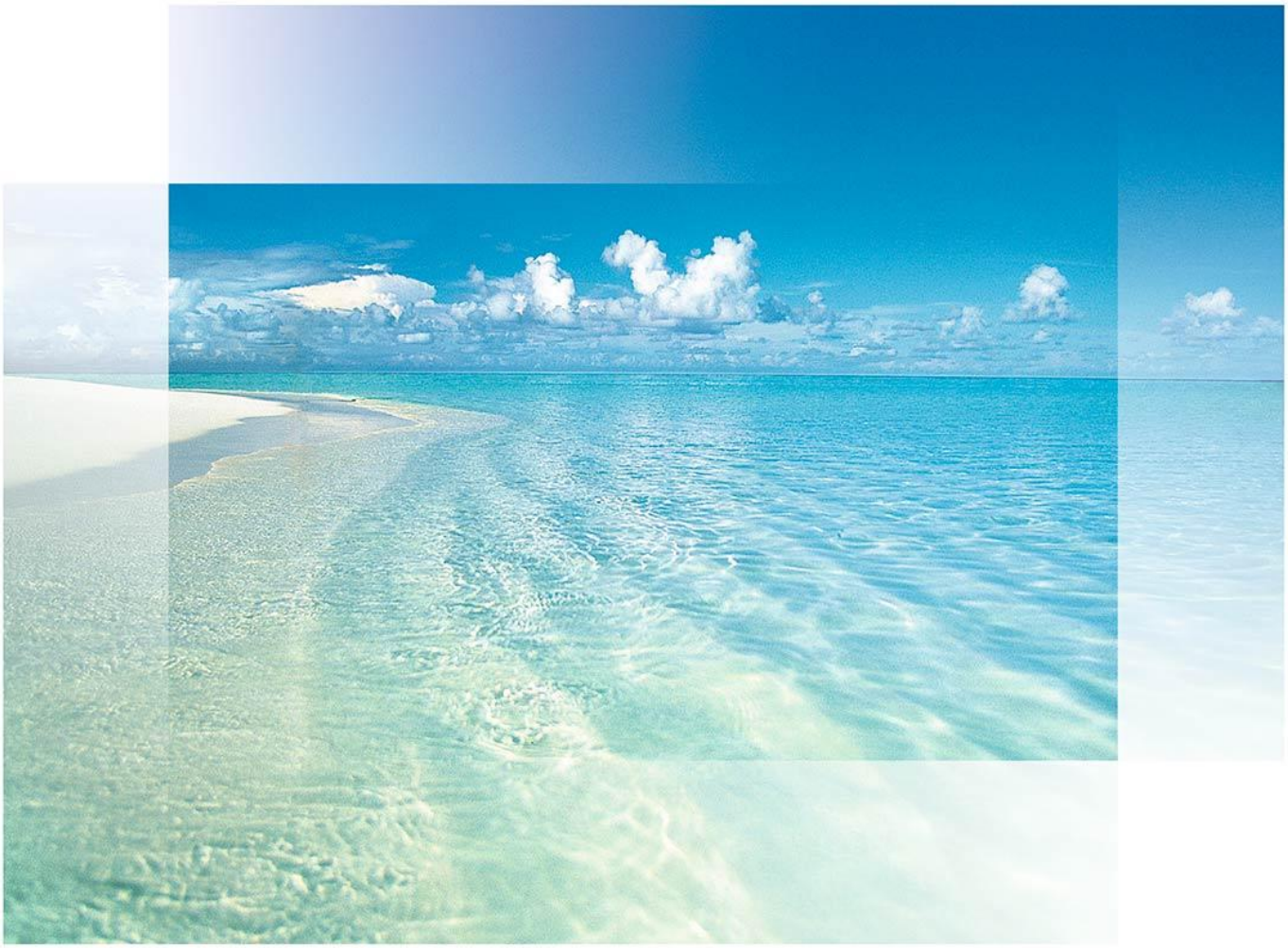
国家教材委员会专家委员会审核通过
2019

普通高中教科书

物理

选择性必修

第一册



教育科学出版社
ESPH

普 通 高 中 教 科 书

物理

选择性必修

第一册



教育科学出版社

·北 京·

主　　编　陈熙谋　吴祖仁
本册主编　周昌鲜
本册编者　（按姓氏笔画排序）
　　卢　山　李勇强　陈泽勇　罗清红
　　俞献林　彭世坤

目录

第一章　动量与动量守恒定律



1. 动　量 …… 2
2. 动量定理 …… 7
3. 动量守恒定律 …… 12
4. 实验：验证动量守恒定律 …… 18
5. 碰　撞 …… 22
6. 反　冲 …… 28

反思·小结·交流 …… 33
本章复习题 …… 34

第二章　机械振动



1. 简谐运动及其图像 …… 38
2. 简谐运动的回复力及能量 …… 44
3. 单　摆 …… 48
4. 实验：用单摆测量重力加速度 …… 52
5. 阻尼振动　受迫振动 …… 54

反思·小结·交流 …… 60
本章复习题 …… 61

第三章　机械波



1. 机械波的形成和传播 …… 64
2. 波速与波长、频率的关系 …… 68
3. 波的图像 …… 72
4. 波的反射与折射 …… 76
5. 波的干涉与衍射 …… 81
6. 多普勒效应 …… 86

反思·小结·交流 …… 89
本章复习题 …… 90

第四章　光及其应用



1. 光的折射定律 …… 92
2. 实验：测定玻璃的折射率 …… 98
3. 光的全反射 …… 101
4. 光的干涉 …… 108
5. 实验：用双缝干涉测量光的波长 … 112
6. 光的衍射与偏振 …… 116
7. 激　光 …… 121

反思·小结·交流 …… 126
本章复习题 …… 126

附录　中英文索引 …… 129
后记 …… 130



是故有往来而无死生。往者屈也，来者伸也。则有屈伸而无增减，屈者固有其屈以求伸，岂消灭而必无之谓哉。

——王夫之《周易外传》

第一章

动量与动量守恒定律

主题一　动量与动量定理

- 动量
- 动量定理

主题二　动量守恒定律及其应用

- 动量守恒定律
- 实验：验证动量守恒定律
- 碰撞
- 反冲

碰撞是物质世界常见的一种相互作用的过程。子弹击中飞靶给人愉悦，汽车发生追尾可能会给人们带来灾难，α粒子散射使人类认识了原子内部结构……。在这些碰撞现象的背后蕴藏着什么规律呢？这就是本章我们要学习的内容。

1 动 量



▲ 图1-1-1 天体的运动

观察身边许多运动的物体，你会发现它们终究要停下来，如飘落的树叶、踢出的足球、运转的机器等等。整个宇宙会不会也像它们那样，总有一天会停下来？千百年来，人们从对天体运动（图 1-1-1）的观测中并没有发现宇宙运动有减弱的迹象。16、17 世纪，许多哲学家都认为，只要我们能够找到一个合适的物理量来量度，宇宙中运动的总量是不会变化的。这个物理量到底是什么？

物理学家在对碰撞的研究中找到了它。

常见的碰撞现象

碰撞是自然界中常见的现象。从图 1-1-2 中可以看出：做相对运动的两个（或几个）物体相遇并发生相互作用，



（a）棒击球的一刹那



（b）子弹击穿苹果



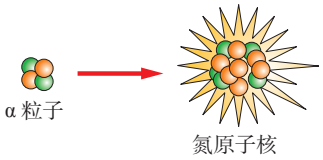
（c）高铁挂接

▲ 图1-1-2 常见的碰撞现象

在很短的时间内，它们的运动状态会发生显著变化，这一过程叫作**碰撞**（collision）。大到宇宙天体（图 1-1-3），小到微观粒子（图 1-1-4），都时常发生碰撞。这些碰撞现象的背后蕴藏着什么样的规律呢？



▲ **图1-1-3**　小行星撞击地球留下的巨坑

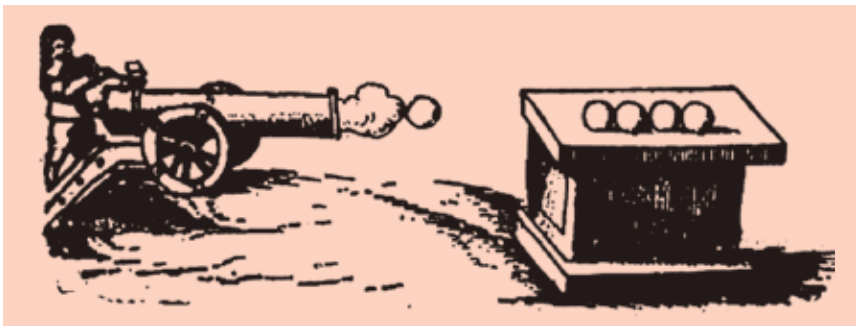


▲ **图1-1-4**　α 粒子轰击氮原子核

历史上对碰撞现象的研究

17 世纪，物理学家对碰撞的研究取得了丰硕的成果，在此基础上提出了运动量守恒的基本思想。

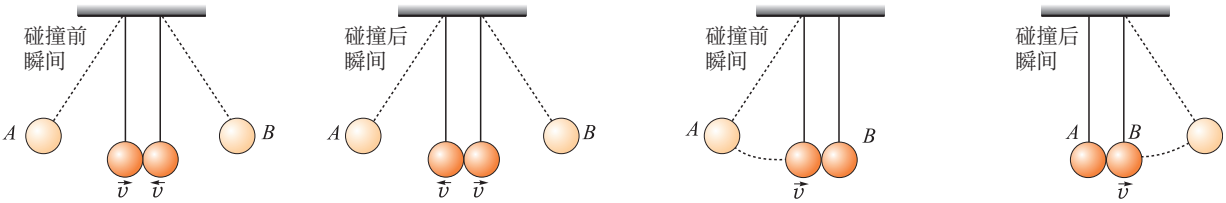
最早发表有关碰撞研究成果的是布拉格大学校长、物理学教授马尔西（M. Marci，1595—1667）。他在 1639 年发表的著作《运动的比例》中介绍了这样一个实验（图 1-1-5）：一颗大理石球撞击一排大小相等且用相同材料做成的石球时，运动将传递到最后一个球，其余各球毫无影响。该实验其实已经蕴含了运动量守恒的思想。



▲ **图1-1-5**　马尔西的碰撞实验

英国皇家学会曾为碰撞的研究征赏论文，荷兰物理学家惠更斯是三位获奖者之一，他用弹性摆球做过如图 1-1-6（a）所示的碰撞实验。实验发现，两个质量相同的弹性球 A、B，以大小相等、方向相反的速度 v 相碰后，各自以同样大小的速度 v 反弹回去。

如果球 A 以速度 v 去碰静止的球 B［图 1-1-6（b）］，球 A 会静止下来，球 B 获得与球 A 碰前相同的速度。



（a）惠更斯碰撞实验一　　（b）惠更斯碰撞实验二

▲ 图1-1-6

惠更斯进一步指出：

每个物体所具有的“运动量”在碰撞时可以增多或减少，但是它们的量值在同一个方向的总和保持不变。

在这里，惠更斯所说的“运动量”是指物体的质量 m 和速度 v 的乘积。

由于碰撞前后瞬间物体速度在同一直线上，我们选定 A 球初速度方向为正方向，用 m_A、m_B 表示 A、B 两球的质量，用 v_A、v_B 表示碰撞前瞬间 A、B 两球的速度，v_A'、v_B' 表示碰撞后瞬间 A、B 两球的速度。

在实验一中，碰撞前运动量 $m_Av_A+m_Bv_B = mv-mv = 0$，碰撞后的运动量 $m_Av_A' + m_Bv_B' = -mv+mv = 0$，即两个小球所具有的运动量在水平方向的总和保持不变。

在实验二中，碰撞前运动量 $m_Av_A+m_Bv_B = mv + 0 = mv$，碰撞后的运动量 $m_Av_A' + m_Bv_B' = 0 + mv = mv$，两个小球所具有的运动量在水平方向的总和仍保持不变。

探究碰撞过程的守恒量

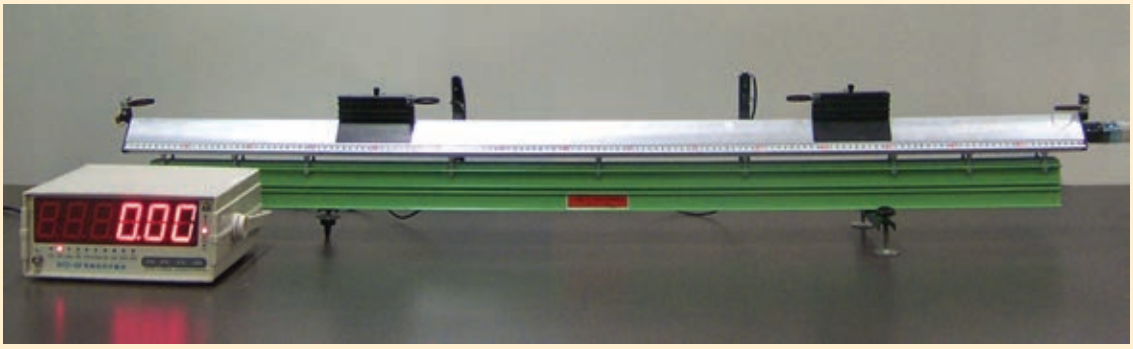
讨论交流

1. 惠更斯用两个相同的弹性球所做的实验，其结论具有普遍意义吗？
2. 请你设计实验进一步探究碰撞前后物体运动量变化遵循的规律。

实验探究 | 探究碰撞前后运动量的变化

实验装置

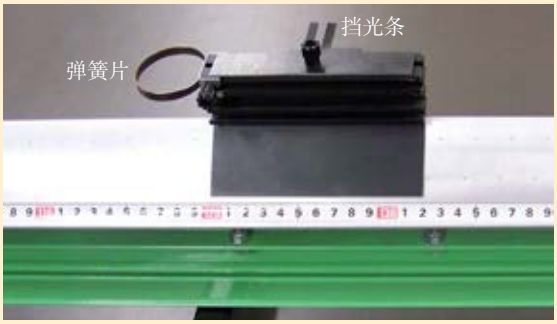
气垫导轨（图 1-1-7）、数字计时器（图 1-1-8）。导轨上附有滑块和光电门，滑块上装有挡光条和弹簧片（图 1-1-9）。



▲ 图1-1-7　气垫导轨



▲ 图1-1-8　数字计时器



▲ 图1-1-9　带有挡光条和弹簧片的滑块

探究过程

1. 先用天平分别测出带弹簧片的滑块 1、滑块 2 的质量 m_1、m_2，然后用手推动滑块 1，使其获得初速度 v_1，与静止的滑块 2 相碰（相碰时，两弹簧片要正对）。测定碰撞前后两滑块的速度大小，算出相关数据，填入表 1-1-1 中。

2. 再换用不带弹簧片的两滑块按照上面的步骤进行实验，并读取实验数据，填入表 1-1-1 中。

3. 将两滑块上的弹簧片换成橡皮泥，用天平分别测出滑块 1、滑块 2 的质量。使有橡皮泥的两端正对，让滑块 1 与滑块 2 相碰，测算出相关数据，并填入表 1-1-1 中。

表1-1-1　碰撞前后运动量的计算

次数	滑块质量		碰前					碰后					运动量的改变量
			速度		运动量		运动量之和	速度		运动量		运动量之和	
	m_1	m_2	v_1	v_2	m_1v_1	m_2v_2	$m_1v_1+m_2v_2$	v_1'	v_2'	m_1v_1'	m_2v_2'	$m_1v_1'+m_2v_2'$	$(m_1v_1'+m_2v_2')-(m_1v_1+m_2v_2)$
1													
2													
3													

注：表格中质量的单位用kg，速度的单位用m/s，“运动量”的单位用kg·m/s。

通过对实验结果的分析，你能得到什么结果？

法国生物学家莫诺说："在具有无限差别的一个个现象中，科学只能去寻找其中不变的东西。"

大量实验表明，两个物体相互碰撞时，碰前运动量的总和（$m_Av_A+m_Bv_B$）与碰后运动量的总和（$m_Av_A'+m_Bv_B'$）总是相等的，即质量m与速度v乘积的矢量和在碰撞过程中保持不变，或者说守恒。由此可见，质量m与速度v的乘积（即运动的量）具有重要的意义，物理学中称为**动量**（momentum）。动量常用符号p表示，即

$$p = mv$$

除了速度、动量外，我们还学习过哪些状态量？

速度是矢量，动量也是矢量，动量的方向与速度的方向相同。在国际单位制中，动量的单位是千克米每秒，符号是kg · m/s。由于速度反映物体的运动状态，所以动量是状态量。

自我评价

1. 查阅资料，简述动量概念的建立过程。
2. 关于动量的概念，以下说法中正确的是（　　）
   A. 速度大的物体动量大
   B. 质量大的物体动量大
   C. 两个物体的速度相等，那么质量大的物体动量一定大
   D. 两个物体的质量相等，速度大小也相等，则它们的动量一定相同
3. 你在"探究碰撞前后运动量的变化"的实验中，遇到了哪些问题？是如何解决的？你对此实验有什么好的建议？
4. 动量与动能有什么联系？又有什么区别？

发展空间

课外阅览

动量概念的建立

最先提出动量概念的是法国科学家笛卡尔（R.Descartes，1596—1650）。他继承了伽利略的说法，把物体的大小（质量）与速率的乘积叫作动量，并认为它是量度运动的唯一正确的物理量。不过笛卡尔忽略了动量的方向性，尽管如此，他的工作还是给后人的继续探索打下了很好的基础。

1668年，惠更斯发表了一篇题为《关于碰撞对物体运动的影响》的论文，总结了他对碰撞问题在实验和理论上的研究成果。结论是："每个物体所具有的'动量'在碰撞时可以增多或减少，但是它们的量值在同一个方向的总和却保持不变。"他在这里明确指出了动量的方向性和守恒性。

后来，牛顿把笛卡尔的定义略做修改，不用质量和速率的乘积，而用质量和速度的乘积，这样就得到量度运动的一个合适的物理量。牛顿把这个量叫作运动量，现在叫作动量。

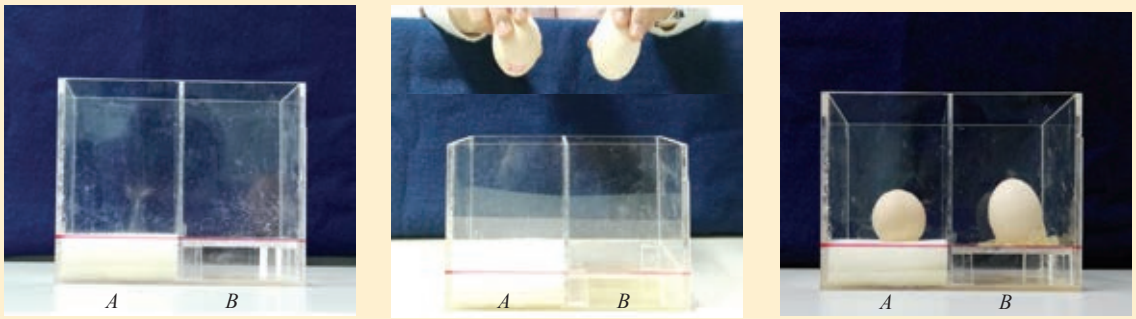
科学先驱们就是在追寻不变量的努力中，逐渐建立起动量的概念。

2 动量定理

在我们的现实世界中，物体的动量会发生变化。它变化的原因是什么？

活动

如图 1-2-1(a)所示，在水平桌面上放置两个有机玻璃容器 *A*、*B*，容器 *B* 为硬底，容器 *A* 底部平铺一层厚海绵，*B* 的底部与 *A* 中海绵上表面处在同一水平高度。将两枚形状、大小接近的生鸡蛋分别从 *A*、*B* 正上方同一高度释放［图 1-2-1（b）（c）］。鸡蛋落下后会发生什么现象？



（a）　（b）　（c）

▲ **图1-2-1**　鸡蛋落地

两个鸡蛋在接触底面前的动量相等吗？与底面的碰撞过程中的动量变化相等吗？碰撞过程中经历的时间相等吗？两个鸡蛋在与底面的碰撞过程中受到的力大小相等吗？

冲量　动量定理

具有一定动量的物体，在外力的作用下，动量会发生

变化，其动量的变化除了跟所受合力有关系以外，还跟什么因素有关呢？

理论探究

我们用牛顿运动定律进行分析。设一个质量为m的物体，初速度为v，初动量为$p = mv$，在合力F（恒力）的作用下，经过一段时间t后，速度变为v'，末动量为$p' = mv'$（图1-2-2）。

在这一过程中，物体的加速度$a=\frac{v'-v}{t}$，由牛顿第二定律可得

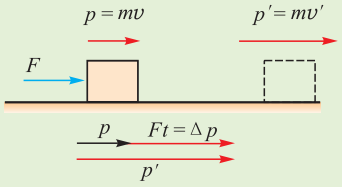
$$F = ma = \frac{mv' - mv}{t}$$

或

$$Ft = mv' - mv$$

即

$$Ft = p' - p$$



▲ 图1-2-2 物体动量的变化

上式说明，如果我们考察一个物体运动过程的始末，那么在这一过程中物体所受合力与作用时间的乘积等于物体动量的变化，这个结论叫作**动量定理**（theorem of momentum）。

物理学中把力与力的作用时间的乘积叫作力的**冲量**（impulse）。冲量的国际单位制单位是牛顿秒，符号是N·s。如果用I表示冲量，用Δp表示运动过程始末动量的改变量，那么动量定理也可以写为

$$I = \Delta p$$

动量定理的表达式是矢量式，运用它分析问题要遵循矢量运算法则。

讨论交流

在上述推导中，我们假定力是恒定的。实际上，物体所受的力通常不是恒定的。例如用铁锤钉钉子、用球棒击打垒球，钉子和垒球受的力就不是恒力。动量定理适用于这类变力作用吗？

如果物体受的力不是恒力，物体做非匀变速运动，可以把整个过程分为很多足够短暂的过程，每个短暂过程中物体受的力就可以视为恒力，物体的运动可视为匀变速运动。把应用于每个短暂过程的动量定理关系式相加，就得到了应用于整个过程的动量定理，可见 $I = p' - p$ 依然成立。需要注意的是此时式中的 $I = F_1\Delta t_1 + F_2\Delta t_2 + \cdots = \bar{F} \cdot t$，$\bar{F}$ 应该理解为变力的平均值。

动量定理的应用

讨论交流

1. 运动员在跳远时（图 1-2-3），为什么要在跳跃的前方设置沙坑，而不是使其直接落到坚硬的地面上？

如图 1-2-4 所示，类似的减小作用力的例子还有很多，它们的共同点是什么？



▲ 图1-2-3　运动员跳远，落入沙坑



（a）苹果防震网套



（b）防护头盔



（c）鸡蛋防震包装



（d）轮胎防撞保护

▲ 图1-2-4

2. 如图 1-2-5 所示，用铁锤钉钉子时，铁锤是如何在极短时间内产生较大的力将钉子钉进去的呢？你还能举出一些生活中类似的例子吗？这些例子的共性是什么？



▲ 图1-2-5　铁锤钉钉子

从上面的例子我们得到这样的启示：在物体的动量变化一定的条件下，作用时间较短则受到的作用力较大；作用时间较长则受到的作用力较小。

例题示范

问题 质量是60 kg的蹦极运动跳跃者，从高台上跳下，下落一段时间后，由于弹性安全绳的保护作用而减速，最后悬挂在空中。已知弹性安全绳从刚伸直到第一次拉伸至最长的缓冲时间为1.2 s，安全绳原长5 m，求跳跃者在下落过程中所受的平均弹力。（g 取10 m/s^2）

分析 跳跃者先自由下落，根据自由落体运动规律可求出下落5 m安全绳刚伸直时跳跃者的速度。安全绳刚伸直到伸至最长的过程中，跳跃者受到重力和安全绳的弹力作用，动量变为零，根据动量定理可求弹力的平均值。

解 跳跃者下落之初做自由落体运动，下落到安全绳刚伸直时的速度为v_1，有

$$v_1^2 - v_0^2 = 2gh$$

$$v_1 = \sqrt{2gh} = 10 \text{ m/s}$$

以跳跃者为研究对象，在安全绳从原长伸长到最长的过程中，其受到重力mg和安全绳弹力$\bar{F}$，取$\bar{F}$方向即竖直向上为正方向，由动量定理得

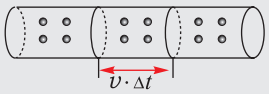
$$\bar{F}t - mgt = mv_t - (-mv_1)$$

由于末速度$v_t = 0$，所以

$$\bar{F} = mg + \frac{mv_1}{t} = 1100 \text{ N}$$

跳跃者受到的弹力平均值大小为1100 N，方向竖直向上。

拓展 某种气体分子束由质量$m = 5.4 \times 10^{-26}$ kg、速度$v = 460$ m/s的分子组成，设各分子都向同一方向运动，垂直地打在某平面上后又以原速率反向弹回。如果分子束中每立方米的体积内有$n_0 = 1.5 \times 10^{20}$个分子。那么，分子束撞击的平面所受到的压强是多大？



▲ 图1-2-6

设在Δt时间内打到横截面积为S的平面上的气体的质量为ΔM（图1-2-6），则

$$\Delta M = v\Delta tS \cdot n_0 m$$

取ΔM为研究对象，它受到的合外力等于平面作用到气体上的压力F，以v方向为正方向，由动量定理得

$$-F \cdot \Delta t = -\Delta Mv - \Delta Mv$$

解得

$$F = 2v^2 n_0 Sm$$

根据牛顿第三定律可知，平面受到的压强p为

$$p = \frac{F}{S} = 2v^2 n_0 m \approx 3.428 \text{ Pa}$$

处理有关流体（如水、空气、高压燃气等）撞击物体表面产生冲力（或压强）的问题，常用动量定理。解决这类问题的关键是选好研究对象，一般情况下选在极短时间Δt内打到物体表面上的流体为研究对象。

自我评价

1. 比较动量定理与动能定理，体会它们的区别和联系。

2. 一个质量为 5 kg 的小球以 5 m/s 的速度竖直落到地板上，随后以 3 m/s 的速度反向弹回，若取竖直向下的方向为正方向，则小球动量的变化量是多少？

3. 一位质量为 m 的运动员从下蹲状态向上起跳，经 Δt 时间，身体伸直并刚好离开地面，离开地面时速度为 v，在此过程中地面对他的作用力的冲量为多少？地面对他的作用力做的功为多少？

4. 生活中，有时需要增大作用力，有时需要减小作用力，分别是怎样实现的？请结合实例用动量定理加以分析。

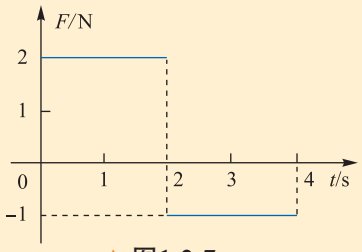
5. 一质量为 2 kg 的物块在合外力 F 的作用下从静止开始沿直线运动。F 随时间 t 变化的图线如图 1-2-7 所示，则（　　）

A. $t=1$ s 时物块的速率为 1 m/s

B. $t=2$ s 时物块的动量大小为 4 kg·m/s

C. $t=3$ s 时物块的动量大小为 5 kg·m/s

D. $t=4$ s 时物块的速度为零



▲ 图1-2-7

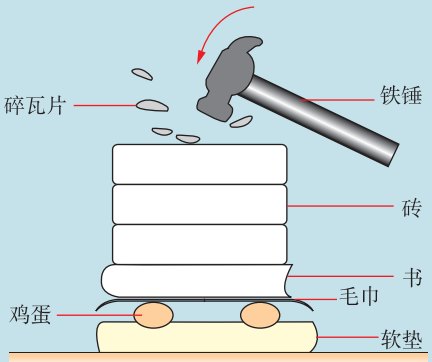
发展空间

实验室

“瓦碎蛋全”

在地面上放一块软垫，其上放四个鸡蛋，再用一条毛巾盖在鸡蛋上，然后在毛巾上放一本较厚的书，书上叠放砖块，最上面放一块瓦片，如图 1-2-8 所示。如果用一个铁锤对准瓦片用力一击，你可以看到，瓦片被砸得粉碎，而下面的鸡蛋却完好无损。

试着做一做这个实验，你能解释其中的现象吗？



▲ 图1-2-8

走向社会

请上网或去图书馆查阅相关资料，了解安全带与安全气囊的相关知识。

3 动量守恒定律

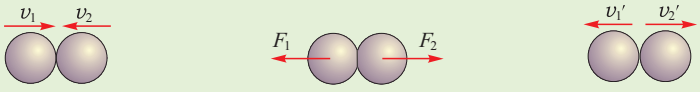
面对面站在滑冰场上的两位同学，相互推一下，两人向相反的方向运动，动量均发生了变化。他们动量的变化遵循什么规律呢？

动量守恒定律

在物理学中，有时要把相互作用的两个或多个物体作为一个整体来研究，这个整体叫作系统，如图 1-1-7 中的两个滑块就可以看成一个系统。根据第 1 节表 1-1-1 中的实验数据，我们可以看出，在我们讨论的几种碰撞中，碰撞前后系统的动量是不变的。在更普遍的情况中，相互作用的系统的总动量满足什么条件才能保持不变呢？

理论探究

如图 1-3-1 所示是两个质量均为 m 的小球以相同的速率相向运动并发生碰撞的三个瞬间，其中（a）为刚接触的瞬间，二者的速度分别是 v_1 和 v_2（$v_1 = -v_2$）；（b）为二者形变最大的瞬间，它们的相互作用力 F_1 和 F_2 达到最大（$F_1 = -F_2$）；（c）为二者脱离接触的瞬间，二者的速度分别为 v_1' 和 v_2'（$-v_1' = v_2'$）。



（a）刚接触的瞬间　（b）形变最大的瞬间　（c）脱离接触的瞬间

▲ **图1-3-1**　碰撞过程

从（a）到（b）的过程，两球间的相互作用力从零逐渐增大至 F_1 和 F_2，而速度则从 v_1 和 v_2 逐渐减小至零；从（b）到（c）的过程则相反，相互作用力从 F_1 和 F_2 逐渐减小到零，而速度则从零逐渐增大至 v_1' 和 v_2'。

我们把这个本已短暂的过程再分成很多小段，每段的时间为 Δt，只要 Δt 足够短，这段时间内的相互作用力就可以看作恒力，并且根据牛顿第三定律，这对相互作用力大小相等、方向相反，可以说，在这个相互作用过程的每时每刻相互作用力都满足 $F_{2对1} = -F_{1对2}$。因此，在整个碰撞过程中的平均力满足 $\bar{F}_{2对1} = -\bar{F}_{1对2}$。

分别对两物体应用动量定理，得

$$\bar{F}_{2\text{对}1}\cdot t=p_1'-p_1$$

$$\bar{F}_{1\text{对}2}\cdot t=p_2'-p_2$$

则

$$p_1'-p_1=-(p_2'-p_2)$$

式中 p_1 和 p_2 分别是两个物体碰撞前的动量，p_1' 和 p_2' 分别是两个物体碰撞后的动量。将上式变形，得

$$p_1+p_2=p_1'+p_2'$$

它表示相互碰撞的两个物体组成的系统，总动量保持不变。

可见，两个物体的总动量在相互作用前后保持不变，即系统的总动量在碰撞前后是守恒的。

讨论交流

物体系统碰撞前后系统动量守恒，有没有什么前提条件呢？

为了寻找碰撞前后系统动量守恒的条件，我们来分析一下上述系统的受力情况：两个滑块在碰撞过程中，除了两滑块之间的相互作用力（系统的内力）外，还受到来自系统外部的作用力（系统的外力）。而在碰撞过程中，每个滑块受到的外力只有重力和导轨提供的支持力，它们彼此平衡，因此两滑块组成的系统所受的合外力为零。

