



普通高中教科书


W U L I

# 物理

选择性必修

第一册



 广东教育出版社

普通 高中 教科 书


# 物 理

选择性必修

第一册

主编 熊建文



 广东教育出版社

· 广州 ·

## 图书在版编目(CIP)数据

物理：选择性必修. 第一册 / 熊建文主编. —广州：广东教育出版社，2020.2（2021.12重印）

普通高中教科书

ISBN 978-7-5548-2981-3

I. ①物… II. ①熊… III. ①中学物理课—高中—教材  
IV. ①G634.71

中国版本图书馆CIP数据核字（2019）第187548号

编写单位 广东教育出版社

主 编 熊建文

副 主 编 王笑君 姚跃涌

本 册 主 编 何琴玉

本册副主编 黄爱国

核心编写人员（以姓氏笔画为序）

宁 革 朱美健 许桂清

李朝明 张军朋 周少娜

出版人 朱文清

责任编辑 陈洁辉

责任技编 杨启承 陈 瑾

装帧设计 何 维 梁 杰

物理 选择性必修 第一册

WULI XUANZEXING BIXIU DIYI CE

广东教育出版社出版

（广州市环市东路472号12-15楼）

邮政编码：510075

网址：<http://www.gjs.cn>

广东新华发行集团股份有限公司发行

广州市新思程印刷有限公司印刷

（广州市番禺区沙头街大富村白仙岗4号）

890毫米×1240毫米 16开本 8.5印张 200 000字

2020年2月第1版 2021年7月第5次印刷

ISBN 978-7-5548-2981-3

定价：10.05元

批准文号：粤发改价格〔2017〕434号 举报电话：12315

著作权所有·请勿擅用本书制作各类出版物·违者必究

如有印装质量或内容质量问题，请与我社联系。

质量监督电话：020-87613102 邮箱：[gjs-quality@nfc.com.cn](mailto:gjs-quality@nfc.com.cn)

购书咨询电话：020-87772438

# 前言

欢迎进入《物理》选择性必修第一册的学习。

本册将在必修课的基础上，学习较为复杂的物质相互作用和运动以及这些复杂运动所涉及的能量与运动形式的物理规律。

我们在必修课学习的作用力较为简单，大小与方向至少有一个恒定。本册将学习一种力的大小随时间无规则变化的物体相互作用——碰撞，以及力的大小和方向都随时间变化的物体运动——振动。碰撞过程的作用力大但不恒定；产生振动的力（回复力）的方向总是与物体运动方向相反，使得物体在某个位置附近来回运动。

从能量的角度来讲，碰撞是自然界能量传递的一种基本形式。两个物体通过碰撞将能量从一个物体传递给另一个物体。物体振动产生的波也会传播能量，机械波通过带动波传播方向上相邻介质质点在平衡位置的振动来传播机械能。机械波的传播需要媒介，但电磁波的传播不需要媒介，所以电磁波的应用更为广泛。但无论是哪种波，都有反射、折射、衍射和干涉等特征，其中横波还具有偏振特性。

本册第一章讨论碰撞和描述碰撞过程的动量定理、动量守恒定律，以及碰撞过程中能量的传递和变化情况。认识机械能守恒、动量守恒等自然界的守恒定律，体会自然界的运动之美。第二章讨论简谐运动模型，认识简谐运动的力、运动和能量特征，以及简谐运动的图像与函数描述。介绍需要输入能量以维持振动的受迫振动，以及受迫振动中的特例——共振。第三章讨论机械波的形成条件、波的传播以及多普勒效应等。第四章介绍光的反射、折射、干涉、衍射和偏振等特性，了解激光及其应用。

学习物理是一个动手动脑、体验物理学魅力的过程，为此，本书设计了一系列引人入胜的栏目。在“观察与思考”栏目，锻炼观察、描述、分析物理现象的能力。在“实验与探究”栏目，体会问题、证据、解释、交流等要素在开展科学探究中的重要性。在“讨论与交流”栏目，展示我们对物理问题的见解，感受思维碰撞的乐趣。在“实践与拓展”栏目，发散我们的思维，在实践性的课题探索中提升创新能力，认识科学、技术、社会与环境发展的关系。在“资料活页”栏目，感悟物理学史上科学家们的智慧，感受前沿科技的成就。在“练习”和“习题”栏目，巩固对物理概念与规律的理解，学习解决实际问题的方法。在“本章小结”栏目，通过知识结构图梳理全章的知识主线，回顾和整理学习成

果，反思自己的学习情况。

学习物理，不仅是为了记住物理概念和认识物理规律，而且是为了帮助我们形成正确的物理观念，指导我们认识自然万物；培养科学思维，辩证地分析实际生产和生活中遇到的问题；学会科学探究的方法，培养基于观察和实验探究自然规律的能力；形成正确的科学态度与社会责任意识。这才是物理学习的要义，让我们共同努力！

# 目 录



## 第一章 动量和动量守恒定律 1

第一节	冲量 动量	2
第二节	动量定理	7
第三节	动量守恒定律	12
第四节	动量守恒定律的应用	17
第五节	弹性碰撞与非弹性碰撞	22
第六节	自然界中的守恒定律	26



## 第二章 机械振动 35

第一节	简谐运动	36
第二节	简谐运动的描述	42
第三节	单摆	47
第四节	用单摆测量重力加速度	51
第五节	受迫振动 共振	55



### 第三章 机械波 65

---

第一节	机械波的产生和传播	66
第二节	机械波的描述	70
第三节	机械波的传播现象	76
第四节	多普勒效应	83



### 第四章 光及其应用 91

---

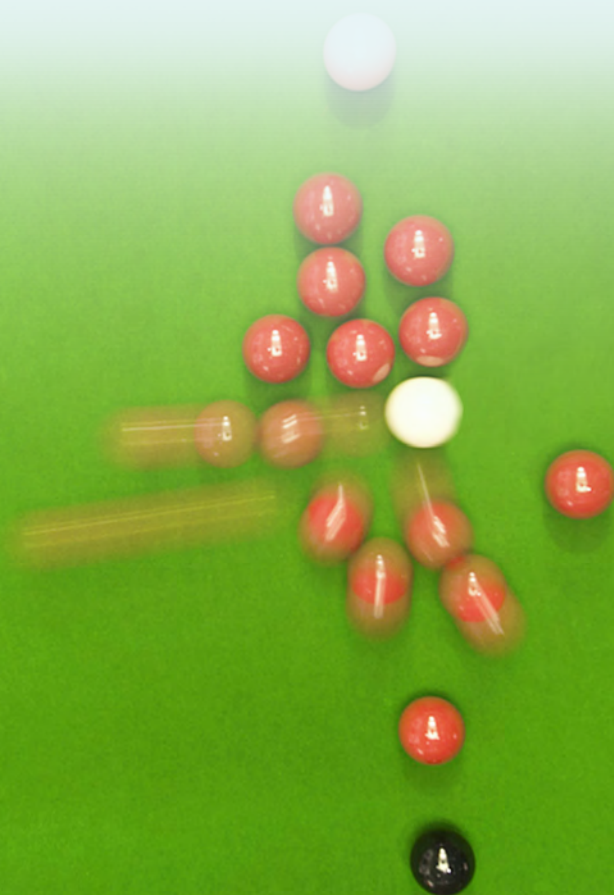
第一节	光的折射定律	92
第二节	测定介质的折射率	97
第三节	光的全反射与光纤技术	101
第四节	光的干涉	106
第五节	用双缝干涉实验测定光的波长	111
第六节	光的衍射和偏振	116
第七节	激光	121

# 第一章

# 动量和动量守恒定律

冲击、碰撞是常见的物理现象，如打桩机打桩、台球碰撞等。这类现象发生时间极短，力、速度等物理量的变化规律复杂，直接运用牛顿运动定律难以处理。为了研究这类问题，物理学家们引入了动量的概念，并在牛顿运动定律的基础上确定了与动量有关的规律。应用与动量有关的知识，这类问题就容易解决了。

本章从描述碰撞的物理量——冲量和动量入手，探究动量定理和动量守恒定律；通过利用动量守恒定律对相关现象的具体分析，体会应用动量守恒定律解决问题的便捷。





## 第一节

## 冲量 动量



一把重锤不一定能将静止的飞机机头砸扁，而一只飞鸟却能将高速飞行的飞机机头撞扁，为什么看似柔弱的小鸟的破坏性比重锤还大呢？如何描述其碰撞过程？物体碰撞效果究竟与什么因素有关？运动场上跳远的落地点要铺上细沙，跳高的落地点要铺上海绵垫，易碎的物品在运输过程中要用塑料泡沫或空气垫等包装，生活中这些常识蕴含了哪些与碰撞有关的物理知识呢？

## 冲量

我们有这样的经验：鸡蛋从一定高度掉到地上会摔破，但如果地上垫了海绵，鸡蛋则可能完好无损。这两次碰撞前后鸡蛋速度的变化是一样的，但碰撞中受到的作用力却显然不同，这是为什么？让我们先观察一个实验，再思考用什么物理量能恰当地描述碰撞过程。



## 观察与思考

将一个钢球从同一高度分别自由下落到坚硬的木板和垫有海绵的木板上，用力传感器测出钢球碰撞时作用力的大小，用与力传感器相连的数据采集器记录下力随时间的变化。如图 1-1-1 所示是某次实验获得的钢球从同一高度落下碰撞不同材质垫块的实验结果。

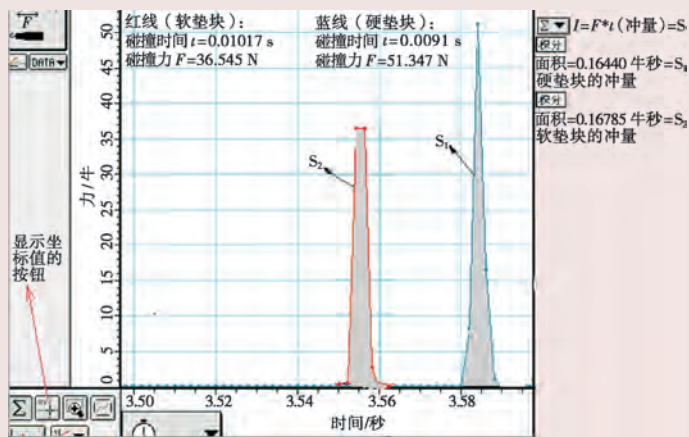


图 1-1-1 某次实验获得的钢球从同一高度落下碰撞不同材质垫块的实验结果

实验表明，同一钢球从同一高度下落分别与不同材质的垫块相碰，相互作用力的大小明显不同。相对而言，钢球与坚硬垫块的相互作用力大一些，作用时间短一些，但钢球碰到不同材质垫块时，碰撞曲线下阴影面积的大小很接近。这个面积表示碰撞过程中作用力在时间上的积累  $Ft$  ( $F$  可以理解为作用时间  $t$  内的平均作用力)。这说明对于同一钢球，从同一高度下落，与不同材质的垫块相碰时，作用力在时间上的积累  $Ft$  是一个常数。

从以上实验可知， $Ft$  在碰撞过程中可能是一个重要的物理量。在物理学中，将  $Ft$  定义为冲量 (impulse)，用  $I$  表示，即

$$I = Ft \quad (1.1.1)$$

冲量是矢量，它的方向由力的方向决定，如果力的方向在作用时间内不变，冲量的方向与力的方向相同。对一个随时间变化的力来说，冲量的大小等于如图 1-1-1 所示的力—时间图像下方的阴影面积。冲量的单位是牛秒，符号是  $\text{N}\cdot\text{s}$ 。

### 观察与思考

如图 1-1-2 所示，利用两个不同质量的钢球、半盒细沙、一张小板凳（用一块薄木板和四枚长钢钉做成）做如下实验：



图 1-1-2 实验器材

(1) 把小板凳平放在细沙表面，分别用不同质量的钢球从同一高度落下碰撞小板凳，观察小板凳两次陷入细沙中的深度。

(2) 把小板凳平放在细沙表面，同一钢球分别从不同高度落下碰撞小板凳，观察小板凳两次陷入细沙中的深度。

讨论影响碰撞的因素还有哪些。

从以上实验可知，碰撞过程涉及相互作用力、作用时间、质量和速度几个物理量。

## 动量

下面我们从牛顿运动定律出发，研究钢球下落到海绵垫块时相互作用力、作用时间、质量和速度的关系。设钢球的质量为  $m$ ，从高处下落至与海绵垫块相碰前的速度为  $v$ ，碰撞  $t$  秒后静止，碰撞过程中平均作用力为  $F$ 。视碰撞过程为匀减速直线运动。

根据牛顿第二定律，有

$$F = ma$$

由匀减速直线运动的速度公式，有

$$v_t = v - at$$

因为钢球与海绵垫块相碰最终的速度为零，故可以得到

$$Ft = mv$$

从以上表达式可以看出，在钢球与垫块发生碰撞至静止过程中冲量  $I$  与  $mv$  有关，故  $mv$  也是一个研究碰撞时需要考虑的物理量。在物理学中，将质量和速度的乘积  $mv$  叫作物体的动量（momentum），用符号  $p$  表示，即

$$p = mv \quad (1.1.2)$$

动量也是一个矢量，它的方向与速度的方向相同，单位是千克米每秒，符号是  $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}$ 。



### 讨论与交流

冲量与动量，哪个与碰撞过程有关？哪个描述物体的运动状态？

冲量与物体碰撞过程有关，动量描述物体的运动状态。

我们知道，动能  $\frac{1}{2}mv^2$  是一个用来衡量物体机械运动的物理量。那么，动量和动能有什么区别呢？历史上，科学家在研究机械运动时分别提出过将动量和动能用来量度物体的运动，经过长时间的争论，最后确定这两个物理量都可以用来量度物体的运动，但两者的区别在于：动量  $mv$  是一个与力在时间上的积累有关的物理量，具有方向性，是矢量，它表示传递机械运动的本领；动能  $\frac{1}{2}mv^2$  是一个与力在空间上的积累有关的物理量，是标量，它表示物体做功的本领。

### 历史上关于运动量度问题的争论

17 世纪是力学蓬勃发展的时期，为了从量的方面去研究和把握力学运动规律，科学家们都希望能找到一个恰当的物理量来描述物体的运动，这就是运动的量度问题。

#### 笛卡儿派的观点

1638 年，意大利物理学家伽利略（G. Galilei, 1564—1642）在研究打击现象时发现，打击效果与锤子的重量和速度两者存在密切关系。因此，他主张用两者的乘积作为运动的量度。

法国科学家笛卡儿 (R. Descartes, 1596—1650) 继承与发展了伽利略的上述研究思想, 他在 1644 年出版的《哲学原理》一书中写道: “当一部分物质的速度是另一部分物质速度的两倍, 而另一部分物质却是这部分物质的两倍时, 我们应该认为这两部分的物质具有等量的运动。”显然, 笛卡儿把物质的多少和速度的乘积作为物体“运动的量”的量度。但由于那时“质量”的概念尚未建立, 而且笛卡儿并未考虑速度的方向性, 因此“运动的量”的意义并不十分明确。



图 1-1-3 笛卡儿

笛卡儿指出: “每当一部分的运动减少时, 另一部分的运动就会相应地增加。”上述表述隐含了运动守恒的思想, 将度量物体运动的研究推向了一个新的高度, 对后续科学家的研究产生了深远的影响。

荷兰科学家惠更斯 (C. Huygens, 1629—1695) 在笛卡儿的基础上, 通过碰撞实验研究认为, 在计算“运动的量”时应考虑速度的方向性, 这是对“运动的量”概念的一大发展。但是惠更斯与笛卡儿一样还没有明确质量的概念, 常常把重量概念与质量概念混用, 因此这时“运动的量”概念还是处在形成与发展过程中。

英国物理学家牛顿 (I. Newton, 1643—1727) 在 1687 年出版的《自然哲学之数学原理》中, 首次明确定义了质量的概念, 紧接着就定义了“运动的量”, 他说: “运动的量由速度与质量的乘积决定。”此处“运动的量”即后来普遍使用的概念“动量”, 这是物理学史上第一次真正建立了动量的概念。牛顿还通过牛顿第二定律, 揭示出在物体的相互作用中, 正是动量这个物理量反映着物体运动变化的客观效果。这样, 把动量作为运动的量度, 在 17 世纪的几十年间, 一度得到了科学家的普遍承认。

### 莱布尼茨派的观点

到 17 世纪 80 年代, 德国科学家莱布尼茨 (G. Leibniz, 1646—1716) 率先发表论文, 对笛卡儿派的运动量度提出挑战。他认为, 使 1 磅 (1 磅 = 0.4536 千克) 重的物体自由下落 4 英尺 (1 英尺 = 0.3048 米) 和使 4 磅重的物体自由下落 1 英尺, 这两种情况下所得的效果是相同的, 因为它们下落到地面时引起的形变相同, 但是这两种自由落体运动得到的动量  $mv$  却不相等, 而是质量与速度平方的乘积  $mv^2$  相等。因此, 应该以  $mv^2$  作为运动的量度, 并把  $mv^2$  称为活力。后来根据科里奥利的建议以  $\frac{1}{2}mv^2$  代替  $mv^2$ , 这就是后来所说的运动物体的动能。



图 1-1-4 莱布尼茨

此后, 莱布尼茨派与笛卡儿派在运动的量度问题上各自强调自己所依据的事实和推理方法, 相持不下近半个世纪。欧洲许多著名科学家都卷入了这场争

论，并且形成了两大对立的学派。这些争论有效地推动了关于运动量度问题的深入探讨。

### 争论的平息

1743年，法国科学家达朗贝尔（J. d'Alembert, 1717—1783）对这场争论做了总结性的评述，指出两种量度都是有效的，但是用在不同的地方。他认为，当物体平衡时，“运动物体的力”用  $mv$  来量度；当物体受障碍而停止时，只能用物体克服障碍的能力来表示，这时就要用  $\frac{1}{2}mv^2$  来量度。

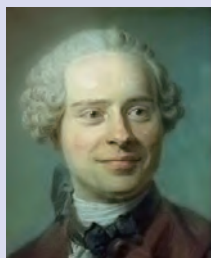


图 1-1-5 达朗贝尔

达朗贝尔所做的评述，模糊地谈到了动量的变化和力的作用时间有关，“活力”的变化和力的作用距离有关，但是还没有完全澄清这一争论的混乱。

直到 19 世纪后期，德国哲学家恩格斯（F. Engels, 1820—1895）根据当时自然科学最新成就，揭示了两种量度的本质区别。他认为，在不发生机械运动和其他形式的运动能量转化的情况下，运动的传递和变化的情况可以用动量去量度；但当发生了机械运动和其他形式的运动能量转化的情况下，则应以动能去量度。

关于运动量度的这场历史争论表明，不同的人从不同的角度、根据不同的事实去研究同一问题时，是会提出不同的见解的。科学认识的历史是不同的观点不断争论的历史。通过科学争论，帮助人们的认识从片面走向全面，从肤浅走向深刻，它是推动科学进步所必需的一个重要环节。



### 练习

1. 在公园里有多个高度相同、倾角不同的滑梯，一名小孩从静止沿不同滑梯的光滑斜面下滑至底端，小孩的动量是否相同？如果小孩质量为  $20\text{ kg}$ ，斜面倾角为  $30^\circ$ ，高为  $5\text{ m}$ ，取  $g = 10\text{ m/s}^2$ 。求小孩下滑过程中的重力、支持力、合力的冲量。
2. 飞行表演中，飞机在水平面内做匀速圆周运动，请问：飞机刚好飞行一周时向心力的冲量是多少？动量的变化是多少？
3. 篮球运动员接传来的篮球时，通常要先伸出两臂迎球，手触到球瞬间顺势后引。用所学的物理知识解释这样做的目的。
4. 请仔细观察日常生活现象，找出通过延长作用时间来减小相互作用力的实例，再找出通过缩短作用时间来增大相互作用力的实例。

## 第二节

## 动量定理



物体在不为零的合力作用下，动量会发生改变。下面我们从牛顿第二定律出发，考察任意一段时间内物体的动量和合力作用之间的关系。

### 动量定理的推导

如图 1-2-1 所示，一个物体质量为  $m$ ，初速度为  $v_0$ 。在恒定合力  $F$  的作用下，经过一段时间  $t$ ，速度变为  $v_t$ 。根据牛顿第二定律，

$$F = ma$$

由运动学公式，

$$a = \frac{v_t - v_0}{t}$$

可得

$$Ft = mv_t - mv_0 \quad (1.2.1)$$

式 (1.2.1) 表明，物体所受合力的冲量等于物体动量的改变量。这称为**动量定理** (theorem of momentum)。

从动量定理可知：若发生一个大的动量变化，必定有一个大的冲量。而一个大的冲量，既可以是在很短的时间内作用一个较大的作用力，也可以是用一个较小的作用力作用较长的时间。结合前面的实验结果可知，冲量是力对时间的积累。

动量定理不但适用于恒定的外力，而且适用于随时间而变化的变力。在后一种情况下，动量定理中的力  $F$  通常取力在作用时间内的平均值。

### 动量定理的应用

动量定理在生活生产中有很多应用。如用冲床冲压钢板，冲头受到钢板对它的冲量作用，冲头的动量在短时间内变为零，钢板受到很大的作用力，于是钢板被冲断。在此例中，是通过缩短作用时间来得到很大的作用力。同样，在生活生产中还经常通过延长作用时间来减小作用力。如在轮渡码头上装有橡皮轮胎，轮船停靠码头时，靠到橡皮轮胎处，

轮胎发生变形. 轮胎作为缓冲装置, 延长了作用时间, 可以减小轮船停靠时所受的作用力. 又如高速行驶的汽车, 应使刹车时间长一些才能让车上的人员不会受到较大的冲击力. 下面我们通过一道例题来定量讨论刹车时间的问题.

**例题 1:** 一辆质量为 2200 kg 的汽车正在以 90 km/h 的速度匀速行驶. 突然前方出现复杂路况, 如果驾驶员马上轻踩刹车逐渐制动, 汽车在 21 s 内停下; 如果驾驶员马上急踩刹车紧急制动, 可在 3.8 s 内使车停下. 求这两种情况下使汽车停下的平均作用力.

**分析:** 这两种情况速度变化量相同, 平均作用力和作用时间不同. 只有平均作用力是未知量, 可运用动量定理求解.

**解:** 如图 1-2-2 所示, 设汽车初始运动方向为正向, 则初始动量为正, 平均作用力  $F$  的冲量为负.

汽车的初速度  $v_0 = 90 \text{ km/h} = 25 \text{ m/s}$ ,

初动量  $p_0 = mv_0 = 2200 \times 25 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 5.5 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ ,

末动量  $p_t = mv_t = 0$ .

根据动量定理  $Ft = p_t - p_0$ , 有

$$F = \frac{p_t - p_0}{t}.$$

将  $t = 21 \text{ s}$  和  $t = 3.8 \text{ s}$  分别代入上式, 求出平均作用力分别为  $-2.6 \times 10^3 \text{ N}$ 、 $-1.4 \times 10^4 \text{ N}$ . 负号表示平均作用力的方向与汽车速度的方向相反.



图 1-2-2 汽车在两种制动情况下受到的平均作用力



### 讨论与交流

若例题 1 的刹车时间换成表 1-2-1 中的刹车时间, 请根据不同的刹车时间分别计算要多大的平均作用力才能使汽车停下, 并计算汽车从开始刹车到停下所滑行的距离, 将计算的值填入表中相应位置. 分析这些数据, 并说一说有什么领悟?

表 1-2-1 汽车在不同刹车时间的运动情况

汽车刹车时间 $t/\text{s}$	20	10	5	2.5	1
使汽车停下的平均作用力 $F/\text{N}$					
汽车刹车过程滑行的距离 $s/\text{m}$					

从表 1-2-1 可以看出, 行驶中的汽车要想在紧急刹车时受到较小冲击力, 必须有较长的刹车时间. 所以行车时要预判哪些情况下可能需要紧急刹车, 如在三岔路口和靠近人群的地方, 应提前减速以减小紧急刹车时的冲击力和刹车过程滑行的距离, 保证行车安全.

我们常常需要利用动量定理指导生活与生产活动. 如在木板或者墙上钉钉子, 生活的经验告诉我们, 用重锤快速地捶打钉子, 可以更容易将钉子钉入. 这里我们通过一个例子来定量理解为什么用重锤快速地捶打时更容易将钉子钉入.

**例题 2:** (1) 用质量为 0.2 kg 的锤子捶打竖直墙壁上的一颗钉子. 锤子接触钉子瞬间, 速度的大小为 5 m/s, 锤头反弹起来时, 速度的大小为 2 m/s, 锤子与钉子接触时间为 0.1 s, 则锤子对钉子平均打击力的大小是多少?

(2) 若锤子捶打和反弹的速度不变, 锤子与钉子接触时间也不变, 改用一个质量为 0.4 kg 的锤子捶打, 则锤子对钉子平均打击力的大小是多少?

(3) 若锤子捶打速度的大小变为 10 m/s, 反弹速度的大小不变, 锤子与钉子接触时间也不变, 锤子质量为 0.2 kg, 则锤子对钉子平均打击力的大小是多少?

**分析:** 由牛顿第三定律可知锤子对钉子平均打击力的大小等于钉子对锤子平均反作用力的大小. 这个力可以用动量定理来求. 设锤子质量为  $m$ , 锤子接触钉子瞬间的速度为  $v_1$ , 反弹速度为  $v_2$ , 钉子对锤子的平均反作用力为  $F$ , 锤打时间为  $\Delta t$ .

**解:** 取打击前锤子的速度方向为正方向, 由动量定理, 有

$$F\Delta t = mv_2 - mv_1.$$

在 (1) 的情况下, 有

$$F = \frac{mv_2 - mv_1}{\Delta t} = \frac{0.2 \times (-2) - 0.2 \times 5}{0.1} \text{ N} = -14 \text{ N};$$

在 (2) 的情况下, 有

$$F = \frac{mv_2 - mv_1}{\Delta t} = \frac{0.4 \times (-2) - 0.4 \times 5}{0.1} \text{ N} = -28 \text{ N};$$

在 (3) 的情况下, 有

$$F = \frac{mv_2 - mv_1}{\Delta t} = \frac{0.2 \times (-2) - 0.2 \times 10}{0.1} \text{ N} = -24 \text{ N};$$

由牛顿第三定律可知, 在 (1)、(2)、(3) 情况下, 锤子对钉子平均打击力的大小分别为 14 N, 28 N, 24 N.

从例题 2 可以看出, 用重锤快速地捶打钉子更容易将钉子钉入墙内.

利用动量定理, 我们还可以解释飞鸟为什么能撞扁高速飞行的飞机头部. 设飞机速度的大小为  $v$ , 飞鸟的质量为  $m$ , 速度的大小为  $v'$ , 碰撞时间为  $t$ , 取飞机飞行方向为正方向. 因为飞鸟与飞机相撞后速度与飞机的速度相同, 其速度变化量为  $v + v'$ , 碰撞前后飞鸟的动量变化量为  $m(v + v')$  (其中  $m$  是鸟的质量). 根据动量定理和牛顿第三定律, 飞机受到飞鸟的撞击力  $F$  为  $\frac{m(v + v')}{t}$ , 若取  $m = 1 \text{ kg}$ ,  $v = 200 \text{ m/s}$ ,  $v' = 20 \text{ m/s}$ ,  $t = 0.01 \text{ s}$ , 则  $F = 22\,000 \text{ N}$ .

这就是飞鸟能将高速飞行的飞机机头撞扁的原因.

生活中严禁高空抛物也是同样的道理. 假设从 20 层高楼楼顶 (每层楼高约 3 m) 落下一个质量为 0.1 kg 的苹果, 苹果落到楼下地面时与地面相撞, 撞击时间为 0.1 s. 我们来算一下苹果撞击地面的平均撞击力  $F$  有多大. 苹果到达地面撞击地面前面的速度  $v = \sqrt{2gh} \approx 34.6 \text{ m/s}$  (取  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ), 苹果撞击楼下地面后速度为零. 根据动量定理, 可求得  $F = 34.6 \text{ N}$ . 如果苹果落到楼下的人或物上, 可能会造成很大的伤害, 所以我们严禁高空抛物.



动量定理只考虑物体相互作用始末状态，不考虑具体过程和细节。在涉及力、力的作用时间、速度的问题时，采用动量定理分析和处理物理问题比较简捷。



## 实践与拓展

尝试根据动量定理分析运动鞋减震设计的原理。

## 资料活页

### 安全带和安全气囊在碰撞中的保护作用

在汽车碰撞安全保护措施中，安全带和安全气囊是目前最有效的乘客约束保护装置。据统计，仅使用安全带就可以减少 42% 左右的乘客死亡率。安全气囊的保护作用十分明显，它能够在汽车碰撞时大大减轻乘客受伤的程度，单独使用可以减少 18% 的死亡率，而与安全带配合使用则可减少 47% 的死亡率。

汽车座椅安全带系统将乘客的身体约束在座椅上，在汽车发生碰撞时，防止乘客身体冲出座椅而与方向盘、仪表盘等车内部件发生碰撞，将乘客的伤害程度降到最低（如图 1-2-3 所示）。在汽车发生翻滚事故时，也可以防止乘客被抛离座椅。

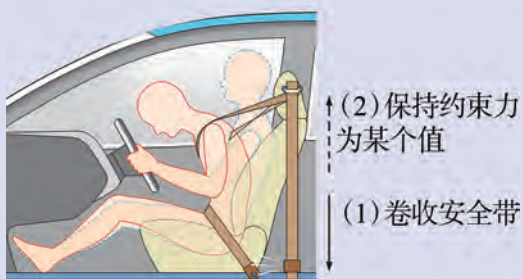


图 1-2-3 安全带工作原理

资料分析表明，安全带的使用在以下两方面效果明显：一是在碰撞事故中，不使用安全带的死亡人数是使用安全带的 17 倍；二是从乘客的伤害程度来看，在车速为 20 km/h 时，乘客不使用安全带就有发生死亡事故的危险，而在车速为 95 km/h 时，如果使用三点式安全带，如图 1-2-4 (a) 所示，乘客虽有不同程度的损伤，但不会死亡，也不会被抛甩出车外。全背式安全带是在两点式腰带上再连两条肩带组合而成，如图 1-2-4 (b) 所示。全背式安全带保护效果最好，也是最完善的一种，但使用不便，一般只用于特殊需要时或在赛车上使用。

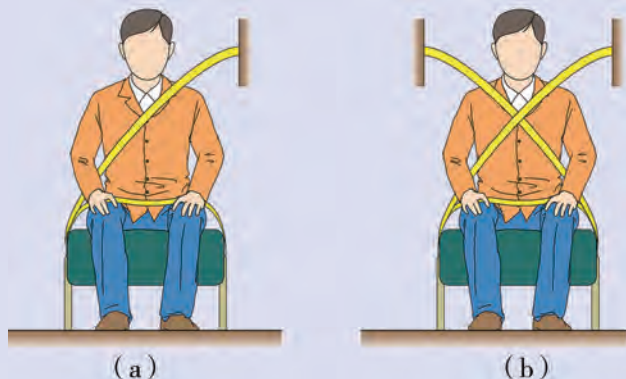


图 1-2-4 安全带种类

如图 1-2-5 所示分别是发生碰撞时使用安全带与不使用安全带驾驶员身体各部位的受伤率, 其中使用安全带时驾驶员头部的受伤率约为 36.1%, 而不使用安全带时驾驶员头部的受伤率高达 51.6%。

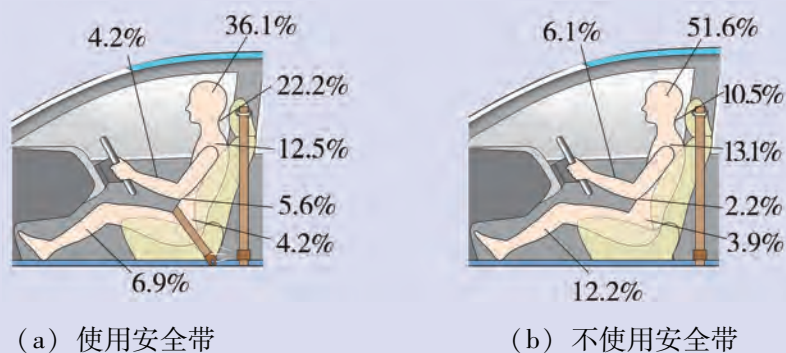


图 1-2-5 安全带对人体不同部位的保护效果

在安全带和气囊组成的安全保护系统中, 乘客需做到正确调节安全座椅的位置, 按要求正确系安全带, 采用正确的驾驶坐姿, 使自己处在一个合理的空间位置. 驾驶过程中, 在复杂道路上要谨慎驾驶, 车速合理, 以便能提前处理突发事件, 遇突发事故不慌乱就可以最大程度保证驾乘人员的行车安全.

## 练习

1. 一名 80 kg 的特技演员从一个距离地面 5 m 高的窗户跳出, 触地瞬间他的速度是多少? 若他落在一个大安全气垫上, 在 1.5 s 后静止, 这一过程中他感受到的平均作用力是多大? 如果他直接落到地上呢? (假设碰撞时间  $t = 0.01$  s) 哪种情况下特技演员受到的伤害大? ( $g$  取  $10 \text{ m/s}^2$ )
2. 有一艘宇宙飞船, 它的正面面积  $S = 3.5 \text{ m}^2$ , 以  $v = 2 \times 10^3 \text{ m/s}$  的速度飞入一宇宙微粒尘区, 此尘区每立方米空间有一个微粒, 微粒的平均质量  $m = 2 \times 10^{-7} \text{ kg}$ . 要使飞船速度保持不变, 飞船的牵引力应增加多少? (设微粒与飞船外壳碰撞后附于飞船上)
3. 一个质量为 0.18 kg 的垒球, 以 25 m/s 的水平速度飞向球棒, 被球棒打击后, 反向水平飞回, 速度的大小为 45 m/s. 设球棒与垒球的作用时间为 0.01 s, 则球棒对垒球的平均作用力为多大?

### 第三节

## 动量守恒定律



从动量定理可知，若物体所受合力为零，则其动量不发生改变。

物体之间碰撞时一定有相互作用力，单个物体所受合力为零的情况很少；而若将两个相互作用的物体看成一个系统，则该系统所受合力为零的情况很常见。我们把系统内物体之间的相互作用力叫作**内力**，系统外部其他物体对系统的作用力叫作**外力**。那么，对于两个物体组成的系统，当整个系统合外力为零时，系统总动量保持不变。

### 动量守恒定律的推导

下面让我们结合牛顿运动定律，分析合外力为零的系统的动量变化情况。

如图 1-3-1 所示，物体 1 和物体 2 在光滑水平面上碰撞。设物体 1 和物体 2 的质量分别为  $m_1$ 、 $m_2$ ，碰撞前，物体 1 和物体 2 的速度分别为  $v_1$ 、 $v_2$ 。碰撞时，物体 1 对物体 2 的作用力为  $F_{12}$ ，物体 2 对物体 1 的作用力为  $F_{21}$ ，物体 1 与物体 2 的碰撞时间为  $t$ 。碰撞后，物体 1 和物体 2 的速度分别为  $v_1'$ 、 $v_2'$ 。则根据牛顿第三定律，有

$$F_{12} = -F_{21}$$

由动量定理，对于物体 1，有

$$F_{21}t = m_1 v_1' - m_1 v_1$$

对于物体 2，有

$$F_{12}t = m_2 v_2' - m_2 v_2$$

得

$$(m_1 v_1' + m_2 v_2') - (m_1 v_1 + m_2 v_2) = 0$$

即物体在碰撞时，如果系统所受合外力为零，则系统的总动量保持不变。这就是**动量守恒定律**（Law of conservation of momentum），用数学公式表示为

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2' \quad (1.3.1)$$

动量守恒定律并不限于两个物体的相互作用，一个系统里可以包括任意数目的物体。在碰撞时这些物体可以黏合在一起，也可以相互分离。但只要整个系统受到的合外力等于

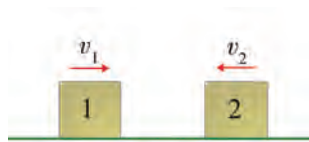


图 1-3-1 光滑平面上两个物体发生碰撞

零或在某个方向为零，系统的总动量或该方向的动量分量就守恒。下面用一个实验验证动量守恒定律。

## 动量守恒定律的验证

我们通过用两个钢球的碰撞来验证动量守恒定律。由于动量守恒定律是在系统合外力或者某个方向合外力为零时遵循的，故钢球碰撞时必须满足合外力或某个方向合外力为零的条件。实验过程中，需要测量两个钢球碰撞前与碰撞后的运动速度。

### 实验与探究

如图 1-3-2 所示的装置常用来验证动量守恒定律。根据验证动量守恒定律的原理，结合装置图，思考下列问题。

- (1) 利用图 1-3-2 所示装置，如何实现两个球碰撞过程满足动量守恒的条件？
- (2) 如何测量两个钢球碰撞前后的速度？
- (3) 实验中需要记录哪些数据？

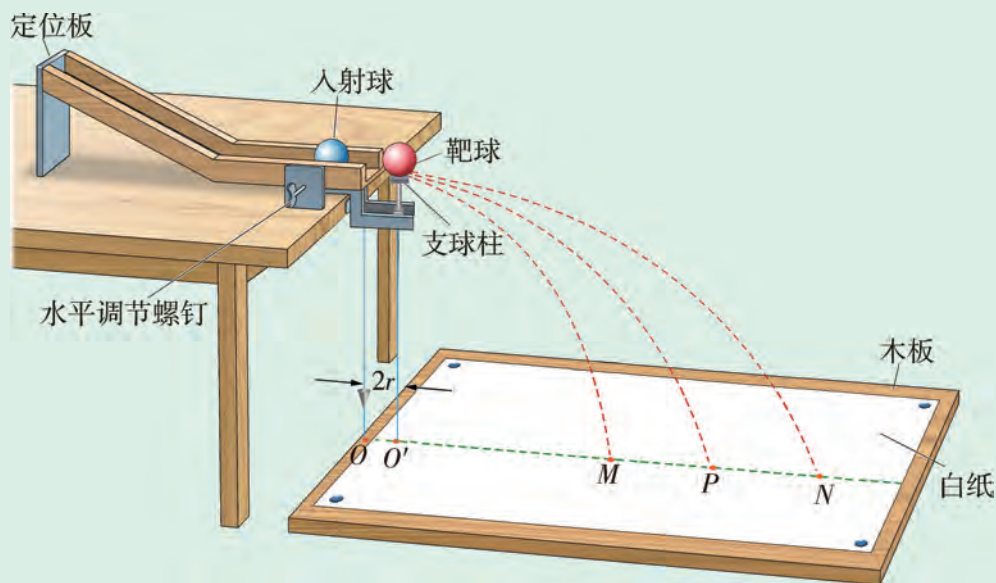


图 1-3-2 验证动量守恒定律的装置图

按照以下步骤进行实验：

(1) 按图 1-3-2 所示安装实验仪器，通过水平调节螺钉使斜槽末端处于水平，钢球放在上面能保持静止状态。在木板上依次铺上白纸、复写纸。利用重垂线在白纸上分别标注斜槽水平段端口、靶球初位置（支球柱）在白纸平面的投影点  $O$  和点  $O'$ 。

(2) 用天平测出两个大小相同、但质量不同的钢球的质量，质量大的钢球  $m_1$  作为入射球，质量小的钢球  $m_2$  作为靶球。

(3) 先让入射球单独从斜槽上端紧靠定位板的位置自由滑下，在白纸上留下落地碰撞的痕迹。

(4) 让入射球从斜槽上端同一位置自由滑下, 与放在支球柱上的靶球发生碰撞, 两球分别在白纸上留下落地碰撞的痕迹.

