 构成的系统所受外力之和为零时,相互作用前、后系统的动量不变。

进一步的研究和实践发现,一个系统,无论包含多少个物体,内力作用有多复杂,如果系统不受外力或所受外力的矢量和为零,系统的动量就保持不变。这个结论称为**动量守恒定律 (law of conservation of momentum)**,可表示为

$$p_0 = p \text{ 或 } \Delta p = 0$$

式中, p_0 为系统的初动量, p 为系统的末动量, Δp 为系统动量的变化。

除了系统不受外力或所受外力的矢量和为零的情况外，如果系统所受的外力远小于内力且作用时间极短，则可忽略外力的冲量，近似认为系统的动量守恒。

拓展视野

如图 1-15 所示的频闪照片中，白色桌球 A 撞击了原本静止的黑色桌球 B。撞击后 A 球改变了运动方向，B 球也由静止开始运动。由于 A、B 两球大小相同、质量相等，碰撞前后 A、B 球的动量仅由其速度决定。用箭头分别表示碰撞前 A 球的动量 p_A 和碰撞后 A、B 两球的动量 p_A' 、 p_B' ，发现碰撞后两球动量的矢量和几乎与碰撞前 A 球的动量相等，即 A、B 两球组成的系统在碰撞前后动量守恒。

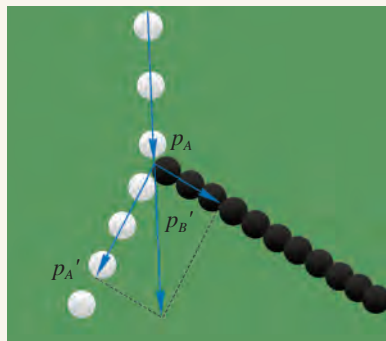


图 1-15 桌球碰撞的频闪照片

历史上，科学家围绕“运动的守恒量”展开激烈的争论，最终确立了两个既有联系又有区别的物理量：动量和能量。动量守恒定律和能量守恒定律都是自然界中重要的定律。

► 动量守恒定律的普适性

用牛顿运动定律分析物体运动状态的变化，需要知道物体在整个运动过程中各个时刻的受力细节，这些信息的获取往往非常繁琐，甚至无法直接获得。运用动量守恒定律分析物体运动状态的变化，不涉及具体过程，只考虑始、末两个状态的动量，使问题大大简化。即使不清楚相互作用机制，科学家也可运用动量守恒定律根据已有的事实对物理过程的结果作出一定的推测。

迄今为止，物理学的发展史上还未发现违背动量守恒定律的事例。因此，在分析新的现象或实验结果时，如果发现似乎违背动量守恒定律的情况，物理学家总是提出一些新的假设，使之满足动量守恒的规律，而这些假设往往最终都被新的发现所证实。例如，两个运动的带电粒子在电磁相互作用下动量似乎也不守恒，但当把电磁场的动量引入系统后，动量守恒仍然成立。

目前，物理学的研究范围已经从宏观、低速拓展到微观、高速。牛顿运动定律仅适用于宏观、低速的领域，而动量守恒定律在各种情况下均成立。当物体发生相互作用时，只要系统不受外力或所受外力的矢量和为零，无论物体是黏合在一起还是分裂成碎块；无论物体相互作用前后是否在一条直线上运动，无论作用是接触还是非接触，无论相互作用的物体有多少个，也无论相互作用的性质如何；大到宇宙天体，小到原子、基本粒子，动量守恒定律总是成立的。

► 碰撞现象

碰撞现象广泛存在，如锤子击打钉子，台球间的撞击，足球运动员身体间的合理冲撞，火车车厢间的挂接，对撞机中微观粒子的碰撞等。这类现象中，相互作用情况复杂，力的作用时间短，通常可以从动量的角度加以分析。

示例 如图 1-16 所示，在水平冰面上，质量为 m_1 的儿童，以速度 v_0 向右滑行，与质量为 m_2 、静止的成人相撞后一起以相同的速度继续向右运动。求：

- (1) 两人共同运动的速度。
- (2) 在相撞过程中两人组成的系统损失的动能。

分析：相撞时两人组成的系统受到的外力可忽略，动量守恒。

解：以两人组成的系统为研究对象，取水平向右为正方向。碰撞过程中所受外力有重力、支持力和阻力。竖直方向的外力之和为零；水平方向的阻力远小于两人相撞时的水平内力，系统的动量守恒。

- (1) 设两人相撞后共同运动的速度为 v ，由于碰撞过程中系统动量守恒，根据动量守恒定律

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

得

$$\begin{aligned} v &= \frac{m_1 v_0}{m_1 + m_2} \\ &= \frac{v_0}{1 + \frac{m_2}{m_1}} \end{aligned}$$

- (2) 系统损失的动能为

$$\begin{aligned} \Delta E_k &= \frac{1}{2} m_1 v_0^2 - \frac{1}{2} (m_1 + m_2) v^2 \\ &= \frac{m_1 m_2 v_0^2}{2(m_1 + m_2)} \\ &= \frac{m_1 v_0^2}{2 \left(\frac{m_1}{m_2} + 1 \right)} \end{aligned}$$

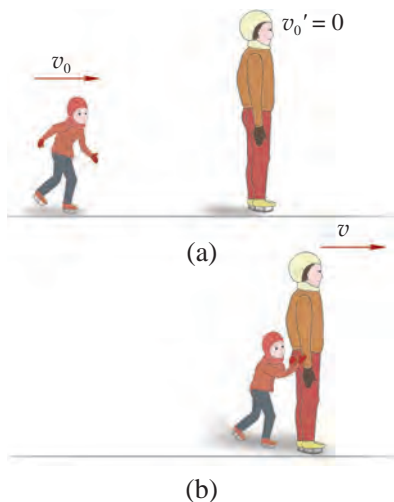


图 1-16 滑冰

系统在碰撞前后动量守恒，动能有损失。在物理学中，将这类碰撞称为**非弹性碰撞**（**inelastic collision**）。与此对照，在物理学中，把碰撞前后动量和动能都不变的碰撞称为**弹性碰撞**（**elastic collision**）。

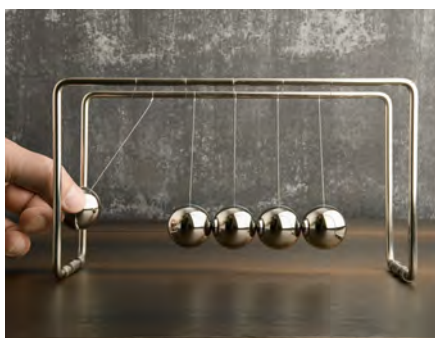


图 1-17 小球的碰撞装置

图 1-17 中 5 个相同的钢球悬挂在横梁下，构成一个系统。拉高最左侧的钢球释放，钢球间发生碰撞后，最左侧钢球静止，最右侧的钢球会摆到与最左侧钢球释放时相同的高度。根据机械能守恒定律，最左侧钢球碰撞前速度的大小与最右侧钢球碰撞后速度的大小相同。这说明最左侧钢球的动量和动能通过一系列弹性碰撞传递给了最右侧的钢球，碰撞前、后系统的动量和动能都没有发生变化。

大家谈

行驶中的汽车如果发生迎头相撞或追尾，发动机盖或后备厢盖会严重变形。在设计汽车时，为什么不加强这两处的强度？

► 反冲现象

鱿鱼（图 1-18）是海洋中的“游泳健将”，通过向后喷射水流使自身快速向前游动。类似的现象在生活中还有很多。



图 1-18 鱿鱼

自主活动

如图 1-19 所示，用夹子稍稍夹住笔的尾部，置于桌面上，轻轻敲击桌面，夹子会与笔分离。观察夹子与笔分离时会怎样运动。



图 1-19 夹子与笔的分离



图 1-20 火箭的发射

系统在内力作用下向某一方向发射部分物质，从而使系统的剩余部分向相反方向运动的现象，称为**反冲**（recoil）现象。

如图 1-20 所示，火箭的发射也利用了反冲现象。火箭携带的燃料燃烧后产生气体，这些高温、高压的气体以很大的速度从尾部向后喷出，将火箭推向前方。1970 年，“长征一号”火箭把我国第一颗人造卫星“东

方红一号”送入了预定轨道；1990 年，“长征二号”捆绑式大推力火箭发射成功，表明我国具有了发射重型卫星的能力；2018 年，嫦娥四号探测器搭载“长征三号乙”运载火箭开启了月球背面探测的新旅程。

与碰撞类似，在发生反冲的过程中系统两部分间相互作用的内力往往远大于系统所受的外力，系统动量通常是守恒的。

学生实验

验证动量守恒定律

提出问题

相互作用的物体构成的系统，在所受外力的矢量和为零的条件下动量守恒。如何通过实验来验证这一结论？

实验原理与方案

两个物体相互作用的过程中，若系统外力可以忽略，相互作用前、后系统的动量守恒。只研究最简单的一维情况（即两个物体碰撞前后均沿同一直线运动）。实验中需测量运动物体的质量，以及它们相互作用前、后的速度，验证系统动量是否保持不变。

实验装置与方法

实验装置如图 1-21 所示，所需的实验器材为：平直轨道，两辆一端装有弹性圈、一端装有尼龙搭扣的小车，配重片若干，光电门传感器 2 个。

尽量减小小车所受的阻力，通过增减配重片改变小车的质量，利用光电门传感器测量相互作用前、后两小车的速度大小。

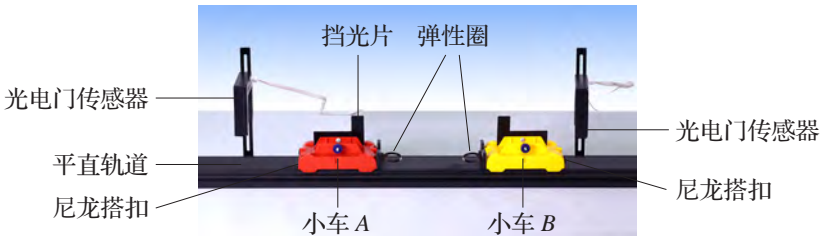


图 1-21 验证动量守恒的实验装置

实验操作和数据收集

在水平轨道的合适位置安装光电门传感器，使其能准确测量小车的速度大小。
第一次实验：将两小车置于轨道上，装有弹性圈的一端相对。使两小车相互靠近压缩弹性圈，并由静止同时释放。

第二次实验：将两小车置于轨道上，装有尼龙搭扣的一端相对。保持其中的一辆小车静止，另一辆小车以合适的速度向静止小车运动。

多次实验并在表 1-6 中记录两小车的质量和相互作用前、后小车的速度大小。

表 1-6 实验数据记录表

小车 A 的质量 $m_A = \underline{\hspace{2cm}}$ kg, 小车 B 的质量 $m_B = \underline{\hspace{2cm}}$ kg

实验 序号	相互作用前		相互作用后	
	小车 A 速度 $v_{A0}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	小车 B 速度 $v_{B0}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	小车 A 速度 $v_A/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	小车 B 速度 $v_B/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
1				
2				
3				
4				

数据分析

利用表中的数据, 分别计算并比较相互作用前、后两小车的动量以及两小车动量的矢量和。

实验结论

交流与讨论

交流各组所得数据和结论。讨论其他实验方案。

问题与思考

1. 在如图 1-22 所示的三种情境中, A 和 B 组成的系统动量是否守恒? 动能是否变化? 简述理由。

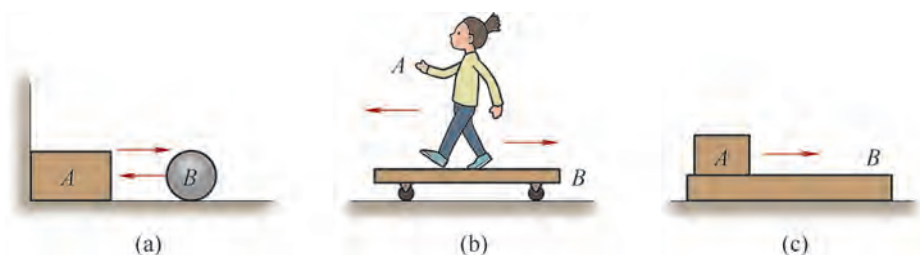


图 1-22

- (a) 小球 B 与靠在墙角的物体 A 碰撞后以同样大小的速度弹回。
 (b) 人 A 在小车 B 上突然行走, 小车后退 (忽略小车与地面间的摩擦力)。
 (c) 木块 A 在木板 B 上滑动, 木块与木板、木板与地面之间的接触面均粗糙。

2. 如图 1-23 所示, A、B 两物体连接在轻质弹簧两端。弹簧压缩后由静止释放 B 物体。分析说明弹簧由压缩状态到恢复原长的过程中, A、B 和弹簧组成的系统动量和动能如何变化? 在此过程中系统的机械能是否守恒?



图 1-23

3. 如图 1-24 所示, 光滑水平面上有大小相同的 A 、 B 两球在同一直线上同向运动, A 球的质量为 B 球的一半。取向右为正方向, A 、 B 两球的动量均为 $6 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$, 运动中两球发生碰撞。如果碰撞后 A 球的动量变化量为 $-4 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$, 则 B 的动量变化量是多少? 碰撞后 A 、 B 的动量分别为多少?



图 1-24

4. 如图 1-25 所示, 甲、乙两个小朋友各乘一辆冰车在水平冰面上游戏, 甲与他的冰车总质量 $m_{\text{甲}}$ 为 30 kg , 乙与他的冰车总质量 $m_{\text{乙}}$ 也是 30 kg 。游戏时甲推着一个质量 m 为 15 kg 的箱子和他一起以大小为 2 m/s 的速度 v_0 滑行, 乙以同样大小的速度迎面滑来。为了避免相撞, 甲突然将箱子沿冰面推给乙, 箱子滑到乙处时乙迅速把它抓住。分析说明这样做是否一定能避免相撞, 为什么? (忽略冰面的摩擦)

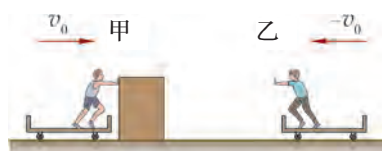


图 1-25

5. 质量为 m 的小球 A 以速度 v_0 碰撞质量也为 m 的静止小球 B 。碰撞后 B 、 A 两球的速度之差为 $\frac{3}{4}v_0$ 。碰撞后, A 、 B 的速度大小分别为多少? 两球的机械能损失了多少?
6. 小球 A 以速度 v_0 与另一个静止小球 B 发生碰撞, 两个球的质量相等。碰撞后两球的运动方向与 v_0 的方向在同一直线上。仅根据动量守恒定律, 两球碰撞后的速度可能为: ① $v_A = 0$, $v_B = v_0$; ② $v_A = \frac{v_0}{2}$, $v_B = \frac{v_0}{2}$; ③ $v_A = \frac{2}{3}v_0$, $v_B = \frac{1}{3}v_0$; ④ $v_A = -v_0$, $v_B = 2v_0$ 。分析哪几组结果是可能的。

学期活动

设计并完成一个测量反冲物体所受冲力的实验。

在反冲现象中，物体通过以一定速度发射部分的物质而实现反向的加速运动。在此过程中，物体会受到冲力的作用。如何测量这个力？以初中曾经制作过的靠向后喷射水流飞行的“水火箭”为例，设计一个方案，测量“水火箭”持续喷出水流时，水流对火箭作用力随时间的变化。估算“水火箭”的最大速度（选做）。

活动要求：

- (1) 制定实验方案和测量方法，说明使用的主要器材和配件。
- (2) 通过实验得到作用力随时间变化的数据。
- (3) 根据阅读材料提供的信息和实验数据，估算水火箭的最大速度。（选做）
- (4) 完成实验报告，互相交流、评价。
- (5) 实验过程中注意安全。

阅读材料：

火箭由火箭本体（火箭箭体、载荷等）和所携带的燃料构成。火箭发射时，燃料在燃烧室中燃烧，产生高温高压气体并通过喷口喷出，同时对火箭施加一个推力。由动量定理可以推得，火箭受到的推力大小 $F_{\text{推}} = u \frac{\Delta m}{\Delta t}$ ，式中 $\frac{\Delta m}{\Delta t}$ 为单位时间喷出气体的质量， u 是气体的喷射速度，其大小对于确定型号的火箭发动机而言是确定的。

如果火箭仅在推力作用下运动，发射前火箭与燃料总质量为 m_0 ，火箭本体质量为 m ，当燃料耗尽时，火箭的最终速度可通过理论计算得到，其大小为 $v_t = u \ln \frac{m_0}{m}$ 。

小结

• 基本概念和基本规律

动量：物体质量与速度的乘积，用符号 p 表示。动量是矢量。

冲量：作用力 F 与其作用时间 Δt 的乘积，用符号 I 表示。冲量是矢量。

动量定理：物体动量的变化量等于其所受合力的冲量。

动量守恒定律：如果系统不受外力或所受外力的矢量和为零，系统的总动量保持不变。

弹性碰撞：碰撞前后系统动量保持不变的同时，动能也保持不变的碰撞。

非弹性碰撞：碰撞前后系统动量保持不变的同时，动能有损失的碰撞。

反冲：系统在内力作用下向某一方向发射部分物质，从而使系统的剩余部分向相反方向运动的现象。

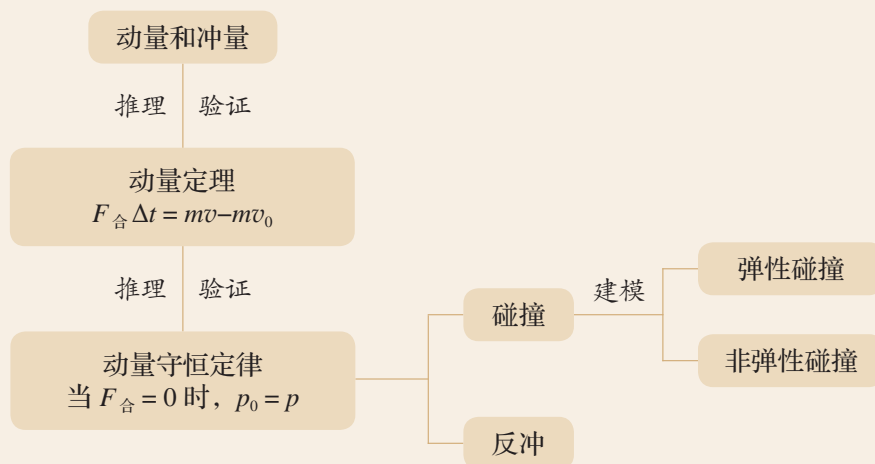
• 基本方法

通过寻找守恒量的实验分析，认识应用实验数据处理、分析和提取证据的方法。

经历由牛顿运动定律推导得出动量定理的过程，感受演绎推理的方法。

通过探究动量守恒定律，运用演绎推理和实验验证结合的方法。

• 知识结构图



复习与巩固

1. 如图 1-26 所示, 小球用不可伸长的轻绳悬挂在 O 点, 将小球拉紧从 A 点由静止释放, 小球向下摆动至最低点 B 。在此过程中, 根据动能定理, 小球重力做的功等于动能的变化量, 即 $W = \Delta E_k$ 。由此, 有同学认为, 小球重力的冲量 I 与小球动量的变化量 Δp 之间也满足类似关系, 即 $I = \Delta p$ 。试对此说法作出评析。

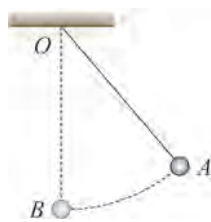


图 1-26

2. 从平台上以相同的速率抛出小球, 第一次竖直向上抛出, 第二次水平抛出。忽略空气阻力的影响, 比较小球两次落地瞬间的动量, 以及两次运动过程中小球所受合力的冲量。
3. 在光滑的绝缘水平面上, 有两个相距一定距离的带电小球 A 、 B 。它们的质量分别为 m_1 、 m_2 , 带有等量电荷。
- (1) 静止释放两小球, 分析两球组成的系统动量是否守恒。
- (2) 若在空间加一沿水平方向的匀强电场, 静止释放后两球组成的系统动量是否守恒?
4. 物体以初速度 v_0 竖直向上抛出, 落回抛出点时的速度为 v_t , 运动过程中物体所受的阻力与其速度成正比。画出物体从抛出到落回抛出点过程中的 $v-t$ 图像。在此过程中阻力的冲量为多少? 物体从抛出到落回抛出点的时间为多少?
5. 蹦极运动员离开跳台时的速度为零。将运动员离开跳台到弹性绳刚好被拉直的过程视为第一阶段, 将弹性绳刚好被拉直到运动员下降至最低点的过程视为第二阶段。分析比较第一阶段中运动员所受重力的冲量和第二阶段中运动员所受弹性绳拉力的冲量的大小。(忽略空气阻力)
6. 水平面上有质量相等的 a 、 b 两个物体, 均处于静止状态。水平推力 F_1 、 F_2 分别作用在 a 、 b 上, 作用一段时间后撤去推力。撤去推力后, 两物体继续运动一段距离, 先后停下。两物体由静止起运动到停止的 $v-t$ 图像如图 1-27 所示, 图中 AB 段与 CD 段平行。分析比较 F_1 与 F_2 的大小, 以及 F_1 的冲量与 F_2 的冲量的大小。

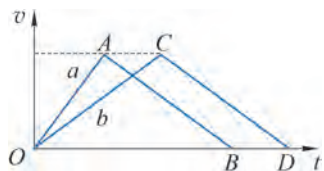


图 1-27

7. 质量为 m_1 的火箭搭载质量为 m_2 的卫星, 以速率 v_0 进入太空中的预定位置后两者分离。星箭分离前, 卫星位于火箭箭体前端。星箭分离后, 箭体以速率 v_2 沿原方向运动, 估算星箭分离后卫星的速率 v_1 。

8. 如图 1-28 所示为沿同一直线运动的 A 、 B 两小球碰撞前后的 $x-t$ 图像。其中直线 a 、 b 分别为小球 A 、 B 碰撞前的 $x-t$ 图线, 直线 c 为碰撞后两球的 $x-t$ 图线。根据图中的信息描述 A 、 B 两小球碰撞前后的运动情况。若 A 球质量为 1 kg , 则 B 球质量为多少?

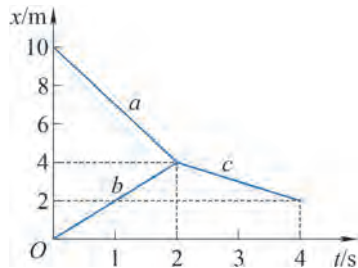


图 1-28

9. 如图 1-29 (a) 所示, 气垫导轨上两个静止的滑块 A、B 之间放有一根被压缩的轻质弹簧, 两个滑块用绳子连接。将绳子烧断后, 两个滑块向相反方向运动, 运动过程中的频闪照片如图 1-29 (b) 所示。已知频闪的频率为 10 Hz, 滑块 A、B 的质量分别为 200 g、300 g。根据照片记录的信息, 问:

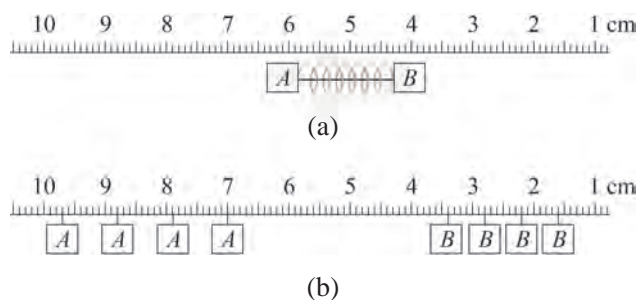


图 1-29

- (1) 绳子烧断且 A、B 离开弹簧后, A、B 分别做什么样的运动? 运动速度分别为多大?
 - (2) 能否得出两滑块在绳子烧断前后总动能守恒的结论? 为什么?
 - (3) 能否得出两滑块在绳子烧断前后总动量不变的结论? 为什么?
10. 如图 1-30 所示, 在光滑水平面的左侧固定一竖直挡板, A 球静止在水平面上, B 球向左运动并与 A 球发生碰撞, 碰撞前后 A、B 均沿同一直线运动。B 球碰撞前、后的速率之比为 3:1, A 球垂直撞向挡板, 相撞后以原速率返回, 两球刚好不发生第二次碰撞。分析两球的质量关系。

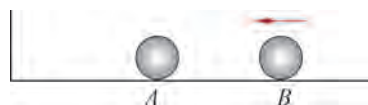


图 1-30

11. 一艘宇宙飞船垂直于飞行方向的横截面积为 S , 以恒定的速率 v_0 航行, 进入一个具有宇宙尘埃的区域。设该区域内单位体积有 n 颗尘埃, 每颗尘埃的质量为 m , 尘埃碰到飞船前是静止的, 碰到飞船后黏附其上。在忽略其他阻力的情况下, 飞船为保持匀速航行, 发动机需提供大小为 $nmv_0^2 S$ 的牵引力, 试写出推导这一表达式的过程。
12. 质量为 m_0 的人乘坐质量为 m 的气球, 静止于离地 h 高处。如果从气球上放下一个质量不计的软梯, 让人沿软梯匀速降到地面, 则软梯至少需多长。

第二章

机械振动

在事物运动、变化发展的过程中，某些特征可能多次重复出现，自然界中以此为特点的周期性运动十分普遍。昼夜交替、潮起潮落、季节变换就是地球周期性运动的反映；岁月更迭，时间流逝，数千年来，人们发明了多种计时装置，它们都利用了事物的周期性规律。

我们在必修课程中已经学习了直线运动、曲线运动，以及牛顿运动定律和机械能守恒定律。在本章中，将认识简谐运动的特征、探究单摆的运动规律，理解机械振动的规律，了解受迫振动的特点，了解共振的条件及应用。在学习中，运用力与运动的关系和能量的观念认识简谐运动的特征，进一步加深对质点运动的认识。在学生实验中，用传统方法和现代信息技术获取和处理实验数据，分析实验图像，得出实验结论，初步体验通过实验构建知识的乐趣，提升科学探究的能力。本章也是学习机械波的基础。

第一节 机械振动 简谐运动

自然界中有各种各样的振动，我们生活在振动的世界中。汽车、火车、飞机在运行时都发生振动；蚊子翅膀每秒振动数百次，发出我们听得见的声音；各种乐器正是由于振动才能产生美妙的音乐；对于人体来说，心脏跳动、肺的呼吸、脑电波的涨落等也都是振动；地震则是一种强烈的、有很大破坏性的振动。你一定有过如图 2-1 所示荡秋千的体验，秋千的运动也是一种振动。振动是自然界中普遍存在的运动形式。



图 2-1 秋千的运动

► 机械振动

如图 2-2 所示，质量为 m 的小球套在水平光滑金属杆上，轻质螺旋弹簧一端固定，另一端与小球连接，这样就构成了一个最简单的振动系统——**弹簧振子 (spring oscillator)**。构成弹簧振子的小球可视为质点。

小球在 O 点不受弹簧弹力的作用（弹簧既不伸长也不压缩），在运动方向上合力为零，在物理学中 O 点称为平衡位置。一旦小球受到扰动离开 O 点，它就会受到指向 O 点的弹力作用，最远只能到达 B 、 C 两点处。于是，小球在弹力的作用下将不断在 O 点两侧来来回回，做周期性的往复运动。弹簧振子的运动是一种典型的振动。