理论研究和已知的客观事实都证明：系统所受的合外力为零，是系统相互作用过程中动量守恒的条件。

如果一个系统不受外力或所受合外力为零，无论这一系统的内部发生了何种形式的相互作用，这个系统的总动量保持不变，这就是**动量守恒定律**（law of conservation of momentum）。

对于在一条直线上运动的两个物体组成的系统，动量守恒定律的一般表达式为

$$m_1v_1+m_2v_2=m_1v_1'+m_2v_2'$$

式中的 m_1、m_2 分别为两个物体的质量，v_1、v_2 分

我们前面说寻找“碰撞前后系统动量守恒的条件”，只是为了叙述的方便，可把它改为“碰撞过程中任一时刻动量不变的条件”，这个条件仍然是：系统所受的合外力为零。

碰撞只是相互作用的一种形式，更普遍地说，物体间相互作用的过程中，如果所受合外力为零，系统动量守恒。

别为它们在相互作用前的速度，v_1'、v_2'分别为它们相互作用过程中任一时刻的速度。等式左边是两物体相互作用前的动量，等式右边是它们相互作用过程中任一时刻的动量。

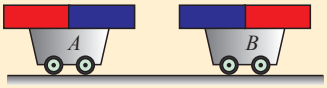
动量守恒定律的普适性

讨论交流

1. 既然许多问题可以通过牛顿运动定律解决，为什么还要研究动量守恒定律？

2. 讨论在以下情况中系统的动量是否守恒，为什么？

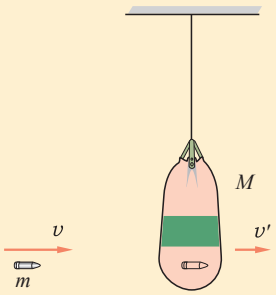
（1）如图 1-3-2 所示，两块磁铁固定在两辆小车上，构成一个系统。两小车分别在光滑的水平桌面上和粗糙的水平桌面上相对运动。



▲ 图1-3-2

（2）如图 1-3-3 所示，子弹与沙袋构成一个系统，研究子弹打入沙袋的短暂过程和沙袋此后摆动的过程。

（3）如图 1-3-4 所示，研究防空炮发射导弹的短暂过程。



▲ 图1-3-3


▲ 图1-3-4

本章章首图是台球发生碰撞的情景，无论是正碰还是斜碰，无论两个球还是多个球发生碰撞，由于合外力可以忽略不计，因此都遵守动量守恒定律。

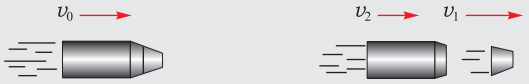
随着物理学的发展，人们认识到动量守恒定律具有普适性，它比牛顿运动定律适用的范围要广得多。无论在微观、宏观还是高速领域，无论是何种形式的相互作用，只要系统所受的合外力为零，动量守恒定律都是适用的。动量守恒定律是自然界中最普遍、最基本的规律之一。如果系统内相互作用的物体不只是两个，而是三个或者多个，只要系统不受外力或所受的合外力为零，系统的动量也是守恒的。

动量守恒定律的应用

例题示范

问题　一枚火箭搭载着卫星以速率v_0进入太空预定位置，由控制系统使箭体与卫星分离。已知前部分的卫星质量为m_1，后部分的箭体质量为m_2，分离后箭体以速率v_2沿火箭原方向飞行，若忽略空气阻力及分离前后系统质量的变化，则分离后卫星的速率v_1为多少？

分析　画出如图1-3-5所示的示意图，题目说明“忽略空气阻力及分离前后系统质量的变化”，就是忽略喷出气体的质量，从而以m_1和m_2组成的系统满足动量守恒的条件。



▲ 图1-3-5

解　火箭和卫星组成的系统，在分离前后沿原运动方向上动量守恒。

由动量守恒定律有

$$(m_1+m_2)\ v_0=m_1v_1+m_2v_2$$

解得

$$v_1=v_0+\frac{m_2\ (v_0-v_2)}{m_1}$$

拓展　不受外力、只有内部相互作用力的系统实际上是不存在的，例如空气阻力、接触面的摩擦力等都普遍存在。但对于碰撞等相互作用时间很短、相互作用力很大的系统，由于内力远大于外力，常常可以忽略外力的影响，认为系统的动量守恒。

另外，还有一种情况也很常见，那就是系统的外力不能忽略，系统的动量不守恒，但在某一方向上不受外力（或外力可以忽略），则系统的动量沿这一方向的分量守恒。

自我评价

1. 图 1-3-6 的相互作用过程中，可以认为系统动量守恒的是（　　）



A. 轮滑女孩从后面推轮滑男孩



B. 子弹击穿饮料瓶的短暂过程



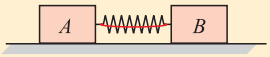
C. 宇航员在舱外将一件小设备抛离自己



D. 汽车发生轻微碰撞

▲ 图1-3-6

2. 如图 1-3-7 所示，两滑块 A、B 之间有一轻弹簧，滑块与弹簧不连接，用一细绳将两滑块拴接，使弹簧处于压缩状态，并将整个装置放在光滑的水平面上。从烧断细绳后到两滑块与弹簧分离的过程中，下列说法正确的是（　　）



▲ 图1-3-7

A. 两滑块的动量之和变大

B. 两滑块与弹簧分离后动量等大反向

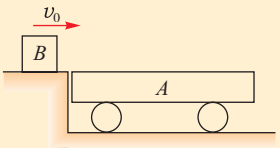
C. 如果两滑块的质量相等，则分离后两滑块的速率也相等

D. 整个过程中两滑块的机械能增大

E. 滑块和弹簧组成的系统的机械能增大

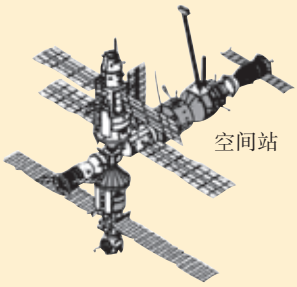
3. 某人站在平板车上，与车一起在光滑水平面上做匀速直线运动，当人相对于车竖直向上跳起时，车的速度大小将怎样变化？

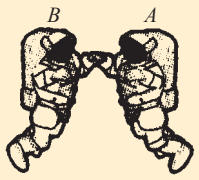
4. 如图 1-3-8 所示，质量为 M 的小车 A 停在光滑的水平面上，小车上表面粗糙。质量为 m 的滑块 B 以初速度 v_0 滑到小车 A 上，车足够长，滑块不会从车上滑落，则小车的最终速度为多大？



▲ 图1-3-8

5. 如图 1-3-9 所示，进行太空行走的宇航员 A 和 B 的质量分别为 80 kg 和 100 kg，他们携手远离空间站，相对空间站的速度为 0.1 m/s。A 将 B 向空间站方向轻推后，A 的速度变为 0.2 m/s，求此时 B 的速度大小和方向。





▲ 图1-3-9

发展空间

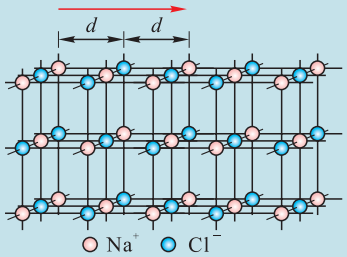
课外阅览

守恒定律与对称性

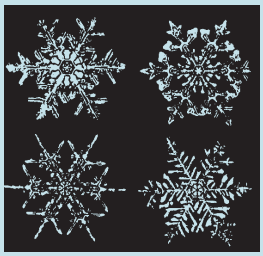
对称的概念源于生活，在日常生活中通常是指某物体或某图形上存在着 A 与 A' 两个部分，这两个部分在大小、形状、排列、距离等方面都互相对应。例如人体的四肢、耳朵、眼睛等，左右两部分十分相似，这种情况就叫作左右对称。事物具有对称性，就会表现出均衡、有序、和谐，给人以美的感受。

大自然在造就万物时，处处都呈现了对称美。建筑师、艺术家们在创作中也常常追求对称美。科学家们也在寻找自然规律中的对称美。

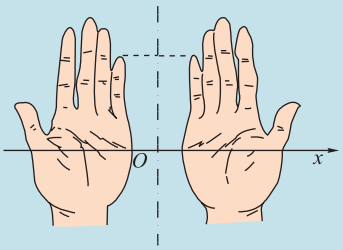
在科学范畴，什么是对称呢？一个事物 A，如果通过某种操作（平移、转动或其他变换）发生变化后成为事物 A'，且 A' 能完全复原为 A，则事物 A 具有某种对称性，A 与 A' 是对称的。这种操作也叫作对称操作。因为 A 与 A' 完全相同，所以对称性也叫作不变性，或不可区分性。图 1-3-10 就显示了几种具体的对称操作。



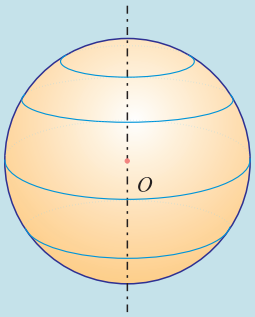
（a）平移对称操作：NaCl晶体沿箭头方向平移2d后跟原来一模一样



（b）转动对称操作：六角形雪花绕垂直于纸面的中心轴转过60° 后就恢复原状



（c）轴对称操作：平摊左手和右手，右手绕过中心的轴旋转180°，两手重合在一起



（d）转动对称操作：一个球绕通过球心的轴转过任意角度都可以与原球重合

▲ 图1-3-10

物理定律是从实验中得到的。我们都知道这样一个事实：在空间某处做一个实验，然后将这套实验仪器移到另一处，以同样的方式进行同样的实验，我们会获得相同的结论；同样，实验的结论也应当与实验开始的时刻无关，今天做这个实验，明天再做这个实验，应当获得完全相同的结论。物理定律在空间和时间上经上述操作之后的不变性，正是反映了物理定律的空间、时间对称性。

关于物理定律的对称性有一条很重要的定律：对应于每一种连续对称性，都存在一条守恒定律。这是由德国女数学家诺特（Emmy Noether，1882—1935）首先提出来的。对于空间的对称性，即物理定律在空间平移中的不变性，可以导出动量守恒定律。例如在光滑平整的冰面上运动的冰球，不计各种阻力，动量是不变的，一旦出现了动量的变化，则一定是由于冰面凹凸不平，使冰球在空间的平移中失去了对称性。对于时间的对称性，即物理定律在时间平移中的不变性，可以导出能量守恒定律。例如做自由落体运动的小球，机械能是不变的，一旦出现了机械能的变化，则一定是由于时间不能均匀流逝，时间变慢（或变快），小球的速度变大（或变小），使小球在时间的平移中失去了对称性。

守恒定律是与时、空的对称性相关联的，而时、空性质呈现的规律比一般物理学规律更普遍。因此，守恒定律比一般的物理学规律具有更大的普适性。在进入了 21 世纪的今天，在物理学的基础研究中人们正给予对称性和相关的守恒定律越来越多的关注。

4 实验：验证动量守恒定律



图1-4-1

在本章第 1 节，我们利用气垫导轨进行碰撞实验，探究碰撞前后系统动量变化遵循的规律。我们还可以用研究抛体运动的实验装置（图 1-4-1）进行碰撞实验，进而验证动量守恒定律。

讨论交流

1. 我们如何才能让两球发生碰撞？
2. 为了验证动量守恒定律，我们需要测量哪些物理量？如何测量这些物理量？

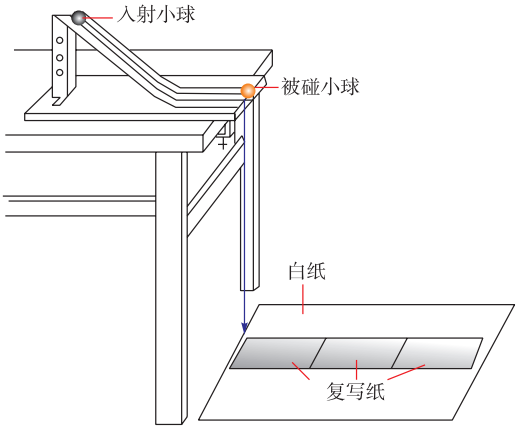
实验操作

1. 取两个大小相同的小球，测出它们的质量 m_1、m_2。

2. 按图 1-4-2 所示安装好实验装置并使斜槽末端水平。

3. 在地上铺一张白纸，在白纸上铺放复写纸。

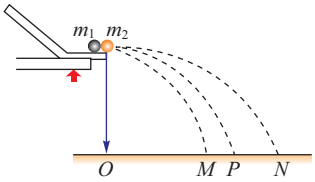
4. 在白纸上记下重垂线所指的位置 O（图 1-4-3），它表示两小球做平抛运动的初始位置的水平投影。



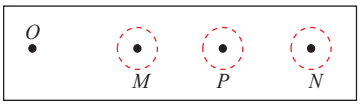
▲ 图1-4-2

5. 先不放被碰小球，让入射小球从斜槽上某一高度处静止滚下，重复 10 次，用圆规画一个尽可能小的圆，把所有的小球落点圈在里面，圆心就是入射小球发生直接平抛的落地点 P（图 1-4-4）。

6. 把被碰小球放在斜槽的末端，让入射小球从同一高度由静止滚下，使它们发生正碰，重复 10 次，仿照上一步骤得到入射小球落地点的平均位置 M 和被碰小球落地点的平均位置 N（图 1-4-4）。



▲ 图1-4-3



▲ 图1-4-4

7. 过 O 和 N 在纸上作一直线。

8. 用刻度尺量出线段 OM、OP、ON 的长度。

9. 把两小球的质量和相应的数值代入 $m_1 \cdot OP = m_1 \cdot OM + m_2 \cdot ON$，看看是否成立。

实验分析

讨论交流

1. 如何确保两小球速度水平并发生正碰？

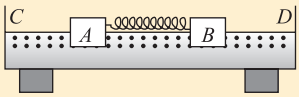
2. 入射小球每次都必须从斜槽同一高度处静止释放，这是为什么？

3. 入射小球与被碰小球的质量大小有何要求？

4. 在实际操作中，地上铺白纸，记录小球落点位置的方式存在哪些问题？你能想到解决问题的方案吗？

自我评价

1. 气垫导轨是一种常用的实验仪器，它利用气泵使带孔的导轨与滑块之间形成气垫，使滑块悬浮在导轨上，滑块在导轨上的运动可视为没有摩擦阻力。我们可以用带竖直挡板 C 和 D 的气垫导轨以及滑块 A 和 B 验证动量守恒定律，实验装置如图 1-4-5 所示，实验步骤如下：



▲ 图1-4-5

a. 松开手的同时，记录滑块 A、B 运动时间的计时器开始工作，当 A、B 滑块分别碰到 C、D 挡板时计时器结束计时，分别记下 A、B 到达 C、D 的运动时间 t_1 和 t_2；

b. 在 A、B 间水平放入一个轻弹簧，用手压住 A、B 使弹簧压缩，放置在气垫导轨上，并让它静止在某个位置；

c. 给导轨送气，调整气垫导轨，使导轨处于水平；

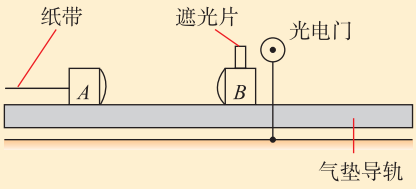
d. 用刻度尺测出 A 的左端至 C 板的距离 l_1，B 的右端至 D 板的距离 l_2。

（1）实验步骤的正确顺序是怎样的？

（2）实验中还需要的测量仪器有哪些？还需要测量的物理量有哪些？

（3）利用上述测量的实验数据，验证动量守恒定律的表达式有哪些？

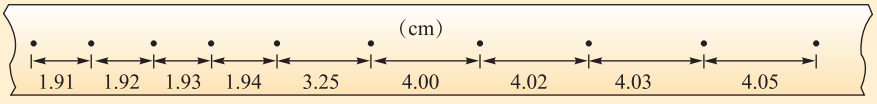
2. 现利用如图 1-4-6 所示的装置验证动量守恒定律。在图中，气垫导轨上有 A、B 两个滑块，滑块 A 右侧带有一弹簧片，左侧与打点计时器（图中未画出）的纸带相连；滑块 B 左侧也带有一弹簧片，上面固定一遮光片，光电计时器（未完全画出）可以记录遮光片通过光电门的时间。



▲ 图1-4-6

实验测得滑块 A 的质量 $m_1 = 0.310\ \text{kg}$，滑块 B 的质量 $m_2 = 0.108\ \text{kg}$，遮光片的宽度 $d = 1.00\ \text{cm}$；打点计时器所用交流电的频率 $f = 50.0\ \text{Hz}$。

将光电门固定在滑块 B 的右侧，启动打点计时器，给滑块 A 一向右的初速度，使它与 B 相碰。碰后光电计时器显示的时间为 $\Delta t_B = 3.500\ \text{ms}$，碰撞前后打出的纸带如图 1-4-7 所示。



▲ 图1-4-7

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

3. 为了验证动量守恒定律（探究碰撞中的不变量），某同学选取了两个材质相同、体积不等的立方体滑块 A 和 B，按下述步骤进行实验。

步骤 1：在 A、B 的相撞面分别装上橡皮泥，以便二者相撞以后能够立刻成为一个整体。

步骤 2：安装好的实验装置如图 1-4-8 所示，铝质轨道槽的左端是倾斜槽，右端是长直水平槽。倾斜槽和水平槽由一小段圆弧连接，轨道槽被固定在水平桌面上，在轨道槽的侧面与轨道等高且适当远处装一台数码频闪照相机。

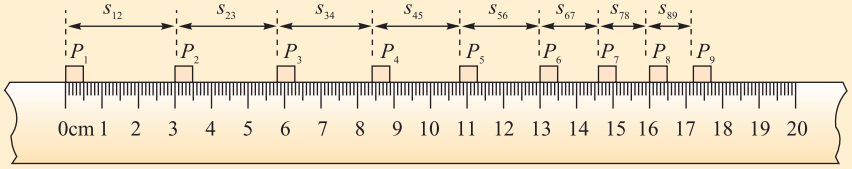


▲ 图1-4-8

步骤 3：让滑块 B 静置于水平槽的某处，滑块 A 从斜槽某处由静止释放，同时开始频闪拍摄，直到 A、B 停止运动，得到一幅多次曝光的照片。

步骤 4：多次重复步骤 3，得到多幅照片，挑出其中最理想的一幅，打印出来，将刻度尺紧靠照片放置，如图 1-4-9 所示。

（1）由图 1-4-9 分析可知，滑块 A 与滑块 B 碰撞发生的位置是：_____。



▲ 图1-4-9

①在 P_5、P_6 之间

②在 P_6 处

③在 P_6、P_7 之间

（2）为了探究碰撞中动量是否守恒，需要直接测量或读取的物理量是 _____。

① A、B 两个滑块的质量 m_1 和 m_2

②滑块 A 释放时距桌面的高度

③频闪照相的周期

④照片尺寸和实际尺寸的比例

⑤照片上测得的 s_{45}、s_{56} 和 s_{67}、s_{78}

⑥照片上测得的 s_{34}、s_{45}、s_{56} 和 s_{67}、s_{78}、s_{89}

⑦滑块与桌面间的动摩擦因数

（3）写出本实验验证动量守恒定律的表达式。

发展空间

实验室

验证动量守恒定律还有其他方案吗？请自行设计实验，试一试。

5 碰 撞

通过第 3 节的学习，我们得到碰撞过程中动量守恒的规律。接下来我们再根据第 1 节“探究碰撞前后运动量的变化”实验中得到的数据，进一步研究两滑块在碰撞前后动能变化遵循的规律。

碰撞的分类

实验探究

根据第 1 节实验数据完成表 1-5-1。

表1-5-1 探究碰撞前后动能的变化

次数	滑块质量		碰前					碰后					动能的改变量
			速度		动能		动能之和	速度		动能		动能之和	
	m_1	m_2	v_1	v_2	E_{k1}	E_{k2}	$E_k=E_{k1}+E_{k2}$	v_1'	v_2'	E_{k1}'	E_{k2}'	$E_k'=E_{k1}'+E_{k2}'$	$\Delta E_k=E_k'-E_k$
1													
2													
3													

注：表格中质量的单位用kg，速度的单位用m/s，动能的单位用J。

结论：在第一种情况下，两个滑块的动能之和在碰撞前后_____。而在第二种、第三种情况下，碰撞后两滑块的动能之和_____。

上面的实验数据表明，对于不同情况下的碰撞，动能变化的情况不同。

根据碰撞前后两物体总动能是否变化，可将碰撞分为弹性碰撞和非弹性碰撞两类。

我们把碰撞前后两滑块的总动能不变的碰撞称为**弹性碰撞**（elastic collision）。在两物体发生弹性碰撞的过程中，两物体都要发生弹性形变，动能有一部分转化为弹性势能，而在转化过程中，总机械能保持不变，碰撞过

程结束，两物体都恢复原来的形状。因此，更准确的说法是：碰撞过程中，系统总机械能保持不变的碰撞，称为弹性碰撞。

台球、钢球（图 1-5-1）、冰壶等坚硬的宏观物体的碰撞，碰撞后的动能损失很小，可近似看作弹性碰撞；微观粒子中，低能电子和分子的碰撞是严格的弹性碰撞。

若两滑块在碰撞后的总机械能减少了，这说明两滑块在碰撞过程中，有一部分机械能转化为其他形式的能量，这种碰撞称为**非弹性碰撞**（inelastic collision）。如汽车追尾、子弹射穿光滑水平面上的木块并继续运动（图 1-5-2）等都属于非弹性碰撞。



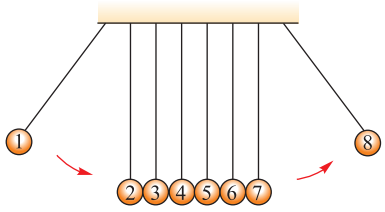
▲ **图1-5-2**　子弹射穿木块

在非弹性碰撞中，如果两物体碰后粘在一起，以相同的速度运动，物理学上把这种碰撞称为**完全非弹性碰撞**（perfect inelastic collision）。完全非弹性碰撞是非弹性碰撞中机械能损失最多的一种。这种碰撞在现实生活中的实例很多，如子弹射入木块没有穿出，子弹和木块一起运动（图 1-5-3）；跳上滑板的人，最终与滑板以相同的速度一起运动（图 1-5-4）；等等。在微观世界中，正、负离子碰撞后共同组成分子的过程也属于完全非弹性碰撞。



▲ **图1-5-3**　子弹射入木块，以相同速度运动

碰撞过程中，两物体相互作用的时间很短，即使有外力作用，也远小于碰撞物体之间的相互作用力（内力），因此可以忽略外力作用的影响，认为碰撞过程中动量守恒。



▲ **图1-5-1**　英国皇家学会有一个很著名的实验。它是在天花板上并排悬挂很多摆长相等且摆球质量都相等的双线摆，当第一个小球摆下以后，这个速度就会一直传递到最后一个小球，最后一个小球就摆到第一个小球原来的高度。这样一直往复运动下去，中间的各双线摆不运动，起到传递速度的作用



▲ **图1-5-4**　滑板运动

例题示范

问题 在列车编组站里，一辆质量$m_1=1.8\times10^4$ kg的货车在平直轨道上以$v_1=2$ m/s的速度运动。碰上一辆质量$m_2=2.2\times10^4$ kg的静止的货车，它们碰后接合在一起继续运动，求此后两车运动的速度。

分析 两辆货车组成一个系统，在碰撞过程中两车之间的相互作用力远大于作用在系统上的外力（即车辆与轨道之间的摩擦力、空气阻力等），此时外力可忽略不计，系统动量守恒。

解 取碰撞前货车运动方向为正方向，设两车碰撞后的共同速度为v，则由动量守恒定律可得

$$m_1v_1=(m_1+m_2)v$$

得

$$v=\frac{m_1v_1}{m_1+m_2}=\frac{1.8\times10^4\times2}{1.8\times10^4+2.2\times10^4}\ \text{m/s}=0.9\ \text{m/s}$$

两车碰后的速度为0.9 m/s，沿v_1方向运动。

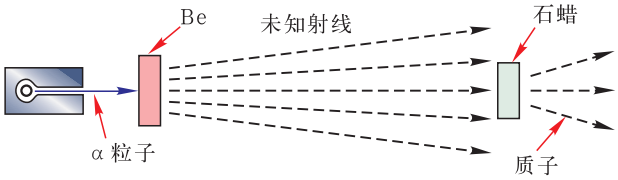
拓展 上述过程也就是前面我们在对碰撞的分类中所提及的“完全非弹性碰撞”，这种碰撞过程中机械能的损失最大。大家可以计算一下，这个过程中系统损失了多少机械能。

中子的发现

在人类认识原子核的历程中，中子的发现有着一段曲折的过程。

1928年，德国物理学家玻特（Walther Bothe，1891—1957）用α粒子去轰击轻金属铍（Be）时，发现有一种贯穿力很强的中性射线，当时他认为这是γ射线。后来，法国物理学家约里奥·居里夫妇进行类似的实验，用玻特发现的射线去轰击石蜡，结果从石蜡中打出了质子流，如图1-5-5所示。对于这一现象，约里奥·居里夫妇认为是γ射线撞击石蜡里的氢原子核的结果。到了1932年，卢瑟福的学生、英国物理学家查德威克（图1-5-6）研究了这种中性射线，测出它的速度不到光速的10%，从而否定了这种中性射线是γ射线的看法。查德威克认为，要确

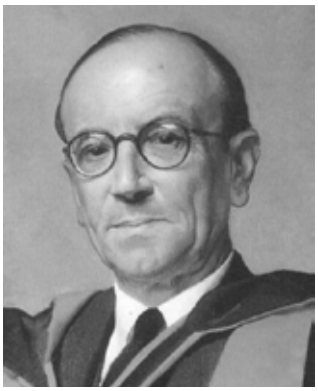
α粒子由2个质子和2个中子构成，是氦原子的核。



▲ **图1-5-5**　α粒子轰击轻金属铍

定这种中性粒子究竟是什么，就必须测定它的质量。他用这种中性射线与质量已知的氢核和氮核分别发生碰撞，并认为这种碰撞是完全弹性的。他在实验中测出了碰撞后氢核和氮核的速度，于是就可以用动量守恒定律和能量守恒定律求出这种中性粒子的质量，从而发现了中子。

查德威克因发现中子而获得了 1935 年的诺贝尔物理学奖。中子的发现揭开了原子核组成的神秘面纱，开创了人类认识原子核的新纪元。中子发现后，对中子性质以及中子和原子之间相互作用的研究开创了物理学的一个新分支——中子物理学，进而导致了核裂变的发现。



▲ **图1-5-6**　查德威克（James Chadwick，1891—1974）

理论探究 | 中子质量的计算

设中性粒子的质量为m，碰前速率为v，碰后速率为v'，氢核的质量为m_H，碰前速率为零，碰后速率为v_H，碰撞前后的动量和动能都守恒，则

$$mv = mv' + m_H v_H$$

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mv'^2 + \frac{1}{2}m_H v_H^2$$

解得

$$v_H = \frac{2mv}{m + m_H}$$

同理，对氮原子核的碰撞可解得

$$v_N = \frac{2mv}{m + m_N}$$

由上述两式可得

$$\frac{v_H}{v_N} = \frac{m + m_N}{m + m_H}$$

已知氮核质量与氢核质量的关系为$m_N = 14m_H$，查德威克在实验中测得氢核速率和氮核速率的关系是$v_H \approx 7.5v_N$，由此得$m = m_H$。

由此可见，这种中性粒子的质量与氢核（质子）的质量相同，因其不带电，故称为中子。

自我评价

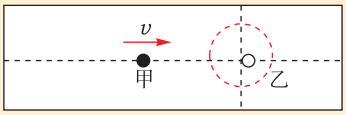
1. 一中子与一质量数为 A（$A>1$）的原子核发生弹性碰撞（碰撞前后二者连线在同一直线上）。若碰前原子核静止，则碰撞前与碰撞后中子的速率之比为多少？

2. “爆竹声中一岁除，春风送暖入屠苏。”爆竹声响是辞旧迎新的标志，是喜庆心情的流露。有一个质量为 $3m$ 的爆竹斜向上抛出，到达最高点时速度大小为 v_0、方向水平向东。在最高点爆炸成质量不等的两块，其中一块质量为 $2m$，速度大小为 v，方向水平向东，则另一块的速度为多大？（不计火药爆炸损失的质量）

3. 冰壶运动深受观众喜爱，图 1-5-7（a）为 2014 年 2 月在索契举行的第 22 届冬奥会上中国队员投掷冰壶的镜头。在某次投掷中，冰壶甲运动一段时间后与对方静止的冰壶乙发生弹性碰撞，如图 1-5-7（b）所示。若两冰壶质量相等，则碰后两冰壶最终停止的位置，可能是图 1-5-8 中的哪幅图？为什么？

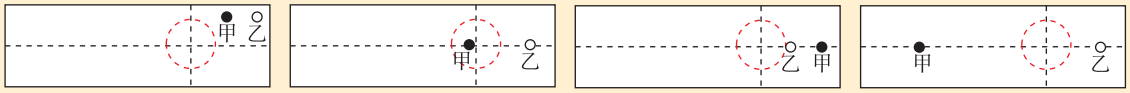


（a）



（b）

▲ 图1-5-7



（a）　（b）　（c）　（d）

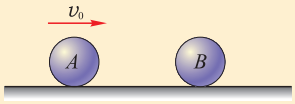
▲ 图1-5-8

4. 质量分别为 300 g 和 200 g 的两个物体在摩擦可以忽略不计的水平面上相向运动，速度大小分别为 50 cm/s 和 100 cm/s。

（1）如果两物体碰撞并黏合在一起，求它们共同的速度及碰撞后损失的动能；

（2）如果碰撞是弹性碰撞，求两物体碰撞后的速度。

5. 如图 1-5-9 所示，当小球 A 以速度 v_0 向右运动时跟静止的小球 B 发生碰撞，碰撞后 A 球以 $\frac{v_0}{2}$ 的速度弹回，而 B 球以 $\frac{v_0}{3}$ 的速度向右运动，求 A、B 两球的质量之比。



▲ 图1-5-9

发展空间

课外阅览

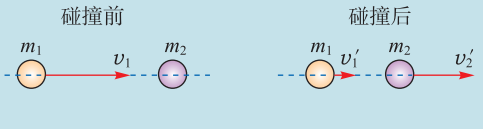
对心碰撞和非对心碰撞

如图 1-5-10 所示，一个运动的球与一个静止的球碰撞，碰撞之前球的运动速度与两球心的连线在同一条直线上，碰撞之后两球的速度仍会沿着这条直线。这种碰撞称为**正碰**（direct