(5) 测出入射球  $m_1$  两次落地碰撞点与点  $O$  的距离  $s$  和  $s_1$ , 靶球  $m_2$  落地碰撞点与点  $O'$  的距离  $s_2$ .

注意: 入射球的质量必须大于靶球的质量. 每次都要控制入射球从相同的高度自由滑下. 在调节实验装置时, 要使固定在桌边的斜槽末端点的切线水平, 支柱与槽口间距离等于钢球直径, 而且两球相碰时处在同一高度. 想想这样做的原因.

由于钢球离开斜槽末端后做平抛运动, 钢球下落的高度相同, 所以它们的飞行时间相等, 故钢球飞出的水平距离与飞出速度成正比. 因此, 若  $m_1 s$  在实验误差允许范围内与  $m_1 s_1 + m_2 s_2$  相等, 就验证了两钢球碰撞前后总动量守恒.

实验表明, 在系统所受合外力为零的情况下, 系统的动量守恒.

通过与之有线性关系又容易观察的物理量来测量不直观的物理量, 是一种测量物理量的常用方法.



### 实践与拓展

1. 如图 1-3-3 所示的牛顿摆由一排多粒钢珠组成, 可通过钢珠间的相互碰撞来演示动量守恒定律. 请阐述其原理.
2. 查阅水银温度计的工作原理, 体会通过与温度有线性关系的水银柱来测量温度的方法.



图 1-3-3 牛顿摆

### 预碰撞安全系统

随着科学技术的不断发展, 汽车的安全已经不仅仅体现在坚固的车身上, 智能化的电子设备让汽车变得更加聪明. 能主动躲避碰撞无疑是汽车安全的最高要求, 目前很多汽车厂商已推出各具特色的预碰撞安全系统.

预碰撞安全系统通过监测车辆行驶状态、探测前方障碍物, 测算出发生碰撞的可能性, 在即将碰撞前的一刻自动采取应对措施来最大限度地减轻损伤. 它并不是一个独立的装置, 而是预碰撞刹车辅助系统、紧急转向辅助系统、汽

车动态综合管理系统等众多安全系统的集合。

预碰撞安全系统技术目前主要有两种，一种是靠摄像头采集图像，从而识别障碍物，发出刹车指令；另一种是利用毫米波雷达判定前方障碍物，通过测量与障碍物的相对运动趋势来触发制动。

下面以使用毫米波雷达的预碰撞安全系统为例介绍其工作原理（如图1-3-4所示）。当毫米波雷达探测到前方有行驶的车辆，并判断有追尾的危险时，系统会发出警报，若继续接近前车，系统会轻微制动，以提醒驾驶员注意前方车辆。当判断出追尾难以避免时，系统则采取强烈制动措施，和驾驶员自身的制动一起降低追尾车速，以便有效地帮助驾驶员避免和降低追尾的损伤。当车辆与前车速度差大于15 km/h时，预碰撞安全系统启动，当系统认为有可能导致追尾时，除提醒驾驶者和制动之外，也会通过自动收紧安全带确保对前排乘客的约束作用。同时，在车辆自动制动时，刹车灯也会点亮，提示后车保持安全距离。若车辆与前车速度差小于15 km/h，该系统将不起作用。

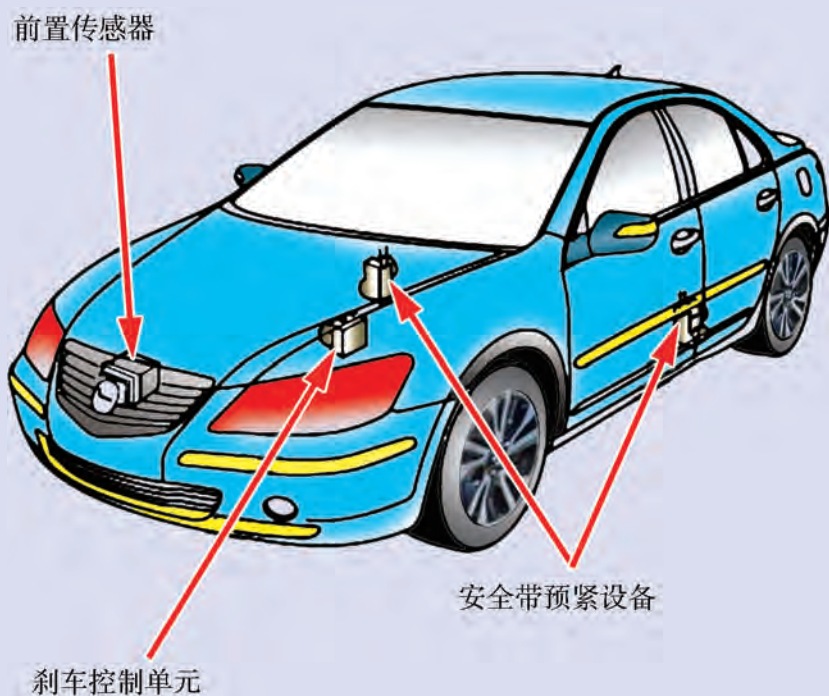


图1-3-4 预碰撞安全系统组成单元



## 练习

1. 把两个磁性很强的磁铁分别放在两辆小车上，磁铁的同性磁极相对，小车放在光滑的水平桌面上，推动一下小车，使它们相互接近，两辆小车没有碰上就分开了，两辆小车相互作用前后，它们的总动量守恒吗？为什么？

2. 一辆装满水的消防车静止在水平地面上. 消防车的总质量为  $M$ , 车上固定一支高压水枪. 某时, 高压水枪突然相对于地面以速度  $v$  水平向后喷射水. 已知喷出水的质量为  $m$ , 忽略消防车前进所受的阻力, 求消防车前进的速度以及对水做的功.

3. 如图 1-3-5 所示,  $A, B$  两物体的质量比  $m_A:m_B = 3:2$ , 它们原来静止在平板车  $C$  上,  $A, B$  间有一根被压缩了的弹簧,  $A, B$  与平板车表面间的动摩擦因数相同, 地面光滑. 当弹簧突然释放, 请分析系统动量是否守恒以及小车的运动情况. (假设平板车足够长, 保证  $A, B$  两物体始终在车上运动)

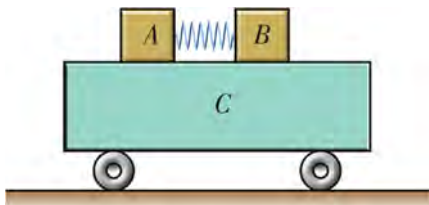


图 1-3-5

4. 某同学设计了一个用电磁打点计时器“验证动量守恒”的实验. 在小车  $A$  的前端粘有橡皮泥, 推动小车  $A$  使之做匀速运动. 然后与原来静止在前方的小车  $B$  相碰并粘在一起, 继续做匀速运动. 设计的具体装置如图 1-3-6 所示, 在小车  $A$  后连着纸带, 电磁打点计时器电源频率为  $50\text{ Hz}$ . 长木板右侧垫着小木块用以平衡摩擦力.

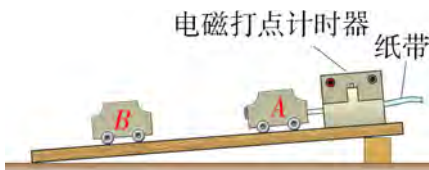


图 1-3-6

(1) 若已得到打点纸带如图 1-3-7 所示, 并测得各计数点间距标在图上, 点  $A$  为运动起始的第一点, 则应选\_\_\_\_\_段来计算小车  $A$  的碰前速度, 应选\_\_\_\_\_段来计算小车  $A$  和  $B$  碰后的共同速度. (以上均选填“ $AB$ ”“ $BC$ ”“ $CD$ ”或“ $DE$ ”)

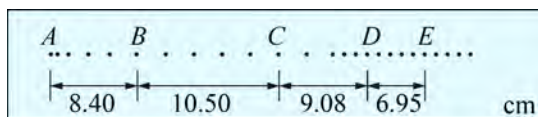


图 1-3-7

(2) 已测得小车  $A$  的质量  $m_1 = 0.40\text{ kg}$ , 小车  $B$  的质量  $m_2 = 0.20\text{ kg}$ , 由以上测量结果可得, 碰前总动量为\_\_\_\_\_  $\text{kg}\cdot\text{m/s}$ , 碰后总动量为\_\_\_\_\_  $\text{kg}\cdot\text{m/s}$ .

## 第四节 动量守恒定律的应用

动量守恒定律是物理学中最常用的普适定律之一，它在理论探索和实际应用中均发挥了巨大的作用。迄今为止，尚未发现违反动量守恒定律的现象。动量守恒在日常生活中是比较常见的，如冰壶运动、火箭升空、台球之间的碰撞等，都适合用动量守恒定律分析。

体育运动中存在不少动量守恒的例子，如篮球运动员腾空投掷篮球时，在篮球脱手瞬间，篮球与人组成的系统在水平方向上动量守恒；在冰面摩擦力可以忽略不计的情况下，冰壶运动员在冰面上掷壶瞬间，运动员与冰壶组成的系统在水平方向上也动量守恒（如图 1-4-1 所示）。



图 1-4-1 冰壶运动员掷出冰壶瞬间

因为冰壶与冰面的摩擦因数很小，摩擦力可以忽略不计，所以掷壶队员与冰壶组成的系统在水平方向上可视为合外力为零。假设掷壶队员手持冰壶从本垒圆心向前的速度  $v_0 = 1 \text{ m/s}$ ，至前卫线冰壶出手瞬间，冰壶在水平方向上相对于手的速度  $v_1 = 2 \text{ m/s}$ 。假设掷壶队员的质量  $M = 60 \text{ kg}$ ，冰壶的质量  $m = 20 \text{ kg}$ 。冰壶出手后，掷壶队员的速度是如何变化的？

掷壶队员与冰壶组成的系统在水平方向上动量守恒，系统中所有物体的速度要选同一个参考系。以地面为参考系，设冰壶出手时掷壶队员的速度为  $v$ 。则冰壶出手时，冰壶相对地的速度为  $v_1 + v$ 。设掷壶前后掷壶队员与冰壶的速度方向都相同，由动量守恒定律，有

$$(M + m)v_0 = Mv + m(v_1 + v)$$

整理可得

$$v = \frac{(M + m)v_0 - mv_1}{M + m}$$

代入数据，可求得冰壶出手后掷壶队员速度的大小为  $0.5 \text{ m/s}$ ，方向不变。





### 讨论与交流

冰壶运动除了上述掷壶过程遵守动量守恒定律，还有哪些过程也遵守动量守恒定律？请和同学一起深入研究，建立相应的物理模型进行定量分析，并与其他同学分享。

同学们制作的“水火箭”发射、火箭发射升空（如图 1-4-2 所示），这些熟悉的场景在一定的条件下也遵守动量守恒定律。



(a) “水火箭”发射



(b) 火箭发射升空

图 1-4-2 动量发生变化的场景



### 讨论与交流

如图 1-4-3 所示，反冲小车停在光滑的桌面上，车上固定一个用胶塞塞住封口的试管。试管内充满空气，用车上的酒精灯加热试管尾端。当试管内的空气达到一定温度时，胶塞从试管口喷出，此时小车是否运动？胶塞从试管口喷出瞬间，整个反冲小车遵循动量守恒定律吗？



图 1-4-3 反冲小车

在以上情景中，由于小车在水平方向所受摩擦力可以忽略不计，因而胶塞从试管口喷出瞬间，整个反冲小车在水平方向上动量守恒。

如果一个静止的物体在内力的作用下分裂成两个部分，一部分向某个方向运动，另一部分必然向相反的方向运动。这种现象叫作反冲。通常情况下，反冲运动中物体之间相互作用力很大，且作用时间极短，一般都满足内力远大于外力，外力可以忽略不计，所以反冲运动可用动量守恒定律来处理。

现在以图 1-4-3 中的反冲小车喷出胶塞为例, 讨论如何应用动量守恒定律来处理反冲运动的问题.

假设反冲小车总质量为  $M$ , 胶塞质量为  $m$ , 胶塞喷出时, 胶塞相对于地面的速度为  $v$ , 小车相对于地面的速度为  $v'$ . 开始时, 反冲小车的速度为零, 所以反冲小车在水平方向的动量为零, 有  $(M - m)v' + mv = 0$ , 故  $v' = -\frac{mv}{M - m}$ , 负号表示小车的速度方向与胶塞的速度方向相反.

火箭的发射过程也是一个反冲运动. 从前面的分析可以看出, 火箭喷出的燃料速度越大, 喷出的燃料质量与火箭质量之比越大, 则火箭获得的速度越大. 现代火箭喷气的速度在  $2000 \sim 4000 \text{ m/s}$ . 火箭发射时的质量与火箭除燃料外的箭体质量之比叫作火箭的质量比, 这个参数一般小于 10, 否则火箭结构的强度就成了问题. 但是, 这样的火箭还是达不到发射人造地球卫星的速度要求. 为了解决这个问题, 苏联科学家齐奥尔科夫斯基提出了多级火箭的概念. 如图 1-4-4 所示, 多级火箭由数级火箭组合而成, 每一级都装有发动机与燃料, 从尾部最初一级开始, 每级火箭燃料用完后自动脱落, 同时下一级火箭发动机开始工作, 使火箭继续加速前进. 理论上火箭的速度可以提至很高, 但是实际应用中一般不会超过四级, 因为级数太多时, 连接机构和控制机构的质量会增加很多, 工作的可靠性也会降低.

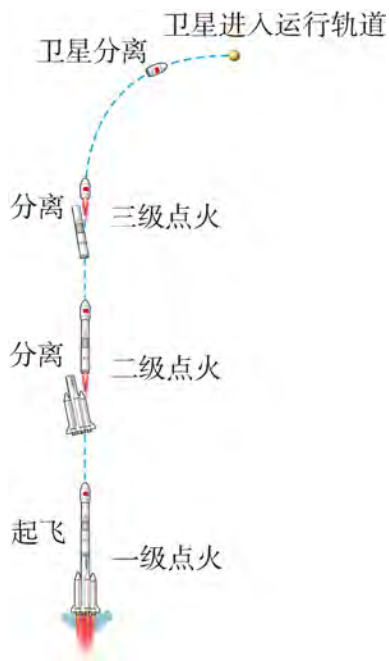


图 1-4-4 多级火箭

我国现有酒泉、西昌、太原、文昌四大火箭发射场, 它们在我国探索宇宙过程中发挥了巨大作用.

**例题:** 如图 1-4-4 所示, 用火箭发射人造卫星, 假设最后一节火箭的燃料用完后, 火箭壳体和卫星一起以速度  $v = 7.0 \times 10^3 \text{ m/s}$  绕地球做匀速圆周运动. 已知卫星质量  $M = 500 \text{ kg}$ , 最后一节火箭壳体的质量  $m = 100 \text{ kg}$ , 某时刻火箭壳体与卫星分离, 分离时卫星与火箭壳体沿轨道切线方向的相对速度  $u = 1.8 \times 10^3 \text{ m/s}$ , 试分析计算:

- (1) 分离后卫星的速度是多大?
- (2) 火箭壳体的速度是多大? (以地面为参考系)

**分析:** 由于卫星与火箭壳体分离时间很短, 重力等作用引起的动量变化与它们各自在分离前后具有的动量相比可以忽略不计. 故卫星与火箭壳体分离时近似视为动量守恒. 此题采用牛顿运动定律来解很困难, 因为分离的时间和卫星受力都不清楚.

**解:** 设分离时卫星速度方向为正方向, 分离后卫星的速度为  $v_1$ , 火箭壳体的速度为  $v_2$ .

由动量守恒, 有

$$(m + M)v = mv_2 + Mv_1,$$

由题意可知

$$v_1 - v_2 = u,$$

联立以上两式并代入数值, 解得

$$v_1 = 7.3 \times 10^3 \text{ m/s}, v_2 = 5.5 \times 10^3 \text{ m/s}.$$



## 实践与拓展

请同学们在运动场进行“水火箭”射远比赛. 利用常见的饮料瓶、水、活塞、单车轮胎气嘴组装成“水火箭”, 把“水火箭”放置在发射支架上, 用气泵通过气嘴给“水火箭”内部充气, 在气压的作用下活塞脱落, 水高速喷射出去, “水火箭”在反冲作用下运动, 射向远方. 距离远者获胜.

## 应用动量守恒定律时应注意的问题

人们通过长期实践, 在研究碰撞问题时发现了动量守恒定律, 并随着实践范围的扩大, 逐步认识到其普遍意义. 动量守恒定律的含义是, 对于相互作用的系统, 在合外力为零的情况下, 物体的总动量保持不变.

应用动量守恒定律应注意以下几点:

(1) 动量是矢量, 相互作用的物体组成的系统的总动量是指组成系统的所有物体的动量的矢量和, 而不是代数和. 在具体计算时, 经常采用正交分解法, 写出动量守恒定律的分量方程, 这样可把矢量运算转化为代数运算.

(2) 在合外力为零时, 尽管系统的总动量不变, 但组成系统的各个物体的动量却可能不断变化, 系统的内力只能改变系统内物体的动量, 却不能改变系统的总动量. 在合外力不为零时, 系统的总动量就会发生改变, 但在垂直于合外力方向上, 系统的动量应保持不变.

(3) 动量守恒定律成立的条件是合外力为零. 但在处理实际问题时, 若系统受到的合外力不为零, 而内力远大于外力, 我们仍可以把它当作合外力为零进行处理, 运用动量守恒定律解决问题. 如遇到碰撞、爆炸等时间极短的问题时, 可忽略外力, 系统动量近似认为守恒.

(4) 动量守恒定律是在牛顿运动定律的基础上推导出来的, 牛顿运动定律对于分子、原子等微观粒子一般不适用, 而动量守恒定律却仍适用. 因此, 动量守恒定律是一条基本规律, 它比牛顿运动定律的应用更为普遍.

近代的科学实验和理论分析都表明, 在自然界中, 大到天体间的相互作用, 小到质子、中子等基本粒子间的相互作用, 都遵循动量守恒定律. 因此, 它是

自然界中最重要、最普遍的客观规律之一，比牛顿运动定律的适用范围更广。下面举的例子可以很好地对此进行说明。

我们在研究光的发射和吸收时，会发现这样一种现象：在宇宙空间中某个地方有时会突然发出非常明亮的光，这就是超新星。可是它很快就逐渐暗淡下来。光从这样一颗超新星出发到达地球需要几百万年，而相比之下超新星从发光到熄灭的时间就显得太短了。

当光从超新星到达地球时，它给地球一个轻微的推动，而与此同时地球却无法给超新星一个轻微的推动，因为它已经消失。因此，地球与超新星之间的相互作用，在同一瞬间就不是大小相等、方向相反了。这时，牛顿第三定律显然已不适用。然而动量守恒定律还是正确的，但必须把光也考虑在内。当超新星发射光时，星体反冲，得到动量，同时光也带走了大小相等而方向相反的动量。几百万年之后，光到达地球时，它把动量传递给了地球。这里要注意的是，动量不仅可以为实物所携带，而且可以随着光辐射一起传播。



### 练习

1. 两个质量都为  $1\text{ kg}$  的小球分别以  $4\text{ m/s}$  和  $2\text{ m/s}$  的速率相向运动，相撞后黏合在一起，最终是否可能以  $3\text{ m/s}$  的速率一起运动？请通过计算说明，并求这个过程中损失的机械能。

2. 如图 1-4-5 所示，质量为  $24\text{ g}$  的木块静止在水平桌面上，一质量为  $10\text{ g}$  的子弹，以  $300\text{ m/s}$  的速度射入木块，并留在其中。子弹留在木块中后，木块运动的速度是多少？如果子弹把木块打穿，子弹穿过后的速度为  $100\text{ m/s}$ ，这时木块的速度又是多少？



图 1-4-5

3. 两条小船相向航行，航线邻近。在两船首尾相齐时，由每条船上各自向对方放置一质量为  $m = 50\text{ kg}$  的麻袋，结果总质量较小的船停了下来，另一条船则以  $v = 8.5\text{ m/s}$  的速度沿原方向航行。设两条船总质量分别为  $m_1 = 500\text{ kg}$ ， $m_2 = 1000\text{ kg}$ 。问：交换麻袋前两船的速度分别是多大？（水的阻力忽略不计）

4. 火箭喷气发动机每次喷出质量为  $m = 200\text{ g}$  的气体，喷出的气体相对地面的速度  $v = 1000\text{ m/s}$ 。设火箭的初质量  $M = 300\text{ kg}$ ，发动机每秒喷气 20 次，在忽略地球引力及空气阻力的情况下，火箭在第一秒末的速度是多大？

## 第五节 弹性碰撞与非弹性碰撞

系统在合外力为零时发生的碰撞遵循动量守恒定律，但不一定遵循机械能守恒定律。如两名在冰面上滑冰的运动员相撞有可能都停下来，此碰撞过程系统动量近似守恒，但机械能显然不守恒。

碰撞是指两个或两个以上的物体在相遇的极短时间内产生非常大的相互作用。碰撞最主要的特点是物体组成的系统所受外力远小于内力，且相互作用时间极短，所以可以认为系统在碰撞过程中动量守恒。下面让我们来研究碰撞过程中机械能的变化情况。

### 观察与思考

用如图 1-5-1 所示的实验装置做如下实验：

(1) 两个相同的刚性球悬挂于同一水平面，两悬点的距离等于刚性球的直径大小，线长相等，将其中一球拉开至一定角度，松手后使之与另一球发生正碰。

(2) 在两个球上分别套上尼龙搭扣做的套圈，做同样的碰撞。

记下碰撞后两球达到的最大高度，并思考下列问题。

(1) 在以上两种情况下，两个球碰撞前后的总机械能是否相等？可能的原因是什么？

(2) 如果碰撞前后总机械能不相等，是否违反了机械能守恒定律？

(3) 总结以上两种碰撞情况的区别。



图 1-5-1 弹性碰撞与非弹性碰撞实验装置

事实上，任何两个小球碰撞时都会发生形变，若两球碰撞后，它们的形变能完全恢复，则没有机械能损失，碰撞前后两小球构成的系统的机械能相等，这种碰撞叫作**弹性碰撞**；若两球碰撞后，它们的形变不能完全恢复原状，这时将有一部分机械能转化为其他形式的能量，碰撞前后系统的机械能不再相等，这种碰撞叫作**非弹性碰撞**；若两球碰撞后，它们完全不反弹而粘在一起，这时机械能损失最大，这种碰撞则叫作**完全非弹性碰撞**。

自然界中，多数的碰撞实际都属于非弹性碰撞。真正的弹性碰撞，只有在分子、原子及更小的粒子之间才会发生。



### 讨论与交流

列举一些非弹性碰撞的例子，讨论碰撞过程损失的机械能去了哪里。

非弹性碰撞损失的机械能转化为其他形式的能，如内能等。

碰撞有可能发生在空间，如空中飞鸟撞击飞机；也可能发生在一个平面内，如台球桌上球与球的碰撞；还有可能发生在一条直线上，如图 1-4-3 所示小车的反冲。高中阶段我们只讨论发生在直线上的碰撞问题。

现在以直线上的碰撞为例，具体分析弹性碰撞和非弹性碰撞过程中动量与能量的变化情况。

**例题：**如图 1-5-2 所示，质量为  $m_2$  的物体  $B$  静止在光滑水平面上，物体  $B$  的左端连有轻弹簧，质量为  $m_1$  的物体  $A$  以速度  $v_1$  向  $B$  运动。在 I 位置，物体  $A$  与物体  $B$  的轻弹簧刚好接触，弹簧开始被压缩，物体  $A$  开始减速，物体  $B$  开始加速；到 II 位置，物体  $A, B$  的速度刚好相等（设为  $v$ ），弹簧被压缩到最短；到 III 位置，物体  $A, B$  的速度分别为  $v_1'$  和  $v_2'$ 。分三种情况讨论全过程系统动量和能量变化情况。

- (1) 在 III 位置，弹簧可以恢复到原长。
- (2) 在 III 位置，弹簧只能部分恢复，不能回到原长。
- (3) 在 III 位置，弹簧弹性失效。

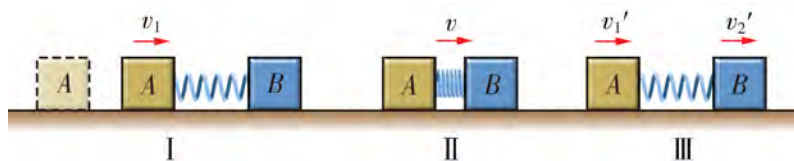


图 1-5-2 物体  $A, B$  碰撞全过程示意图

**分析：**在碰撞全过程中，物体  $A, B$  和弹簧组成的系统水平方向不受外力，竖直方向合外力为零，系统动量守恒。系统机械能是否守恒取决于弹簧是否可以恢复到原长。

**解：**(1) 在弹性限度范围内，弹簧发生弹性形变。在 III 位置，弹簧可以恢复到原长。I → II，系统减少的动能全部转化为弹性势能，在 II 位置，系统动能最小而弹性势能最大；II → III，系统减少的弹性势能全部转化为动能；因此在 I、III 位置，系统动能相等。这种碰撞是弹性碰撞。由动量守恒定律和机械能守恒定律，有

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

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

解得物体  $A, B$  的最终速度分别为

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

(2) 弹簧发生塑性形变. 在 III 位置, 弹簧只能部分恢复.  $I \rightarrow II$ , 系统减少的动能部分转化为弹性势能, 部分转化为内能, 在 II 位置系统动能仍和 (1) 相同, 弹性势能仍最大, 但比 (1) 小;  $II \rightarrow III$ , 系统减少的弹性势能部分转化为动能, 部分转化为内能; 因此全过程系统的动能有损失 (部分动能转化为内能). 这种碰撞是非弹性碰撞.

(3) 弹簧完全失效.  $I \rightarrow II$ , 系统减少的动能全部转化为内能, 在 II 位置系统动能仍和 (1) 相同, 但没有弹性势能; 由于没有弹性, 物体  $A, B$  不再分开, 而是以速度  $v'$  共同运动, 不再有  $II \rightarrow III$  过程. 这种碰撞是完全非弹性碰撞. 可以证明, 物体  $A, B$  最终的共同速度为  $v_1' = v_2' = v' = \frac{m_1}{m_1 + m_2} v_1$ . 在完全非弹性碰撞过程中, 系统的动能损失最大, 即

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 - \frac{1}{2} (m_1 + m_2) v'^2 = \frac{m_1 m_2 v_1^2}{2(m_1 + m_2)}.$$



### 讨论与交流

在弹性碰撞中: ①若  $m_1 = m_2$ , 则碰后  $A, B$  速度如何? ②若  $m_1 \gg m_2$  或  $m_2 \gg m_1$ , 则碰后  $A, B$  速度又如何?

在弹性碰撞中, 若  $m_1 = m_2$ , 则物体  $A, B$  碰撞后交换速度; 若  $m_1 \gg m_2$  或  $m_2 \gg m_1$ , 则质量大的物体速度几乎不变.

在社会实际生活生产中, 虽然很少有弹性碰撞, 但如果损失的机械能远小于碰撞前的机械能, 我们通常将这些碰撞视为弹性碰撞. 比如, 我们熟悉的台球碰撞就是一个近似的弹性碰撞. 台球的变形和球碰撞过程中与桌面的摩擦相对于碰撞力来说可忽略, 则我们粗略认为两个台球的碰撞过程机械能守恒, 属于弹性碰撞过程.

但是, 很多碰撞过程的能量损失不能忽略, 我们将其视为非弹性碰撞. 例如, 篮球碰撞地面的过程大都是非弹性碰撞过程, 在马路上同向而行的两辆汽车相撞属于非弹性碰撞, 而子弹射入木块并和木块一起运动则属于完全非弹性碰撞.



### 实践与拓展

结合案例, 通过查找资料, 分析碰撞中能量是如何传递的.



## 练习

1. 如图 1-5-3 所示, 两个质量都为 3 kg 的球, 以 6 m/s 的速率相向运动, 发生正碰后, 每个球都以原来的速率向相反方向运动, 它们的碰撞是弹性碰撞吗? 为什么?

2. 两个不同质量的球以相同的速率相向运动, 其中重球的质量是轻球质量的 3 倍, 相碰后重球停止不动, 轻球以 2 倍的速率弹回, 试证明它们发生的是弹性碰撞.

3. 如图 1-5-4 所示, 动量分别为  $5 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$  和  $6 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$  的小球  $A$ ,  $B$  沿光滑平面上的同一条直线同向运动,  $A$  追上  $B$  并发生碰撞, 若已知碰撞后  $A$  的动量减小了  $2 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$ , 而方向不变, 那么  $A$ ,  $B$  质量之比的可能范围是什么?

4. 1930 年, 科学家用放射性物质中产生的  $\alpha$  粒子轰击铍原子时, 产生了一种看不见的、贯穿能力很强的不带电粒子. 为了弄清楚这是一种什么粒子, 人们用它分别去轰击氢原子和氮原子, 结果从中打出了氢核和氮核, 以此推算出该粒子的质量, 从而确定该粒子为中子. 设氢核质量为  $m_{\text{H}}$ , 打出后速度为  $v_{\text{H}}$ , 氮核质量为氢核质量的 14 倍, 打出后速度为  $v_{\text{N}}$ , 假设中子与它们的碰撞为弹性碰撞, 试推算中子的质量.



图 1-5-3



图 1-5-4



## 第六节 自然界中的守恒定律

自然现象丰富多彩，物质运动千变万化，物理学家在繁杂的变化中发现了物质运动遵循各种物理量的守恒定律，如动量守恒定律、机械能守恒定律、能量守恒定律、电荷守恒定律等。这些守恒定律反映了自然界的和谐与统一。

讨论物理量的守恒离不开与之相互作用的因素。物理学上常将物体及与之相互作用的因素视为一个系统。

物理量的守恒定律表明，物质所处的系统若没有系统外的因素使系统的这些物理量发生改变，则系统内部的这些物理量总和保持不变，这些物理量只在此系统内部转移或转化。若由于外界因素的作用，使得系统中的某个物理量发生变化，则系统中该物理量总和的增加量（或减少量）等于外界向该系统输入（或抽取）的量。总之，系统内的这些物理量总和不会无缘无故地增加或者减少。物理量的守恒性质保证了系统的相对稳定性。

守恒定律只有在合适的系统和范围才适用。

动量守恒定律反映了合外力为零的情况下，系统的总动量不会发生改变。有时候虽然系统合外力不为零，但在某个方向系统合外力为零，则系统在该方向的动量仍然守恒。如果系统某个方向的动量发生了改变，则该方向必然受到一个冲量，冲量的值等于系统在该方向动量的改变量。如图 1-6-1 所示，在冰上表演双人滑冰时，由于冰面的摩擦因数很小，可以视为两个滑冰运动员甲和乙组成的系统在水平方向动量守恒。



图 1-6-1 冰上的双人滑冰运动员相互推开

动量守恒定律在微观、宏观和宇观都是适用的，是自然界普适的基本定律。

对于一个系统，我们把系统以外的物体对系统内部物体的作用力称为外力，把系统内部物体之间的相互作用力称为内力。由于系统内重力或弹力做功只引起系统内动能和势能的相互转化，不改变系统的机械能总量，所以当系统外力与系统内除重力和弹力外的其他内力做功的代数和为零，则系统的总机械能保持不变，这就是机械能守恒定律。

利用机械能守恒定律解决动力学问题往往比用牛顿第二定律更为方便，我们只需要掌握物体初、末的运动状态，而不必考虑物体运动的过程，利用机械能守恒定律，便可使问题迎刃而解。

**例题：**一质量为  $m$  的物体沿如图 1-6-2 所示的光滑曲面自  $A$  点向下滑动，试求物体在  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三点的速度  $v_A$ 、 $v_B$ 、 $v_C$  所满足的关系。

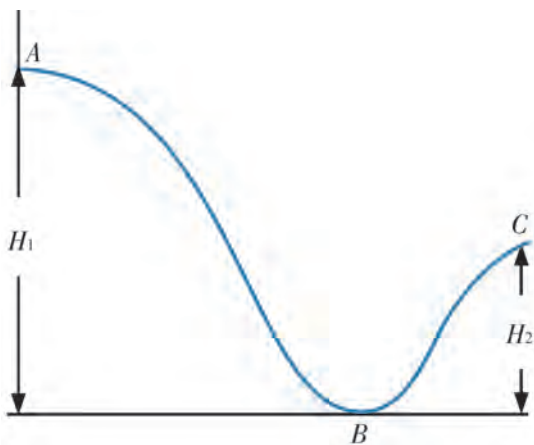


图 1-6-2 物体沿光滑曲面滑动

**分析：**在物体沿曲面运动的过程中，作用在物体上的力有重力和曲面对物体的支持力，由于曲面各点的斜率不同，支持力的大小和方向将不断地变化。因此，作用在物体上的合力也将不断地变化。根据牛顿第二定律可知，物体在曲面各点的加速度也将随着不断地变化。这就使得问题的解决比较困难，但若考虑地球与物体组成的系统，其内力只有重力，而曲面支持力的方向总是与物体运动的方向垂直，因此支持力不做功，由此可见，物体在运动过程中满足机械能守恒的条件，我们可以用机械能守恒定律来求解。

**解：**选取物体在  $B$  点时的势能为零，根据机械能守恒定律，有

$$\frac{1}{2}mv_A^2 + mgH_1 = \frac{1}{2}mv_B^2 = \frac{1}{2}mv_C^2 + mgH_2,$$

由此得到  $v_A$ 、 $v_B$ 、 $v_C$  所满足的关系为

$$v_B^2 = v_A^2 + 2gH_1, \quad v_C^2 = v_A^2 + 2g(H_1 - H_2).$$



## 讨论与交流

请将上述结果与自由落体运动的情况进行比较，并讨论它说明了什么问题。

如果系统内部存在除重力和弹力外的其他力（如摩擦力）做功，则系统的机械能会发生改变。但大量事实证明，在系统机械能增加或减少的同时，必然有其他形式的能量减小或增加，而且系统机械能的变化量和其他形式能量的变化量是相同的，这就是能量守恒定律。

如果还有其他外力对系统做功，则不仅系统的机械能不守恒，而且系统的机械能与其他形式的能量总和也不再守恒。可是，在系统的总能量增加或减少的同时，外界必然有其他的物体失去或得到能量。因此，能量守恒定律在更大的范围内仍然适用，它是自然界具有普遍意义的定律之一。

如图 1-6-3 所示，若将一壶热水倒入盛有冷水的保温钢瓶中，忽略散失的热量，则认为热水和保温钢瓶内胆以及其中的冷水组成的系统能量守恒。但对于电热水壶烧开水的过程，电热水壶和水组成的系统能量不守恒，因为系统外的电源给系统输入了能量。

系统的物理量是否满足守恒条件，与系统的选择有关。例如，物体  $A$  只受到物体  $B$  和物体  $C$  的作用力，若将物体  $A, B$  视为一个系统，则该系统动量不守恒；若将物体  $A, B, C$  视为一个系统，则该系统动量守恒。

实际上，“孤立”物体是不存在的，物体总会与周围物体产生相互作用。如果将相互作用的几个物体作为一个整体，而这几个物体组成的系统与系统以外的物体无相互作用，则这个系统是“孤立”的，该系统相关物理量满足守恒定律条件。即使系统与环境有相互作用，但若这些作用不改变系统的相关物理量，则该系统仍然满足该物理量的守恒定律条件。如图 1-6-4 所示，用细绳拉着小球在光滑水平面做匀速圆周运动，由于向心力不对小球做功，所以小球机械能守恒。



图 1-6-3 电热水壶与保温钢瓶



图 1-6-4 小球在光滑水平面做匀速圆周运动



## 实践与拓展

1. 查阅资料，理解自然界的“简单性”和“对称性”，结合物质运动过程中物理量的守恒定律，体会自然界的和谐与统一。
2. 随着人类社会的进步，人类对能源的利用途径发生了改变。查阅资料，从能量守恒定律的角度了解能源利用的新方式。



## 练习

1. 举出生活中动量守恒、能量守恒、机械能守恒的例子。
2. 人类发送地球卫星对地球的运行轨道有影响吗？
3. 了解火箭运载人造卫星上天的发射过程，并分析在火箭发射的各个阶段适合用哪些守恒定律来估算人造卫星的速度。
4. 如图 1-6-5 所示，质量为  $M$  的木块置于光滑的水平台面上，质量为  $m$  的子弹以初速度  $v_0$  水平向右射向木块，设木块对子弹的摩擦阻力为  $f$ ，木块足够长，子弹留在木块中。求子弹打进木块的深度  $h$ 。分别用牛顿第二定律和动量守恒定律解答，对比两种方法，哪种更便捷？

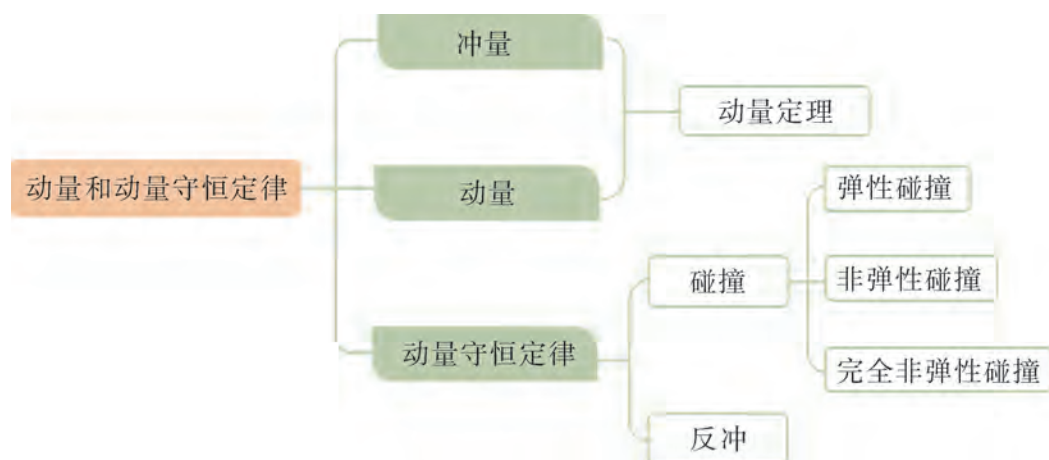


图 1-6-5

# 本章小结

## 知识结构

参考下面的知识结构，请进一步梳理本章的知识。



## 回顾与评价

1. 物体受到的冲量与物体的动量有什么关系？
2. 列举生活中体现减小相互作用力的具体例子，说一说这些例子都有哪些共同点，以及解决这类问题的思路。
3. 通过本章学习，谈一谈对动量守恒定律的认识。
4. 本章学习了哪些典型的碰撞模型？请列举这些碰撞模型在生活中的应用，并说明将典型模型用于实际问题分析的作用，体会其中蕴含的科学思维方法。
5. 说一说在验证动量守恒定律的实验中印象最深的实验过程。

## 习题一

1. 下列关于力的冲量的说法中, 正确的是 ( ).
- A. 作用在物体上的力越大, 力的冲量就越大
- B. 作用在物体上的力大, 力的冲量不一定大
- C. 若  $F_1$  与作用时间  $t_1$  的乘积  $F_1 t_1$  等于  $F_2$  与作用时间  $t_2$  的乘积  $F_2 t_2$ , 则这两个力的冲量相同

D. 静止在地面上的物体受水平推力  $F$  的作用, 经时间  $t$  仍静止, 则此推力的冲量为零

2. 一炮弹以一定倾角斜向上发射达到最高点时, 爆炸成两块, 其中一块沿原方向运动, 则另一块 ( ).