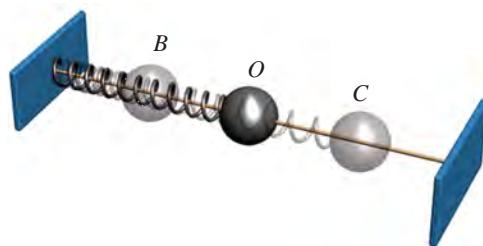


图 2-2 弹簧振子模型

物体在某一位置附近的往复运动称为**机械振动 (mechanical vibration)**，简称振动。

► 振动图像

小球在平衡位置两侧的运动具有重复性。如何比较直观地描述不同时刻小球的位置呢？

以平衡位置为坐标原点 O ，沿小球的振动方向建立坐标轴 (x 轴)，小球在平衡位置右侧时，相对平衡位置的位移为正；在平衡位置左侧时，相对平衡位置的位移为负。在垂直于 x 轴的方向建立时间轴 (t 轴)。图 2-3 (a) 描述了弹簧振子在 9 个连续的间隔相等的时刻偏离平衡位置 O 的位移。

将图 2-3 (a) 逆时针旋转 90° ，用平滑的曲线把球心的位置连接起来，如图 2-3 (b) 所示，便得到振动过程中小球相对平衡位置的位移与时间的关系图像。进一步抽象后可得如图 2-3 (c) 所示的 $x-t$ 图像，称为小球的振动图像。

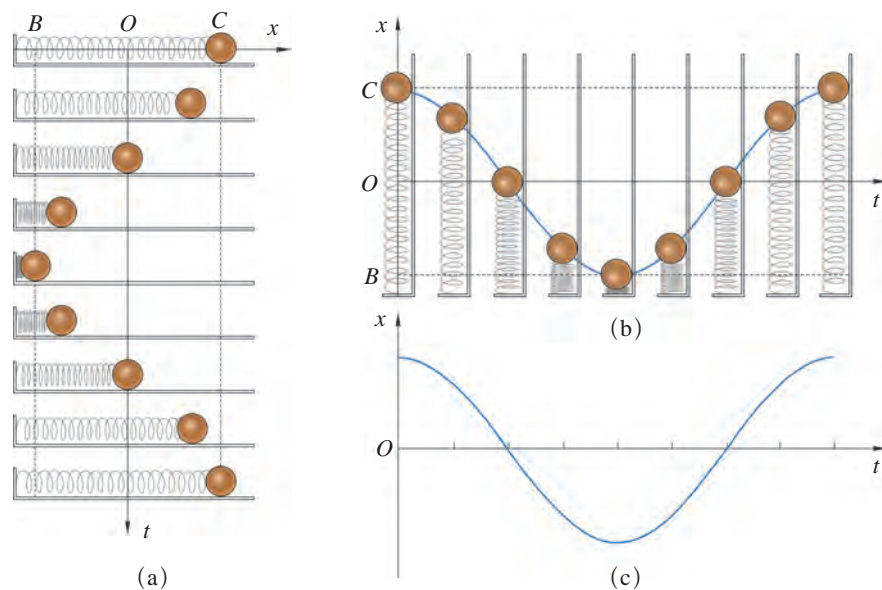


图 2-3 振动位置与时间的关系

如果没有能量损耗, 小球将会在弹簧弹力的作用下持续往复运动, 这样的运动称为自由振动。由于振动具有周期性, 随着记录时间的增加, 图 2-3 (c) 所示的图像会不断重复。因此, 只需要研究图 2-3 (c) 所示这一段时间内的运动就可以推测后续任意时刻振动物体相对平衡位置的位移。振动的物体从某一位置出发到第一次回到该位置, 并保持与出发时相同运动方向的过程称为一次全振动。图 2-3 (c) 所示就是一个全振动过程的 $x-t$ 图像。通过研究一次全振动就能知道振动的全过程。

► 简谐运动

可以证明, 弹簧振子的振动图像与正弦或余弦图像一致。弹簧振子的这种振动称为**简谐运动 (simple harmonic motion)**。简谐运动是最简单、最基本的振动。一切复杂的振动都可以看作是由若干个不同的简谐运动合成的。

STSE

钢琴弹奏“中央 C”的振动比较复杂, 用声传感器获得的强度如图 2-4 (a) 所示。这种复杂的周期性运动包含了不同振幅和频率的简谐运动, 用“频谱分析”软件可以得到如图 2-4 (b) 所示的频谱图, 图中每一条直线代表“中央 C”这个音中相应的简谐运动的成分。

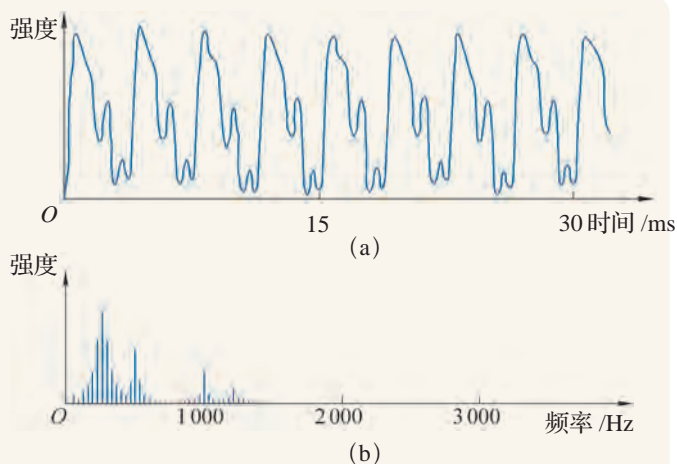


图 2-4 强度图像与频谱

振动物体在平衡位置两侧往复运动。在图 2-3 (a) 中, $OB = OC$ 。 OB 、 OC 的长度是振动物体离开平衡位置的最大距离, 称为**振幅 (amplitude)**, 用符号 A 表示, 单位是 m。

简谐运动是一种周期性运动。振动物体完成一次全振动所需的时间称为振动的**周期 (period)**, 用符号 T 表示。振动的周期反映振动的快慢; 周期越短, 振动越快。完成全振动的次数与所用时间之比称为振动的**频率 (frequency)**, 用符号 f 表示。频率也反映了振动的快慢; 频率越高, 振动越快。周期与频率的关系是

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

在国际单位制中, 周期 T 的单位是 s; 频率 f 的单位是赫兹, 符号是 Hz, $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$ 。简谐运动的位移与时间的关系式, 可以用余弦 (或正弦) 函数表示为

$$x = A \cos \left(\frac{2\pi}{T} t \right)$$

拓展视野

1610 年, 伽利略用他新制作的望远镜发现了木星的四颗主要卫星。经过数周的观察, 他发现似乎每颗卫星都在相对于木星做简谐运动, 木星则处在卫星运动的中心点。而实际上木星的卫星绕木星运动的规律接近匀速圆周运动。这一现象反映了简谐运动和匀速圆周运动之间的紧密联系。

根据数学中的单位圆与余弦函数的知识, 我们能得出做匀速圆周运动物体在同一条直径上的投影的运动是简谐运动的结论。

如图 2-5 所示, 某质点沿逆时针方向做半径为 A 、周期为 T 的匀速圆周运动。 $t=0$ 时, 质点位于 P 处, 其在过圆心的 x 轴上的投影点为 M_0 , 经过时间 t , 质点运动到 P' 处, 其投影点 M 的坐标 x 与时间 t 的函数关系可表示为

$$x = A \cos \left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi \right)$$

可见, 投影点 M 沿 x 轴做简谐运动。质点沿圆周运动一周, 其投影点恰好在 x 轴上由 M_0 经 O 、 B 、 C 再回到 M_0 , 完成一

次全振动。在图 2-5 中, OP' 与 x 轴正方向间的夹角 $\Phi = \frac{2\pi}{T} t + \varphi$, 称为振动的相位, 与物体

的振动状态直接对应, 其中, φ 是 $t=0$ 时的相位, 称为初相位。例如, 当相位 $\Phi = \frac{\pi}{3}$ 时, 根

据图 2-5 可知, M 位于 $x = \frac{1}{2} A$ 处, 且向着 x 轴的负方向运动。可见, 相位是描述投影点 M

运动状态的物理量。如果两个简谐运动的相位不同, 则它们的运动状态将不一致, 可以用它们的相位之差 $\Delta \Phi$ (称为相位差) 来描述其振动状态的差异。例如, 两个周期相等的简谐运动之间的相位差 $\Delta \Phi$ 就是它们的初相位差 $\Delta \varphi$ 。当 $\Delta \varphi$ 等于 π 的奇数倍时, 两者运动的步调正好相反。同理, 当 $\Delta \varphi$ 等于 0 或 2π 的整数倍时, 两者同步振动, 任意时刻的振动状态均相同。

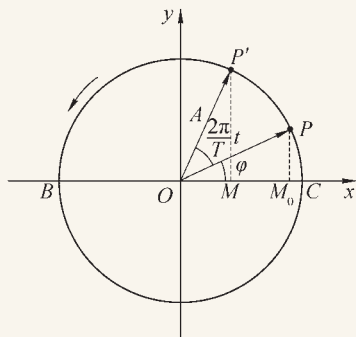


图 2-5 简谐运动与匀速圆周运动的关系图

问题与思考

- 小朋友在水平地面上拍皮球，皮球上上下下往复运动。皮球的运动是不是简谐运动？
- 图 2-6 所示是某质点做简谐运动的 $x-t$ 图像。根据图像中的信息回答下列问题。
 - 该质点做简谐运动的振幅为多大？周期为多少？
 - 在 1.5 s 时刻和 2.5 s 时刻，质点的位置在哪里？
 - 在 1.5 s 时刻和 2.5 s 时刻，质点分别向哪个方向运动？

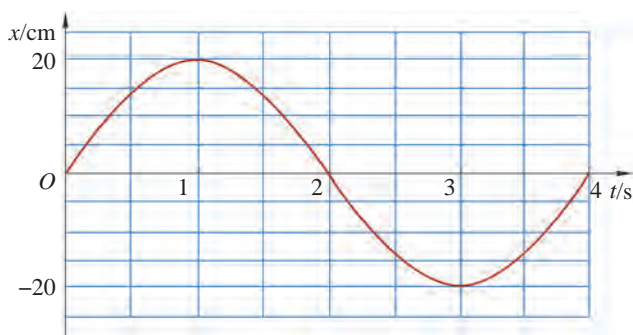


图 2-6

- 一个质点在平衡位置 O 点附近做简谐运动。若从过 O 点开始计时，经过 6 s 小球第一次经过 M 点，再继续运动，又经过 2 s 它第二次经过 M 点。该小球做简谐运动的周期可能是多少？
- 甲、乙两个弹簧振子均做简谐运动：甲的振幅为 4 cm，乙的振幅为 2 cm，它们的周期都是 2 s。当 $t = 0$ 时，甲的位移为 4 cm；乙的位移为 -2 cm。图 2-7 所示为甲的振动图像，试在图中画出乙的振动图像（画出一个周期）。

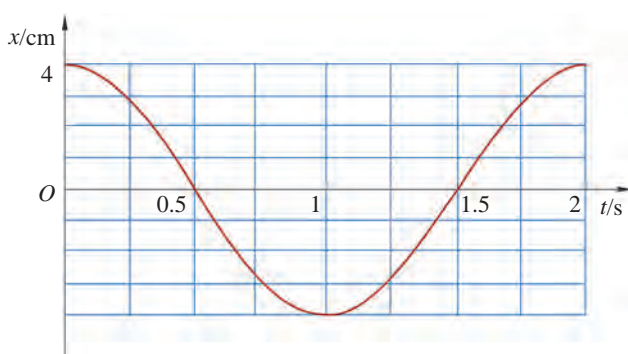


图 2-7

- 甲、乙两弹簧振子的振动图像如图 2-8 所示，写出甲、乙两弹簧振子简谐运动的位移随时间变化的关系式。

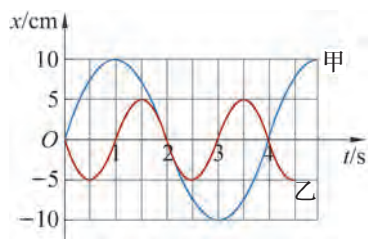


图 2-8

6. 某同学为了探究弹簧振子的振动周期 T 与振子质量 m 间的关系，用天平测量弹簧振子的质量，用光电门传感器测量弹簧振子的振动周期 T ，测得的实验数据如表 2-1 所示，根据实验数据画出如图 2-9 所示的图像。如何设置坐标可使实验数据在坐标系中描出的点分布在一条过原点的直线上？写出周期 T 与振子质量 m 间的函数关系。

表 2-1

实验序号	振子质量 m/kg	周期 T/s
1	0.10	0.14
2	0.20	0.20
3	0.40	0.28
4	0.60	0.35
5	0.80	0.40

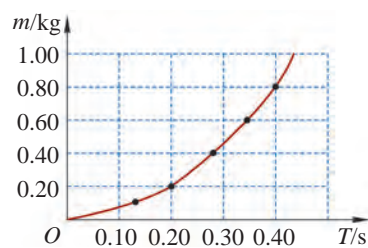


图 2-9

第二节 简谐运动的回复力和能量

弹簧振子沿 x 轴做简谐运动，小球的位移与时间的关系 $x = A\cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right)$ 比我们以前学过的各类运动都要复杂。小球为什么会如此运动？由牛顿运动定律可知，小球的运动一定与其受力有关。

► 回复力

以图 2-10 所示的弹簧振子为例，把不受弹力作用的平衡位置作为坐标原点 O ，水平向右为正方向建立 x 轴。在振动的全过程中，除了平衡位置外，小球始终受到弹簧弹力 F 的作用。小球在平衡位置右侧时，位移 x 为正，弹力 F 沿着 x 轴负方向；小球在平衡位置左侧时，位移 x 为负，弹力 F 沿着 x 轴正方向；可见弹力总是与位移方向相反，总是指向平衡位置。小球位移 x 的大小即为弹簧的形变量，根据胡克定律，在任意位置，小球所受弹力 F 为

$$F = -kx$$

式中 k 是弹簧的劲度系数。小球在弹簧弹力的作用下，在平衡位置两侧做简谐运动。

我们把振动物体受到的总是指向平衡位置的力称为**回复力 (restoring force)**。物体在运动方向上只受回复力的作用，且回复力与偏离平衡位置的位移大小成正比，该物体一定做简谐运动。

示例 如图 2-11 所示的频闪照片显示了弹簧振子在半个周期中 7 个时刻的位置。为了便于观察，①~⑦间弹簧的像已经做了处理。位置①和位置⑦分别为弹簧拉伸和压缩形变最大的位置，频闪时间间隔为 0.1 s，照片与实际长度之比为 1:4。



图 2-11 某弹簧振子运动的位置

- (1) 根据照片确定此弹簧振子做简谐运动的振幅、周期和频率。
- (2) 定性分析弹簧振子中的振动物体从位置①到位置⑦过程中回复力和速度的变化。

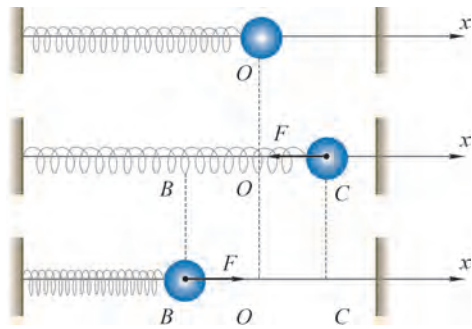


图 2-10 弹簧振子受力分析

分析：由半个周期内弹簧拉伸形变最大位置与压缩形变最大位置可得弹簧振子做简谐运动的振幅大小。根据半个周期中频闪的次数和频闪的时间间隔可得简谐运动的周期和频率。由于频闪时间间隔恒定，根据照片上相邻两个位置之间的距离就能近似反映弹簧振子中振动物体在该位置附近的速度大小。根据弹簧的形变量可以判断物体所受回复力的情况。

解：(1) 位置①是拉伸形变最大的位置，相隔半个周期的位置⑦就是压缩形变最大的位置，利用刻度尺量出照片中位置①与位置⑦中心的距离约为 4.4 cm，考虑到照片与实际长度之比为 1:4，可知两者的实际距离约为 17.6 cm，所以该弹簧振子做简谐运动的振幅 $A \approx 8.8 \text{ cm}$ 。

半个周期内，频闪摄影所经历的时间为 $0.1 \text{ s} \times 6 = 0.6 \text{ s}$ 。所以，运动的周期 $T = 1.2 \text{ s}$ ，频率

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{1.2} \text{ Hz} \approx 0.83 \text{ Hz}$$

(2) 从图片上可以看出，在相等时间间隔内，弹簧振子经过的位移不同，从位置①到位置⑦，弹簧振子先加速后减速。位置①和位置⑦离平衡位置最远，在这两处物体的速度为 0。根据简谐运动中回复力和位移的关系，物体受到的回复力与其偏离平衡位置的位移大小成正比，在位置①回复力最大，方向向右；从位置①到位置④，随着物体位置的变化，回复力逐渐减小，到位置④时回复力为 0；随后回复力方向向左，且逐渐增大，到位置⑦时，又达到最大。从位置①到位置④，回复力方向与运动方向相同，速度增大；从位置④到位置⑦，回复力方向与运动方向相反，速度减小。

拓展视野

如图 2-12 所示，沿半径为 A 的圆周，做匀速圆周运动的质点在 x 轴上的投影点 M 沿 x 轴做简谐运动。 $t=0$ 时，质点位于 C 处； t 时刻，质点位于 D 处，其投影点 M 所受的回复力大小等于质点受到的向心力在 x 轴上的投影。

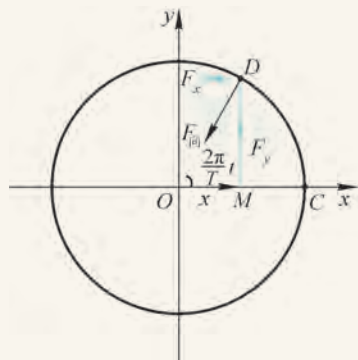


图 2-12 简谐运动与圆周运动的关系

$$F_{\text{回}} = F_x = F_n \cos \left(\frac{2\pi}{T} t \right)$$

$$F_{\text{回}} = -m \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 A \cos \left(\frac{2\pi}{T} t \right) = -m \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 x = -kx$$

式中 m 为质量， T 为周期。由上式可得常数 $k = m \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2$ ，则简谐运动物体的周期 $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$ 。

根据弹簧振子中小球受到的回复力与其位移的关系可知，对弹簧振子来说， k 即为弹簧的劲度系数， m 为小球的质量。可见，弹簧振子做简谐运动的周期仅与小球的质量、弹簧的劲度系数有关，即由弹簧振子本身决定，与其他因素如振幅无关，称为弹簧振子的固有周期。

► 简谐运动中的能量

弹簧振子的动能与速度有关，势能与弹簧的形变量即位移的大小有关。简谐运动的过程中，弹簧振子的速度和位移时刻变化。弹簧振子动能和势能也在不断变化。

自主活动

分析半个周期内弹簧振子的动能、势能是如何变化的，填入表 2-2。

表 2-2 弹簧振子做简谐运动过程中动能、势能的变化（参考图 2-10）

小球位置	位移	弹性势能	速度	动能
C	最大	最大	0	0
$C \rightarrow O$	减小	减小	增大	增大
O				

在上述过程中，弹簧弹力对动能与弹性势能的相互转化起到了什么作用？

可以看出，弹簧振子做简谐运动的过程中，弹力做功引起动能与弹性势能相互转化。由于只有弹力做功，机械能守恒。弹簧振子的机械能既等于它处于平衡位置时的动能也等于它在最大位移处的弹性势能，振幅反映了弹簧振子机械能的大小。

问题与思考

1. 观察弹簧振子的振动过程，运用牛顿运动定律分析一次全振动的过程中振子所受的回复力、振子的位移、速度、加速度是如何变化的？把分析结论填在表 2-3 中，归纳速度、加速度随位移变化的规律。

表 2-3

小球位置	位移	回复力	加速度	速度
C	向右 最大			0
$C \rightarrow O$	向右 减小	向左 减小	向左 减小	向左 增大

2. 如图 2-13 所示为某质点沿 x 轴做简谐运动的振动图像, 根据图像回答下列问题。

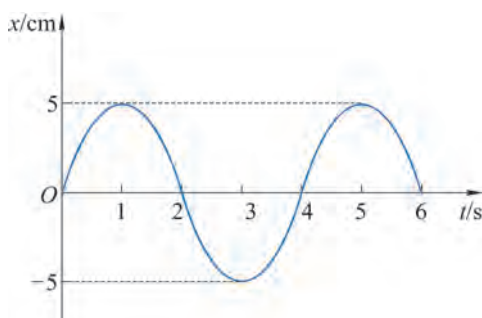


图 2-13

- (1) 在图中哪段时间内质点相对平衡位置的位移方向沿 x 轴的正方向?
 - (2) 质点在任意 4 s 内的路程是否相同? 若相同是多少? 若不同试说明理由。
 - (3) 图中质点在哪些时间内位移方向与瞬时速度的方向相同? 在哪些时间内位移方向与瞬时速度的方向相反?
 - (4) 在图中哪段时间内质点受到的回复力方向沿 x 轴正方向?
3. 某弹簧振子中小球的质量为 0.2 kg, 当它运动到平衡位置左侧 2 cm 时, 受到的回复力为 4 N。求小球运动到平衡位置右侧 4 cm 时的加速度。

4. 如图 2-14 (a) 所示, 弹簧振子在水平方向做简谐运动, O 点为平衡位置, B 、 C 为两侧位移最大的位置。图 (b) 表示振动过程中弹簧振子在位置 O 的动能 E_k 、势能 E_p 和机械能 E 。试在图 (c) 和图 (d) 中画出弹簧振子经过位置 C 和 OB 间某一位置 D 的动能 E_k 、势能 E_p 及机械能 E 。

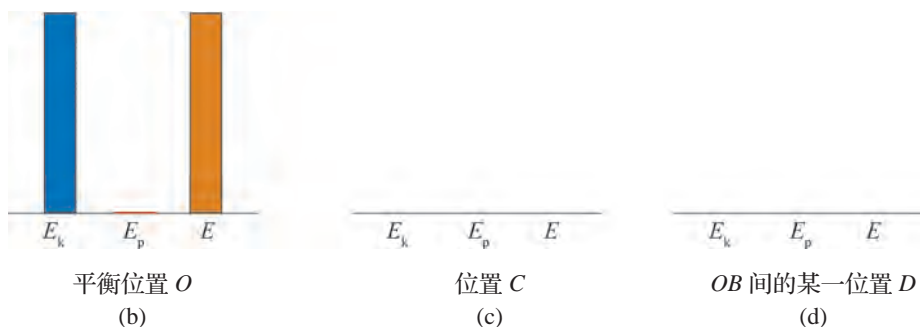
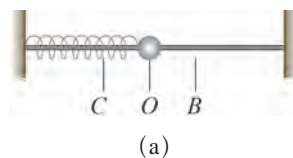


图 2-14

5. 由轻质弹簧和滑块构成的弹簧振子在光滑水平面上做简谐运动。有一小块黏土从高处竖直落下, 刚好落在滑块上, 随滑块一起振动。若黏土落到滑块上时, 滑块刚好位于最大位移处, 弹簧振子做简谐运动的振幅将保持不变, 试从能量的角度解释上述现象。

第三节 单摆

弹簧振子的振动是简谐运动的一个例子。如图 2-15 所示的“空中飞人”杂技演员的运动，其与秋千、钟摆在竖直平面内的运动类似，都周期性地在最低点附近来来回回地“摆动”。

为了研究摆动的规律，我们用细线下悬挂一个小球来近似表示上述所有的“摆”。

如果细线的质量与小球的质量相比可以忽略，小球的大小与细线的长度相比也可以忽略，这样的装置就称为单摆（**simple pendulum**）。单摆（图 2-16）也是一种物理模型。

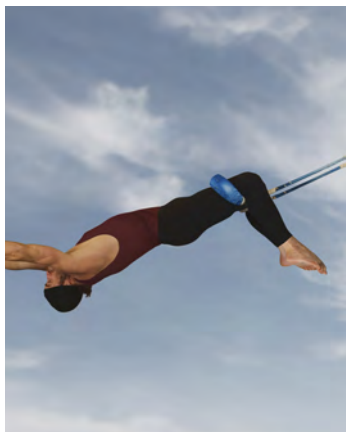


图 2-15 “空中飞人”

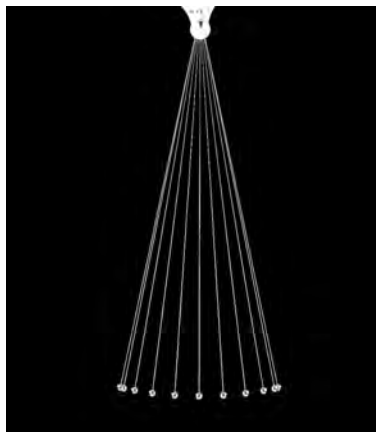


图 2-16 单摆

拓展视野

1851 年，傅科演示了一个摆长为 67 m、摆锤质量为 28 kg 的单摆——傅科摆的运动。傅科摆的摆动周期很大，能够持续摆动很长时间。摆锤下方是巨大的沙盘，每当摆锤经过沙盘，摆锤上的指针就会在沙上留下运动的轨迹。人们发现，在傅科摆摆动的过程中，摆动平面会缓慢地沿顺时针方向转动。这是由于在北半球地球沿逆时针方向转动的结果，这一现象有力地证明了地球在自转。傅科摆是人们在地球上证实地球自转的第一个实验。在北半球，傅科摆（图 2-17）的摆动平面顺时针转动；在南半球，傅科摆的摆动平面逆时针转动，且纬度越高，转动越快。

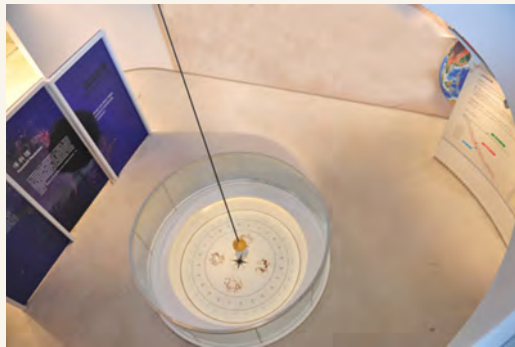


图 2-17 国家授时中心的傅科摆

► 单摆的振动图像

如图 2-18 (a) 所示, 将盛有细沙的漏斗吊在支架上, 支架下方放一块硬纸板, 漏斗静止时恰好位于直线 OO' 的正上方。沿垂直 OO' 的方向拉开漏斗, 使悬线以较小的角度偏离竖直方向, 释放漏斗后其在垂直于 OO' 的方向上自由摆动。漏斗摆动的同时沿着 OO' 的方向匀速拉动硬纸板。

每时每刻都会有细沙从漏斗中漏出落在硬纸板上, 硬纸板上细沙的分布反映了各个时刻漏斗的位置。盛有细沙的漏斗相当于单摆的摆球, 这条由细沙描绘的曲线显示了摆球的位置随时间变化的关系。将该曲线抽象为如图 2-18 (b) 所示的 $x-t$ 图像, 此图像与余弦函数的图像非常相似, 由此可以初步猜想单摆的摆动也是一种简谐运动。

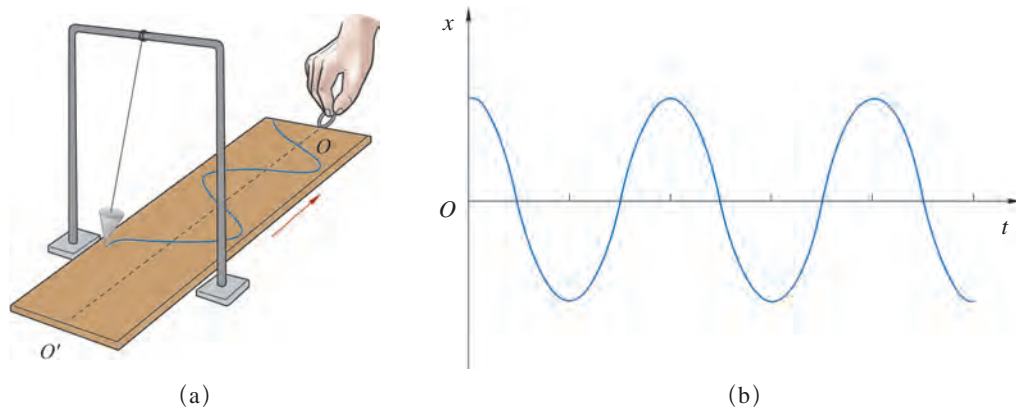


图 2-18 沙摆

► 单摆振动的原因

如图 2-19 所示, 将质量为 m 的摆球从平衡位置 O 拉到 B 点。放手后, 摆球在重力 G 和拉力 F_T 的作用下在 O 点两侧来回摆动。将重力 G 沿圆弧的切线和半径方向分解, 正是在重力沿圆弧切线方向的分力作用下, 摆球才能在竖直平面内沿圆弧 BC 往复运动。