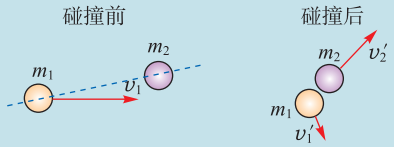
impact），也叫**对心碰撞**。

发生对心碰撞的两个物体，碰撞前后的速度都沿同一条直线，它们的动量也都沿这条直线，可以应用动量守恒定律。前面我们已经多次遇到这种情形。

如图 1-5-11 所示，一个运动的球与一个静止的球碰撞，如果碰撞之前球的运动速度与两球心的连线不在同一条直线上，碰撞之后两球的速度都会偏离原来两球心的连线。这种碰撞称为**非对心碰撞**。



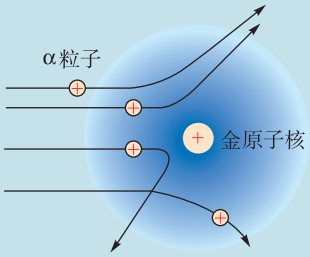
▲ **图1-5-10**　对心碰撞



▲ **图1-5-11**　非对心碰撞

发生非对心碰撞的两个物体，碰撞后的速度都不与原来的速度在同一条直线上，所以非对心碰撞比较复杂，是平面内的二维问题。如果碰前两个物体的初速度都不为零，并发生非对心碰撞，则可能是三维空间中更复杂的运动。

在粒子物理和核物理中，常使一束粒子射入物体，粒子与物体中的微粒碰撞，研究碰撞后粒子的运动方向，可以得到与物质微观结构有关的很多信息。微观粒子相互接近时并不像宏观物体那样“接触”，微观粒子的碰撞常称为**散射**（scattering），如图 1-5-12 所示。由于粒子与物质微粒发生对心碰撞的概率很小，所以多数粒子在碰撞后飞向四面八方。由于原子之间强大的相互作用，碰撞时原子相当于质量极大的物体，其运动状态的变化可以忽略。



▲ **图1-5-12**　金原子核对α粒子的散射

爆　　炸

爆炸是指在极短时间内释放出大量能量，产生高温，并放出大量气体，在周围介质中造成高压的化学反应或状态变化。图 1-5-13 和图 1-5-14 所示的普通炸药爆炸是化学能向内能和机械能的转化；图 1-5-15 所示的核爆炸是原子核反应的能量向内能和机械能的转化。

爆炸与碰撞的相同点是：相互作用时间极短，相互作用力为变力，且远大于系统所受外力。常用动量守恒定律处理碰撞和爆炸问题。

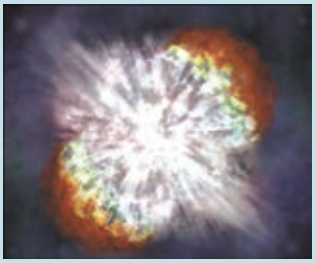
爆炸与碰撞的不同点是：爆炸过程中有其他形式的能（一般为化学能）转化为机械能，所以爆炸过程中系统的机械能会增加。对于碰撞过程，系统的机械能一般要减少，转化为内能。



▲ **图1-5-13**　开山炸石



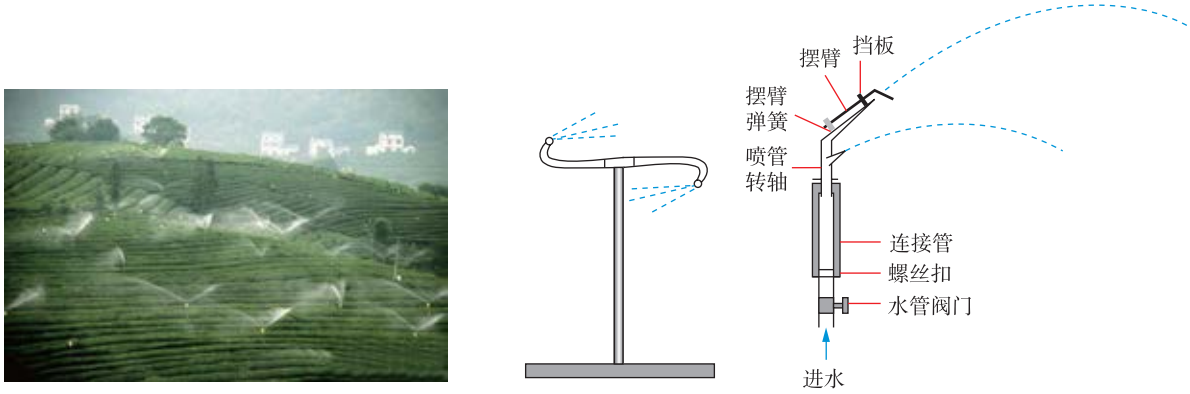
▲ **图 1-5-14**　爆破拆除



▲ **图 1-5-15**　巨大恒星爆炸形成超新星的壮观景象

6 反 冲

如图 1-6-1 所示是常见的灌溉喷水器，它也是动量守恒定律的重要应用。那么，这样的灌溉喷水器是如何工作的呢？这就是本节的学习内容。

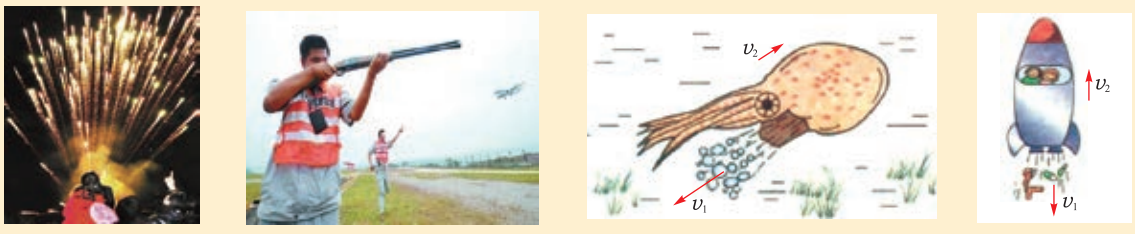


▲ **图1-6-1** 灌溉喷水器

反冲现象

观察思考

观察图 1-6-2 中的几种情形。



▲ **图1-6-2** 反冲现象

（a）节日里，小朋友燃放“冲天炮”，火药燃烧后产生的气体向下冲，导致冲天炮蹿上广袤的天空。

（b）当枪发射子弹时，枪身会同时向后运动，持枪者会感觉到“后坐力”。

（c）乌贼头下有一个漏斗，肌肉收缩时把外套膜中的水从漏斗中向后喷出，从而使自己向前游去。

（d）可以想象，在远离星体的太空中，有一艘飞船。如果船舱中的人向后加速扔出一些物品，在这个过程中飞船会向前加速运动。

1. 分析这些现象，归纳这些现象的共同特征。

2. 分析这些现象产生的原因。

如果一个静止的物体在内力的作用下分裂为两部分，一部分向某个方向运动，另一部分必然向相反的方向运动。这个现象叫作**反冲**（recoil）。

反冲和碰撞、爆炸有相似之处。反冲过程中相互作用力常为变力，且作用力大，一般都满足内力远大于外力，所以可用动量守恒定律来处理。

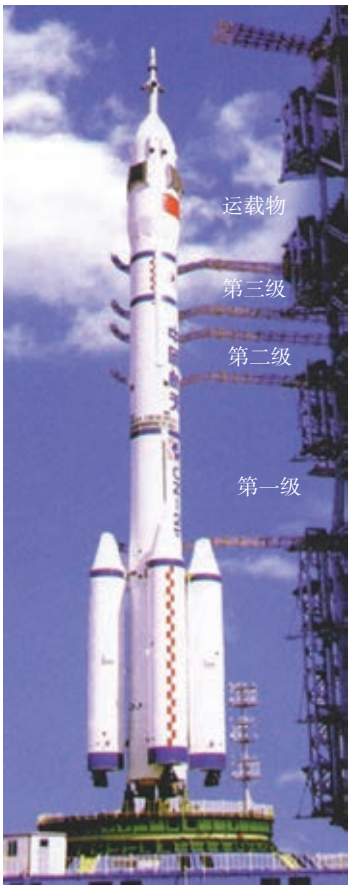
反冲有着广泛的应用，火箭、灌溉喷水器（图 1-6-1）、反击式水轮机等都是利用反冲来工作的。

火箭的发射

火箭的发射利用了反冲。火箭燃料舱内的燃料被点燃后，产生急剧膨胀的燃气，舱壁对这部分燃气的作用力使气体从火箭尾部高速喷出，燃气对火箭的反作用力把火箭推向前方。

火箭飞行所能达到的最大速度，就是燃料燃尽时获得的最终速度。这个速度主要取决于两个条件：一是向后的喷气速度；二是质量比（火箭开始飞行时的质量与燃料燃尽时的质量之比）。喷气速度越大，质量比越大，最终速度就越大。提高喷气速度，需要使用高质量的燃料，目前常用的液体燃料是液氢，用液氧作氧化剂。质量比与火箭的结构和材料有关，现代火箭能达到的质量比不超过 10。在现有技术条件下，一级火箭的最终速度还不能达到发射人造卫星所需要的速度，因而发射卫星要用多级火箭。

多级火箭是由几个单级火箭组成的（图 1-6-3）。发射



▲ **图1-6-3**　火箭

时先点燃第一级火箭，燃料用完以后，空壳自动脱落，然后下一级火箭开始工作。多级火箭及时把空壳抛掉，使火箭的总质量减少，因而能够达到更大的速度。用这种火箭可发射洲际导弹、人造卫星、宇宙飞船等。但火箭的级数不是越多越好，因为级数越多，构造越复杂，工作的可靠性就越差。目前的多级火箭一般都是二级或三级。

例题示范

问题 设有一质量 $M = 5\ \mathrm{t}$ 的火箭，架设于发射台上，其喷出气体对地的速度为 1000 m/s。请估算它至少每秒喷出质量为多少的气体，才能让火箭开始上升。如果要使火箭以 $2\ \mathrm{m/s^2}$ 的加速度上升，请估算它每秒应喷出多少气体。(取 $g = 10\ \mathrm{m/s^2}$)

分析 分别以被喷出的气体和火箭为研究对象，运用动量定理来解决。需要注意的是，若用动量守恒定律来处理此问题，则必须满足条件：内力远远大于火箭所受的重力。因为喷出气体的质量远小于火箭喷气后的质量，在估算时，我们可以认为喷出气体后火箭的质量不变。

解 设喷出气体的质量为 Δm，以 Δm 为研究对象，它在 Δt 时间内速度由 0 增至 $v = 1000\ \mathrm{m/s}$，设火箭对它的作用力为 F，由动量定理有

$$F\Delta t = \Delta m v - 0$$

得

$$F = \frac{\Delta m}{\Delta t} v$$

若要使火箭开始上升，则要求

$$F \geqslant Mg$$

即

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} \times v \geqslant Mg$$

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} \geqslant \frac{Mg}{v} = \frac{5 \times 10^3 \times 10}{1 \times 10^3} = 50\ \mathrm{kg/s}$$

即要使火箭开始上升，它至少每秒要喷出 50 kg 的气体。

若要使火箭以加速度 $a = 2\ \mathrm{m/s^2}$ 上升，取火箭为研究对象，由牛顿第二定律得

$$F - Mg = Ma$$

再取喷出的气体为研究对象，有

$$F\Delta t = \Delta m v - 0$$

可得

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{Mg + Ma}{v} = \frac{5000 \times (10 + 2)}{1000} = 60\ \mathrm{kg/s}$$

拓展　1. 若不是估算，则题中两问应如何求解？

2. 火箭上升后，由于继续喷气，火箭质量将逐渐变小。如果喷气对地的速度保持不变，要维持上升的加速度不变，则每秒喷出的气体质量应如何变化？

自我评价

1. 如图 1-6-4 所示，如果地面摩擦很小，当人推墙时，人将向后退，请解释其中的原因。



▲ 图1-6-4

2. 将质量为1.00 kg的火箭模型点火升空，50 g燃烧的燃气以大小为600 m/s的对地速度在很短时间内从火箭喷口喷出。在燃气喷出后的瞬间，火箭的动量大小为（喷出过程中重力和空气阻力可忽略）（　　）

A. 30 kg · m/s

B. 5.7×10^2 kg · m/s

C. 6.0×10^2 kg · m/s

D. 6.3×10^2 kg · m/s

3. 运送人造地球卫星的火箭开始工作后，火箭做加速运动的原因是什么？

4. 一质量为 M 的航天器正以速度 v_0 在同步卫星轨道上做圆周运动，某一时刻航天器接到加速的指令后，发动机瞬间向后喷出一定质量的气体。若气体喷出时速度大小为 v_1（以地心为参考系），加速后航天器的速度大小为 v_2，则喷出气体的质量 m 为多少？

5. 大炮水平发射一枚质量为 10 kg 的炮弹，炮弹飞出的速度（相对于地面）为 600 m/s，大炮自身的质量是 2.0 t，求大炮后退的速度。如果大炮后退中受到的阻力是自身重力的 30 %，大炮能后退多远？

发展空间

实验室

利用课外时间，制作水火箭、喷气船。

课外阅览

我国航天技术发展简介

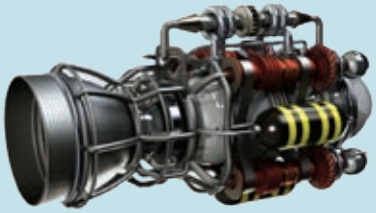
我国早在宋代就发明了原始形态的火箭（图 1-6-5）。这种火箭是在一根箭杆上绑一个火药筒，火药筒的前端是封闭的，火药点燃后生成的燃气会以很大速度向后喷出，由于反冲，火箭向前运动。这是现代火箭的雏形。



（a） （b）

▲ **图1-6-5** 宋代的“火箭”

现代火箭（图 1-6-6）的原理仍然与古代的相同，但构造却复杂得多。现代火箭主要由壳体和燃料两大部分组成，壳体是圆筒形的，前端是封闭的尖端，后端是尾喷管，燃料燃烧产生的高温高压燃气从尾喷管迅速喷出，火箭就向前飞去。现代火箭主要用作运载工具发射探测仪器、人造卫星或宇宙飞船等，也可用于发射弹头甚至核弹头。



▲ **图1-6-6** 火箭发动机



▲ **图1-6-7** 中国长征家族系列运载火箭（部分成员）

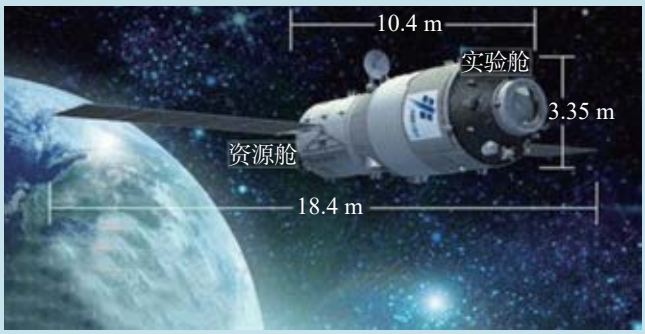
火箭技术是一门尖端技术。我国自行研制的大型系列运载火箭以“长征”命名（图 1-6-7）。1970 年 4 月 24 日，“长征”一号火箭把我国第一颗人造地球卫星送入轨道。1990 年 4 月，“长征”三号火箭首次为国外用户成功地发射了卫星。1990 年 7 月，“长征”二号捆绑式大推力运载火箭发射试验成功，表明我国已经具备发射重型卫星的能力，我国的火箭技术已经跨入了世界先进行列。2013 年 4 月 26 日，“长征”二号丁运载火箭将“高分”一号卫星送入预定轨道，搭载的三颗国外微小卫星随后成功分离，中国首次一箭四星发射圆满成功。2015 年 9 月 20 日，“长征”六号成功将 20 颗微小卫星送入太空，创造了我国航天一箭多星发射的新纪录。

另外，我国自 1956 年建立专门的航天研究机构到现在，我国的卫星发射技术有了迅速的发展。

1964 年 6 月，我国自行研制的运载火箭腾空而起。此后，我国发射了各种科学试验卫星、资源勘察卫星、通信卫星、气象卫星等人造地球卫星，掌握了使卫星返回地面的回收技术以及用一枚火箭把多颗卫星送入轨道的“一箭多星”等尖端技术。1999 年 11 月 20 日，我国发射了“神舟”号试验飞船，它在太空遨游了 21 小时，于 11 月 21 日成功着陆。2003 年 10 月 15 日，我国“神舟”五号载人飞船被送入太空，绕地球 14 周后，于 10 月 16 日从太空安全返回。2005 年 10 月 12 日上午 11 时，我国又成功地发射了“神舟”六号载人飞船，两位宇航员遨游太空 115 个小时后安全返回地面，实现了多人长时间的航天飞行。2007 年 10 月 24 日 18 时 5 分，“嫦娥”一号绕月探测卫星在西昌发射成功。2008 年 9 月 25 日，“神舟”七号载人飞船成功升空，航天员首次成功出舱进行太空行走。这是我国航天史上的又一个里程碑，它标志着我国载人航天技术有了重大突破。2016 年 9 月 15 日 22 时 04 分，搭载“天宫”二号空间实验室的“长征”二号 FT2 运载火箭，在我国酒泉卫星发射中心点火发射成功。2016 年 10 月 17 日 7 时 30 分，“神舟”十一号载人飞船顺利将景海鹏、陈冬两名航天员送入太空（图 1-6-8、图 1-6-9）。



▲ **图1-6-8**　航天员景海鹏、陈冬进驻“天宫”二号空间实验室



▲ **图1-6-9**　空间实验室

反思・小结・交流

• 学后反思

1. 物理学家对碰撞进行研究的起因是什么？
2. 如何根据牛顿运动定律导出动量定理？
3. 如何根据动量定理导出动量守恒定律？

• 自主小结

1. 碰撞的分类及其规律是什么？
2. 你能准确表述冲量、动量的概念吗？
3. 动量定理的内容及其适用条件是什么？如何运用动量定理解决物理问题？

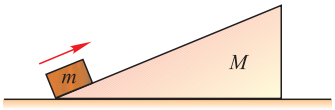
4. 动量守恒定律的内容及其适用条件是什么？如何运用动量守恒定律解决物理问题？
5. 什么是反冲运动？它有什么特点？

• 相互交流

1. 查阅资料，了解动量守恒定律在物理学中的地位和作用，与同学进行交流。
2. 关注生活中相关的实际问题，试用本章学过的知识做初步的解释。
3. 动量定理、动量守恒定律与牛顿运动定律存在怎样的内在联系？
4. 结合物理规律与生活中的现象，谈谈对称与守恒。

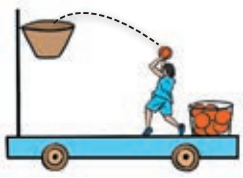
本章复习题

1. 地球同步卫星绕地心做匀速圆周运动，下面的说法中正确的是（　　）
   A. 地球对卫星的引力的冲量总为零
   B. 地球对卫星的引力对卫星不做功
   C. 地球对卫星的引力的冲量随时间的增大而增大
   D. 地球对卫星的引力在一个运行周期内的冲量为零
2. 下面关于爆炸与碰撞的说法中正确的是(　　)
   A. 爆炸与碰撞都是相互作用时间很短、相互作用的内力远大于外力的过程，因此系统的动量守恒
   B. 爆炸与碰撞过程中，外力作用相比内力都可以忽略，因此系统机械能守恒
   C. 爆炸过程系统的机械能增加，是内力做功的结果
   D. 非弹性碰撞过程系统的机械能减少，是外力做负功的结果
3. 如图所示，物体 m 置于斜面 M 上，M 与水平面间无摩擦，在 m 沿斜面由底端冲上顶端的过程中，m 和 M 组成的系统（　　）



▲ 第3题图

   A. 系统的动量守恒
   B. 在竖直方向上系统的动量分量守恒
   C. 在水平方向上系统的动量分量守恒
   D. 在任何方向上系统的动量分量都不守恒
4. 如图所示，静止在水平面上的小车，站在车上的人将右边筐中的球一个一个地投入左边的筐中，车与水平面间的摩擦忽略不计，在投球过程中（球仍在车上）（　　）



▲ 第4题图

   A. 由于人车系统所受的合外力为零，故车始终不动
   B. 由于人车系统所受的合外力不为零，故车右移
   C. 投完球后，小车将向右做匀速直线运动
   D. 投完球后，小车将静止不动
5. 如图所示，小车在地面上静止，车与地面间摩擦忽略不计，A、B 两人站在车的两头。两人同时开始相向行走，发现小车向左运动，小车运动的原因可能是（　　）



▲ 第5题图

A．A、B 质量相等，但 A 的速率比 B 大

B．A、B 质量相等，但 A 的速率比 B 小

C．A、B 速率相等，但 A 的质量比 B 大

D．A、B 速率相等，但 A 的质量比 B 小

6．下列对几种物理现象的解释中，正确的是（　　）

A．砸钉子时不用橡皮锤，只是因为橡皮锤太轻

B．跳高时在沙坑里填沙，是为了减小冲量

C．在推车时推不动，是因为推力的冲量为零

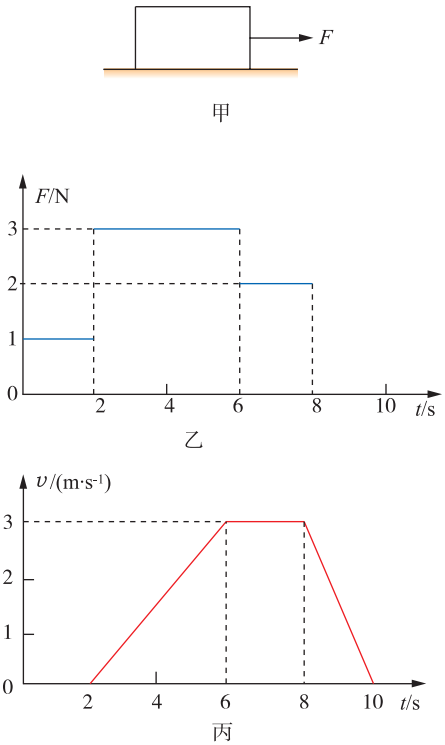
D．动量相同的两个物体受到相同合力的作用而减速，两个物体将同时停下来

7．如图甲所示，一物体放在水平地面上，已知物体所受水平拉力 F 随时间 t 的变化情况如图乙所示，物体的速度 v 随时间 t 的变化关系如图丙所示。求：

（1）0 ～ 8 s 时间内拉力的冲量；

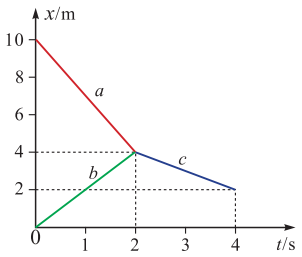
（2）0 ～ 6 s 时间内物体的位移；

（3）0 ～ 10 s 时间内，物体克服摩擦力所做的功。



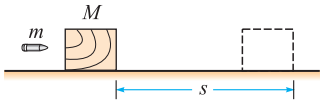
▲ 第7题图

8．A、B 两球沿同一条直线运动，所给的 x–t 图像记录了它们碰撞前后的位置变化情况，其中 a、b 分别为 A、B 碰撞前的 x–t 图像，c 为碰撞后它们的 x–t 图像。若 A 球质量为 1 kg，则 B 球质量是多少？



▲ 第8题图

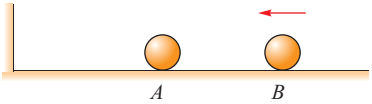
9．如图所示，质量为 M 的木块放在动摩擦因数为 μ 的粗糙水平面上，一颗质量为 m 的子弹，以某一初速度 v_0 水平击中木块，并嵌在其中。随后木块在水平面上滑行距离 s 而停止，求子弹的初速度 v_0。（用 M、m、μ、s、g 表示）



▲ 第9题图

10．质量为 4.9 kg 的沙袋静止在光滑水平面上，现有 5 颗质量为 20 g 的子弹以 20.0 m/s 的水平速度射入沙袋，并留在沙袋内随沙袋一起运动。假如 5 颗子弹射入沙袋时的速度方向均沿同一直线，求沙袋最后的速度。

11．如图所示，在光滑水平面的左侧固定一竖直挡板，A 球在水平面上静止放置，B 球向左运动与 A 球发生正碰，B 球碰撞前后的速率之比为 3∶1，A 球垂直撞向挡板，碰后以原速率返回，两球刚好不发生碰撞，A、B 两球的质量之比为多少？A、B 碰撞前后两球总动能之比为多少？



▲ 第11题图

12．一质量为 m 的烟花弹获得动能 E_k 后，从地面竖直升空。当烟花弹上升到速度为零时，弹中火药爆炸将烟花弹炸为质量相等的两部分，两部分获得的动能之和也为 E_k，且均沿竖直方向运动。爆炸时间极短，重力加速度大小为 g，不计空气阻力和火药的质量。求：

（1）烟花弹从地面开始上升到火药爆炸所经过的时间；

（2）爆炸后烟花弹向上运动的部分距地面的最大高度。

13. A、B 两球质量分别为 $m_1 = 8\ \text{kg}$ 和 $m_2 = 4\ \text{kg}$，沿同一水平轨道相向运动，A 球速度 $v_1 = 5\ \text{m/s}$，方向向东；B 球速度 $v_2 = 4\ \text{m/s}$，方向向西。两球与轨道的摩擦忽略不计。两球发生正碰，把碰撞过程分成两段，第一段是压缩过程，第二段是恢复过程。已知碰撞结束后 A、B 两球速度变为 $v_1' = 1\ \text{m/s}$、$v_2' = 4\ \text{m/s}$，方向都向东。求：

（1）整个碰撞过程系统损失多少机械能？

（2）碰撞的第一阶段系统的动能减少多少？

划然长啸，草木震动，山鸣谷应，风起水涌。

——苏轼《后赤壁赋》

第二章

机械振动

主题一　简谐运动及其应用

- 简谐运动及其图像
- 简谐运动的回复力及能量
- 单摆
- 实验：用单摆测量重力加速度

主题二　外力作用下的振动

- 阻尼振动　受迫振动

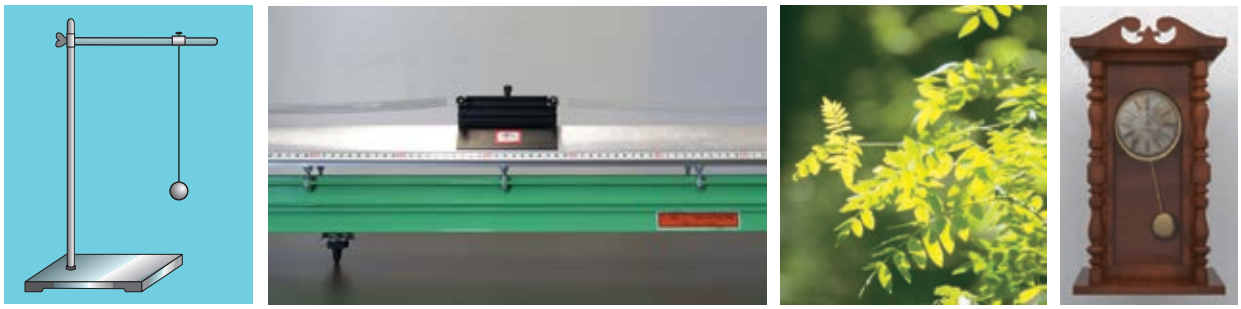
同匀速直线运动、匀变速运动以及圆周运动一样，振动也是一种普遍存在的运动形式。例如，一切发声体都在振动，机器的运转总伴随着振动，海浪的起伏以及地震也都是振动，就连晶体中的原子也都在不停地振动着。

研究振动，将使我们对世界的认识更深入。

1 简谐运动及其图像

观察思考

如图 2-1-1 所示，让悬挂的小球、气垫导轨上的滑块动起来，它们和树梢及钟摆的运动情况有什么共同之处？



（a）细绳拴着的小球在摆动　（b）弹簧系着的滑块在气垫导轨上往复运动　（c）树梢在微风中摇摆　（d）摆钟内钟摆的运动

▲ 图2-1-1

机械振动

不难看出，小球、滑块和树梢、钟摆一样，都在某个位置附近往复运动。物体（或物体的某一部分）在某一位置两侧所做的往复运动，叫作**机械振动**，通常简称为**振动**（vibration），这个位置称为**平衡位置**（equilibrium position）。

振动现象在自然界中普遍存在。钟摆的摆动，水中浮标的上下浮动，挑着物体行走时扁担的颤动，树梢在微风中的摇摆，都是振动。一切发声的物体都在振动。

简谐运动

讨论交流

在必修模块的力学中，我们已经学过直线运动和曲线运动。那么，什么是简谐运动呢？

如图 2-1-2 所示，将弹簧上端固定，下端连接一个小球，小球可在竖直方向上运动。弹簧的质量比小球的质量小得多，可以忽略不计，若不计空气阻力，这样的系统称为弹簧振子，其中小球称为**振子**（oscillator）。



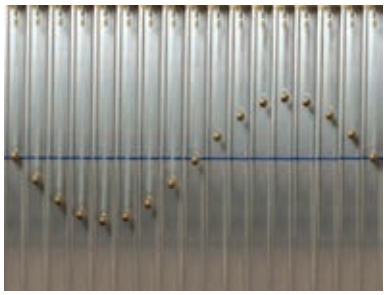
▲ **图2-1-2**　弹簧振子

观察思考

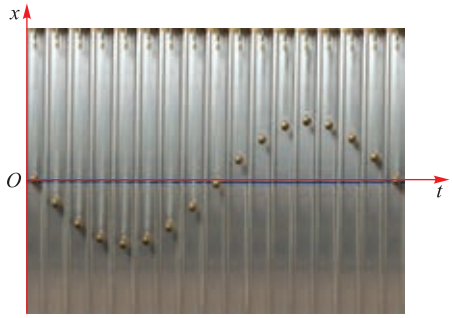
把小球沿弹簧轴线方向拉离平衡位置一小段距离，然后由静止释放，观察小球的运动情况。我们如何记录并分析它的运动呢？

我们用手机对小球的运动过程进行录像，然后等时间间隔 0.02s 截屏，利用软件拼合在一张图片上，得到图 2-1-3。

为了进一步研究的需要，我们在图 2-1-3 中建立坐标系，如图 2-1-4 所示，横轴代表时间 t，纵轴代表小球相对平衡位置的位移 x，因此它就是小球在平衡位置附近往复运动时的位移 – 时间图像，即 x–t 图像，称为弹簧振子的振动图像。从图中可以看出，它的振动图像大致是一条正弦或余弦曲线。如果质点的位移与时间的关系严格遵从正弦函数的规律，即它的振动图像是一条正弦曲线，这样的运动叫作**简谐运动**（simple harmonic motion）。



▲ **图2-1-3**　弹簧振子的运动



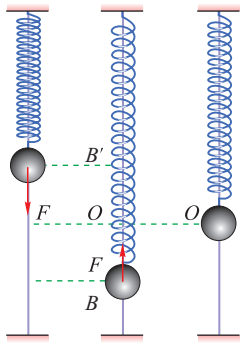
▲ **图2-1-4**　振动图像

图 2-1-1（b）中的滑块、图 2-1-2 中的弹簧振子的运动均可视为简谐运动，图 2-1-5 中音叉叉股上各质点的振动也可看作简谐运动。做简谐运动的振子称为谐振子。简谐运动是最简单、最基本的振动，任何复杂的振动都可以看作几个或很多个简谐运动的叠加。