- A. 一定沿原来相反的方向运动
- B. 一定沿原来相同的方向运动
- C. 可能做自由落体运动
- D. 可能做竖直上抛运动

3. 如图 1-1 所示, 用细线悬挂一质量为  $M$  的木块, 有一质量为  $m$  的子弹自左向右水平射穿此木块, 穿透前后子弹的速度分别为  $v_0$  和  $v$  (设子弹穿过木块的时间和空气阻力忽略不计), 木块的速度大小为多少?

4. 两个小球在光滑水平面上沿同一直线、同一方向运动,  $B$  球在前,  $A$  球在后,  $m_A = 1 \text{ kg}$ ,  $m_B = 2 \text{ kg}$ ,  $v_A = 6 \text{ m/s}$ ,  $v_B = 2 \text{ m/s}$ . 当  $A$  球与  $B$  球发生碰撞后,  $A$ ,  $B$  两球速度可能为 ( ).

- A.  $v_A = 5 \text{ m/s}$ ,  $v_B = 2.5 \text{ m/s}$
- B.  $v_A = 2 \text{ m/s}$ ,  $v_B = 4 \text{ m/s}$
- C.  $v_A = -4 \text{ m/s}$ ,  $v_B = 7 \text{ m/s}$
- D.  $v_A = 7 \text{ m/s}$ ,  $v_B = 1.5 \text{ m/s}$

5. 物体  $P$  从光滑水平面上的斜面体  $Q$  的顶端以一定的初速度沿斜面往下滑, 如图 1-2 所示. 在下滑过程中,  $P$  的速度越来越小, 最后相对斜面静止, 那么由  $P$  和  $Q$  组成的系统 ( ).

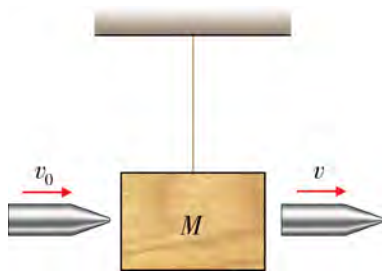


图 1-1

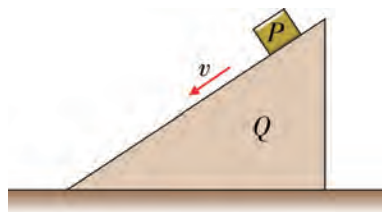


图 1-2

- A. 动量守恒
- B. 水平方向动量守恒
- C. 最终  $P$  和  $Q$  以一定的速度共同向左运动
- D. 最终  $P$  和  $Q$  以一定的速度共同向右运动

6. 如图 1-3 (a) 所示, 长木板  $A$  静止在光滑的水平面上, 质量为  $m = 2 \text{ kg}$  的物体  $B$  以水平速度  $v_0 = 2 \text{ m/s}$  在长木板  $A$  表面上滑行, 由于  $A, B$  间存在摩擦, 之后  $A, B$  速度随时间变化情况如图 1-3 (b) 所示, 则下列说法正确的是 ( ).

- A. 长木板  $A$  获得的动能为  $1 \text{ J}$
- B. 系统损失的机械能为  $2 \text{ J}$
- C. 长木板  $A$  的最小长度为  $1 \text{ m}$
- D.  $A, B$  间的动摩擦因数为  $0.2$

7. 如图 1-4 所示, 光滑的半圆槽置于光滑的水平地面上, 从一定高度自由下落的小球  $m$  恰能沿半圆槽边缘的切线方向滑入原先静止的槽内, 对此情况, 下列说法不正确的是 ( ).

- A. 小球第一次离开槽时, 将向右上方做斜抛运动
- B. 小球第一次离开槽时, 将做竖直上抛运动
- C. 小球离开槽后, 仍能落回槽内, 而槽将做往复运动
- D. 槽一直向右运动

8. 某同学用如图 1-5 所示的装置, 通过半径相同的  $A, B$  两球的碰撞来验证动量守恒定律.

(1) 实验中必须要求的条件是 ( ).

- A. 斜槽轨道尽量光滑以减少误差
- B. 斜槽轨道末端的切线必须水平
- C. 入射球和被碰球的质量必须相等, 且大小相同
- D. 入射球每次必须从轨道的同一位置由静止滚下

(2) 在以下选项中, 哪些是本次实验必须进行的测量? ( )

- A. 水平槽上未放  $B$  球时, 测量  $A$  球落点位置到点  $O$  的距离
- B.  $A$  球与  $B$  球碰撞后, 测量  $A$  球落点位置到点  $O$  的距离
- C. 测量  $A$  球或  $B$  球的直径
- D. 测量  $A$  球和  $B$  球的质量 (或两球质量之比)
- E. 测量点  $G$  相对于水平槽面的高度

答: \_\_\_\_\_ (填选项号).

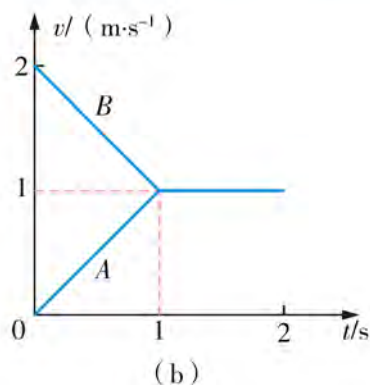
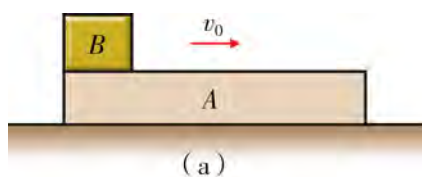


图 1-3

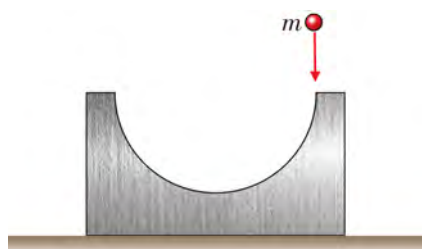


图 1-4

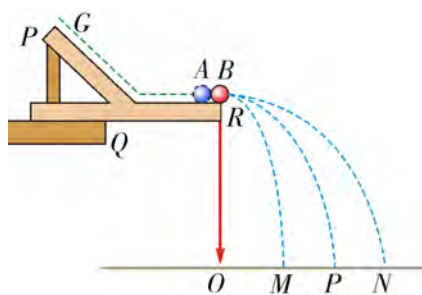


图 1-5

(3) 某次实验中得出的落点情况如图 1-6 所示, 假设碰撞过程中动量守恒, 则入射小球质量  $m_1$  和被碰小球质量  $m_2$  之比为\_\_\_\_\_.

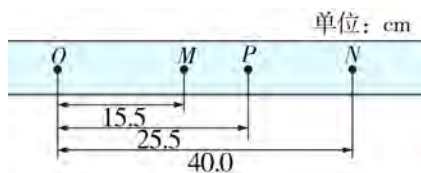


图 1-6

9. 为估算池中睡莲叶面承受雨滴撞击产生的平均压强, 小明在雨天将一圆柱形水杯置于露台, 测得 1 小时内杯中水上升了 45 mm. 据估测, 当时雨滴竖直下落速度约为 12 m/s. 据此估算该压强. (设雨滴撞击睡莲后无反弹, 不计雨滴重力, 雨水的密度为  $1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ )

10. 如图 1-7 所示, 质量为  $M$  的滑块静止在光滑的水平面上, 滑块的光滑弧面底部与桌面相切, 一质量为  $m$  的小球以速度  $v_0$  向滑块滚来, 设小球不能越过滑块.

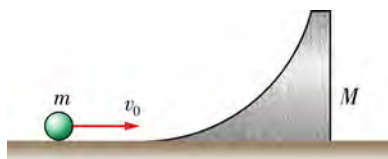


图 1-7

- (1) 求小球滑到最高点时速度的大小.
- (2) 求此时滑块速度的大小.
- (3) 求小球与滑块分离时各自的速度.

11. 如图 1-8 所示, 光滑冰面上静止放置一表面光滑的斜面体, 斜面体右侧一蹲在滑板上的小孩和其面前的冰块均静止于冰面上. 某时刻小孩将冰块以相对冰面 3 m/s 的速度向斜面体推去, 冰块平滑地滑上斜面体, 在斜面体上上升的最大高度  $h = 0.3 \text{ m}$  ( $h$  小于斜面体的高度). 已知小孩与滑板的总质量  $m_1 = 30 \text{ kg}$ , 冰块的质量  $m_2 = 10 \text{ kg}$ , 小孩与滑板始终无相对运动. (取  $g = 10 \text{ m/s}^2$ )

- (1) 求斜面体的质量.
- (2) 通过计算判断, 冰块与斜面体分离后能否追上小孩?

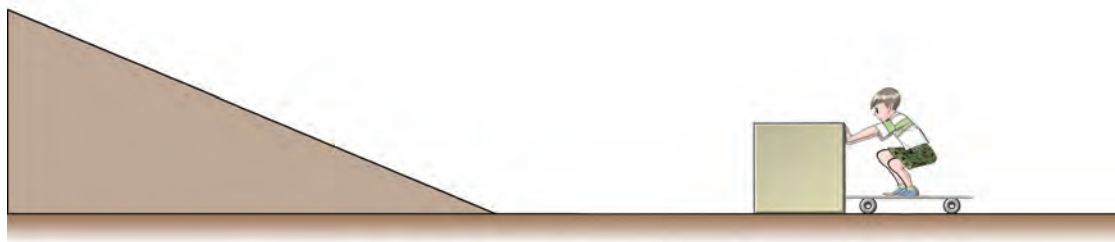


图 1-8

12. 某游乐园入口旁有一喷泉, 喷出的水柱将一质量为  $M$  的卡通玩具稳定地悬停在空中. 为了计算方便, 假设水柱从横截面积为  $S$  的喷口持续以速度  $v_0$  竖直向上喷出, 玩具底部为平板, 面积足够大, 水柱全部打在平板上. 水柱冲击到玩具底板后, 在竖直方向水的速度变为零, 在水平方向朝四周均匀散开, 空气阻力忽略不计. 已知水的密度为  $\rho$ , 重力加速度的大小为  $g$ . 求:

- (1) 喷泉单位时间内喷出的水的质量.
- (2) 玩具在空中悬停时, 其底面相对于喷口的高度.



13. 列车进入编组站后要分解重组, 会出现列车挂接问题, 许多节车厢逐一组合起来的过程实质上是一个完全非弹性碰撞过程. 设一列列车共有  $n$  节车厢, 各车厢之间间隙相等, 间隙长度的总和为  $s$ , 第一节车厢以速度  $v$  向第二节车厢运动, 碰撞后通过“詹天佑挂钩”连接在一起, 直到  $n$  节车厢全部挂好, 则火车的最后速度是多大? 整个过程经历的时间是多少? (轨道对车厢的阻力不计, 各节车厢质量相等, 且碰撞时间很短, 可忽略不计)

14. 中国“天宫二号”空间实验室采用实验舱和资源舱两舱构型, 全长 10.4 m, 最大直径 3.35 m, 太阳翼展宽约 18.4 m, 质量为 8.6 T. 在“神舟十一号”飞船与“天宫二号”自动交会对接过程中 (如图 1-9 所示), 假设两个航天器的相对速度要从之前的 10 m/s 降到 0.2 m/s, 飞船上有像手一样的捕获装置, 会先伸出手来把“天宫二号”紧紧抓住. 若“神舟十一号”飞船从后加速追上“天宫二号”, 假定“神舟十一号”飞船在对接前的质量为 6 T, 发动机喷射燃料的速度为 3000 m/s, 估算“神舟十一号”飞船需要喷射多少燃料.



图 1-9

## 第二章

## 机械振动

与前面所学的直线运动和曲线运动不同，机械振动是物体在某个固定位置附近做重复的往返运动，如琴弦的抖动、心脏的跳动、树枝的摇曳和秋千的摇荡等。机械振动是自然界非常普遍的运动形式。不仅力学中有振动现象，电学、光学、原子物理学等都有振动现象。本章探究机械振动的一些基本知识，这对我们后续学习也是很重要的。

简谐运动是振动的基础。本章我们通过实验探究简谐运动的力、运动和能量特征，认识简谐运动的两个重要物理模型——弹簧振子和单摆，并利用单摆测量重力加速度的大小；最后了解受迫振动、共振等物理现象。



## 第一节

## 简谐运动



琴弦的抖动、心脏的跳动等运动看似简单，实际所受的力和涉及的运动规律颇为复杂。我们先从最简单、最基本的理想化模型来研究这类运动。

## 认识简谐运动

如上所述的运动，物体（或者物体的一部分）在某一中心位置（平衡位置）两侧所做的往复运动叫作机械振动（mechanical vibration），简称振动。

如图 2-1-1 所示，把一个有孔的小球安装在弹簧的一端，弹簧的另一端固定，小球和弹簧穿在光滑的水平杆上，使其能在杆上自由滑动，小球和水平杆之间的摩擦可以忽略不计，小球的运动可以看作质点的运动，这样的系统称为弹簧振子，其中的小球称为振子。

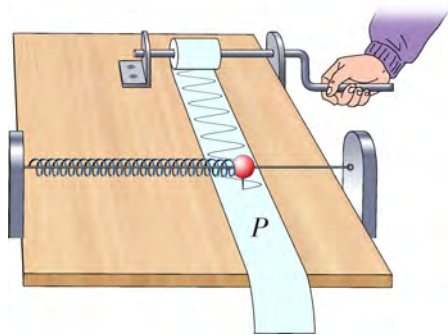


图 2-1-1 光滑水平杆上振子的振动

下面我们来分析一下振子在振动过程中的受力情况。

振子在振动过程中，所受的重力和支持力平衡，对振子的运动无影响。影响振子运动的只有弹簧的弹力。这个力的方向跟振子偏离平衡位置的位移方向相反，总指向平衡位置，它的作用是使振子能返回平衡位置，这个力叫作回复力。

在弹性限度内，振子所受回复力  $F$  的大小跟振子偏离平衡位置的位移  $x$  的大小成正比，即

$$F = -kx \quad (2.1.1)$$

负号表示回复力的方向跟振子偏离平衡位置的位移方向相反。

物体在跟平衡位置的位移大小成正比，并且总指向平衡位置的回复力的作用下的振动，叫作简谐振动。

## 观察与思考

依照图 2-1-1，将振子安装在光滑水平杆上。把一卷足够宽的白纸放在桌上。在振子上固定一支铅笔（笔头向下，笔尖与纸面轻触），用其在白纸上记录振子的振动情况。将振子拉离平衡位置一定距离后让其振动。等振动稳定后，匀速拉动白纸。观察白纸上的痕迹，根据所学的函数知识，判断它可能是什么函数的图像，这个图像又代表什么。

实验中振子在平衡位置附近做往复运动。纸的匀速移动使得这种往复运动随时间的变化用图像形象地展示出来。根据纸上的痕迹可以得出振子的位置与时间的对应关系。

如图 2-1-2 所示，点  $O$  为振子的平衡位置。先将振子由平衡位置  $O$  拉到点  $B$ ，从释放振子开始计时，振子开始振动。振子从点  $B$  经过点  $O$  运动到点  $B'$ ，再经过点  $O$  回到点  $B$ 。此后振子就不停地做这种振动。我们把振子经历  $B \rightarrow O \rightarrow B' \rightarrow O \rightarrow B$  路径的一个完整振动过程叫作一次全振动。

如果实验采用如图 2-1-3 (a) 所示的传感器和计算机组成的记录装置，则可以得到振子较精确的往复运动的位移—时间图像，如图 2-1-3 (b) 所示。

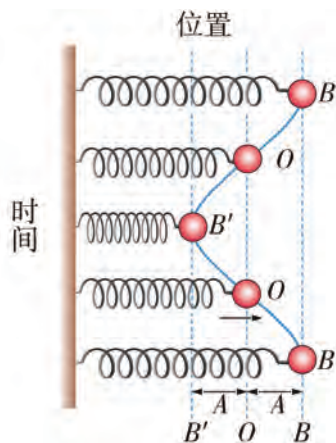
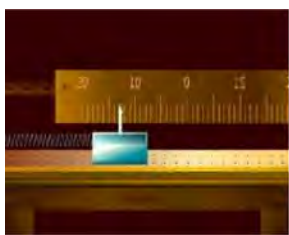
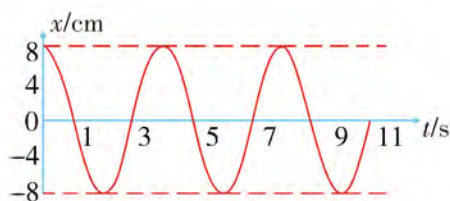


图 2-1-2 振子振动的位置随时间的变化



(a) 记录装置



(b) 记录装置绘制的“位移—时间”图像

图 2-1-3 绘制振子振动的位移—时间图像

由图 2-1-3 (b) 可知，振子一直在平衡位置附近振动，每个全振动中偏离平衡位置的最大距离和需要的时间都不变，振子的位移—时间函数为正弦或者余弦函数，我们把具有这种特征的运动叫作**简谐运动** (simple harmonic motion)。物体振动时离开平衡位置的最大距离叫作振动的**振幅**。物体完成一次全振动所需要的时间叫作振动的**周期**，用  $T$  表示，对应正弦或者余弦函数的一个周期。物体在一段时间内全振动的次数与所用时间之比叫作振动的**频率**，用  $f$  表示。周期和频率的关系为

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

(2.1.2)

振幅、周期与频率都是描述简谐运动的特征物理量.

## 简谐运动的能量特征

通过实验,我们发现振子振动时的速率在零与最大值之间反复变化,说明动能在反复变化.现在让我们进一步分析简谐运动能量的具体特征.



### 讨论与交流

1. 总结图 2-1-1 中的振子在完成一次全振动的过程中位移、回复力、加速度、速度等物理量的变化情况,完成表 2-1-1. (大小变化选填“增大”“减小”“最大”“0”或者“不变”,方向选填“向右”或者“向左”.)

表 2-1-1

简谐运动过程		$B$	$B \rightarrow O$	$O$	$O \rightarrow B'$	$B'$	$B' \rightarrow O$	$O$	$O \rightarrow B$
位移	大小变化								
	方向								
回复力	大小变化								
	方向								
加速度	大小变化								
	方向								
速度	大小变化								
	方向								
动能	大小变化								
弹性势能	大小变化								
机械能	大小变化								

2. 振子在振动过程中,离开平衡位置的距离、回复力、加速度、速度和能量各具有什么特征?

由讨论可知,在平衡位置,振子离开平衡位置的距离为零,所受回复力为零,加速度为零,速度的大小最大,动能最大,弹性势能为零;在最大振幅处,振子离开平衡位置的距离最大,所受回复力的大小最大,加速度的大小最大,速度为零,动能为零,弹性势能最大.

当振子离开平衡位置的距离从零向最大值变化时,回复力、加速度、速度、动能、弹性势能等都由距离为零时对应的值向距离最大时对应的值变化,反之亦然.在回复力的作

用下，振子在振动过程中离开平衡位置的距离、加速度、速度、动能、弹性势能等在每个周期里完全重复。这样的运动叫作**周期性往复运动**。

对于弹簧振子，最初将振子拉离平衡位置，其实是将弹性势能储存在弹簧中。弹簧储存的弹性势能的多少与最初弹簧的形变量和劲度系数有关。同一弹簧，弹簧的形变量越大，所储存的弹性势能越大；相同的形变量，弹簧的劲度系数越大，弹簧储存的弹性势能越大。当振子在振幅最大处时，弹簧弹性势能最大，振子动能为零；当振子在平衡位置时，弹簧弹性势能为零，振子动能最大。弹簧在振动过程中，弹簧振子的弹性势能和动能相互转化，其和等于最初给定的弹性势能，机械能守恒。



## 实践与拓展

查找资料，思考能否将风能储存在弹簧里，如何实现。请设计一个方案。

### 储能弹簧和弹簧减振器

为了减少路面对车辆的振动和冲击，一般会利用弹簧来吸收振动和冲击的能量。在如图 2-1-4 所示的汽车减振器中，悬架中的弹簧可以被看作是一个储能元件，储能的同时还把这些对车辆乘坐舒适性和操纵稳定性不利的能量消耗掉。

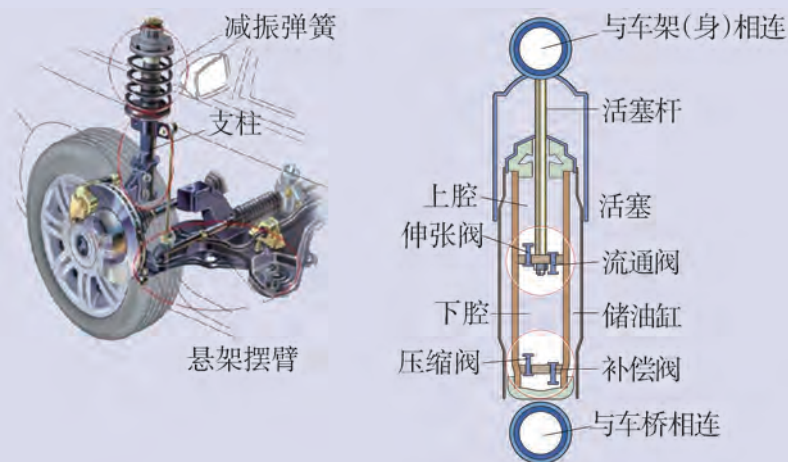


图 2-1-4 汽车液压式减振器

液压式减振器的工作原理：汽车往液压减振器内部充注减振器专用油。内部分为储油缸和工作缸，而活塞将工作缸分为上腔和下腔。在活塞上设有伸张阀和流通阀，用于控制上腔和下腔之间油液的流动；而工作缸下腔与储油缸之间的压缩阀和补偿阀用于油液在下腔与储油缸之间的流动。当车架与车桥做往复相对运动时，活塞在缸筒内做往复运动。减振器被压缩时，活塞下行，上腔容积增大，下腔容积减小，流通阀打开，下腔的油液通过流通阀进入上腔；同

时一部分油液打开压缩阀进入储油缸。这两个阀对油液的节流作用使减振器产生压缩运动时的阻尼作用。减振器被拉伸长，活塞上行，上腔容积减小而下腔容积增大，伸张阀打开，上腔的油液通过伸张阀进入下腔；同时一部分油液打开补偿阀，由储油缸进入下腔。这两个阀对油液的节流作用使减振器产生伸张运动时的阻尼作用。由于伸张阀弹簧力大于流通阀，且伸张阀阀孔流通面积小于流通阀，这使得减振器的伸张行程产生的阻尼力大于压缩行程的阻尼力，达到迅速减少弹簧振弹的要求。

液压式减振器工作时，孔壁与油液间的摩擦及液体分子内摩擦便形成对振动的阻力，使车身和车架的振动能量转化为内能，而被油液和减振器壳体所吸收，然后散到大气中。简单地说就是将动能转化为内能。减振器连续运转几分钟，减振器储油缸外壁会变得非常热，甚至烫手。

值得注意的是，减振器太软，车身就会上下跳跃；减振器太硬，就会带来太大的阻力，妨碍弹簧正常工作。在关于悬挂系统的改装过程中，硬的减振器要与硬的弹簧相搭配；而弹簧的硬度又与车重息息相关，因此较重的车一般采用较硬的减振器。与引振曲轴相接的装置，用来抗衡曲轴的扭转振动（即曲轴受汽缸点火的冲击力而扭动的现象）。

弹簧减振器是一种对位移反应灵敏的振动控制装置，主要适用于核电厂、火电厂、化工厂、钢铁厂等的管道及设备的抗振动，常用于控制持续性的流体振动扰动（如流体脉动、两相流、高速流和风振等）的管系振动。

弹簧减振器虽然能有效地控制各种频率的振动和摆动，但会在一定程度上造成管道的热变形，设计时应充分考虑弹簧减振器对管道产生的附加力。



## 练习

1. 用手拍球，使球在地面上来回跳动，球的运动是简谐运动吗？为什么？
2. 如图 2-1-5 所示，光滑槽的半径  $R$  远大于小球运动的弧长，现有一个小球（可视为质点），由静止释放，小球在往复运动过程中能量是如何转化的？请定性分析小球的回复力。

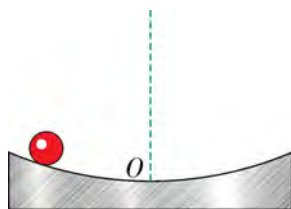


图 2-1-5

3. 如图 2-1-6 所示, 轻弹簧上面固定一质量为  $m$  的小球, 小球在竖直方向上做简谐运动, 振幅为  $A$ . 运动过程的最高点弹簧正好为原长, 则小球在振动过程中, 由哪些力提供回复力? 平衡位置在哪里?



图 2-1-6

4. 做简谐运动的某物体, 全振动 50 次用了 20 s, 求它的振动周期和频率.

5. 如果表 2-1-2 给出的是做简谐运动的物体的位移  $x$ 、速度  $v$  与时刻的对应关系,  $T$  是振动周期. 若甲表示位移, 则哪一项表示相应的速度? 若丁表示位移, 则哪一项表示相应的速度?

表 2-1-2

物理量	时刻				
	0	$\frac{T}{4}$	$\frac{T}{2}$	$\frac{3T}{4}$	$T$
甲	零	正向最大	零	负向最大	零
乙	零	负向最大	零	正向最大	零
丙	正向最大	零	负向最大	零	正向最大
丁	负向最大	零	正向最大	零	负向最大



## 第二节

## 简谐运动的描述



我们在上一节以弹簧振子为例，分析了振子做简谐运动时位移、速度和加速度等随时间变化的情况。简谐运动的位移、速度和加速度随时间的变化关系也可以用函数和图像来表示。

### 简谐运动的函数描述

振子振动时位移与时间关系的曲线叫振动曲线，简称  $x-t$  图线。它表明振子的位移随时间按正弦或余弦函数的规律变化。这就意味着我们可以用三角函数公式来描述简谐运动。

描述简谐运动位移—时间图像的函数表达式为

$$x = A\cos(\omega t + \varphi) \quad (2.2.1)$$

式中  $A$  是简谐运动的振幅， $\omega$  为简谐运动的角频率。后面我们会通过例子阐述  $\varphi$  的物理意义。

$\omega$  与周期  $T$  或者频率  $f$  的关系为

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (2.2.2)$$

因此，式 (2.2.1) 也可以表示为

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

或者

$$x = A\cos(2\pi ft + \varphi)$$

我们可以从简谐运动的函数描述得出简谐运动的振幅、周期、频率等物理量，还能比较两个相同频率简谐运动的运动先后关系。同时，也可以根据两个简谐运动的运动先后关系，从一个简谐运动的函数描述出发，推导出另一个相同频率简谐运动的函数描述。

## 简谐运动的图像描述

假设两个振子  $P$ ,  $Q$  做简谐运动的位移—时间函数表达式分别为

$$x_1 = A_1 \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$$

和

$$x_2 = A_2 \cos\left(\frac{2\pi t}{T} + \frac{\pi}{2}\right)$$

在  $x-t$  坐标系中分别作出它们的振动曲线, 如图 2-2-1 所示. 从这两条曲线可以明显看出两个简谐运动的振幅  $A_1$  和  $A_2$ , 以及周期  $T$ , 而且可以看出它们的振动“步调”不同. 振子  $Q$  在  $t = \frac{3}{4}T$  时达到正向最大值, 而振子  $P$  在  $t = T$  时才达到正向最大值, 即振子  $Q$  的振动比振子  $P$  的振动超前  $\frac{1}{4}$  个周期. 我们称  $Q$  的振动与  $P$  的振动有  $\frac{\pi}{2}$  的相位差. 我们把位移—时间函数  $x = \cos(\omega t + \varphi)$  中的  $\omega t + \varphi$  叫作相位, 而对应  $t = 0$  时的相位  $\varphi$  叫作初相位, 简称初相.

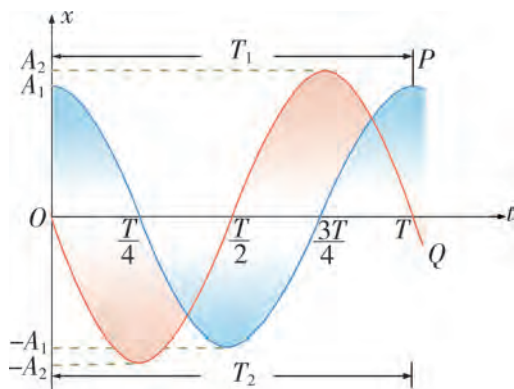


图 2-2-1 振子  $P$ ,  $Q$  的振动曲线

从式 (2.2.1) 可知, 数学上, 位移  $x$  随时间的变化完全由相位 ( $\omega t + \varphi$ ) 决定. 如当相位从 0 增加到  $2\pi$  时,  $x$  取遍区间  $[-A, A]$  内所有可能的值; 或者说, 相位每增加  $2\pi$ , 振子完成一次全振动. 相位从 0 变到  $\alpha$ , 需要  $\frac{\alpha}{2\pi}T$  的时间. 相位是一个表示振子处在振动周期中的哪个位置的物理量.

因此, 对于频率相同、相位不同的振子, 我们通过对它们的相位差来比较它们的振动先后关系. 若相位差用  $\Delta\varphi$  表示, 则

$$\Delta\varphi = (\omega t + \varphi_1) - (\omega t + \varphi_2) = \varphi_1 - \varphi_2$$

从以上分析可以看出, 相位是一个相对概念, 与所取的时间零点有关. 两个振动的相位差是个绝对概念, 表示两个频率相同的简谐运动的振动先后关系.

相位和初相与振幅、频率（周期）一样，是描述简谐运动的重要物理量。

**例题：**如图 2-2-2 所示是某弹簧振子的振动图像。

(1) 求振子振动的振幅、周期、频率和初相。

(2) 如果从点  $O$  开始计时，到图中的哪一点为止，振子完成了一次全振动？如果从点  $C$  开始计时呢？

(3) 当  $t = 1.4 \text{ s}$  时，振子对平衡位置的位移是多少？它在一次全振动中所通过的路程是多少？

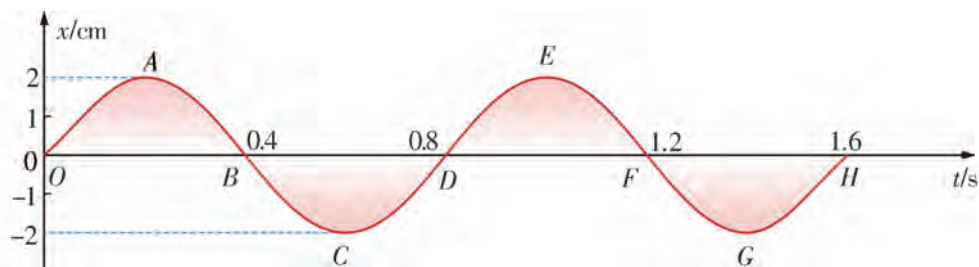


图 2-2-2 某弹簧振子的振动图像

**分析：**可以通过振动图像直接读取振子的振幅、周期和初相等信息，通过计算可以得到振子的频率、位移和路程。

**解：**(1) 振幅是振子离开平衡位置的最大距离。从图 2-2-2 中可以看出，最大距离为  $2 \text{ cm}$ ，即振幅  $A = 2 \text{ cm}$ 。

周期是完成一次全振动所需要的时间。图中  $OD$  之间表示一次全振动，所对应的时间是  $0.8 \text{ s}$ 。所以

$$T = 0.8 \text{ s}.$$

$$f = \frac{1}{T} = 1.25 \text{ Hz}.$$

初相是  $t = 0$  时的相位，根据式 (2.2.1) 可知

$$\varphi = -\frac{\pi}{2}.$$

(2) 从图中可以看出，从点  $O$  开始计时，到点  $D$  为止，振子完成了一次全振动，并随即开始重复前面所经历的过程。如果从点  $C$  开始计时，则到点  $G$  为止，振子同样完成了一次全振动，所经历的时间都是  $0.8 \text{ s}$ 。

(3) 从图中可以看出，当  $t = 1.4 \text{ s}$  时，振子对平衡位置的位移是  $-2 \text{ cm}$ 。它在一次全振动中所通过的路程就是振幅的 4 倍，即  $2 \times 4 \text{ cm} = 8 \text{ cm}$ 。

## 从匀速圆周运动得出简谐运动的数学描述

一辆玩具电动小车在一平面上做匀速圆周运动。在同一平面上放置一台幻灯机，灯光水平照射在这辆小车上，小车运动时在墙壁上的影子正好和弹簧振子做简谐运动的情景相似：圆周运动的圆心的投影就是简谐运动的平衡位置，做匀速圆周运动的小车每一时刻在墙壁上的投影与简谐运动的振子位置始终对应（如图 2-2-3 所示）。

设小车沿半径为  $A$  的圆周做匀速圆周运动，其角速度为  $\omega$ ，则向心力

$$F = m\omega^2 A$$

如图 2-2-4 所示， $F$  在  $x$  轴上的投影

$$F_x = -m\omega^2 A \cos\theta$$

上式的负号表示  $F_x$  与  $x$  轴的正方向相反，由几何关系可知

$$x = A \cos\theta$$

于是有

$$F_x = -m\omega^2 x$$

由于  $m$ 、 $\omega$  都有确定的数值， $m\omega^2$  可以用一个常数  $k$  表示，即  $k = m\omega^2$ ，上式可以写成  $F_x = -kx$ 。弹簧振子做简谐运动时，受到的回复力  $F_x = -kx$ 。由此可知，做匀速圆周运动的物体在某一直径方向的投影正好与弹簧振子做简谐运动的情景完全相同，并且  $\omega^2 = \frac{k}{m}$ 。

简谐运动的振动周期与物体做匀速圆周运动的周期相等，所以

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

如图 2-2-5 所示，简谐运动的位移函数关系为

$$x = A \cos\theta$$

把  $\theta = \omega t + \varphi$  代入，得

$$x = A \cos(\omega t + \varphi)$$

式中  $A$  表示振幅， $\omega$  表示角频率， $\omega = 2\pi f$ ， $\varphi$  表示初相。

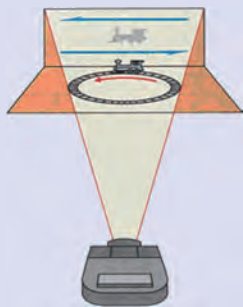


图 2-2-3 匀速圆周运动的投影照片

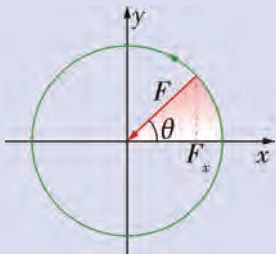


图 2-2-4 向心力在  $x$  轴上的投影

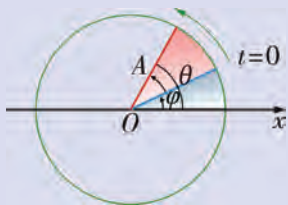


图 2-2-5 简谐运动的位移

**练习**

1. 如图 2-2-6 所示是某振子做简谐运动的图像, 判断以下说法是否正确, 并说明理由.

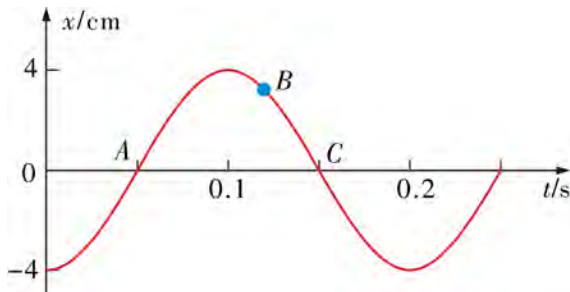


图 2-2-6

- (1) 因为振动图像可由实验直接得到, 所以图像就是振子实际运动的轨迹.
- (2) 振动图像反映的是振子的位移随时间变化的规律, 并不是振子运动的实际轨迹.
- (3) 振子在  $B$  位置的位移就是曲线  $BC$  的长度.
- (4) 振子运动到  $B$  位置时的速度方向即为该点的切线方向.
- (5) 由图像可以直观地看出周期和振幅.
- (6) 利用图像还能知道速度、加速度、回复力及能量随时间的变化情况.

2. 如图 2-2-7 所示是物体做简谐运动的振动图像, 它的振幅、周期、频率、角频率各是多少? 写出位移随时间变化的表达式, 并指出初相的数值.

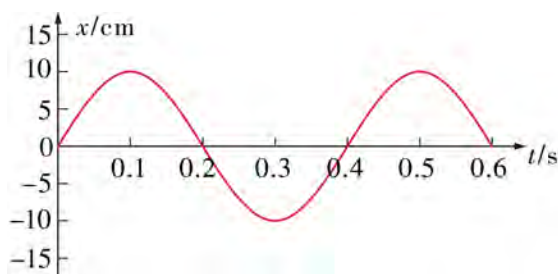


图 2-2-7

3. 一水平弹簧振子的振幅  $A = 2.0 \times 10^{-2} \text{ m}$ , 周期  $T = 0.50 \text{ s}$ . 当  $t = 0$  时, 振子经过  $x = 2.0 \times 10^{-2} \text{ m}$  处, 向负方向运动. 写出弹簧振子的简谐运动表达式.

4. 一个小球和轻质弹簧组成的系统, 小球按  $x_1 = 0.05 \cos\left(8\pi t + \frac{\pi}{4}\right) \text{ cm}$  的规律振动.

- (1) 求振动的角频率、周期、频率、振幅和初相.
- (2) 另一简谐运动的振动规律为  $x_2 = 0.05 \cos\left(8\pi t + \frac{3}{4}\pi\right) \text{ cm}$ , 求它们的相位差.

## 第三节

## 单摆



在日常生活中，我们经常看到悬挂起来的物体在竖直平面内做摆动，如挂钟摆锤的摆动、秋千的摇荡等。如果悬挂物体的绳子的伸缩和质量可以忽略不计，绳长比物体的尺寸大很多，物体可以看作质点，这样的装置可以看作**单摆**（simple pendulum）。单摆是实际摆的理想模型。单摆的运动也是往复运动。若单摆的摆角小于 $5^\circ$ ，单摆的摆动可近似看成简谐运动。这一节我们来探究影响单摆周期的因素。



### 实验与探究

探究影响单摆周期的因素，可以从单摆的装置及与摆动相关的因素入手。影响单摆周期的因素可能有单摆摆长（细绳的质量忽略）、小球质量（小球的体积忽略）、摆角等。

根据以上猜想，我们采用控制变量法研究单摆摆长、小球质量、摆角对单摆周期的影响。实验方案的设计和实验器材的选定，应满足单摆做简谐运动的条件：细绳没有弹性，小球的密度大、体积小、摆角小。

如图 2-3-1 所示，进行实验时，保证摆长远大于小球直径，单摆的摆动是在竖直平面内，并思考以下几点：

(1) 参考弹簧振子做简谐运动时完成一个周期的过程，单摆摆动一个周期的过程是怎样的？

(2) 测量单摆的周期时，采用什么样的方法可以减小误差？以哪个位置作为起点更方便计时和减小误差？

设计实验方案，按设计好的实验步骤进行实验。

分别改变单摆摆长、小球质量、摆角等因素，测量单摆周期，将数据填入自己设计的表中。



图 2-3-1 单摆周期的测量

实验表明，在摆角很小的情况下，单摆的周期与小球质量和摆角无关，与单摆摆长有关。单摆的周期大小与摆长的二次方根成正比，即  $T \propto \sqrt{L}$ 。



### 讨论与交流

分析单摆摆动时哪个力为回复力。

如图 2-3-2 所示，重力  $mg$  沿圆弧切线方向的分力  $F$  为单摆摆球的回复力。单摆的简谐运动周期与装置的固有因素有关，和外界条件无关。故单摆的简谐运动周期也叫作单摆的固有周期，其频率为固有频率。弹簧振子的简谐运动周期和频率也是固有的，与弹簧振子的劲度系数和振子质量有关。

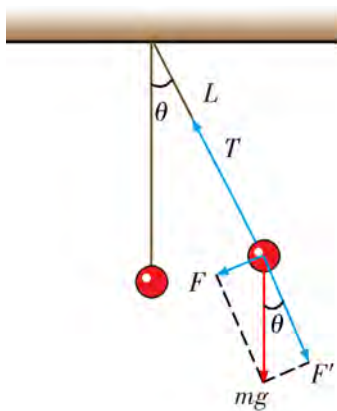


图 2-3-2 单摆的回复力  $F$

荷兰物理学家惠更斯于 1659 年在研究单摆的振动时，发现单摆做简谐运动的周期  $T$  跟摆长  $L$  的二次方根成正比，跟重力加速度  $g$  的二次方根成反比，用公式表示为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (2.3.1)$$



### 实践与拓展

1. 参考弹簧振子演示位移—时间函数曲线的方法（如图 2-1-2 所示），设计一个实验演示单摆的位移—时间函数曲线。
2. 通常将振动周期为 2 s 的单摆称为秒摆，请尝试制作一个秒摆。

## 用类比法求弹簧振子的周期

单摆的受力情况如图 2-3-3 所示, 当摆球静止在点  $O$  时, 摆球受到的重力  $G$  和悬线的拉力  $F_0$  彼此平衡, 点  $O$  是单摆的平衡位置. 拉开摆球, 使它偏离平衡位置一个很小的角度, 然后释放, 摆球将沿着平衡位置  $O$  为中段的一段圆弧  $AA'$  做往复运动, 这就是单摆的振动.