摆球在任意位置所受重力沿切线方向分力的大小 $F = F_x = mg \sin \theta$, θ 为摆线与竖直方向的夹角^{*}。当摆角很小时, F 的方向近似指向平衡位置, 力 F 就是单摆的回复力; 此时摆球相对于 O 点的位移 x 的大小、摆角 θ 对应的弧长和弦长三者几乎相等。因此 $\sin \theta$ 近似等于位移 x 与摆长 l 的比值。单摆的回复力

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

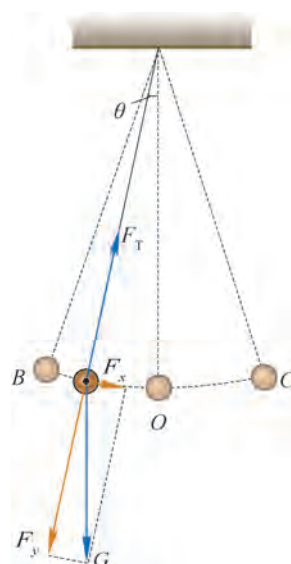


图 2-19 摆球的受力分析图

^{*} 如果 θ 很小, 且用弧度制表示, θ 与 $\sin \theta$ 的值近似相等; θ 所对应的弦长和弧长也近似相等。这时可近似认为摆球沿直线在平衡位置两侧振动。

在此近似下，单摆受到的回复力与其偏离平衡位置位移的大小成正比，方向始终指向平衡位置，符合简谐运动回复力的特征。由此可见，在摆角很小的情况下单摆的运动是一种简谐运动。

► 单摆做简谐运动的周期

1581年，伽利略观察了悬挂着的蜡烛架的摆动。他用自己的脉搏计时后发现，虽然蜡烛架摆动的幅度越来越小，但是每次摆动所用的时间却大致相等，摆动的周期与振幅无关，这就是摆的等时性。虽然不少科学家认为，这可能只是一个传说，但伽利略确实对摆进行了深入的研究。他设计了一个脉搏仪，用标准长度的单摆来测量患者的脉搏。

单摆做简谐运动的周期与哪些因素有关？如何验证你的猜想？

自主活动

利用光电门传感器、天平、刻度尺研究单摆的周期与摆球质量、摆长之间的关系。

利用光电门测量单摆的周期 T (图 2-20)、天平测量摆球的质量 m 、刻度尺测量摆长 l 。

保持摆长不变，研究单摆周期与摆球质量的关系。保持摆球质量不变，研究单摆周期与摆长的关系。

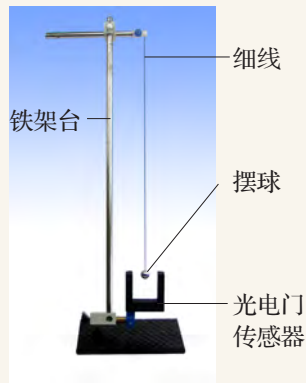


图 2-20 测单摆周期的实验装置示意图

通过上述实验我们发现，单摆做简谐运动的周期与摆球的质量无关，周期与摆长的二次方根成正比。

实际上，早在 17 世纪惠更斯就发现单摆做简谐运动的周期与摆长的二次方根成正比，与重力加速度的二次方根成反比，与振幅和摆球的质量无关，确定了单摆振动的周期公式

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

单摆的周期仅由摆长与当地的重力加速度大小决定，称为单摆的固有周期，相应的频率称为固有频率。

拓展视野

通过对弹簧振子做简谐运动的分析可知，其周期 $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ 。单摆做简谐运动的回复力 $F = -mg\frac{x}{l} = -kx$ ，将 $k = \frac{mg}{l}$ 代入即可得单摆小角度摆动时的周期 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 。

学生实验

用单摆测量重力加速度的大小

提出问题

重力加速度是一个重要的常量，地球上不同地点的重力加速度的大小不尽相同。如何通过实验测量重力加速度呢？

实验原理与方案

单摆的振动具有周期性，其周期与重力加速度的大小有关。当单摆做简谐运动时，其周期 T 与重力加速度 g 的关系为 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ ，式中 l 为摆长，则当地的重力加速度 $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$ 。

分别测量单摆的摆线长度和摆球直径，以及单摆做简谐运动的周期，可得重力加速度的大小。

实验装置与方法

实验装置如图 2-21 所示。

细线下端连接一个小球，上端固定。使小球在竖直平面内做简谐运动，用停表测量单摆做简谐运动的周期，用刻度尺测量悬挂状态下细线的长度，用游标卡尺测量小球的直径。

思考：如果没有游标卡尺，仅用刻度尺，如何比较准确地测量摆长？

实验操作与数据收集

将连接小球的细线上端固定在铁架台上，使之可自由摆动。

测量自由悬挂状态下细线的长度 l_0 和小球的直径 d ，摆长

$$l = l_0 + \frac{d}{2}。$$

使小球偏离平衡位置（摆角小于 5° ）并由静止释放做小角度摆动。

用停表测量单摆经过 30~60 次全振动的时间 t 。改变摆线的长度，重复几次实验。

将实验数据记录在表 2-4 中。

思考：为了尽量准确地测量周期，应以摆球位于最高点还是平衡位置的时刻作为计时的起点？为什么要测量 n 次全振动的时间？

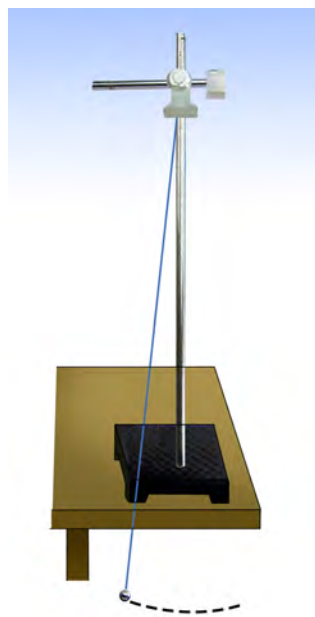


图 2-21 用单摆测量重力加速度的实验装置

表 2-4 数据记录表

小球直径 $d =$ _____, 单摆全振动次数 $n =$ _____

实验序号	摆线长度 l_0/m	n 次全振动的时间 t/s	摆长 l/m	周期 T/s
1				
2				
3				
4				
5				

数据分析

用图像法处理数据, 在图 2-22 的坐标系中选择合适的物理量作为横、纵坐标。在坐标系中描出数据点, 并据此画出相应的图像。使这些点近似分布在一条直线上。由直线的斜率可得重力加速度的测量值。

除了用图像法, 还可如何处理数据得到结果?

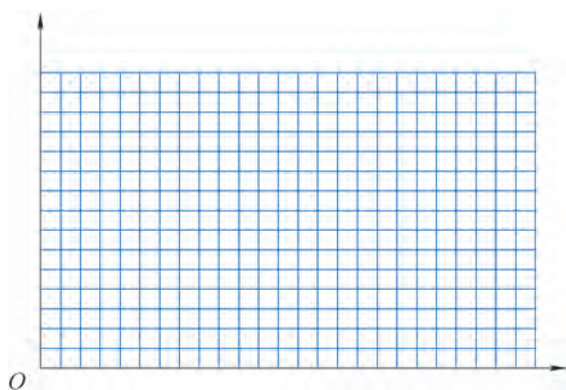


图 2-22 坐标图像

实验结论

本地的重力加速度 $g =$ _____ m/s^2 。

交流与讨论

交流各组测得的重力加速度值和数据处理方法, 讨论提高测量精度的措施。

问题与思考

1. 单摆与弹簧振子做简谐运动经过平衡位置时是否处于受力平衡的状态?
2. 做简谐运动的单摆, 在摆角增大的过程中, 摆球的速度和回复力的大小如何变化?

3. 如果在“用单摆测量重力加速度的大小”的实验中，将光电门传感器固定在摆动最低点来记录时间，图 2-23 所示为光电门传感器电流 I 与 t 的图像，分析单摆的周期与图中哪一段时间对应。
4. 某同学利用单摆测当地的重力加速度大小，他发现测得的重力加速度比当地的公认值大。试分析可能的原因。
5. 周期为 2 s 的单摆称为秒摆，秒摆的摆长约为 1 m。某同学观察到吊车缆绳下的物体从一侧最高位置摆到另一侧最高位置的时间约为 5 s。推测缆绳的大致长度，并说明推测的依据。
6. 在“用单摆测量重力加速度的大小”的实验中，若摆长为 l 的单摆完成 n 次全振动的总时间为 t ，单摆周期为多少？某同学测得多组摆长 l 和周期 T 的数据，得到如图 2-24 所示的图线，若直线的斜率为 k ，写出重力加速度 g 与斜率 k 的关系。

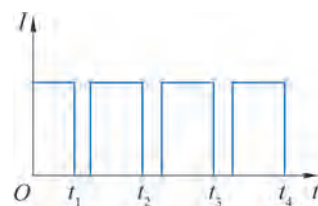


图 2-23

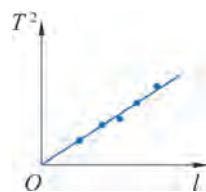


图 2-24

第四节 受迫振动 共振

弹簧振子的振动不可能永远持续下去。这是因为在振动的过程中总是存在各种阻力；振动系统不断克服阻力做功，机械能逐渐减小，振幅也不断减小，最后停止振动。振动系统所受的阻力越大，振幅减小得越快，如果阻力过大，振动将无法发生。

► 受迫振动

荡秋千时，想要秋千持续摆动，保持原来的最大高度，即保持秋千的振幅不变，需要小伙伴按照秋千摆动的节奏在合适的时机周期性地施加推力来维持。通过推力做功来补偿机械能的损耗。由此可见，为维持持续振动需要外力作用于振动系统，振动系统在周期性外力作用下的振动称为**受迫振动 (forced vibration)**。这种周期性的外力称为受迫振动的**驱动力 (driving force)**。

如图 2-25 所示，建筑工人正在用振捣器捣实混凝土。振捣器工作时，混凝土内部的颗粒发生受迫振动，颗粒间的空隙被砂浆填充，气泡被挤出，从而增加混凝土的强度。洗衣机运转时底座发生的振动、扬声器发声时纸盆的振动等都是受迫振动。

为保持物体的持续振动，需要利用驱动力适时地补充能量。物体受迫振动的规律与驱动力有何关系呢？



图 2-25 建筑工人用振捣器工作

自主活动

在如图 2-26 所示的装置中，弹簧振子悬挂在 O 点，匀速转动摇柄可使 O 点在竖直方向做周期性运动，带动弹簧振子在周期性驱动力的作用下做受迫振动。摇柄的转动周期即为驱动力的周期。

不转动摇柄，估测弹簧振子自由振动的振动周期（频率）。以不同转速匀速转动摇柄，估测弹簧振子受迫振动周期（频率），并分析其与自由振动周期（频率）、驱动力周期（频率）间是否有关。

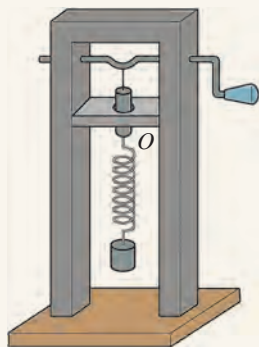


图 2-26 研究受迫振动的装置

大量实验表明，弹簧振子做受迫振动稳定后的频率总是等于驱动力的频率，与自由振动的频率无关。当驱动力的频率很低或很高时，振子的振幅均不大；当驱动力的频率接近弹簧振子自由振动的频率时，振幅会剧烈增大。

共振现象

调节驱动力的频率，将频率不同的驱动力先后作用于同一个振动系统，其做受迫振动的振幅 A 将随驱动力的频率 f 变化，如图 2-27 所示。

可以看出，当驱动力的频率 f 接近系统做自由振动的频率 f_0 （即为系统的固有频率）时，受迫振动的振幅剧烈增大，这种现象称为共振（resonance）。

弹簧振子系统在驱动力的作用下会发生共振。单摆在驱动力的作用下是否也会发生共振？

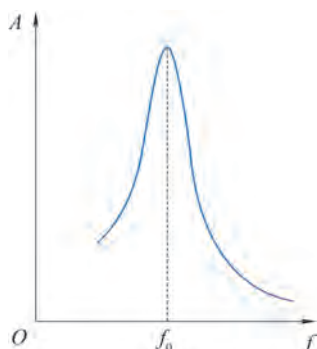


图 2-27 受迫振动振幅 A 与驱动力频率 f 的关系

自主活动

如图 2-28 所示，在一根张紧的弹性绳上悬挂四个摆，其中 A 摆和 C 摆的摆长相等。 A 摆开始振动后，通过弹性绳使 B 摆、 C 摆、 D 摆也振动起来。

B 摆、 C 摆、 D 摆做什么振动？它们振动的频率是否相等？哪个摆的振幅最大？为什么？

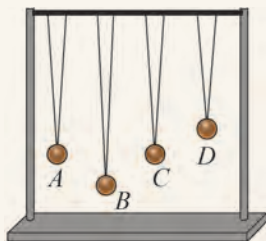


图 2-28 观察摆的受迫振动及共振装置

实验表明，与 A 摆摆长相等的 C 摆振幅最大，即发生了共振。这一结果又一次表明，当驱动力频率与系统的固有频率接近时，会产生共振现象。

共振现象普遍存在于各个领域，《梦溪笔谈》中写道：“余友人家有一琵琶，置之虚室，以管色奏双调，琵琶弦辄有声应之，奏他调则不应，宝之以为异物，殊不知此乃常理。”琵琶琴弦自动应和管乐之音的现象其实就是因为管乐声波的振动引起了琵琶的共振。

微波炉加热就是一个生活中利用电磁波共振加热的例子。食物中水分子的固有振动频率约为 $2\,500\text{ MHz}$ ，处于电磁波谱的“微波”波段。微波炉加热食品时，炉内产生很强的电磁场振荡，使食物中的水分子做受迫振动。由于电磁场驱动力频率与水分子的固有频率相近，水分子发生共振，将电磁辐射能转化为内能；从而使食物内部的温度迅速升高。微波加热是对物体内部的整体加热，极大地提高了加热效率，完全改变了人类传统的加热食物的方式。

核磁共振现象是原子核在外磁场作用下发生共振而吸收某一频率电磁波的物理过程。目前核磁共振成像（MRI）检查已成为一种常见的影像检查方式，在对大多数器官早期病

变的筛查方面较其他检查手段有其特定的优势,并且这种检查技术由于没有放射性,不会对人体健康产生影响。

事物都具有两面性。在某些情况下,共振也可能造成损害。

机床加工需要很高的精度,机床运转时会产生周期性的驱动力。若造成共振,振幅过大会降低加工质量,缩短机床的使用寿命。因此,在设计机床和放置机床的厂房时都要考虑共振的影响。

总之,利用共振时应使驱动力的频率接近振动物体的固有频率;防止共振时应使驱动力的频率远离振动物体的固有频率。

问题与思考

1. 如图 2-29 所示, A、B 是两个完全相同的音叉, 将它们的共鸣箱相对放置, 敲击音叉 A 后迅速用手捂住它, 使它停止振动。此时, 是否还能听到音叉振动发出的声音? 为什么?

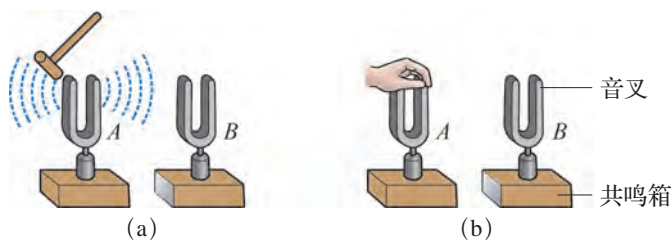


图 2-29

2. 说一说, 生活中还有哪些利用和防止共振的实例。
3. 如图 2-30 所示的装置, 弹簧振子的固有频率是 4 Hz。现匀速转动摇柄, 给弹簧振子以周期性的驱动力。某同学分析得到弹簧振子振动达到稳定时的频率为 1 Hz, 由此推测摇柄转动的频率是多少。
4. 表 2-5 记录了某受迫振动的振幅随驱动力频率变化的关系, 分析该振动系统的固有频率 $f_{\text{固}}$ 约为多少?

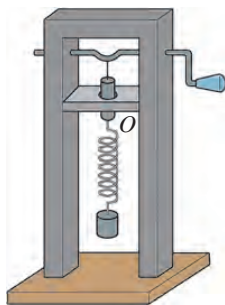


图 2-30

表 2-5

驱动力频率 $f_{\text{驱}}/\text{Hz}$	30	40	50	60	70	80
受迫振动振幅 A/cm	10.20	16.80	27.20	28.10	16.50	8.30

5. 在某些道路上安装了若干条突起于路面且与行驶方向垂直的减速带, 当车辆经过减速带时会产生振动。假如减速带间距为 10 m, 汽车的固有频率为 1.25 Hz, 车辆以多大的速度行驶在此减速区时颠簸得最厉害?

小结

• 基本概念和基本规律

机械振动：物体在某一位置附近的往复运动。

简谐运动：质点相对平衡位置的位移与时间关系遵从余弦函数（或正弦函数）规律的振动。

振幅：振动物体离开平衡位置的最大距离，用符号 A 表示。

周期：振动物体完成一次全振动所需的时间，用符号 T 表示。

频率：完成全振动的次数与所用时间之比，用符号 f 表示。

回复力：振动物体受到的总是指向平衡位置的力。做简谐运动物体所受的回复力与相对平衡位置的位移大小成正比，方向相反。

单摆做简谐运动的周期：与摆球的质量和振幅无关，周期与摆长的二次方根成正比，与重力加速度的二次方根成反比。

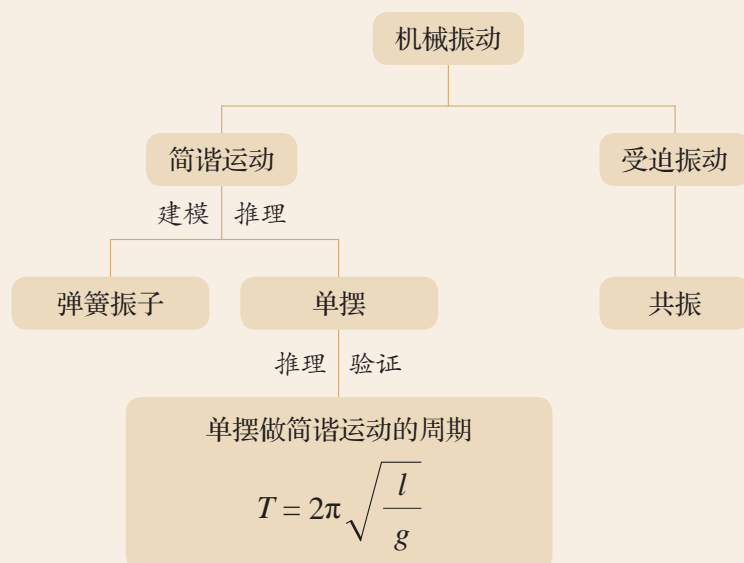
共振：当驱动力的频率 f 接近系统做自由振动的频率 f_0 时，受迫振动的物体振幅剧烈增大的现象。

• 基本方法

经历形成简谐运动概念和建立弹簧振子、单摆模型的过程，感受抽象与建模的方法。

通过实验数据的分析、解释过程，认识将实验数据线性化处理的思想与方法。

• 知识结构图



复习与巩固

1. 说说机械振动的运动特征。如图 2-31 所示为某质点运动的位移 x 与时间 t 的关系, 判断该质点是否在做机械振动, 为什么?

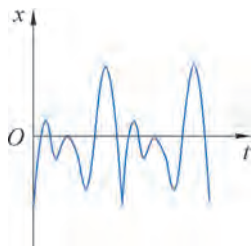


图 2-31

2. 某简谐运动的振幅为 4 cm, 振动物体在 1.0 s 内通过的路程为 36 m, 则简谐运动的频率是多少?

3. 某弹簧振子做简谐运动, 振动物体先后以相同速度通过相距 1.0 cm 的 A、B 两点, 历时 0.2 s, 再从 B 点回到 A 点的最短时间为 0.4 s。弹簧振子的平衡位置在何处, 其运动周期及频率为多少?

4. 甲、乙两个人先后观察同一弹簧振子在水平面内左右振动情况。已知弹簧振子的振幅为 5 cm, 周期为 2 s。设平衡位置右方为 x 轴正方向, 作 $x-t$ 坐标如图 2-32 (a)、(b) 所示, 时间轴上每格代表 0.5 s。则:

(1) 甲开始观察时, 振动物体正好在平衡位置且向右运动, 试在图 (a) 中画出甲观察到的弹簧振子的振动图像。

(2) 乙在甲观察 3.5 s 后开始观察并计时, 试在图 (b) 中画出乙观察到的弹簧振子的振动图像。

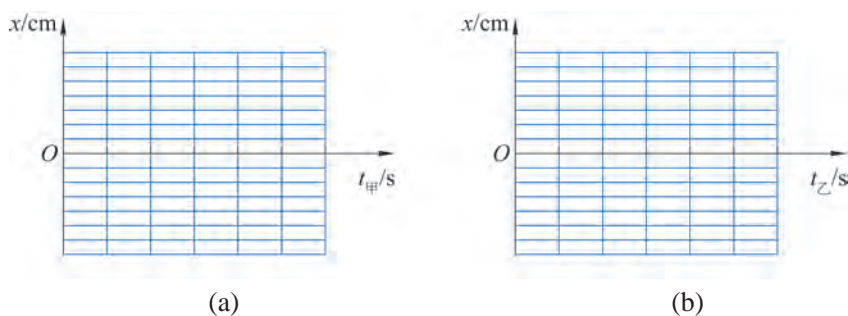


图 2-32

5. 如图 2-33 所示为某人的心电图。如果心电图仪卷动纸带的速度为 0.3 m/min, 图中每小格的宽度为 1 mm, 则由此可估算出此人的心率为多少?



图 2-33

6. 某单摆在地球上摆动振幅为 A 时, 周期为 T 。当把该单摆放在月球上以 $\frac{1}{2}A$ 的振幅摆动时, 周期变为多少? (月球的重力加速度大约是地球的 $\frac{1}{6}$)

7. 某弹簧振子在水平方向做简谐运动, 以水平向右为位移正方向, 振子中的小球沿振动方向运动的最大位移为 20 cm, 小球在 2 s 内完成了 10 次全振动。若从小球经过平衡位置时开始计时, 经过 $\frac{1}{4}$

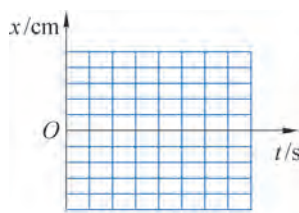


图 2-34

周期小球有正向最大加速度。则:

- (1) 弹簧振子做简谐运动的振幅和周期为多少?
 - (2) 在图 2-34 中画出小球的位移 - 时间图像。
 - (3) 写出小球的位移 - 时间关系式。
8. 一个做简谐运动的弹簧振子, 当 $t=0$ 时小球位于平衡位置。试分别画出弹簧振子的机械能、动能随时间变化的大致图像 (一个周期)。
9. 一位天文学家带着一个摆钟到赤道地区进行天文观测。这个摆钟在启程时调得非常准确, 但到了赤道地区后, 摆钟却每昼夜慢 2 min。于是他调整摆长, 使其恢复准确。当他将摆钟带回出发地时, 发现钟又走快了。试对上述事实做出合理的解释。
10. 如图 2-35 所示, 装有砂粒的试管竖直浮于水面上静止。将试管竖直提起少许后由静止释放, 可以观察到试管上下振动。试判断这种振动是否为简谐运动, 表述论证的思路。

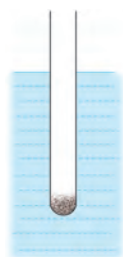


图 2-35

11. 将盛有细沙的漏斗吊在支架上, 支架下放一块硬纸板演示单摆摆动图像。甲、乙两同学分别得到两个摆中的细沙在各自木板上形成的曲线 (图 2-36), 板上的直线 OO' 代表时间轴, 板上的曲线显示出摆的位移随时间变化的关系。甲和乙拉动硬纸板的速度分别为 v_1 和 v_2 , 且 $v_2=2v_1$, 根据曲线推测两个摆的振动周期 T_1 和 T_2 的大小关系。

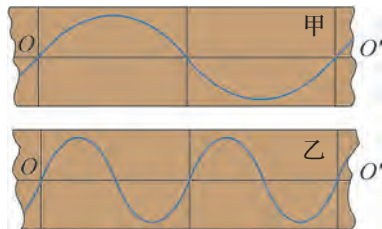


图 2-36

12. 某课外兴趣小组想做“用单摆测量当地重力加速度的大小”的实验研究。为使实验尽可能准确, 他们该如何选择摆球? 在实验中, 他们通过记录单摆振动 n 次所用的时间 t 获得了单摆的周期 T , 多次改变摆长, 测得多组周期 T 与摆长 l 的数据, 并据此画出 T^2-l 图像, 通过计算获得重力加速度大小。试问, 如果摆球选择不合适, 或者摆长测量有误, 会对实验结果产生怎样的影响? 为何要用 T^2-l 图像来处理实验数据?