▲ **图2-1-5**　音叉叉股的振动可以看作简谐运动

描述简谐运动的物理量



▲ 图2-1-6 弹簧振子

振子完成一次全振动发生的位移是多少？经过的路程是多少？

我们用位移、速度、加速度等物理量来描述匀变速直线运动；用角速度、周期、转速等物理量来描述匀速圆周运动。那么，用哪些物理量来描述简谐运动的特征呢？

在图 2-1-6 中，振子在光滑杆上的 B 点和 B' 点之间往复运动，$OB=OB'$，OB（OB'）是振子离开平衡位置的最大距离，叫作振动的**振幅**（amplitude）。振幅是表示振动强弱的物理量。

如果振子由 B 点经 O 点运动到 B' 点，又由 B' 点经 O 点回到 B 点，我们就说振子完成了一次全振动。振子每完成一次全振动所用的时间是相同的，这个时间叫作振动的**周期**（period）。完成的全振动的次数与所用时间的比，叫作振动的**频率**（frequency）。

周期和频率都是表示振动快慢的物理量。用 T 表示周期，用 f 表示频率，则有 $f=\frac{1}{T}$。在国际单位制中，周期的单位是秒，符号是 s。频率的单位是**赫兹**，简称**赫**，符号是 Hz，1 Hz =1 s^{-1}。

除了振幅、周期和频率以外，还有一个表示振动步调的物理量——**相位**（phase）。把两个相同的弹簧振子并排放在一起，并且都从平衡位置拉开相同的距离，一个先释放，另一个稍后一点释放，可以看到两个弹簧振子都做简谐运动，它们的振幅及周期（频率）都相同，所不同的只是相位，也就是振动步调——一个超前而另一个落后。更确切地说，相位是描述做周期性运动的物体在各个时刻所处状态的物理量。

简谐运动的表达式

简谐运动的图像为正弦（或余弦）曲线，也就是说振动物体离开平衡位置的位移 x 与时间 t 的关系可用正弦函数（或余弦函数）来表示。即

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

其中

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

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

综合可得

$$x = A\sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right) = A\sin\left(2\pi ft + \varphi_0\right)$$

式中 A 表示振动的振幅，T 和 f 分别表示物体振动的周期和频率。物体在不同的初始位置开始振动，或开始振动时的初速度不同，φ_0 值不同。

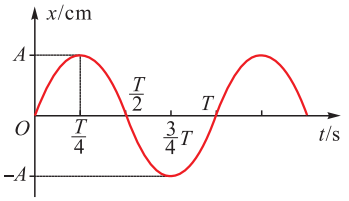
例如，图 2-1-7（a）所示的振动图像表示了物体（如振子或摆球）从平衡位置开始振动，其离开平衡位置的位移 x 和时间 t 的函数关系为

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

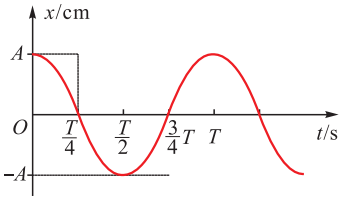
又如，图 2-1-7（b）所示的振动图像表示了物体（如振子或摆球）从正向最大位移处开始运动，其离开平衡位置的位移 x 和时间 t 的函数关系为

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

在 $x = A\sin(2\pi ft + \varphi_0)$ 中，“$2\pi ft + \varphi_0$”这个量就是简谐运动的相位，$t = 0$ 时的相位 φ_0 叫作**初相位**，简称**初相**。



（a）从平衡位置开始的简谐运动



（b）从正向最大位移处开始的简谐运动

▲ 图2-1-7

观察思考

1. 将两个相同的弹簧振子沿弹簧轴线向同一方向拉开相同的距离，然后同时释放振子。观察两个振子所做的简谐运动。

2. 将两个相同的弹簧振子沿弹簧轴线向同一方向拉开相同的距离，先释放其中一个弹簧振子，当它到达平衡位置时，再释放另一个。观察两个振子所做的简谐运动，观察同一时刻两个振子所处的位置。

3. 将两个相同的弹簧振子沿弹簧轴线向相反方向拉开相同的距离，然后同时释放。观察两个振子所做的简谐运动。

两个相同的弹簧振子，周期相同，把它们朝同一方向拉开相同的距离，然后同时放开，将看到它们同时到达同

侧的最大位移处，也同时经过平衡位置，它们总是“步调一致”地运动，两个振子在任一时刻都处于相同的状态。这样，在二者的 x 的表达式中，相位一定相同，我们说它们的振动同相。

把两个相同的弹簧振子，向相反方向拉开相同的距离，然后同时放开，将看到它们在各时刻的位移总是相反，同时到达相反一侧的最大位移处，也同时从相反方向经过平衡位置。这样在二者的 x 的表达式中，相位一定相差 π，我们说它们的振动反相。

当两个相同的弹簧振子，从平衡位置拉开后，相隔不同时间放开，它们的振动步调将不相同，即它们各时刻的相位也就不同，或者说二者振动具有**相位差**（phase difference）。

自我评价

1. 一个质点做简谐运动，振幅为 4 cm，频率为 2.5 Hz，设从该质点某次经过平衡位置时开始计时，求此后 2.5 s 末质点位移的大小和在此 2.5 s 内质点通过的路程。

2. 一个放在光滑水平面上的弹簧振子，第一次在弹簧被压缩 x 后开始振动，第二次在弹簧被压缩 $2x$ 后开始振动，求两次振动的振幅之比。

3. 一质点做简谐运动，先后以相同的速度依次经过 A、B 两点，历时 1 s。质点通过 B 点后再经过 1 s 又第二次经过 B 点。在这两秒内，质点通过的总路程为 12 cm，则质点的振动周期和振幅分别为多少？

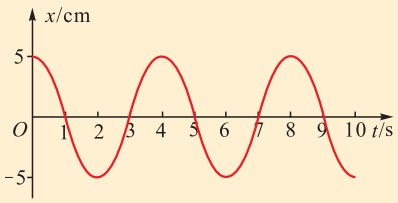
4. 质点做简谐运动的图像如图 2-1-8 所示，则下列说法中正确的是（　　）

A. 4 s 时速度为 0

B. 10 s 时振子的位移为 −5 cm

C. 前 10 s 内振子通过的路程为 50 cm

D. 5 s 时振子的速度方向为 $-x$ 方向



▲ 图2-1-8

发展空间

实验室

1. 利用频闪照相获得简谐运动的图像

类似于图 2-1-3，图 2-1-9 是用频闪照相机拍摄的一个由竖直弹簧吊着的振子振动的照片。

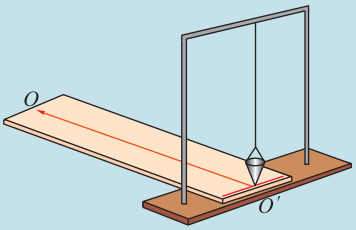
这种照相机能使底片在相等的时间间隔内水平移动相等的间距并多次曝光。因此，照片能显示出振子的位移随时间变化的图像。由照片可看出振子做简谐运动的图像是一条正弦（或余弦）曲线。由简谐运动图像，可得出物体振动的周期和振幅。



▲ **图2-1-9**　弹簧振子运动的频闪照片

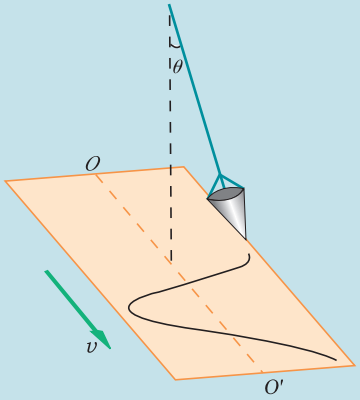
2. 用沙摆演示简谐运动的图像

如图2-1-10所示的装置是一个悬挂在固定支架上盛沙的漏斗。用细线悬挂的漏斗可看作单摆，漏斗相当于摆球。让它在一个固定的平面内做小角度摆动，这个摆动是简谐运动。在漏斗的下方水平放置一块画有直线OO'的薄板，静止时漏斗位于OO'正上方。



▲ **图2-1-10**　沙摆

如图2-1-11所示，使漏斗在一个固定的竖直平面内摆动，沿垂直于该平面的OO'方向匀速拉动薄板，观察从摆动的漏斗中漏出的细沙在板上形成的曲线，并思考以下问题。



▲ **图2-1-11**　演示简谐运动的图像

（1）不拉动木板时，让沙摆摆动起来，细沙的分布特点是直线还是曲线？两边的沙子多还是中间的沙子多？说明了什么？

（2）匀速拉动木板时，落在薄板上细沙的位置和各时刻摆球（漏斗）的位置有什么关系？

（3）细沙在薄板上形成什么形状的曲线？有什么意义？

（4）为什么要匀速拉动木板？

每一时刻都有细沙从漏斗中漏出，所以落在薄板上的细沙就记录下各个时刻摆球（漏斗）的位置。匀速拉动薄板，则以OO'表示的时间轴是均匀的，这样横轴上相同的长度就代表相等的时间间隔；垂直于OO'的坐标x表示的就是摆球在不同的时刻相对于平衡位置的位移，薄板上细沙形成的曲线就是沙摆做简谐运动时位移x随时间t变化的图像，称为简谐运动的图像（或称振动图像）。严格的理论和实验证明，所有简谐运动的图像都是正弦（或余弦）曲线。

走向社会

记录振动的方法在实际生活中有很多应用，如医院里的心电图仪、监测地震的地震监测仪等（图 2-1-12）。请查找资料了解记录振动的方法在实际生活中的应用。



（a）心电图仪



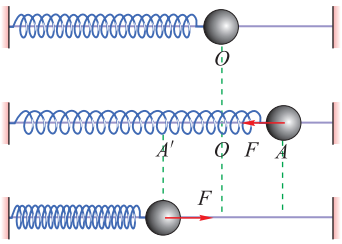
（b）地震监测仪

▲ **图 2-1-12**

2 简谐运动的回复力及能量

我们知道，物体的运动情况是由初速度和受力决定的，做简谐运动的物体受力有什么特点？能量转化遵循什么规律？

回复力



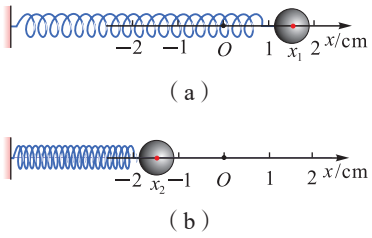
▲ 图2-2-1 水平弹簧振子

如图 2-2-1 所示，在光滑的水平杆上套着一个小球，弹簧一端固定，另一端连接在小球上，小球可以在杆上滑动。弹簧的质量比小球的质量小得多，可以忽略不计。这样的系统称为水平弹簧振子。

活动 | 简谐运动的动力学特征

振子静止在 O 点时，弹簧没有发生形变，长度为原长。把振子拉到平衡位置右方 A 点时，弹簧伸长量为 OA，放开振子，观察振子的振动，并回答下列问题。

1. 弹簧最大伸长的长度 OA 和最大压缩的长度 OA' 有什么关系？
2. 振子从 A 经 O 到 A' 和振子从 A' 经 O 到 A 所用的时间有什么关系？
3. 振子在往复运动过程中的受力有什么特点？
4. 振子在运动过程中，速度如何变化？加速度又如何变化呢？



▲ 图2-2-2 振子的位移

如图 2-2-2 所示，以平衡位置 O 为原点，建立 Ox 轴，向右为 x 轴的正方向。振子在任何时刻相对于 O 点的位移可用 x 表示，x 值的大小表示振子相对于 O 点的距离，也是弹簧的伸长（或压缩）量，x 值的正负表示位移的方向，即振子在 O 点的右侧还是左侧。根据胡克定律，振子所受的弹力的大小和方向可用 $F = -kx$ 来表示。

在振子的振动过程中，弹簧的弹力就是振子所受的合力，是它改变振子的运动状态。在图 2-2-2 中，当振子运动到 O 点右侧时，弹簧伸长，给振子一个向左的弹力；

当振子运动到 O 点左侧时，弹簧压缩，给振子一个向右的弹力。总之，当小球偏离平衡位置时，都会受到一个指向平衡位置的力，这个力叫作**回复力**（ restoring force ）。

弹簧振子所受的合力 F 正比于振子偏离平衡位置的距离 x，力的方向跟振子的位移方向相反，总指向平衡位置。在它的作用下，振子在平衡位置附近做简谐运动。我们可以得出结论：做简谐运动的物体受到总是指向平衡位置，且大小与位移成正比的回复力的作用。

回复力 $F=-kx$，可以称为简谐运动的动力学判据，只要证明了某振动系统满足这个关系，就可以证明它做的是简谐运动。

简谐运动的能量转化

观察思考

观察图 2-2-1 中振子运动速度的变化及弹簧长度的变化，由此分析系统能量的变化。

设 E_k、E_p 分别为弹簧振子在任一时刻（或任一位置）的动能和势能。当振子在平衡位置时，弹簧伸长量（或压缩量）为零，振子速度最大，此时弹性势能为零，动能有最大值为 $E_{kmax}=\frac{1}{2}mv_m^2$；振子相对平衡位置位移最大时，弹簧伸长量（或压缩量）最大，振子速度为零，此时弹性势能达最大值为 E_{pmax}，动能为零。弹簧的势能和振子的动能之和就是振动系统的总机械能 E，如果不考虑摩擦和空气阻力，振动系统的总机械能守恒，即在任一时刻（或任一位置）系统的总机械能都是相等的，等于振子处于平衡位置时或在离开平衡位置最大位移处的总机械能。

$$\begin{aligned}E&=E_p+E_k\\&=E_{pmax}\\&=E_{kmax}\\&=\frac{1}{2}mv_m^2\end{aligned}$$

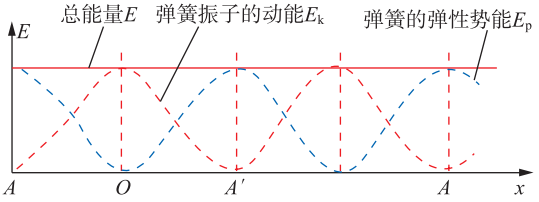
讨论交流

根据简谐运动的特征，分析图 2-2-1 的振子在一次全振动过程中，与弹簧振子有关的各物理量的变化。

以平衡位置 O 点为原点，水平向右为 x 轴的正方向，填表 2-2-1。

表2-2-1　弹簧振子振动过程中各物理量的变化

振子位置 / 物理量	A	$A\to O$	O	$O\to A'$	A'	$A'\to O$	O	$O\to A$
位移的方向	正	正	—	负	负	负	—	正
位移的大小	最大	减小	零	增大	最大	减小	零	增大
回复力的方向								
回复力的大小								
加速度的方向								
加速度的大小								
速度的方向								
速度的大小								
动能								
弹性势能								



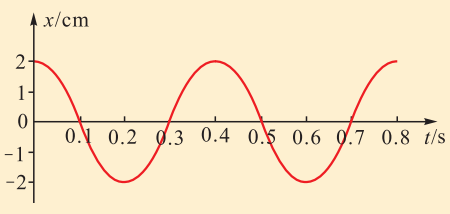
▲ **图2-2-3**　动能、弹性势能随位置变化的图像

图 2-2-3 为图 2-2-1 的弹簧振子在振动过程中各个位置的动能、弹性势能随位置变化的图像。

如果没有能量损失，物体将永远振动下去。实际上任何物体的振动过程都不可避免有能量的损失，简谐运动只是一种理想情况。

自我评价

1. 一质点做简谐运动的图像如图 2-2-4 所示，则下列结论中，正确的是（　　）



▲ **图2-2-4**

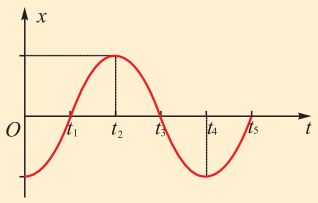
A. 质点速度最大而加速度为零的时刻分别是 0.1 s 、0.3 s

B. 质点速度为零而加速度为负方向最大值的时刻分别是 0 s、0.4 s

C. 质点所受的回复力方向由正变负的时刻是 0.3 s

D. 振动系统势能最大而加速度为正方向最大值的时刻是 0.3 s

2. 卡车在水平道路上行驶，货物随车厢做上下方向的简谐运动而不脱离车厢底板。设向上为正方向，其振动图像如图2-2-5所示。从图像中找出货物对底板的压力小于货物重力的时间段。



▲ 图2-2-5

3. 关于图2-2-1中弹簧振子的简谐运动，下列说法中正确的是（　　）

A. 振子在振动过程中，速率相同时，弹簧的长度一定相同

B. 振子从左端点向平衡位置运动的过程中，弹簧弹力始终做负功

C. 振子在振动过程中的回复力由弹簧的弹力提供

D. 振子在振动过程中，系统的机械能守恒

4. 下列关于振动物体所受回复力的说法正确的是（　　）

A. 回复力是指物体受到的指向平衡位置的力　　B. 回复力是指物体所受的合外力

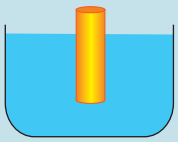
C. 回复力只可能是弹力　　D. 回复力可以做功

5. 从简谐运动受力角度分析说明图2-1-2中小球做的是简谐运动。

发展空间

实验室

观察一个竖直立在液体中的柱状浮体在液体中的上下振动（图2-2-6），试证明浮体做简谐运动。（忽略振动过程中所受的阻力）

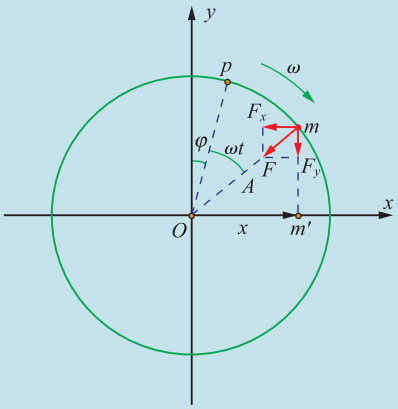

▲ 图2-2-6

课外阅览

匀速圆周运动与简谐运动

如前所述，做简谐运动的物体相对于平衡位置的位移 x 与时间 t 的关系可用正弦函数 $x=A\sin(\omega t+\varphi)$ 来表示。式中的 ω 在学习匀速圆周运动时出现过，表示匀速圆周运动的角速度。那么，简谐运动与匀速圆周运动有什么联系吗？

如图2-2-7所示，质点 m 从 p 点开始，以角速度 ω 绕圆心 O 做半径为 A 的匀速圆周运动，建立直角坐标系 xOy，Op 连线与 y 轴夹角为 φ。因为质点 m 经过 t 时间后其与圆心的连线 Om 和 y 轴的夹角等于 $\omega t+\varphi$，所以，质点 m 在 x 轴上的投影 m' 相对于圆心 O 的位移 x 就等于 $A\sin(\omega t+\varphi)$。即



▲ 图2-2-7

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

而质点 m 做匀速圆周运动所受的向心力

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

在 x 轴方向上的分力是

$$F_x=-m\omega^2A\sin(\omega t+\varphi)$$

其中负号表示方向沿 x 轴负方向。

综合可得：质点 m 在 x 轴所受的分力为

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

令 $k = m\omega^2$，则 $F_x = -kx$。这就是说，质点 m 在 x 轴方向上受到的外力与位移成正比且方向始终指向平衡位置。我们知道，如果受力有这样的特征，可以认为质点 m 在 x 轴上的分运动为简谐运动，其角频率 ω 等于匀速圆周运动的角速度，周期 $T=\dfrac{2\pi}{\omega}$。

3 单 摆

前面的“发展空间”中我们用沙摆描绘简谐运动的图像，一定会有人产生疑问：沙摆的运动是简谐运动吗?

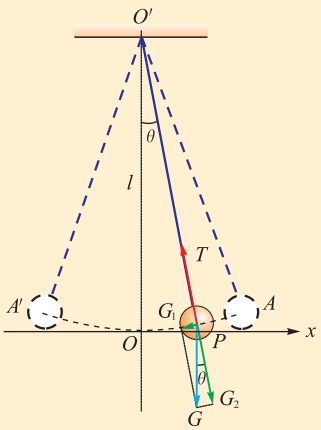
单摆及其运动规律

活动

在图 2-3-1 的装置中，若忽略悬挂小球的细线长度的微小变化和质量，且线长比球的直径大得多，这样的装置就叫作**单摆**（simple pendulum）。拉开摆球，使它偏离平衡位置一个小角度，然后放开，摆球将沿着以平衡位置 O 为中点的一段圆弧 $\overset{\frown}{AOA'}$ 做往复运动，这就是单摆的振动（图 2-3-2）。讨论下列问题。



▲ **图2-3-1** 悬线下小球的摆动



▲ **图2-3-2** 单摆振动过程中的受力情况

1. 单摆振动过程中，摆球在任意点 P 受几个力作用？分别是什么力？

2. 若摆球在 P 点时，悬线与竖直方向的夹角为 θ，则重力沿圆弧切线方向的分力为多大？

为了研究摆球的运动，我们来分析摆球在运动过程中处于某点 P 时的受力情况。它受两个力，其中细线拉力 T 沿线方向，重力 G 竖直向下。重力 G 可分解为沿圆弧切线方向上的分量 G_1 和沿摆线方向上的分量 G_2，如图 2-3-2 所示，重力沿圆弧切线方向的分力

$$G_1 = mg\sin\theta$$

这个力近似指向平衡位置 O，可以认为它就是使摆球振动的回复力。选取平衡位置为坐标原点，水平线为 x 轴，当偏角 θ 很小时（θ 为 5° 左右）弧线与 x 轴近似重合，$\sin\theta \approx \tan\theta \approx \dfrac{x}{l}$，所以单摆的回复力为

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

其中 l 为摆长（即 OO' 的长度），x 为摆球偏离平衡位置的位移，负号表示回复力 F 与位移 x 的方向相反。由于 m、g、l 对同一个单摆都有确定的数值，$\dfrac{mg}{l}$ 可以用一个常量 k 表示，上式可以写成

$$F = -kx$$

可见，在偏角较小的情况下，单摆摆球所受的回复力与偏离平衡位置的位移成正比，这与弹簧振子受的回复力形式相同。因此，单摆在偏角很小时的振动是简谐运动。

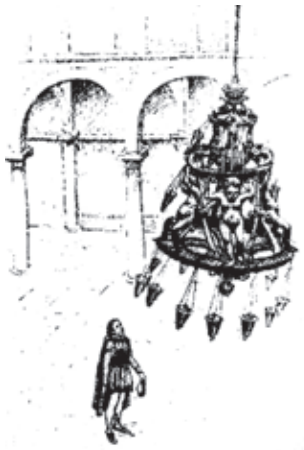
单摆振动过程中，重力势能和动能相互转化，理想情况下，机械能守恒。

讨论交流

1. 单摆也是理想化模型，建立模型的过程中保留的主要因素是什么？忽略的次要因素有哪些？

2. 有人说单摆的运动就是简谐运动，这句话对吗？为什么？

单摆的周期



▲ 图2-3-3 吊灯的摆动

有一天，伽利略来到了教堂，在教堂的大厅里，他看到一盏吊灯不停地摆动（图 2-3-3）。这件事引起了他的兴趣。他想，吊灯来回不停地摆动，这种摆动有什么规律呢？于是，他用脉搏计量时间，仔细观察吊灯的摆动。过了一段时间，他终于发现了吊灯摆动的规律。

活动

请你利用自己的脉搏和身边的器材重复伽利略的实验，你能得出什么规律？

1. 同一个摆振动的快慢情况如何？
2. 振动的快慢与摆锤的轻重有无关系？
3. 振动的快慢与摆线长短有关吗？

实验探究 | 单摆的周期和摆长的关系

1. 测量单摆周期

（1）想一想，单摆的周期可能与哪些因素有关？

（2）如何测出单摆的周期？

把单摆从平衡位置拉开一个很小的角度释放，使之做简谐运动。当摆球某次通过平衡位置时开始计时，用停表记下摆球通过平衡位置 n 次所用的时间 t（第一次过平衡位置的时间计为零），因为单摆完成一个周期的振动，经过平衡位置两次，所以有

$$t=\frac{n}{2}T,\ T=\frac{2t}{n}$$

2. 探究单摆周期 T 与摆长 l 的关系

（1）用刻度尺量出悬线长度 l'，用游标卡尺量出摆球的直径 d，则摆长

$$l=l'+\frac{1}{2}d$$

（2）改变单摆的摆长，测出不同摆长单摆的周期，自己设计一个表格，把所测数据填入表中。

（3）以 T 为纵轴，l 为横轴，根据表中数据，在坐标纸上描点，作出 T–l 图像。

（4）以 T^2 为纵轴，l 为横轴，根据表中数据，在坐标纸上描点，作出 T^2–l 图像。

分析 T^2–l 图像，你得到的周期和摆长的关系是什么？

惠更斯研究了单摆的振动，发现在偏角很小的情况下，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，跟振幅、摆球的质量无关，并且确定了单摆做简谐运动时的周期公式

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



▲ **图 2-3-4**　惠更斯（Christiaan Huygens，1629—1695）

1656年，荷兰物理学家惠更斯利用摆的等时性原理，制成第一座摆钟。惠更斯还发现了土星的卫星和光环，以及猎户星云等。他提出了“光是一种波动”的观点。

自我评价

1. 什么是单摆？
2. 为什么在偏角很小的情况下，单摆的摆动是简谐运动？请用数学知识推导。
3. 单摆做简谐运动时的周期与哪些物理量有关？
4. 频率为 0.5 Hz 的摆称为秒摆。在 g = 9.81 m/s^2 的地点，用小硬木球做的秒摆的摆长应是多少？把木球换成铜球，并把摆长缩短到原摆长的$\frac{1}{4}$，则此单摆的频率又是多少？
5. 一物体在某行星表面受到的万有引力是它在地球表面受到的万有引力的$\frac{1}{4}$，把在地球上走时准确的摆钟（设摆钟的周期与单摆简谐运动的周期相同）搬到此行星上，此钟分针走一整圈所经历的时间实际上是（　　）

A. $\frac{1}{4}$ h　　B. $\frac{1}{2}$ h　　C. 2 h　　D. 4 h

发展空间

课外阅览

不同摆角下单摆实际周期T与理论计算周期T_0的比较

根据理论可以计算出不同摆角的单摆振动周期T_0。从表2-3-1可以看出，当摆角小于5°时，单摆的实际周期T与理论计算周期T_0相差不超过万分之五；摆角等于10°时，单摆的实际周期T与理论计算周期T_0相差也只不过千分之二。在摆角较小的情况下，单摆与简谐运动规律基本符合。

表2-3-1

θ	5°	10°	15°	20°	30°	45°	60°
$\frac{T}{T_0}$	1.0005	1.0019	1.0043	1.0077	1.0174	1.0369	1.0719

4 实验：用单摆测量重力加速度

地球上不同位置的重力加速度g大小不同。从古到今，测量重力加速度g的方法有很多，可不可以利用单摆的运动规律来测量当地的重力加速度呢？

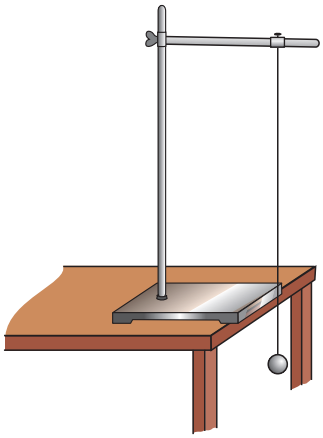
单摆做简谐运动的周期跟摆长和当地的重力加速度有关，跟摆球的质量和振动的幅度无关。根据单摆的周期公式$T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$，可得$g=\frac{4\pi^2 l}{T^2}$。只要测出摆长和周期，就可以计算出当地的重力加速度值。

讨论交流

1. 在制作单摆时，对摆线长度和摆球有什么要求？
2. 怎样才能使单摆做简谐运动？
3. 怎样才能准确地测出摆长？
4. 怎样才能较准确地测定单摆的周期？

准备了细线、带孔小球、铁架台、刻度尺、游标卡尺和停表等仪器后，我们可以按以下方案开展实验。

1. 让一根不易伸长的细线的一端穿过小球的小孔，然后打一个比小孔大的线结。线的另一端固定在铁架台上（图 2-4-1），把铁架台放在实验桌边，使铁夹伸到桌面以外，让摆球自由下垂。



▲ 图2-4-1

2. 用量程 1 m 的刻度尺量出悬线长度 l'，用游标卡尺量出摆球的直径 d，摆长 $l = l' + \frac{d}{2}$。

3. 把单摆从平衡位置拉开一个很小的角度（5°左右）后释放。为了使摆球只在一个竖直平面内摆动，要从静止释放摆球且不要旋转。从摆球某次通过平衡位置时启动停表开始计时，数出摆球通过平衡位置的次数 n（摆球第一次过平衡位置记为零）。用停表记下所用的时间 t，则单摆振动的周期 $T = \frac{2t}{n}$。

4. 根据单摆的周期公式，计算出重力加速度。

5. 改变摆长，多做几次实验，计算出每次实验得到的重力加速度值。

6. 把测得的数据和计算结果填入表 2-4-1 中，求出几次实验得到的重力加速度的平均值，即可把它看作本地区的重力加速度。

表2-4-1

实验次数	l'	d	$l' + \frac{d}{2}$	n	t	$\frac{2t}{n}$	g	$\bar{g}$
1							$g_1 = \frac{4\pi^2 l_1}{T_1^2}$ =	$\bar{g} = \frac{g_1 + g_2 + g_3}{3}$ =
2							$g_2 = \frac{4\pi^2 l_2}{T_2^2}$ =	
3							$g_3 = \frac{4\pi^2 l_3}{T_3^2}$ =	

7. 可以做更多次实验，由多组 T、l 值在坐标纸上作出 $T^2 - l$ 图像，利用图像的斜率，算出重力加速度 g。

讨论交流

1. 实验中，为了减小误差，我们还可以采取哪些措施？
2. 你能对该实验提出改进的方案吗？
3. 你还有其他更好的方案进行该实验吗？

自我评价

1. 某同学用单摆测量重力加速度，测得的结果比当地重力加速度的真实值偏小，他在实验操作上可能出现的失误是（　　）

A. 测量悬线长度作为摆长，没有加上摆球的直径

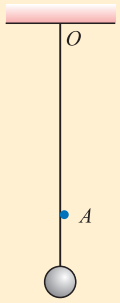
B. 选用摆球的质量偏大

C. 把在时间 t 内的 n 次全振动误认为 $n+1$ 次

D. 把在时间 t 内的 n 次全振动误认为 $n-1$ 次

2. 一个单摆的摆长为 l，摆球的质量为 m，它做简谐运动的振幅为 A，当摆球运动至平衡位置时速度大小为 v。如果将这个单摆的摆球质量增加为 $2m$，并使其在平衡位置的速度大小变为 $\frac{v}{2}$，以单摆的平衡位置所在的水平面为重力势能的参考面，则单摆的振动周期、振幅和机械能中有哪些量会发生变化？

3. 如图 2-4-2 所示，单摆摆长为 l，在悬点 O 正下方 A 点钉一颗钉子，其中 $AO=\frac{3}{4}l$，则此摆振动的周期为多少？



▲ 图2-4-2

5 阻尼振动　受迫振动

阻尼振动

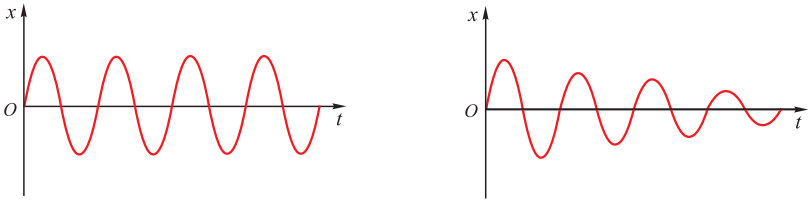
如图 2-5-1 所示，将钢尺的一端伸出桌子边缘，用一根手指按住钢尺，用另一只手拨动钢尺，观察钢尺振动幅度随时间的变化。

如图 2-5-2 所示，在鼓皮上放几颗米粒，猛敲一下鼓，观察米粒在鼓皮上的运动。

拨动钢尺，开始时振动幅度比较大，随后变弱。猛敲一下鼓皮，开始时鼓声很大，随后迅速变弱。在鼓皮上放一些米粒，开始时米粒跳动的幅度很大，随着鼓声变弱，米粒跳动的幅度变小，由此可知，鼓皮振动的振幅变小。弹簧振子和单摆在振动过程中振幅也会不断减小，这是因为它们不可避免地要受到摩擦及空气阻力等的作用。振动逐渐减弱，即振幅逐渐变小，振动能量逐步转变为其他能量，这种振动叫作**阻尼振动**（damped vibration）。

系统不受外力作用，只在自身回复力作用下的振动，称为**自由振动**（free vibration）。理想情况下（即不受任何阻力，没有能量损耗）自由振动的振幅保持不变，叫作**无阻尼振动**。自由振动的频率，叫作系统的**固有频率**（natural frequency）。固有频率由系统本身的特征决定。

图 2-5-3（a）（b）分别是无阻尼振动和阻尼振动的振动图像。



（a）无阻尼振动图像　　（b）阻尼振动图像

▲ **图2-5-3**



▲ **图2-5-1**　钢尺的振动逐渐变弱



▲ **图2-5-2**　鼓皮的振动逐渐变弱

受迫振动

一般情况下的振动，最终都要停下来，那么怎样才能使振动持续下去呢?