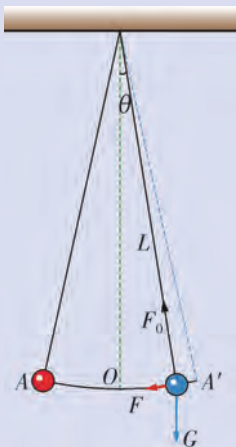


图 2-3-3 单摆摆动任意角度时的受力分析图

在单摆振动时, 摆动任意一个角度  $\theta$ , 摆球受到绳子拉力  $F_0$  和重力  $G$  的作用. 将重力  $G$  沿着绳子方向和圆弧切线方向分解. 绳子方向的分力  $mg\cos\theta$  与绳子拉力的合力提供向心加速度. 重力  $G$  沿圆弧切线方向的分力  $mg\sin\theta$  提供单摆的回复力, 即

$$F = mg\sin\theta$$

在  $\theta$  较小的情况下 ( $\theta < 5^\circ$ ),

$$\sin\theta \approx \frac{x}{L}$$

可得回复力

$$F \approx -mg \frac{x}{L}$$

其中  $x$  为摆球偏离平衡位置的位移,  $L$  为摆长, 负号表示回复力  $F$  与位移  $x$  的方向相反. 当  $\theta$  很小时, 由于  $m$ ,  $g$ ,  $L$  都有确定的数值, 所以回复力与小球的位移成正比, 是简谐运动. (从这些近似处理可知, 只有在摆角小、小球直径远小于绳子长度时, 单摆的运动才是简谐运动.)

类比弹簧振子做简谐运动的回复力  $F = -kx$ , 单摆的  $\frac{mg}{L}$  类似于弹簧振子的

$k$ . 将单摆周期中的  $\frac{L}{g}$  用  $\frac{m}{k}$  代替, 则得到弹簧振子的周期为  $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$ .



 练习

1. 一般在摆角小于\_\_\_\_\_时, 单摆振动可看成是简谐运动. 单摆的周期仅与\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_有关, 而与\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_无关. 其计算公式为\_\_\_\_\_.

2. 月球表面的重力加速度是地球表面的重力加速度的 $\frac{1}{6}$ , 将地球上的秒摆拿到月球上去, 此摆的周期变为原来的\_\_\_\_\_倍.

3. 已知单摆的摆长是 1 m 时, 摆动周期是 2 s. 当摆长改变为 0.81 m 时, 摆动周期是多少? 要使摆动周期为 4 s, 摆长应是多少?

4. 某一单摆原来的周期是 2 s, 在下列情况下, 周期有无变化? 如有变化, 变为多少?

(1) 摆长减为原长的 $\frac{1}{4}$ .

(2) 摆球的质量减为原来的 $\frac{1}{4}$ .

(3) 振幅减为原来的 $\frac{1}{4}$ .

(4) 重力加速度减为原来的 $\frac{1}{4}$ .

## 第四节 用单摆测量重力加速度

由单摆的振动周期公式  $T=2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ , 可得

$$g = \frac{4\pi^2 L}{T^2} \quad (2.4.1)$$

因此, 通过实验方法测出摆长  $L$  和周期  $T$ , 即可计算得到当地的重力加速度.



### 实验与探究

用长约 1 m 的细丝线、球心开有小孔的金属小球、带有铁夹的铁架台、长约 1 m 的毫米刻度尺、秒表、游标卡尺等器材来测量当地的重力加速度.

在实验操作之前, 请思考下列问题.

- (1) 单摆摆长是长些好还是短些好? 为什么?
- (2) 为什么要保证摆球在竖直平面内摆动? 测周期时为什么要测出单摆完成 30~50 次全振动的时间, 再算出平均完成一次全振动所用的时间 (即单摆的振动周期)?
- (3) 记录振动次数时, 为什么要以摆线通过平衡位置处的标记为准?

如图 2-4-1 所示, 将细线穿过金属小球上的小孔, 在细线的一端打一个稍大一点的结, 制成一个单摆. 将铁夹固定在铁架台上端, 铁架台放在桌边, 使铁夹伸出桌面, 然后把单摆固定在铁夹上, 使摆球自由下垂.

测量摆长 (摆球静止时悬点到摆球球心的距离): 用米尺测量悬线长度  $L_0$  (精确到 1 mm), 用游标卡尺测量摆球的直径  $d$ , 则摆长为  $L=L_0+\frac{d}{2}$ .

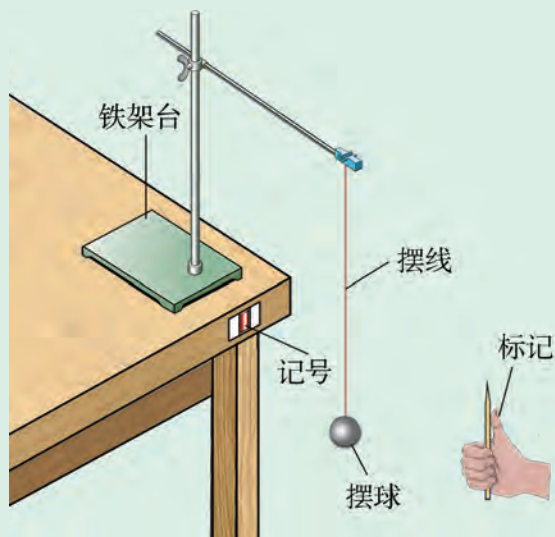


图 2-4-1 用单摆测量重力加速度

将摆球从平衡位置拉开一个很小的角度（小于 $5^\circ$ ），然后由静止释放摆球，使摆球在竖直平面内摆动。用秒表测出单摆完成30~50次全振动的的时间 $t$ （注意记全振动次数时，以摆线通过平衡位置处的标记为准，设全振动次数为 $n$ ），计算出平均完成一次全振动所用的时间，即为单摆的振动周期 $T = \frac{t}{n}$ 。

用公式 $g = \frac{4\pi^2 L}{T^2}$ 算出当地的重力加速度。

改变摆长，重做几次实验，可得一系列的测量值。

将每次实验测得的摆线长度 $L_0$ 、摆球直径 $d$ 、全振动次数 $n$ 和振动总时间 $t$ ，以及算出的摆长 $L$ 、振动周期 $T$ 和重力加速度 $g$ 记录在表2-4-1中。可得一系列重力加速度的值，最后算出其平均值。

表2-4-1 实验数据记录表

实验次数	摆线长度 $L_0/\text{m}$	摆球直径 $d/\text{m}$	摆长 $L/\text{m}$	全振动次数 $n$	振动时间 $t/\text{s}$	振动周期 $T = \frac{t}{n}$	重力加速度 $g$	重力加速度的平均值 $\bar{g} = \frac{1}{n} (g_1 + g_2 + \dots + g_n)$
1								
2								
3								
4								
5								
...								

我们也可以利用图像法算出本地区重力加速度。以 $L$ 为横坐标，以 $T^2$ 为纵坐标建立坐标系，如图2-4-2所示，根据表2-4-1中的数据（算出 $T^2$ ）作 $T^2-L$ 图线，由函数关系 $T^2 = \frac{4\pi^2}{g}L$ 知，它应该是过原点的一条直线（尽量让各数据点对称地分布在这条直线的两侧）。

斜率 $k$ 的求法可以选取直线上容易读数且相距较远的两个点 $(L_1, T_1^2)$ 和 $(L_2, T_2^2)$ ，求出摆长的差值 $\Delta L = L_2 - L_1$ ，周期平方的差值 $\Delta T^2 = T_2^2 - T_1^2$ ，从而求出 $k = \frac{\Delta T^2}{\Delta L}$ ，最后得出

本地区重力加速度 $g = \frac{4\pi^2}{k}$ 。

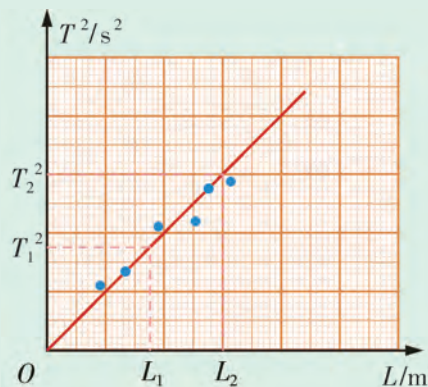


图2-4-2 用图像法处理数据

实验所用的单摆应尽量符合理想模型的要求，即摆线细且弹性小，摆球用密度和质量较大的小球，直径应较小。单摆的上端不要卷在夹子上，而要用夹子夹紧，以免单摆摆动时摆线滑动引起摆长改变。

单摆做简谐运动的回复力、位移、速度、加速度、机械能等物理量在一个完整周期中的变化规律和弹簧振子的简谐运动一样，而且两者的振动周期都是固有周期，由系统自身决定，与外界因素无关。



### 实践与拓展

1. 两个或者两个以上同学做荡秋千的实验，观察以下几点：
  - (1) 将秋千拉高后放手，秋千在随后的摆荡中能达到初始的高度吗？
  - (2) 秋千摆荡是简谐运动吗？
2. 根据学过的知识，还有哪些方法可以测量重力加速度？尝试一下，看看哪种测量方法更准确且容易实现。



### 练习

1. 某实验小组的同学想测量他们学校所在地的重力加速度。
  - (1) 身边能找到的小球：直径为 5 mm 的钢球（有贯穿球心的孔洞）、直径为 5 mm 的聚四氟乙烯小球（有贯穿球心的孔洞）、直径为 8 mm 的钢球（有能挂住绳子的小钩）、直径为 6 mm 的铝球（密度小，有不通过球心的贯穿孔洞）。
  - (2) 身边能找到的单摆摆线：1 m 长的摆线、0.5 m 长的摆线、0.1 m 长的摆线。请合理选择测量重力加速度的摆球、摆线，并确定单摆的最大摆角。
2. 如图 2-4-3 所示，某同学利用双线摆和光电计数器测量当地的重力加速度。已知每根悬线长为  $d$ ，两悬点间相距  $s$ ，金属小球半径为  $r$ ， $AB$  为光电计数器。现将小球垂直于纸面向外拉动，使悬线偏离竖直方向一个较小的角度并由静止释放，同时，启动光电计数器。当小球第一次经过图 2-4-3 中虚线（光束）位置  $O$  时，由  $A$  射向  $B$  的光束被挡住，计数器计数一次，显示为“1”，同时计时器开始计时。然后每当小球经过点  $O$  时，计数器都计数一次。当计数器上显示的计数次数刚好为  $n$  时，所用的时间为  $t$ ，由此可知：

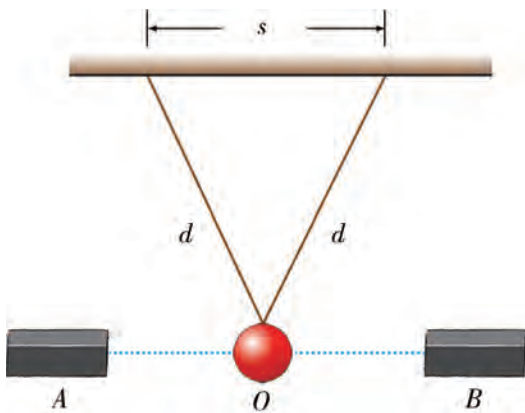


图 2-4-3

- (1) 双线摆的振动周期  $T = \underline{\hspace{2cm}}$ ，双线摆的等效摆长  $L = \underline{\hspace{2cm}}$ 。
- (2) 依据公式  $g = \underline{\hspace{2cm}}$  代入周期  $T$  和等效摆长  $L$  的值，即可求出重力加速度。
- (3) 该同学在实验中，测量 5 种不同摆长情况下单摆的振动周期，记录数据见表 2-4-2。

表 2-4-2

实验次数	1	2	3	4	5
$L/\text{m}$	0.50	0.80	0.90	1.00	1.20
$T/\text{s}$	1.41	1.79	1.90	2.01	2.19
$T^2/\text{s}^2$	1.99	3.20	3.61	4.00	4.80

以  $L$  为横坐标， $T^2$  为纵坐标，在图 2-4-4 中作出  $T^2 - L$  图像，并利用此图像求得重力加速度  $g = \underline{\hspace{2cm}} \text{m/s}^2$ 。（保留三位有效数字）

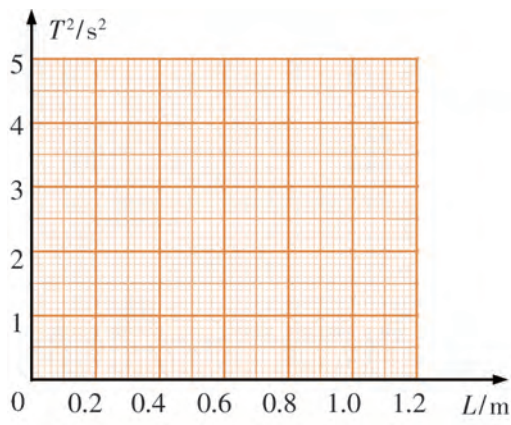


图 2-4-4

3. 已知月球表面的重力加速度是地球的  $\frac{1}{6}$ ，如果把一个周期为 8 s 的单摆放到月球上，它的周期变为多少？
4. 在生活中寻找摆钟（若找不到实物，可以上网搜索摆钟的相关资料），撰写小论文论述摆钟的构造及计时原理。

## 第五节

# 受迫振动 共振



简谐运动是实际振动的理想化模型，是一种机械能守恒的振动，所以振幅保持不变。这种振幅不变的运动叫作**等幅振动**。

我们在推动秋千使其摇荡时发现，如果不持续提供动力，秋千会逐渐慢下来直到停止。这是为什么？如何才能保持其初始时候的振荡高度？如何让秋千荡得更高？又如何让秋千快速停下来？

### 受迫振动的频率

振荡的秋千在停止提供动力后会逐渐慢下来，是因为空气阻力和摩擦力等因素导致秋千获得的初始机械能逐渐耗散，因而其振幅逐渐减小。这种振幅逐渐减小的振动叫作**阻尼振动**。此时需要外力周期性地补充能量以补偿其耗散的机械能，维持振动的振幅不变。这种在外界驱动力作用下的振动叫作**受迫振动**（forced vibration）。

前面分析的弹簧振子和单摆的自由振动频率，只与它们自身的参数有关，我们称之为**固有频率**。振动系统做受迫振动时的情况又如何呢？其振动频率与哪些因素有关？

#### 观察与思考

在图 2-5-1 中，三个不同的弹簧将三个质量相同的小球固定在摇杆上，分别使驱动力的频率由小逐渐变大，观察三个小球所做受迫振动的频率有什么变化。

将三个不同的弹簧换成三个相同的弹簧，将三个质量相同的小球换成三个质量不同的小球，重复操作，观察三个小球所做受迫振动的频率又有什么变化。

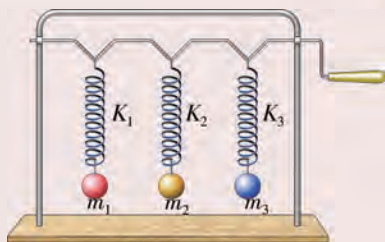


图 2-5-1 小球做受迫振动

实验表明，弹簧振子做受迫振动，振动稳定后的频率等于驱动力的频率，与弹簧振子的固有频率无关。

## 共振

虽然受迫振动的频率与振动系统的固有频率无关，但两者之间的差别会影响外界向受迫振动系统输入能量的多少。让我们先来观察下面的实验。



### 观察与思考

如图 2-5-2 所示，在一根张紧的绳上挂几个单摆，其中单摆 A、B、C 的摆长相等，单摆 A 与 D 的摆长相差最大，与单摆 E 的摆长相差其次。当单摆 A 振动时，观察其他单摆中哪个单摆的受迫振动最剧烈。

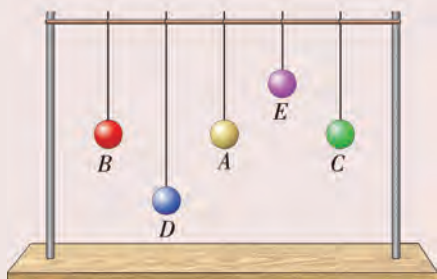


图 2-5-2 研究共振装置

实验表明，单摆 B 与 C 的摆幅最大，单摆 E 的摆幅其次，单摆 D 的摆幅最小。

在同一地点，摆长相同表明单摆频率相同；摆长相差越大，单摆固有频率相差越大。

由以上实验可知，驱动力频率等于振动系统的固有频率时，受迫振动的振幅最大，说明从外界获得的能量最大。这种现象叫作共振 (resonance)。如图 2-5-3 所示的曲线表示受迫振动的振幅与驱动力频率的关系，称为共振曲线。 $f_0$  为振动系统的固有频率。

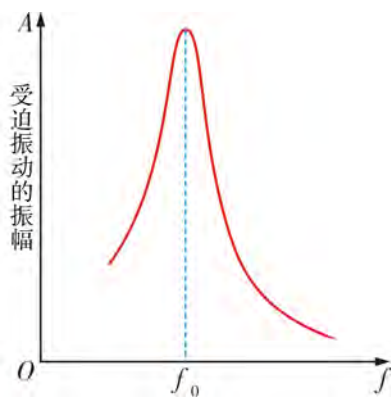


图 2-5-3 共振曲线

## 共振的应用和防止

共振有许多应用。共振筛 (如图 2-5-4 所示) 就是利用共振现象制成的。把筛子用四个弹簧支起来，在筛架上安装一个偏心轮，就成了共振筛。偏心轮在发动机的带动下发生转动，适当调节偏心轮的转速，使筛子受到的驱动力频率接近筛子的固有频率范围，这时筛子发生共振，从而提高了筛除杂物的效率。

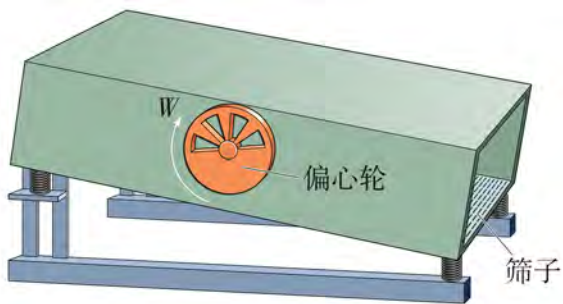


图 2-5-4 共振筛简图

许多仪器和装置要利用共振原理来制造。机械共振应用的典型例子是地震仪，它不仅是记录和研究地震的基本仪器，也是研究地球物理的重要工具。利用共振可以制造超声工具，利用

原子、分子共振可以制造各种光源（如日光灯、激光等）以及电子表、原子钟等。在音乐艺术中，不论是声乐，还是器乐，共振都起决定性的作用，甚至可以说没有共振就没有音乐。

人的听觉器官中就有一套精巧绝伦的共振系统，许多动物也如此。“听”可以说是利用共振原理对声振动的谐波分析。因此，研究共振对于医学、仿生学均有重大意义。

共振也有不利的一面，共振时由于系统振幅过大会造成机器设备、桥梁和建筑物等损坏（如图2-5-5所示）。队伍或者火车过桥时，整齐的步伐或者车轮对铁轨接头处的撞击会对桥梁产生周期性的驱动力，如果驱动力的频率接近桥梁系统的固有频率，就有可能使桥梁的振幅显著增大，严重的会使桥梁断裂。历史上有不少这样的例子。因此，队伍过桥时不能齐步走，以免产生周期性的驱动力；火车过桥要按设计要求的速度通过，使驱动力的频率与桥梁系统的固有频率保持一定差距；在设计、安装机器时也要考虑共振问题。



图2-5-5 美国塔科马海峡大桥由于被风驱动产生共振而使桥面剧烈扭动，最终断裂

总之，在需要利用共振时，应使驱动力的频率接近或者等于振动系统的固有频率；在防止共振时，应使驱动力的频率与振动系统的固有频率保持一定差距。



## 实践与拓展

频率小于20 Hz的声波叫作次声波。某些频率的次声波与人体器官的固有频率接近，容易和人体器官产生共振，因此对人体有很强的伤害性，严重的可致人死亡。通过查找和阅读有关资料，找出人体器官的固有频率范围，并查找是否存在减小或者消除次声波的方法。

## 我国古代关于共振的研究及应用

共振是一种特殊的机械振动，在声学上也被称为“共鸣”。我国古代不仅观察和记载了大量的共振现象，并且从理论和实验上都作了不少研究，还将其应用到了军事、生产、生活等领域。

### 关于共振现象的观察与记载

我国古代文献很早就有记载共振现象。公元前4世纪至公元前3世纪，《庄子》一书就记下了瑟的各弦间发生的共振现象：“为之调瑟，废于一堂，废于一室。鼓宫宫动，鼓角角动。音律同矣。夫改调一弦，于五音无当也，鼓之，二十五弦皆动。”



这段文字不仅指出了基音的共振现象，而且发现了基音和泛音的共振现象，这一发现在声学史上是了不起的成就。

除了弦线的共振，古人还记载了不少钟不扣自鸣的现象。《太平广记》（如图 2-5-6 所示）中记载道：东汉永建年时，殿上悬挂的大钟不扣自鸣。人们去请教学者，才知道这是四川岷山崩塌，钟因感应而产生共鸣的现象。

### 关于共振的实验研究

我国古人除了如实记载和尝试解释共振现象外，还进行了共振实验。北宋沈括设计了一个非常巧妙的实验：要想找到能跟某一根琴弦产生共鸣的应弦，可以先把各条弦的音依五音声阶调准，然后剪纸人放在这根弦上，这样一弹它的应弦，纸人就会跳动，弹奏其他弦，纸人就不动。如果琴弦的音高都相同，即使在其他的琴上弹，这张琴上的应弦同样也会振动。借助剪纸人的方法来研究共振现象，也体现了物理学中转化法的灵活应用。

类似的实验研究方法，意大利的达·芬奇在 15 世纪进行过，英国的诺布尔和皮戈特在 17 世纪也进行过。他们的研究比沈括要晚几百年。

### 关于共振的应用

我国古人还将共振用于军事、生活、生产等不同领域。

在军事上，《墨子》中描述了战国时墨家运用共振侦察敌情的事情：命令陶器匠烧制坛子，大小要能够容纳四十斗以上，用薄皮革裹紧坛口，放入井中，派听觉灵敏的人伏在坛口上静听地下传来的声音，如果敌人凿隧道向城内偷袭，就能弄清敌人凿隧道的方位，然后从城内凿隧道给敌人以迎面攻击。

我国古人也懂得在乐器上装上共鸣箱，将声音放大。如战国时流行的秦箏，其音箱是木制长方形的，面上张弦，用手指拨动丝弦，“木声丝声均其所自出”，“木声”指的就是乐器木质部分的共鸣声。

我国是研究共振最早的国家，取得了许多令人瞩目的成就。我们在继承先辈智慧的基础上，应当做到知其然亦知其所以然，注重理论与实验的紧密结合，注重基础科学与技术应用的紧密结合，融会贯通，这样才能肩负起发扬我国优秀传统文化的重任。



图 2-5-6 《太平广记》(节选)

 练习

1. 在生活中，哪些地方需要利用共振？哪些地方需要防止共振？
2. 有人在家里靠近电冰箱的地方摆放了一个橱柜，柜内装了一些瓶子和罐子。当电冰箱的压缩机启动时，有一些瓶子和罐子就会发出声音。这些声音的来源是什么？怎样才能消除？
3. 表 2-5-1 记录了某物体受迫振动的振幅随驱动力频率变化的关系，你认为物体的固有频率接近哪个值？为什么？

表 2-5-1

驱动力频率/Hz	30	40	50	60	70	80
受迫振动的振幅/cm	10.2	16.8	27.2	28.1	16.5	8.3

4. 汽车的车身装在弹簧上，如果这个系统的固有周期是 1.5 s，汽车在一条起伏不平的路上行驶，路上凸起处大约都相隔 8 m，汽车以多大速度行驶时，车身上下颠簸得最剧烈？

5. 如图 2-5-7 所示是一个单摆的共振曲线。

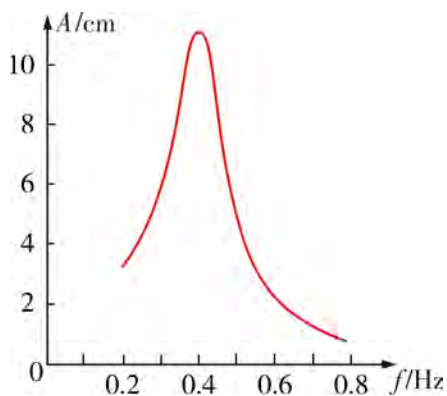


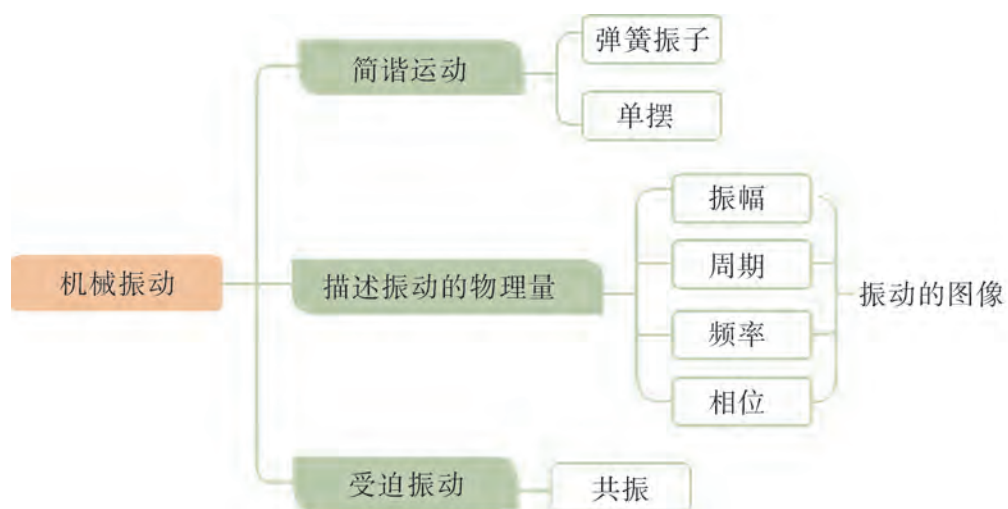
图 2-5-7

- (1) 试估计此单摆的摆长。（ $g$  取  $10 \text{ m/s}^2$ ）
- (2) 若摆长增大，共振曲线的峰将怎样移动？

## 本章小结

### 知识结构

参考下面的知识结构，请进一步梳理本章的知识。



### 回顾与评价

1. 生活中有哪些做简谐运动的物理现象？它们都有哪些共同点？
2. 本章学习了哪些描述简谐运动的方式？说一说印象最深刻的探究活动。
3. 通过学习我们知道共振的利与弊。我们还学过哪些类似的物理知识？从中我们应当树立怎样的观念？

## 习题二

1. 某人在医院做了一次心电图，结果如图 2-1 所示. 如果心电图仪卷动纸带的速度为  $1.5 \text{ m/min}$ ，图中方格纸每小格长  $1 \text{ mm}$ ，则此人的心率约为 ( ).

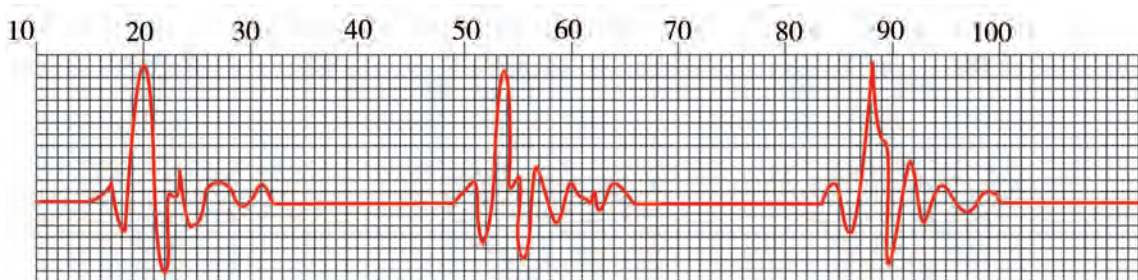


图 2-1

- A. 75 次/min      B. 65 次/min      C. 55 次/min      D. 45 次/min

2. 振子在  $a, b$  间做简谐运动，如图 2-2 所示， $O$  为平衡位置，从某一时刻开始 ( $t=0$ ) 经过  $\frac{1}{4}$  周期，振子具有正方向最大加速度，那么能正确反映振子振动情况的是 ( ).

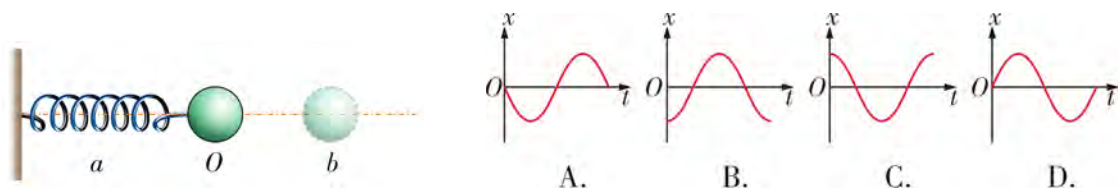


图 2-2

3. 摆长是  $1 \text{ m}$  的单摆在某地区振动周期是  $2 \text{ s}$ ，则在同一地区 ( ).

- A. 摆长是  $0.5 \text{ m}$  的单摆的周期是  $0.707 \text{ s}$   
 B. 摆长是  $0.5 \text{ m}$  的单摆的周期是  $1 \text{ s}$   
 C. 周期是  $1 \text{ s}$  的单摆的摆长为  $2 \text{ m}$   
 D. 周期是  $4 \text{ s}$  的单摆的摆长为  $4 \text{ m}$

4. 如图 2-3 所示， $A, B$  分别为单摆做简谐运动时摆球的不同位置. 其中  $A$  处为单摆摆动的最高位置，虚线为过悬点的竖直线. 以单摆最低位置为重力势能零点，则单摆在摆动过程中 ( ).

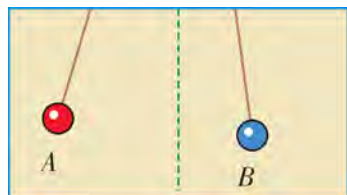


图 2-3

- A. 位于  $B$  处时动能最大  
 B. 位于  $A$  处时势能最大  
 C. 在  $A$  处的势能大于在  $B$  处的动能  
 D. 在  $B$  处的机械能大于在  $A$  处的机械能

5. 如图 2-4 所示, 轻弹簧下端固定在水平地面上, 弹簧位于竖直方向, 另一端静止于点  $B$ . 在点  $B$  正上方点  $A$  处, 有一质量为  $m$  的物块, 物块从静止开始自由下落. 物块落在弹簧上, 压缩弹簧, 到达点  $C$  时, 物块的速度为零. 如果弹簧的形变始终未超过弹性限度, 不计空气阻力, 下列判断正确的是 ( ).

- A. 物块在点  $B$  时动能最大  
 B. 从点  $A$  经点  $B$  到点  $C$ , 再由点  $C$  经点  $B$  到点  $A$  的全过程中, 物块的加速度的最大值大于  $g$   
 C. 从点  $A$  经点  $B$  到点  $C$ , 再由点  $C$  经点  $B$  到点  $A$  的全过程中, 物块做简谐运动  
 D. 如果将物块从点  $B$  由静止释放, 物块仍能到达点  $C$
6. 下列振动现象为共振现象的是 ( ).

- A. 一列火车通过钱塘江大桥时的振动  
 B. 挑水的人由于行走, 使扁担和水桶上下振动, 结果水桶中的水溢出  
 C. 工厂中机器开动引起厂房的振动  
 D. 快艇上的发动机振动带动乘客振动

7.  $A, B$  两个弹簧振子,  $A$  的固有频率为  $f$ ,  $B$  的固有频率为  $4f$ , 若它们均在频率为  $3f$  的策动力作用下做受迫振动, 则 ( ).

- A. 振子  $A$  的振幅较大, 振动频率为  $f$   
 B. 振子  $B$  的振幅较大, 振动频率为  $3f$   
 C. 振子  $A$  的振幅较大, 振动频率为  $3f$   
 D. 振子  $B$  的振幅较大, 振动频率为  $4f$

8. 测得一根弹簧位移和力的关系如表 2-1 所示, 求该弹簧的劲度系数. 在位移为  $0.003 \text{ m}$  时, 弹簧储存的势能是多少? 假设这是弹簧振子的弹簧, 若其最大振幅是  $0.005 \text{ m}$ , 这个弹簧振子的小球质量为  $0.1 \text{ kg}$ . 求在平衡位置时小球的速度.

(提示: 弹簧的弹性势能  $E_p = \frac{1}{2}kx^2$ )

表 2-1

位移/m	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005
力/N	5.010	10.030	15.020	20.030	25.090

9. 在用单摆测量重力加速度的实验中, 测得悬线长为  $l$ , 摆球直径为  $d$ , 完成  $n$  次完整振动所用时间为  $t$ , 则重力加速度  $g =$  \_\_\_\_\_.

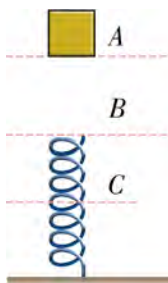


图 2-4

10. 将一单摆装置竖直悬挂于某一深度为  $h$  (未知) 且开口向下的小筒中 (单摆的下部分露于筒外), 如图 2-5 (a) 所示. 将悬线拉离平衡位置一个小角度后由静止释放, 设单摆摆动的过程中悬线不会碰到筒壁, 如果本实验的长度测量工具只能测量出筒的下端口到摆球球心的距离  $L$ , 并通过改变  $L$  而测出对应的摆动周期  $T$ , 再以  $T^2$  为纵轴、 $L$  为横轴作出函数关系图像, 那么就可以通过此图像得出小筒的深度  $h$  和当地的重力加速度  $g$ .

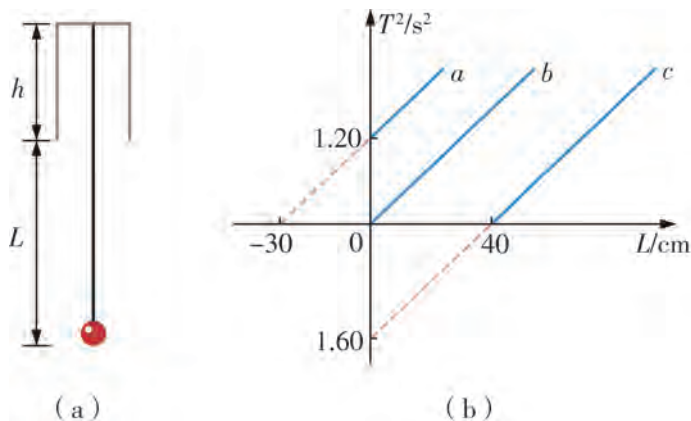


图 2-5

(1) 现有可选择的测量工具: A. 时钟; B. 秒表; C. 天平; D. 毫米刻度尺. 本实验所需的测量工具是\_\_\_\_\_.

(2) 如果实验中所得到的  $T^2 - L$  图像如图 2-5 (b) 所示, 那么真正的图像应该是图线  $a, b, c$  中的\_\_\_\_\_.

(3) 由图像可知, 小筒的深度  $h =$  \_\_\_\_\_ m, 当地的重力加速度  $g =$  \_\_\_\_\_  $\text{m/s}^2$ .

11. 如图 2-6 所示的四个单摆固定在同一根绳子上, 绳子两端固定, 四个摆长  $L_A = \frac{L_B}{2} = L_C = 2L_D$ . 当单摆 A 做简谐运动后, 其他三个单摆中振幅最大的是单摆\_\_\_\_\_. 若单摆 A 的周期为  $T$ , 则其他三个单摆的周期  $T_B =$  \_\_\_\_\_,  $T_C =$  \_\_\_\_\_,  $T_D =$  \_\_\_\_\_.

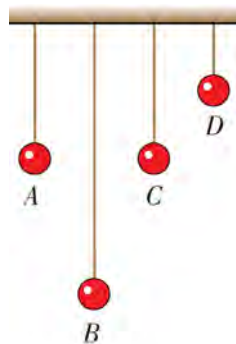


图 2-6

12.  $A, B$  两个弹簧振子同时从平衡位置以相同的速度开始运动, 它们的振动图像如图 2-7 所示. 已知单摆 A 的周期为  $T$ , 则单摆 B 的周期为\_\_\_\_\_, 它们第一次同时经过平衡位置且速度相同所需的时间是\_\_\_\_\_.

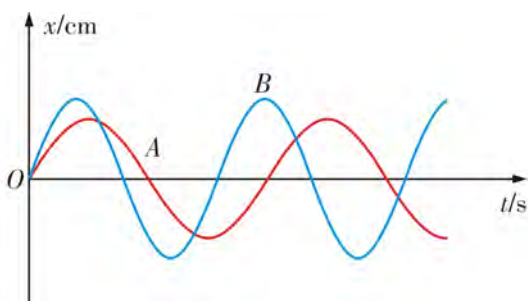


图 2-7

13. 将一测力传感器连接到计算机上就可以测量快速变化的力, 如图 2-8 (a) 所示点  $O$  为单摆的悬点, 将传感器接在摆线与点  $O$  之间, 现将小球 (可视为质点) 拉到点  $A$ , 此时细线处于张紧状态, 释放摆球, 则摆球在竖直平面内的  $ABC$  之间来回摆动, 其中点  $B$  为运动最低位置,  $\angle AOB = \angle COB = \alpha$ ,  $\alpha$  小于  $5^\circ$  且是未知量. 如图 2-8 (b) 所示是由计算得到细线对摆球的拉力大小  $F$  随时间变化的图像, 且图中  $t=0$  时刻为摆球从点  $A$  开始运动的时刻, 据力学规律和题中信息 ( $g$  取  $10 \text{ m/s}^2$ ), 求:

- (1) 单摆的周期和摆长.
- (2) 摆球的质量及摆动过程中的最大速度.