第三章

机械波

人与人之间的交往、人与外部世界之间的交流，都和我们周围无处不在的各种波密切相关，例如，人们依靠声波来交谈。波动现象在自然界中普遍存在，有我们熟悉的水波、声波、地震波、无线电波；也有来自宇宙深处的电磁波、引力波；甚至微观粒子如电子、质子、中子也具有波动的性质。目前，波的应用已深入到生产、生活的方方面面。我们用光波照明，用无线电波通信，用超声波与 X 射线探测物体（包括人体）内部，用电磁波探寻宇宙的奥秘，用微观粒子的波动性研究物质的结构，等等。

在初中阶段我们已经学习过声波的知识，上一章又学习了机械振动。在本章中，将认识波的特征，理解波长、频率和波速的关系；知道波的反射、折射，了解波的干涉、衍射现象；认识多普勒效应；运用图像来描述横波。在学习中，基于事实建构机械波模型；用叠加的思想解释波的干涉现象。本章的学习有助于提升相互作用和能量的观念、发展科学思维能力。本章也是学习光的波动性和电磁波的基础。

第一节 机械波的形成和传播

我们的耳朵能听到各种声音是声波作用于耳膜的结果；医疗检查中的“B超”利用了超声波的特性；石子投入平静的水面后漾起的阵阵涟漪（图 3-1）和艺术体操运动员舞动丝带产生的一个个美丽螺旋也都是特殊的波。这些波都是振动在介质中的传播。



图 3-1 水面的涟漪

► 机械波

物理学中，把机械振动在介质中的传播称为**机械波（mechanical wave）**。能够传播机械波的物质（如空气和水等）称为介质。

如图 3-2 所示，弹性绳的一端固定，手持另一端连续上下振动。可以看到振动状态沿绳传播，形成了一列波。



图 3-2 绳波示意图

这列波由左向右沿绳传播，系在绳上的小铃铛也随之上下振动，但却没有随波移动。这说明，波传播了振动的运动形式和能量，而介质本身并没有随波迁移。

自主活动

如图 3-3 所示，软木塞漂浮在水槽内平静的水面上，手指在水槽另一端周期性地上下振动碰触水面。

观察水面的变化和软木塞的运动情况。结合实验现象，从物理学的角度说一说成语“随波逐流”是否恰当？

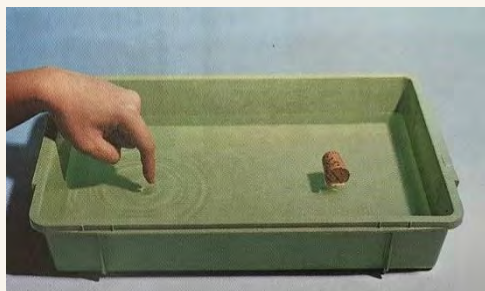


图 3-3 手指碰触水面形成水波

实验发现，当水波到达软木塞时，软木塞大致在上下运动，但并没有随水波在水平方向的传播而随波迁移。

► 机械波的形成和传播

把绳波实验中的弹性绳分成一个个小段来分析，每一小段都简化为一个质点。这些质点间具有相互作用。当外力使第一个质点以一定规律开始运动时，它相对相邻的第二个质点发生了运动，第二个质点将也在弹性力的作用下开始运动；同样，第二个质点的运动又将依次引起第三、第四等较远质点的运动，从而形成了机械波。

由此可见，形成机械波必须要有两个条件：一要有做机械振动的物体——波源，二要有能够传播机械振动的介质。

自主活动

在图 3-4 中用红点表示组成绳子的一个个质点，小弹簧表示质点间存在弹性相互作用，箭头表示质点的运动方向。 T 是波源做简谐运动的周期，图中已画出了 $t=0$ 、 $t=\frac{1}{4}T$ 、 $t=\frac{1}{2}T$ 时刻的波形。根据对绳波实验的观察，画出绳波在 $t=\frac{3}{4}T$ 、 $t=T$ 和 $t=\frac{5}{4}T$ 时刻的波形。

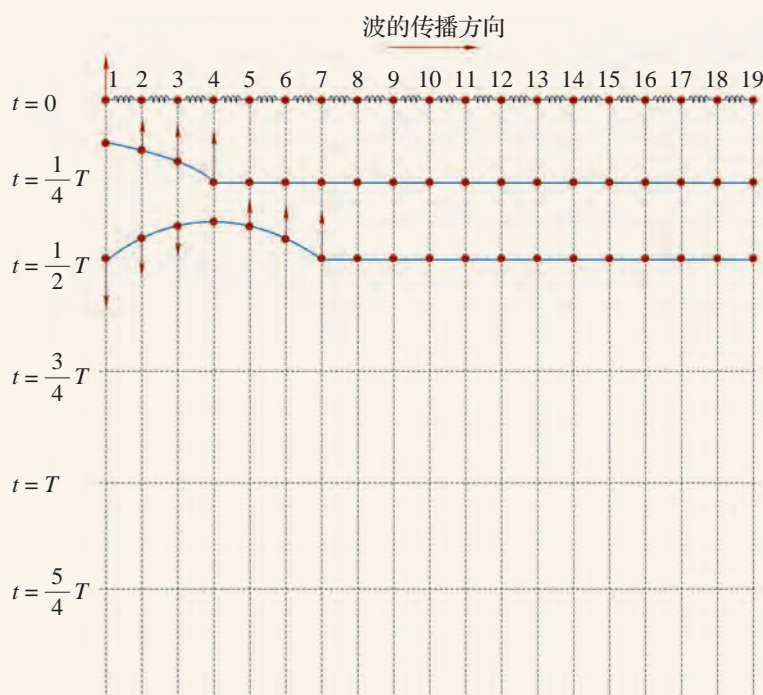


图 3-4 绳波在不同时刻的波形

由活动可知，远处的质点总比近处的质点迟一些开始振动。振动的形式和能量沿着绳传递出去，形成了绳上由近及远、凹凸相间的波。绳子在某一时刻的形状称为波形。绳子上每一个质点的运动情况都与波源相同，只是时间上由近及远相应滞后。

大家谈

在绳波实验中，波源连续振动会形成凹凸相间的连续波形。假使实验时手持绳端仅振动一个周期或半个周期，会观察到怎样的现象？

► 横波和纵波

当波沿绳子传播时，绳子中各质点的振动方向和波的传播方向互相垂直。我们把介质中质点的振动方向与波的传播方向垂直的波称为**横波 (transverse wave)**。横波中，凸起部分的最高点称为波峰，下凹部分的最低点称为波谷。

质点的振动方向和波的传播方向是否也可能在同一直线上呢？

把轻弹簧用细线水平悬挂起来，如图 3-5 (a) 所示。用手左右有规律地拉动、挤压弹簧的一端，弹簧与手接触的相邻部分受到周期性的拉伸与压缩，一会变疏，一会变密，这种疏密相间的状态沿弹簧自左向右传播，形成了一系列疏密相间的波，如图 3-5 (b) 所示。此时，弹簧就成为波传播的介质。介质中的质点左右振动，疏密波由左向右传播，介质中质点的振动方向与波的传播方向在同一直线上。这样的波称为**纵波 (longitudinal wave)**。质点分布最密的位置称为密部，质点分布最疏的位置称为疏部。

声波就是纵波，它不仅能在空气中传播，也能在液体、固体中传播。

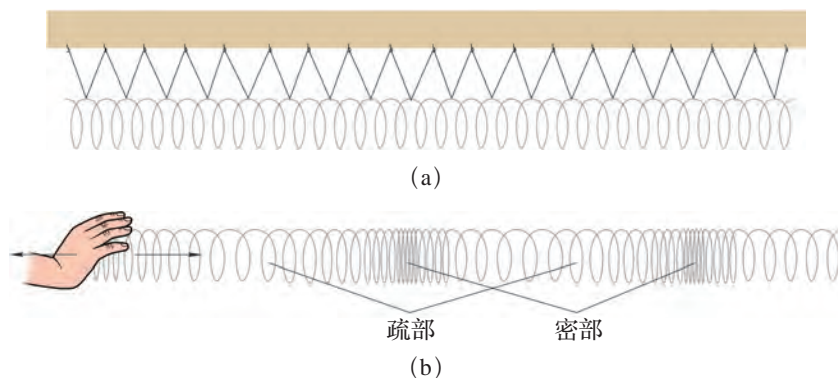


图 3-5 纵波实验示意图

STSE

地震又称地动、地振动，是地壳发生突然破裂和错动时释放的能量以地震波的形式向四周辐射的自然现象。地震波是机械波。地震发生时，从震源同时发出横波 (S 波) 和纵波 (P 波)。P 波造成的震动小，S 波导致的震动大，而 P 波的传播速度比 S 波快得多。利用地震波的这一特性，当探测仪器感应到 P 波时，可对地震的破坏范围和破坏程度进行快速评估，在 S 波到达前几秒至数十秒发出预警。我国的地震预警网在平均响应时间、震级偏差等关键核心技术上处于世界领先水平。

问题与思考

1. 平静的湖面上漂浮着几片树叶，一块小石子从桥面竖直落在湖面上激起了一圈圈水波，小石子的落水处位于树叶的左侧。试简述此后波的传播及树叶的运动情况。
2. 手持长绳的一端不停地上下振动，在长绳上形成一系列横波。描述当手停止运动后绳上的波形。
3. 如图 3-6 所示，把金属链条上端的小环挂在铁架台上横杆 A 的端点附近，用手握住链条下端。在手不能碰到阻挡物 B 的情况下，你能够使小环从铁架上脱落吗？试一试，如果成功了，说说你是怎样使小环脱落的。

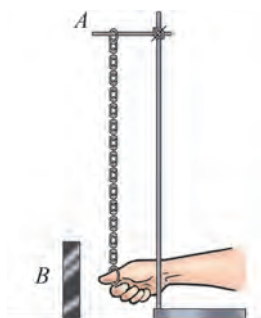


图 3-6

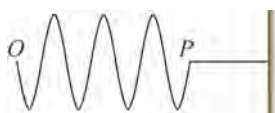
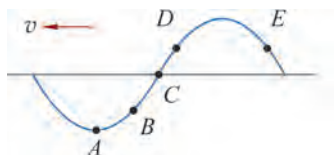
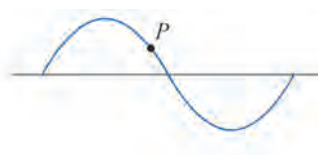


图 3-7

4. 如图 3-7 所示是振源 O 振动形成的机械波沿水平绳传播到质点 P 时，在绳上形成的波形图。试问：
 - (1) 振源 O 刚开始向什么方向振动？你是如何判断的？
 - (2) 在绳上传播的波是横波还是纵波？为什么？
5. 水平绳的一端在外界作用下上下做简谐运动，形成了如图 3-8 所示沿绳子传播的横波。则：
 - (1) 在图 (a) 中，根据波传播的方向标出质点 A、B、C、D、E 此刻的速度方向，并指出哪些质点的速度将越来越大。
 - (2) 在图 (b) 中，质点 P 的速度方向向下，在图中标出表示波传播方向的箭头。



(a)



(b)

图 3-8

第二节 机械波的描述

无论探测水下潜艇位置的声呐，或是用于医疗诊断的B超；还是监测地震的设备，它们的工作原理都与波的特性有关。

波在介质中传播时，不同位置的质点都在振动。波是大量质点的集体运动，用振动图像分别描述每个质点的运动不仅繁琐，而且不能反映波的整体性质。波传播时，介质中不同位置质点的振动规律虽然相同，但彼此间的步调并不一致，某一时刻各质点相对平衡位置的位移在传播方向上具有空间周期性。是否可以用某一时刻介质中各质点在空间的分布规律描述波的特性呢？

波的图像

我们以横波为例。通过观察波在弹性绳中的传播，可以发现横波沿绳传播的过程中，绳的形状每时每刻都在变化，波峰与波谷互相间隔的波形由近及远地沿着绳传播。此时，若拍一张照片就能记录下该时刻的波形，如图3-9(a)、(b)所示。波形描述了某一时刻介质中所有质点的位置，即所有质点相对其平衡位置的位移，是介质运动的整体表现。

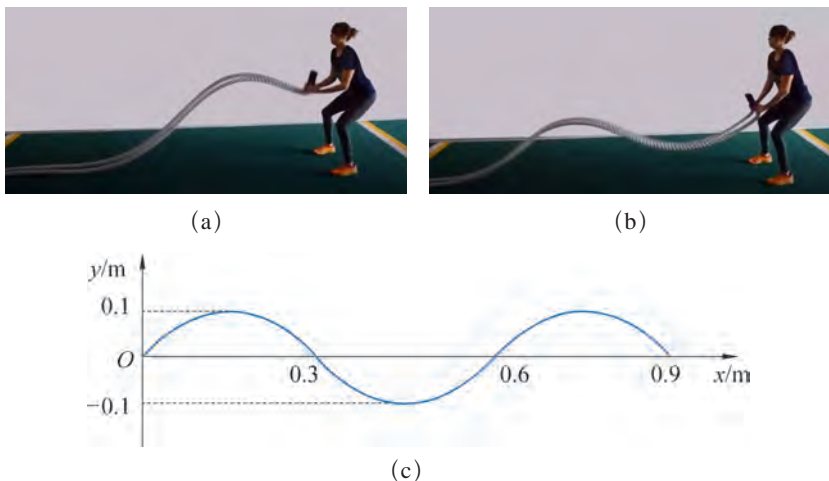


图3-9 绳波的波形与波形图

用横坐标 x 表示波的传播方向上各个质点的平衡位置坐标，用纵坐标 y 表示某时刻各质点相对平衡位置的位移，由此可得介质中各质点的位置坐标，这些点的集合就是这个时刻波的图像，称为波形图。图3-9(c)所示即为某时刻绳波的波形图。

当波沿某一方向传播时，后一时刻的波形可视为前一时刻的波形沿传播方向的平移，而平移的距离就是波在这两个时刻之间传播的距离。

描述波的物理量

当机械波在介质中沿某一确定方向传播时，由于介质中的质点都做与波源相同的振

动,各质点具有与波源相同的振幅、周期或频率。波源的振幅、周期或频率就是该波的振幅、周期或频率。波的周期是介质中任意一个质点完成一次全振动所需要的时间,用符号 T 表示,单位是秒 (s)。波的频率是介质中任意一个质点完成全振动的次数与所用时间之比,用符号 f 表示,单位是赫兹 (Hz)。周期和频率互为倒数,即 $T = \frac{1}{f}$ 。

如图 3-10 所示为一列横波在不同时刻的波形。1~19 为介质中间隔相等的质点。当质点 1 振动一个周期完成一次全振动时波刚好传到质点 13,质点 13 开始振动。此后两者的振动情况完全一致,它们在任意时刻相对平衡位置的位移和速度的大小和方向总是相同的。仔细观察还会发现,质点 2 与质点 14、质点 3 与质点 15 的振动完全相同,即每一个质点均能找到与其振动情况相同的质点。

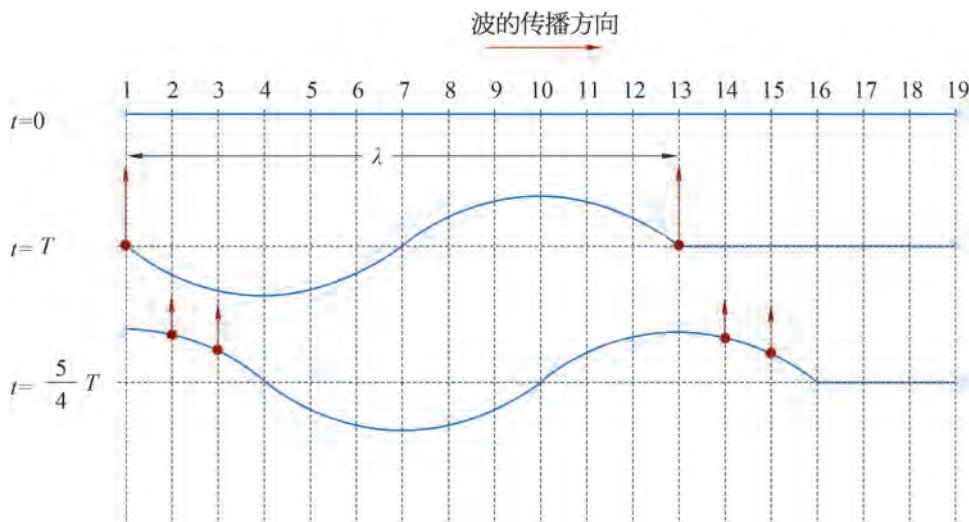


图 3-10 波形图中振动相同的质点

我们把振动在介质中经过一个周期 T 传播的距离称为**波长 (wave length)**,用符号 λ 表示,单位为米 (m)。

在一列波中,如果两个质点的平衡位置间的距离为一个波长,它们的振动情况总是相同的。对于横波,相邻波峰或者相邻波谷间的距离等于波长,如图 3-10 所示;对于纵波,相邻疏部或者相邻密部间的距离等于波长。

周期和波长分别描述了机械波在时间和空间上的周期性。

机械波在均匀介质中沿传播方向匀速传播,其传播速度称为**波速 (wave speed)**,用符号 v 表示。波速 $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$, Δx 是波传播的距离, Δt 是波传播距离 Δx 所需要的时间。

由于每经过一个周期振动在介质中的传播距离为一个波长,波速也可以表示为 $v = \frac{\lambda}{T}$ 或 $v = \lambda f$ 。

机械波的频率由波源决定,波速由介质决定,波源和介质共同决定了机械波的波长。

示例 开始计时时, $x=0$ 处的波源由平衡位置开始沿 y 方向振动, 产生的波沿着 x 轴的正方向传播。 $t_1=0.3\text{ s}$ 的波形如图 3-11 所示。求这列波的振幅 A 、波长 λ 、波速 v 、周期 T , 并画出 $t_2=0.5\text{ s}$ 时的波形。

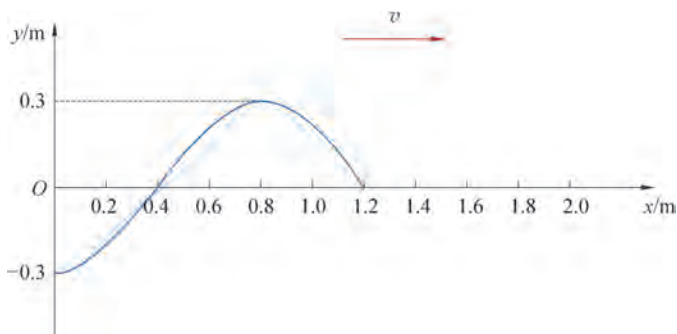


图 3-11 $t_1=0.3\text{ s}$ 时刻的波形图

分析: 从波形图获得振幅与波长的大小, 利用波长、波速、周期之间的关系可以得到其他所求的量。根据波的传播特点确定某时刻的波形。

解: 由图 3-11 可知, 这列波的振幅

$$A = 0.3\text{ m}$$

由于波经过 0.3 s 沿 x 轴正方向传播了 $\frac{3}{4}\lambda$, 历时 $\frac{3}{4}T$,

$$\text{则} \quad \frac{3}{4}\lambda = 1.2\text{ m}$$

$$\text{得} \quad \lambda = 1.6\text{ m}$$

$$\text{由} \quad \frac{3}{4}T = 0.3\text{ s}$$

$$\text{得} \quad T = 0.4\text{ s}$$

由 $v = \frac{\lambda}{T}$ 可知

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{1.6}{0.4}\text{ m/s} = 4\text{ m/s}$$

由上述计算可知, 波传播的过程中, 波形以 4 m/s 的速度沿着传播方向匀速平移。经过 $\Delta t =$

$$t_2 - t_1 = 0.5\text{ s} - 0.3\text{ s} = 0.2\text{ s}, \text{ 波向右传播的距离 } \Delta x = v\Delta t = 4 \times 0.2\text{ m} = 0.8\text{ m} = \frac{1}{2}\lambda.$$

所以, 波形向右传播了 $\frac{1}{2}\lambda$, 由此可得 $t_2=0.5\text{ s}$ 时的波形如图 3-12 所示。

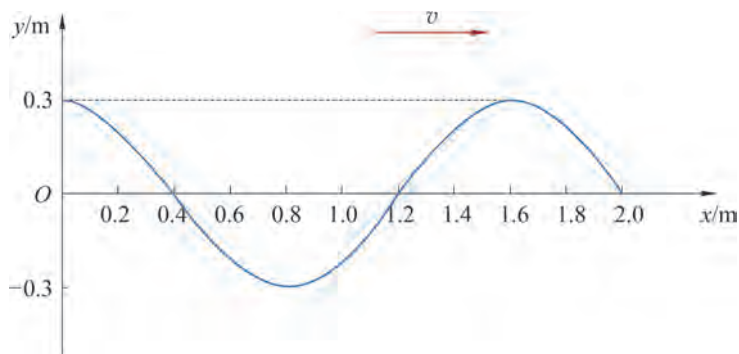


图 3-12 $t_2=0.5\text{ s}$ 时刻的波形图

大家谈

你能根据图 3-11 中的波形图确定波源的起振方向吗？在 0.3 s 和 0.5 s 两个时刻，0.8~1.2 m 间各个质点是远离平衡位置还是向着平衡位置方向运动？

问题与思考

1. 用手握住水平长绳一端以周期 T 连续上下抖动，形成沿绳传播的一列横波。如图 3-13 所示为某一时刻的波形。质点 a 处于波谷位置，质点 b 恰好位于平衡位置。若质点 a 、 b 开始振动的时刻分别为 t_1 、 t_2 ，则 $t_1 - t_2$ 为多少？
2. 空气中的声速小于水中的声速，声波由空气进入水中时波长如何变化？并说明理由。
3. 甲、乙两同学在讨论机械波的波长时，甲认为波源振动的振幅越大，形成的机械波波长越长；乙认为波源振动的频率越高，形成的机械波的波长越短。这两种观点对吗？为什么？
4. 如图 3-14 所示为一列波速为 2.0 m/s 的横波在某一时刻的波形图，该波的振幅、频率分别是多少？

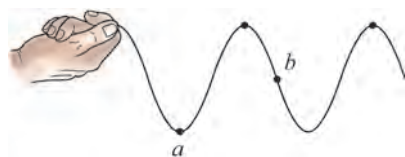


图 3-13

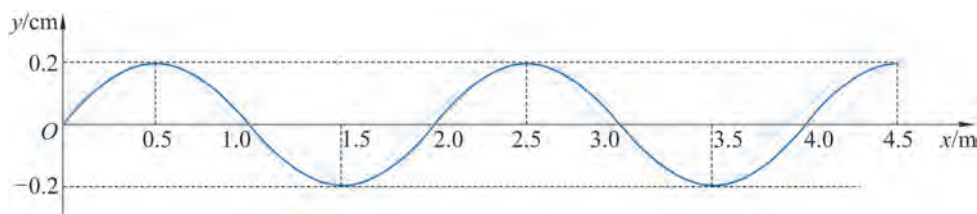


图 3-14

5. 如图 3-15 所示为一列周期为 0.4 s 的横波在 $t = 0$ 时刻的波形图。此时质点 M 正经过平衡位置沿 y 轴负方向运动，画出 $t = 0.5$ s 时的波形图。

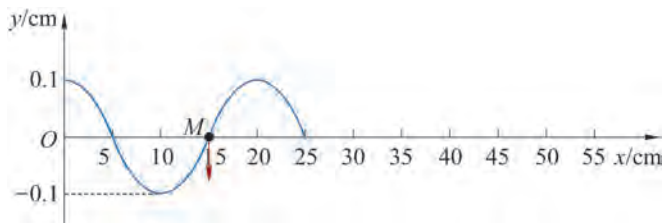


图 3-15

6. 如图 3-16 所示, 图 (a) 和图 (b) 中图线的形状相同, 一个是某一时刻的波形图, 另一个是该波传播过程中波源的振动图像。你能分辨出哪一个是波形图, 哪一个是波源的振动图像吗? 根据图像中的信息你能找出这列波的波长、周期和波速吗?

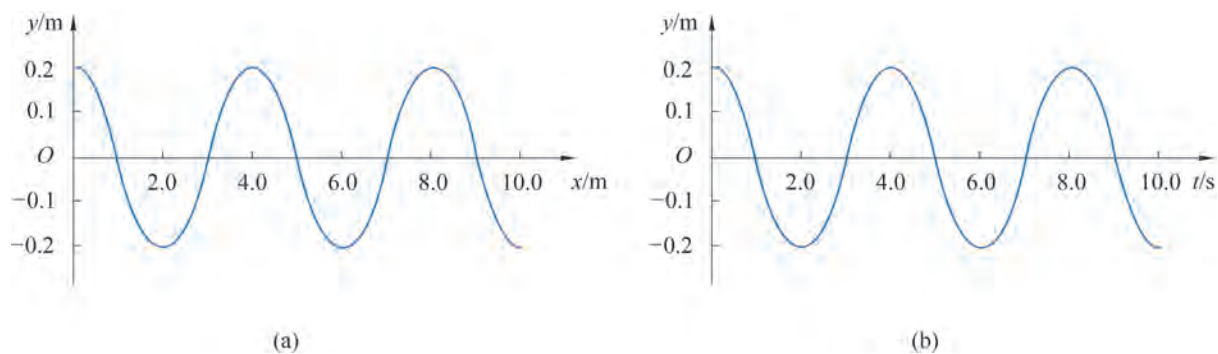


图 3-16

第三节 机械波的反射和折射

声呐是现代舰船的必备装置，如渔船用声呐探测鱼群，舰艇用声呐探测敌方潜艇等。声呐系统是通过声波在水下的传播完成水下探测和通信任务的。图 3-17 (a) 所示为声呐扫描海底获得的一战时德国沉没潜艇的图像；图 3-17 (b) 所示为主动式声呐工作原理的示意图，由声呐主动发射声波“照射”目标，并接收目标的反射波，根据反射波返回的时间和相关参数来测定目标。其中的原理与波的反射有关。

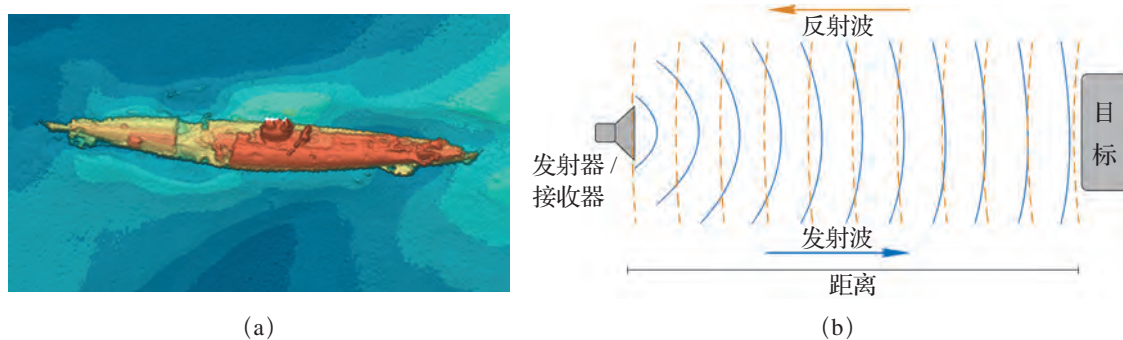


图 3-17 声呐工作示意图

► 波的反射

如图 3-18 (a) 所示，发波水槽中一列沿着直线传播的水波遇到挡板后发生了反射。挡板像镜子一样改变了水波的传播方向。波在传播过程中遇到障碍物时发生的背离障碍物传播的现象，称为波的反射 (**reflection**)。

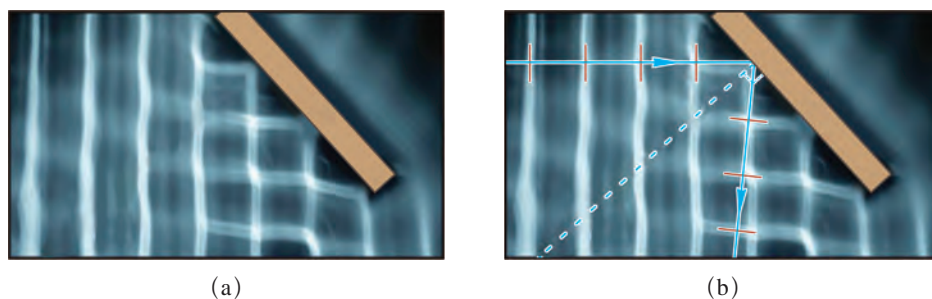


图 3-18 水波的反射

在图 3-18 (b) 中，我们用短实线表示波峰，虚线表示挡板的法线，带箭头的蓝线表示波的传播方向。入射方向与法线的夹角为入射角，反射方向与法线的夹角为反射角。观

察图 3-18 (b) 不难发现波的反射与我们初中接触的光的反射有着相似的规律：反射角等于入射角。

如图 3-19 所示，水波被堤坝阻挡时发生了明显的反射。



图 3-19 水波遇到堤坝发生反射

► 波的折射

当波沿着介质传到边界时，除了会发生反射，一部分波会穿过边界进入另一种介质，并改变传播方向，这就是波的**折射 (refraction)**。

如图 3-20 所示，在水槽底部放置一块玻璃板，使得水槽 *B* 区域的深度比 *A* 区域浅。由于水波在深水区和浅水区的传播速度不同，可将深水区 and 浅水区看作两种介质。波由深水区进入浅水区后波的传播速度减小，传播方向也发生了变化。可以观察到图中所示的折射图样。