在儿童游乐场常看到这样的情况：每当孩子荡秋千荡到一端即将返回时，顺势轻推他一下，就可以使孩子保持荡来荡去的运动状态，甚至越荡越高。这是因为大人用周期性外力推动孩子，及时补充了损失的能量。

如果用周期性的外力作用于振动系统，补偿系统的能量损耗，使系统持续等幅地振动下去，这种周期性的外力叫作**驱动力**（driving force），系统在驱动力作用下的

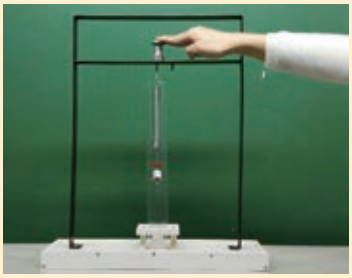
振动叫作**受迫振动**（forced vibration）。收音机喇叭纸盆的振动、钟表的摆动、洗衣机工作时机壳的振动等都是受迫振动。

观察思考

1. 在如图 2-5-4 所示的装置中，先把下面的量筒去掉，向下拉动金属球，然后放手，观察金属球自由振动的周期。

2. 如图所示，使振子小球位于量筒中，并往量筒内倒入一定量的油。分别用不同的频率周期性地按动支架上的按钮，观察金属球从静止开始振动的情况。

3. 由观察到的现象分析受迫振动的周期与驱动力周期的关系。



▲ **图2-5-4** 受迫振动

在以一定的频率按压按钮时，按钮给弹簧振子以周期性驱动力，使振子做受迫振动。可以看到，开始阶段振子的振动很不稳定，经过一定时间，振动稳定后振子做受迫振动的周期等于驱动力的周期。改变按压按钮的频率，重复几次实验，我们可以得到相同的结论。

后面所说的“受迫振动的振幅”，指的是做受迫振动的物体振动稳定后的振幅。

大量实验表明，物体做受迫振动时，振动稳定后的频率跟物体的固有频率没有关系，而是等于驱动力的频率。

共振

观察思考

如图 2-5-5 所示，在一根张紧的绳子上挂几个摆，其中 A、B、C 的摆长相等。以 A 摆为驱动摆，让 A 摆振动，观察其余各摆做受迫振动的振幅。思考以下问题：

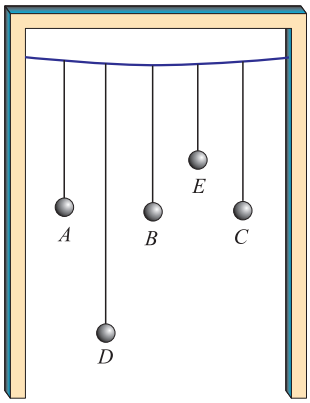
你认为驱动力频率与固有频率满足什么关系，才能使受迫振动的振幅最大？

图 2-5-5 中所挂各摆的固有频率取决于摆长，当 A 摆振动时，通过张紧的绳子给其他各摆施加驱动力，这个驱动力的频率等于 A 摆的频率，其余各摆在驱动力的作用下

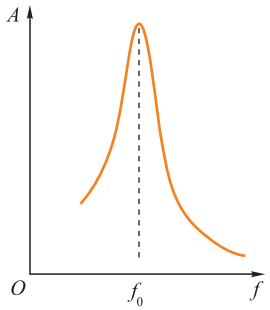
做受迫振动。在实验中可以看出：固有频率跟驱动力频率不同的各摆振幅较小；固有频率跟驱动力频率相等的 B 摆和 C 摆，振幅最大；固有频率跟驱动力频率相差最大的 D 摆，振幅最小。

驱动力的频率等于振动物体的固有频率时，受迫振动的振幅最大，这种现象叫作**共振**（resonance）。

图 2-5-6 表示受迫振动的振幅 A 与驱动力频率 f 的关系。可以看出：当驱动力的频率 f 等于振动物体的固有频率 f_0 时，振幅最大；驱动力的频率 f 跟固有频率 f_0 相差越大，振幅越小。



▲ **图2-5-5**　研究摆的共振



▲ **图 2-5-6**　受迫振动的振幅 A 与驱动力频率 f 的关系，其中 f_0 为振动物体的固有频率

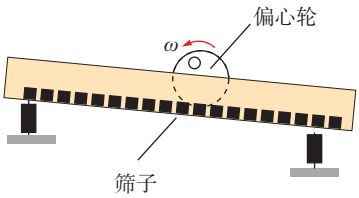
讨论交流

图 2-5-4 的实验中，金属球在什么情况下振动的幅度最大？

共振的应用和防止

共振现象很普遍，有时人们应用共振，有时人们避免共振。

把一些不同长度的钢片安装在同一支架上，可以制成测量机器转速的转速计。用这种转速计与转动着的机器紧密接触，机器的振动引起转速计的轻微振动，这时固有频率与机器运转频率一致的那个钢片就会发生共振，有较大的振幅，从刻度上读出这个钢片的固有频率，就可以知道机器的转速。共振筛广泛应用于筛分各种粒度的物料（图 2-5-7），当电动机带动偏心轮转动的频率等于筛子的固有频率时，发生共振，从而可以消耗较少的能量而得到更好的效果。



▲ **图2-5-7**　共振筛

在某些情况下，共振可能造成危害。火车过桥时，车轮对铁轨接头处有节奏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的固有频率，就可能使桥梁的振幅显著增大，致使桥梁断裂。1831 年，一队士兵以整齐的步伐通过英国曼彻斯特附近的布劳顿吊桥时，由于踏步节奏一致，其频率与桥的固有频率相同，使桥发生共

振而断裂。1849 年，一支法国军队通过昂热市曼恩河上的一座大桥时，也发生了同样的悲剧。因此，部队过桥要用便步，以免产生周期性驱动力。

轮船航行时，如果所受的波浪冲击力的频率接近轮船的固有频率，可能会使轮船摇摆角度过大而倾覆。这时可以改变轮船的航向与速度，使波浪冲击力的频率远离轮船摇晃的固有频率。

机器运转时，零部件的运动（如活塞的运动、轮的转动）会产生周期性的驱动力。如果驱动力的频率接近机器本身或机器支座的固有频率，就会发生共振，使机器或支座受到损坏。这时要采取措施，如调节机器的转速，使驱动力的频率远离机器或机器支座的固有频率。同样，厂房建筑物的固有频率也不能处在机器振动的频率范围之内。

总之，在需要利用共振时，应使驱动力的频率接近或等于振动系统的固有频率；在需要防止共振时，应使驱动力的频率远离振动系统的固有频率。

自我评价

1. 有人说：“由于摩擦阻力和空气阻力是不可完全避免的，因此无阻尼振动是不存在的。”你同意这个说法吗？为什么？

2. 如果把人体作为一个有弹性的整体来看，在水平方向的固有频率为 3 ~ 6 Hz，竖直方向的固有频率为 4 ~ 8 Hz。拖拉机驾驶员，风镐、风铲、铆钉机等机械的操作员在工作时都会受到周期性的驱动力，为保障操作员的安全与健康，有关部门做出规定：用手操作的各类振动机械的频率必须大于 20 Hz，请说明这样规定的原因。

3. 实际的振动系统做阻尼振动时，它的（　　）

A. 位移越来越小　　B. 振幅越来越小

C. 动能越来越小　　D. 机械能越来越小

发展空间



课外阅览

共振与航天、军事

发射载人宇宙飞船时，要考虑共振可能给宇航员造成的伤害。因为人的内脏和身躯的固

有频率一般在几赫兹范围内，而大型火箭发射时要产生较强的超低频振动，这种振动形成的驱动力容易使人体器官发生共振，造成人体器官的损伤（图2-5-8）。



▲ 图2-5-8



▲ 图 2-5-9　在人类早期的航天发射中，“振颤”是个大敌

航天发射本身就是个相当复杂的系统工程，发射过程中涉及的因素很多。据不完全统计，有 7 成的航天发射失败都是在发射过程中产生的，其中有 4 成来自“振颤”。

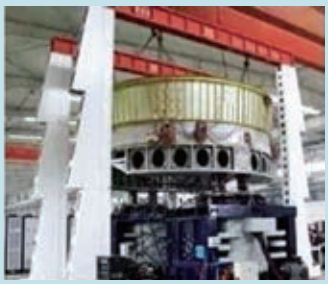
振颤就是高频的抖动，这个抖动可是个大事，控制不好非常容易造成火箭损毁，导致卫星甚至载人航天器的发射失败。在人类早期的太空探索中经常出现这样的问题。美国的“红石”火箭在最初设计时就出现过多次在风洞中振颤强烈的情况，原因就是发生了共振，最终的结果就一个：火箭解体（图 2-5-9）。

可见振颤对航天的威胁相当明显。在设计弹道导弹时人们也遇到过振颤的问题。在德国人早期设计 V-2 弹道导弹的时候，类似的情况导致 V-2 导弹凌空爆炸。

振颤现象不仅会在航天发射中出现，小到一辆小轿车的抗颠簸，大到高速铁路车厢和车头，甚至是预警机的大型雷达罩都需要经过振颤测试，否则会产生不堪设想的后果（图 2-5-10）。



超大型构件



火箭组件



动车车头



弹头

▲ 图2-5-10　需要经过振颤测试的核心部件

感悟 · 启迪

1656年，荷兰物理学家惠更斯利用伽利略发现的摆的等时性原理发明了摆钟。从此，对时间这个基本物理量的测量翻开新的篇章。几百年来，计时技术经历了从机械摆、电子钟到原子钟的不同发展阶段。当今最精密的计时工具是铯原子钟，其精确度达到每十万年误差不超过1s。高精度计时技术有着广泛的应用，比如它在全球定位系统中扮演着重要的角色，可以说它在当代科技发展中的地位不可或缺。

科学计时技术的基本原理是运动的周期性，这使我们不由得去思考：这一技术为什么诞生在经典力学发展的时代？又为什么随着现代物理学的发展而不断进步？

反思 · 小结 · 交流

• 学后反思

1. 如何将弹簧振子的运动抽象为简谐运动？
2. 如何将单摆的运动抽象为简谐运动？
3. 通过图像来描绘两个物理量之间的关系，优点是什么？

• 自主小结

1. 描述简谐运动的物理量有哪些？与描述直线运动和圆周运动的物理量进行比较。
2. 如何用公式描述简谐运动的规律？如何用图像描述简谐运动的规律？
3. 什么是阻尼振动？它的特点是什么？
4. 什么是自由振动？什么是受迫振动？
5. 什么是共振？举例说明生活中对共振的应用与防止。

• 相互交流

1. 谈谈振动这种运动形式的普遍性。
2. 说说如何通过沙摆获得简谐运动的图像，体会这种方案的巧妙之处。

本章复习题

1．关于简谐运动物体对平衡位置的位移、速度、加速度间的关系，下列说法正确的是（　　）

A．位移减小时，加速度增大，速度增大

B．位移方向总是与加速度方向相反，与速度方向相同

C．物体运动方向指向平衡位置时，速度方向与位移方向相反；背离平衡位置时，速度方向与位移方向相同

D．物体向平衡位置运动时做加速运动，远离平衡位置时做减速运动

2．关于简谐运动各物理量，下列说法正确的是（　　）

A．振幅就是位移的最大值

B．周期和频率的乘积为一常数

C．振幅越大，周期越大

D．振幅越小，频率越小

3．做简谐运动的物体，当物体的位移为负值时，下列说法正确的是（　　）

A．速度一定为正值，加速度一定为负值

B．速度一定为负值，加速度一定为正值

C．速度不一定为正值，加速度一定为负值

D．速度不一定为负值，加速度一定为正值

4．一弹簧振子分别拉离平衡位置 5 cm 和 1 cm 处放手，使它做简谐运动，求前后两次：

(1) 振幅之比是多少？

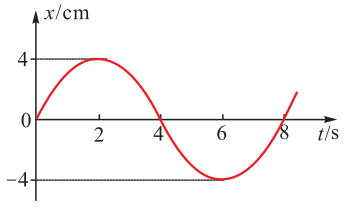
(2) 周期之比是多少？

(3) 回复力的最大值之比是多少？

(4) 最大加速度之比是多少？

5．如图所示是某质点做简谐运动的图像。

(1) 该振动的振幅是多少？0 ~ 4 s 内质点通过的路程是多少？t = 6 s 时质点的位移是多少？



▲ 第5题图

(2) 该质点的振动方程可以写作

$$x = 4\cos(\omega t+\varphi_0)\ \text{cm}$$

其中的 ω 和 φ_0 各是多少？

6．一单摆周期 T_0 = 2 s，则下列情况下它的周期 T 将如何变化？

(1) 摆长变为原来的 $\frac{1}{4}$；

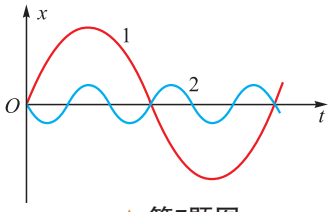
(2) 摆球质量减半；

(3) 振幅减半。

7．两个摆长分别为 l_1 和 l_2 的单摆，做小角度的振动，它们的振动图像分别如图中的 1 和 2 所示，可知 $l_1 : l_2$ 为（　　）

A．1 : 3　　B．1 : 9

C．3 : 1　　D．9 : 1



▲ 第7题图

8．关于水平放置的弹簧振子做简谐运动时的能量，下列说法正确的是（　　）

A．等于平衡位置时振子的动能

B．等于达到最大位移时系统的弹性势能

C．等于任意时刻振子动能和弹性势能之和

D．位移越大振动能量也越大

9．在用单摆测量重力加速度的实验中，思考以下问题：

(1) 测量摆长时应注意哪些细节？

(2) 不直接用停表测一个周期，而是测 30 ~ 50 个周期而后取平均值，这样做有什么好处？

10．下列说法不正确的是（　　）

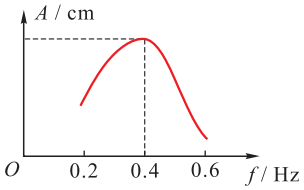
A．受到阻力作用的振动一定是阻尼振动

B．阻尼振动的振幅逐渐减小，机械能逐渐减小

C．受迫振动的振幅越来越大

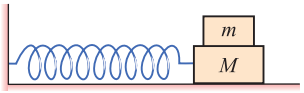
D．受迫振动稳定后的频率与振动系统的固有频率无关

11. 如图所示为某单摆的共振曲线，图中横轴表示周期性的驱动力的频率，纵轴表示单摆的振幅，求此单摆的摆长。($g = 9.8\ \mathrm{m/s^2}$)



▲ 第11题图

12. 在如图所示的系统中，弹簧的劲度系数 $k = 39.2\ \mathrm{N/m}$，与弹簧相连的物块 M 质量为 0.2 kg，置于其上的物块 m 质量为 0.1 kg，两物体之间的最大静摩擦力 f_m 等于 0.196 N，M 与水平支撑面之间的摩擦可以忽略，若要使两物块一起（两物块之间无相对滑动）做简谐运动，则可能达到的最大振幅有多大？



▲ 第12题图

居高声自远，非是藉秋风。

——虞世南《蝉》



第三章

机 械 波

主题一　认识机械波

- 机械波的形成和传播
- 波速与波长、频率的关系
- 波的图像

主题二　波的特性

- 波的反射与折射
- 波的干涉与衍射
- 多普勒效应

带操是十分优雅的艺术体操项目，带的一端固定在棍上；项目由绕环、螺形、抛接、摆动、跳跃、平衡、转体、8字以及蛇形等动作编排而成。绸带的飘动令运动员焕发高贵的气质，五彩的绸带与运动员相得益彰，跃动的色彩让观众极尽视觉的享受。

本章我们研究绸带运动中的一种简单的情况，即持绸带的手在某一位置附近做简谐运动时绸带运动的规律。

1 机械波的形成和传播



▲ 图3-1-1 水波

体操运动员手持短棒抖动绸带的一端，绸带形成波浪状（章首图）；向平静的水面扔一块石头，水面上会荡起圈圈涟漪，以石头落水处为中心，起伏的波纹向四周延展，形成水波（图 3-1-1）；拨动琴弦，弦的振动在周围的介质中形成声波（图 3-1-2）。绳波、水波、声波等都是机械波。



（a）小提琴　（b）二胡　（c）钢琴

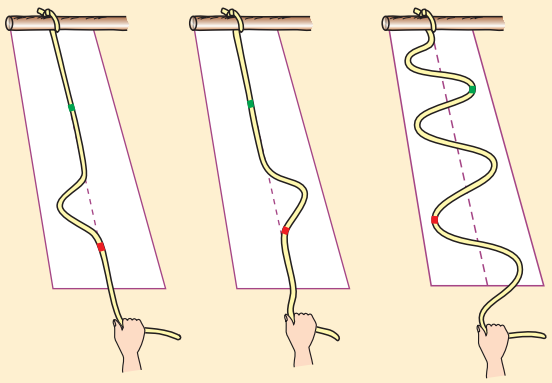
▲ 图3-1-2 不同乐器发出的声波

机械波的形成和传播

机械波是怎么形成和传播的呢？

活动

我们可以将章首页带操中绸带的运动简化处理。如图 3-1-3 所示，准备一根长约 10 m 的软绳并放置在水平面上，将绳上的两点做上不同颜色的标记。固定一端，用手握住绳的另一端，拉直软绳。



（a）　（b）　（c）

▲ 图3-1-3 绳波

1. 如果手不做左右振动，绳子处于什么状态？

2. 手向左抖动一次和向右抖动一次，并立即复原，你看到了什么现象？

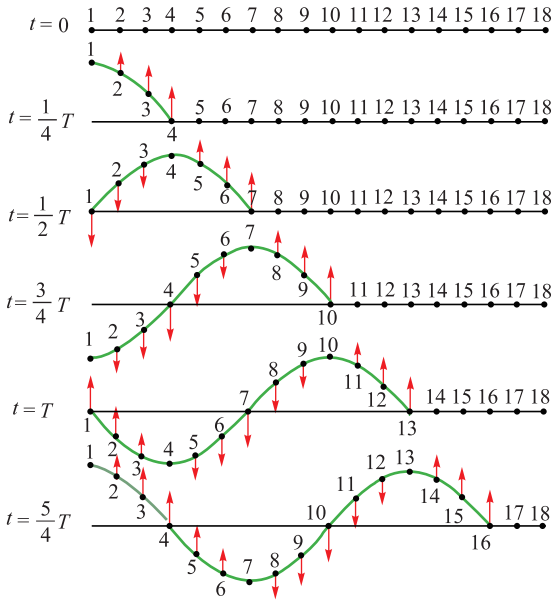
3. 手连续左右抖动，你看到了什么现象？大致画出在某一时刻软绳的形状。

4. 软绳一端的振动是怎样传到绳的另一端的？绳上有标记的两点怎样运动？随波前进吗？

5. 手以不同频率和不同幅度连续左右抖动，绳子的形状有什么区别？

观察中我们可以发现，当手向左抖动一次时，一个向左凸起的形状沿绳向另一端传去；当手向右抖动一次时，一个向右凸起的形状沿绳向另一端传去；当手左右连续抖动时，凸凹相间的形状沿绳向另一端传去。绳一端的振动为什么会沿绳向另一端传播呢？

可以用图 3-1-4 来说明绳波的形成过程，绳上的各小段可以看作质点，在图中分别用 1、2、3…表示。由于绳的各部分之间有弹力作用，所以当手抖动绳的一端，紧靠这一端的质点 1 向上运动时，它就会带动质点 2 向上运动，质点 2 又带动质点 3，依次传递下去。当手向下拉动质点 1 回到原来位置时，它也要带动质点 2 回来，此后质点 3、质点 4 也将被依次带动回到各自原来的位置。每一个质点都在重复绳端的振动，后一个质点的运动状态总是滞后于前一个质点的运动状态。结果手抖动引起的振动就不限于绳的这一端，而是沿绳向另一端传去，振动状态在绳上的传播就形成了波。



▲ **图3-1-4**　绳波的形成

一切机械波都是振动状态在某些物质中的传播。对绳一端的抖动依次引起了绳中的各质点的振动，振动在绳中传播形成了绳波；对水面某处的扰动由近及远引起了水面各部分的振动，此振动在水面传播形成了水波；击鼓时，鼓面的振动引起了周围空气的振动，此振动在空气中传播

形成了声波。绳、水、空气等能够传播振动的物质，叫作**介质**（medium）。机械振动在介质中的传播就形成了**机械波**（mechanical wave）。振动传播的方向就是波的传播方向。产生初始振动的部分通常叫作波源。

从绳波中可以看到，软绳上有标记的两质点只是在各自的平衡位置附近左右振动，并没有随波的传播而向前移动。因此机械波是机械振动这一运动形式（包括波源的振动信息）的传播，介质本身并没有沿着波的方向发生迁移。

当振动在绳中传播时，各质点由于左右运动而具有动能；同时由于形变，又具有弹性势能，这样随着振动的传播，波源的能量就被传递出去。所以机械波的传播也是机械能的传播，波是传递能量的一种方式。

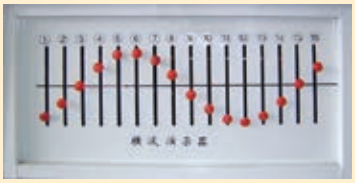
横波与纵波

按介质中质点的振动方向和波的传播方向关系的不同，常将波分为横波和纵波。

观察思考

1. 观察横波演示器所模拟的横波的发生情况［图 3-1-5（a）］，记下你的观察结果。

2. 观察纵波演示器所模拟的纵波的发生情况［图 3-1-5（b）］，记下你的观察结果。

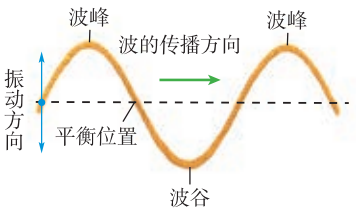


（a）横波演示器



（b）纵波演示器

▲ **图3-1-5**



▲ **图3-1-6** 横波

若介质中质点的振动方向和波的传播方向垂直，这种波称为**横波**（transverse wave）。例如在绳上传播的波就是横波（图 3-1-6）。

横波的波形是凹凸相间的，凸起来的最高处叫波峰，凹下去的最低处叫波谷。当波源的连续振动在介质中传播

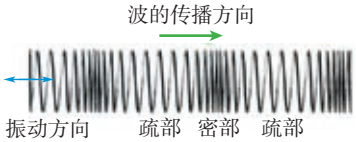
时，就形成了波峰和波谷相间的完整的波形。由于相邻质点不断地连续上、下振动，波峰和波谷的形状将不断向前推进。

介质能传播横波的必要条件是介质内各质点间存在着横向的作用力。气体和液体内部，各质点间没有这种横向作用力，因此在气体和液体内部不能传播横波。

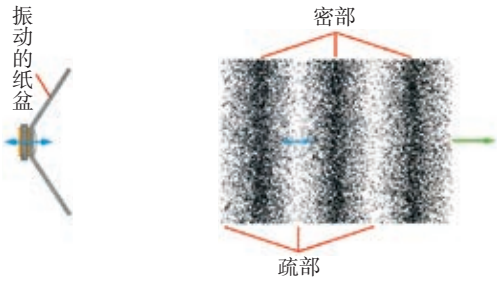
若介质中质点的振动方向和波的传播方向平行，这种波称为**纵波**（longitudinal wave）。例如沿弹簧轴线方向连续推拉弹簧的一端，就可在弹簧上形成纵波（图 3-1-7）。介质能传播纵波的必要条件是介质内各质点间存在着纵向的作用力，各种弹性介质都能传播纵波，例如在空气以及水中传播的声波就是纵波（图 3-1-8）。

纵波介质密集和稀疏相间。介质中质点分布密集的部分叫作密部，质点分布稀疏的部分叫作疏部，这种质点分布的疏密状态随时间沿波的前进方向传播出去。

自然界中很多波既含有横波成分，也含有纵波成分，例如沿地壳传播的地震波、沿水面传播的水面波都是如此。



▲ **图3-1-7**　纵波



▲ **图3-1-8**　在空气中传播的声波

自我评价

1. 关于振动和波的关系，正确说法是（　　）
   A. 物体做机械振动，一定会产生机械波
   B. 介质中有机械波传播，其中质点一定在做机械振动
   C. 如果波源停止振动，在介质中传播的波动也立即停止
   D. 介质中每一个质点开始振动的方向一定和波源开始振动的方向相同
2. 关于机械波的概念，下列说法正确的是（　　）
   A. 质点振动的方向总是垂直于波传播的方向

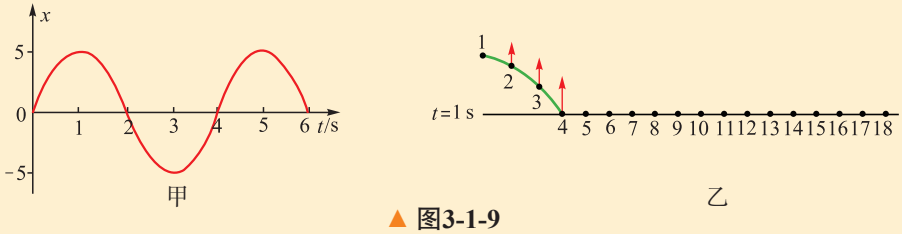
B. 横波和纵波可同时存在于介质中

C. 机械波传播能量，也传递振动信息

D. 横波中质点不随波迁移，纵波中质点随波迁移

3. 为什么机械波在传播过程中，介质中各质点的振动频率与波源振动的频率相同？

4. 如图3-1-9甲所示为波源的振动图像，图乙为均匀介质中同一条直线上等间距的质点在$t = 1$ s时的振动状态，其中质点4刚开始振动。请画出$t = 5$ s时质点的振动状态。



▲ 图3-1-9

发展空间

实验室

人　浪

请一组同学手挽手站成一行，周期性地按顺序逐个相继下蹲和站起，模拟波的形成与传播。另一组同学仔细观察并思考以下问题：

1. 同学们的下蹲和站起的运动整体上形成了什么？

2. 在“波”的传播过程中，每个同学所站的位置发生移动了吗？

3. 为什么说这种“人浪”只是模拟波的形成与传播？它与真正的机械波有什么不同？

2 波速与波长、频率的关系

我们已经知道描述振动的物理量有振幅、周期、频率、相位等，那么描述机械波有哪些物理量呢？

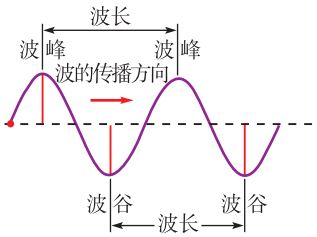
波长

在第 1 节图 3-1-4 中，连续振动的波源（质点 1）完成一次全振动（一个周期）后，振动就从质点 1 传到了质

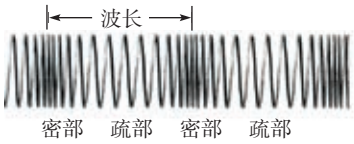
点 13，此后这两个质点的振动状态将保持一致。或者说，它们的振动是“同相”的，在这两个质点之间形成了一个“完整的波”。随着波源的继续振动，一个个这样“完整的波”不断产生，并向前传播。

沿波的传播方向，任意两个相邻的同相振动的质点之间的距离（包含一个“完整的波”），叫作波的**波长**（wavelength），常用 λ 表示。

横波中任意两个相邻的波峰或波谷的距离就是横波的波长，如图 3-2-1 所示。同样，纵波中任意两个相邻的密部或疏部之间的距离就是纵波的波长，如图 3-2-2 所示。



▲ **图3-2-1**　横波的波长



▲ **图3-2-2**　纵波的波长

观察思考

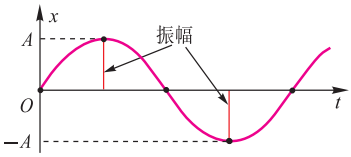
在图 3-1-4 中，与振动质点 2、6 相邻的做同相振动的质点各是哪个？

振幅

在波动中，各质点离开平衡位置的最大距离，即其振动的振幅，也称为波的振幅，如图 3-2-3 所示。

机械波是机械振动的传播，振动的振幅越大，振动的能量就越大，波所传播的能量也就越大。因此，波的振幅大小反映波所传播能量的大小。

只沿一个方向传播的简谐波，沿传播方向上各质点的振幅都相等。



▲ **图3-2-3**　波动中某一质点的振动图像

这种只沿一个方向传播，各质点振幅都相等的波称为**平面波**，或**一维简谐波**（本章第 3 节“波的图像”）。

在各向同性（《物理　选择性必修　第三册》第二章第 1 节）介质中，如果波向各个方向传播，就形成**球面波**。在球面波中，沿任一传播方向，质点的振幅都是依次减小的。想一想，这是为什么？

频率

波在传播过程中，介质中各质点振动的频率都相同，这个频率也称为波的频率。波的频率在数值上也等于单位时间内通过某点的“完整的波”的数目。

波的频率等于波源振动的频率，与介质的种类无关。在前面的学习中，我们已经知道频率 f 与周期 T 的关系为

$$f=\frac{1}{T} \text{ 或 } f\cdot T=1$$

讨论交流

想一想，在第 1 节的“活动”中：

1. 怎样才能增大绳波的频率？
2. 波长除了与波的频率有关之外，还可能与什么因素有关？

波速

在波源振动的一个周期 T 内，振动向外传播了一个波长 λ 的距离，所以波的传播速度为

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

根据周期和频率的关系，上式可写为

$$v=\lambda f$$

想一想，对同一个声音，我们隔着墙听和直接听，音调会有区别吗？为什么？

机械波在介质中的传播速度由介质的性质决定，在同一均匀介质中，机械波的传播速度不变，波长与频率成反比；在不同的介质中（或在不同的条件下），机械波的传播速度一般不同。当机械波从一种介质进入另一种介质时，波的频率保持不变，波长发生改变。