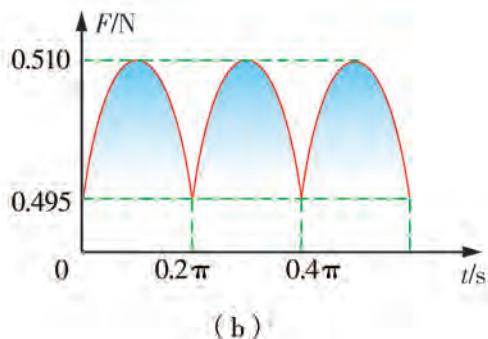
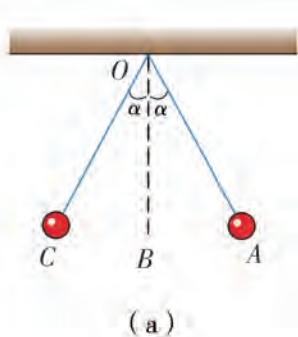


图 2-8

14. 振子以点  $O$  为平衡位置在  $B, C$  两点之间做简谐运动,  $B, C$  相距  $20 \text{ cm}$ . 某时刻振子处于点  $B$ , 经过  $0.5 \text{ s}$ , 振子首次到达点  $C$ . 求:

- (1) 振子振动的周期和频率.
- (2) 振子在  $5 \text{ s}$  内通过的路程及位移大小.
- (3) 振子在点  $B$  的加速度大小与在点  $P$  (与点  $O$  相距  $4 \text{ cm}$ ) 的加速度大小的比值.

15. 有人利用安装在气球载人舱内的单摆来确定气球的高度. 已知该单摆在海平面处的周期是  $T_0$ , 当气球停在某一高度时, 测得单摆周期为  $T$ . 求该气球此时离海平面的高度  $h$ . (地球可看成质量均匀分布、半径为  $R$  的球体)

## 第三章

## 机械波

波是我们常见的物理现象，飞鸟在平静的水面轻轻一啄，唤起涟涟波纹，向四周传去；手机铃声响起，远方亲朋的声音或图像随着电磁波到达我们面前……波的内容涉及物理学的许多领域，声波、水波和电磁波等，甚至原子和电子等微观粒子中也存在波。各种类型的波都有各自的特殊性，但也有普遍的共性。

本章我们学习的机械波，是物体振动时与周围介质相互作用，将振动形式在该介质中传播开去，这种机械振动的传播形成机械波。雨滴落在湖面上形成的波纹，音乐家拨动琴弦产生的动听旋律等都属于机械波。以千差万别的物质作为载体的机械波是如何产生和传播的？又具有怎样的传播现象和规律呢？

在本章学习中，我们将探究机械波的产生和传播，学会用图像和物理量描述机械波；理解波速、波长和频率的关系，了解机械波的反射、折射、干涉、衍射等现象；能解释多普勒效应产生的原因并列举其应用实例。





## 第一节 机械波的产生和传播

湖面上的涟漪、抖动绳子的起伏运动、敲打锣鼓的声音……这些各具形态的现象有什么特点？

### 认识机械波

我们首先通过实验来了解这些特点.



#### 观察与思考

将一根长软绳的一端拴在门把上，另一端用手握住，如图 3-1-1 所示，分别观察在下列情况下会出现什么现象：向上抖动一次；向下抖动一次；上下抖动一次；持续上下抖动.



图 3-1-1 上下抖动绳子

将绳子向上抖动一次，在绳子上形成一个凸起的波形，并向另一端传去；向下抖动一次，在绳子上形成一个凹下的波形，并向另一端传去；上下抖动一次，在绳子上形成一个凸凹相间的波形，并向另一端传去；持续地上下抖动，会在绳子上形成一系列凸凹相间的波形，并向另一端传去.

绳子的上下抖动实际上是一种机械振动. 当运动员抖动绳子的自由端时，才能产生一个沿绳子传播的波. 同理，在图 3-1-2 中，只有当运动员手持细棒抖动丝带的一端，才能形成由丝带传播的波动. 由此看出，在绳子和丝带上某一点引起的机械振动，会沿着绳子和丝带这些媒介传播，形成波动. 机械振动在媒介中的传播叫作**机械波** (mechanical wave).



图 3-1-2 运动员抖动丝带

大量事实表明，要产生机械波，必须有一个振动源，我们称之为**波源**. 但是，只有波源并不能产生机械波，还必须要有传播机械振动的媒介. 绳子、丝带等用来传播振动的媒介被称为**介质**.

形成机械波需要两个条件：机械振动的波源和传播振动的介质.

## 机械波的传播

图 3-1-3 动态地展示了机械波传播过程中不同时刻绳子上质点的运动情况。绳子上的质点本来是静止的，随着机械波的传播发生振动，表明它获得了能量。这个能量是从波源通过介质质点依次传来的。波源带动相邻质点做受迫振动，该质点振动后会同样带动其相邻质点做受迫振动，即绳子上每个振动的质点又如新的波源带动下一个质点的运动，直至机械波传播到能传播的地方。所以，机械波既传播振动的运动形式，同时也将波源的能量传播出去。波是传递能量的一种方式。

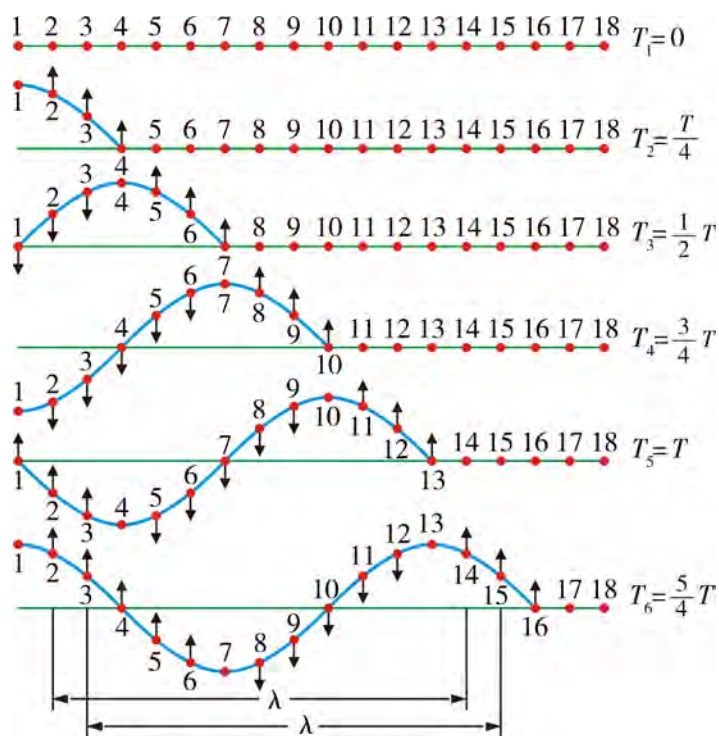


图 3-1-3 绳子上质点的运动情况示意图

从图 3-1-3 我们还可以看出，在波传播的过程中，每个质点只是在平衡位置附近做上下振动，并未形成沿机械波传播方向的宏观移动。

## 横波与纵波

仔细观察如图 3-1-4 所示的机械波，我们可以发现，机械波的传播方向和绳子上质点的振动方向垂直。像这种介质质点的振动方向与波的传播方向垂直的机械波，叫作**横波** (transverse wave)。自然界中还存在着一种机械波，它的传播方向和质点的振动方向在同一直线上，我们把这种机械波叫作**纵波** (longitudinal wave)。

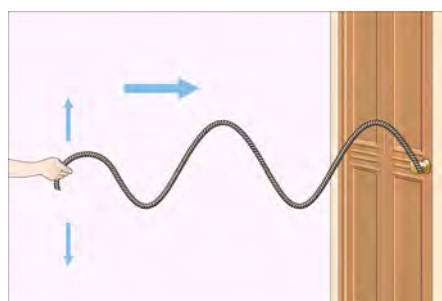


图 3-1-4 抖动绳子产生的横波

如图 3-1-5 所示的情形就是纵波的例子。当我们挤压一下弹簧后，沿弹簧两端会交替产生疏部和密部且不断地向两端传递，于是在弹簧中出现了疏密相间的波。由于弹簧的振动方向与波的传播方向在一条直线上，所以这种波是纵波。

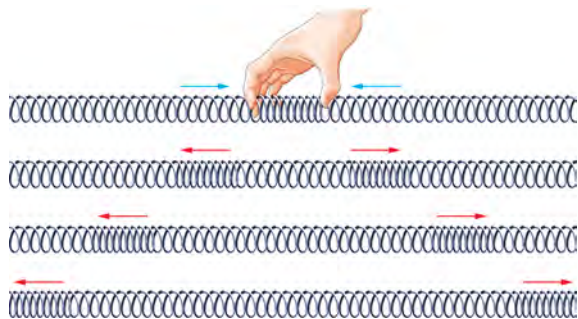


图 3-1-5 挤压弹簧产生的纵波



### 实践与拓展

1. 设计一个实验，证明声波必须有介质才能传播。总结不同介质传播的声音听起来有什么差别。
2. 同学们并排站立，并手搭手，依次起立和下蹲，以此来模拟机械横波的传播。

## 离岸流

离岸流（如图 3-1-6 所示）又叫裂流，是由于海风吹起海浪，海浪在岸边不断汇集，之后形成一股重回海洋的回流。离岸流基本垂直于海岸，一般发生在离海岸三四十米附近，长度为数十米或更长，流幅较窄，颜色较深。离岸流虽然表面看似平静，但实则是一股狭窄而强劲的水流，其流速可达  $2 \text{ m/s}$  以上，每股



图 3-1-6 离岸流

的持续时间为两三分钟甚至更长。离岸流容易出现在以下地点：白浪中断的水域、两个新月形沙洲中间的水域、垂直于海岸的海沟、礁石区域、沿岸分布的沙脊地形且沙脊有缺口或低洼区域。我国青岛和厦门是离岸流频发区域。

形成离岸流的因素有很多，其中一种解释是：风浪传播到近岸浅水区时，一方面，由于波浪及其反射波的干涉作用使得浪高加大；另一方面，随着浪不断向海岸推进，海底的摩擦阻力迅速增大。在这些因素的作用下波浪前倾、翻卷、破碎成浪花，并在近岸处形成一条明显的破碎带。海水的动能消耗殆尽时，海水恰好处于最高位置，在重力的作用下，又只能穿过破碎带再回流到海中，形成了强劲离岸流。

由于离岸流是垂直于海岸线、向外海方向快速移动的强劲海流，因此它对在海边的人员非常危险，没有经验的游泳者一旦被离岸流带离浅滩，很难与之对抗游回岸边，往往因力竭而溺水。据统计，80%~90%的海滩救援都与离岸流有关。人万一陷入离岸流，不要慌张，保持冷静，离岸流只会把人带离海岸，不会把人卷入海底，它很强劲、流速很快，但是流幅很窄，所以不要尝试逆流而返，这样容易体力耗尽发生意外。正确的自救方法是朝与离岸流垂直的方向横向游离，如果无法横向游离，就让自己“随波逐流”，保持体力。离岸流到了外海就会渐渐消失，这时再尽量保持与海岸平行的方向游一段，然后游回海岸或者寻求帮助。如果不会游泳，更要保持冷静，憋气让自己浮起来，再挥手寻求救援。



## 练习

1. 机械波是怎样产生的？为什么说机械波是传播能量的一种方式？
2. 请判断下面关于机械振动和机械波的说法是否正确，并说明理由。
  - (1) 波的传播过程就是介质中的质点由近及远的移动过程。
  - (2) 波的传播过程就是波源提供的能量由近及远在介质中的传播过程。
  - (3) 质点振动的方向总是垂直于波传播的方向。
  - (4) 波在传播过程中，介质中的质点所做的振动属于自由振动。
  - (5) 有机械振动必有机械波。
  - (6) 由某波源激起机械波，机械波和波源的频率始终相同。
  - (7) 一旦波源停止振动，由它激起的机械波也立即停止波动。

3. 有三根平行的弹性绳  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ，它们的左端处于同一直线  $MN$  上，让它们的左端同时开始振动，经过一定时间后出现了如图 3-1-7 所示的情况，其中  $PQ$  是平行于  $MN$  的一条直线。由图中可知哪些信息？

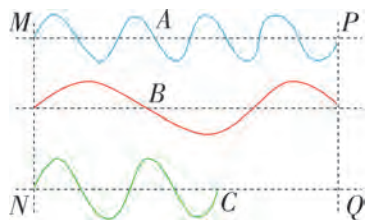


图 3-1-7

## 第二节

## 机械波的描述



波源做简谐运动时，介质的各个质点随之做简谐运动，所形成的波就是简谐波。简谐波是一种最基本、最简单的波，下面我们以简谐波为例来讨论对机械波的描述。

## 机械波的图像

与简谐运动不同，简谐波的传播既与时间有关，又与空间位置有关，所以情况要复杂得多。在平面上用图像描述简谐波时，我们先选定某一时刻，然后在平面直角坐标系中，用横坐标表示介质中各个质点的平衡位置，用纵坐标表示这一时刻各个质点偏离平衡位置的位移，连接各位移矢量的末端，就得出一条光滑曲线，这条曲线就是简谐波在这一时刻的图像。

如图 3-2-1 所示为某一时刻绳上的一列横波以及它的图像。把它们相互比较，可以看出，横波的图像能直观地表示出这列波在时刻  $t$  的波形，从图像上可以直接得出各个质点在时刻  $t$  的位移。

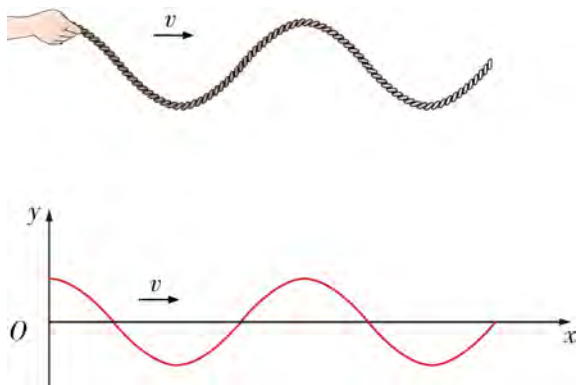


图 3-2-1 机械波的图像

从横波的图像中可以看到，在波的传播方向上达到正向最大位移的质点和达到反向最大位移的质点交替出现。前者所在处叫作**波峰**，后者所在处叫作**波谷**。必须注意的是，波的图像只能从数学意义上来理解，它不代表真正的质点的排列位置。



## 讨论与交流

振动图像与机械波的图像有什么不同？

振动图像和机械波图像看起来很相似，都是正弦曲线（或余弦曲线），但这两种图像的物理意义不同。振动图像表示的是某个质点在各个时刻的位移，机械波的图像表示的是某一时刻各个质点的位移。对于这一点也可以从横坐标来加以区别。

## 描述机械波的物理量

在波动中，对平衡位置的位移总是相同的两个相邻质点之间的距离，叫作**波长**。波长通常用 $\lambda$ 表示。如图3-2-2所示，横波的相邻波峰或者波谷的距离等于横波波长；同样，纵波的两个相邻最密部或者相邻最疏部的距离等于纵波波长。由分析可知，机械波传播一个波长的时间正好等于波源的振动周期。由于各个质点的振动周期（或频率）是相同的，它们都等于波源的振动周期（或频率），所以这个周期（或频率）就是波的周期 $T$ （或波的频率 $f$ ）。周期的单位是秒（s），频率的单位是赫兹（Hz）。它们之间的关系是

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

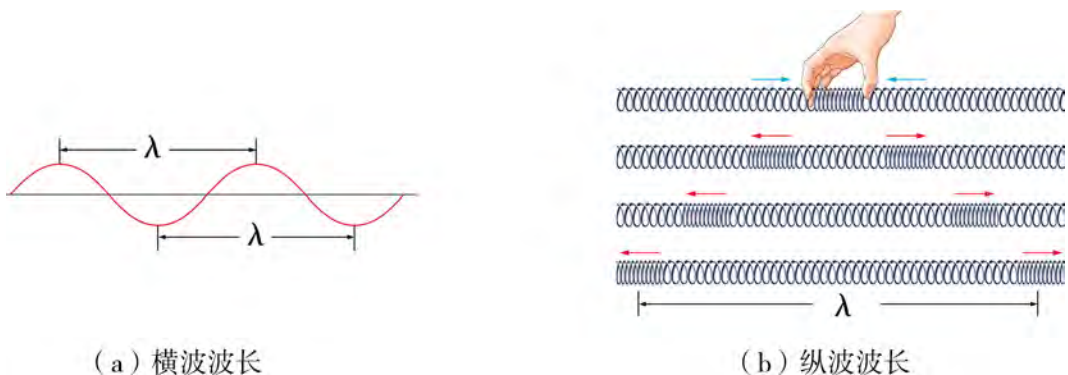


图3-2-2 波长

振动状态（以波峰或者波谷作为标志）在介质中的传播速度叫作**波速**，用 $v$ 表示，则

$$v = \frac{\lambda}{T} \quad (3.2.1)$$

由上面两式，可得

$$v = \lambda f \quad (3.2.2)$$

式(3.2.2)表示波速等于波长和频率的乘积。

波长、周期（或频率）、波速都是描述机械波的物理量。



### 讨论与交流

一列波在不同介质中传播时，其频率（或周期）、波长及波速哪个会改变？哪个不会改变？

波从一种介质进入另一种介质中传播时，频率（或周期）不变，波长与波速将会改变。机械波在介质中的传播速度由介质的性质决定，在不同介质中，波的传播速度也不同。在给定的介质和同样的条件下，波的速度是一个常量。

如图 3-2-3 所示，知道在某一时刻  $t$  波的图像，波以一定的速度  $v$  在介质中传播，经过  $\Delta t$  的时间，波的图像沿着波的传播方向运动了一段距离  $\Delta x = v\Delta t$ ，由此就可得到时刻  $t + \Delta t$  波的图像。

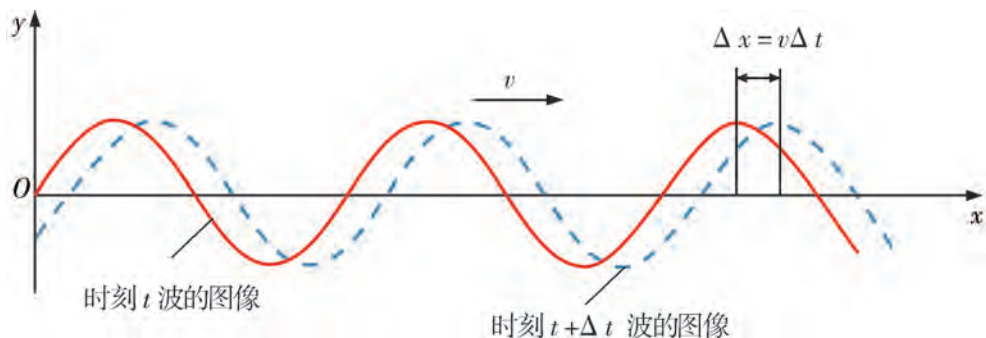


图 3-2-3 时刻  $t$  和时刻  $t + \Delta t$  波的图像

**例题 1：**一列简谐横波波源的振动图像如图 3-2-4 所示，若已知该列波在某均匀介质中的传播速度为  $0.85 \text{ m/s}$ ，请画出该列波在  $t = 0$  时刻的波的图像。取波源的平衡位置为坐标原点。

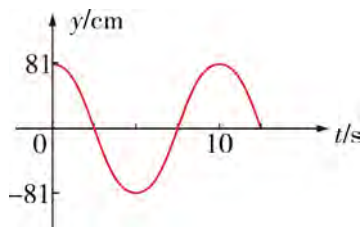


图 3-2-4

**分析：**机械波是机械振动在介质中的传播。简谐机械波的周期、振幅与波源处的简谐运动的周期、振幅相同。

**解：**该机械波波源的周期为  $10 \text{ s}$ ，振幅为  $0.81 \text{ m}$ ，故该机械波的周期  $T = 10 \text{ s}$ ，振幅为  $0.81 \text{ m}$ 。

由于其传播速度  $v = 0.85 \text{ m/s}$ ，故波长

$$\lambda = Tv = 8.5 \text{ m}.$$

取  $t = 0$  时刻的波源的平衡位置为坐标原点，  
则其波的图像如图 3-2-5 所示.

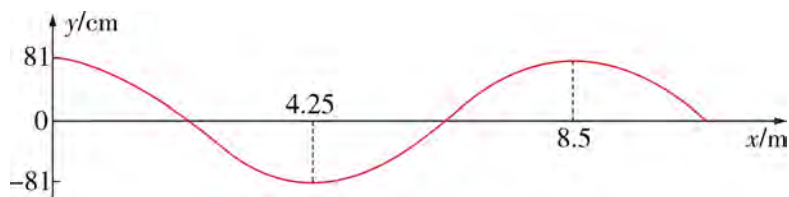


图 3-2-5

**例题 2:** 两人分别乘坐静止在湖面上的甲、乙两条小船，两船在湖面上相距 20 m. 有一列水波沿甲船到乙船的方向传播，使每条小船每分钟上下浮动 30 次. 当甲船位于波峰时，乙船刚好在波谷，此时两船间还有两个波峰. 这列水波的传播速度是多少？

**分析:** 甲、乙两船位于波的同一个传播方向上，一个周期的时间波传播的距离为一个波长. 靠近波源的甲船先振动，远离波源的乙船后振动，波峰到相邻波谷之间的距离为半个波长，连续三个波峰之间的长度为两个波长. 利用波长和周期的关系求出波的传播速度.

**解:** 小船每分钟上下浮动 30 次，即每分钟完成 30 次全振动，故水波的周期

$$T = \frac{60}{30} \text{ s} = 2 \text{ s}.$$

甲船在波峰，乙船在波谷，两船间还有两个波峰，则水波波长

$$\lambda = \frac{20}{2.5} \text{ m} = 8 \text{ m}.$$

因此波速

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

## 次 声 波

次声波是指频率小于 20 Hz 的声波. 次声波不容易衰减，不易被水和空气吸收. 由于其波长往往很长，因而能绕开某些大型障碍物，某些次声波甚至能绕地球二至三周. 某些频率的次声波由于和人体器官的振动频率相近，容易和人体器官产生共振，对人体有很强的伤害性，严重时可致人死亡.

次声波来源广. 在自然界中，海上风暴、火山爆发、大陨石落地、海啸、电闪雷鸣、波浪击岸、水中漩涡、空中湍流、龙卷风、磁暴、极光、地震等都可能伴有次声波的发生. 在人类活动中，诸如核爆炸、导弹飞行、火炮发射、轮船航行、汽车争驰，甚至像鼓风机、搅拌机、扩音喇叭等在发声的同时也都能产生次声波.



次声波的频率很低，但波长很长，传播距离也很远。例如，频率低于 1 Hz 的次声波，可以传到几千甚至上万千米以外的地方。次声波具有极强的穿透力，不仅可以穿透大气、海水、土壤，而且还能穿透坚固的钢筋水泥构成的建筑物，甚至连坦克、军舰、潜艇和飞机都不在话下。

次声波的破坏力很大。地震或核爆炸所产生的次声波可将岸上的房屋摧毁。次声波如果和周围物体发生共振，能放出相当大的能量。如 4~8 Hz 的次声波能在人的腹腔里产生共振，可使心脏出现强烈共振和肺壁受损。次声波也能干扰人的神经系统正常功能，危害人体健康。一定强度的次声波能使人头晕、恶心、呕吐、丧失平衡感甚至精神沮丧。住在十几层高的楼房里的人，遇到大风天气，往往感到头晕、恶心，这也是因为大风使高楼摇晃产生次声波缘故。更强的次声波还能使人耳聋、昏迷、精神失常甚至死亡。

次声波的应用范围很广。从 20 世纪 50 年代起，核武器的发展对次声学的建立起了很大的推动作用，使得对次声波接收、抗干扰方法、定位技术、信号处理和传播等方面的研究都有了很大的发展，次声波的应用也逐渐受到人们的注意。人们通过研究自然次声波的特性和产生机制，预测自然灾害性事件。例如台风和海浪摩擦产生的次声波的传播速度远大于台风移动速度，因此，人们利用一种叫“水母耳”的仪器，监测风暴发出的次声波，即可在风暴到来之前发出警报。此外，通过测定人和其他生物的某些器官发出的微弱次声波的特性，可以了解人体或其他生物相应器官的活动情况。例如人们研制出的次声波诊疗仪可以检查人体器官工作是否正常。

科学家们正在研究、监测和控制次声波，以便有效地避免它的危害，并从中获取信息来预报地震、台风，或为监测核爆炸提供依据。



### 练习

1. 一条小船停泊在海岸边，有人测量在 1 min 内小船上下颠簸 12 次，海浪传播速度约为  $v = 4 \text{ m/s}$ ，由此可知海浪的波长约是\_\_\_\_\_ m。
2. 一列机械波上的质点在某个时刻处于波峰处，在 0.5 s 后处于波谷处，这列机械波的振动频率可能是多少？
3. 一列横波沿  $x$  轴正向传播， $a, b, c, d$  为介质中沿波传播方向上四个质点的平衡位置。某时刻的波形如图 3-2-6 (a) 所示，此后，若经过  $\frac{3}{4}$  周期开始计时，则图 3-2-6 (b) 描述的是哪个质点的运动？ $b$  质点与  $d$  质点的相位差是多少？

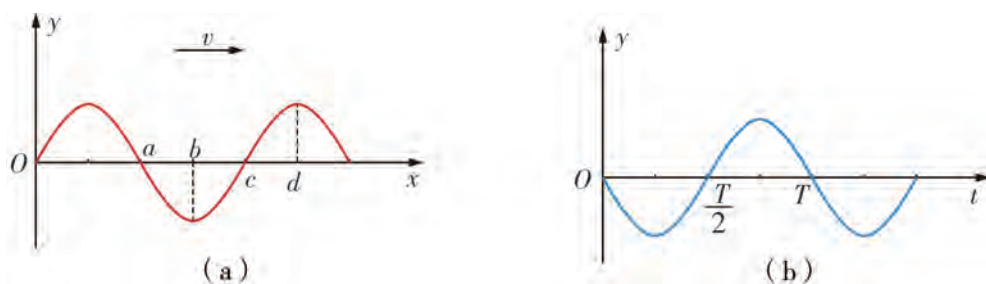


图 3-2-6

4. 如图 3-2-7 所示是地震局某次收到的地震波解波后的某个波的图像. 其在地壳中的传播速度为  $1000 \text{ m/s}$ . 求该列波的周期、频率、波长和波源的振动频率.

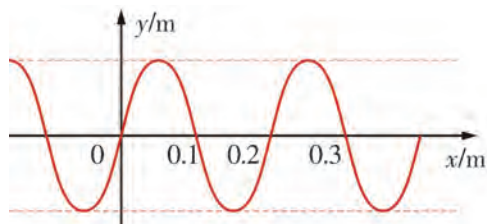


图 3-2-7

5. 一列沿  $x$  轴正方向传播的横波在某时刻的波形图像如图 3-2-8 中的 I 所示, 经  $t = 0.2 \text{ s}$  后, 波形图像如图 3-2-8 中的 II 所示. 求这列波的波速.

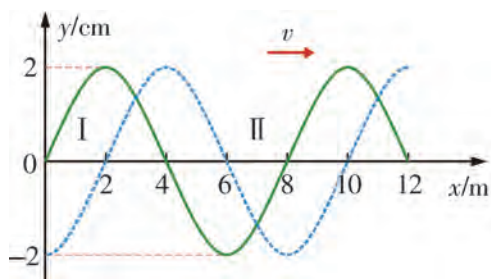


图 3-2-8

## 第三节 机械波的传播现象



机械波在传播过程中经常会遇到障碍物或者两种介质的界面，或者与其他的波相遇，此时会产生怎样的现象呢？本节我们将通过描述这些现象进一步研究波的传播特性。

### 机械波的衍射与惠更斯原理

水波在遇到小障碍物或者小孔时，能绕过障碍物或穿过小孔继续向前传播，我们把这种现象叫作**波的衍射**（diffraction）。机械波的衍射是如何发生的？让我们先来观察下面的实验。



#### 观察与思考

在水波槽中放置两块挡板，两挡板成一直线，两者之间留一窄缝，使水波能通过窄缝。

- (1) 观察水波通过窄缝后是怎样传播的。
- (2) 保持水波的波长不变，改变窄缝的宽度，观察波的传播情况有什么变化。
- (3) 保持窄缝的宽度不变，改变水波的波长，观察波的传播情况有什么变化。

通过实验可以看到，水波可以绕到挡板后面继续传播。如图 3-3-1 所示，当窄缝的尺寸比波长大很多的情况下，波的传播方向基本不发生改变，在窄缝后面形成一个等宽的水波区域，而在挡板后面则几乎没有水波；减小窄缝的间距，挡板后面出现水波的区域越来越大，可以观察到水波明显的衍射现象。如图 3-3-2 所示，保持窄缝的宽度不变，改变水波的波长，可以观察到水波的波长越接近窄缝的宽度，水波的衍射现象越明显。

进一步实验表明，当缝、孔的宽度或者障碍物的尺寸跟波长相近或者比波长更小时，能观察到明显的衍射现象。

不只是机械波，一切波都能发生衍射，衍射是波特有的现象。

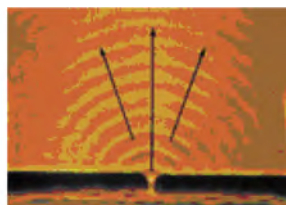
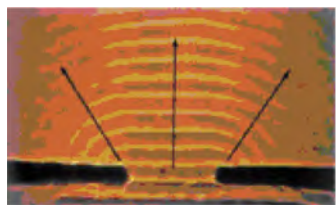
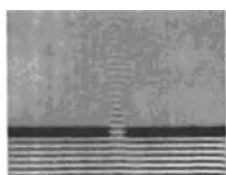
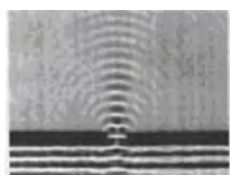


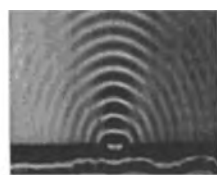
图 3-3-1 相同波长的水波通过尺寸不同的窄缝



(a) 波长是窄缝宽度的 $\frac{3}{10}$



(b) 波长是窄缝宽度的 $\frac{5}{10}$



(c) 波长是窄缝宽度的 $\frac{7}{10}$

图 3-3-2 不同波长的水波通过宽度相同的窄缝

如何解释这一衍射现象？我们知道，波动的起源是波源的振动，波动的传播是由于介质中质点之间的相互作用。如果介质是连续分布的，介质中任何一点的振动将直接引起邻近各点的振动，因而在波动中任何一点都可以看作新的波源。

如图 3-3-3 所示，水面上有一任意波动传播，当波遇到一个很小的孔时，我们就可以看到，穿过小孔的圆形的波，与原来波的形状无关，说明小孔可以看作新的波源。

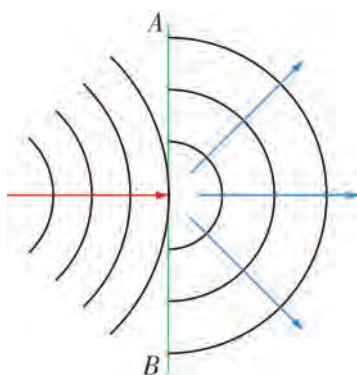


图 3-3-3 障碍物的小孔成为新波源

惠更斯总结了上述现象，于 1690 年提出，介质中波动传到的各点都可以看作是发射子波的波源，在其后的任一时刻，这些子波的包络就形成新的波面，这就是惠更斯原理。

惠更斯原理对任何波动过程都是适用的，利用这一原理，我们就不难解释上述实验中发生的衍射现象了。

## 机械波的反射和折射

当机械波在传播过程中从一种介质进入另一种不同介质时，机械波会同时发生反射和折射现象。



### 观察与思考

将两根不同的弹簧连接，产生一系列机械波在连接的两根弹簧上传播。观察机械波在这两根弹簧上的传播情况。

实验表明，当机械波从介质1传播到介质2时（如图3-3-4所示），有一个比初始传播的波（入射波）的振幅小的波（反射波）被反射回来，另一个比入射波的振幅小的波（折射波）继续向前传播，这就是机械波在两种介质界面的反射和折射现象。

普遍地，如图3-3-5所示，若一系列机械波从一种介质入射到另一种介质的界面上时，波的一部分发生反射，另一部分会发生折射，继续传播。

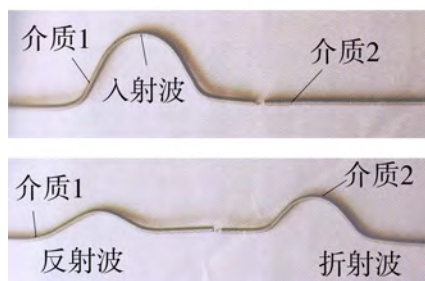


图3-3-4 机械波在两根弹簧上的传播

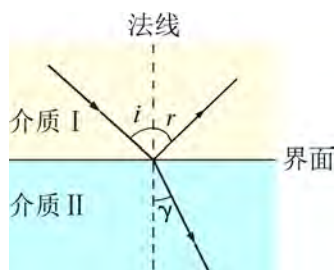


图3-3-5 波在界面上的反射和折射

在波的反射中，波的频率、波速和波长都不变。在波的折射中，频率不变，波速和波长发生改变。

反射和折射是波的普遍性质，以后学到的光波和其他电磁波也具有这种性质。

## 机械波的干涉

两列波在同一介质中传播时相遇是常见的物理现象。两列波相遇时，会不会像两个小球相碰那样改变它们原来的运动状态呢？

### 观察与思考

如图3-3-6所示，将有机玻璃挡板1和2竖直插入透明水槽中，使水槽分隔成A、B、C三个部分，在水槽中装入适量的红色墨水，使A部分的水位比B部分的水位高10 cm左右，B部分的水位比C部分的水位高10 cm左右。在水槽后方紧贴水槽竖直放置一块刻度板，同时将玻璃挡板1和2竖直向上抽出，使水槽中产生两列相向运动的且振幅不同的水波脉冲。观察两列水波脉冲在相遇前、相遇时和相遇后的传播情况。



图3-3-6 水波的叠加

如图 3-3-7 所示, 我们发现, 这两列波在彼此相遇以后, 仍像相遇前那样, 各自保持原有的波形继续前行; 两列波在相遇叠加时, 每列波都是独立地保持自己原有的特性, 如同在各自的传播路径中并没有遇到其他波一样. 相遇区域中各点的位移, 就是这两列波引起的位移的合成, 我们把这一规律称为波的叠加原理.

一般来说, 几列波在空间叠加时的情形是很复杂的. 下面只讨论一种最简单而又最重要的情形, 即振动频率相同、振动方向相同、相位差恒定的两列波的相遇情形.

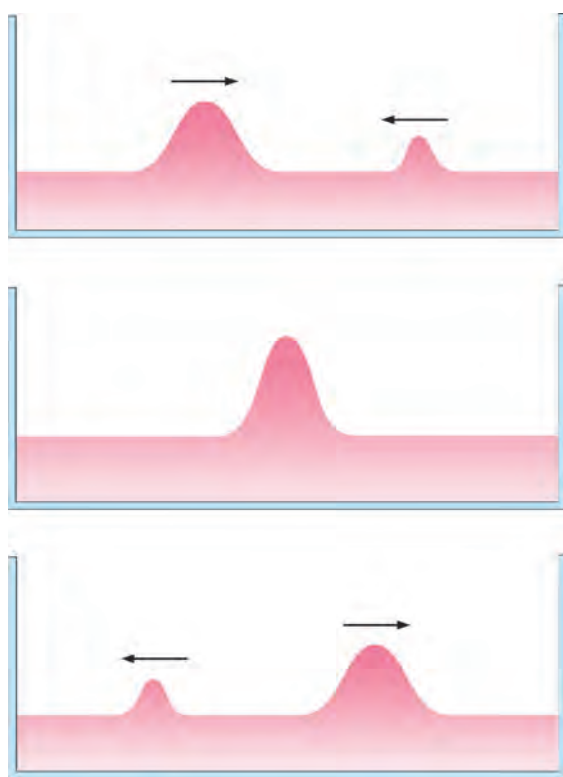


图 3-3-7 两列波相遇前、相遇时和相遇后的传播情况



### 观察与思考

在一水波槽中将一根金属丝固定在振动片上, 当振动片发生振动时, 金属丝会周期性地振动水面, 形成波源. 水面就会出现从波源发出的一系列圆形波.

(1) 将两根金属丝固定在不同的振动片上, 使生成的两列波的频率不同, 观察两列波的相遇情况.

(2) 将两根金属丝固定在同一振动片上, 使生成的两列波相同, 观察两列波的相遇情况.

实验表明, 当两列波相遇时, 无论频率是否相同, 都会彼此穿过, 穿过后仍然保持各自原来的运动状态继续传播下去; 但对于频率相同的两列波, 在相遇的区域水面上, 如图 3-3-8 所示, 会出现稳定的相对平静的区域和剧烈振动的区域. 这两个区域在水面上的位置是固定的, 且互相隔开. 这种现象称为波的干涉 (wave interference). 如何理解这一现象呢?



图 3-3-8 水波的干涉图样



### 讨论与交流

如图 3-3-9 所示, 两列振幅、频率、相位都相同的波相向而行. 请画出它们在  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  各点附近相遇时的波动情况.

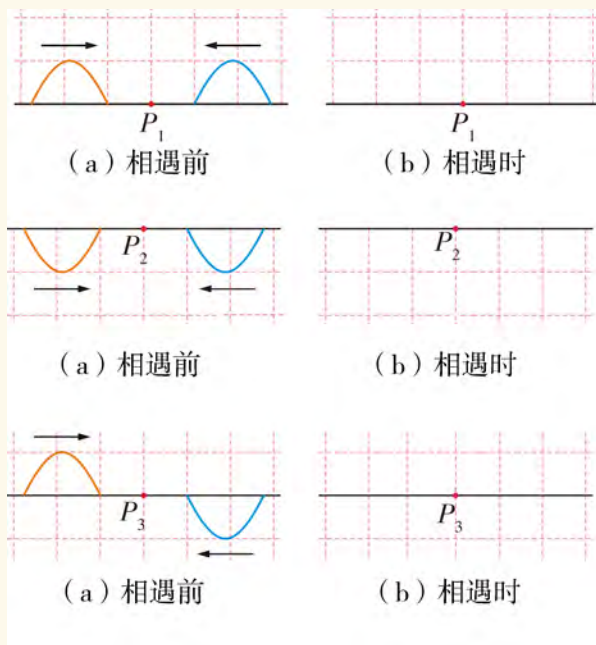


图 3-3-9

如图 3-3-10 所示, 对于频率相同的两列波 (图中用两组同心圆表示从波源传播开来的波面, 实线表示波峰, 虚线表示波谷. 相邻的实线与虚线之间相差半个波长, 相邻的实线与实线、虚线与虚线相差一个波长). 根据波的叠加原理, 如果在某一时刻波峰与波峰 (实线与实线) 相遇, 振动加强; 半个周期后, 两列波的波谷同时到达此点, 波谷与波谷 (虚线与虚线) 相遇, 振动同样得到加强; 再过半周期, 又是波峰与波峰相遇, 振动得到加强. 如果第一列波的波谷和第二列波的波峰相遇, 则振动相消 (实线与虚线); 半个周期后, 第一列波的波峰到达此点, 而第二列波的波谷也到达此点, 振动同样相消, 即此点的振动始终相消.