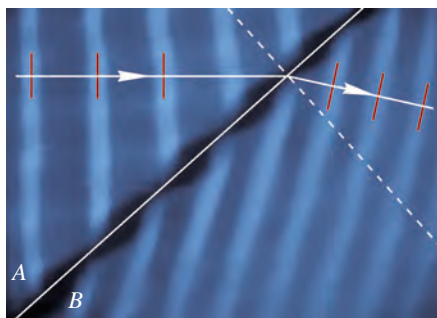


图 3-20 水波在不同深度的水中传播

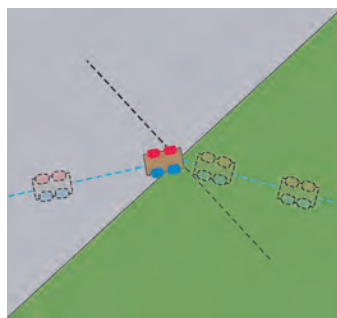


图 3-21 小车运动方向的偏折

波的折射现象可与小车进入粗糙程度不同的区域运动方向发生偏折的情况类比。如图 3-21 所示，灰色表示较光滑的硬地，绿色表示粗糙的草地。一辆无动力小车原本在硬地上沿着直线行驶，到达硬地和草地的交界处时，蓝色车轮先进入草地，阻力增大，蓝色车轮速度变慢；红色车轮依旧在硬地上行驶，速度不变，车的行驶方向将发生偏转。小车完全进入草地后，继续沿着直线行驶。

在两种介质的分界面处，波的反射和折射往往同时发生。

在大海中，海浪可能向着各个方向传播，但无论海岸的形状如何，靠近岸边的海浪总是趋于平行于海岸，沿着垂直于海岸的方向滚滚而来（图 3-22）。这是因为海浪的传播速度受海水深度的影响。越靠近岸边，海水深度越浅，海浪传播的波速越小，传播方向也渐渐变化，无论海岸的形状如何，最终近岸海浪的传播方向总趋于与岸线垂直。



图 3-22 海浪垂直于海岸的方向传播

问题⑤思考

1. 生活中有时会见到以下现象：① 夏日的雷声轰鸣不绝；② 水波从深水区向浅水区传播，其传播方向会发生改变；③ 在回音壁一端贴墙而立说话，声音会沿着墙壁传到一二百米的另一端。其中哪些属于机械波的反射？哪些属于机械波的折射？
2. 用反射式位移传感器测量距离的原理与声呐类似，静止的位移传感器发射的超声波脉冲被运动的待测物体反射。位移传感器记录发射和接收超声波的时间差来获取两者间距。这样测得的是哪一时刻位移传感器与被测物体之间的距离？
3. 利用超声波可以测量运动物体的速度。如图 3-23 (a) 所示为某同学设计的超声波测速的示意图。波源每隔 T_0 时间向正在平直轨道上运动的小车发出超声波脉冲，并接收其反射回来的信号。图 3-23 (b) 中振幅较大的是发出的脉冲，振幅较小的是接收到的信号，横轴为时间轴。根据图 (b) 可以推断小车在匀速运动，且车速大小为 $v_{\text{车}} = \frac{v_0 \Delta t}{2T_0 + \Delta t}$ ，式中 Δt 为固定的时间间隔， v_0 为波速，写出推断的过程。

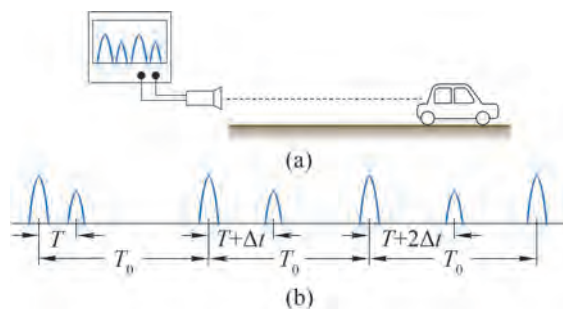


图 3-23

第四节 机械波的干涉和衍射

生活中，经常会有两列波在同一种介质中相遇的现象。例如，两滴水同时滴入水槽形成两列彼此独立的水波，在水槽中传播并相遇，如图 3-24 所示；房间里两个人同时讲话也形成两列彼此独立的声波，在空气中传播并相遇。两列波相遇会发生什么现象？

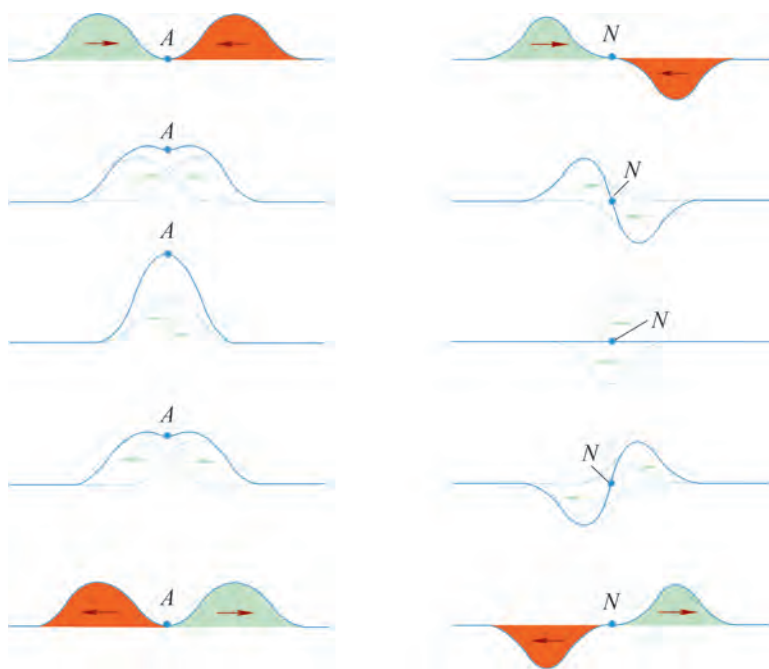


图 3-24 两列水波相遇

波的叠加

两位同学分别握住弹性长绳的两端，抖动一下，各产生一个波。这两个波在绳上沿着相反的方向传播。观察这两个波相遇前、相遇时和相遇后的波形。

图 3-25 中绳上的质点 A 和 N 在两列波相遇时同时受到了两列波的影响。在相遇之后两波继续按相遇前的规律传播。



(a) 两个波峰在 A 点相遇

(b) 一个波峰与一个波谷在 N 点相遇

图 3-25 两列绳波相遇

在两列波相遇的区域，所有质点的位移遵循相同的运动合成规则，如图 3-26 所示。图中蓝色箭头表示左边传来的波引起的位移，绿色箭头表示右边传来的波引起的位移，红色箭头表示质点的合位移。由此可知，介质中质点的位移是两列波分别引起的位移的矢量和，这种现象称为波的叠加。

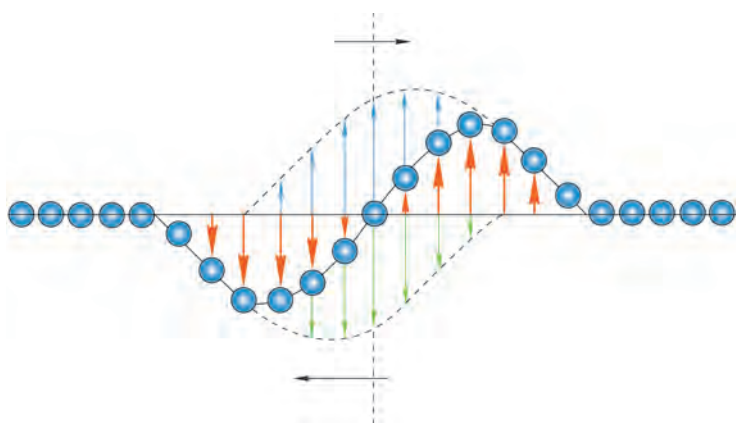
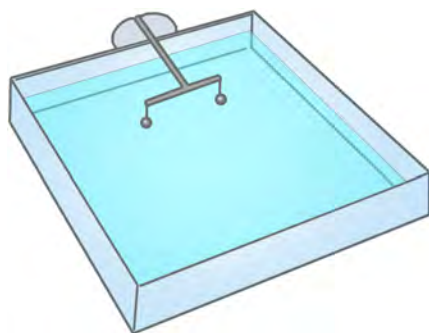


图 3-26 两列波相遇处质点运动合成

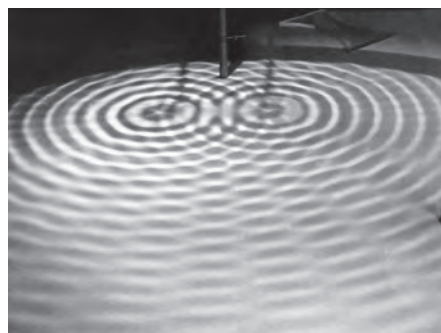
两列波相遇后仍然能够保持原来的特性（频率、波长、振动方向等）继续传播。在它们相遇的区域，介质中每一个质点同时参与两列波引起的振动，质点的位移是两列波分别引起的位移的矢量和。在水波的反射实验中，我们可以观察到入射水波和反射水波互相穿过彼此独立传播的现象。

► 波的干涉

利用如图 3-27 (a) 所示的实验装置可以观察到两列完全相同的水波互相叠加的现象。固定在同一振动架上的两个小球，周期性地触动水面，形成两列频率相同的水波。这两列水波相遇后，在它们重叠的区域内出现了如图 3-27 (b) 所示的现象。



(a)



(b)

图 3-27 水波实验发生器与水波干涉图样

两列振动情况相同的波源产生的波在某区域相遇时，在相遇区域的某些位置质点的振幅较大，振动加强；某些位置质点的振幅较小，振动减弱；振动加强和减弱区域相互间隔，且分布稳定，这样的现象称为波的干涉 (**interference**)。振动加强和振动减弱的区域是稳定分布的，这种分布图样称为干涉图样。

图 3-28 所示为两列互相干涉的水波某一时刻在水面上的波形。黑线表示两列波的波峰，蓝线表示两列波的波谷。黑线与黑线的交点表示波峰与波峰相遇。在两列波叠加的区域，介质中各个质点的位移为两列波分别引起的位移的矢量和，此时黑线交点处的位移数

值最大，等于两列波的振幅之和；同样，蓝线与蓝线交点处的位移数值也最大，也等于两列波的振幅之和。经过四分之一周期，两列波在这些点引起的位移均为零，这些点都在平衡位置；经过半个周期，波峰变为波谷，波谷变为波峰，这些点的位移数值依旧是最大的。这些区域就是振动加强的区域。

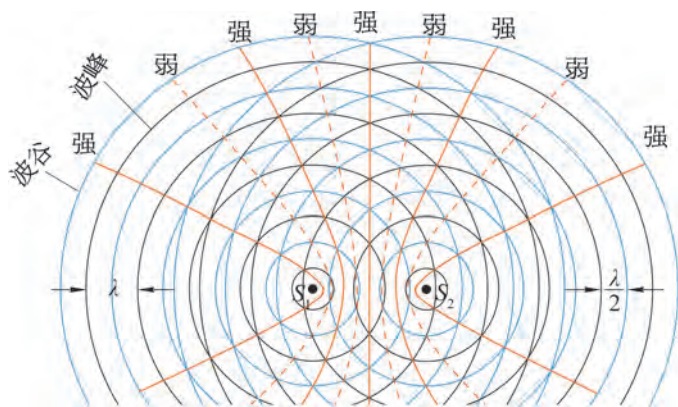


图 3-28 两列相同波相遇

大家谈

黑线与蓝线的交点表示波峰与波谷相遇，这些点此时位移数值的大小如何？经过四分之一周期、半个周期这些点的位移数值会发生什么变化？这些点位于振动加强的区域还是振动减弱的区域？

波的干涉是波的重要特征之一。利用干涉原理制成的干涉型消声器可用来降噪。内燃机、通风机、鼓风机等工作时，都伴有高速气流。高速气流排放过程中会产生噪声。如图 3-29 所示，当噪声声波经管道到达点 A 时，分为两路传播，在主通道的 B 处汇合时两列声波彼此干涉。如半圆的直径合适，两路声波会互相抵消，从而降低了噪声。干涉型消声器对单频或频率范围较窄的低频噪声有较好的消声效果。为了具有较宽的消声频率范围，可以将不同的消声单元串联起来，即可对不同波长的噪声降噪了，汽车的排气管也具有类似的消声结构。

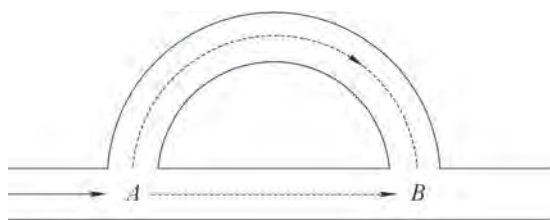


图 3-29 消声管原理示意图

► 波的衍射

如图 3-30 所示,在水槽中产生一系列水波,将一支笔垂直水面插入水中,对水波的传播几乎没有影响。这一现象说明水波能够绕过障碍物继续传播。波可以绕过障碍物进入其阴影区继续传播的现象,称为波的**衍射 (diffraction)**。

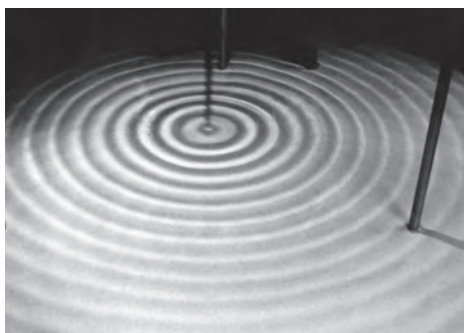


图 3-30 水波

自主活动

在发波水槽内产生一系列水波。

在水槽内放置两块挡板,两板中间留一条缝隙,如图 3-31 所示。保持振源的振动频率不变,逐渐改变缝隙的宽度,观察水波的传播情况。

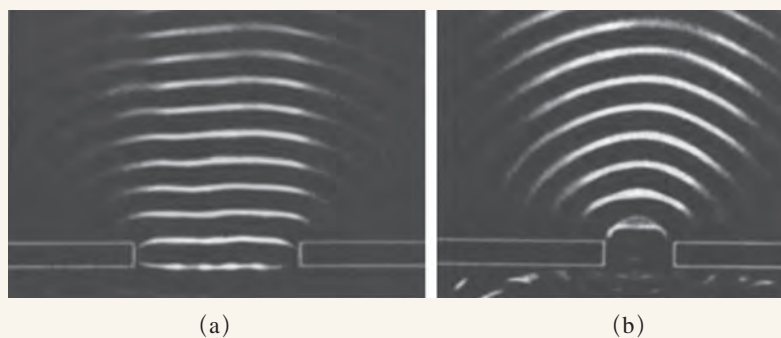


图 3-31 衍射实验

以上实验证实,当缝隙的宽度比波长大得多时,水波几乎无法到达挡板后的区域,如图 3-31 (a) 所示;当缝隙的宽度与波长相差不多或比波长小时,水波可以绕到挡板后面继续传播,如图 3-31 (b) 所示。

更多的实验表明,波能够发生明显衍射现象的条件是:障碍物(或缝隙、小孔)的尺寸与波长相差不多或比波长小。

问题与思考

1. 如图 3-32 所示, 两列波沿 x 轴相向传播, 画出当右行波的波峰位于 $x = 10 \text{ cm}$ 时两列波相遇叠加的波形。

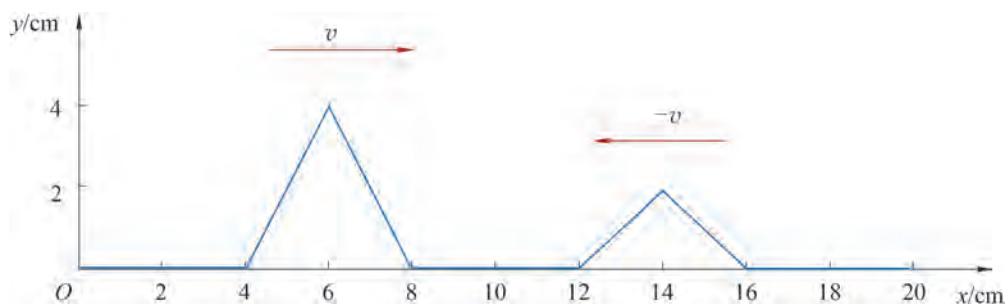


图 3-32

2. 如图 3-33 所示, 两列振幅均为 2.0 cm 的横波均沿 x 轴传播, 传播速度大小相等, 其中一列沿 x 轴正方向传播 (图中实线所示), 一列沿 x 轴负方向传播 (图中虚线所示)。这两列波的频率相等, 振幅相等, 振动方向均沿 y 轴, 在图示时刻, 平衡位置位于 $x = 1 \text{ cm}, 2 \text{ cm}, 3 \text{ cm}, 4 \text{ cm}, 5 \text{ cm}, 6 \text{ cm}, 7 \text{ cm}, 8 \text{ cm}$ 处的各质点中,

- (1) 振幅最大的质点有哪些? 振幅为多大?
- (2) 振幅最小的质点有哪些?

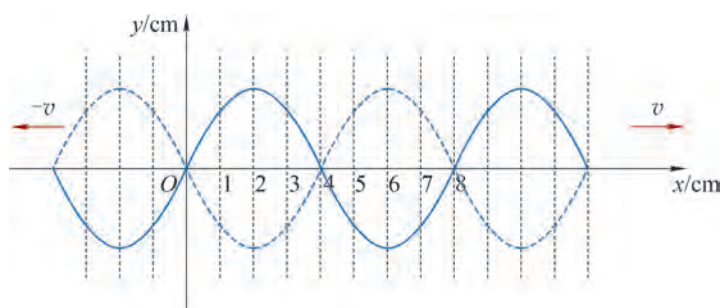


图 3-33

3. 如图 3-34 所示, 用两个相同的扬声器同时发出频率为 440 Hz 的声音。在周围走一走, 感觉声音是否有细微的差别, 说说其中的道理。

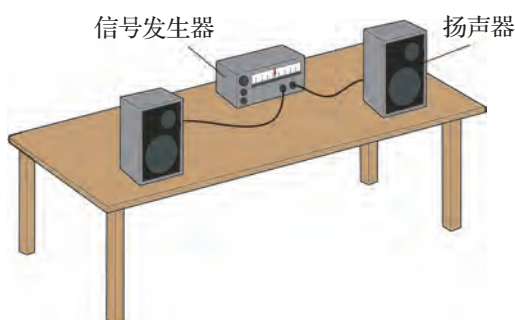


图 3-34

4. 波源 S_1 、 S_2 在同一水面上步调一致地上下振动，分别产生了振幅为 A_1 、 A_2 ($A_1 > A_2$) 的两列水波。两列波的波峰、波谷分别用实线、虚线表示，如图 3-35 所示为某一时刻两列水波相遇的图样。关于水面上 B 、 C 、 D 、 E 、 P 质点的运动状态，三位同学的观点如下。

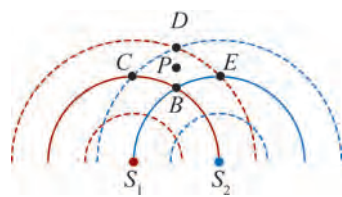


图 3-35

甲： B 质点始终位于波峰， D 质点始终位于波谷。

乙： P 质点的振动加强，其振幅为 $A_1 + A_2$ 。

丙： C 、 E 质点的振动减弱，其振幅为 0。

分析说明三位同学的观点是否正确。

5. 如图 3-36 所示， P 为直立于小河之中的一个实心桥墩， A 为靠近桥墩浮在水面上的一片树叶，小河水面平静。在 S 处稳定拍打水面，形成水波向桥墩后面传播，但树叶 A 没有明显振动。为使水波能传播到桥墩后面使树叶 A 振动起来，可以采用什么方法？
6. 蝙蝠通过发射高频超声波，根据从障碍物反射回来的超声波来判定前进的方向。假如蝙蝠发出的是频率较低的次声波，会出现什么情况？
7. 如图 3-37 所示为汽车消音器的示意图，从管口 S 处传入某一频率的声音，通过左右两条管道传到管口 T ，调节 B 管伸入 A 管的长度， T 处听到的声音强弱会发生变化。对此现象做出解释。

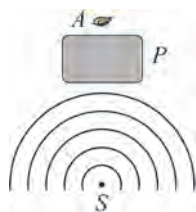


图 3-36

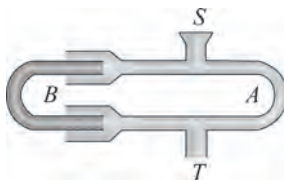


图 3-37

第五节 多普勒效应

当救护车、消防车从身边飞驰而过时，你有没有注意过它们鸣笛声的音调发生了变化？当这些特种车辆向你驶来时，你会觉得音调升高了；当车辆离你而去时，音调降低了。

► 多普勒效应

1842年，多普勒（Doppler，1803—1853）在铁道旁散步，发现鸣笛的火车经过身旁时，音调先变高后变低。他对这种现象进行了研究，发现波源与观察者有相对运动时，观察者接收到的波的频率会发生改变。

自主活动

用声音发生器发出某种频率的声波，用声传感器测量该声波的频率。当快速移动声音发生器时，听一听音调有什么变化，观察声传感器测得的声波的频率，你有什么发现吗？生活中有没有类似的现象？

如果声音发生器静止，移动声传感器，又有什么现象？

大量实验表明，当波源与观察者发生相对运动时，观察者接收到的波的频率高于或低于波源频率，这种现象称为**多普勒效应（Doppler effect）**。

把一颗石子扔入水中，水面会产生一阵不断向外扩展的涟漪。与此类似，波源振动时，发出的波向各个方向传播。如果波沿各个方向传播的速度相同，经过相同时间波将传到同一个球面，在二维平面上就是一个圆。用实线表示波峰，波在二维平面中的传播情况是如图3-38所示的同心圆，相邻圆的半径之差即为一个波长。

波源每完成一次全振动，波就向外传播一个波长，随着波的传播，图3-38所示的同心圆就不断扩展。此时如果在圆的某一条半径上距波源确定距离处有一位观察者，随着波以波速 v 传播，图3-38中间距为 λ 的波峰会一个个相继经过该观察者，他接收到的频率就是单位时间内经过观察者的波峰数目，

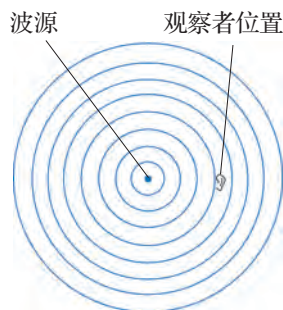


图3-38 观察者、波源都静止

即 $f = \frac{v}{\lambda}$ 。可见，当波源与观察者都静止时，观察者接收到的频率就是波源的振动频率。

如果观察者向着波源运动，如图 3-39 所示，单位时间内经过观察者的波峰数则会增加，观察者接收到的频率高于波源的频率；观察者远离波源运动时，单位时间内经过观察者的波峰数将减少，观察者接收到的频率低于波源的频率。

当观察者相对介质静止，而波源相对介质运动时，观察者测得的频率也会变化。图 3-40 所示描述了由波源发出的波的波峰经过四个周期在空间的分布，图中圆点表示波源，圆形实线表示波峰。某一时刻波源发出的波的波峰是以该时刻波源位置为圆心的圆。波峰向外扩展的同时，波源也沿直线运动。在波源的运动方向上，不同时刻发出的波峰间距减小，而相反方向则增加。

可见，波源向着观察者运动时，波源与观察者连线方向上的波峰间距将被压缩，波长减小。但由于波速不变，观察者在单位时间内接收到的波峰数增加，即接收到的频率高于波源的频率；反之，波源远离观察者时，波源与观察者连线方向上的波峰间距将被拉伸，波长增大，观察者在单位时间内接收到的波峰数减少，接收到的频率低于波源的频率。

► 多普勒效应的应用

蝙蝠是利用声波的高手。它们发出高频超声波脉冲，接收反射声波。当蝙蝠的猎物——昆虫在蝙蝠前飞行时，昆虫若飞得比蝙蝠快，两者间的距离增大，从昆虫身上反射的超声波频率会变低；若蝙蝠逐渐接近昆虫，从昆虫身上反射的超声波频率会变高。蝙蝠就是据此来探测和捕捉昆虫的（图 3-41）。蝙蝠不仅用超声波来捕食、定位和导航，还用超声波来感知其他同伴。

多普勒现象在我们的生活中有很多应用，不胜枚举。

多普勒超声心动图学是一门新兴学科，利用

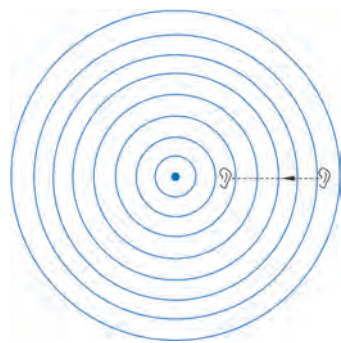


图 3-39 观察者运动、波源静止

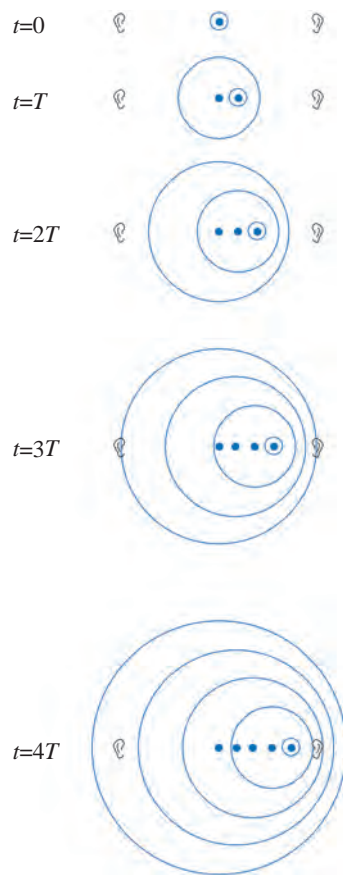


图 3-40 波源运动、观察者静止



图 3-41 蝙蝠利用多普勒效应捕食

超声波的多普勒效应来研究心脏和大血管中血液的流动特性。进入人体的超声波被血细胞反射，由于血细胞的运动，反射波的频率发生了变化。由此能得到血液流动快慢的信息。

公路上的测速仪利用多普勒效应根据反射声波频率的变化来检测汽车的车速。天文学家根据星系运动引起的多普勒效应认识到宇宙一直在膨胀。

STSE

当波源移动的速度超过介质中的波速时会出现马赫锥。马赫 (E. Mach, 1838—1916) 在研究一个微小的点波源运动时发现，当点波源以超音速在空气中运动时存在一个以点波源为顶点的锥面。在锥面内才能听到声音，在锥面外部不会听到声音，这个圆锥称为马赫锥，这种形式的波动称为艏波。艏波最直观的例子就是船掠过水面留下的痕迹，如图 3-42 所示。超音速飞机发出的震耳欲聋的裂空声就是艏波传播的结果。

这是由于声波的传播速度是有限的，飞机速度接近音速时就会追上自身发出的声波，飞机发出的沿前进方向传播的声波在飞机前方变得非常密集，使空气压强变得很大，能量非常集中，出现一个界面。界面两侧气体的压强等物理性质都会发生突变，正是压强的突变导致了“音爆”。在这种情况下流经飞机表面的气流变得非常紊乱，使飞机产生剧烈抖动，给飞行带来很大的干扰，甚至导致飞机坠毁，这就是所谓“音障”问题。如果飞机加速度足够大，便能尽快穿过这个不稳定的声波屏障，飞到声音的前方突破音障。从技术上而言，突破音障除了增加发动机的推力外，还可以通过改变飞机的气动外形来实现，目前采取的方法之一是将机翼做成三角形，或把机翼做得又薄又短 (图 3-43)。



图 3-42 船掠过水面留下的水波图



图 3-43 改变飞机的气动外形来突破音障

问题与思考

1. 站在站台上，如何根据汽笛音调的变化，判断火车是驶向站台还是驶离站台？
2. 设想将声传感器以声速远离一个频率为 440 Hz 的声源，测得的声音频率为多少？
3. 蜻蜓点水是蜻蜓在水中产卵的行为。假如蜻蜓沿着直线匀速飞行，每隔相同时间点一次水。某次飞行在水面形成的波纹如图 3-44 所示，说明在什么条件下会出现这样的波纹？画出不同条件下可能的波纹示意图。

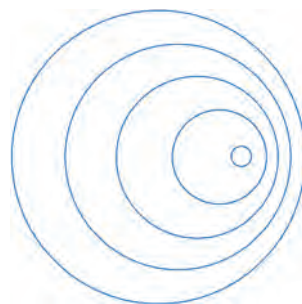


图 3-44

小结

• 基本概念和基本规律

机械波：机械振动在介质中的传播。

横波：介质中质点的振动方向与波的传播方向垂直的波。

纵波：介质中质点的振动方向与波的传播方向在同一直线上的波。

波的周期：介质中任意一个质点完成一次全振动所需要的时间，与波源振动的周期相等，用符号 T 表示。

波的频率：介质中任意一个质点完成全振动的次数与所用时间之比，与波源的频率相等，用符号 f 表示。

波长：振动在介质中经过一个周期 T 传播的距离，也是介质中运动状态完全相同的两个相邻质点间的距离，用符号 λ 表示。

波速：机械波在介质中传播的速度，由介质的性质决定，用符号 v 表示。

波的反射：波在传播中遇到障碍物时发生的背离障碍物传播的现象。

波的折射：波在传播中从一种介质进入另一种介质时发生了传播方向偏折的现象。

波的干涉：两列振动情况相同的波源产生的波在某区域相遇时，在相遇区域的某些位置质点的振幅较大，振动加强；某些位置质点的振幅较小，振动减弱；且振动加强和减弱区域相互间隔、分布稳定的现象。

波的衍射：波绕过障碍物继续传播的现象。

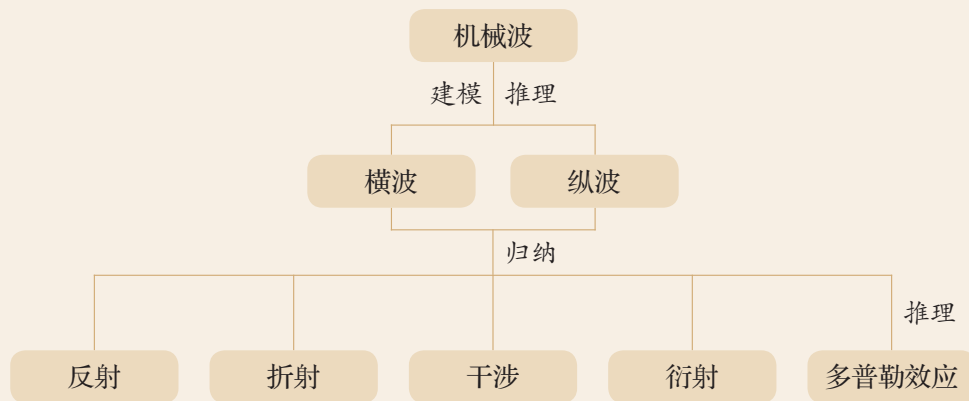
多普勒效应：当波源与观察者发生相对运动时，观察者接收到的波的频率高于或低于波源频率的现象。

• 基本方法

通过建构机械波模型，感受通过抽象、归纳得出结论的方法。

通过观察、分析波的传播现象，感受基于证据进行解释、论证的方法。

• 知识结构图



复习与巩固

1. 一列多米诺骨牌依次倒下, 球场看台上的“人浪”此起彼伏。这些现象能否认为是波的传播?
2. 空气中一列声波的频率是 200 Hz , 它的周期是多少? 如果这列声波在水中传播, 它的周期是多少? 如果在水中这列声波的波长为 7.4 m , 则这列声波在水中的传播速度是多少?
3. 如图 3-45 所示为一列沿 x 轴正方向传播的横波在某时刻的波形图。此时位于 $x = 3\text{ cm}$ 的质点经过 $\frac{1}{4}T$ 后的坐标为多少?