沿绳传播的波，其波速除与绳的材质有关外，还与绳的张紧程度有关。

例题示范

问题　如图 3-2-4 所示，S 点是波源，其振动频率为 100 Hz，所产生的横波向右传播，波速为 80 m/s，P、Q 是波传播方向上的两个质点，已知 SP = 4.2 m，SQ = 5.4 m。当 S 通过平衡位置向上运动时，下列说法正确的是（　　）

A. P 在波谷，Q 在波峰

B. P 在波峰，Q 在波谷

C. P、Q 都在波谷

D. P、Q 都在平衡位置



▲ 图3-2-4

分析　根据波的传播方向和波速，可以判断不同时刻各质点的位置。

解　由于振动周期 $T=\frac{1}{f}$ = 0.01 s，所以可算得波从 S 传到 P 所需时间为 $t_P=\frac{SP}{v}=\frac{4.2}{80}\text{ s}=0.0525\text{ s}=5\frac{1}{4}T$，即波从 S 传到 P 有 $5\frac{1}{4}$ 个波长。因为此时 S 在平衡位置且向上运动，故 P 在波谷处。

同理可算得波从 S 传到 Q 所需时间为 $t_Q=\frac{SQ}{v}=\frac{5.4}{80}\text{ s}=0.0675\text{ s}=6\frac{3}{4}T$，即波从 S 传到 Q 有 $6\frac{3}{4}$ 个波长，因为此时 S 在平衡位置且向上运动，故 Q 在波峰处。故答案 A 正确。

拓展　平衡位置相差 $\frac{1}{4}$ 个波长的质点，振动的相位差是怎样的？参考图 3-1-4 的绳波，你可能就明白了。

自我评价

1. 在波动中，每个质点的振动周期（或频率）由什么决定？单位时间内通过介质中任意点的完整的波的个数由什么决定？

2. “什么是波长”，可以有哪几种说法？

3. 机械波的波速是由什么决定？波长与哪些因素有关？

4. 平静的湖面上传播着一列水面波，把它近似看作横波，在波的传播方向上有两个小木块，它们相距10 m，且随波上下运动。测得两小木块每分钟均上下20次，当甲木块在波峰时，乙木块恰在波谷，且两木块间有两个波峰。则此水面波的波长、波速和频率各是多少？（用分数表示）

3 波的图像

振动图像可以直观、形象地表示振动质点的位移随时间变化的规律。波是否也可以用图像来描述？它是描述哪一个物理量随哪一个物理量变化的规律呢？

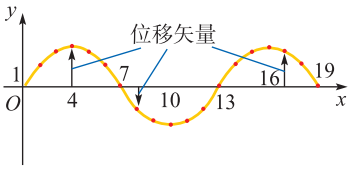
横波的图像

我们用手振动绳子的一端形成绳波，绳在某一时刻的形状如图 3-3-1 所示。在波传播的过程中，介质中离波源远近不同的各质点都在其平衡位置附近振动。若以横坐标 x 表示在波的传播方向上各质点的平衡位置，纵坐标 y 表示某时刻各个质点偏离平衡位置的位移，规定位移的方向向上为正值，向下为负值，则在 xOy 坐标平面上，描出该时刻各质点的位置（x，y），用平滑曲线将各点连接起来，就得到了这一时刻横波的图像，如图 3-3-2 所示。波的图像直观地表示了各振动质点在某一时刻的位置，波的图像有时也称为波形图，简称**波形**（waveform）。

波形图是正弦曲线的波，称为**正弦波**，又叫作一维简谐波。



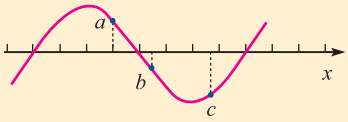
▲ **图3-3-1** 绳波的形状



▲ **图3-3-2** 波的图像

活动

设波沿 x 轴正方向以速度 v 传播，$t = 0$ 时刻其波形如图 3-3-3 所示，请画出 $t = \frac{5}{6}T$ 时刻的波形图，并判断此时刻 a、b、c 三个质点的振动方向。



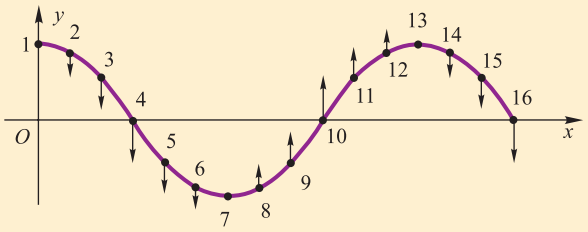
▲ **图3-3-3**

可以看到，波的图像与波形图还是有一些区别的：波的图像是一种物理图像，纵轴表示沿波的传播方向上各质点的位移，横轴表示质点的平衡位置与波源的距离，两个坐标轴的标度不一定相同。波形图则是实时拍摄下来的波的形状，其纵、横坐标的标度总是相同的。

如果说横波的图像与波形图很相似的话，那么纵波的图像与波形图就大不一样了。

观察思考

在图 3-3-4 中，已知波的图像中各质点的振动方向，试判断波沿什么方向传播。



▲ 图3-3-4　横波的图像及各质点的运动方向

例题示范

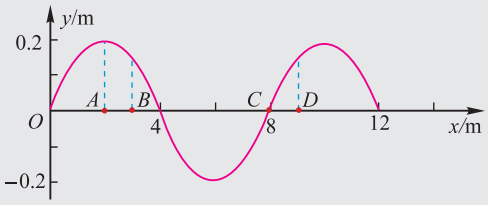
问题　一列简谐横波在某一时刻波的图像如图 3-3-5 所示。

（1）这列波的振幅和波长分别是多少？

（2）已知波向右传播，说明平衡位置分别为 A、B、C、D 的 4 个质点在此时刻的振动方向。

（3）若波速为 240 m/s，求波的频率。

（4）画出再经过 $\frac{T}{4}$ 时的波的图像。



▲ 图3-3-5

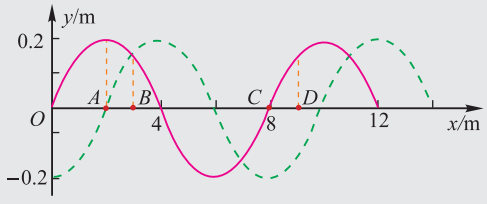
分析　已知波向右传播，说明右边的质点比它左边相邻的质点要滞后一些，这是解答第（2）题和第（4）题的出发点。

解　（1）由图像可知振幅为 0.2 m，波长为 8 m。

（2）根据波沿 x 轴向右传播，可以知道质点 B 的振动比左边的质点 A 要滞后一些，此时刻质点 A 已经到达上方最大位移处，所以质点 B 此时刻的运动方向是向上的。同理，可以判断 C、D 此时刻运动方向是向下的。

（3）由 $v=\lambda f$ 得

$$f=\frac{v}{\lambda}=\frac{240}{8}\text{Hz}=30\text{ Hz}$$



▲ 图3-3-6

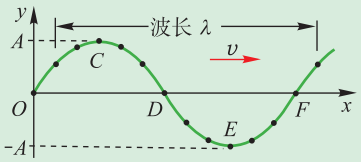
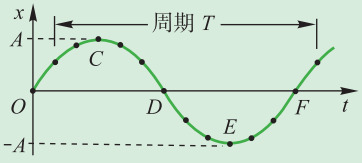
（4）由于波向右传播，把此时刻波的图像沿 x 轴向右平移 $\frac{\lambda}{4}$，即为再经过 $\frac{T}{4}$ 时波的图像，如图 3-3-6 中虚线所示。

拓展 已知某时刻的波的图像以及波的传播方向，画出经过某段时间后的波的图像，还有另一种方法：在确定相邻两质点的超前与落后关系的基础上，明确各质点此时刻的运动方向，分别找出它们经过那段时间后的位置，就可画出所要求的波的图像了。

波的图像与振动图像的比较

一维简谐波的图像和简谐运动的振动图像各自表达的意义不同，通过前面的学习，我们可以用表 3-3-1 来比较它们的异同。

表3-3-1 波的图像与振动图像的比较

	波的图像（一维简谐波）	振动图像（简谐运动）
研究内容	波传播过程中某一时刻在介质中各质点相对于平衡位置的位移	某一质点振动的过程中，各时刻相对于平衡位置的位移
图像形状	正弦（或余弦）曲线	正弦（或余弦）曲线
横坐标	表示在波的传播方向上各质点的平衡位置	表示时间 t
纵坐标	某一时刻各质点偏离平衡位置的位移	某一质点各时刻偏离平衡位置的位移
沿横轴方向相邻的两个状态总一致的点之间的距离的含义		

此外，在能量的变化上波和振动有着更深层次的区别：简谐运动的振动图像表示的是同一个质点位置随时间的变化规律，它位于平衡位置时，动能最大而势能为零；位于最大位移处时，动能为零而势能最大，动能和势能相互转化，机械能守恒。一维简谐波表示的是沿波传播方向上各质点在同一时刻的位置，位于平衡位置的质点（实际是很小范围内的众多质点，下同）动能最大，同时形变也最大，即弹性势能也最大；位于最大位移处的质点，动能为零，同时形变也最小，即弹性势能

也最小。也就是说，在波的传播过程中，动能和势能同时变成最大或最小；而下一时刻，能量最大或最小的位置就发生了移动，能量由波源处向外传播。

自我评价

1. 在波的传播方向上，距离波源不同处的各个质点在同一时刻相对平衡位置的位移，可以用波的图像来表示。在如图 3-3-2 所示的 xOy 坐标系中，x 坐标和 y 坐标各表示什么？能表示波传播能量大小的物理量是什么？

2. 一列横波沿 x 轴传播，在某时刻的波形如图 3-3-7 所示，根据此时质点 F 的运动方向，判断此横波的传播方向。

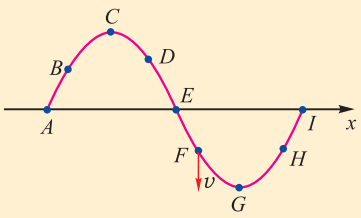
3. 图 3-3-8 为一列横波在某一时刻的波的图像，波沿 x 轴正方向传播，则：

（1）在此时刻，A 点和 C 点的振动方向各是什么？

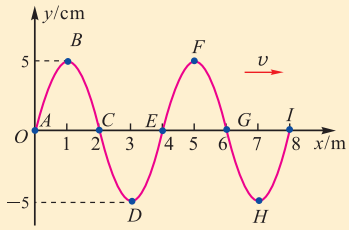
（2）再经过 $\frac{T}{2}$，质点 A 通过的路程是多少？质点 C 的位移是多少？

（3）此横波的波长多大？

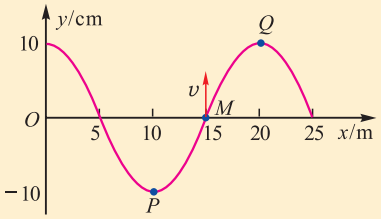
4. 一位演员抖动绸带的一端，绸带随之舞动，形成了一列简谐波。已知波的振动周期为 0.4 s，$t=0$ 时刻的波的图像如图 3-3-9 所示，图中 M 处的质点此时正经过平衡位置沿 y 轴正方向运动，画出 $t=0.5$ s 时的波的图像。



▲ 图 3-3-7



▲ 图 3-3-8

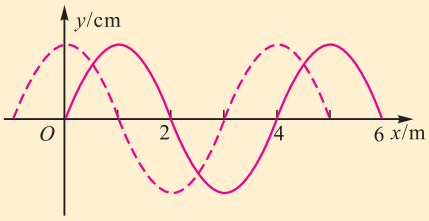


▲ 图 3-3-9

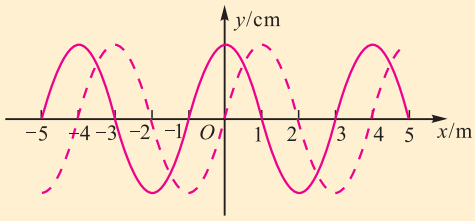
5. 如图 3-3-10 所示，一列横波以 10 m/s 的速度沿水平方向传播。某时刻波的图像如图中的实线所示，经时间 Δt 后波的图像如图中的虚线所示。已知 $2T>\Delta t>T$（T 为这列波的周期），由此可知 Δt 可能是（　　）

A. 0.3 s　　B. 0.5 s　　C. 0.6 s　　D. 0.7 s

6. 如图 3-3-11 所示，实线是一列简谐波在 $t_1=0$ 时的波的图像，虚线是 $t_2=0.2$ s 时的波的图像，则这列波可能的传播速度是多少？



▲ 图 3-3-10

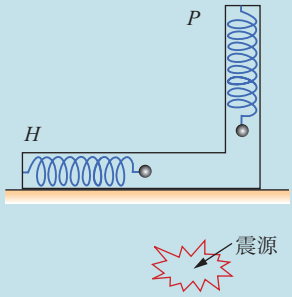


▲ 图 3-3-11

发展空间

走向社会

某同学制作了一种简易地震仪，它由竖直弹簧振子 P 和水平弹簧振子 H 组成（图 3-3-12）。若所在地区地震波中的横波和纵波传播速率分别约为 4 km/s 和 9 km/s，在一次地震中，观察到两振子相差 5 s 开始振动，则震源距地震仪大约多远？



▲ 图 3-3-12

4 波的反射与折射

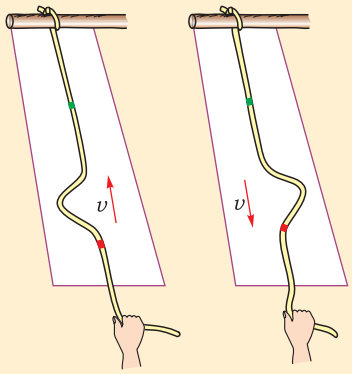
蝙蝠常在夜间活动，它如何确定障碍物的位置呢？医院里检查身体经常要做 B 超，它是怎么探测到人体内部器官是否发生了病变呢？这些都与机械波的反射和折射有关。

波的反射现象

人在山谷或空旷的大厅说话会听到回声，那是声波传到山崖或高墙时的反射；夏日的雷声轰鸣不绝，那是声波在云层界面多次反射形成的。波在传播的过程中，遇到两种介质的界面时返回到原介质继续传播的现象叫作波的**反射**（reflection）。

实验探究 | 绳波的反射

利用如图 3-4-1 所示的实验装置进行实验。固定绳的一端，用手握住绳的另一端，手向左抖动一次，你看到了什么现象？



（a）　（b）

▲ **图3-4-1**　绳波的反射

我们可以发现，当手向左抖动一次时，一个向左凸起的形状沿绳向另一端传去，如图 3-4-1（a）所示。当波遇到固定端时反射回来，可以看到反射波的波形，如图 3-4-1（b）所示。

实验探究 | 水波的反射

如图 3-4-2 所示为水波槽实验仪。

用一块直板周期性地敲击水面，产生波纹形状为平行直线的水波，如图 3-4-3（a）所示。用一根圆棍周期性地敲击水面，产生波纹形状为同心圆形的水波，如图 3-4-3（b）所示。



▲ **图3-4-2**　水波槽实验仪



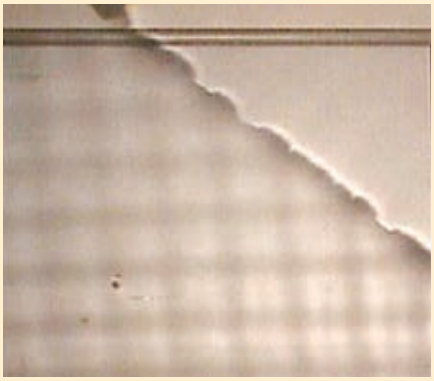
（a）直线形水波



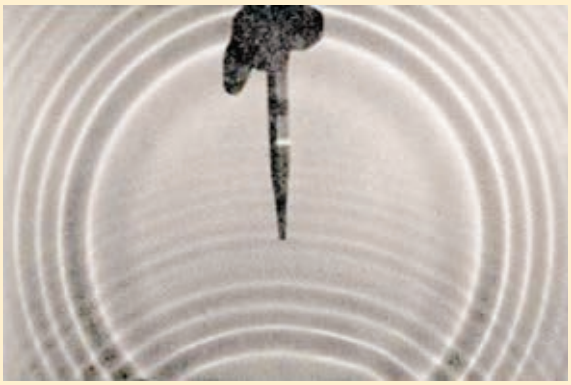
（b）圆形水波

▲ **图3-4-3**　水波

在水波槽中，直线形水波遇到直线界面反射后的波形如图 3-4-4（a）所示。圆形水波遇到直线界面反射后的波形仍然为同心圆形，如图 3-4-4（b）所示。



（a）直线形水波的反射



（b）圆形水波的反射

▲ **图3-4-4** 水波的反射

我们在实验中看到的水波的“直线形”和“圆形”波纹，实际是水波传播过程中，相位相同的点组成的面，称为波阵面，简称“波面”。波的传播方向与波面垂直，我们用“波线”表示波的传播方向，它相当于光学中的“光线”。如果用波线来描述波的反射现象，那么它就与我们初中学过的光的反射定律相似：机械波在两种介质的界面处要发生反射，反射波线与入射波线、法线位于同一平面内，反射波线与入射波线位于法线的两侧；反射角等于入射角。

波的折射现象

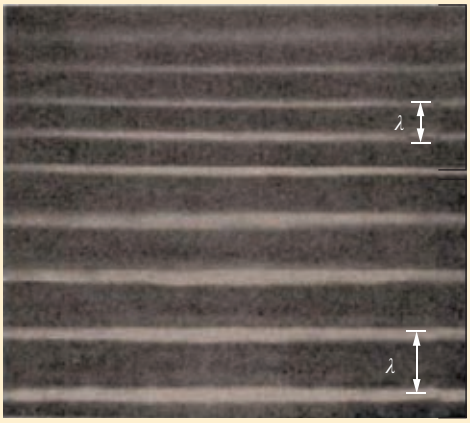
在初中，我们学习过光的折射，机械波同样也会发生折射现象。

波在传播过程中，从一种介质进入另一种介质时，波传播的方向发生偏折的现象叫作波的**折射**（refraction）。

实验探究 | 水波的折射

如图 3-4-5 所示，水波从深水区进入浅水区。由于水波在深水区和浅水区的传播速度不同，因此我们视深水区和浅水区为不同的传播介质。

使水波斜向传播到深水区和浅水区的分界面上。在实验中，你有什么发现？



▲ 图3-4-5　水波的折射现象

水波从深水区进入浅水区时，其波长变小。这是因为水波在传播过程中，频率保持不变，但水波在深水区的传播速率比在浅水区快，所以水波在深水区传播时的波长比在浅水区时长。

自我评价

1. 一位旅游者走过一个山谷，他高呼后经过 0.5 s 听到右边山坡反射回来的声音，再经过 1.5 s 听到左边山坡反射回来的声音，则这个山谷的宽度大约是多少米？

2. 一列波从一种介质进入另一种介质时，发生折射现象，下列说法正确的是（　　）

A. 传播方向一定发生变化　　B. 频率一定发生变化

C. 传播速度一定发生变化　　D. 波长一定发生变化

3. 如图 3-4-6 所示，*AB* 是两种介质的界面，上面的横线是入射波的波面，它是一组平行的直线。已知波在上方介质中的传播速率大于在下方介质中的传播速率。

（1）在图上画出一条代表它传播方向的波线，用带箭头的直线表示，箭头方向即为波的传播方向。

（2）在该波线与 *AB* 的交点处画出法线。

（3）画出代表反射波传播方向的波线，大致画出代表折射波传播方向的波线。

（4）根据画出的反射波线和折射波线，示意性地画几个反射波和折射波的波面。



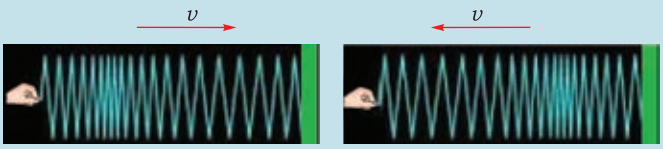
▲ 图3-4-6　机械波射到两种介质界面

发展空间

实验室

观察纵波和横波的反射

如图3-4-7所示，将一根长弹簧右端固定，左端用手拿着，让弹簧处于原长状态。手沿弹簧轴线抖动一下，观察产生的脉冲波遇到固定端时的反射现象。



▲ **图3-4-7** 弹簧纵波的反射

如图3-4-8所示，将一根长绳右端固定，左端用手拿着，让绳处于水平状态。手垂直于绳沿竖直方向抖动一下，观察产生的脉冲波遇到固定端时的反射现象。



（a） （b）

▲ **图3-4-8** 绳上横波的反射

课外阅览

人民大会堂的声学构造

声的吸收对建筑物的声学性质很重要。人们在礼堂中讲话时，声波经过天花板、墙壁等多次反射和吸收后，其声强才降到听阈以下，这种声源振动停止后声音的延续现象叫交混回响。而声强减到原值的百万分之一的时间，叫交混回响时间。经验指出，交混回响时间在1～2 s之间最为适当。交混回响时间的长短与建筑物大小、布局及其中各种表面对声的吸收情况有关。

在建造人民大会堂时，为了兼顾音乐和汉语的特点，设计人员对其中的设施做了一些恰当的处理：在屋顶和墙内装上矿渣棉，天花板钻了几百万个孔，使它变为钻孔吸音板；在二层和三层楼上的7000个皮座椅底下，设计穿孔吸声结构，当座椅无人时，椅底反过来可以代替人对声的吸收作用。这样将交混回响时间控制在合适的范围，可以使满场时和仅用一楼开会（3000人）时，都有较高的语言清晰度。

5　波的干涉与衍射

两列波相遇会不会像两个球相遇那样，改变了它们原来的运动状态呢？

波的叠加原理

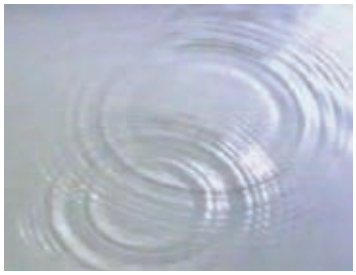
有几列波在同一介质中传播，当它们相遇后会发生什么情况？

观察思考

在一个水盆中，用滴管分别在两处滴几滴水，激起不同的水波，观察两列水波相遇时发生的现象。

它们相遇后的传播状态怎样？形状是否改变？

实验现象告诉我们：由水滴激起的两列水波相遇后相互穿过，穿过后仍然保持各自的运动状态继续传播，彼此之间好像未曾相遇，如图 3-5-1 所示。

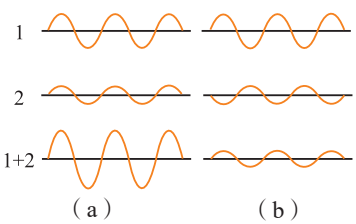


▲ **图3-5-1**　两列水波相遇

大量事实证明，介质中的几列波相遇后，仍将保持着它们各自原有的特性（频率、振幅、振动方向、传播方向等）继续传播，并不因为有其他波的存在而发生变化。声波在空间里传播时也并不因为在空间互相交叠而变成另外的声音。例如当乐队合奏或几个人同时谈话时，我们仍然能够分辨出不同的乐器、不同人的声音。

在几列波传播的重叠区域内，质点要同时参与由几列波引起的振动，质点的总位移等于各列波单独存在时在该处引起的振动位移的矢量和，这就是波的叠加原理。

根据波的叠加原理，叠加区域的质点的振动可能加强，也可能减弱。如图 3-5-2（a）所示，两列波长相同且同相的波发生叠加时，振动加强，合振幅将增大；如图 3-5-2（b）



▲ **图3-5-2**　波的叠加

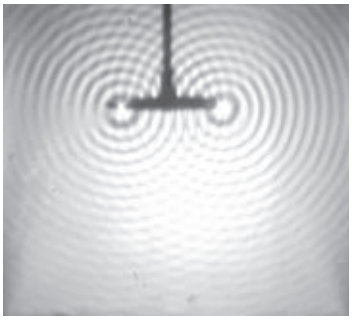
所示，两列波长相同且反相的波发生叠加时，振动减弱，合振幅减小，此时如果两列波的振幅相同，质点振动的合振幅就等于零。

波的干涉现象

观察思考

在水波槽中，使两个振子以相同的频率、相同的振动方向发生振动，产生两列相同的波，仔细观察在两列波的重叠区域所发生的现象。

如果使两个振子以不同的频率振动，产生两列波长不同的波，是否还能观察到前面的现象？



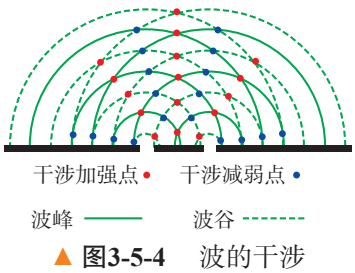
▲ **图3-5-3** 水波的干涉

在以上实验中可以看到：两列频率相同的水波的波纹都呈正圆形，并向外传播。这两列波叠加时就会出现如图 3-5-3 所示的图样：在振动着的水面上，出现一条条从两个波源中间展开来的水面相对平静的区域和振动较强的区域。这两种区域的分布固定而且相互隔开。

频率相同的两列波叠加，使介质中某些区域的质点振动加强，另一些区域的质点振动减弱，并且这两种区域互相隔开、位置保持不变。这种稳定的叠加现象（图样）叫作波的**干涉**（interference）。

为什么会产生干涉现象呢？

这是因为如果在某一时刻，两列振动方向相同的波的波峰在某一点相遇，经过半个周期，在此点必定是波谷和波谷相遇。这两列波在该点引起的振动是同相的。在这一点振动的振幅等于两列波的振幅之和，质点的振动最剧烈，图 3-5-4 中所示各红点就是这样。

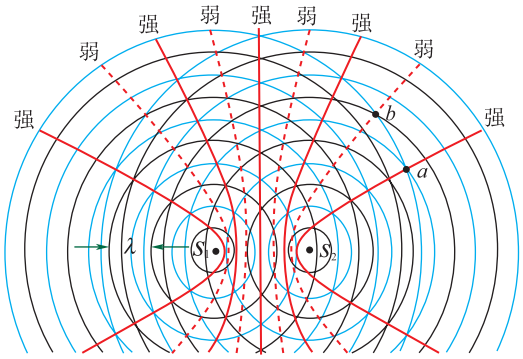


▲ **图3-5-4** 波的干涉

如果某一时刻，这列波的波峰和另一列波的波谷在某一点相遇，经过半个周期，这列波的波谷和另一列波的波峰必定也在此点相遇，即这两列波在该点引起的振动反相。在这一点振动的振幅等于两列波的振幅之差，质点振动最微弱，图 3-5-4 所示的各蓝点就是这样。

把相应的振动最剧烈的质点连起来，构成振动加强

区；把相应的振动不大或静止的质点连起来，构成振动减弱区。图 3-5-5 是水波干涉形成的图样，从图中可以看到振动加强区和振动减弱区是相互隔开的。



▲ **图3-5-5**　干涉图样

是否任意两列波的叠加都能产生干涉现象呢？在上面的实验中如果使两个振子以不同频率振动，产生两列波，在它们相遇的区域就不能观察到这种现象发生。这说明两列波相遇时要产生干涉现象，需要满足一定的条件。产生干涉的一个必要条件是两列波的频率（或波长）必须相同。

波的干涉现象是在特殊条件下波的叠加。一切波只要满足一定条件都能发生干涉现象。

波的衍射现象

在海边，当海浪遇到不大的礁石或其他障碍物时，海水的波动并不会被礁石完全挡住，在礁石的背后仍然继续传播（图 3-5-6）。我们也知道，在水波前进的方向上放一有缝的挡板时，波仍然可能绕到挡板的后面继续传播，礁石或挡板的阻碍并不像原来想象的那么大。



▲ **图3-5-6**　海浪

波能够绕到障碍物的后面传播的现象，叫作波的**衍射**（diffraction）。

如果仔细观察海面的波浪，你也许会发现大的礁石前面波涛汹涌，礁石后面的海面却相对平静，没有发生明显的波的衍射现象，这是为什么？在什么条件下波才能发生明显的衍射现象？

观察思考

如图 3-5-7 所示，在水槽中，把两块挡板放在水波前进的方向上，挡板之间留一条缝。



▲ 图3-5-7 水波衍射

1. 保持波源的振动频率不变（即水波的波长不变），改变缝的宽度，观察水波的传播情况有什么变化。

（1）当缝很宽时，是否能清楚地观察到波出现在挡板的后面？

（2）逐渐减小缝的宽度，当缝变得越来越窄时，将会看到什么现象？

2. 保持缝的宽度不变，通过改变波源的振动频率来改变波长，观察水波的传播情况有什么变化。

（1）当波长比缝宽小很多时，能否看到明显的衍射现象？

（2）逐渐增大波长，将会看到什么现象？

以上现象表明，当缝的宽度或障碍物的尺寸大小与波长相差不多或比波长小时，就能看到明显的衍射现象。

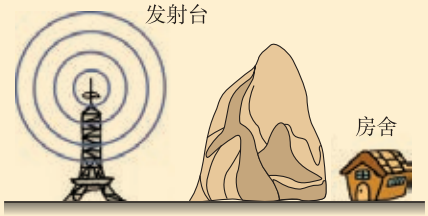
一切波都能发生衍射现象，一般情况下，波长较长的波衍射现象比较明显，波通过衍射把能量传播到了障碍物的后面。

讨论交流

在现实生活中，我们是否遇到过波的衍射现象？

我们在房间里的窗户后面能听到外面的喧闹声，也可以接收到广播和电视的信号，怎么解释？

如图 3-5-8 所示，要在大山后面的房舍内听广播（信号波长为 1 ~ 100 m）和看电视（信号波长为 1 ~ 3 m），哪个效果更好？



▲ 图3-5-8 波的衍射

自我评价

1. 在两列波重叠的区域里，某一质点振动的位移由什么因素决定？

2. 关于两列波的干涉现象，下列说法正确的是（　　）

A. 任意两列波都能产生干涉现象

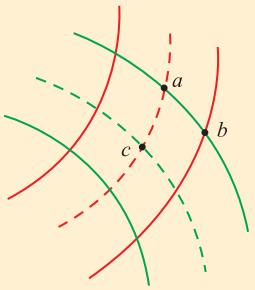
B. 发生干涉现象的两列波，它们的频率一定相同

C. 在振动减弱的区域，各质点都处于波谷

D. 在振动加强的区域，有时质点的位移等于零

3. 图 3-5-9 是两列波叠加时某一时刻的图样，其中实线表示波峰所在位置，虚线表示波谷所在位置。图中 a、b、c 各点的振动情况如何？

4. 将一只小瓶立于水波槽中，在槽中激起水波。若想在瓶子后面比较容易地观察到水波的衍射现象，激起水波的振子振动频率大一些好还是小一些好？为什么？



▲ 图3-5-9

发展空间

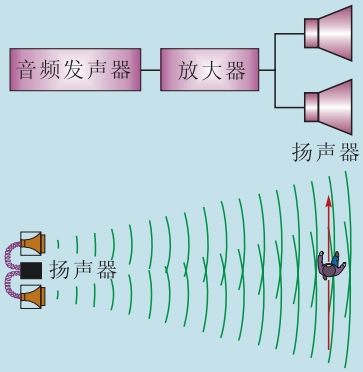
实验室

声波的干涉

把正在振动的双股音叉放入平静的水面，能否看到水波的干涉现象？

声波能产生干涉现象吗？

在学校的操场上，如果有相距1 m的两个扬声器发出1 kHz 的声音，在操场上沿平行于两个扬声器的连线的方向走一走，如图3-5-10所示，会发现什么现象？怎样解释？