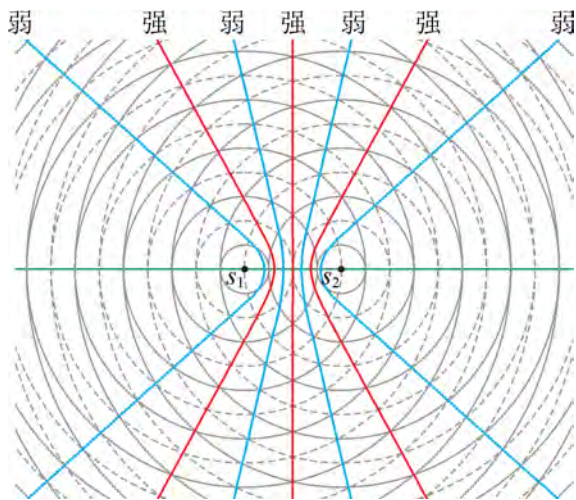


图 3-3-10 波的干涉示意图

因此, 在频率相同的波相遇的区域, 某些地方 (如图 3-3-10 所示) 的振动始终加强, 某些地方的振动始终减弱, 波产生干涉会形成一种加强和减弱相间的图样, 这样的图

样叫作波的干涉图样。干涉是波特有的现象。

综上所述，两列波产生干涉的必要条件是频率相同，相位差恒定，振动方向相同。



## 实践与拓展

学校操场上的两个扬声器播放着同样的音乐，人在操场上行走时，能感觉到音量的变化，这是为什么？

## 波浪能

随着社会的发展，人们对能源的需求越来越大，而陆地上传统的化石能源的储量急剧下降，寻找新的清洁能源成为刻不容缓的事情。

其实，在广阔无垠的海洋中藏着丰富的清洁能源宝库，有待人类去开采，其富含海水化学资源、生物资源、矿产资源、潮汐能、波浪能、海流能、海洋温差能、海盐能等诸多能源。其中潮汐能、海流能、波浪能属于海洋机械能，海洋温差能属于海洋热能，海盐能属于化学能。这些能源如果加以利用，远远超过人类生产生活需要的能源。但到目前为止，除了潮汐能已被实际应用外，其他形式的海洋能的利用尚处于基础研究阶段，或者处于示范研究和技术开发阶段。近期有望利用的海洋能源主要有潮汐能、波浪能、海流能和海洋温差能。

这里我们只介绍技术越来越成熟并已接近商业化发展阶段的波浪能。

海洋的波浪中藏着巨大的能量（如图3-3-11所示）。波浪能是一种以海水机械波形式出现的海洋能。在波高2米、波长6米的海浪里，每1米长度的波浪可产生24千瓦的能量。尤其是在中、高纬度和气流不稳定的海域，波浪能密度更高。利用波浪能发电，投资少，见效快，无污染，无须原料投入。因此，自20世纪以来，许多海洋资源丰富的国家，如美国、英国、日本、新西兰等国都积极开展波浪能开发利用的研究，并取得了较大进展。我国在浙江、福建、广东、山东和台湾沿海以及南海有着丰富的波浪能资源。



图3-3-11 海浪

波浪能利用装置大都源于几种基本原理，即利用物体在波浪作用下的振荡和摇摆运动生电，利用波浪压力的变化生电，利用波浪的沿岸爬升将波浪能转换成水的势能等。

波浪能也可以用于抽水，利用波浪产生的上、下浮力进行发电。



此外，波浪能还可以用于供热，利用波浪推动一些摩擦装置，或者推动压缩机调节室内空气温度等。

波浪能还可以用于海水淡化。通过高效地吸收波浪能，直接利用波浪能转化的液压能进行海水预处理及其淡化。我国南海具有丰富和广阔的海洋资源，我们应该尽快予以开发利用，力争我国能源自给自足。

### 练习

1. 反射回来的波会和入射波产生干涉吗？为什么？

2. 为什么我们有时能听到墙后面的声音？

3. 如图 3-3-12 所示，波源  $S_1$  在绳的左端发出频率为  $f_1$ 、振幅为  $A_1$  的半个波形  $a$ ；同时另一个波源  $S_2$  在绳的右端发出频率为  $f_2$  ( $f_1 < f_2$ )、振幅为  $A_2$  的半个波形  $b$ ， $P$  为两个波源连线的中点。两列波相遇时，振幅最大的位置是在点  $P$ ，还是在点  $P$  的左侧或是在点  $P$  的右侧？为什么？

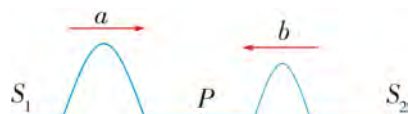


图 3-3-12

4. 如图 3-3-13 所示为两个相干波源某一时刻的干涉图样，实线表示波峰，虚线表示波谷，同一颜色表示属于同一波。图中  $a$ 、 $b$  两点哪一个为振动加强点？从图所示时刻经过多长时间，点  $c$  偏离平衡位置的位移最小？

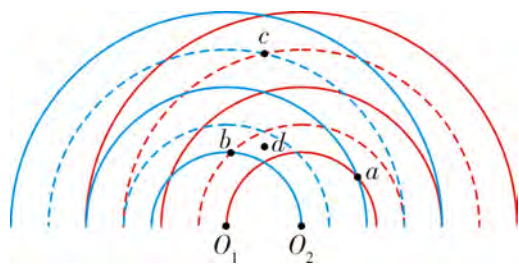


图 3-3-13

5. 如图 3-3-14 所示是某一报告厅主席台的平面图， $AB$  是讲台， $S_1$ 、 $S_2$  是与讲台上话筒等高的喇叭，它们之间的相互位置和尺寸如图 3-3-14 所示。报告者的声音放大后，经喇叭传回话筒再次放大时，可能会产生啸叫。为了避免啸叫，话筒最好摆放在讲台上适当的位置，在这些位置上两个喇叭传来的声音因干涉而相消。已知空气中声速为  $340 \text{ m/s}$ ，若报告人声音的频率为  $136 \text{ Hz}$ ，问：讲台上这样的位置有多少处？

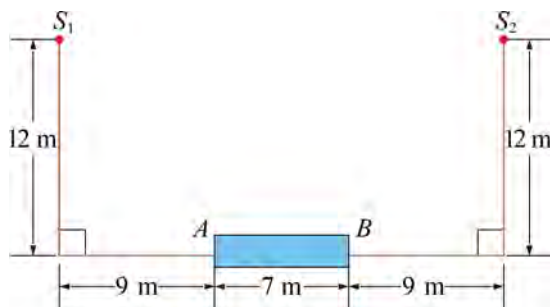


图 3-3-14

## 第四节

# 多普勒效应



我们都有过这样的经验：当一辆消防车迎面驶来时，我们听到鸣笛音调越来越高；消防车离去时，我们听到鸣笛音调越来越低。实际上，消防车鸣笛的频率并没有改变，而是由于消防车相对观察者运动所致。

### 认识多普勒效应

迄今为止，我们所讨论的都是波源与观察者相对于传播介质静止的情况，所以观察者接收到的频率与波源发出的频率是相同的。如果波源或观察者或两者都相对于传播介质运动，那么观察者接收到的频率与波源发出的频率就不相同了，这样的现象叫作**多普勒效应** (Doppler effect)。

下面让我们通过实验来感受一下多普勒效应。

#### 观察与思考

一名同学拿着一个蜂鸣器，从讲台迅速跑向课室后面（或从课室后面迅速跑向讲台），其他同学仔细辨别蜂鸣器的频率是否有变化。

当这名同学跑动时，由于蜂鸣器对于其他同学有相对运动，因而听起来有音调的变化。下面通过图例来说明多普勒效应的成因。

#### 讨论与交流

利用图 3-4-1 和图 3-4-2，我们可以解释形成多普勒效应的原理。

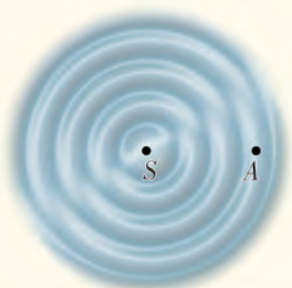


图 3-4-1 波源  $S$  和在  $A$  处的观察者都不动

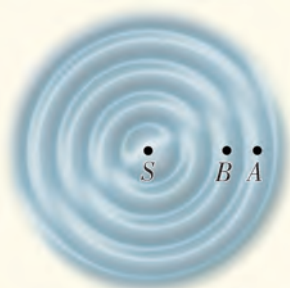


图 3-4-2 波源  $S$  不动，观察者向波源运动

如图 3-4-1 所示, 波源  $S$  和在  $A$  处的观察者都不动, 设波源频率为  $20\text{ Hz}$ , 则波源每秒发出 20 个完全波, 观察者每秒接收到 20 个完全波.

如图 3-4-2 所示, 波源  $S$  不动, 观察者向波源运动, 观察者在  $1\text{ s}$  内由位置  $A$  移至位置  $B$ , 波源每秒发出 20 个完全波, 但观察者每秒接收到 21 个完全波.

弄清楚多普勒效应的成因后, 我们就可以用它来解释本节提出的现象了. 如图 3-4-3 所示, 当消防车从人身边高速驶过时, 听到的波源的音调改变了. 如果人站在行驶中的消防车前方, 人接收到的声波波长变短, 音调就提高了; 如果人站在行驶中的消防车后方, 人接收到的声波波长变长, 音调就降低了.



图 3-4-3 消防车从人身边高速驶过

尝试根据上面的分析完成表 3-4-1.

表 3-4-1 讨论结果记录表

波源的运动情况	观察者的运动情况	频率的关系 (选填 “>” “<” 或 “=”)		
波源静止	观察者静止	观察者 接收 频率		波源的 频率
波源静止	观察者朝着波源运动			
波源静止	观察者远离波源运动			
波源朝着观察者运动	观察者静止			
波源远离观察者运动	观察者静止			

## 多普勒效应的应用

多普勒效应有很多实际的应用. 修理铁路的工人可以从火车的汽笛声判断火车的运行方向和快慢. 交警向行进中的汽车发射一个已知频率的电磁波, 波被汽车反射回来时, 接收到的频率发生变化, 由此可以测出汽车的速度 (如图 3-4-4 所示). 根据光的多普勒效应,



图 3-4-4 多普勒测速雷达

由地球上接收到遥远天体发出的光波的频率，可以判断遥远天体相对地球的运动速度。

应用多普勒效应还可以跟踪人造地球卫星。如图 3-4-5 所示，一旦有卫星经过跟踪站的上空，地面接收到的信号频率就会先增大后减小。天文学家将来自星球的光谱与地球上相同元素的光谱进行比较，发现星球光谱的频率几乎都变小，这说明星球正在远离地球。

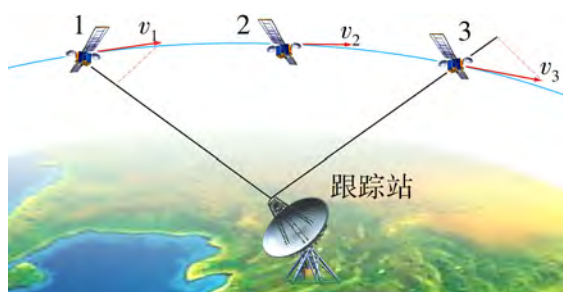


图 3-4-5 卫星跟踪站

现代医学应用多普勒超声波对人体体内器官进行观察。当声源与接收体（即探头和反射体）之间有相对运动时，回声的频率有所改变，此种频率的变化被称为频移。经自相关技术进行多普勒信号处理，把频移与血流信号对应起来，因而可以通过处理频移信号建立彩色多普勒超声（简称彩超）血流图像（如图 3-4-6 所示）。彩超在临床上被誉为“非创伤性血管造影”。

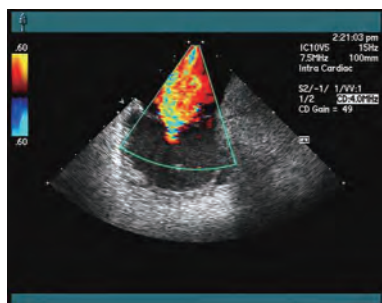


图 3-4-6 彩超图像

现代医学更是发展了三维动态显示的彩超和随时间变化的动态显示的四维彩超。



## 实践与拓展

查阅资料，了解更多多普勒效应的应用例子。

## 多普勒彩超的临床应用

多普勒效应是为纪念奥地利物理学家及数学家克里斯琴·约翰·多普勒（Christian Johann Doppler, 1803—1853）而命名的，他于 1842 年首先发现了这一效应。多普勒效应是指观测者观测到的波长因为波源和观测者的相对运动而产生变化。在运动的波源前面，波被压缩，波长变得较短，频率变得较高（蓝移）；在运动的波源后面时，会产生相反的效应，波长变得较长，频率变得较低（红移）；波源的速度越高，所产生的效应越大。根据波红（蓝）移的程度，可以计算出波源循着观测方向运动的速度。

声波的多普勒效应用于医学诊断，就是我们平常说的彩超。彩超简单地说就是高清晰度的黑白 B 超再加上彩色多普勒。超声频移诊断法就是 D 超，此法应用多普勒效应原理。D 超包括脉冲多普勒、连续多普勒和彩色多普勒血流图像。彩超一般是用自相关技术进行多普勒信号处理，把自相关技术获得的血流信号，经彩色编码后实时地叠加在二维图像上，即形成彩色多普勒超声血流图像。由此可见，彩超既具有二维超声结构图像的优点，又同时提供了血流动力学的丰富信息，在实际应用中受到广泛重视和欢迎，在临床上被誉为“非创伤性血管造影”。现代医学更是发展了三维动态显示的彩超和随时间变化的动态显示的四维彩超。

彩超的临床应用主要有血管疾病、腹腔脏器、心脏、甲状腺、乳腺、眼球、前列腺和精囊、妇科等的病情诊断。



### 练习

1. 人造地球卫星经过跟踪站的上空，并向远离跟踪站的方向飞去时，为什么地面接收到的信号频率是先增大后减小的呢？

2. 声源向观察者运动和观察者向声源运动，都会产生音频增高的多普勒效应，这两种情形有何区别？

3. 请简要说明科学上利用多普勒效应测量太空中星球相对地球的运动速度的原理。

4. 渔船常利用超声波来探测远处鱼群的方位。已知某超声波频率为  $1.0 \times 10^5$  Hz，某时刻该超声波在水中传播的波动图像如图 3-4-7 所示。

(1) 从该时刻开始计时，画出  $x = 7.5 \times 10^{-3}$  m 处质点做简谐运动的振动图像（至少一个周期）。

(2) 现测得超声波信号从渔船到鱼群往返一次所用时间为 4 s，求鱼群与渔船间的距离（忽略船和鱼群的运动）。

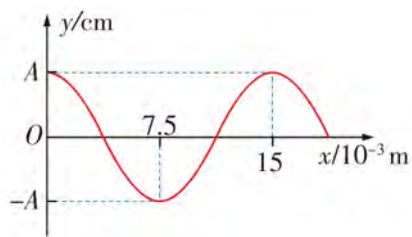
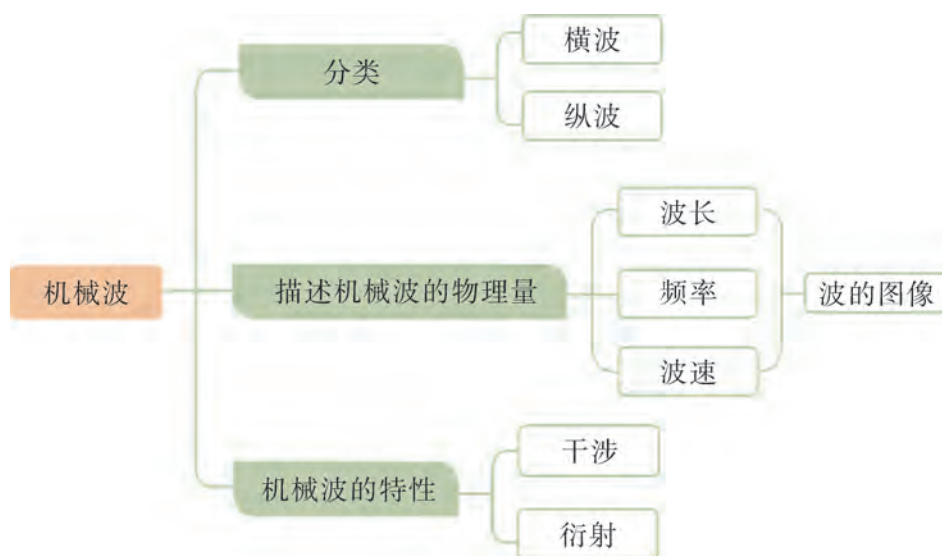


图 3-4-7

## 本章小结

### 知识结构

参考下面的知识结构，请进一步梳理本章的知识。



### 回顾与评价

1. 生活中有哪些机械波的具体例子？这些例子都有哪些共同点？
2. 怎样描述机械波？说一说印象最深刻的学习过程。
3. 日常生活中有哪些波的干涉或者衍射现象的具体例子？请详细说明。
4. 请列举日常生活中多普勒效应的具体例子。

## 习题三

1. 当波从一种介质进入另一种介质时, 下列物理量不会发生改变的是 ( ).

- A. 周期                      B. 频率                      C. 振幅                      D. 相位

2. 声波属于机械波, 下列有关声波的描述中, 正确的是 ( ).

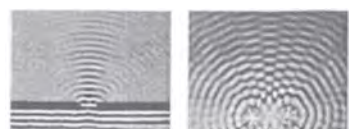
- A. 同一列声波在各种介质中的波长是相同的  
B. 声波的频率越高, 它在空气中传播的速度越快  
C. 声波可以绕过障碍物传播, 发生衍射  
D. 人能辨别不同乐器同时发出的声音, 说明声波不会发生干涉

3. 对声波的各种现象, 以下说法正确的是 ( ).

- A. 在空房间里讲话, 声音特别响, 这是声音的共振现象  
B. 绕正在发音的音叉走一圈, 可以听到忽强忽弱的声音, 这是声音的干涉现象  
C. 火车驶离远去时, 音调变低  
D. 把耳朵贴在铁轨上可以听到远处的火车声, 属于声波的衍射现象

4. 利用发波水槽得到的水面波形如图 3-1 所示, 则 ( ).

- A. 图 (a) 和图 (b) 均显示了波的干涉现象  
B. 图 (a) 和图 (b) 均显示了波的衍射现象  
C. 图 (a) 显示了波的干涉现象, 图 (b) 显示了波的衍射现象



(a)                      (b)

图 3-1

射现象

- D. 图 (a) 显示了波的衍射现象, 图 (b) 显示了波的干涉现象

5. 下列现象属于多普勒效应的是 ( ).

- A. 远去的汽车声音越来越小  
B. 炮弹迎面飞来, 声音刺耳  
C. 火车向人驶来时, 人感到鸣笛的音调变高; 远离人而去时, 人感到鸣笛的音调变低  
D. 大风中, 远处人的说话声时强时弱

6. 医生通过彩超仪向病人体内发射频率已精确掌握的超声波, 超声波经血液反射后被专用仪器接收, 测出反射波的频率变化, 就可以知道血液的流速. 这一技术主要体现的物理现象是 ( ).

- A. 多普勒效应                      B. 波的衍射                      C. 波的干涉                      D. 共振

7. 下列关于机械波的说法中, 正确的是 ( ).

- A. 在简谐波中, 各质点的振动步调完全相同
- B. 简谐横波向右传播时, 介质中的各个质点也向右移动
- C. 一列简谐横波在介质中传播, 各质点的振动频率各不相同
- D. 简谐横波向左传播时, 介质中左边质点的振动总比相邻的右边质点的振动滞后一些

8. 两个振动情况完全一样的波源  $S_1$ ,  $S_2$  相距 6 m, 它们在空间产生的干涉图样如图 3-2 所示, 图中实线表示振动加强的区域, 虚线表示振动减弱的区域. 下列说法正确的是 ( ).

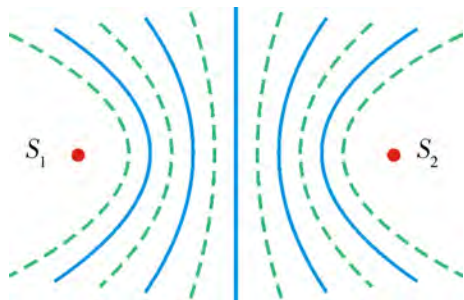


图 3-2

- A. 两波源的振动频率一定相同
- B. 虚线一定是波谷与波谷相遇处
- C. 两列波的波长都为 2 m
- D. 两列波的波长都为 1 m

9. 有一列沿水平绳传播的简谐横波, 其频率为 10 Hz, 振动方向沿竖直方向. 当绳上的质点  $P$  向下经过平衡位置时, 其右方 0.6 m 处的质点  $Q$  刚好到达最高点, 则波速和波的传播方向为 ( ).

- A. 8 m/s, 向右传播
- B. 8 m/s, 向左传播
- C. 24 m/s, 向右传播
- D. 24 m/s, 向左传播

10. 一列简谐横波沿  $x$  轴正方向传播, 轴上  $x_1 = 0$  处的质点振动图像如图 3-3 (a) 所示,  $x_2 = 1$  m 处的质点的振动图像如图 3-3 (b) 所示, 则此列波的波速可能等于 ( ).

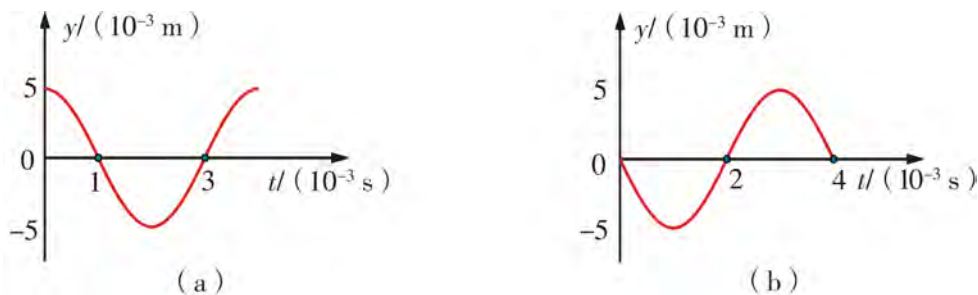


图 3-3

- A. 1000 m/s
- B. 333 m/s
- C. 143 m/s
- D. 11 m/s

11. 在一个脸盆里周期性地用手插入水里, 可能会观察到什么现象? 请拍摄下该种现象并做解释. 假设插入的频率加快了, 又会发现什么现象? 为什么?

12. 一列横波的波长是 80 cm, 波幅是 20 cm. 它从左向右传播, 在某一刻, 原点  $O$  处的质点正向上运动. 请在图 3-4 中画出此时刻这一列波的图像.

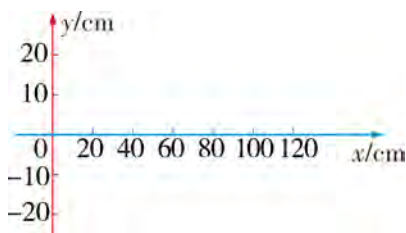


图 3-4



13. 如图 3-5 (a) 所示是某一列机械波在  $t = 1.0 \text{ s}$  时的图像, 如图 3-5 (b) 所示是这一列波上点  $P$  的振动图像.

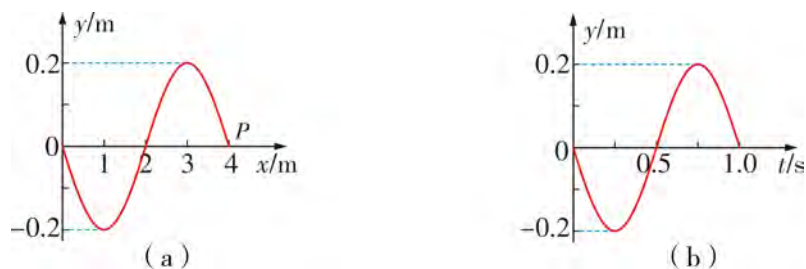


图 3-5

- (1) 求这一列波的波速.
- (2) 在图 3-5 (a) 中画出经过 3.5 s 时的波形.
- (3) 求再经过 3.5 s 时点  $P$  的路程和位移.

14. 有一种示波器可以同时显示两列波形. 对于这两列波, 显示屏上横向每格代表的时间间隔相同. 利用此示波器可以测量液体中的声速, 实验装置的一部分如图 3-6 (a) 所示, 管内盛满液体, 音频信号发生器所产生的脉冲信号由置于液体内的发射器发出, 被接收器接收. 如图 3-6 (b) 所示是示波器的显示屏, 屏上所显示的上、下两列波形分别为发射信号与接收信号. 若已知发射的脉冲信号频率为  $f = 2000 \text{ Hz}$ , 发射器与接收器的距离为  $s = 1.30 \text{ m}$ , 求管内液体中的声速. (已知所测声速应在  $1300 \sim 1600 \text{ m/s}$  之间, 结果保留两位有效数字)

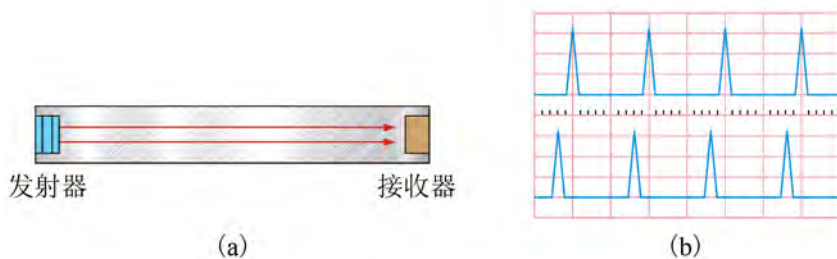


图 3-6

## 第四章

# 光及其应用

对于光的认识，在物理学发展史上主要经历了“光的微粒说”“光的波动说”和“光既有波动性，又具有粒子性”三个阶段。“光的微粒说”以英国物理学家牛顿为代表，容易解释光的直线传播和反射。“光的波动说”以荷兰物理学家惠更斯为代表，容易解释光的折射、干涉、衍射和偏振等。19世纪末，随着爱因斯坦“光电效应”等新的发现，光具有波粒二象性的科学认识得以确立，一大批新技术不断涌现，“激光”的发明便是其中之一。

在本章的学习中，我们将探究光的折射、干涉、衍射、偏振现象，并结合事例了解其在生活、生产和科研中的应用。最后简单介绍激光的特性及其应用。



## 第一节

## 光的折射定律



光在均匀的介质中是沿着直线传播的. 当它遇到不同介质的分界面时, 往往不再按照原来的方向前进, 一部分被反射回原来的介质中, 发生光的反射; 另一部分进入不同介质后偏向另一个方向传播, 发生光的折射 (如图 4-1-1 所示). 我们在初中已学过光的反射定律, 那么光的折射有什么规律呢?

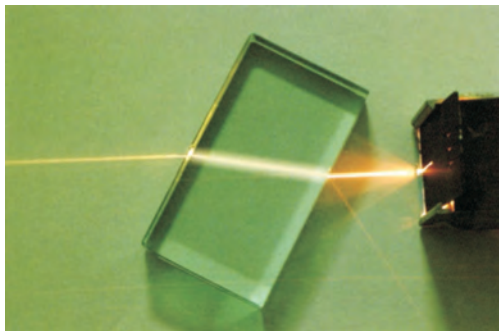


图 4-1-1 光在遇到另一种透明介质时发生折射

## 光的折射定律

人类对光的折射规律的认识经历了漫长的探索过程. 希腊人托勒密 (C. Ptolemy, 约 90—168) 对光的折射作过研究. 他发现在入射角很小的情况下折射角和入射角成正比. 大约经过一千年后, 阿拉伯人阿勒·哈增 (A. Hazen, 965—1038) 研究发现在入射角较大的情况下, 折射角和入射角成正比的关系不成立. 1611 年, 德国人开普勒 (J. Kepler, 1571—1630) 利用前人的光学知识分析推导出托勒密“折射角和入射角成正比”的结论只有在入射角小于  $30^\circ$  角时才成立. 1620 年, 荷兰数学家斯涅尔 (W. Snellius, 1580—1626) 通过实验发现了光发生折射时的规律: 在不同的介质里, 入射角和折射角的余割之比总是保持相同的值. 由于余割和正弦成反比, 这个叙述等价于“折射角和入射角的正弦值之比为一常数”. 其实这是光的折射定律的内容, 但是斯涅尔并未发表这一结果. 直到 1626 年惠更斯在整理斯涅尔的遗稿时, 才发表了完整的折射定律的内容.



## 实验与探究

光发生折射的条件是光从一种介质进入另一种介质. 如图 4-1-1 中显示光路发生了偏折, 是因为光进入了空气和玻璃的分界面. 因此, 这个实验的关键点是设置不同的介质界面, 并让光线射向介质界面.

实验装置是如图 4-1-2 所示的一块半圆形玻璃片、一支激光笔和一块标有角度的背景板。为了验证光的折射定律，我们可以让光以不同的入射角进入空气和玻璃的分界面，在表 4-1-1 中记下相应的入射角与折射角，并观察入射角和折射角与法线的几何位置关系，同时找出入射角正弦值与折射角正弦值之间的关系。



图 4-1-2 实验装置图

表 4-1-1 入射角与折射角的关系

入射角 $i$	折射角 $\gamma$	$\sin i$	$\sin \gamma$
$30^\circ$			
$45^\circ$			
$60^\circ$			

如图 4-1-3 所示，当光线从空气射入介质时，发生折射，折射光线、入射光线和法线在同一平面内，折射光线和入射光线分别位于法线的两侧；入射角  $i$  的正弦值跟折射角  $\gamma$  的正弦值成正比。这就是光的**折射定律**（Law of refraction），用公式表示为

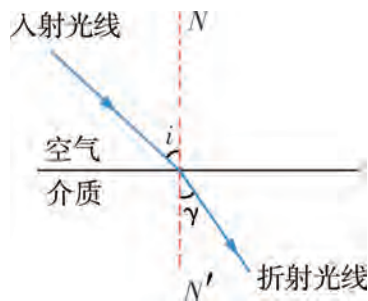


图 4-1-3 光的折射

$$\frac{\sin i}{\sin \gamma} = n \quad (4.1.1)$$



### 讨论与交流

在上面的实验中，若让光从玻璃片入射，进入到玻璃片与空气的界面，折射光线将如何？光线向什么方向偏折？

当光从玻璃片入射到空气时，折射角大于入射角，即折射光线偏离法线传播。

折射的应用很多，最常见的是光学显微镜。光学显微镜能将肉眼看不清楚的标本影像通过光的折射后放大，使肉眼能够观察到该标本的组织形态和结构，目前广泛应用于各种微小物体的观察、测定、分析、分类、鉴定等方面。

## 折射率

从折射定律可知，光从一种介质射入另一种介质时，入射角的正弦值跟折射角的正弦值之比是一常数  $n$ 。实际上，对不同的介质来说，这个常数  $n$  是不同的。

从式 (4.1.1) 可知，常数  $n$  越大，光线偏折越厉害。为了表征介质的这种性质，在物理学中引入折射率的概念，并把真空的折射率确定为 1，而把光从真空射入某种介质发生折射时，入射角  $i$  的正弦值与折射角  $\gamma$  的正弦值之比  $n$ ，叫作这种介质的折射率，即  $n = \frac{\sin i}{\sin \gamma}$ 。折射率与介质的自身性质有关，与入射角大小无关，是一个反映介质的光学性质的物理量。

由于空气的折射率与真空的折射率相差很小，一般情况下，可以把光从空气射入某种介质时入射角的正弦值与折射角的正弦值之比当作是这种介质的折射率。



### 讨论与交流

有人说，当光从水射入空气发生折射时，入射角的正弦值与折射角的正弦值之比即为水的折射率。这种说法正确吗？

不同介质的折射率不同，是由光在不同的介质中的传播速度不同引起的，折射率  $n$  与光在此介质中的传播速度  $v$  的关系为

$$n = \frac{c}{v} \quad (4.1.2)$$

式 (4.1.2) 中  $c$  为光在真空中的传播速度。

从式 (4.1.2) 中可知，由于真空中光速最大，故所有介质的折射率都大于 1；且折射率越大，光在此介质中的传播速率越小。



### 实践与拓展

查阅资料，解释雨后出现彩虹的原因。



图 4-1-4 雨后彩虹

## 光的折射研究史

公元2世纪，希腊天文学家托勒密通过实验研究了光的折射现象。他借助圆盘、尺子等测出一系列入射角和折射角，再通过分析实验数据，得出结论：折射角和入射角成正比关系。今天我们知道这个结论并不正确。

尽管托勒密的实验设计是完全正确的，实验测量结果也相当精确，与现代值几乎没有太大的差别，他也曾用数学方法巧妙地编制了类似现代正弦三角函数的一张表，但他当时并没有把光的折射实验数据与这份表作一比较，因此他未能从正确的数据中发现正确的规律，错过了一次发现光的折射定律的机会。由此可见，对实验数据的正确处理，以及正确的理论指导在发现物理规律中的重要性。

17世纪初，伽利略制成的望远镜为开普勒对光的折射现象进行深入研究提供了基础。在汇集前人光学知识的基础上，开普勒认为托勒密关于折射实验的结论是不正确的。1611年，他写了《折光学》一书，书中记载了他做的光的折射实验。

通过一系列的实验，开普勒修正了托勒密的研究结论：只有在入射角小于 $30^\circ$ 时，折射角与入射角成正比的关系才成立。尽管这一修正比托勒密前进了一步，但依然没能得出正确的折射定律。

荷兰数学家斯涅尔于1620年前后，通过与开普勒类似的实验确立了开普勒没有能够发现的折射定律，可惜斯涅尔在世时并没有发表这一研究成果。

赋予折射定律以现代形式的是法国的笛卡儿，他从力学的角度来解释光的折射。他把光投射到某一表面时的行为同一个球的行为相类比，推导出 $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_2}{v_1} = \text{常数}$ 。这正是折射定律的正弦表达式。但为了使上述理论结果与实验数据相符，笛卡儿必须假设光在光密媒质中比在光疏媒质中传播得快，而这一假设实际上是错误的。

法国数学家费马读了笛卡儿的《屈光学》后提出质疑，笛卡儿则为自己的推导方法进行辩护，由此两人进行了长期的争论。费马认为，导出折射定律可以采取另一种截然不同的思考方法。他在推导过程中运用了极值的思想，认为光在不同媒质中传播时，所走路程取极值，即遵从费马原理。也就是说，光从空间的一点到另一点，是沿着光程为极值（最小、最大或常量）的路程传播的。1661年，费马运用费马原理，借助数学方法成功地导出了正确的折射定律。在媒质疏密与光速的关系上，由费马原理得出的结论，与笛卡儿的假设正好相反。

从托勒密开始，人们经过了1500年左右的时间终于得到了严谨的折射定律，科学研究的历程充满曲折与乐趣。

折射定律的研究，一方面是由科学家们自身的兴趣，另一方面也是由于天文学的迫切要求而受到的推动。因为天文观测总是会受到大气折射的影响，后来又加上光学仪器制造的需要，所以到了17世纪，许多科学家都致力于研究折射现象。而随着折射定律的建立，几何光学理论很快得到发展，为当时天文学的发展和光学仪器的研制提供了良好的指导。

### 练习

1. 两个相同的杯子里分别装有透明的油和水，在相同的位置各斜插一根相同的筷子，观察并比较分析看到的现象。

2. 两名同学共同做一个实验，A同学把一枚硬币放在一个没有水的碗里，把碗放在桌子上并慢慢向远处推移，直到眼睛刚好看不到硬币为止，保持头部视线不动。这时，B同学在旁边缓慢地向碗中倒水，接着A同学又重新看到碗底的硬币了。如何解释这种有趣的现象？

3. 如图4-1-5所示，一个大游泳池的池底是水平面，池中水深1.2 m，有一直杆竖直插入池底，恰好有一半露出水面，太阳光以与水平面成 $37^\circ$ 角射在水面上，测得直杆在池底的影长是2.5 m，求水的折射率。

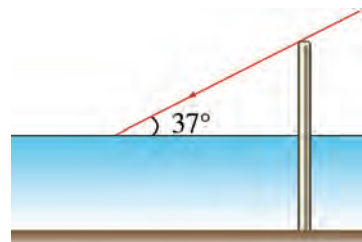


图 4-1-5

4. 某些为屏蔽电磁波设计的人工材料，其折射率都为负值 ( $n < 0$ )，称为负折射率材料。电磁波从空气射入这类材料时，折射定律和电磁波传播规律仍然不变，但是折射线与入射线位于法线的同一侧（此时折射角取负值）。如图4-1-6所示，现空气中有一上下表面平行厚度为  $d = 30$  cm，折射率  $n = -1.732$  的负折射率材料，一束电磁波从其上表面以入射角  $i = 60^\circ$  射入，从下表面射出，请画出电磁波穿过该材料的示意图。

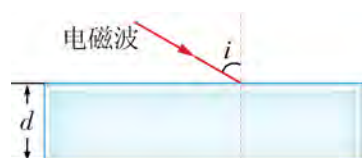


图 4-1-6

5. 一直桶状容器的高为  $2l$ ，底面是边长为  $l$  的正方形；容器内装满某种透明液体，过容器中心轴  $DD'$ 、垂直于左右两侧面的剖面图如图4-1-7所示。容器右侧内壁涂有反光材料，其他内壁涂有吸光材料。在剖面的左下角处有一点光源，已知由液体上表面的点  $D$  射出的两束光线相互垂直，求该液体的折射率。

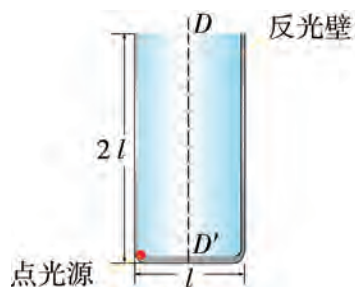


图 4-1-7

## 第二节 测定介质的折射率

介质的折射率由介质内在的因素决定，是介质本身的一种属性，是光学材料的一个基本参数。同时，它是食品生产中常用的工艺控制指标。通过测定食品的折射率，可以鉴别食品的组成。例如，牛乳掺水，其乳清折射率降低，故测定牛乳乳清的折射率，即可了解乳糖的含量，判断牛乳是否掺水；蔗糖溶液的折射率随浓度增大而升高，通过测定折射率，可以确定以糖为主要成分的果汁、蜂蜜等食品的可溶性固形物的含量。下面我们来学习测定介质折射率的常用方法。

测定介质折射率的方法有很多，如上一节中图 4-1-2 的实验装置，可以用来测定多种透明液体和固体的折射率。这里介绍一种测量透明固体折射率的插针法。

下面以有规则形状的固体介质（如长方形或半圆形玻璃砖）为例来介绍插针法。如图 4-2-1 所示，可利用插大头针在玻璃砖另一侧成像来确定入射角和折射角，即让另一侧的大头针  $P_3$ 、 $P_4$  依次挡住前面大头针  $P_1$ 、 $P_2$  所成的像，此时  $P_1$ 、 $P_2$  的连线为入射光线， $P_3$ 、 $P_4$  的连线为折射光线。

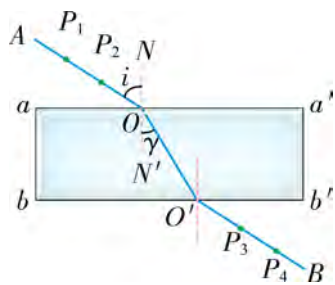


图 4-2-1 插针法实验原理图



### 实验与探究

下面以长方形玻璃砖为实验介质，设计实验步骤进行实验。

在实验过程中，应仔细观察现象，遇到异常的情况应记录下来并分析其原因。

进行多组实验数据测量，并将实验数据记录在表 4-2-1 中。

实验前请思考如下问题：

- (1) 根据图 4-2-1 的实验原理图，需要选取哪些实验仪器？
- (2) 测量过程如何减小实验误差？



表 4-2-1 实验数据记录表

测量数据组	入射角 $i$	折射角 $\gamma$	$\sin i$	$\sin \gamma$	$n = \frac{\sin i}{\sin \gamma}$	$n = \frac{1}{5} (n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5)$
1						
2						
3						
4						
5						

实验结束后，讨论如下问题：

比较表 4-2-1 中用平均值法求出的介质折射率与图 4-2-2 用作图法求出的介质折射率，哪种方法误差更小？

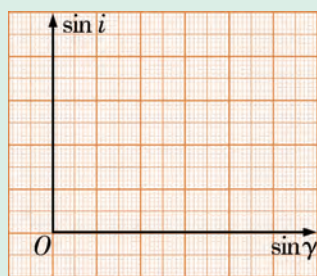


图 4-2-2 用作图法求折射率

不同的介质有不同的折射率，表 4-2-2 列出了几种常见介质的折射率。

表 4-2-2 几种常见介质的折射率

介质	折射率	介质	折射率
空气	1.0003	钻石	2.419
冰	1.309	玻璃	1.5 ~ 1.9
乙醇	1.36	翡翠	1.57
水	1.333	红/蓝宝石	1.77



### 实践与拓展

请查阅资料，了解是否还有其他测定介质折射率的方法，并比较各种测量方法的适用条件。

## 绝对折射率与相对折射率

光产生折射发生在两种介质的界面，所以光的偏折程度与这两种介质有关。设光从介质1射入介质2，这时光的折射率叫作介质2相对于介质1的相对折射率，通常用  $n_{21}$  来表示，即

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

光从真空中射入某种介质时的折射率，叫作该介质的绝对折射率，简称为某介质的折射率，用  $n$  来表示。通常所说的某种介质的折射率，指的就是这种介质的绝对折射率。介质的折射率跟光在介质中的传播速度有关。

设光在介质1中的传播速度为  $v_1$ ，在介质2中的传播速度为  $v_2$ ，介质2对介质1的相对折射率为  $n_{21}$ ，介质1对介质2的相对折射率为  $n_{12}$ ，则有

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2}$$

$$n_{12} = \frac{v_2}{v_1}$$

由上式可以推导

$$n_{21} = \frac{1}{n_{12}} \quad \text{①}$$

空气中的光速近似等于真空中的光速，因此通常空气的绝对折射率近似为1，某种介质对空气的相对折射率可以认为等于这种介质的绝对折射率。

由折射率与光速的关系，可以求得绝对折射率和相对折射率的关系，即

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_1}{\frac{c}{n_2}} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{②}$$

式中  $n_1$  和  $n_2$  分别是介质1和介质2的绝对折射率。

知道了绝对折射率和相对折射率的关系后，①式可以写成

$$n_1 \sin i = n_2 \sin \gamma \quad \text{③}$$

根据③式可以知道，如果光线逆着原来的折射线由介质2射到界面上，即入射角为  $\gamma$ ，在介质1中光线将逆着原来的入射光线发生折射，即折射角等于  $i$ 。就是说，在折射现象中光路也是可逆的。由此可判断当光线由某种介质射入真空（或空气）时折射角与入射角的大小关系。



## 练习

1. 如图 4-2-3 所示, 在用玻璃砖测定玻璃折射率的实验中, 如果所用的玻璃砖  $ABCD$  的上表面  $AB$  和下表面  $CD$  不严格平行 ( $AD$  略大于  $BC$ ), 所测得的折射率是否存在误差? 请分析原因.