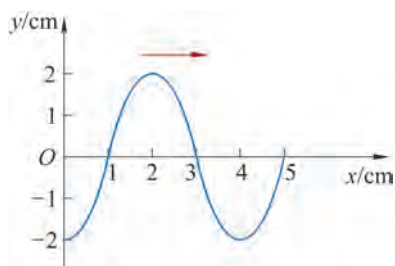


图 3-45

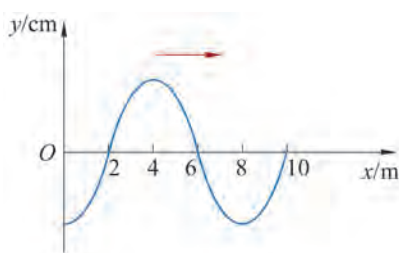


图 3-46

4. 如图 3-46 所示为一列沿 x 轴正方向传播的横波在某时刻的波形图, 波源位于坐标原点 O , 从 $t = 0$ 时开始振动。波速为 2 m/s , 分别画出 $t = 3.5\text{ s}$ 和 $t = 6.5\text{ s}$ 两个时刻的波形图。
5. A 、 B 两波相向而行, 在某时刻的波形与位置如图 3-47 所示, 已知波的传播速度为 v , 图中标尺每格长度为 l , 在图中画出又经过 $t = \frac{7l}{v}$ 时的波形。



图 3-47

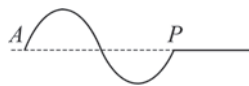


图 3-48

6. 在一根水平绷紧的弹性绳上, 质点 A 从零时刻开始上下做简谐运动, 经时间 t 形成的波形如图 3-48 所示。若规定向上方向为质点离开平衡位置位移 y 的正方向, 画出质点 A 从零时刻开始做简谐运动的振动图像。
7. 一列横波沿 x 轴正方向传播。当平衡位置位于 $x_1 = 10\text{ m}$ 的质点 A 位于波峰时, 平衡位置位于 $x_2 = 140\text{ m}$ 的质点 B 位于波谷; 在 A 、 B 之间有 6 个波峰, 振源的振动周期为 0.2 s 。这列波的波速为多大? 质点 B 从波谷开始经多少时间位于波峰?
8. 一列横波沿 x 轴正方向传播, 其波速为 1 m/s , 频率为 2.5 Hz , 振幅为 4 cm 。在 x 轴上有 P 、 Q 两点, $x_Q - x_P = 3.9\text{ m}$ 。某时刻 P 处的质点位于平衡位置上方最大位移处, 再经过多少时间 Q 处质点也位于平衡位置上方的最大位移处? 在这段时间内该质点经过的路程是多少?

9. 如图 3-49 (a)、(b)、(c) 所示分别反映了飞机以三种不同速度在空中 (不考虑空气的流动) 水平飞行时产生声波的情况。图中一系列圆表示飞机不同时刻发出的声波传播到的位置, A 点表示飞机的位置。分析说明哪张图中飞机飞行的速度最大。最大速度约为声波速度的多少倍?

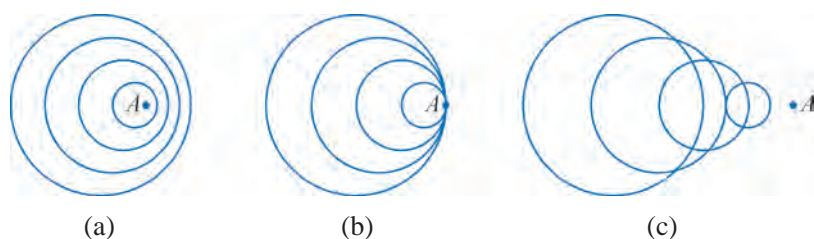


图 3-49

10. 在利用发波水槽观察水波的衍射实验中, 若改变挡板的方向和位置可观察到水波通过挡板后的不同情况。在图 3-50 中画出水波在挡板后的传播情况。

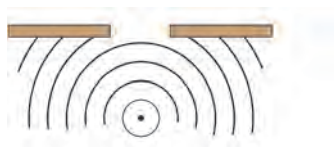


图 3-50

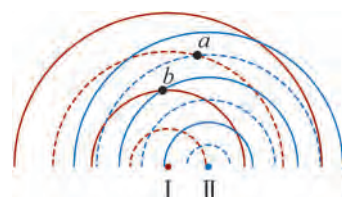


图 3-51

11. 两波源 I、II 在水槽中形成的波形如图 3-51 所示, 其中实线为波峰, 虚线为波谷。此时 a 、 b 两点分别处于波谷与波谷、波峰与波峰叠加的状态。因此, 这两个位置的振动始终加强。你是否认同此说法, 说明理由。
- *12. 在静止的水面上, 一个波源 S 做垂直水面、周期为 T 的振动, 所产生的波沿水面以大小为 u 的速度向各个方向传播, 波源开始振动后经过 Δt 时间, 在水面上看到的图像如图 3-52 (a) 所示, 图中实线表示波峰。则:
- (1) 说明图 (a) 中的图像为什么是一系列的同心圆? 波长为多少?
 - (2) 如果波源不动, 水流以速度 v 沿某一方向流动, 那么波源开始振动后经过 Δt 时间时, 站在岸上的人将看到的图像是图 (b) 中的哪一个? 说明判断的理由。

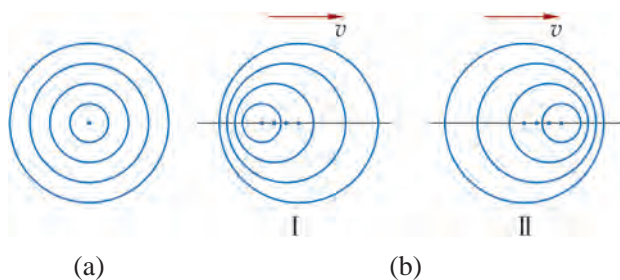


图 3-52

第四章

光

人类对光的研究可以追溯到公元前 1 000 多年。我国战国初期的思想家墨子的著作中记载了丰富的光学知识。古希腊数学家欧几里得的著作也描述了当时所了解的光学现象。直到 17 世纪前半叶，人们对于光的认识还仅限于光的直线传播及光的反射、折射现象。对光本质的认识经历了一个漫长的过程。光的波动说与微粒说之争始于 17 世纪初，其间经历了通过光的干涉和衍射实验证实光具有波动性，建立光的电磁波理论的过程。直至 20 世纪初，人们才认识到光具有波粒二象性。

在初中阶段，我们已经学习过光的反射和折射现象的相关知识。在本章中，将理解光的折射定律；知道光的全反射现象，了解光的干涉、衍射和偏振现象以及发生这些现象的条件；知道光是横波；了解激光的特性。在学习中，通过对光具有波动性的论证，增强证据意识，提升科学论证能力。通过实验发展科学探究能力；在观察实验现象的过程中，提升科学思维能力，形成科学态度。本章也是学习电磁波、波粒二象性等知识的基础。

第一节 光的折射

站在清澈的湖边，你是否有过这样的体验，同时看到湖旁景物的倒影和水底的枯枝，如图 4-1 所示。这是来自景物和枯枝的光分别在水面发生反射和折射后，同时进入眼睛产生的视觉效果。



图 4-1 水中景象

在初中我们已经学习了光的有关知识，如图 4-2 所示，光从介质 1 射到介质 1 与介质 2 的分界面时，一部分光会返回到介质 1，我们把这种现象称为光的反射。光的反射遵循光的反射定律。在发生反射现象的同时，还有一部分光进入了介质 2，并改变了传播的方向，这就是光的折射现象。

► 光的折射定律

在光的折射现象中，改变入射光的方向，折射光的方向也随之改变。入射光线与法线的夹角为入射角，折射光线与法线的夹角为折射角。折射角随着入射角的变化而变化。

入射角和折射角之间有什么定量关系？下面我们通过实验研究光从空气斜射入水中时，入射角与折射角之间的定量关系。

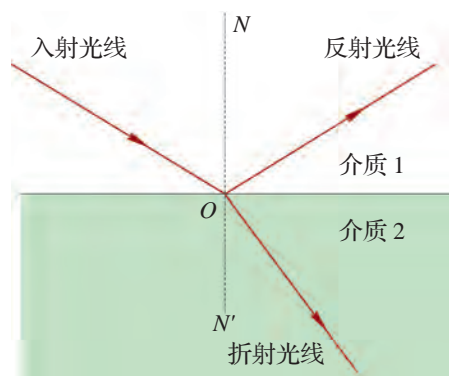


图 4-2 光在两种介质表面的反射与折射

自主活动

如图 4-3 所示,画有方格的圆盘竖直插入水槽,水面恰好位于水平直径 PQ 处。在盘边缘固定激光笔,激光笔射出的光由空气沿半径 AO 斜射入水中,光发生折射,折射光线为 OB 。由于圆盘半径一定,通过比较光线 AO 、 OB 在水面与法线方向的投影,即可得入射角 θ_1 、折射角 θ_2 的各种信息。选择不同的入射角,在表 4-1 中记录数据,据此分析 θ_1 与 θ_2 之间的定量关系。

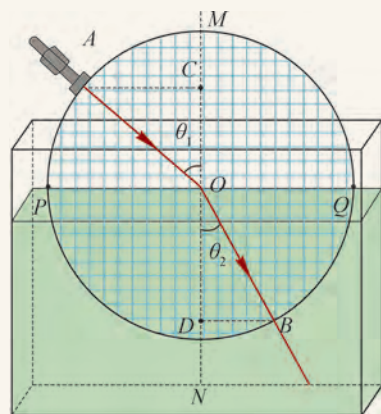


图 4-3 光从圆盘圆心处射入水槽

表 4-1

实验序号	OC	OD	AC	BD
1				
2				
3				
4				

从上面的实验可以看出, AC 与 BD 的比值为常数。如何将 AC 与 BD 的关系转化为 θ_1 与 θ_2 的关系呢?

设圆盘半径为 R , 则有

$$\frac{AC}{BD} = \frac{R \sin \theta_1}{R \sin \theta_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}$$

斯涅耳 (W. Snell, 1580—1626) 在分析了大量数据后, 总结出光的**折射定律 (law of refraction)**: 当光从介质 1 射入介质 2 时, 折射光线与入射光线、法线处在同一平面内, 折射光线与入射光线分别位于法线的两侧; 入射角 θ_1 的正弦与折射角 θ_2 的正弦之比为—常数, 即

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = C$$

在光的折射现象中, 光路也是可逆的。图 4-3 所示的实验中, 如果光沿 BO 从水下入射, 折射后进入空气中的光将沿 OA 方向。

光在两种介质的分界面发生折射现象时, 入射角的正弦与折射角的正弦之比为常数, 该常数与入射角和折射角的大小均无关。但是, 对于不同的介质, 这个常数不同。

研究表明, 常数 C 与光在介质中的速度有关, 以 v_1 表示光在介质 1 中的速度, v_2 表示光在介质 2 中的速度, 常数 $C = \frac{v_1}{v_2}$ 。

► 折射率

当光从真空斜射入某种介质时，把常数 C （即入射角 θ_1 的正弦与折射角 θ_2 的正弦的比值）称为这种介质的**折射率（refractive index）**，用符号 n 表示。

$$n = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}$$

光在真空中的速度为 c ，在介质中的速度为 v ，折射率也可表示为

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

由于光在真空中的速度大于其在介质中的速度，所以介质的折射率都大于 1。折射率决定了光从真空斜射入介质时的偏折程度，反映了介质的光学性质。

在实际中，通常遇到光从空气射入某种介质，或者从某种介质射入空气的情况。由于光在空气中的速度接近光在真空中的速度，空气的折射率近似为 1。可认为光由空气进入介质的折射情况与光由真空进入介质的折射情况相同。此时同样可以用折射率 n 反映光从空气斜射入介质时的偏折程度。表 4-2 中列举了几种介质的折射率。

表 4-2 几种介质的折射率

介质	折射率	介质	折射率
合成碳硅石	2.65	水晶	1.54
金刚石	2.42	酒精	1.36
二硫化碳	1.63	水	1.33
玻璃	1.2~1.8	空气	1.000 28

对于两种不同介质，光在其中传播的速度大小不同，不同介质的折射率就不同。把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）**。光疏介质与光密介质是相对而言的，例如，水、水晶和金刚石三种介质相比较，水晶相对于水是光密介质，而相对于金刚石则是光疏介质。

自主活动

当光从折射率为 n_1 的介质以入射角 θ_1 入射到折射率为 n_2 的介质时，折射角为 θ_2 。利用折射定律和折射率的定义推导：折射定律可以表示为 $n_1\sin\theta_1 = n_2\sin\theta_2$ 。并讨论光从光疏介质入射到光密介质或从光密介质入射到光疏介质时，光线偏折现象有什么不同。

无论光是由光疏介质入射到光密介质还是由光密介质入射到光疏介质，折射角都随入射角增大而增大。

生活中的很多现象都与光的折射有关。如图 4-4 所示，日落时，我们看到椭圆状的太阳逐渐沉入地平线。这是因为大气的密度随高度的减小而增大，离地面越近，大气的密度越大，光在其中的传播速度越小，折射率越大；来自太阳的光线在穿过大气层的过程中发生了折射，逐渐向地面弯曲；沿着地面观察者的视线看来，光线似乎是从较高的位置射过来的，太阳被“抬高”了。如图 4-5 所示，由于落日上缘和下缘发出的光在大气中的折射情况不同，落日看起来呈椭圆形。大气的折射同样会对星体位置的观察造成偏差，这是天文学家在地球上进行天文观测时必须考虑的因素。

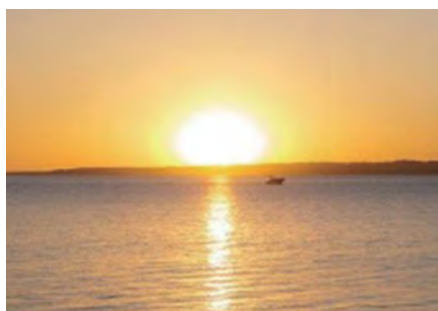


图 4-4 日落时观察到椭圆状的太阳

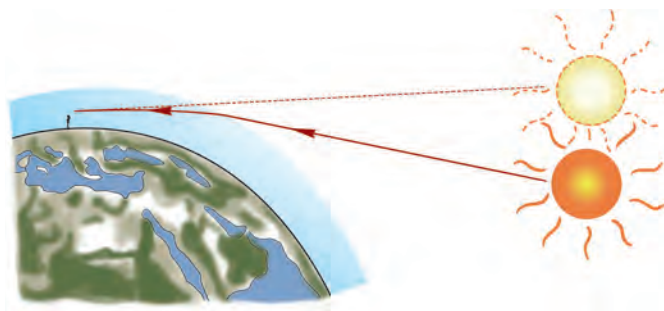


图 4-5 观察落日的示意图

STSE

折射率是物质的一种物理属性，常被用作检测食品的一项指标。例如，通过折射率的测定，可以控制高浓度葡萄糖浆的浓度，确定果汁饮料的含糖量，鉴别食用油中脂肪酸的构成，测定牛乳乳清的乳糖含量，快速区分甲醇与乙醇，等等，从而有效打击伪劣产品，维护市场秩序。

学生实验

测量玻璃的折射率

提出问题

折射率是反映介质光学性质的一个重要参数。光从一种介质进入另一种介质时，折射光的传播路径与折射率有关。入射光从空气进入玻璃时，如何确定光在玻璃中的传播路径，并由此测量玻璃的折射率？

实验原理与方案

光在同一种均匀介质中沿直线传播，两点可确定一条光线。当光从空气斜射入另一种介质时会发生偏折，其规律满足折射定律。

通过测绘射入和射出玻璃砖的光线，确定光在玻璃砖中的传播路径，可得光从空气入射到玻璃界面处的入射角 θ_1 和折射角 θ_2 ，根据折射定律计算得到玻璃的折射率。

实验装置与方法

实验装置如图 4-6 所示。

用大头针分别确定入射光线和出射光线，通过作图找出光线在玻璃砖两个平行表面的入射点和出射点，两点的连线就是光在玻璃砖中的传播路径。

实验操作与数据收集

按照玻璃砖的宽度在白纸上画出两条平行直线，将玻璃砖依平行线置于白纸上。在玻璃砖的一侧垂直于纸面插两枚大头针 a 、 b ，其连线与玻璃砖表面成一定角度。在另一侧透过玻璃砖观察，并在该侧的适当位置再插两枚大头针 c 、 d ，使四枚大头针依次遮挡。此时，它们位于同一条射入眼睛的光线上，如图 4-6 所示。根据大头针的位置在白纸上画出入射光线和出射光线，确定入射点和出射点，画出玻璃砖中的折射光线。

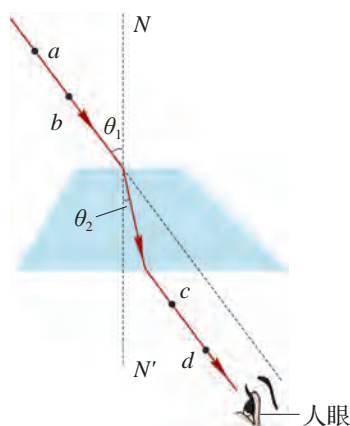


图 4-6 测量玻璃的折射率

测量并记录光在空气和玻璃分界面上的入射角 θ_1 和折射角 θ_2 。改变入射角，再次测量，将数据记录在自己设计的表格中。

数据分析

根据测得的入射角和折射角，计算两者正弦的比值。

实验结论

玻璃的折射率 $n = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}$ 。

交流与讨论

交流各组的测量结果，讨论如果只有刻度尺，如何测量和处理数据。

如果准备插第三枚大头针时，发现透过玻璃砖观察不到前两枚大头针，原因是什么？

示例 人的双眼看到的图像信息经大脑处理后，产生了空间深度。站在游泳池边上观察池底时感觉深度（视觉深度）比池壁所标的数值 h 要小。通过计算解释这一现象。

分析：视觉深度小于实际深度的原因是从池底某点发出的光线经水面折射进入双眼产生的视觉效果。为此可以简化为由池底某点发出两条夹角较小的光线经水面折射进入空气。根据几何关系推算视觉深度。

解：如图 4-7 所示，从池底的 A 点画两条光线 AB 和 AO，AB 沿竖直方向，AO 与竖直方向偏离一个角度 θ_1 。AO 经水面折射偏离了原来的方向，与竖直方向的偏角为 θ_2 。折射光线的反向延长线与 AB 相交于 C，BC 大小即为视觉深度。

由表 4-2 可知，水的折射率 $n=1.33$ 。在直角三角形 OBA 中

$$OB = AB \tan \theta_1$$

根据光路可逆，可以反向看作光线从空气射入水中，根据折射定律

$$n = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1}$$

在直角三角形 OBC 中

$$BC = OB \cot \theta_2 = AB \tan \theta_1 \times \cot \theta_2 = AB \times \frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2}$$

当角度 θ_1 很小时， θ_2 也很小

$$\sin \theta_1 \approx \tan \theta_1, \sin \theta_2 \approx \tan \theta_2$$

$$\text{则} \quad \frac{BC}{AB} = \frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{1}{n} \approx \frac{3}{4}$$

可见，池水的视觉深度约为实际深度的 $\frac{3}{4}$ 。

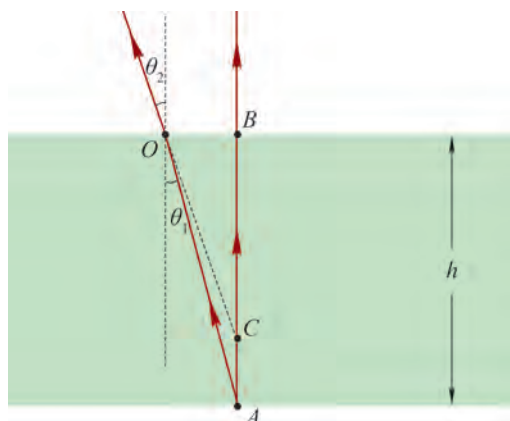


图 4-7 分析光的折射

问题与思考

1. 如图 4-8 所示为光从空气射入半圆形玻璃砖再从玻璃砖射入空气的光路图，O 为半圆形砖的圆心。指出哪些情况是可能发生的，哪些是不可能发生的，并说明理由。

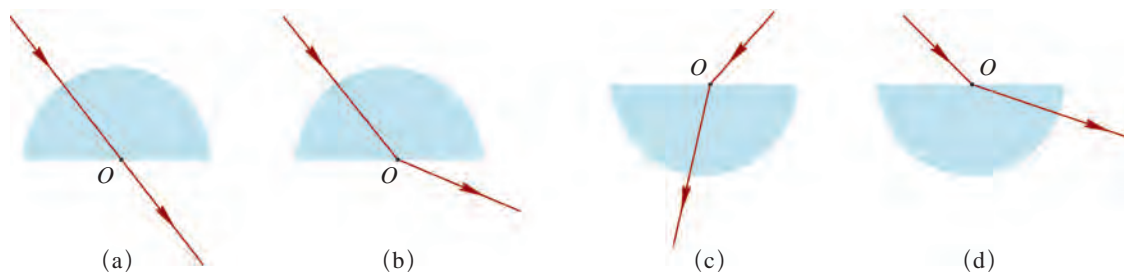


图 4-8

2. 如图 4-9 所示，一束光线斜射入容器中，并在容器底部形成一个光斑。往容器中逐渐注水的过程中，图中的光斑的位置将如何变化？



图 4-9

3. 把一块厚玻璃板压在水平放置的纸上，透过玻璃板看纸上的字迹与直接看纸上的字迹会有什么不同？试解释发生这种现象的原因。
4. 诗句“大漠孤烟直，长河落日圆”给我们展现了一幅美丽的画卷。当诗人看到落日接近地平线之时，太阳的实际位置已经位于地平线下方了。分析这种现象的原因是什么？
5. 某同学通过实验研究光的折射。表 4-3 记录的是光从空气以不同角度射入水中的实验数据，表 4-4 记录的是光从空气射入某种透明介质的实验数据。
 - (1) 由表 4-3 和表 4-4 的数据，判断这种透明介质和水的折射率哪个更大。简述判断依据。
 - (2) 根据表 4-4 的数据，结合表 4-2 “几种介质的折射率”，判断这种透明介质可能是哪种材料。

表 4-3

入射角 i	0°	30°	45°	60°
折射角 r	0°	22°	32°	40°

表 4-4

入射角 i	0°	30°	45°	60°
折射角 r	0°	17°	24°	30°

6. 如图 4-10 所示，一束光从空气斜射入某介质，入射光线与反射光线的夹角为 90° ，折射光线与入射光线延长线的夹角 θ 为 15° ，该介质的折射率和光在该介质中传播的速度分别为多少？

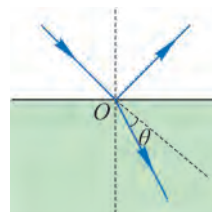


图 4-10

第二节 全反射

如图 4-11 所示，水中的一些气泡特别明亮，如一颗颗晶莹的珍珠，这是因为光线在气泡的表面发生了全反射。

► 全反射

根据光的折射定律，光由光疏介质射入光密介质（如由空气射入水中）时，折射角小于入射角；光由光密介质射入光疏介质（如由水射入空气中）时，折射角大于入射角；折射角随入射角的增大而增大。