▲ 图3-5-10　体验声波的干涉

6 多普勒效应

到 2018 年年底，我国高速公路通车里程已达 14.26 万千米，位列世界第一。为保障交通安全，交管部门安装了大量的监控测速装置。你知道测量车速的原理吗？

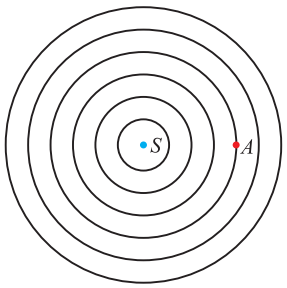
多普勒效应

1842 年，奥地利物理学家多普勒带着女儿在铁道旁散步时，注意到一个现象：当火车从身旁飞驰而过时，火车汽笛的音调发生了由高到低的变化。他经过认真的研究发现，当观测者和波源之间有相对运动时，观测者测得的频率与波源频率不同。后来这一现象就被命名为**多普勒效应**（Doppler effect）。

多普勒效应的成因是什么呢？

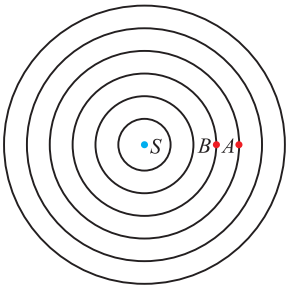
下面分三种情况进行分析。

1. 波源 S 与观测者 A 相对于介质都静止时，观测者单位时间内接收到的完整波的数目与单位时间内波源发出的相同，所以，观测者接收到的频率和波源的振动频率相同（图 3-6-1）。



▲ **图 3-6-1** 波源 S 和观测者 A 都不动，设波源频率为 20 Hz，则波源每秒发出 20 个完整波，观测者每秒接收到 20 个完整波

2. 波源相对于介质静止不动，观测者相对波源运动。当观测者朝着波源运动时，它在单位时间内接收到的完整波数目增多，表明测得的频率大于波源振动的频率（图 3-6-2）；当观测者远离波源运动时，它在单位时间内接收到的完整波数目减少，表明测得的频率小于波源振动的频率。



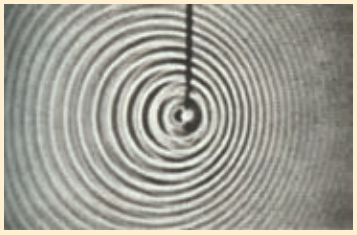
▲ **图 3-6-2** 波源 S 不动，观测者在 1 s 内由位置 A 移至位置 B，A、B 相距一个波长。波源每秒发出 20 个完整波，但观测者每秒接收到 21 个完整波

3. 观测者相对介质静止，波源相对观测者运动。让我们通过实验来理解这种情况下的多普勒效应。

观察思考　|　水面上波源移动引起的多普勒效应

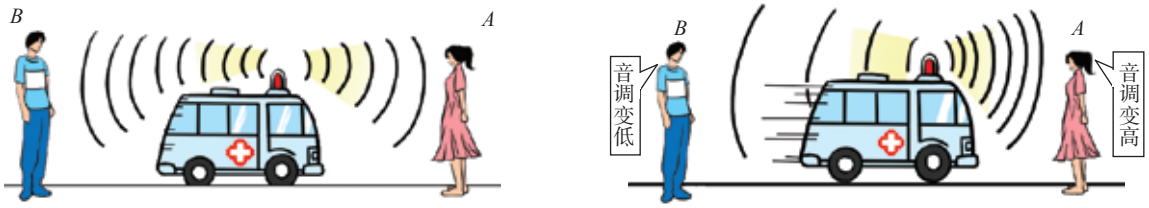
在水波槽中，当振动片振动时，固定在振动片上的金属丝周期性触动水面，形成水波。当波源在水面上移动时，观察所产生的现象。

如图 3-6-3 所示，当波源在水面上移动时形成了不同圆心的圆形波纹。在波源前进的方向上，波纹压缩，波长变短，因此运动波源前方的观测者（波源接近观测者）测得的水波频率变大；在波源后方，波纹间距变大，波长变长，因此在波源后方的观测者（波源远离观测者）测得的水波频率变小。



▲ **图3-6-3**　波源向右移动引起的多普勒效应

由上面的分析可以看到，当观测者与波源二者相互接近时，接收到的频率将大于波源的频率；当二者远离时，接收到的频率将小于波源的频率。生活中我们也可以体会到类似的情形，如图 3-6-4 所示。



（a）当救护车静止时，两人听到的警笛音调一致　（b）当救护车运动时，两人听到了不同的音调

▲ **图3-6-4**

多普勒效应的应用

机械波、电磁波都会产生多普勒效应。静止的探测仪器根据接收到的频率的变化，可以测出波源相对于介质的速度。医疗上，利用超声波的多普勒效应，可以测量心脏血流速度，为诊断提供重要依据。将超声波辐射到体内，它被流动的血液反射，回波发生频率的变化，根据频率变化量可得出血液流速信息；再给血流信号加上色彩，显示在屏幕上，即可实时观察体内血流状态，这就是现在所说的彩色超声波检测仪，简称彩超（图 3-6-5）。目前彩超和核磁共振、CT 一样，是医院里先进的检测设备。



▲ **图3-6-5**　医生为孕妇做彩超

多普勒效应在测定人造卫星位置的变化、测定流体

的流速、检查车速等方面也有广泛的应用。在天文学上，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的天体相对于地球的运动速度。

自我评价

1. 为什么有经验的铁路工人，可以从火车的汽笛声中判断出火车的运行方向和快慢？

2. 波源向观测者运动和观测者向波源运动，都会发生频率变大的多普勒效应，这两种情况有什么区别？

3. 天文观测表明，几乎所有远处的恒星（或星系）都以各自的速度背离我们而运动，离我们越远的星体，背离我们运动的速度（称为退行速度）越大，也就是说，宇宙在膨胀。不同星体的退行速度 v 和它们离我们的距离 r 成正比，即 $v = Hr$，式中 H 为一常量，称为哈勃常数，已由天文观测者测定。为解释上述现象，有人提出一种理论，认为宇宙是从一次大爆炸开始形成的，假设大爆炸后各星体以不同的速度向外匀速运动，并设想我们就位于其中心，则速度越大的星体离我们越远。由上述理论和天文观测结果，可估算出宇宙年龄。

请写出宇宙年龄的计算式。根据近期观测，哈勃常数 $H = 3 \times 10^{-2}\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{l.y.}^{-1}$，其中 l.y. 为光年，指的是光在一年中行进的距离，请由此估算宇宙年龄。

发展空间

课外阅览

用多普勒效应测量物体的运动速度

根据计算可以知道当波源和观测者有相对运动时观测者测得的频率。

如果波源相对介质静止，观测者相对波源以速度 u_c 运动，观测者测得的波频率为 $f' = \left(1 + \frac{u_c}{v}\right) f$，式中 f 为波源的频率，v 为波在介质中的传播速度。当观测者向着波源运动时，u_c 取正值；当观察者背离波源运动时，u_c 取负值。如果观测者相对于介质静止，波源相对观测者以速度 u_z 运动，观测者测得的波的频率为 $f' = \left(\frac{v}{v - u_z}\right) f$。当波源接近观测者时，$u_z$ 取正值；当波源远离观测者时，u_z 取负值。



▲ 图3-6-6 应用多普勒效应测速

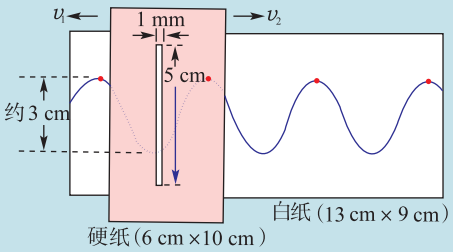
测速装置可以向运动中的汽车发射一个频率已知的超声波，超声波被运动的汽车反射回来后，根据接收到的频率发生的变化，就可以测出汽车的运动速度（图 3-6-6）。请你说出其中的原理。

实验室

如图 3-6-7 所示，一张白纸上画有正弦曲线，波峰涂上红色，另一张硬纸中间开有狭缝，把硬纸放在白

纸上。白纸向左做匀速运动，表示一列从右向左传播的波。当硬纸静止时，正弦曲线的一部分在狭缝中上下振动，振动的快慢表示波的频率的大小。1 s 内在狭缝中出现的波峰（红点）个数即为观测者相对波源静止时测得的频率，也就是波源的频率。

在白纸运动的同时，向右或向左移动硬纸，在狭缝中看到的现象与硬纸静止时有什么区别？你能由此实验解释多普勒效应吗？



▲ 图3-6-7

感悟 · 启迪

机械波是机械振动在它周围介质中的传播，这意味着它受到波源和介质两方面的影响。那么在描述波的频率、波长、波速等物理量中，哪些量记录着波源的“基因”，哪些量体现介质的特性呢？为什么声音在不同介质中速度不同？波长又怎样变化？

我们应该从波的传播过程所发生的反射、折射、干涉、衍射现象，波的多普勒效应和波的能量传播等方面，全面理解机械波的运动规律。

反思 · 小结 · 交流

• 学后反思

1. 如何正确理解振动与波的关系？
2. 如何获得波的图像？

• 自主小结

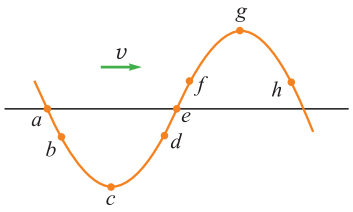
1. 机械波是如何形成的？它有什么特点？
2. 什么是横波？什么是纵波？
3. 准确表述描述波的物理量：波速、波长和频率。它们之间的关系是什么？
4. 产生干涉的条件是什么？产生明显衍射的条件是什么？
5. 什么是多普勒效应？

• 相互交流

1. 振动图像与波的图像的区别和联系是什么？
2. 举例说明生活中波的反射、折射、干涉、衍射与多普勒效应。

本章复习题

1. 如图所示为一弹性绳上形成的水平向右传播的简谐波。试判断绳上 a、b、c、d、e、f、g、h 各个质点的运动方向。



▲ 第1题图

2. 以下关于波的认识，正确的是（　　）

A. 潜艇利用声呐探测周围物体的情况，用的是波的反射原理

B. 发生多普勒效应时，波源的频率发生了变化

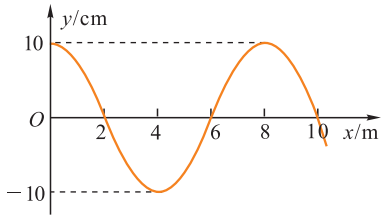
C. 机械波在介质中的传播速度是由介质本身的性质决定的

D. 波在传播过程中绕过障碍物向前传播的现象，是波的折射现象

3. 一列沿 x 轴正方向传播的简谐横波在某一时刻的波形图如图所示，已知波的传播速率是 16 m/s。

（1）这列波中质点振动的振幅是多少？

（2）画出再经过 0.125 s 时的波形图。



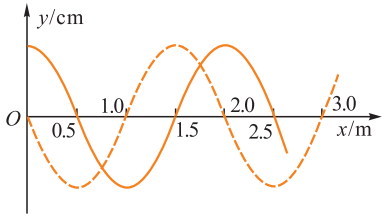
▲ 第3题图

4. 一列简谐横波向右传播，在其传播方向上，有相距 3 m 的 a、b 两点。当 a 点到达波峰时，右侧的 b 点恰通过平衡位置向下运动，则这列波的波长为多少？

5. 有一列沿 x 轴正方向传播的简谐横波，周期为 T，其某时刻的波形图如图中的实线所示，再经 $t=0.2$ s 其波形图如图中的虚线所示。

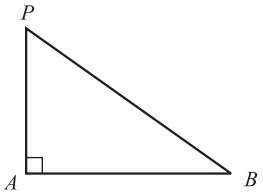
（1）若 t 小于 T，则此列波的波速为多大？

（2）若 t 大于 T，则此列波的波速为多大？



▲ 第5题图

6. 如图所示，在同一均匀介质中，有两个振幅相等、频率均为 $f=10$ Hz 的相干波源 A 和 B，波速 $v=10$ m/s，$AB=20$ m，$AP=15$ m，且 AB 垂直于 AP。若 A 点为波峰时，B 点恰为波谷，试分析 A、B 发出的两列波在 P 点叠加的结果。



▲ 第6题图

7. 正在报警的警钟每隔 0.5 s 响一声。有一个人正坐在以 60 km/h 的速率向着警钟行驶的车中。已知声音在空气中的速度为 330 m/s，则这个人每分钟能听到几声报警声？



第四章

光及其应用

主题一　光的折射

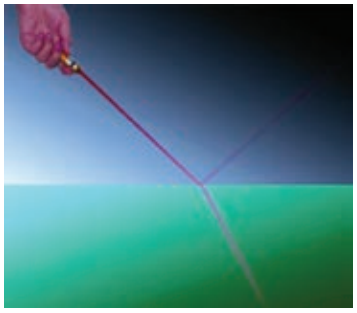
- 光的折射定律
- 实验：测定玻璃的折射率
- 光的全反射

主题二　光的波动性

- 光的干涉
- 实验：用双缝干涉测量光的波长
- 光的衍射与偏振
- 激光

雨后的天空中，为什么会出现绚丽多姿、蔚为壮观的七色彩虹？苍茫的大海上，为什么会形成虚无缥缈、宛如仙境的亭台楼阁？这一章将告诉你关于它们的秘密。

1 光的折射定律



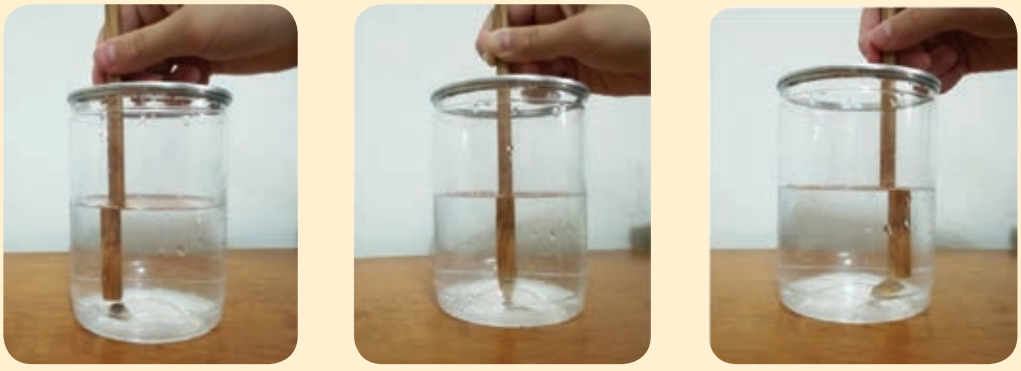
▲ 图4-1-1 光的反射与折射

如图 4-1-1 所示，当光射到两种介质的界面时，一部分光仍回到原来的介质里继续传播的现象叫作光的反射；另一部分光进入第二种介质继续传播的现象叫作光的折射。我们在初中已经学习了光的反射定律，那么，光的折射遵循怎样的规律呢？

光的折射定律

活动

在圆柱形玻璃杯中装大半杯清水，将一根筷子竖直插入杯子的左侧，筷子的下半部分在水中，上半部分在空气中，如图 4-1-2（a）所示。将筷子从杯子的左侧逐步移动到右侧的过程中，从杯子的正前方观察筷子在水中的像与在空气中的实物之间的位置关系。



（a） （b） （c）

▲ 图4-1-2 从不同的位置看插入水中的筷子

反复做一做，看看是否会出现如图所示的现象，并想一想其中的道理。这个现象背后隐藏着什么规律？

实验探究

实验器材

半圆柱形玻璃砖，光反射、折射演示仪（图 4-1-3）。



▲ 图4-1-3

实验过程

1. 将演示仪平放在桌面上，半圆柱形玻璃砖放在演示仪上，让玻璃砖的圆心与演示仪的圆心重合，圆心为光线的入射点。

2. 旋转玻璃砖，直到其直边与演示仪面板上的一条直径重合，作为玻璃与空气的界面，与该界面垂直且过圆心的另一条直径为法线。

3. 用激光笔贴着演示仪面板表面，从空气中对着圆心发出光束射入玻璃砖中，从面板上读出入射角 i 与折射角 r。

4. 改变入射角的大小，重复实验步骤 3。

注意：勿将激光束射入眼中。

数据记录与处理

记录各次测出的 i 与 r 的值，并计算每次的 $\frac{\sin i}{\sin r}$ 的值，填入表 4-1-1 中。

表4-1-1

物理量 / 数据 / 次数	入射角 i	$\sin i$	折射角 r	$\sin r$	$\frac{\sin i}{\sin r}$
1					
2					
3					
4					
5					

实验结论

通过分析表中数据可以得出结论：在误差允许的范围内，入射角 i 的正弦值跟折射角 r 的正弦值之比为一常数，用 n 来表示这个常数，有 $\frac{\sin i}{\sin r} = n$。

拓展

将半圆柱形玻璃砖换成半圆柱形透明塑料块，重复上述实验，看看是否也遵循同样的规律。

由大量精确的实验可以得出光的**折射定律**（refraction law）：入射光线、折射光线和法线在同一平面内，入射光

线与折射光线分居法线的两侧；入射角的正弦值与折射角的正弦值之比为一常数。

介质的折射率

从以上实验探究中可看到，光从空气入射到玻璃中与光从空气入射到透明塑料块中，n 值是不同的。在入射角相同时，光线偏折得越厉害，n 就越大，因此 n 是一个反映介质光学性质的物理量。

在物理学中，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 r 的正弦值的比，叫作这种介质的**折射率**（refractive index）。用 n 表示折射率，有

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

理论和实验的研究都证明：某种介质的折射率 n，等于光在真空中的传播速度 c（$c=3\times10^8\,\mathrm{m/s}$）与光在这种介质中的传播速度 v 之比，即

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

光在不同介质中的传播速度不同，这正是光发生折射的原因。

因为光在真空中的传播速度 c 大于光在其他任何介质中的传播速度 v，所以任何介质的折射率都大于 1。又因为光在空气中和真空中的传播速度近似相等，因此也可认为光从空气射入某种介质时，入射角 i 的正弦值与折射角 r 的正弦值之比就等于这种介质的折射率。表 4-1-2 列出了几种介质的折射率。

表4-1-2　几种介质的折射率

介质	n	介质	n	介质	n
空气	1.000 29	水	1.33	冰	1.309
酒精	1.36	麻油	1.47	水晶	1.54
各种玻璃	1.40~2.00	金刚石	2.42	翡翠	1.57
红／蓝宝石	1.77	二硫化碳	1.63	岩盐	1.55

两种介质比较，折射率较大的介质称为**光密介质**

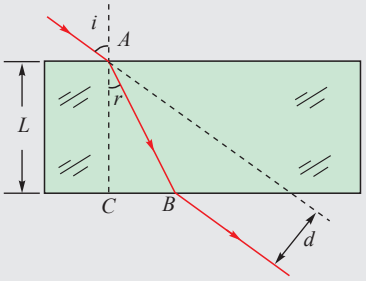
（optically denser medium）；折射率较小的介质称为**光疏介质**（optically thinner medium）。

例题示范

问题　如图4-1-4所示，截面为矩形的玻璃砖的厚度为L，现测得该玻璃砖的折射率为1.73。若光从上表面射入，入射角i为60°，求：

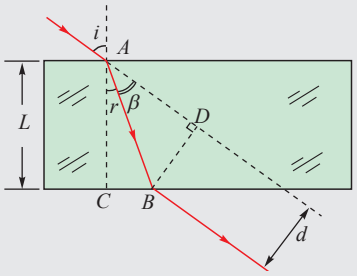
（1）从下表面射出玻璃砖的光线相对于入射光线的侧移d。

（2）光在玻璃中传播的时间t。



▲ 图4-1-4

分析　如图4-1-5所示，过B点作垂直于入射光线延长线的垂线BD，以此构建Rt△ABD。要求出侧移d（即BD），就应该先求出光在玻璃中的传播距离AB和角β；而求距离AB和角β的关键是求出折射角r，它可由折射定律$\dfrac{\sin i}{\sin r}=n$求出。由$v=\dfrac{c}{n}$和$t=\dfrac{AB}{v}$可求光在玻璃中传播的时间。



▲ 图4-1-5

解　（1）设光从空气进入玻璃时的折射角为r，则

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

把$i=60°$和$n=1.73$代入可得

$$r=30°$$

从而

$$\beta=i-r=30°$$

在Rt△ABC中，

$$AB=\frac{AC}{\cos r}=\frac{L}{\cos r}$$

在Rt△ABD中，光线的侧移距离为

$$d=AB\sin\beta=\frac{L}{\cos r}\cdot\sin(i-r)=\frac{\sqrt{3}}{3}L$$

（2）光在玻璃中传播的速度

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

光在玻璃中传播的时间

$$t=\frac{AB}{v}=\frac{2L}{c}$$

拓展 截面为矩形的玻璃又称为平板玻璃，它的应用非常广泛，建筑物的窗户，甚至整个外墙面都大量使用。光线通过平板玻璃，不改变传播方向，只是发生一段侧移，而侧移量$d=\frac{L}{\cos r}\cdot\sin\left(i-r\right)$，$i$与$r$间遵守折射定律$\frac{\sin i}{\sin r}=n$。可以看出侧移量$d$与玻璃的厚度$L$、玻璃折射率$n$及入射角$i$有关。对于确定的平板玻璃，$L$及$n$是一定值，则侧移量$d$只与入射角$i$有关，$i$越大，$d$也越大。

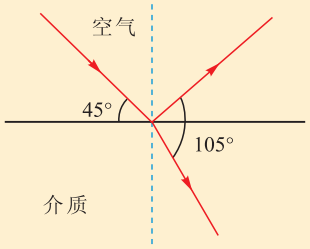
自我评价

1. 如图4-1-6所示，光从空气射入某介质，入射光线和界面的夹角为45°，反射光线和折射光线之间的夹角为105°，这种介质的折射率为多大？

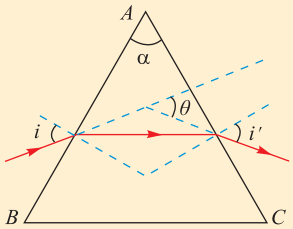
2. 光从空气射入某介质中时，入射角i = 45° ，折射角r = 30° 。求光在该介质中的传播速度。

3. 光从折射率为n的介质射入空气时，其入射角正弦值与折射角正弦值之比应等于多少？

4. 如图 4-1-7 所示，一束单色光从空气入射到棱镜的 AB 面上，经 AB 和 AC 两个面折射后从 AC 面进入空气。当出射角 i' 和入射角 i 相等时，出射光线相对于入射光线偏转的角度为 θ。已知棱镜顶角为 α，求棱镜对该色光的折射率。



▲ 图4-1-6



▲ 图4-1-7

发展空间

课外阅览

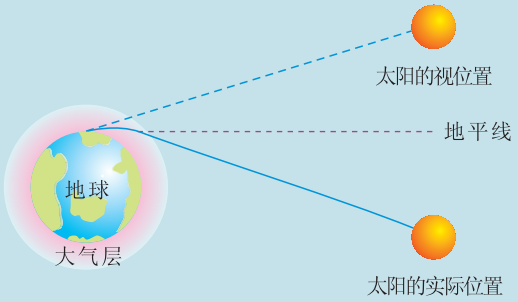
朝阳的位置

地球的大气层可以看作越靠近地面折射率越大的不均匀介质。当太阳发出的光射向地球时，就会产生如图 4-1-8 所示的现象，你知道其中的原因吗？

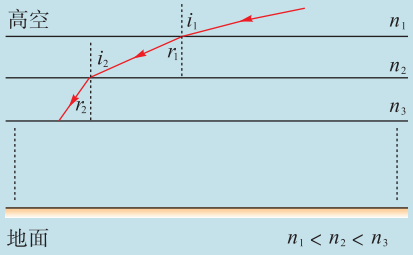
我们可以将大气层看成由许多足够薄的薄层组成。每层的折射率可以认为不变。如图 4-1-9 所示。由高空逐渐向下，分别为第一层、第二层、第三层……；折射率分别为 n_1、n_2、n_3…。则 $n_1 < n_2 < n_3 <\cdots$。其中第一层可以认为是真空，$n_1 = 1$。

当光射到第一层和第二层的分界面时，相当于从真空射向介质，$i_1 > r_1$。

当光射到第二层和第三层的分界面时，相当于从光疏介质射向光密介质，$i_2 > r_2$。由于每层空气都非常薄，光线便沿一条曲线射向地面。



▲ 图4-1-8



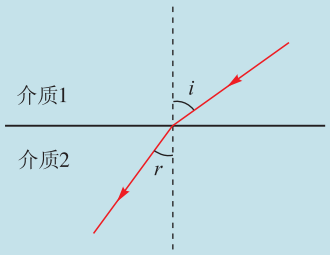
▲ 图4-1-9

绝对折射率与相对折射率

光从真空射入某种介质时的折射率，叫作这种介质的绝对折射率，也简称为该种介质的折射率，通常用 n 表示。又因为空气的绝对折射率为 1.000 29，在近似计算中我们可以取空气绝对折射率为 $n = 1$。

如图 4-1-10 所示，光从介质 1 射入介质 2 时，不论入射角 i 大小怎样，入射角 i 的正弦值跟折射角 r 的正弦值的比值都是一个常数，这个常数叫作介质 2 对于介质 1 的相对折射率，用 n_{21} 表示，即

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



▲ 图4-1-10

在光学中，可以用光的波动学说证明：两种介质中光速的比等于入射角正弦值跟折射角正弦值的比。如果用 v_1、v_2 分别表示在介质 1 和介质 2 中的光速，则 $n_{21}=\frac{v_1}{v_2}$。若用 n_1、n_2 分别表示介质 1 和介质 2 的折射率，请同学们用所学知识证明

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

如果 $n_1<n_2$，光在介质 1 中的传播速度就大于光在介质 2 中的传播速度，光线由空气射入某种介质时有

$$n_{空气} \sin i = n_{介质} \sin r$$

因为 $n_{空气}=1$，所以有

$$\frac{n_{介质}}{n_{空气}}=\frac{\sin i}{\sin r}=n_{介质-空气}=n_{介质}$$

这就是说，光从空气射入某种介质时的相对折射率近似等于该介质的绝对折射率。

2 实验：测定玻璃的折射率

折射率是介质重要的光学参数，如何用简单的器材较准确地测定介质的折射率呢？

讨论交流

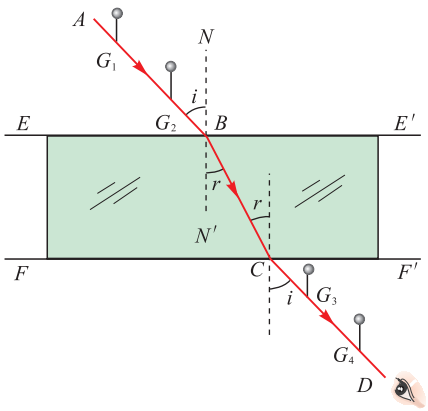
1. 我们已经知道当光以一定的入射角射入一块截面为矩形的玻璃砖后，出射光线的方向会发生平移。你能画出示意图吗？

给你以下器材：截面为矩形的玻璃砖一块，大头针四枚，白纸一张，直尺一把或三角板一个，量角器一个。

请你设计一个实验方案，根据这个方案，画出光以一定入射角穿过玻璃砖时的传播路径。

2. 为了测出玻璃的折射率，想一想在实验中应该测出哪些物理量。

实验操作



▲ 图4-2-1 测定玻璃的折射率

1. 如图 4-2-1 所示，先在白纸上画一条直线 EE'，代表两种介质的分界面；再画出一直线段 AB 代表入射光线；然后画出分界面上 B 点处的法线 NN'。

2. 把矩形玻璃砖放在白纸上，使它的一条长边与 EE' 对齐，用直尺或三角板轻靠在玻璃砖的另一长边，按住直尺或三角板不动，将玻璃砖取下，画出直线 FF' 代表玻璃砖的另一边。

3. 在直线 AB 上竖直地插上两枚大头针 G_1、G_2，放回玻璃砖，然后透过玻璃砖观察大头针 G_1、G_2 的像，调整视线方向，直到 G_1 的像被 G_2 的像挡住。

4. 再在观察的这一侧先后竖直地插上两枚大头针 G_3、G_4，用 G_3 挡住 G_1、G_2 的像，再用 G_4 挡住 G_3 以及 G_1、G_2 的像。

5. 移去大头针和玻璃砖，过 G_3、G_4 的插点画直线 CD，与 FF' 相交于 C 点，直线 CD 就表示沿直线 AB 入射的光线透过玻璃砖后的出射光线。连接 BC，BC 就是折射光线在玻璃砖内的路径。

6. 用量角器量出入射角 i 和相应的折射角 r，查出它们的正弦值。改变入射角 i 的数值，多次重复实验，例如入射角 i 分别取 15°、30°、45°、60°、75° 等。

数据处理

请自己设计表格，把实验数据记录在表格中。计算出不同入射角时$\frac{\sin i}{\sin r}$的值，求出几次实验中测得的$\frac{\sin i}{\sin r}$的平均值，以此作为玻璃的折射率 n。

讨论交流

1. 采取哪些措施可以减小测量误差？

2. 如果没有量角器而只有刻度尺，你能否求出入射角、折射角的正弦值，并进一步求出玻璃的折射率？

3. 根据实验中画出的光的传播路径图，观察当光从空气进入玻璃时入射角与折射角哪个大，当光从玻璃进入空气时入射角与折射角哪个大，你能用$\frac{\sin i}{\sin r}=\frac{c}{v}$进行解释吗？

4. 如果没有较厚的截面为矩形的玻璃砖，而只有一块三棱镜，是否可以用类似的方法测定玻璃的折射率？

自我评价

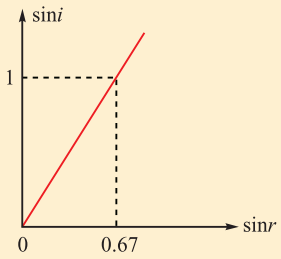
1. 某同学做“测定玻璃的折射率”的实验时，用他测得的多组入射角i和折射角r，作出sin$i$–sin$r$图像，如图4-2-2所示。下列判断中正确的是（　　）

A. 他做实验时，光线是由空气射入玻璃的

B. 他做实验时，光线是由玻璃射入空气的

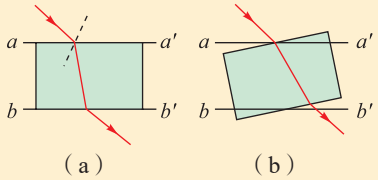
C. 该玻璃的折射率为0.67

D. 该玻璃的折射率为1/0.67



▲ 图4-2-2

2. 甲在做“测定玻璃的折射率”的实验时，法线画得与界面不垂直，出现如图4-2-3（a）所示的倾斜；乙在放置玻璃砖时，玻璃砖的平面没有与aa'重合，出现如图（b）所示的偏差。则他们测得的折射率与真实值相比（　　）