2. 如图 4-2-4 所示是利用插针法测定玻璃砖折射率得出的一次实验光路图,  $PQ$  为玻璃砖入射面的法线,  $MN$ 、 $EF$  均垂直于法线  $PQ$  并分别交于点  $N$  和点  $E$ , 入射点为  $O$ , 取  $OM = OF$ , 用刻度尺量出  $MN$ 、 $EF$  的长度, 则折射率  $n = \frac{MN}{EF}$ . 改变入射角  $i$  的大小, 重复以上实验, 可量出  $MN$ 、 $EF$  的多组数据. 现有甲、乙两名同学各设计了一个记录数据表格, 且都已完成计算, 如表 4-2-3 和表 4-2-4 所示.

表 4-2-3 甲同学设计的表格

次数	1	2	3	长度的平均值	$n$
$MN/\text{cm}$	1.68	1.78	2.12	1.86	1.49
$EF/\text{cm}$	1.12	1.24	1.40	1.25	

表 4-2-4 乙同学设计的表格

次数	$MN/\text{cm}$	$EF/\text{cm}$	$n$	$n$ 的平均值
1	1.68	1.12	1.50	1.48
2	1.78	1.24	1.44	
3	2.12	1.40	1.51	

上述同学处理数据的方法正确吗? 为什么?

3. 小明同学用插针法测量一半圆柱形玻璃砖的折射率. 如图 4-2-5 所示, 半圆是玻璃砖的截面,  $A, B, C, D$  是小明同学插下的四枚针的位置.

(1) 请完成测量玻璃砖折射率的光路图.

(2) 在只有一对三角板 (带刻度尺) 的情况下, 怎样测量玻璃砖的折射率? 试在图中画出所需的线段, 并标出相关字母.

(3) 需要测量哪些线段的长度? 并写出计算折射率的表达式 (用需测量的线段表示).

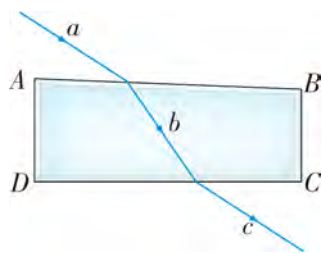


图 4-2-3

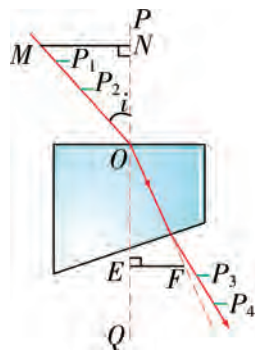


图 4-2-4

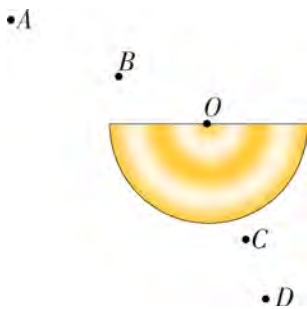


图 4-2-5

## 第三节 光的全反射与光纤技术

光从空气斜射入水、玻璃等折射率较大的介质时，折射角总是小于入射角。由于光路可逆，当光从水、玻璃等介质射入空气时，折射角则会大于入射角。当入射角增大到某一角度时，折射角将达到 $90^\circ$ ，此时如果继续增大入射角，将会出现什么情况呢？

### 光的全反射现象



#### 观察与思考

如图4-3-1所示，用一个长方体的玻璃缸，装约 $\frac{4}{5}$ 的清水（清水中加几滴牛奶，以便使水中的光束显现更清楚），再用烟雾发生器使玻璃缸剩余空间内充满烟雾，盖上一块平板玻璃，避免烟雾散去。然后用一支激光笔使光从玻璃缸的一侧向上斜射到水与烟雾的界面。观察实验现象并思考下列问题。

- (1) 射向水与烟雾的界面的光是被反射回水中，还是进入了空气中，或两种现象都存在？
- (2) 让激光从水中射向空气，不断增大入射角，可以观察到什么现象？
- (3) 让激光从空气射入水中，不断增大入射角，可以观察到什么现象？



图4-3-1 观察光的全反射现象实验装置

实验表明,当光从折射率较大的介质(光密介质)射入折射率较小的介质(光疏介质)时,折射角大于入射角且随入射角增大而增大.当入射角达到一定角度,折射角变成 $90^\circ$ ,继续增大入射角,折射角将大于 $90^\circ$ .此时,入射光线全部被反射回折射率较大的介质中,这种现象称为**光的全反射**(total reflection).折射角等于 $90^\circ$ 时的入射角称为**临界角**(critical angle),记作 $i_c$ .

光密介质与光疏介质是相对的.比如,对于玻璃与水来说,玻璃是光密介质,水是光疏介质;而对于水与空气来说,水是光密介质,空气是光疏介质.

通过以上的实验,可以总结出发生光的全反射的两个必要条件:

- (1) 光线从光密介质射入光疏介质.
- (2) 入射角等于或大于临界角.

不同的介质,由于其折射率不同,在空气中发生全反射的临界角也不一样.由临界角的定义可知,此时的折射角为 $90^\circ$ ,则由折射定律和光路的可逆性,可得

$$\sin i_c = \frac{1}{n} \quad (4.3.1)$$

可以看出,介质的折射率越大,全反射的临界角越小.水的临界角约为 $48.8^\circ$ ,各种玻璃的临界角为 $32^\circ \sim 42^\circ$ .目前已知的物质中,钻石的折射率最大,高达2.419,临界角仅为 $24.5^\circ$ ,这使得射入钻石的光很容易在钻石内部的各个界面间发生连续多次的全反射后才离开钻石,所以钻石看上去闪闪发光.

全反射现象在生活中很常见.清晨,荷叶和小草上的露珠晶莹夺目,水中的气泡看上去犹如一粒粒光彩亮丽的银珠.炎炎夏日,在风平浪静的海面上空或是在炎热干燥的沙漠上空,常常浮现充满传奇色彩的“海市蜃楼”(如图4-3-2所示).这些都是光的全反射的“杰作”.



图4-3-2 在山东蓬莱海域出现的“海市蜃楼”

## 光导纤维的工作原理

全反射现象在生产生活中具有较高的应用价值,并得到了广泛的应用.如光导纤维就是全反射原理的一个重要应用.

光导纤维简称光纤,它能把光(信号)从一端远距离传输到光纤的另一端.其原理就是利用了光的全反射,将光纤设计成沿垂直光纤轴向的两层结构.外层的折射率小于内层的折射率.当光在其中传输时,发生全反射,从而大大减少了光的损耗,即使传输到很远的距离仍然有很高的光能,即信号的衰减很小,以此实现信号的传输.下面通过一个与光纤导光相似的实验来详细展示光纤的工作原理.

**观察与思考**

在一个玻璃瓶的下端侧面开一个小圆孔，并用一橡胶塞塞住。在橡胶塞上开一带阀门的金属直通管，直通管另一端用一小段胶管与一“L”形玻璃管（或金属管）相连，并使“L”型管的出水端略向上倾斜。把整个瓶放在一个升降台上，调节激光器的位置，使其发出的激光正好射向出水端口的上方，如图4-3-3（a）所示。

将瓶中装满水，打开直通管阀门，出现一束连续弯曲的水流，如图4-3-3（b）所示。再开启激光器，可以看到什么现象？当水柱随着瓶中的水位下降而变形的时候，又可以看到什么现象？

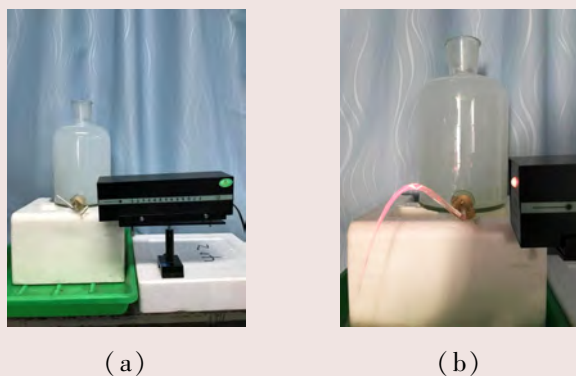


图4-3-3 水柱导光实验现象

从实验中可以看出，当入射角大于某一角度时，激光沿着水柱传播，水柱以外几乎没有光。这是因为水柱中的光在水与空气界面发生全反射，激光全被反射回水中。

光纤导光与实验中看到的水柱导光现象一样，都是利用了光的全反射原理，光是经过连续多次的全反射实现的。实际应用的光纤用的是石英玻璃或塑料拉制成的细丝，如图4-3-4（a）所示，其直径在几微米到一百多微米之间。光纤由纤芯和包层组成，如图4-3-4（b）所示，纤芯的折射率大于包层的折射率，以合适角度进入光纤的光能够在纤芯和包层的界面上发生全反射，并以折线的形式沿着光纤传播，即使是弯曲的光纤也能导光，这使得光的传播方向可以通过光纤任意改变。光纤的这一特点为其实际的应用开辟了广阔的前景。

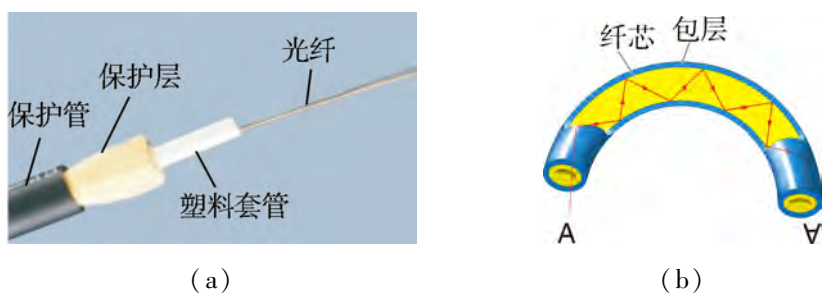


图4-3-4 光纤实物与光纤导光原理

## 光纤技术的实际应用

实际应用中，通常把许多光纤组合制成光缆。光缆中的每条光纤都独立导光互不干扰。因此，制作光缆时，只要使其两端各条光纤的排列位置一致，就可以用来传送图像，医学上用来检查人体消化道的内窥镜就利用了光缆的这种性质（如图 4-3-5 所示）。

我们知道，光是一种电磁波，可以作为一种载体传递信息。载有声音、图像等信号的激光从光纤的一端输入，可以沿着光纤传到千里以外的另一端，实现光纤通信。光纤通信的主要优点是容量大、衰减小、抗干扰性强。例如，“国际通信卫星 6 号”只能传输 3.3 万路电话或 4 路电视，但 1 路光纤的传输能力理论值为 20 亿路电话或 1 万路电视。光纤通信的发展带动了整个信息科学的发展。光纤宽带、光纤电话、光纤有线电视等光纤通信网络正以惊人的速度进入千家万户。

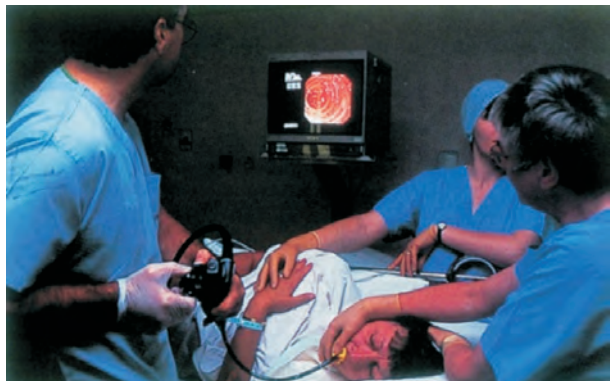


图 4-3-5 用于检查消化道疾病的内窥镜



### 实践与拓展

1. 自己设计一种方案来演示光的全反射现象。
2. 查阅资料，了解光纤在生产生活中的应用。

### 塑料光纤

#### 资料活页

塑料光纤（POF）是由高透明聚合物如聚苯乙烯（PS）、聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）、聚碳酸酯（PC）作为芯层材料，PMMA、氟塑料等作为皮层材料的一类光纤。它具有质轻、柔软、耐破坏（振动和弯曲），光传导能力大，切割、布线、黏结、抛光和其他加工容易，成本低，不产生辐射，因而完全不受电磁和无线电频率干扰以及噪声的影



图 4-3-6 我国自主生产的塑料光纤

响,进行数据传输不能被窃听等优点,因此是优异的短距离数据传输介质,适合于接入网的最后100~1000米,应用于各种汽车、飞机等运载工具的传输数据系统,以及消费电子产品、照明、军事通信等方面。

网络成本的降低、性能的提高、数字传播技术的引入、电磁干扰的减少以及塑料光纤标准的制定与完善,都使得塑料光纤在工业、农业和国防建设中得到大量应用,并推动着塑料光纤产业逐渐成为光通信的主流产业。

目前,塑料光纤在我国多用于室内装饰、水景照明、溶洞照明、易燃易爆场合、太阳光的利用,且在汽车工业、农业及国防建设中也得到了大量的应用。

随着科技的发展,塑料光纤的应用领域越来越广,其市场的发展会越来越广阔。中国科学家经过多年努力,终于攻克了技术难关,掌握了批量连续化生产塑料光纤的技术,打破了国外公司在国际上的垄断地位。

### 练习

1. 光导纤维的应用体现了哪些光学知识?若光导纤维是由内芯和包层组成,则内芯和包层的折射率要满足什么条件?
2. 折射率为 $n$ 、长度为 $L$ 的玻璃纤置于空气中,若从 $A$ 端射入的光线能在玻璃纤维中发生全反射,最后从 $B$ 端射出,如图4-3-7所示,求光在 $A$ 面上入射角的最大值。

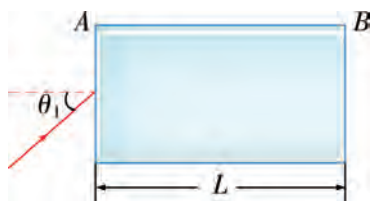


图 4-3-7

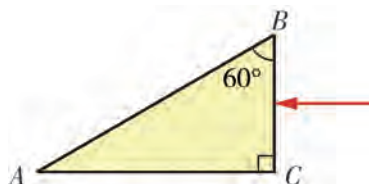


图 4-3-8

3. 如图4-3-8所示,光线从空气垂直射入棱镜界面的 $BC$ 边上,棱镜的折射率 $n = \sqrt{2}$ .请作相应光路图,并求这条光线离开棱镜时与界面的夹角。

4. 打磨如图4-3-9所示的宝石某剖面时,必须将 $OP$ 边、 $OQ$ 边与轴线的夹角 $\theta$ 切磨在 $\theta_1 < \theta < \theta_2$ 的范围内,才能使从 $MN$ 边垂直入射的光线在 $OP$ 边和 $OQ$ 边都发生全反射(仅考虑如图所示的光线第一次射到 $OP$ 边并反射到 $OQ$ 边后射向 $MN$ 边的情况).请根据 $\theta$ 角度的各个范围,分析对应出射光线的各种可能。

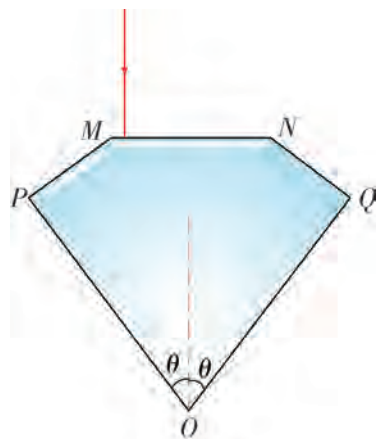


图 4-3-9



## 第四节

## 光的干涉



我们生活在光的世界里。但光是什么呢？人类对这个问题的认识和回答，经历了漫长而曲折的过程。历史上关于光是波还是粒子，有过很长时间的争论。1801年，英国物理学家托马斯·杨（T. Young, 1773—1829）首次在实验室成功观测到光的双缝干涉现象，直接证明了光的波动特性。

### 光的双缝干涉现象

下面我们来还原这个著名的光的双缝干涉实验，并了解双缝干涉的原理。

#### 观察与思考

如图4-4-1所示，将一支激光笔发出的光照射在双缝上，双缝平行于屏，在屏上观察到了什么？如果将两支同样的激光笔射向屏上的同一个地方，又观察到了什么现象？

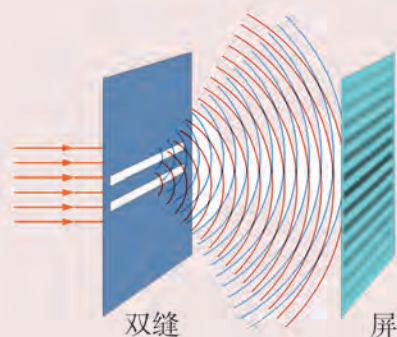


图4-4-1 光照射双缝后的干涉图样

将一支激光笔发出的光照射在双缝上，双缝平行于屏，在屏上观察到了明暗相间的条纹；而将两支同样的激光笔射向屏上的同一个地方，则观察不到明暗相间的条纹。光波和机械波一样都具有干涉现象。光的干涉条件和机械波的干涉条件类似。

### 光产生干涉的条件

研究表明，光和机械波一样，产生稳定的干涉图样需要一定的条件：两列光波的频率

相同，相位差恒定，振动方向相同，即光波为相干光波，而且两列相干光波到达明（暗）干涉条纹的位置的路程差  $\Delta r$  是波长的整数倍（或半波长的奇数倍），即满足

$$\Delta r = k\lambda, k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \text{ (明条纹)}$$

$$\Delta r = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}, k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \text{ (暗条纹)}$$

但如果两列光不是在真空或空气中传播，而是在绝对折射率为  $n$  的介质中传播路程  $r$ ，经计算表明，明条纹和暗条纹满足的条件为

$$\Delta(nr) = k\lambda, k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \text{ (明条纹)}$$

$$\Delta(nr) = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}, k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \text{ (暗条纹)}$$

其中  $\Delta(nr)$  为两列相干光到达明（暗）干涉条纹处的路径与绝对折射率乘积的差值，叫作光程差。

对于如图 4-4-1 所示的双缝干涉实验，如果观察屏到双缝挡板的距离为  $L$ ，双缝之间的距离为  $d$ ，光的波长为  $\lambda$ （如图 4-4-2 所示），则观察屏上的相邻明条纹（或暗条纹）间的距离  $\Delta x$  为

$$\Delta x = \frac{L}{d}\lambda \quad (4.4.1)$$

从式 (4.4.1) 可以看出，在狭缝间距  $d$  和狭缝与屏之间的距离  $L$  不变的条件下，不同颜色的光产生的双缝干涉条纹间距不同。光的波长越长，干涉条纹的间距越大。如果是复色光，在屏上除了与双缝对称的中线上是复色光，其余地方各种颜色的光将分开，从而呈现彩色。

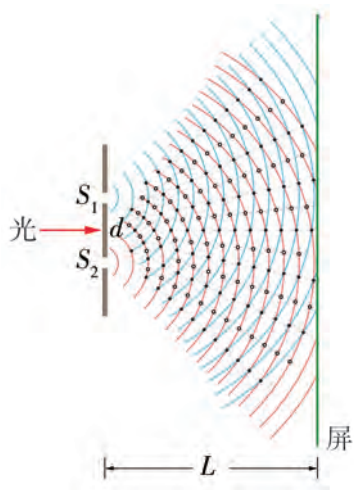


图 4-4-2 双缝干涉实验光路示意图



### 讨论与交流

杨氏双缝干涉实验为什么采用双缝？是为了满足干涉的哪个条件？为什么两支激光笔发出的激光照射到屏上无法产生干涉？

通过双缝出来的光能保证频率相同、振动方向相同，同时两束光的相位差由屏到双缝的距离  $L$  以及双缝之间的距离  $d$  决定，故可以保证相位差恒定，从而满足干涉的条件——频率相同，振动方向相同，相位差恒定。

两支激光笔即使相同，只能保证激光的频率相同，而激光笔发出的光的初相位由每支笔发光的随机性决定，因而它们发出的光相位差不恒定。故两支激光笔发出的光不是相干光，在同一空间不出现干涉条纹。

## 薄膜干涉

现在，许多科技产品都应用了干涉原理。其中有一类特殊的干涉现象——薄膜干涉，是光通过薄膜时产生的干涉。薄膜可以是透明固体、液体或由两块玻璃所夹的气体薄层。人们经常在肥皂液膜、两片玻璃之间可以看到薄膜干涉现象。这种薄膜干涉在科技产品中得到应用，如在相机的镜头上通过镀上增透膜产生干涉，增加透射，减少反射。下面通过介绍发生在肥皂液膜（如图 4-4-3 所示）中光的干涉来了解薄膜干涉的原理。



图 4-4-3 阳光下的肥皂泡

如图 4-4-4 所示，肥皂泡上的颜色是由肥皂膜的前、后表面反射回来的两组光波相遇后形成的。由于重力的作用，从膜的上部到膜的下部呈现楔形。太阳光照射在膜上时，一部分从膜表面  $A_1B_1$  上被反射，另一部分折射进入膜内，经膜的内表面  $A_2B_2$  反射后的光，再在膜的外表面  $A_1B_1$  折射出去。这束光与在膜表面  $A_1B_1$  上反射的光频率相同，振动方向相同，具有稳定的光程差，是相干光。在膜不同的地方，其内、外表面反射光的光程差不同，故总有一些地方的光程差满足明、暗条纹条件。又由于太阳光是由许多不同颜色的单色光组成的，不同颜色的光在不同的位置满足明条纹和暗条纹的条件。因此，不同颜色的光的明、暗条纹是错开的，从而形成了肥皂泡上的彩色光带。

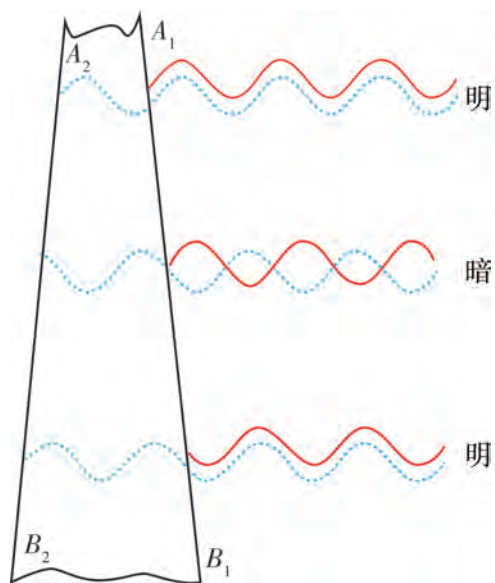


图 4-4-4 肥皂泡的薄膜干涉示意图



## 实践与拓展

1. 尝试在家中观察洗衣粉泡沫的干涉条纹。
2. 比较光的干涉图样与机械波的干涉图样，用“波峰（波谷）与波峰（波谷）加强”“波峰（波谷）与波谷（波峰）相消”的观点来分析它们的干涉图样。

### 镜头镀膜漫谈

现代光学装置，如照相机、摄影机、电影放映机的镜头、潜水艇的潜望镜等，都是由许多光学元件如透镜、棱镜等组成的。进入这些装置的光，在每一个镜面上都有一部分光被反射。计算表明，如果一个装置中包含有六个透镜，那么将有50%的光被反射，使成像质量大大降低。若在镜面上涂上一层透明薄膜，即增透膜，就能大大减少光的反射损失，增强光的透射强度，从而提高成像质量。



图4-4-5 摄像镜头

增透膜为什么能增加透射光的强度呢？它的厚度又该是多大呢？当光由空气射向镜头上的增透膜时，膜的后表面上的反射光比前表面上的反射光多经历的路程为膜厚度的两倍。所以膜厚应为光在薄膜介质中波长的 $\frac{1}{4}$ ，使两反射光相互抵消。由此可知，增透膜的厚度 $d = \frac{\lambda}{4n}$ （其中 $n$ 为膜的折射率， $\lambda$ 为光在空气中的波长）。

不镀膜的镜头，其镜片的透光率比较低，镜片表面的反光比较严重，称为“白头”，对光谱中的各种光线都有较强的反射，因此反光的综合颜色发白。

单层镀膜的镜头，其镜片表面的反光较弱，它能大大增加光谱中部的黄绿光透过率，只有光谱两端的红光和蓝光才被反射，因此反光一般呈淡蓝紫色。

多层镀膜的镜头，其镜头的透光率极高，镜片表面的直接反光很弱，只有从镜片的侧面观察才可以看到彩色的反光，这种反光多为深红色（大幅增透蓝光）、深蓝色（大幅增透红光）、深黄色（大幅增透蓝绿光）和深绿色，其中深绿色的镀膜可以同时增加光谱两端的蓝光和红光的透过率，只有光谱中部的

黄绿色光才被反射回来. 多层镀膜的镜头, 其各个镜片不可能都镀上同一种增透膜, 否则这个镜头就会发生偏色.

因此, 每一个镜头的不同镜片, 要根据镜片所用的材质及其对不同色光的吸收程度, 分别镀上不同特性的增透膜, 相互搭配起来. 这样, 既能使镜头总的透光率增加, 又能使镜头对色光的透过率达到平衡, 做到既不偏蓝也不偏红. 因此, 不同材质的镜片就要镀上不同特性的增透膜, 所以其镜片反光的颜色也不可能相同.

### 练习

1. 相对机械波的干涉实验而言, 光的干涉实验的难度更大. 英国物理学家托马斯·杨成功地在实验室里做出了双缝干涉实验. 该实验的主要困难是什么? 托马斯·杨用什么办法巧妙地解决了这个难题?

2. 通过双缝干涉图样的中心亮条纹的位置可以确定光的波长吗? 请说明理由.

3. 某人用某一单色光做双缝干涉实验时, 已知双缝间距离为  $0.25 \text{ mm}$ , 在距离双缝为  $1.2 \text{ m}$  处的光屏上, 测得 5 条亮纹间的距离为  $7.5 \text{ mm}$ . 试求所用单色光的波长.

4. 登山运动员在登雪山时要注意防止紫外线的过度照射, 尤其是眼睛更不能长时间被紫外线照射, 否则将会严重地损伤视力. 有人想利用薄膜干涉的原理设计一种“增反膜”, 以减小紫外线对眼睛的伤害. 他选用的薄膜材料的折射率为  $n = 1.5$ , 所要消除的紫外线的频率为  $\nu = 8.1 \times 10^{14} \text{ Hz}$ .

(1) 他设计的这种“增反膜”所依据的是什么原理?

(2) 这种“增反膜”的厚度至少是多少?

## 第五节

# 用双缝干涉实验 测定光的波长

光的波长是光的重要参数之一。可见光的波长约在  $400 \sim 760 \text{ nm}$  范围内。测量光的波长的方法有很多，用双缝干涉实验测定光的波长是相对准确的一种方法。

在上一节的双缝干涉实验中，我们知道了相邻明纹（或暗纹）之间的距离  $\Delta x$  与波长  $\lambda$ 、双缝间距  $d$ 、双缝到屏的距离  $L$  之间的关系为  $\Delta x = \frac{L}{d}\lambda$ 。若测出双缝干涉中的  $\Delta x$ ， $d$  与  $L$ ，即可求出  $\lambda = \frac{\Delta x d}{L}$ 。

### 实验与探究

测量光波波长的实验装置为双缝干涉仪，包括光具座、光源、滤光片、单缝、双缝、遮光筒、毛玻璃屏、测量头、学生电源、导线、刻度尺等。

在实验操作之前，请思考下列问题。

- (1) 一般光源发出的光通常为复色光，实验中如何得到相干光？
- (2) 实验中遮光筒的作用是什么？

按照如图 4-5-1 所示的装置安装好仪器。先调整光源的位置，使光源发出的光平行地进入遮光筒并照亮光屏；再放置单缝和双缝，使缝相互平行，调整各部件的间距，观察白光的双缝干涉图样（彩色条纹）；在光源和单缝间放置滤光片，使单一颜色的光通过，观察单色光的双缝干涉图样（明暗相间的单色条纹）。

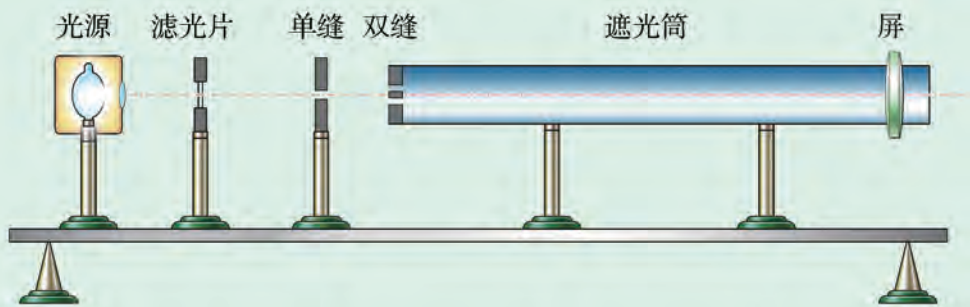


图 4-5-1 双缝干涉仪

用米尺测出双缝到屏的距离  $L$ ，用测量头测出相邻的两条明（或暗）纹间的距离  $\Delta x$ 。

改变双缝到屏的距离  $L$ ，再测出几组对应的相邻的两条明（或暗）纹间的距离  $\Delta x$ 。将实验数据记录在表 4-5-1 中。

表 4-5-1 数据记录表

双缝间的距离  $d =$  \_\_\_\_\_ mm.

测量次数	屏到双缝的距离 $L/\text{m}$	相邻条纹的距离 $\Delta x/\text{mm}$	光波波长 $\lambda/\text{nm}$
1			
2			
3			
4			
5			

利用公式  $\lambda = \frac{d\Delta x}{L}$ （双缝间的距离  $d$  可从产品铭牌上直接读出），求单色光的波长，并求出多次测量的平均值。

换用不同颜色的滤光片，观察干涉图样有什么不同，并求出不同单色光相应的波长。

实验时，要保证光源、滤光片、单缝、双缝、光屏的中心在同一条轴线上，单缝和双缝间距调到 5~10 cm 为宜。

实验时，为了精确测量相邻条纹的间距  $\Delta x$ ，会在光屏后安装测量头（如图 4-5-2 所示）。测量头紧贴屏安装，由分划板、目镜、手轮等构成。转动手轮，分划板会左右移动。测量时，应使分划板的中心刻度对齐条纹的中心（如图 4-5-2 所示），记下此时手轮上的示数  $x_1$ （其读数方法与螺旋测微器相同）。转动手轮，使分划板向一侧移动，当分划板中心刻线对齐另一相邻的明条纹中心时，记下手轮上的示数  $x_2$ 。两次示数之差就是相邻两条明条纹间的距离，即  $\Delta x = |x_1 - x_2|$ 。

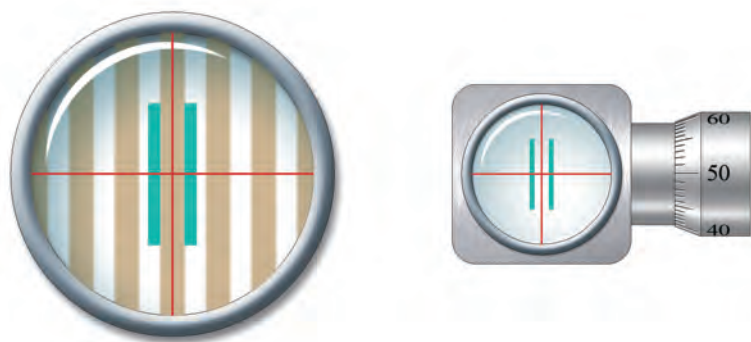


图 4-5-2 测量头

$\Delta x$  很小, 直接测量时相对误差较大. 通常测出  $n$  条明条纹间的距离  $a$ , 再按  $\Delta x = \frac{a}{n-1}$

推算相邻两条明(暗)条纹间的距离. 最后由  $\lambda = \frac{da}{(n-1)L}$  算出单色光的波长.



## 讨论与交流

能否用双缝干涉仪同时观察到不同单色光的干涉条纹? 如果能, 试比较不同波长的色光对应的干涉条纹的宽窄变化.

比较不同颜色光干涉条纹的宽窄时, 可将两块不同颜色的滤光片上、下并列放在光源和单缝之间, 使得进入遮光筒的上、下两部分是不同颜色的光, 这样就能在屏上同时看到上、下两种不同色光的干涉条纹, 便于直接比较它们.



## 实践与拓展

利用两支铅笔, 通过打有小孔的铝箔或者胶片、刀片、羽毛、纱巾等观察发光的光源, 可以看到什么现象, 如何解释?

## 光栅位移测量技术

近年来, 高精度测量已成为世界测量领域的研究热点. 考虑到测量范围、精度、系统尺寸和工作环境等因素的影响, 用小体积多自由度的测量方法来实现高精度测量在现代位移测量中的需求越来越突出. 随着现代科技的发展, 光栅位移测量技术是应用最广泛的测量技术之一.

光栅位移传感器在精密加工、微电子、微机电系统、微纳米技术等领域具有广阔的应用前景, 可用作直线位移或者角位移的检测. 光栅位移传感器由光源、光路系统、光栅和光敏元件等部件组成. 当被测物体位移发生变化时, 光源发出的光透过光栅形成的光脉冲被光敏元件接收并记录, 然后系统处理脉冲数据, 从而实现位移测量.

光栅位移测量技术具有以下优点:

- (1) 测量精度高.
- (2) 量程大.
- (3) 可实现动态测量.
- (4) 结构相对简单, 操作方便.
- (5) 可小型化.
- (6) 可以从一维扩展到二维.