图 4-11 水中气泡

大家谈

当光由光密介质射入光疏介质，随着入射角的增大最大折射角有多大？将猜想用光路图表示。

如何用实验观察这样的现象？

自主活动

如图 4-12 所示，激光束沿着半圆柱形玻璃砖的半径射到它的平直面上，光在玻璃与空气的界面上同时发生反射与折射。逐渐增大入射角，观察反射光和折射光如何变化。

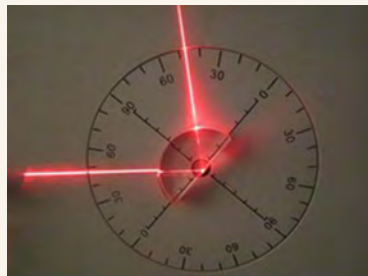


图 4-12 观察光的全反射

由活动可观察到，当光从玻璃射入空气时，同时发生折射和反射，折射角大于入射角。随着入射角逐渐增大，折射角相应增大；同时，折射光越来越弱，反射光越来越

强。当入射角增大到某一角度时，折射光消失，只剩下反射光。这就是**全反射（total reflection）**现象。

► 临界角

光从光密介质射入光疏介质，当折射角达到 90° 时，折射光完全消失，此时入射角称为**临界角（critical angle）**，用符号 C 表示。

光由介质射入空气（或真空），若入射角为临界角 C ，则折射角为 90° ，根据光的折射定律

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

即

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

则

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

不同介质的折射率 n 不同，各种介质的临界角 C 也不同。介质的折射率越大，发生全反射的临界角越小，越容易发生全反射。水的临界角为 48.8° ，玻璃的临界角为 $32^\circ \sim 42^\circ$ ，金刚石的临界角为 24.4° 。与其他材质比，金刚石特别容易发生全反射。正因为如此，经过精心打磨的金刚石看起来璀璨夺目。

光导纤维简称“光纤”，是一种能够传导光波和各种光信号的纤维，如图 4-13 所示。21 世纪人类社会进入信息大爆炸的时代，光纤是传输信息的理想载体。



图 4-13 光纤导光

如图 4-14 所示为反射型光纤的结构示意图。光纤的结构呈圆柱形，中间是直径为微米级的纤芯，具有高折射率，外面包裹低折射率材料，最外面是塑料护套。特殊的制造工艺和特殊的材料，使光纤既纤细似发，柔顺如丝，又具有较高的强度。光能够在光纤中传输就是利用光在折射率不同的两种介质的分界面产生的全反射。由于外层材料的折射率比纤芯小，进入纤芯的光线在两种介质的界面上作多次全反射而曲折前进，沿着芯线传送，

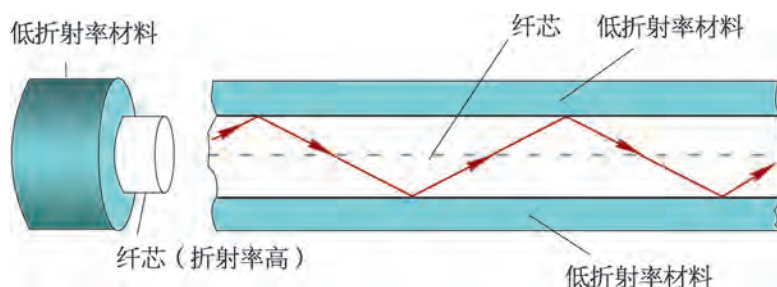


图 4-14 光纤结构示意图

就好像自来水只能在水管里流动一样，不会泄漏出去。

医学上，医生用光导纤维制成的内窥镜来检查人体胃、肠器官等脏器的内部，也可利用光导纤维成像技术辅助做微创手术。

问题与思考

1. 在下部有孔的透明桶内装满水，用聚光手电筒或激光笔透过桶照亮该孔时可观察到，随着水流从小孔流出，光能沿着水流传播。水流的形状发生变化时，光的传播方向也随之变化。动手做一做，分析产生这一现象的原因。
2. 按照纤芯折射率的分布可将光纤分为突变型和渐变型两类。突变型光纤纤芯的折射率是均匀的，渐变型光纤纤芯的折射率不均匀。从光纤一端射入的光被约束在纤芯中传播，最终从光纤的另一端射出。查找资料，画出光在两种光纤的纤芯中传播路径的示意图，并说出这两种路径有何区别。
3. 水池中平静的水面下有一个点光源向各个方向发光，在池边可看到水面上有一个圆形亮斑。若亮斑的中心位置不变，面积逐渐减小，分析判断该点光源在水下的运动方向。
4. 如图 4-15 所示，折射率为 1.5 的玻璃圆柱棒直径 $d = 4\text{ cm}$ ，长 $L = 40\text{ cm}$ 。一束光射向圆柱棒一个底面的中心，折射入圆柱棒后再由棒的另一底面射出。该束光在圆柱棒中最多能经历多少次全反射？
5. 如图 4-16 所示为水下 h 深处的摄影机拍摄的画面，画面中既有水面上的景物也有水面下的情景。若在摄影机正上方的水面放置一半径为 r 的不透光圆形挡板，摄影机便无法拍摄任何水面上的景物。若水的折射率为 n ，试问要发生这种现象，圆板最小半径 r 应为多少？

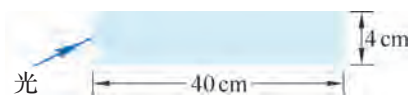


图 4-15



图 4-16

第三节 光的干涉

干涉是波特有的现象。光是电磁波，同样也会发生干涉。但是我们从未观察到教室里两盏相同的灯同时照明时出现干涉图样，这说明，发生光的干涉现象与发生机械波干涉现象一样，同样需要满足一定的条件。

▶ 光的双缝干涉实验

1801年，英国物理学家托马斯·杨（图4-17）在实验室成功观察到了光的干涉现象。他让一束太阳光照射到一个有小孔的屏上，光从小孔射出后，射到位于第二个屏上靠得很近（约0.1 mm）的两个小孔上，在两个小孔后的光屏上出现了彩色图样。后来他把小孔改为彼此平行、靠得很近的狭缝，用单色光（严格地说，是指只有一个频率或波长的光。实际上频率范围很窄的光，就可认为是单色光）做实验，得到了清晰的、明暗相间的条纹。



图4-17 托马斯·杨（T. Young, 1773—1829）

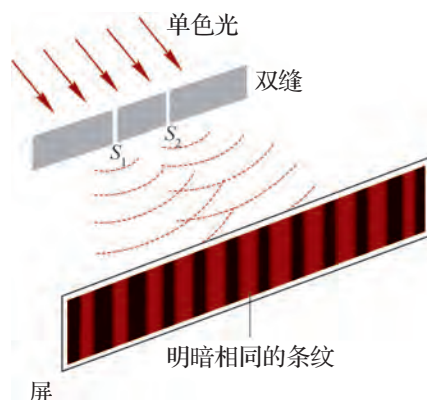


图4-18 双缝干涉

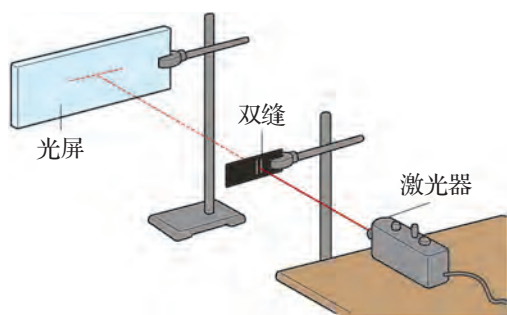
托马斯·杨利用波的叠加思想很好地解释了光的干涉现象。如图4-18所示，一束单色光同时入射到双缝 S_1 、 S_2 ，一束光被分成了两束，这两个缝可视为两个振动情况总是相同的光源，从 S_1 、 S_2 发出的光波在光屏上相遇叠加，波峰与波峰、波谷与波谷叠加处，光波相互加强；波峰与波谷叠加处，光波相互削弱抵消，从而在屏上呈现出明暗相间的条纹。

与机械波的干涉类似，两束振动情况完全相同的光在空间相遇，彼此叠加，出现在一些区域振动相互加强、在另一些区域振动相互削弱且分布稳定的现象。这种现象称为光的干涉现象。

实际上，振动方向相同、频率相等、相位差恒定的光源称为相干光源，由相干光源发出的光相互叠加才能产生光的干涉现象。

光的干涉现象表明，光具有波的特性。为了纪念托马斯·杨的贡献，这个实验称为杨氏双缝干涉实验。

可用如图 4-19 (a) 所示的装置观察光的干涉现象。激光器发出的光可认为是单色光。当一束激光通过双缝时, 被分为振动情况相同的两束光, 射到光屏上发生叠加, 形成光的干涉图样, 如图 4-19 (b) 所示。



(a) 双缝干涉实验装置



(b) 激光干涉图样

图 4-19 双缝干涉实验

自主活动

调换不同间距的双缝, 调节光屏与双缝的距离, 观察光屏上干涉条纹的变化。

观察发现, 在双缝干涉图样中, 明条纹或暗条纹之间的距离是相等的。保持光屏到双缝的距离不变, 减小双缝间距, 光屏上的条纹间距增大; 保持双缝间距不变, 增大光屏到双缝的距离, 光屏上的条纹间距也增大。

进一步实验表明, 保持双缝间距和屏到双缝的距离都不变, 改变光的颜色, 条纹间距也随之变化。红光的条纹间距最大, 紫光的条纹间距最小, 如图 4-20 (a) 所示。

可见, 双缝干涉图样是明暗相间、等间距的条纹。相邻明条纹或相邻暗条纹的间距相等, 相邻明条纹或暗条纹中心间距 Δx 大小取决于双缝间距 d 、光屏到双缝的距离 L 和光的波长 λ 。它们之间的定量关系为

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

当用白光作为光源时, 光屏上出现彩色的干涉条纹, 如图 4-20 (b) 所示。这是由于白光是由不同颜色的单色光复合而成, 各色光产生的条纹间距不同, 在光屏上叠加在一起, 中央明纹为白色, 两边出现彩色条纹。

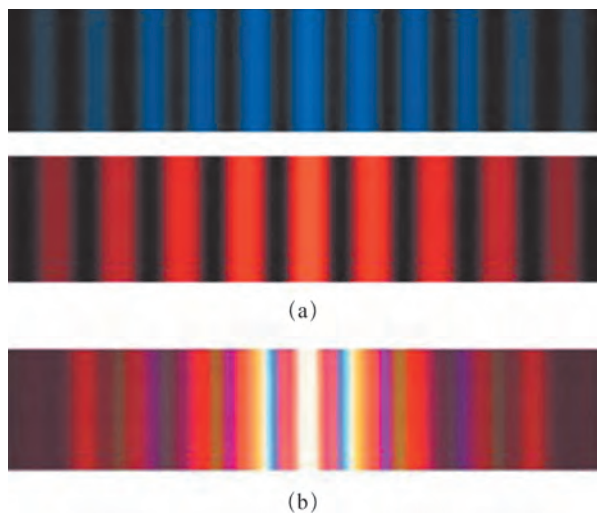


图 4-20 不同色光在同一实验装置的双缝干涉图样

学生实验

用双缝干涉实验测量光的波长

提出问题

可见光的波长很短，其范围大致为 400~760 nm（约为头发直径的百分之一）。通常说的“白光”是由不同单色光混合而成的，如何测量某种单色光的波长呢？

实验原理与方案

单色光发生双缝干涉时，条纹间距 Δx 与双缝间距 d 、光屏到双缝的距离 L 、光的波长 λ 之间有确定的关系 $\Delta x = \frac{L}{d} \lambda$ 。通过测量条纹间距 Δx ，就可以间接测出光的波长 λ 。由于可见光的波长 λ 很小，比值 $\frac{L}{d}$ 必须足够大才能较为准确地测量波长 λ 。

利用单色光的双缝干涉图样，测量相关物理量，通过计算得到单色光的波长。

实验装置与方法

实验装置如图 4-21 所示。从左到右依次为可调亮度的激光器（光源）、已知间距的双缝、光强分布传感器。

光强分布传感器可通过测量光屏上的光强分布数据得到干涉条纹间距 Δx ，测量双缝到传感器接收面的距离 L ，便可得到激光器发出的单色光的波长 λ 。



图 4-21 实验装置

实验操作与数据收集

调节光源的亮度以及激光器、双缝、传感器的相对位置，使与传感器连接的计算机屏幕上呈现清晰的干涉图样。选定不相邻的两条暗纹，测出其中中心间距，并算出相邻暗纹的间距 Δx ，用刻度尺测量双缝到传感器接收面的距离，将数据记录在表 4-5 中，通过计算获得单色光的波长。

改变双缝到传感器接收面的距离，再次测量 Δx 。

表 4-5 实验数据记录表

实验序号	双缝间距 d/mm	双缝到传感器接收面距离 L/cm	相邻暗纹间距 $\Delta x/\text{cm}$
1			
2			

数据分析

根据 $\Delta x = \frac{L}{d} \lambda$ 的关系，求得激光器发出的单色光的波长。

实验结论

所测激光器发出的单色光的波长 $\lambda =$ _____ m。

交流与讨论

改变双缝到传感器接收面的距离后，干涉图样有什么变化？如果直接测量相邻暗纹间距，对测量结果是否有影响？

► 薄膜干涉

潮湿地面上残留的油膜在阳光下呈现出七彩的颜色；原本透明的肥皂泡飘荡在空中，在阳光的照射下变得五彩斑斓；这些现象都是光干涉的结果，如图 4-22 所示。日常生活中的很多现象都与光的干涉有关。



图 4-22 阳光下的油膜和肥皂膜

自主活动

将一个深色的杯子浸入肥皂液，取出后会在杯口形成一层肥皂膜，如图 4-23 所示，杯口侧倒，让肥皂膜竖直，观察肥皂膜上的花纹。用酒精灯作为光源照射肥皂膜，在灯芯上撒一些食盐，酒精灯的火焰将变为黄色，观察肥皂膜上出现的现象。

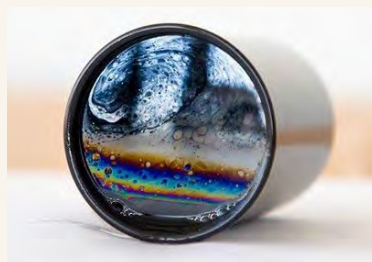


图 4-23 杯口上的肥皂膜

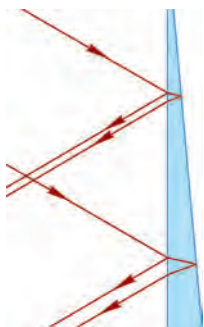


图 4-24 肥皂膜前后表面反射示意图

观察实验现象发现，在自然光下肥皂膜上出现水平的彩色条纹；酒精灯灯芯加盐后照射，肥皂膜上出现水平的黄色条纹。

产生这一现象的原因是照射到肥皂膜上的光从膜的前后两个表面反射回来。两列反射光由同一光源产生，满足相干条件，能够发生干涉。竖立的肥皂膜在重力作用下形成了上薄下厚的楔形结构，如图 4-24 所示。在某一厚度的地方两列反射光互相加强，出现明条纹；在另一厚度的地方两列反射光互相抵消，出现暗条纹。

自然光中不同色光的波长不同，出现明纹和暗纹的位置不同，从而

在薄膜表面互相交叠呈现出彩色条纹。

这种光照射到薄膜上，从膜的两个表面分别反射形成相干光而互相叠加的干涉现象，称为薄膜干涉。

STSE

薄膜干涉可以用来检查镜面或其他精密光学平面的平整度。如图 4-25 (a) 所示，在待测平面上放置一个透明标准样板，在样板的一侧垫一张纸片。在标准样板的下表面与待测平面之间形成了一个楔形的空气膜。用单色光从上垂直向下照射，光在空气层的上下两个表面反射形成相干光，发生干涉。如果待测平面非常平整，会出现如图 4-25 (b) 所示的平行条纹。如果待测平面不够平整，条纹就会出现弯曲，如图 4-25 (c) 所示。

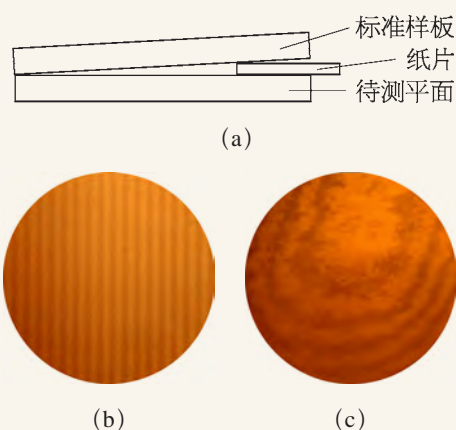


图 4-25 干涉检测物体表面平整度

问题与思考

1. 教室里的两盏相同的灯同时照射时，为什么观察不到光的干涉图样？
2. 将如图 4-26 (a) 所示的半径很大的平凸透镜放在一块平板玻璃上。单色光从上方垂直入射，在凸透镜和平板玻璃之间的空气膜上下表面反射，反射光互相干涉。从上往下观察，可以看到如图 4-26 (b) 所示的明暗相间的圆环状条纹，这种条纹称为牛顿环。说说为什么条纹是圆形的。

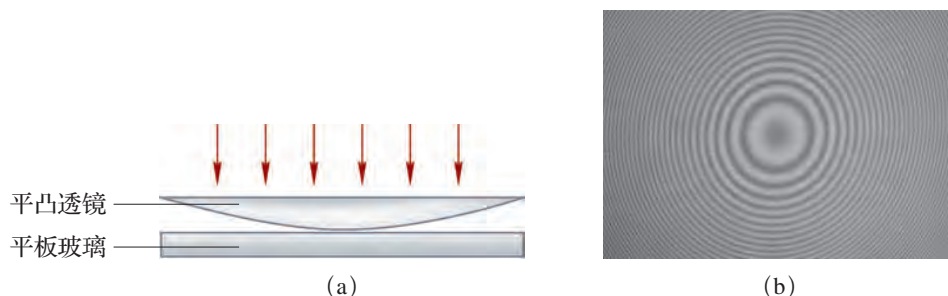


图 4-26

3. 在明亮的光线下以一定角度观察眼镜镜片，能观察到什么现象？分析出现这种现象的原因。

4. 阳光下的肥皂泡上呈现出彩色的花纹，花纹随肥皂泡形状而变化。用光的干涉原理解释上述现象。
5. 图 4-27 所示为某兴趣小组为测试无线电发射器发出的电磁波频率而设计的装置示意图。将无线电发射器与两个相距为 d 的天线相连，两个天线同时向外发送相同的信号。信号接收器装在小车上，小车沿着与两天线连线平行、距离为 L 的直轨道以速度 v 匀速运动。发现接收器接收到的信号有规律地变化，时强时弱。相邻两次接收到最强信号的时间间隔为 Δt 。利用上述信息确定无线电发射器发射的无线电波的频率。

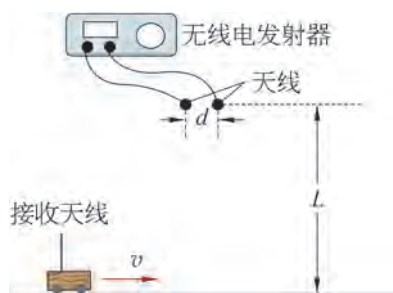


图 4-27

第四节 光的衍射和偏振

光具有波动性，除了能发生干涉，也一定会产生衍射。但是在日常生活中，我们通常观察到光沿直线传播，并没有绕过障碍物到达其背后的阴影区域。可见，观察光的衍射也需要满足一定的条件。

► 光的衍射

对于机械波而言，障碍物或孔隙的尺寸与波长相差不大时才能观察到明显的衍射现象。由于光波的波长很短，远小于常见物体的尺寸，我们很难在日常生活中观察到光的衍射现象，所以一般可以近似地认为光是沿直线传播的。

自主活动

在如图 4-28 所示的装置中，用激光照射狭缝，改变狭缝的宽度，观察光屏上光强分布的变化。

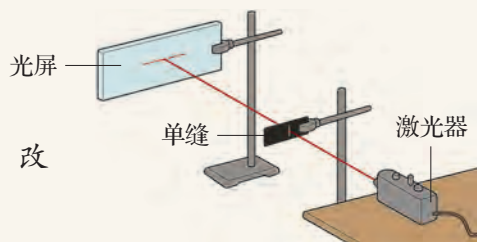


图 4-28 单缝衍射实验装置图

实验观察到，光屏上被照亮的范围比缝的宽度大得多，而且出现了明暗相间的分布 (图 4-29)；若将狭缝改为小圆孔，也会有类似的现象，在光屏上出现明暗相间的同心圆环 (图 4-30)。

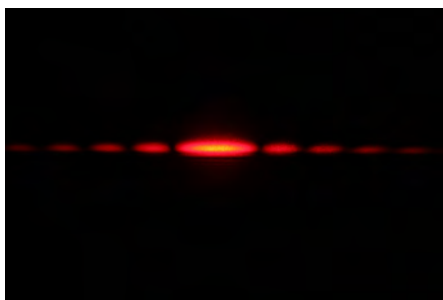


图 4-29 光通过狭缝的衍射图样



图 4-30 光通过小孔的衍射图样

当光在传播过程中遇到孔隙（或障碍物）后，偏离原来的直线传播方向绕过孔隙（或障碍物）继续传播的现象称为光的衍射。

STSE

科学家可以通过衍射图样来推断障碍物或孔隙的空间结构和形状。用激光束从侧面水平照射竖直弹簧，如图 4-31 (a) 所示。光屏上会出现如图 4-31 (b) 所示的衍射图像。而如图 4-32 所示为 1952 年拍摄的首张 DNA 分子 X 射线衍射图像，与图 4-31 (b) 十分相似。当年科学家正是根据照片中的信息提出了 DNA 分子的双螺旋结构。

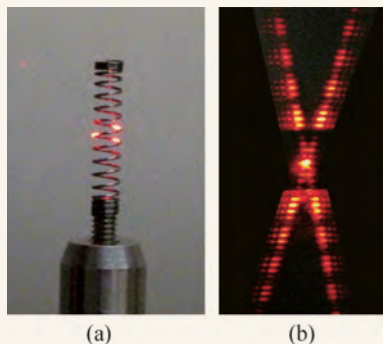


图 4-31 激光照射弹簧的衍射图样

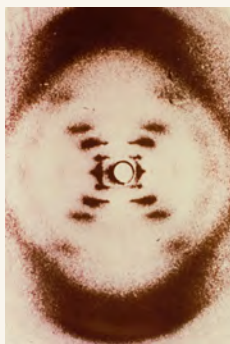


图 4-32 DNA 分子的 X 射线衍射图样

1818 年，法国科学院组织了一次竞赛，目的是要解决光到底是粒子还是波的问题。年轻的工程师菲涅耳 (A.-J. Fresnel, 1788—1827) 在其投送的论文中按照波动说的理论深入地研究了光的衍射，提出了解决衍射问题的数学方法。竞赛评委泊松 (S. D. Poisson, 1781—1840) 是波动说的反对者，他认为菲涅耳的论文有问题。根据菲涅耳的分析他推演出，如果把不透光的小圆盘放在光束的中心，圆盘影子的中心竟然会出现一个亮斑！泊松认为这是非常荒谬的，波动说可以休矣。但不久之后，竞赛委员会的主席阿拉果 (F. Arago, 1786—1853) 却在实验中发现圆盘影子的中心确实存在亮斑。泊松的计算反而为光的波动说提供了有力支持。毕竟这个亮斑是由泊松首先推演出来的，为了纪念泊松的质疑对光学研究的促进作用，后人将这个亮斑称为“泊松亮斑”。

自主活动

如图 4-33 (a) 所示，用激光照射直径略小于激光束的不透明圆盘，观察光屏上的现象。

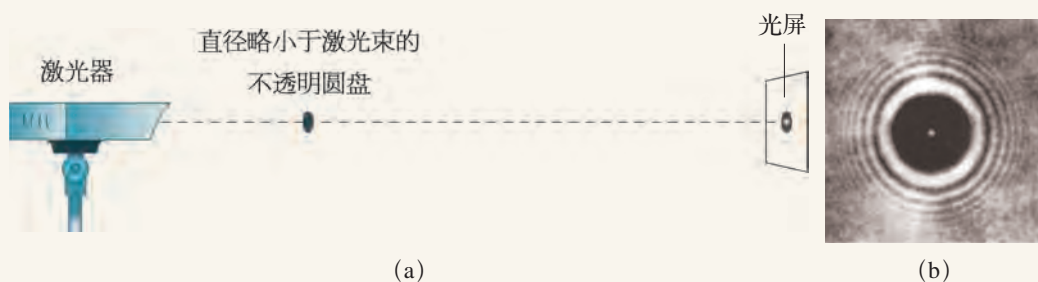


图 4-33 圆盘衍射

可以观察到，光屏上不透明圆盘的阴影中心确实有一个亮斑。

光通过一条狭缝会衍射，光通过平行的多条狭缝同样会衍射。狭缝越窄、狭缝数量越多，光的衍射现象越明显。激光防伪技术就是利用激光在印有图案的表面上沿不同方向刻上密排的细条纹。光通过这些细条纹发生衍射，形成特定的彩色图案来防伪。如图 4-34 所示即为纪念币上的防伪标识。



图 4-34 防伪标识

大家谈

声波的波长范围为 $0.017\sim 17\text{ m}$ ，人眼可感知的可见光范围为 $400\sim 760\text{ nm}$ 。请解释“只闻其声不见其人”现象的原因。

► 光的偏振

光能够发生干涉和衍射现象表明光是一种波。作为电磁波的光到底是横波还是纵波？

在绳波的传播方向上放置一个有狭缝的木板。沿绳传播的横波可以穿过如图 4-35 (a) 所示的狭缝；若将狭缝旋转 90° ，波就无法通过了，如图 4-35 (b) 所示。而纵波是沿着波的传播方向振动的，所以无论狭缝的方向如何，纵波都可以穿过。

可以利用类似的方法来检验光是横波还是纵波。在实验室中，通常用“偏振片”来实现狭缝的功能，其作用是只让沿一定方向振动的光波通过。

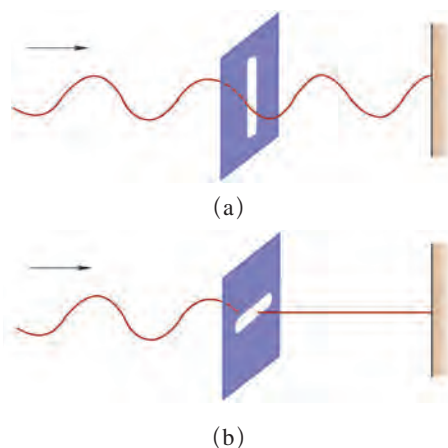


图 4-35 判断横波的示意图

自主活动

在光的传播路径上放一块偏振片 A，使光通过 A 照射到光屏上，观察光屏上的现象 (图 4-36)；在光的传播路径上再放一块偏振片 B，保持 A 不动，转动 B，或保持 B 不动，转动 A，观察光屏上的现象。

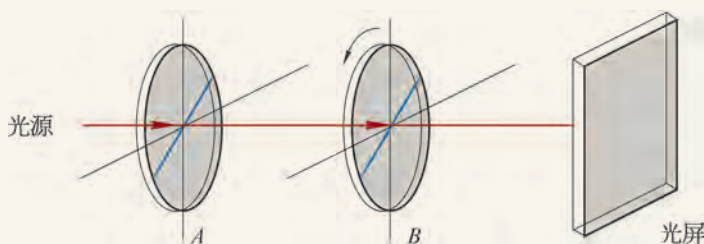


图 4-36 偏振片检测光的横波特征

观察得到,随着 A 或 B 的转动,光屏上的光斑亮度随之变化。当两偏振片处在某个特定位置时,没有光线到达光屏。这一现象可以用光是横波来解释。

电磁理论指出,电磁波是横波,横波的振动方向总和传播方向垂直。不同的横波,即使传播方向相同,振动方向也可能不同,这样的现象称为**偏振 (polarization)**。偏振现象是横波区别于纵波的一个标志。

普通光源发出的光,在垂直于光传播方向的平面内包含一切振动方向的光,这样的光称为自然光。图 4-36 中偏振片 A 称为起偏器,偏振片 B 称为检偏器。自然光经过起偏器 A 后,在垂直于传播方向的平面内光只沿一个特定的方向振动,这种光称为偏振光,这个特定方向就称为偏振片的偏振方向。转动 B ,使 B 与 A 偏振方向的夹角变化,屏上光斑的亮度随之相应变化,当两者的偏振方向互相垂直时,屏上的光强最弱。自然光在玻璃、水面等物体表面发生反射和折射时,反射光和折射光都是不同程度的偏振光。

光的偏振现象有许多应用。如拍照时阳光、闪光灯光都会影响戴眼镜人的拍摄效果;拍摄橱窗和鱼缸内景物时,也会因明亮的反射光而受干扰。在镜头上加装偏振滤光片就能减弱反射光对拍摄的影响。

拓展视野

普通光源(如日光、各种照明光源等)发出的自然光,是由构成发光物质的大量原子、分子同时发射的光波组成。虽然每个原子或分子都发出一列长度有限、沿某一方向振动的光波,但不同原子或分子发出的光波的振动方向是随机的。自然光是由大量随机发出的光波组成,光的振动出现在各个方向的概率相同。如果用带箭头的直线表示光的振动方向,在与光传播方向相垂直的平面内,自然光的振动如图 4-37 所示。为了获得仅沿某确定方向振动的偏振光,通常是让自然光经过某些具有一定内部结构的透明物质后射出。自然光在物质中传播时,由于光与物质的相互作用,导致除沿某特定方向振动的光之外,沿其他方向振动的光波能量均被物质吸收,从而出射的是只沿一个方向振动的偏振光。这个方向就是该物质的偏振方向。

观众戴上眼镜观看立体电影有身临其境的感觉。立体电影是利用人双眼的视角差和会聚功能制作的可产生立体感觉的电影(图 4-38)。立体电影拍摄时使用两台摄像机同时拍摄景物的双视

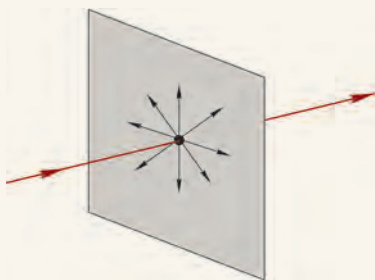


图 4-37 自然光的振动方向

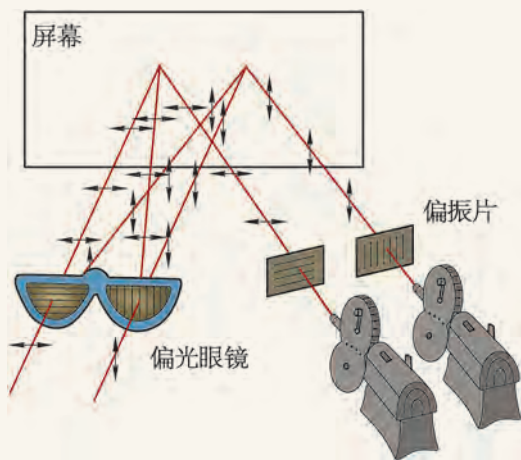


图 4-38 观看立体电影示意图

点图像。放映时使用两台放映机将两个视点的图像同步放映，在两台放映机前分别装有两个偏振片，偏振片的偏振方向互相垂直。从放映机射出的光通过偏振片后的偏振方向也互相垂直。这时如果用眼睛直接观看，看到的画面是重叠的，有些模糊不清。观众使用对应上述偏振光的偏振眼镜观看银幕，左眼只能看到左机映出的画面，右眼只能看到右机映出的画面，两眼看到的画面略有差别，从而产生立体感。

问题⑤思考

1. 用激光笔垂直照射一根细铜丝，观察光屏上的衍射图样有什么特点。在垂直光线的平面内转动铜丝，又会观察到什么现象？
2. 如何证实液晶屏发出的光为偏振光？
3. 某同学做了三个单缝，如图 4-39 所示为用激光分别照射三个单缝得到的衍射图样。比较三个单缝的宽度。
4. 如图 4-40 所示，甲、乙两图是同一单色光分别透过孔径为 $d_{\text{甲}}$ 和 $d_{\text{乙}}$ 的两圆孔后在光屏上形成的图样。由图样比较 $d_{\text{甲}}$ 和 $d_{\text{乙}}$ 的大小。

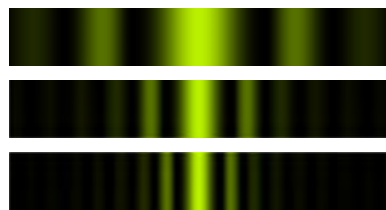


图 4-39



图 4-40

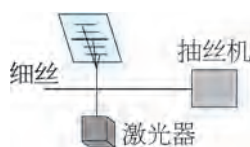


图 4-41

5. 柔软的耳机线中有很多粗细均匀的细铜丝。对这些细铜丝的加工要求非常高。工厂中利用如图 4-41 所示的装置，用激光器照射细铜丝，对抽丝过程实施自动控制。这一技术利用了光的什么现象？如果发现光屏上的条纹变宽，表明此时抽出的铜丝粗细发生了怎样的变化？为什么？
6. 强光突然照射眼睛，会使人产生短时间视觉障碍。为了避免夜间迎面驶来的汽车远光灯发出的强光带来的安全隐患，某同学做了如下设想：将汽车前灯玻璃和汽车前窗玻璃都改用偏振玻璃。这样的设想如何实现使双方司机不受对方车辆发出的强光的影响？

第五节 激光

在我们的生活中存在各种各样的光源，如太阳、萤火虫、蜡烛、日光灯、弧光灯等。激光（laser）是 20 世纪 60 年代才出现的一种新型光源。

► 激光

早在 1916 年爱因斯坦就提出了“光可以被放大”这一设想。直到 1959 年，汤斯（C. H. Townes, 1915—2015）等人发表了关于实现激光的论文。1960 年，梅曼（T. H. Maiman, 1927—2007）发明了世界上第一台激光器。1961 年，中国科技人员研制出了我国第一台红宝石激光器。1964 年，我国著名科学家钱学森受邀为 LASER 取了“激光”这个贴切的中文名称。

当前，激光技术在工农业生产、光纤通信、宽带网络、信息处理、医疗卫生、文化教育、科技研究、军事发展等多方面都发挥着重要的作用。如图 4-42 所示为 2016 年 G20 峰会文艺演出中激光投影技术呈现出的舞台效果。



图 4-42 激光投影效果



图 4-43 激光扫描条形码

如图 4-43 所示，激光扫描仪正在检读条形码。黑色线条对激光的反射率低；浅色条纹对激光的反射率高，被激光扫描仪识读后转换为计算机能接受的二进制信息。条码技术的应用大大促进了商品流通和管理的信息化。

拓展视野

设 E_1 和 E_2 是原子中电子的两个不同能级。当电子从较高能级 E_2 自发地跃迁到较低能级 E_1 时会发射出一个光子，该过程称为“自发辐射”。如果有一个能量恰好等于高低能级能量差的外来入射光子，处于较高能级 E_2 的电子会在外来光子“诱发”下跃迁到较低能级 E_1 ，并发射出一个与外来光子完全相同的光子，如图 4-44 所示，该过程称为“受激辐射”。每入射一个光子，就会辐射出两个与入射光子完全相同的光子。这意味着原来的光信号被放大了。若受激辐射产生的光子在介质中传播时又诱发了更多的其他原子发生相同的受激辐射，就会产生越来越多的相同光子。这些光子的性质完全相同，光信号被进一步放大。这种在受激过程中被放大的光就是激光。

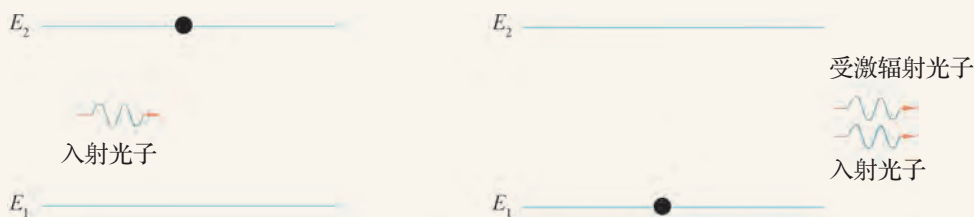


图 4-44 受激辐射

► 激光的特性

与普通光源发出的光相比，激光有着显著不同的特性，主要表现在：方向性好、单色性好、相干性好、亮度高四个方面。

普通光源发出的光都是向四面八方辐射的，无论我们采用什么物理方法，都很难获得理想的平行光束。即使采用凹面镜、聚光镜等光学器件，可将光会聚成近似平行的光束；但若照射距离较大，光束仍会发散，在远处呈现大而暗淡的光斑。

如图 4-45 所示，激光是沿一定方向发射、沿直线辐射的很细的光束，其发散角仅为 0.001 rad 左右。即使照射到离地球 $380\,000 \text{ km}$ 外的月球，激光束在月球上的光斑直径仍不足 2 km 。如果用探照灯往月球照射（实际上这是不可能的），其光斑直径将达几百千米。激光的方向性是普通光源无法企及的。因此，激光常被广泛应用于测距、通信、雷达和制导等方面。

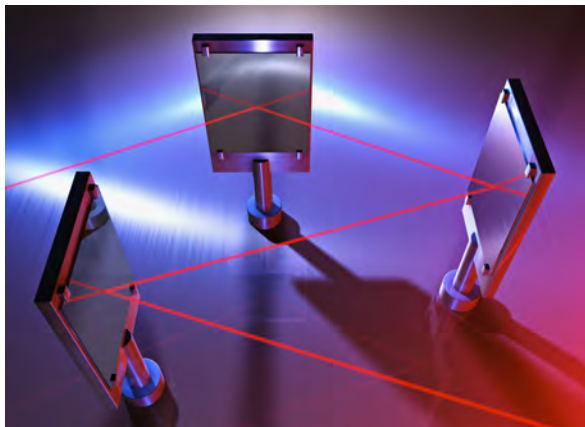


图 4-45 激光光束的方向性

拓展视野

激光之所以具有这么好的方向性要归功于激光器谐振腔的特殊结构。全反射镜和部分反射镜构成如图 4-46 所示的光学谐振腔。根据光的传播规律，凡是偏离轴线的光或直接逸出腔外，或经过几次来回反射后逸出腔外，不可能形成较强的光束。只有那些传播方向严格地与谐振腔轴线平行的光子才能在腔体内通过反复来回反射受激放大，因此，从激光器输出的激光束是与谐振腔的轴线平行一致的光束。

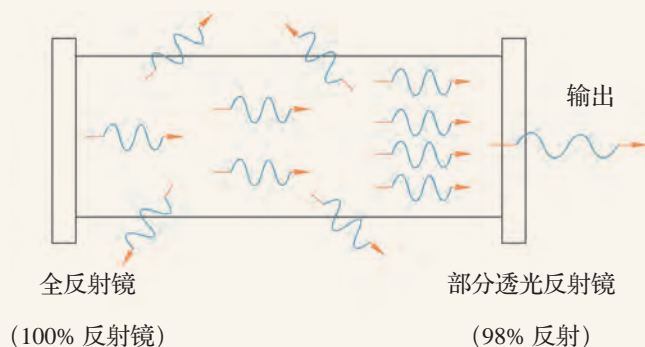


图 4-46 光学谐振腔

光的颜色由光在真空中的波长决定。“单色光”的波长范围越小，这种色光的单色性就越好。例如，氪（Kr86）灯发射的红光波长为 605.7 nm ，其波长的变化范围为 $4.710 \times 10^{-4}\text{ nm}$ 。而 He-Ne 激光器发出的红色激光波长为 632.8 nm ，其波长的变化范围仅为 $2 \times 10^{-9}\text{ nm}$ ，比氪（Kr86）灯红光的单色性提高了几十万倍。由于具有良好的单色性，激光常被用于精密测量、精准定位和测速等。

我们曾用激光束直接照射双缝，观察光屏上干涉条纹的特点。这是由于激光具有很好的相干特性，激光照射双缝后，能在光屏上看到清晰的干涉条纹。

激光的高度相干性使人们可以像利用无线电波一样用激光携带信号，通过光导纤维传输文字、声音、图像，从而实现了通信手段的重大突破。

全息技术也称“虚拟成像技术”，是利用干涉和衍射原理记录并再现物体三维信息的技术。全息技术不仅可以产生立体的空中幻象，还可以使幻象与表演者互动，一起完成表演，产生令人震撼的演出效果。全息技术利用了光的干涉原理。只有激光出现后，全息技术才得到长足的发展。

由于激光的方向性好，能量可以在空间沿发射方向高度集中，亮度比普通光源有极大提高。在机械制造中，常需按一定的形状切割或焊接厚度达几厘米至几十厘米的钢板。由于激光具有方向性好、能量集中的突出优点特别适用于加工各种材料，焊接（图 4-47）、打孔、切割（图 4-48）等。激光不仅能干削铁如泥的“重活”，还可以在金属、水晶上雕刻，甚至在金刚石上“钻”出极其细小完美的小孔。在超大规模集成电路的研制与开发中激光已成为关键技术。



图 4-47 激光焊接金属



图 4-48 激光切割金属

激光雷达是以激光作为光源，通过向被测目标发射激光，测量反射或散射信号确定被测目标的距离、运动速度及方位。激光雷达可以全天候作业，具有测距精度高、重量轻、功耗低的优点。

STSE

如图 4-49 所示为上海超强超短激光实验装置。超强超短激光指峰值功率大于 1 TW (太瓦, $1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W}$), 脉冲宽度小于 100 fs (飞秒, $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$) 的激光。2017 年 10 月, 中科院上海光机所和上海科技大学超强激光光源联合实验室成功实现上海超强超短激光实验装置 (SULF) 10 PW (拍瓦, $1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ W}$) 激光放大输出, 脉冲宽度为 21 fs。这是已知的世界最高激光脉冲峰值功率, 达到国际同类研究的领先水平。



图 4-49 上海超强超短激光实验装置

问题⑤思考

1. 在阳光下用激光笔照射墙壁依然可以看到很亮、很小的光斑。这说明激光具有什么特性？在使用激光笔时需要注意什么？
2. 激光具有普通光源不具备的一些特性，主要有：单色性好、强度大、传播方向性好等。在下列利用激光特性的实际应用中，利用了激光的哪些特性？
 - (1) 在光纤通信中利用激光在光纤中传递信息。
 - (2) 在医院，利用激光进行手术。
 - (3) 利用激光测距仪精确测量远处目标的距离。
3. 除了上述的应用外，激光还有哪些应用？这些应用利用了激光的什么特性？

学期活动

了解人类对光的本性的认识过程。

在认识光的本性的过程中，人们经历了微粒说和波动说之争。随着科学的发展，人们对这个问题的认识逐步深入。

阅读书籍并查阅相关资料，了解这一历史过程，体会实验和理论在科学研究中的作用，撰写读书报告。

活动要求：

(1) 摘录书本上关于光的本性认识的重要事件（相关人物，时间节点，主要观点），标明出处（如“……”摘自《××》第××页。）

(2) 按一定的顺序排列上述信息。

(3) 确定从一个角度（如：科学方法、认识论、科学技术推动社会发展等角度）切入，对人类探索光的本性的过程作出评述。

(4) 在班级内进行展示与交流。

小结

• 基本概念和基本规律

折射：光从介质 1 入射到介质 1 与介质 2 的分界面时，部分进入介质 2，并改变传播方向的现象。

折射定律：当光从介质 1 射入介质 2 时，折射光线与入射光线、法线处在同一平面内，折射光线与入射光线分别位于法线的两侧；入射角的正弦与折射角的正弦之比为—常数。

折射率：光从真空射入某种介质发生折射时，入射角的正弦与折射角的正弦的比值。

全反射：当光从光密介质射向光疏介质的入射角大于某一角度时，光全部反射回光密介质的现象。

光的干涉：两束相干光在空间相遇，彼此叠加，在一些区域振动相互加强，在另一些区域振动相互减弱，且分布稳定的现象。

光的衍射：光在传播过程中遇到孔隙（或障碍物）后，偏离原来的直线传播方向绕过孔隙（或障碍物）继续传播的现象。

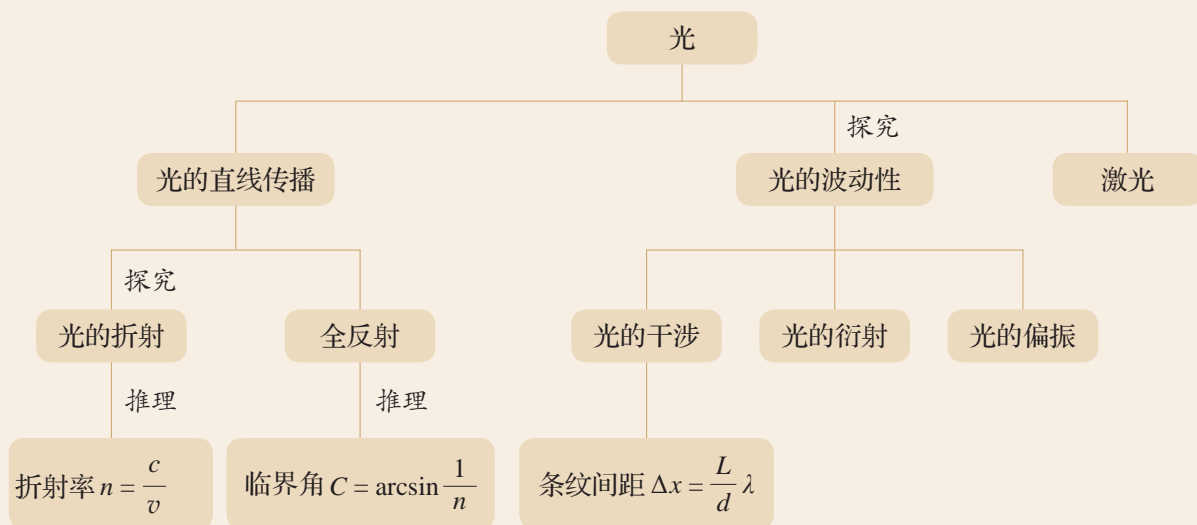
光的偏振：在垂直于光传播方向的平面内光波沿某一或某些方向振动的现象。

• 基本方法

在探究光的折射现象过程中，运用归纳、推理与实验探究结合的方法。

通过观察干涉、衍射现象，感受利用证据进行论证的方法。

• 知识结构图



复习与巩固

1. 如图 4-50 所示, 在两块平板玻璃的一侧垫上两张纸片。用光垂直照射玻璃, 由上向下观察, 可看到干涉条纹。若抽掉一张纸片, 还能看到干涉条纹吗? 如果还能看到, 视野中看到的干涉条纹有何变化?



图 4-50

2. 在双缝干涉实验中, 以白光为光源, 可在光屏上观察到彩色干涉条纹。设想用红色和绿色滤光片分别盖在两条缝上, 是否还会在屏幕上看到明暗相间的光强分布?
3. 如图 4-51 所示, 有两块相同的玻璃直角棱镜 ABC 与 $A'B'C'$, 将 AC 面与 $A'C'$ 面平行放置并置于空气中, 一束单色光垂直于 AB 面由左侧入射。画出光经两块棱镜后出射的光路图。

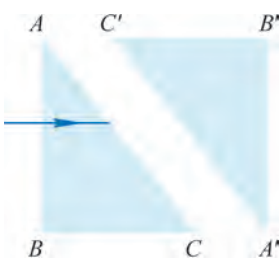


图 4-51

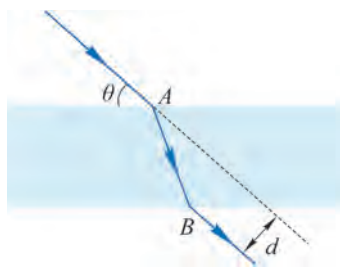


图 4-52

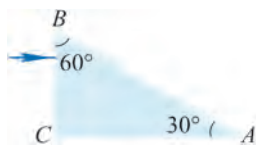


图 4-53

4. 如图 4-52 所示, 上、下表面平行的玻璃砖放在空气中, 一束光从玻璃砖上表面的 A 点射入, 入射方向与玻璃砖表面成 θ 角。光进入玻璃砖后经过又一次折射, 从玻璃砖下表面的 B 点射出, 出射光线相对于入射光线的延长线有一水平偏移, 移动距离为 d 。如果使入射方向与玻璃砖表面的夹角 θ 逐渐增大, 光在玻璃中的传播时间以及出射光线偏离入射方向的距离将如何变化?
5. 如图 4-53 所示, 折射率为 1.41 的直角棱镜 ABC 置于空气中。一束光从直角棱镜的 BC 面垂直射入后又从棱镜中射出, 其出射方向与 AC 面之间的夹角为多大?
6. 某同学利用微波发射器和接收器研究电磁波。发射器可发射频率为 10 GHz 的一定强度的电磁波, 接收器可显示接收到电磁波的强度。
- (1) 如图 4-54 (a) 所示, 接收器和发射器置于同一直线上, 在发射器和接收器前均加装一偏振片, 此时接收器显示接收到的信号最强。若接收器按图示方向沿轴线转动, 接收到信号的强度如何变化?
 - (2) 如图 4-54 (b) 所示, 在发射器和接收器之间放置一块带双缝的金属平板, 接收器沿虚线移动时, 接收器接收到信号的强弱会发生变化。解释为何接收器位于双缝连线的中垂线上时, 接收到的信号最强。

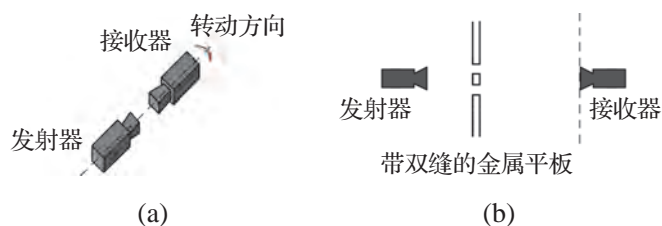


图 4-54

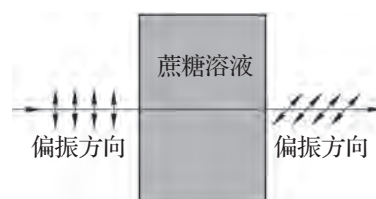


图 4-55

7. 蔗糖溶液具有一种称为“旋光性”的光学性质。当沿某一方向振动的偏振光经过蔗糖溶液后，出射的偏振光会相对入射偏振光的振动方向转过一个角度（图 4-55），角度的大小 α 与蔗糖溶液的浓度 c 间的关系为 $c = k\alpha$ 。常数 k 与光在溶液中传播的距离和温度有关。简述如何利用两块偏振片比较不同蔗糖溶液的浓度。
8. 如图 4-56 所示为一根长为 L 、折射率为 n 的实心玻璃棒。为了保证一束光从玻璃棒一个端面的中心射入后只从另一个端面射出。在入射端面上，光的最小入射角为多少？

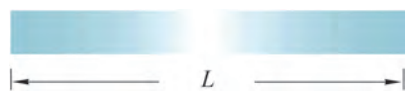


图 4-56

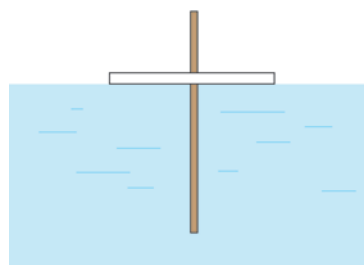


图 4-57

9. 如图 4-57 所示，将一根标有刻度的细直棒从直径为 d 的圆形泡沫板中心垂直插入。将该装置漂浮在液体表面，调整细棒插入液体的深度，同时从液面上方观察。发现当细棒插入液体中一定深度时，从液面上方任何方向观察，都恰好看不到液体中的细棒。读出此时细棒浸入液体的深度 L ，即可得到液体的折射率。分析产生该现象的原因，求出液体的折射率。
10. 如图 4-58 (a) 所示为光分别通过狭缝、正方形孔与圆孔后产生的衍射图样（缝和孔的形状标于各图的右下方）。当光通过正六边形孔时，会在光屏上产生如图 4-58 (b) 所示的衍射图样。根据图 (a) 中提供的信息，分析说明产生图 (b) 衍射图样的原因。

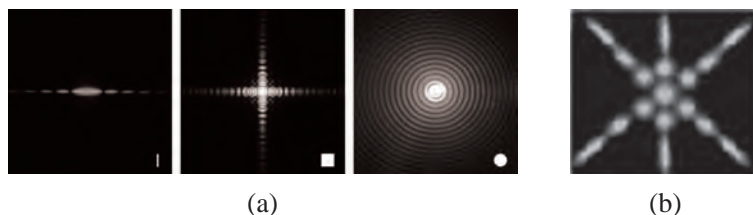


图 4-58

附录

索引

摆的等时性 / 34

波长 / 50

波的反射 / 54

波的干涉 / 58

波的图像 / 49

波的衍射 / 60

波的折射 / 55

波峰 / 47

波谷 / 47

波速 / 50

波形图 / 49

波源 / 46

薄膜干涉 / 85

冲量 / 6

单摆 / 32

地震波 / 47

动量 / 4

动量定理 / 7

动量守恒定律 / 11

多普勒效应 / 63

反冲 / 14

非弹性碰撞 / 14

傅科摆 / 32

共振 / 39

固有频率 / 34

光的反射 / 71

光的干涉 / 81

光的偏振 / 90

光的衍射 / 87

光的折射 / 71

光密介质 / 73

光疏介质 / 73

光纤 / 79

横波 / 47

回复力 / 28

机械波 / 45

机械振动 / 23

激光 / 92

简谐运动 / 24

临界角 / 79

马赫锥 / 65

密部 / 47

内力 / 11

牛顿环 / 85

偏振 / 90
偏振片 / 89
频率 / 24
平均冲力 / 8
泊松亮斑 / 88
驱动力 / 38
全反射 / 79
全振动 / 24
入射角 / 71
艏波 / 65
受激辐射 / 93
受迫振动 / 38
疏部 / 47
双缝干涉实验 / 81
水面波 / 47

弹簧振子 / 23
弹性碰撞 / 14
外力 / 11
相干光源 / 81
谐振腔 / 94
折射定律 / 72
折射率 / 73
振动图像 / 23
振幅 / 25
周期 / 25
自发辐射 / 93
自然光 / 90
自由振动 / 24
纵波 / 47

后记

本教材根据教育部颁布的《普通高中物理课程标准（2017年版）》编写并经国家教材委员会专家委员会审核通过。

本教材是在上海市高中物理“二期课改”教材的基础上全面改写而成的，当年参加编写的主要人员有张越、徐在新、刘齐煌、谭玉美、唐一鸣、冯容士、蒋元方、倪闽景、王铁桦等。王铁桦、朱广天、汤清修、陈刚、金松、胡卫平、袁芳、桑嫣、潘苏东等给本教材的编写提出了不少宝贵意见。马世红、王祖源、陆昉、陈树德、蒋平、冀敏在本教材编写的各个阶段审阅了书稿。编写过程中，上海市中小学（幼儿园）课程改革委员会专家工作委员会，上海市教育委员会教学研究室，上海市课程方案教育教学研究基地、上海市心理教育教学研究基地、上海市基础教育教材建设研究基地及基地所在单位华东师范大学，上海市物理教育教学研究基地（上海高校“立德树人”人文社会科学重点研究基地）及基地所在单位复旦大学给予了大力支持。在此一并致谢。

本教材出版之前，我们就教材中使用的照片、图片等选用作品，通过多种途径与作者进行了联系，得到了他们的大力支持，在此表示衷心的感谢！对于未联系到的作者，我们也希望作者能及时联系出版社，以便支付相应的稿酬。

欢迎广大师生来电来函指出教材的差错和不足，提出宝贵意见。

2020年5月

本册教材图片提供信息：

本册教材中的图片由视觉中国、IC photo 和中国全球图片总汇（图 3-43）等提供。

物理

选择性必修 第一册



绿色印刷产品

ISBN 978-7-5478-5294-1



定价：8.70 元