图 4-5-3 光栅位移传感器



然而，光栅位移测量技术的应用也存在如下的局限性：

- (1) 精度受系统各元器件之间的位置误差影响。
- (2) 对环境要求较高，怕振动，怕油污、灰尘等污染。
- (3) 制造成本高。

基于光栅位移测量技术的精密测量系统正在向高精度、大量程、多维度、小体积的方向发展，未来它将在精密位移测量中发挥越来越重要的作用。

### 练习

1. 某同学按双缝干涉实验装置安装好仪器后，观察光的干涉现象，获得了成功。若他在此基础上将遮光筒内的光屏向靠近双缝的方向移动少许，其他不动，实验仍能成功吗？为什么？

2. 如图 4-5-4 所示是某同学用“双缝干涉法”做测定某单色光的波长的实验示意图。他测得单缝到双缝的距离为 80 mm，双缝间距为  $200\ \mu\text{m}$ ，双缝到墙壁的距离为 60 cm，墙壁上的干涉图样及尺寸如图 4-5-4 所示，则该单色光的波长是多少？

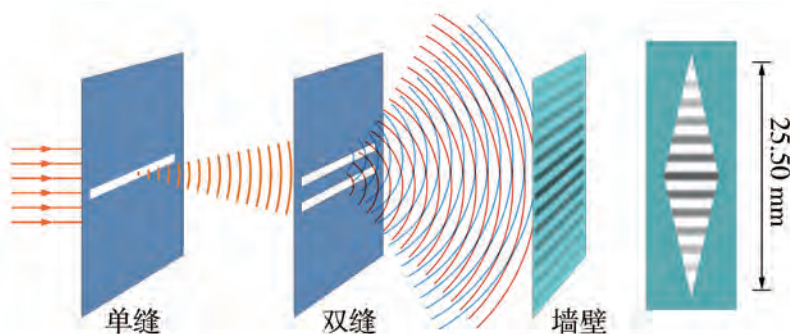


图 4-5-4

3. 现有毛玻璃屏 A、双缝 B、白光光源 C、单缝 D 和透红光的滤光片 E 等光学元件，要把它们放在如图 4-5-5 所示的光具座上组装成双缝干涉装置，用以测量红光的波长。

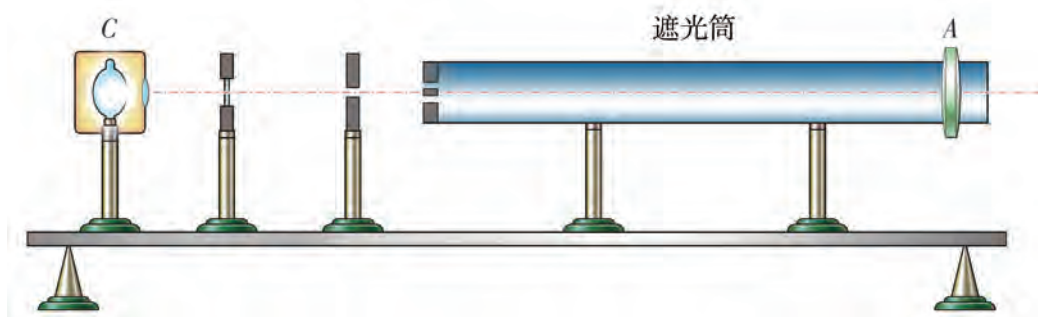


图 4-5-5

(1) 将白光光源  $C$  放在光具座最左端，依次放置其他光学元件，由左至右，表示各光学元件的字母排列顺序应为  $C$ ，\_\_\_\_\_，\_\_\_\_\_，\_\_\_\_\_， $A$ 。

(2) 本实验的步骤有：

- ①取下遮光筒左侧的元件，调节光源高度，使光束能直接沿遮光筒轴线把屏照亮。
- ②按合理顺序在光具座上放置各光学元件，并使各元件的中心位于遮光筒的轴线上。
- ③用米尺测量双缝到屏的距离。
- ④用测微目镜（其读数方法同螺旋测微器）测量数条明纹间的距离。

在操作步骤②时，还应注意\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_。为了增加屏上相邻明纹（暗纹）间的距离，可采取\_\_\_\_\_或\_\_\_\_\_的方法。

(3) 将测微目镜的分划板中心刻线与某条明纹中心对齐，将该明纹定为第 1 条明纹，此时手轮上的示数如图 4-5-6 (a) 所示。然后同方向转动测微目镜，使分划板中心刻线与第 6 条明纹中心对齐，记下此时图 4-5-6 (b) 中手轮上的示数为\_\_\_\_\_ mm，求得相邻明纹的间距  $\Delta x$  为\_\_\_\_\_ mm。



图 4-5-6

(4) 已知双缝间距  $d$  为  $2.0 \times 10^{-4}$  m，测得双缝到屏的距离  $l$  为 0.700 m，由计算式  $\lambda =$  \_\_\_\_\_，可以求得所测红光波长为\_\_\_\_\_ nm。

## 第六节 光的衍射和偏振



与机械波的衍射类似，光在传播过程中，遇到障碍物或小孔时，会偏离原有直线传播的途径而绕到障碍物后面，产生衍射现象。光的衍射现象随处存在，但在通常情况下，光的衍射效应十分微弱，人们难以观察到，这是由于光产生衍射需要的条件较高引起的。

### 光的衍射

下面我们通过实验来研究光产生衍射所需的条件。



#### 观察与思考

1. 如图 4-6-1 所示，用单色平行光照射一狭缝可调的挡板  $AB$ ，在狭缝后面放置一光屏。从大到小地调节狭缝的大小，在光屏上可以观察到什么现象？

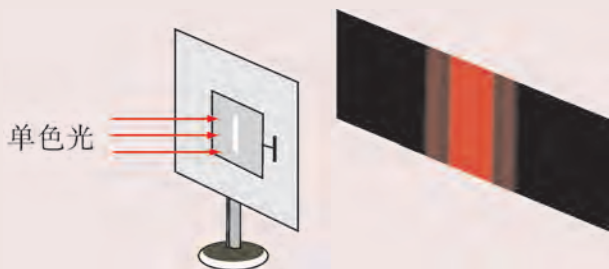


图 4-6-1 光的狭缝衍射

2. 如图 4-6-2 所示，让一单色点光源发出的光照射一个尺寸可调的圆孔，在圆孔的后面放置一光屏。从大到小地调节圆孔的大小，在光屏上可以观察到什么现象？



图 4-6-2 光的圆孔衍射

从狭缝实验我们可以看到，当狭缝较宽时，观察屏上是一条亮的光带，光带的宽度符合光的直线传播规律。但是，当狭缝不断变窄时，观察屏上会出现中央亮且宽、两边对称分布、明暗相间的光带，整个图样远大于光通过狭缝时按照直线传播所能照亮的区域。这表明光绕过了狭缝边缘传播，而不是沿直线传播。这就是光的**狭缝衍射现象**。这种现象与声波、水波遇到障碍物时出现的情况类似。如果将狭缝换成大小可调的圆孔，当圆孔足够小时，同样能观察到中央为明显的亮斑、周围是明暗相间的圆形光环的图样。和光线通过狭缝传播相似，圆形光环的图样远大于通过圆孔时按照直线传播所能照亮的区域。这就是光的**圆孔衍射现象**。

对光衍射现象的进一步研究表明，当障碍物的尺寸与光的波长相当，甚至小于光的波长时，衍射现象将十分明显。

光的衍射是一种奇妙的自然现象。在经过人们不断的探索研究后，光的衍射原理已经得到广泛应用。例如，DNA 的复杂双螺旋结构就是借助光的衍射图样来确定的；利用原子晶格被特有射线穿透衍射后能够形成一定特征的衍射图样的原理，可以推断出原子的排列特征。



### 讨论与交流

光的衍射与光的直线传播是否矛盾？

## 光的偏振

如图 4-6-3 所示，在一个乳胶管内灌满水，两端扎紧。将胶管穿过一个带有夹缝（夹缝宽度稍大于胶管直径）的挡板。胶管的一端固定，另一端用手拉着上下振动，形成一个机械横波。当夹缝放在竖直方向，机械横波能通过夹缝。当夹缝放在水平方向，机械横波则不通过夹缝。我们把这种现象称为横波的偏振性。显然，纵波由于振动沿着波的传播方向，不具有以上特性。

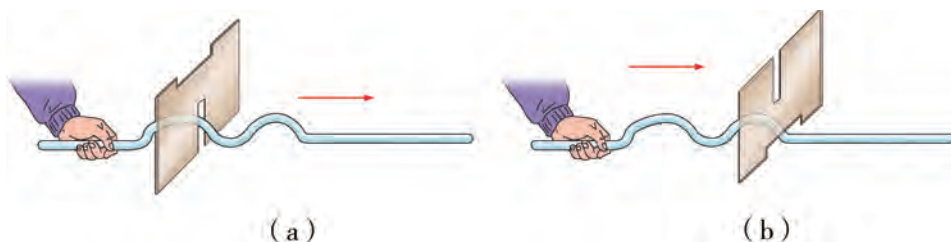


图 4-6-3 机械横波通过狭缝实验

光是电磁波，它有没有偏振性呢？

**观察与思考**

如图 4-6-4 所示，偏振片是一种由特殊的材料制成的元件，它有一个特殊的方向，叫作透振方向。当光的振动方向与透振方向平行时，光能完全通过偏振片；当光的振动方向与透振方向垂直时，光不能通过偏振片；当处于两者之间时，光只能部分通过。

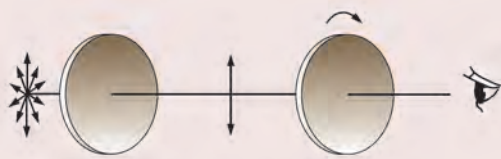


图 4-6-4 偏振光的检测

(1) 让太阳光或灯光通过偏振片，旋转偏振片，从偏振片的另一侧观察到的光有什么变化？

(2) 保持偏振片位置不动，再在后面放置第二块偏振片，旋转第二块偏振片，从第二块偏振片后能观察到什么现象？

从上述实验可知，偏振片透射的光的强度会随着旋转的角度而变化，当两块偏振片的透振方向一致时，观察到的光最强，这说明从第二块偏振片出来的光的振动方向与第一块偏振片的透振方向相同。当两块偏振片的透振方向垂直时，几乎观察不到光。这种具有特定振动方向的光叫作**偏振光** (polarized light)。很显然，只有横波才具有偏振性。这个实验也验证了光是横波。

光的偏振性很少被人们觉察。这是因为通常所用的光源包含数目极多的原子和分子，每个原子和分子都是一个独立的光源。虽然每一个原子或分子每一次发射所发出的光波都是偏振的，它们的振动都有确定的方向。但是由于普通的光源中各个原子或分子的发光都是各自独立的，它们发出的光的振动在各个方向上都有，不存在某个优先的振动方向。因此，当对着光波传来的方向看去时，任何方向上振动的强度都相等，并不显示出偏振性。

光的偏振现象被发现后，在许多与光有关的环境下被广泛应用。例如，登山运动员在攀登雪峰时，常会戴上一副偏振光眼镜，保护眼睛免受雪地强反射光的伤害；夜间行车时，对面行驶过来的车辆刺眼的车灯有可能导致驾驶员短暂失明而引发交通事故，如果戴上偏振光眼镜，就可以有效地衰减进入眼睛的光强，避免意外发生；摄影爱好者常备的偏振滤光片，在拍摄太阳斜照的水下景物或玻璃门窗里的图景时，会起到有效地减弱水面、玻璃面反射光的作用，从而获得清晰的照片，如图 4-6-5 所示。



(a) 未加偏振滤光片拍摄的效果



(b) 加偏振滤光片拍摄的效果

图 4-6-5 两种拍摄方式的效果对比

## 3D 电影

目前流行的3D电影技术，就是利用光的偏振原理实现的。在观看3D电影时，观众要戴上一副特制的眼镜，这副眼镜就是一对透振方向互相垂直的偏振片。这样，从银幕上看到的景象才有立体感。如果不戴这副眼镜看，银幕上的图像就模糊不清。这是为什么呢？

我们从“人眼如何看物体”说起。人的两只眼睛同时观察物体，不但能扩大视野，而且能判断物体的远近，产生立体感。这是由于人的两只眼睛同时观察物体时，在视网膜上形成的像并不完全相同，左眼看到物体的左侧面较多，右眼看到物体的右侧面较多，这两个像经过大脑综合以后就能区分物体的远近，从而产生立体视觉。

3D电影是用两个镜头如人眼那样从两个不同方向同时拍摄下影像。在放映时，通过两个放映机，把用两个摄影机拍下的影像同步放映，使这略有差别的两段影像重叠在银幕上。这时如果用眼睛直接观看，看到的画面是模糊不清的，只要在每架电影机前装一块偏振片，它的作用就相当于起偏器。从两架放映机射出的光，通过偏振片后，就成了偏振光。左右两架放映机前的偏振片的偏振化方向互相垂直，因而产生的两束偏振光的偏振方向也互相垂直。这两束偏振光投射到银幕上再反射到观众处，偏振光方向不改变（如图4-6-6所示）。观众用上述的偏振眼镜观看，每只眼睛只看到相应的偏振光图像，即左眼只能看到左机放映出的影像，右眼只能看到右机放映出的影像，这样就会产生立体感。这就是3D电影的原理。

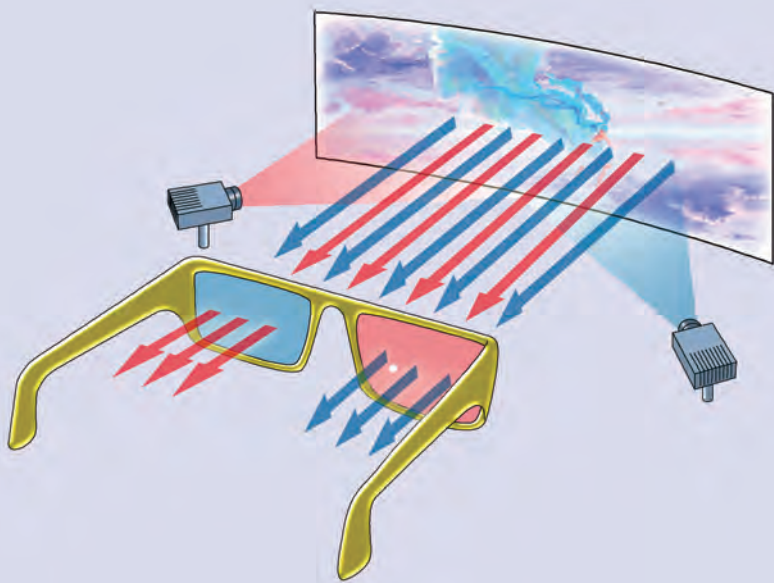


图 4-6-6 3D 电影播放示意图

 练习

1. 对于“闻其声，不见其人”，其中的物理原理是什么？
2. 通过上网查阅资料，简述衍射在医学和天文学中的作用。
3. 如图 4-6-7 所示，两光屏间放有两个偏振片，它们四者平行共轴，现让太阳光沿轴线通过光屏  $M$  上的小孔照射到固定不动的偏振片  $P$  上，再使偏振片  $Q$  绕轴匀速转动一周，观察光屏  $N$  上光的亮度会如何变化，试解释变化的原因。

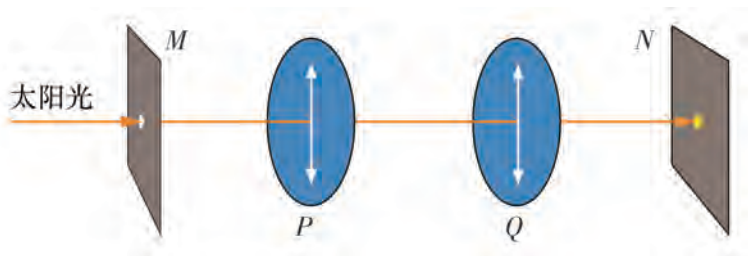


图 4-6-7

4. 请注意观察、搜集生活中应用光的偏振现象的实例。例如，需要逆光拍水下的景物时，水面的反射光会有很大干扰，怎样才能有效消除这种干扰，拍清水下景物？

## 第七节

## 激光



激光（如图4-7-1所示）是20世纪以来，继原子能、计算机、半导体之后，人类的又一重大发明，被称为“最快的刀”“最准的尺”“最亮的光”和“奇异的光”。激光的原理早在1916年被爱因斯坦发现，但直到1960年，激光才被首次成功制造。激光是在有理论准备和生产实践迫切需要的背景下应运而生的，它一问世，就获得了异乎寻常的飞速发展。激光的发展不仅使古老的光学科学和光学技术获得了新生，而且促使一些新兴产业蓬勃发展。下面我们一起来认识激光的特性和激光的一些高科技应用。

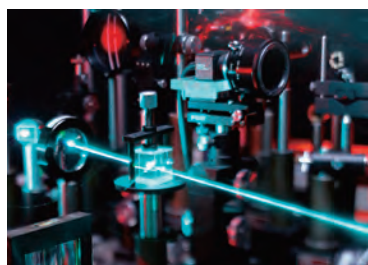


图4-7-1 激光

### 激光的特性

我们以微型激光笔作为激光源来探究激光的特性。



#### 观察与思考

1. 分别将手电筒光和微型激光笔产生的激光由近及远投射在白墙上，观察对比两者光斑亮度及大小的变化。
2. 如图4-7-2所示，用微型激光笔产生的激光照射光栅，观察激光经过光栅后在光屏上的图案。

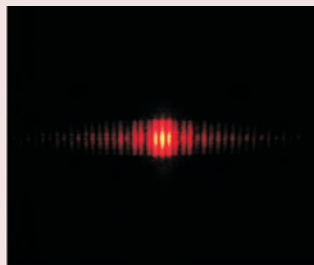
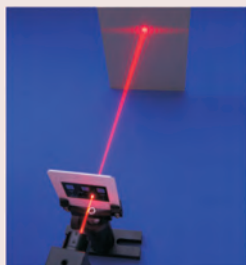


图4-7-2 激光光栅实验



激光具有如下的特性：

(1) 单色性好：普通光源发射的光，通常包含各种不同频率的光，因而包含有各种颜色。而激光发射的光谱宽度很窄，因此激光是单色产生很好的光源。

(2) 相干性好：普通光通常是非相干光，激光是相干光束，它为我们提供了很好的相干光源。

(3) 平行度好：激光束的发散角很小，方向性很强，激光光束的能量在空间高度集中，不容易发散，例如激光从地球照射到月球上形成的光斑直径仅约 1 km。

(4) 亮度高：激光的亮度可比普通光源高出  $10^{12} \sim 10^{19}$  倍，是目前最亮的光源，强激光甚至可产生上亿度的高温。

## 激光的应用

由于激光具有单色性好、相干性好、亮度高、平行度好等特点，因此它在现代生活和生产中有广泛的应用，并形成了很多与激光相关的产业，比如激光通信、激光武器、激光加工、激光医学、激光成像等。下面举几个激光应用的具体例子。

光导纤维中用激光作为信息高速传输的载体。要使射到粗细均匀的圆形光导纤维一个端面上的激光束都能从另一个端面射出，而不会从侧面泄露，必须使携带信号的光都满足全反射条件，传输很长距离后的光还具有足够的亮度。激光的亮度高，能在一定程度上保证携带信号的光在传输很长时间后仍然具有足够的亮度。另一方面，由于激光单色性好，只要选择好光入射到光纤的角度，则所有携带信号的光都满足全反射条件。

良好的平行度使激光在雷达上用于测量距离和跟踪目标。雷达对准目标发出一个极短的激光脉冲，通过测量从发射脉冲到接收回波的时间，即可算出目标的距离。同时根据多普勒效应，还可以测出目标的运动速度和运动方位，从而对目标进行跟踪。

激光高亮度的特点也被应用在工业、医学和美容等方面。例如，工业上的激光切割（如图 4-7-3 所示）、激光焊接技术，医学上切割肿瘤的“光刀”，用于矫正视力的准分子激光技术（如图 4-7-4 所示），美容上的“激光祛斑”，军事上的激光武器等。

目前治疗牙神经发炎、坏死的常用方法是用专用牙钻在牙齿上开洞，清除内部的神经，再用专用药物填充。这种疗法易使病人感到疼痛、紧张，而且会损害牙齿的牢固程度。而水激光治疗法的原理是使用波长为 2940 nm 的钬激光来处理

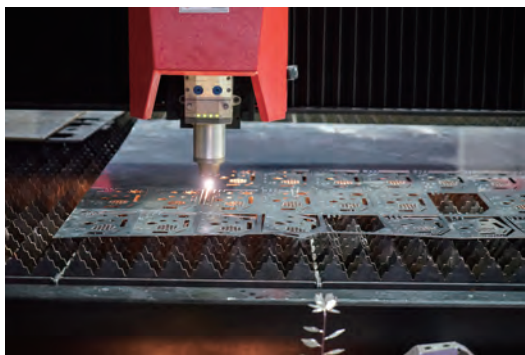


图 4-7-3 激光切割

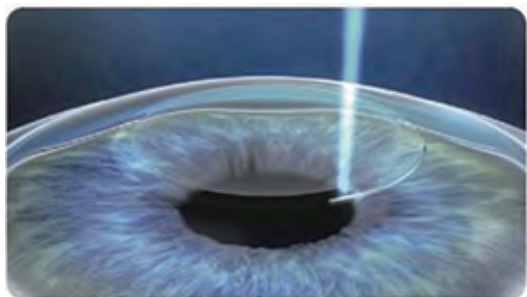


图 4-7-4 激光准分子技术

病牙。这一波长的激光容易被水吸收，而牙齿内部的病变神经组织含有大量的水，因而激光的大部分能量被病变组织吸收，使它们蒸发。由于水激光不会对靶组织产生热效应，所以口腔组织就不会产生疼痛感。因此，牙科上应用水激光时，大多数操作不需要麻醉，且无痛、舒适，这项技术让我们轻松告别了治疗牙病时疼痛、肿胀、流血的历史。

激光还用来测量大气中水蒸气的饱和程度，可以准确预告降雨量，从而预报洪涝灾害，以便采取应对措施。

全息照相也是激光的一个重要应用。全息照相与普通照相不同，从它的照片可以看到三维的图像，而普通的照片看到的图像是二维的。全息照相为什么能拍摄三维的照片呢？

用于普通照相的感光胶片只能记录物体上各个点发出的光的强度（即振幅），而实际上物体不同点发出的光束不但振幅不同，相位也不同，振幅与相位的不同反映出物体不同点的明暗与远近。普通照相由于只记录了光波的振幅，因此不能反映物体不同点的远近的差别，而只能反映各个部分的明暗情况，所以把立体的物体变成了平面的图像。如图4-7-5所示，如果能够把物体各点发出的光波的振幅与相位同时记录下来（全息记录），并使之再现（全息再现），则当这些光波被人眼接收时，眼中的图像将和直接观看物体一样是三维的。这种能同时记录振幅与相位的照相叫作**全息照相**（holography）。全息照相利用了激光的相干性、平行度好和亮度高的特点。



图4-7-5 全息再现



## 实践与拓展

观看全息相片，改变视角，同时平移全息底片，观察虚像的变化。为什么会出现这样的变化？

## 激光的产生

激光器是20世纪60年代初出现的一种新型光源。激光器是产生激光的器件，如图4-7-6所示，主要由工作物质、激励源和谐振腔三部分组成。

工作物质是发射激光的发光材料，决定产生的激光的波长。激励源负责

向工作物质提供能量，把工作物质的原子、分子从稳定的低能量状态激发到不稳定的较高能量状态。处于不稳定的较高能量状态的原子、分子在返回低能量稳定态时，就会放出光子。谐振腔是由置于工作物质两端的一对反射镜构成的光学系统。一个反射镜的反射率接近100%，另一个有适量的透过率，使激光能够向外输出。谐振腔的作用是对工作物质发出的某种确定频率的光子进行收集放大，进而形成激光并向外输出。

自从1960年在实验室中制成第一台激光器（红宝石激光器）以来，各种激光器的研制和各种激光技术的应用已实现突飞猛进的发展。

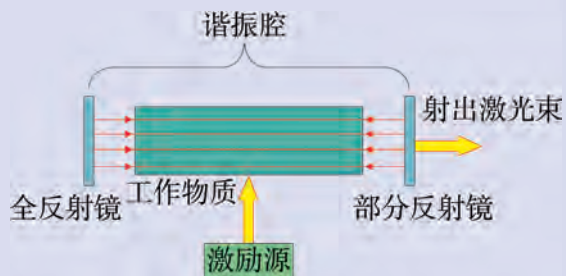


图4-7-6 激光器的组成



## 练习

1. 激光适用于室内照明吗？为什么？试从激光的特性来解释。

2. 全息照相中的像与海市蜃楼中的像有什么异同？

3. 2004年，中国科学院上海光学精密机械研究所在一个不到  $10 \text{ m}^2$  的光学平台上，在  $35 \text{ fs}$ （ $\text{fs}$  是一种时间单位，读作飞秒， $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$ ）的超短瞬间内获得了  $15 \times 10^{12} \text{ W}$  的超强超短激光束。这一瞬时功率相当于全世界所有电网功率总量的数倍。据了解，自然界中类似的极端物理条件，只有在核爆中心、恒星内部以及黑洞边缘才能找到。在实验室中用人工手段获得这种条件，意味着人类在激光研究领域将进入一个前所未有的超强超快的境界。通过以上叙述，试计算在这  $35 \text{ fs}$  中所释放的激光能量是多少。

4. 一种红宝石激光器发射的激光是不连续的一道道闪光，每道闪光被称为一个光脉冲，若这种激光器光脉冲的持续时间为  $1.0 \times 10^{-11} \text{ s}$ ，波长为  $694.3 \text{ nm}$ ，发射功率为  $1.0 \times 10^{10} \text{ W}$ ，则：

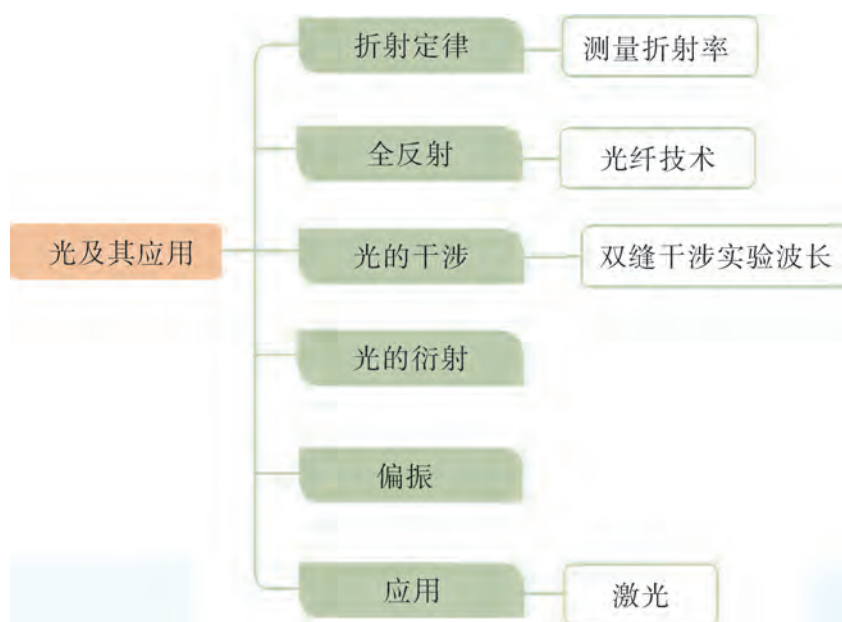
(1) 每列光脉冲的长度是多少？

(2) 用该红宝石激光器进行激光祛斑美容，如照射皮肤色斑，每  $1 \text{ cm}^2$  吸收能量达到  $60 \text{ J}$  以后，色斑便逐渐消失。若一块色斑的面积为  $50 \text{ mm}^2$ ，则它需要吸收多少个该类光脉冲才能逐渐消失？

## 本章小结

### 知识结构

参考下面的知识结构，请进一步梳理本章的知识。



### 回顾与评价

1. 生活中有很多利用光来布景的场面，找一个与同学们交流，说说其中利用光的物理知识的具体例子。这些例子都有哪些特点？
2. 说一说对光纤技术的了解，并用具体事例说明光纤技术的应用。
3. 在用双缝干涉实验测定光的波长实验过程中，哪一个步骤最为关键？
4. 到电影院看 3D 电影时，一般都需要佩戴 3D 眼镜。请简述 3D 眼镜的原理。

## 习题四

1. 水、水晶、玻璃和二硫化碳的折射率分别为 1.33, 1.55, 1.60 和 1.63. 如果光按下面几种方式传播, 可能发生全反射的是 ( ).

- A. 从水晶射入玻璃
- B. 从水射入二硫化碳
- C. 从玻璃射入水中
- D. 从水射入水晶

2. 华裔科学家高锟被誉为“光纤之父”, 他获得 2009 年诺贝尔物理学奖. 光纤通信中信号传播的主要载体是光导纤维, 它的结构如图 4-1 所示, 其纤芯和包层材料不同, 光在纤芯中传播. 下列关于光导纤维的说法正确的是 ( ).

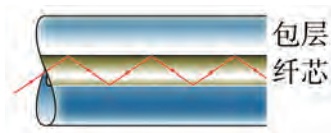


图 4-1

- A. 纤芯的折射率比外套的大, 光传播时在纤芯与包层的界面上发生全反射
- B. 纤芯的折射率比外套的小, 光传播时在纤芯与包层的界面上发生全反射
- C. 波长越短的光在光纤中传播的速度越大
- D. 频率越低的光在光纤中传播的速度越大

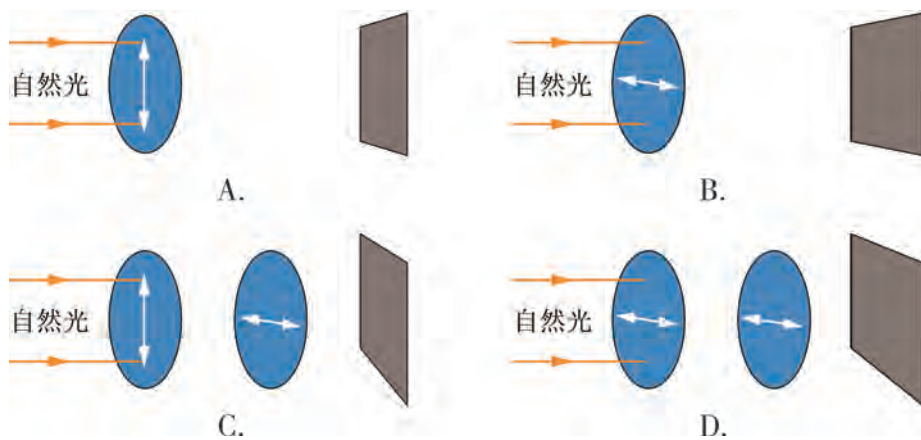
3. 由两个不同光源所发生的两束白光落在同一点上, 不会产生干涉现象, 这是因为 ( ).

- A. 两个光源发出光的频率相同
- B. 两个光源发出光的强度不同
- C. 两个光源的光速不同
- D. 这两个光源是彼此独立的, 不是相干光源

4. 通过一块偏振片分别去观察电灯、蜡烛、月亮、反光的黑板的光, 当以入射光线为轴转动偏振片时, 能够观察到光线强弱有变化的是 ( ).

- A. 电灯
- B. 蜡烛
- C. 月亮
- D. 反光的黑板

5. 一束自然光通过起偏器照射到光屏上. 下列选项中光屏上发亮的有 (起偏器上用箭头表示其透射方向) ( ).



6. 某同学用插针法做测定玻璃折射率实验时，他的方法和操作步骤都正确无误，但处理实验记录时发现玻璃砖的两个光学面  $aa'$  和  $bb'$  不平行，如图 4-2 所示，则 ( )。

- A.  $P_1P_2$  与  $P_3P_4$  两条直线平行
- B.  $P_1P_2$  与  $P_3P_4$  两条直线不平行
- C. 他测出的折射率偏大
- D. 他测出的折射率不受影响

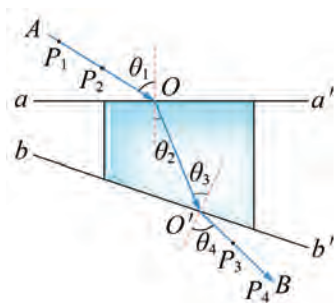


图 4-2

7. 某同学做测定玻璃折射率实验时，用他测得的多组入射角  $\theta_1$  与折射角  $\theta_2$  作出  $\sin \theta_1 - \sin \theta_2$  图像，如图 4-3 所示，则下列判断正确的是 ( )。

- A. 他做实验时，研究的是光从空气射入玻璃的折射现象
- B. 玻璃的折射率为 0.67
- C. 玻璃的折射率为 1.5
- D. 他做实验时，研究的是光从玻璃射入空气的折射现象

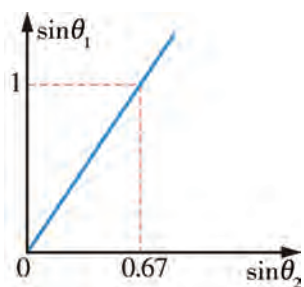


图 4-3

8. 奶粉的碳水化合物（糖）的含量是一个重要指标，可以用旋光法来测量糖溶液的浓度，从而鉴定含糖量。偏振光通过糖的水溶液后，偏振方向会相对于传播方向向左或向右旋转一个角度  $\alpha$ ，这一角度  $\alpha$  被称为“旋光度”， $\alpha$  的值只与糖溶液的浓度有关，将  $\alpha$  的测量值与标准值相比较，就能确定被测样品的含糖量。如图 4-4 所示， $S$  是自然光源， $A$ ， $B$  是偏振片，转动  $B$ ，使到达  $O$  处的光最强，然后将被测样品  $P$  置于  $A$ ， $B$  之间，则下列说法正确的是 ( )。

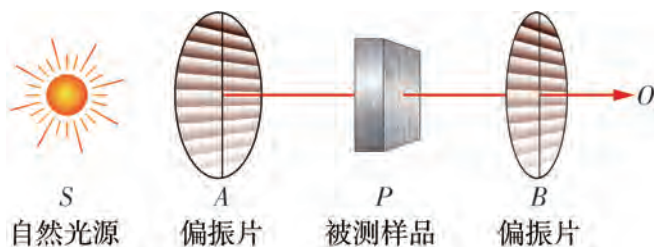


图 4-4

- A. 到达  $O$  处的光强度会明显减弱  
 B. 到达  $O$  处的光强度不会明显减弱  
 C. 将偏振片  $B$  转动一个角度, 使得  $O$  处光强度最大, 偏振片  $B$  转过的角度等于  $\alpha$   
 D. 将偏振片  $A$  转动一个角度, 使得  $O$  处光强度最大, 偏振片  $A$  转过的角度等于  $\alpha$
9. 下列说法正确的是 ( ).

- A. 如果地球表面没有大气层, 太阳照亮地球的范围要比有大气层时略大些  
 B. 激光是一种人工产生的相干光, 因此可对它进行调制, 用来传递信息  
 C. 从本质上说激光是横波  
 D. 激光测距雷达能根据多普勒效应测出目标的运动速度, 从而对目标进行跟踪

10. 图 4-5 所示是一条光线从  $A$  媒质射入  $B$  媒质并到达  $B$  媒质与  $C$  媒质界面时发生的现象, 由此可判定  $A, B, C$  三种媒质的折射率  $n_A, n_B, n_C$  间的关系是\_\_\_\_\_.

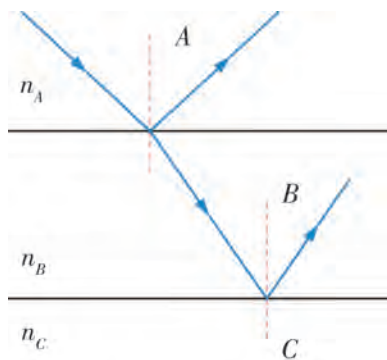


图 4-5



图 4-6

11. 假设地球表面不存在大气层, 那么人们观察到日出的时刻与实际存在大气层的情况相比将会如何变化?

12. 如图 4-6 所示, 在清澈的水中可以清清楚楚地看到水中的游鱼. 如果用鱼叉对准看到的鱼, 却总是叉不到鱼. 有经验的渔民都知道, 叉鱼时只有瞄准鱼的下方才能叉到, 试说明其中的道理. 如果不用鱼叉而改用激光束捕鱼, 应该把激光束瞄准哪里, 为什么?

13. 如图 4-7 所示, 把用相同玻璃制成的厚度为  $d$  的正方体  $A$  和半径亦为  $d$  的半球体  $B$ , 分别放在报纸上, 且让半球体的凸面向上. 从正上方分别观察  $A, B$  中心处报纸上的字, 有何不同?



图 4-7

14. 一束白光通过双缝后, 可以在屏上观察到干涉条纹, 除中央的白色条纹外, 两侧还有彩色条纹. 为什么中央的是白色条纹? 离中央白色条纹最近的是什么颜色的干涉条纹?

15. 在杨氏干涉实验中, 若单色光的波长  $\lambda = 5.89 \times 10^{-7} \text{ m}$ , 双缝间的距离  $d = 1 \text{ mm}$ , 双缝到屏的距离  $l = 2 \text{ m}$ . 求第 1 条亮条纹到第 11 条亮条纹的中心间距.

16. 如图 4-8 所示为一个半径为  $R$  的半圆形玻璃砖, 其中  $AB$  为半圆的直径,  $O$  为圆心, 玻璃的折射率为  $n = \sqrt{2}$ .

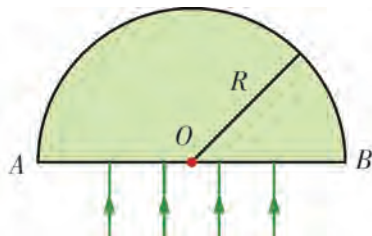


图 4-8

(1) 一束平行光垂直射向玻璃砖的下表面, 若光线到达上表面后, 都能从该表面射出, 则入射光束在  $AB$  上的最大宽度为多少?

(2) 一束细光线在点  $O$  左侧, 距离点  $O$   $\frac{\sqrt{3}}{2}R$  处垂直于  $AB$  从下方入射, 求此光线从玻璃砖射出点的位置.

17. 如图 4-9 所示, 一名学生用广口瓶和刻度尺测定水的折射率, 请填写下述实验步骤中的空白.

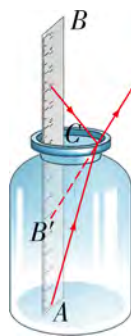


图 4-9

(1) 用\_\_\_\_\_测出广口瓶瓶口内径  $d$ .

(2) 在瓶内装满水.

(3) 将刻度尺沿瓶口边缘\_\_\_\_\_插入水中.

(4) 沿广口瓶边缘向水中刻度尺正面看去, 若恰能看到刻度尺的零刻度 (即图中点  $A$ ), 同时看到水面上点  $B$  刻度的像  $B'$  恰与点  $A$  的像重合.

(5) 若水面恰与直尺的点  $C$  相平, 读出\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_的长度.

(6) 由题中所给条件, 可以计算水的折射率为  $n =$ \_\_\_\_\_.

18. 利用薄膜干涉的原理可以用干涉法检查平面和制造增透膜, 回答下列问题.

(1) 用如图 4-10 所示的装置检查平面时, 是利用了哪两个表面反射光形成的薄膜干涉图样?

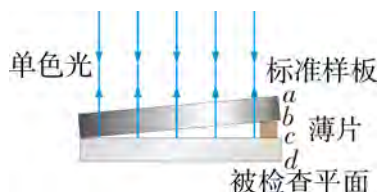


图 4-10



(2) 为了减少光在透镜表面由于反射带来的损失, 可在透镜表面涂上一层增透膜, 一般用折射率为 1.38 的氟化镁, 为了使波长为  $5.52 \times 10^{-7} \text{ m}$  的绿光在垂直表面入射时使反射光干涉相消, 求所涂的这种增透膜的厚度.

19. 如图 4-11 所示, 巡查员站立于一空的贮液池边, 检查池角出液口的安全情况. 已知池宽为  $L$ , 照明灯到池底的距离为  $H$ , 若保持照明光束方向不变, 向贮液池中注入某种液体, 当液面高为  $\frac{H}{2}$  时, 池底的光斑在距离出液口  $\frac{L}{4}$  处.

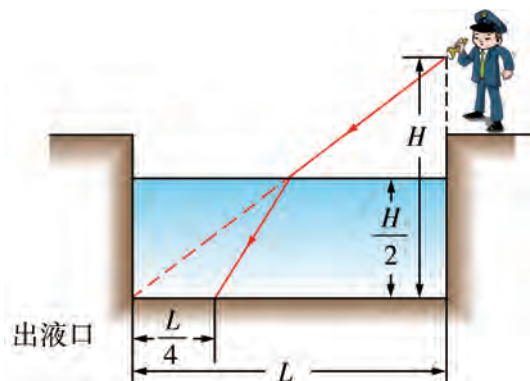
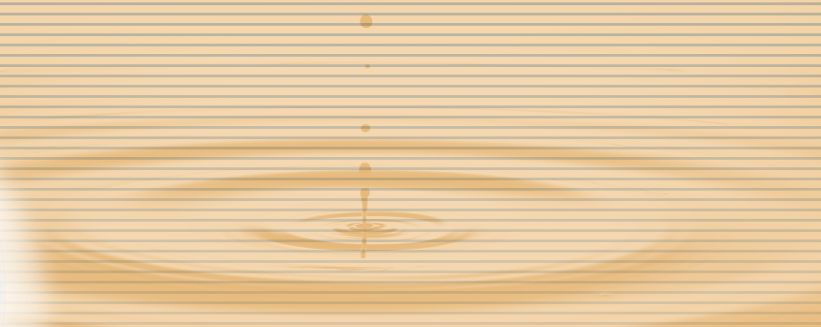
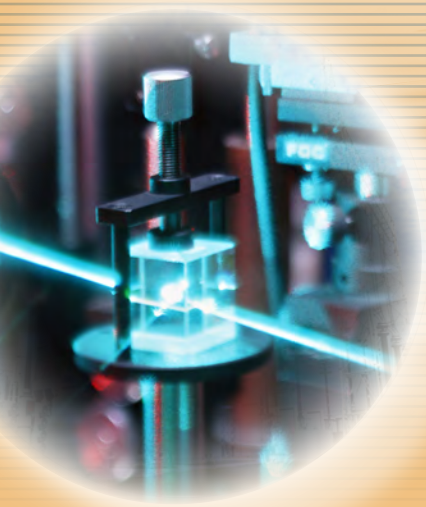


图 4-11

(1) 当液面高为  $\frac{2}{3}H$  时, 求池底的光斑到出液口的距离  $x$ .

(2) 控制出液口缓慢地排出液体, 使液面以  $v_h$  的速率匀速下降, 试求池底的光斑移动的速率  $v_x$ .



绿色印刷产品

批准文号：粤发改价格 [2017] 434号 举报电话：12315



定价：10.05元