（a）　（b）

▲ 图4-2-3

A. 甲的偏小　　B. 乙的偏小

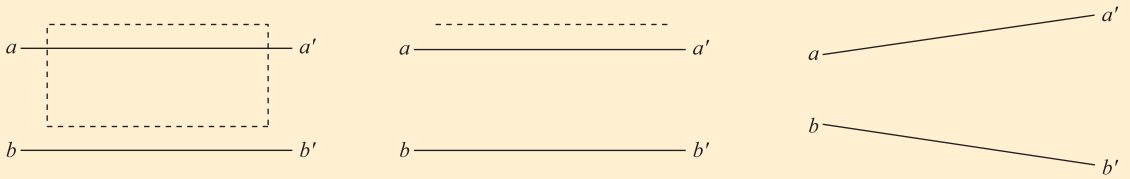
C. 甲的偏大　　D. 乙的偏大

3. 在“测定玻璃的折射率”的实验中，请思考以下三个问题：

（1）如图4-2-4（a）所示，若在画好玻璃砖界面两条直线aa'和bb'后，不慎误将玻璃砖向上平移至图中虚线位置，而其他操作均正确，则测得的折射率将偏大、偏小还是不变？

（2）如图4-2-4（b）所示，若在画玻璃砖界面aa'时，误将界面向上画至图中的虚线位置，而其他操作均正确，则测得的折射率将偏大、偏小还是不变？

（3）如图4-2-4（c）所示，若玻璃砖的两界面不平行，则测得的折射率将偏大、偏小还是不变？



（a）　（b）　（c）

▲ 图4-2-4

发展空间

课外阅览

光的色散

用一束太阳光或一束日光灯的灯光去照射横截面为三角形的玻璃砖，能否观察到如图 4-2-5 所示的现象？



▲ 图4-2-5

太阳、日光灯等光源发出的光，称为白光。大量的实验（包括上面的实验）表明：白光实际上是由各种单色光组成的复色光。我们把复色光经过透明介质的两次折射后分解成单色光的现象叫作**色散**（dispersion）。

实验表明：同一种介质对不同颜色的光的折射率是不相同的。表 4-1-2 是实验测得的不同介质对某一波长的黄光的折射率，表 4-2-1 是实验测得的冕牌玻璃对各种色光的折射率。

表4-2-1　冕牌玻璃对各种色光的折射率

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

我们知道，各种色光在真空中的速度都等于 c。由公式 $n=\frac{c}{v}$ 可知，各种色光在同一均匀介质中的传播速度 v 是不相同的，介质对紫光的折射率最大，表示紫光在介质中的传播速度最小。

3 光的全反射

活动

在水平桌面上放一较浅的盘子，在盘子中央放一枚硬币，在硬币的上方再放一透明水杯。当盘子和水杯中都不装水时，通过水杯可以看见盘子底部的硬币。

向杯子中注入半杯清水后，通过杯子的侧面还能看到硬币吗？

向盘子中注入清水将硬币完全淹没，通过杯子的侧面还能看到硬币吗？



▲ 图4-3-1

全反射现象

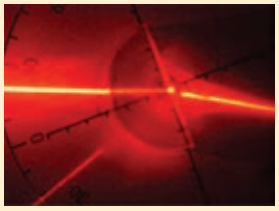
我们已经知道，对于两种介质来说，光在其中传播速度较小的介质，即折射率较大的介质叫作光密介质；而光在其中传播速度较大的介质，即折射率较小的介质叫作光疏介质。

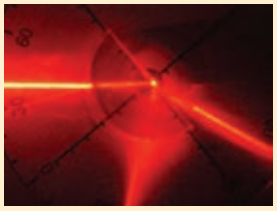
光疏介质和光密介质是相对的。例如：水（$n_1=1.33$）、空气（$n_2=1.00$）和玻璃（$n_3=1.50$）三种物质相比较，水对空气来说是光密介质，而对玻璃来说是光疏介质。

从前面的实验中我们已看到，光由光密介质（玻璃）射入光疏介质（空气）时，折射角大于入射角。由此可以预料，当入射角增大到一定程度时，折射角就会增大到 90°。如果入射角再增大，会出现什么情况呢？

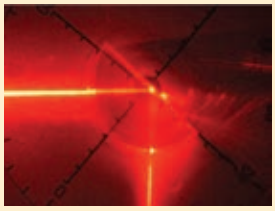
实验探究

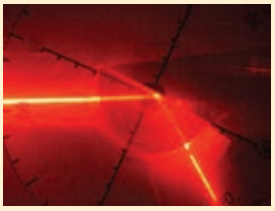
用一束激光沿透明半圆柱形玻璃砖的半径射到它的平面上，如图 4-3-2 所示。玻璃中的激光从半圆形的圆心折射进入空气中。观察当入射角逐渐增大时所发生的现象。


（a）入射角较小时


（b）入射角较大时

▲ 图4-3-2


（a）折射角等于90°


（b）折射光线完全消失

▲ 图4-3-3

（1）当激光沿半径垂直入射到平面时，此时入射角为 0°，折射角也为 0°，光线沿直线射出。

（2）当入射角增大少许时，会看到微弱的反射光线和较强的折射光线；同时可观察到反射角等于入射角，折射角大于入射角。

（3）随着入射角逐渐增大，反射光线越来越强，而折射光线越来越弱；当入射角增大到某一角度，使折射角达到 90° 时，折射光线消失，只剩下反射光线；若继续增大入射角，仍然只有反射光线，如图 4-3-3 所示。

光从光密介质射到光疏介质的界面时，全部被反射回原介质中传播的现象叫作**全反射**（ total reflection ）。

发生全反射的条件

实验表明，要使光在不同介质的分界面上发生全反射，一是光需从光密介质射至光疏介质的界面上；二是入射角必须等于或大于一定的角度，这一角度叫作临界角。临界角随介质的不同而不同，我们把光从某种介质射向真空或空气、折射角为 90° 时的入射角，称为这种介质的**临界角**（ critical angle ）。

设光从折射率为 n 的介质射向真空（或空气），由于临界角 C 是折射角等于 90° 时的入射角，根据折射定律有

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

所以

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

由此可求得临界角 C。

几种常见介质的临界角如表 4-3-1 所示。

表4-3-1　几种介质的临界角

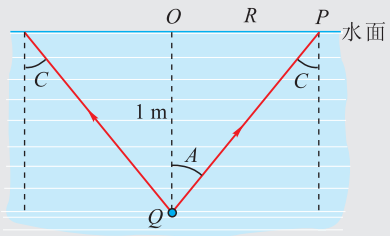
金刚石	二硫化碳	玻璃	甘油	酒精	水
24.4°	38°	30° ~ 42°	43°	47°	48.7°

例题示范

问题　在平静的水面下1 m处有一点光源Q，求这个点光源发出的光能从多大面积的水面上射出来。（水的折射率为1.33）

分析　只有当光射向水面的入射角小于临界角时，光才能透过水面射出来，这个透光的区域呈圆形。只要求出光由水射向空气而发生全反射时的临界角C，就可以求出水面透光区域的半径，进而求出它的面积。

解　如图4-3-4所示，O为光源正上方水面上一点，P为光以临界角入射到水面上的一点，以$R = OP$为半径的圆的面积即为水面透光的面积。



▲ 图4-3-4

在Rt△PQO中

$$R = QO\tan A$$

因QO = 1 m，$\sin A = \sin C = \frac{1}{n} = \frac{1}{1.33}$，所以$\tan A = \frac{\sin A}{\sqrt{1-\sin^2 A}} = 1.14$

所以，R = 1 m × 1.14 = 1.14 m

圆面的面积

$$S = \pi R^2 \approx 3.14 \times 1.14^2\ \text{m}^2 \approx 4.08\ \text{m}^2$$

拓展　将光源Q逐渐上移直至露出水面的过程中，这个面积如何变化？

全反射的应用——光导纤维

光导纤维简称光纤，它是现代通信和网络技术中重要的材料，光纤通信就利用了光在光纤中的全反射特性。光导纤维的原理是什么？我们先来观察以下现象。

观察思考

1. 把一段有机玻璃棒制成 S 形，如图 4-3-5 所示。注意有机玻璃棒的两个端面要尽量平整光滑。

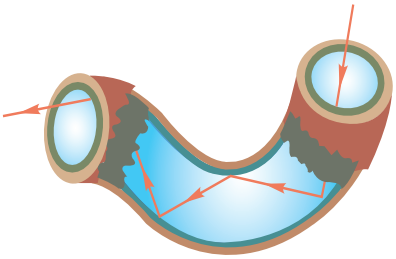
2. 在暗处打开激光笔，观察在弯曲的有机玻璃棒的另一端面有无光线射出。

想一想，激光笔发出的光，是怎样通过弯曲的有机玻璃棒传到另一端的？你能解释这个现象吗？

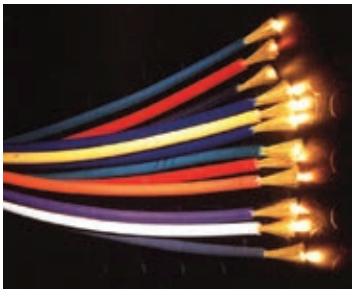


▲ **图4-3-5** 光沿弯曲的有机玻璃棒传播

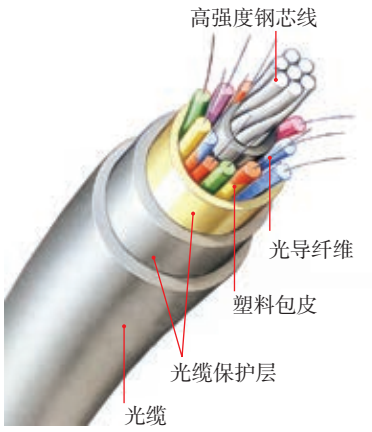
由于有机玻璃的折射率大于空气的折射率，当光从有机玻璃棒的一端射入时，可以沿着有机玻璃棒的曲面发生多次全反射，从另一端射出（图 4-3-6 与图 4-3-7）。这就是光纤的工作原理。



▲ **图4-3-6** 光纤的工作原理

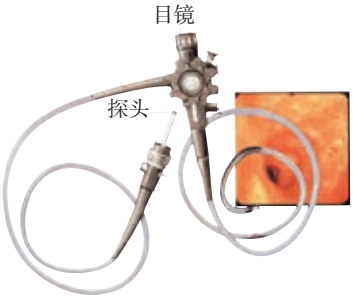


▲ **图4-3-7** 光纤的端点是亮晶晶的



▲ **图4-3-8** 光缆的结构

实际应用中的光纤是一根极细的玻璃丝，直径从几微米到 100 μm 不等，由两种折射率不同的玻璃制成，分内外两层，内层玻璃的折射率比外层玻璃的折射率大。当光从一端进入光纤时，将会在两层玻璃的界面上发生全反射，通过一系列的全反射，光就能沿着弯弯曲曲的光纤，从一端传到另一端去。实用上常把数十根、成百根光纤做成光缆（图 4-3-8），并使每一根光纤在两端的位置一一对应，用它来传递文字、图像和视频等多种信息。医学上用光纤制成内窥镜（图 4-3-9），用来检查人体内脏的病变。



▲ **图4-3-9** 内窥镜

光纤通信，就是把载有声音、图像和各种数字信号的激光从光纤的一端输入，沿着光纤传到另一端去。它

具有容量大、衰减小、抗干扰能力强、传输质量高等优点，一根比头发丝还细的光纤就可以传输几万路电话或者几千路电视。

利用光纤进行通信的经济效益是惊人的。光纤的原料主要是极普通的石英等材料，几克石英就可以制造出 1 km 长的光纤。1 km 由 8 根光纤组成的光缆取代同样长度的同轴电缆，能节约铅 3.7 t，铜 1.1 t。

我国在光纤通信方面的研究取得了令世人瞩目的成绩，目前正在建设以光缆为骨干的现代化通信网络。借助强大的光纤，通信事业正在大踏步地向前迈进！

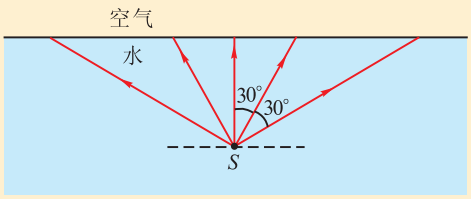
自我评价

1. 根据表4-1-2中水晶的折射率，求光从水晶进入空气时发生全反射的临界角。

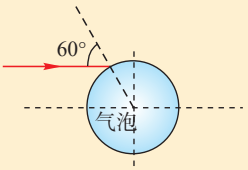
2. 如图4-3-10所示，S为一点光源，分别画出图中各条光线的折射光线和反射光线。

3. 水中和玻璃中的气泡，看起来特别明亮，是因为一部分射到其界面上的光发生了全反射。根据图4-3-11所示的入射光线，完成该光线射到界面后的光路图。

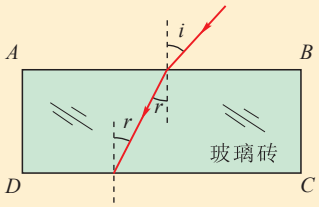
4. 一束红色激光从空气射到厚度均匀的平行玻璃砖表面上，如图4-3-12所示，光在AB面能否发生全反射？光在CD面能否发生全反射？为什么？



▲ 图4-3-10



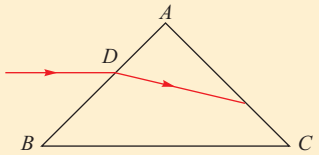
▲ 图4-3-11



▲ 图4-3-12

5. 如图 4-3-13 所示，一个三棱镜的截面为等腰直角三角形△ ABC，∠ A 为直角。此截面所在平面内的光线沿平行于 BC 边的方向射到 AB 边，进入棱镜后直接射到 AC 边上，并刚好能发生全反射。该棱镜材料的折射率为（　　）

A. $\sqrt{3}$　　B. $\sqrt{2}$　　C. $\frac{3}{2}$　　D. $\frac{\sqrt{6}}{2}$



▲ 图4-3-13

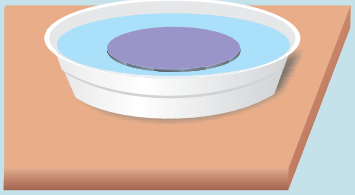
发展空间

实验室

1. 如图 4-3-14 所示，在一个较浅的杯盖中倒满水，将一粒沙子放在杯盖底部的中央，

剪一个半径约为杯盖高度 1.5 倍的不透明圆纸板，使它浮在沙子正上方的水面上，让纸板圆心与沙子正对。虽然纸板并没有把水面全部盖上，但是我们从任何角度观察都看不到沙子，为什么会发生这种现象呢？

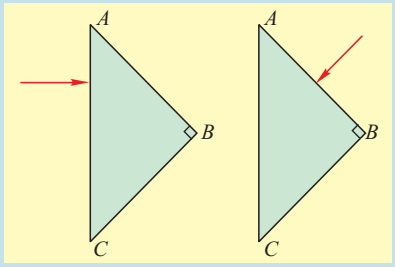
如果量出杯盖内水的高度，请你算出不透明圆纸板的半径小于多少时就可以看到水中的沙子了。



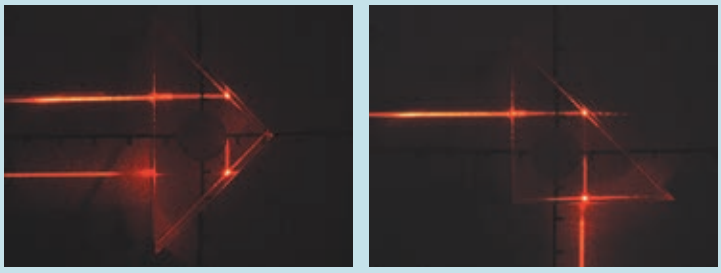
▲ 图4-3-14

2. 全反射棱镜

我们把横截面是等腰直角三角形的玻璃砖叫作全反射棱镜。如图 4-3-15 所示的等腰直角三角形△ ABC 表示了全反射棱镜的横截面，AB 和 BC 表示棱镜上两个互相垂直的侧面，画出如图 4-3-15 中的光线在 AC 面上和 AB 面上垂直射入棱镜后的光路图。通过图 4-3-16 所示的实验验证你的光路图是否正确。



▲ 图4-3-15



（a）　　（b）

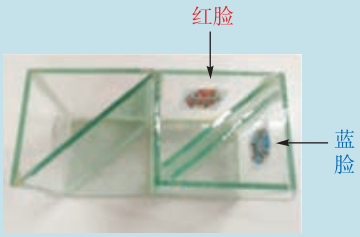
▲ 图4-3-16

走向社会

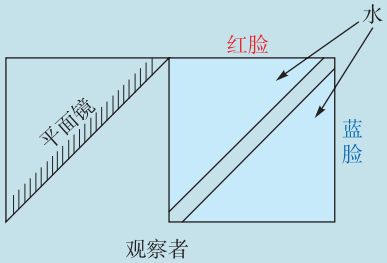
光学“变脸”

川剧变脸是中国国粹，是国家二级文化机密，已列入世界非物质文化遗产。变脸是在川剧艺术中用来塑造人物的一种特技，是揭示剧中人物的内心及思想感情的一种浪漫主义手法。它把不可见、不可感的抽象情绪和心理状态变成可见、可感的具体形象——脸谱。

我们运用光学原理，也可以实现“变脸”。如图 4-3-17 所示，用透明有机玻璃做成长方体，中间用两块有机玻璃把长方体隔离成两个等腰直角三角形，水槽上面内侧贴有“红脸”图案，水槽右面内侧贴有“蓝脸”图案，平面镜平行于隔离玻璃板放置。当两玻璃槽内装满水而隔离玻璃板之间不装水时（图 4-3-18），观察者看到“红脸”“蓝脸”的位置如图 4-3-19 所示。当两隔离玻璃板之间也装满水时（图 4-3-20），



▲ 图4-3-17　“变脸”道具的结构

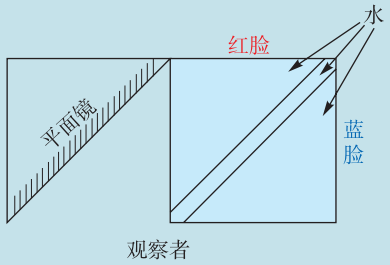


▲ 图4-3-18　隔离玻璃板之间不装水时的光路图



▲ 图4-3-19　变脸前实物图

观察者看到“红脸”“蓝脸”的位置如图 4-3-21 所示，成功实现“变脸”。请你利用所学知识分析变脸的原理，并在图 4-3-18、图 4-3-20 中画出光路图。



▲ **图4-3-20**　隔离玻璃板之间装满水时的情况



▲ **图4-3-21**　变脸后的情形

课外阅览

海市蜃楼

在平静无风的海面、湖面或沙漠上，有时眼前会突然耸立起亭台楼阁、城郭古堡，或者其他物体的幻影，虚无缥缈，变幻莫测，宛如仙境，这就是海市蜃楼（简称蜃景，图 4-3-22）。海市蜃楼是光在空气中发生折射和全反射形成的光学幻景。



▲ **图4-3-22**　2004 年1 月31 日，在烟台山出现罕见的海市蜃楼奇观，在滨海景区观光的数百市民目睹了这一壮观场面

1. 海面上的蜃景

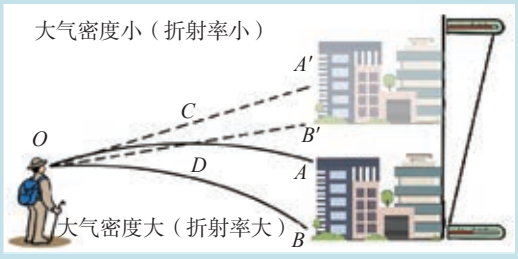
夏季时，靠近海面的空气温度比上空的空气温度低，低层空气的密度（折射率）比高层的大，可以粗略地把海面上方的空气看成是由许多折射率不同的空气层所组成的。

当远处楼阁发出的光线射向空中时，由于经折射率不同的水平空气层的折射，光线越来越偏离法线，最后进入折射率更小的较高空气层时，就可能发生全反射，使楼阁发出的光线向下偏折，光线反射回地面，射入眼睛就会看到远方“悬在空中”的景物，如图 4-3-23（a）所示。

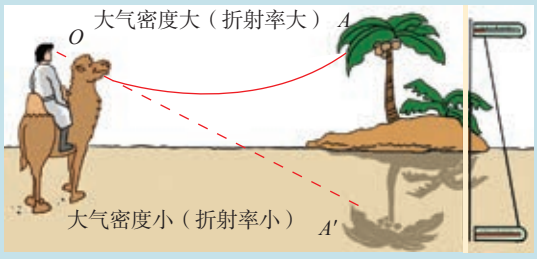
2. 沙漠里的蜃景

在炎热的夏季，沙漠贴近地面的空气由于太阳的照射，温度升得很高，而较高层的空气仍然比较冷，此时，沙漠上方由低到高空气密度将依次变大，折射率也依次变大。

如果沙漠远方有一棵大树，树顶部射向地面的光线，穿过不同折射率的空气层，不断向远离法线的方向偏折，入射角逐渐变大，最后进入折射率更小的较低空气层时，也可能发生全反射，使光线向上弯曲，光线进入人眼，就会看到远处物体的倒景，如图 4-3-23（b）所示。



（a）



（b）

▲ **图4-3-23**　海市蜃楼

4 光的干涉



▲ 图4-4-1 托马斯·杨（Thomas Young，1773—1829）

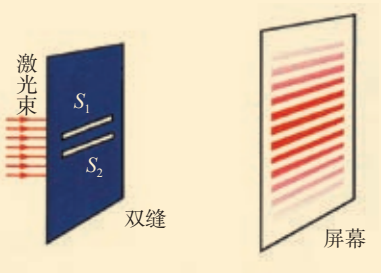
在学习机械波时，我们已经知道干涉现象是波所特有的现象，如果我们能够观察到光的干涉现象，就为光具有波动性提供了有力的实验证据。

1801 年，英国物理学家托马斯·杨（图 4-4-1）在实验室里成功地观察到了光的干涉现象。

双缝干涉

观察思考

如图 4-4-2 所示，用一束平行的红色激光束照射有两条平行狭缝（也称双缝）S_1 和 S_2 的挡板（S_1 和 S_2 相距约 0.1 mm），观察挡板后面与挡板平行的屏幕上所出现的条纹，这些条纹的图案有什么特点？



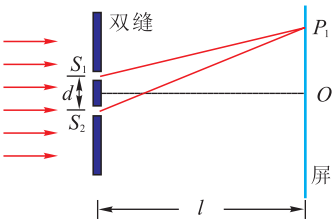
▲ 图4-4-2 双缝干涉实验

红色激光束垂直射到两条狭缝 S_1 和 S_2 时，S_1 和 S_2 就相当于两个完全相同的光源。如果光是一种波，则从 S_1 和 S_2 发出的光在挡板后面的空间中就会叠加而发生干涉现象：光在一些地方互相加强，在另一些地方互相削弱，在屏幕上就能看到明暗相间的条纹。实验中，我们果然在两个狭缝后的屏幕上看到了明暗相间的条纹，且条纹间距相等，这表明两束光在叠加区域内发生了干涉。

如图 4-4-3 所示，由 S_1 和 S_2 发出的两列特定光波在狭缝后面的空间中叠加，当两列波在某一点同时出现波峰或波谷，则在此点两列光波必定同相，叠加结果是光波得

到加强，在这里就会出现一个亮条纹。如果一列波的波峰到达某点，而另一列波的波谷正好在这一点出现，则在此点两列光波必定反相，叠加的结果是相互削弱，于是在这里出现暗条纹。

在图 4-4-3 中的 O 点，与狭缝 S_1 和 S_2 的距离相等，从 S_1 和 S_2 到 O 点，两列光波经过的路程相等，由于 S_1 和 S_2 两个光源的光相位相同，因此在 O 点总是波峰与波峰叠加，波谷与波谷叠加，在 O 点出现的是亮条纹。在 O 点的上方取一点 P_1，P_1 与两个狭缝距离就不相等了。用 Δs_1 表示两狭缝到 P_1 的路程差，如果路程差正好是光波的半个波长，则两列光波到达 P_1 点的时间差正好是半个周期，那么当一列波的波峰到达 P_1 时，另一列波正好在这里出现波谷，两列波叠加结果是互相减弱，于是 P_1 点就会出现暗条纹。同理，在 P_1 点上方，还可以找到 P_2、P_3…各点，使两狭缝到达这些点的路程差 Δs_2、Δs_3…分别为 $\frac{3}{2}\lambda$、$\frac{5}{2}\lambda$…，那么，在 P_2、P_3…各点也会出现暗条纹。若屏上某些点到两狭缝的路程差等于波长的整数倍，如 0、λ、2λ、3λ…，则两列光波到达这些点的时间正好相差周期的整数倍，那么在这些点一列波的波峰总是与另一列波的波峰相遇，这列波的波谷也总是与另一列波的波谷相遇，在这些地方总出现亮条纹。



▲ 图4-4-3　双缝干涉

综上分析，我们可以得到结论：当光从两狭缝到屏上某点的路程差为半波长$\frac{\lambda}{2}$的偶数倍（即波长 λ 的整数倍）时，这些点出现亮条纹；当路程差为半波长$\frac{\lambda}{2}$的奇数倍时，这些点出现暗条纹。

和一般波的干涉一样，光干涉的必要条件是两列光的频率相同。能发生干涉的两束光称为相干光。

光的干涉现象充分表明光是一种波。

观察思考

1. 改变光屏到双缝的距离 l，观察干涉条纹的间距有何变化。
2. 改变双缝的间距 d，观察干涉条纹的间距有何变化。

3. 分别用红光和紫光照射同一个双缝，观察它们的干涉条纹的间距有什么不同。

想一想，双缝干涉条纹的间距可能与哪些因素有关？

薄膜干涉

活动

用一根吸管蘸一点肥皂溶液，可以吹出一串肥皂泡。每个肥皂泡都呈现出五颜六色，你能解释这个现象吗？

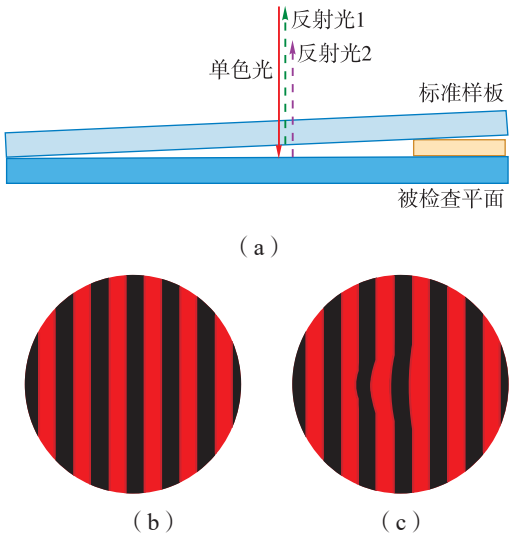


▲ **图4-4-4** 肥皂泡

单色光平行入射到肥皂泡液薄膜上，由液膜前后两个表面反射回来的两束光是相干光，它们相互叠加产生干涉。液膜的厚度不均匀，有些地方相互叠加的两束光是同相的，呈现亮条纹；有些地方相互叠加的两束光是反相的，呈现暗条纹。这样肥皂泡表面就出现了明暗相间的条纹或区域。

用不同波长的单色光照射肥皂泡，条纹的间距不同，如果用白光照射肥皂泡，由于各色光干涉后的条纹间距不同，液膜上就会出现彩色条纹（图 4-4-4）。

光的干涉现象在技术中有重要应用，例如，在磨制各种镜面或其他精密的光学平面时，可以用干涉法检查平面的平整程度。如图 4-4-5（a）所示，在被测平面上放一个透明的样板，在样板的一端垫一个薄片，使样板的标准平面和被测平面之间形成一个楔形空气薄层。用单色光从上面照射，空气层的上下两个表面反射的两列光波发生干涉，空气层厚度相同的地方，两列波的路程差相同，两列波叠加时相互加强或削弱的情况也相同。所以，如果被测表面与标准样板表面一样平整，干涉条纹就是一组平行的直线［图 4-4-5（b）］；如果干涉条纹发生弯曲，就表明被测表面不够平整［图 4-4-5（c）］。这种测量的精度可达 10^{-5} cm。



▲ **图4-4-5** 用干涉法检查平面的平整度

自我评价

1. 在双缝干涉实验中，是哪两列光波相互叠加而发生干涉？它们为什么是相干光波？

2. 双缝干涉实验中出现亮条纹的条件是什么？出现暗条纹的条件是什么？

3. 用单色光做双缝干涉实验，干涉条纹之间的间距是否相等？当屏与双缝之间距离减小，屏上条纹间的距离是增大还是减小？在实验装置不变的情况下，红光的条纹间距与蓝光的条纹间距哪个大？

4. 图 4-4-5 是用干涉法检查某块厚玻璃板的上表面是否平整的装置，所用单色光是用普通光源透过滤光片产生的，检查中所观察到的干涉条纹是由哪两束光线叠加而成的？为什么有的地方出现亮条纹，而有的地方出现暗条纹？

5. 马路积水的表面常漂有一层油膜，油膜呈现彩色图样，这是光的什么现象？

发展空间

课外阅览

增透膜与增反膜

透明的玻璃片可以容许任意色光透射和反射。但如果在玻璃片表面镀上一定厚度的透明薄膜，当光照射时，前、后两表面产生两列反射光波，引起光的干涉。当薄膜厚度适当时，在薄膜的两个面上反射的光恰好反相，它们就互相抵消，大大减小了反射光的强度，增强了透射光的强度，这样的薄膜叫增透膜（图 4-4-6）；也可以控制薄膜的厚度，使从它的两个面上反射的光恰好同相，这就会增强反射光的强度，这样的膜叫增反膜。



▲ **图4-4-6**　照相机镜头镀有增透膜

如照相机镜头表面镀一层厚约99.7 nm的氟化镁薄膜时，感光作用最好的绿光就能几乎全部透过镜头，而反射出来的很少，大大改善了相机的性能。由于绿光的大量透射，光谱边缘部分的红光和紫光的反射并没有显著削弱，所以眼睛看到的镜头呈蓝紫色。

同理，把镀过增透膜的玻璃作为墙面来代替有色玻璃，就可以在商厦、大楼等高大建筑墙面镶上平整轻巧的镀膜玻璃。镀膜玻璃不仅制作规整，可使室内光线柔和明亮，而且又有一定的艺术风格，华贵而大方，人们称其为“镜面建筑”。现在，可以利用加热、喷涂、离子交换、化学镀膜等一系列技术将金属及其化合物按一定厚度和排列方式镀到玻璃表面上。由于镀膜的作用，黄绿光能畅通无阻地进入室内，其余色光则被反射，建筑物内的人可对外面景物一览无余，而外面的人只能从蓝紫色的反射光看到天光云影，对建筑物内部的情况却难窥一斑。另外，多数镜面建筑还把镀膜玻璃与普通玻璃结合使用，构成中空夹心墙壁，就像热水瓶胆那样，夹心空气层起到优良的隔热保温作用，使建筑物内冬暖夏凉，四季如春。镜面建筑也会带来光污染，使街面上出现杂炫光，容易造成交通事故。

5 实验：用双缝干涉测量光的波长

实验原理

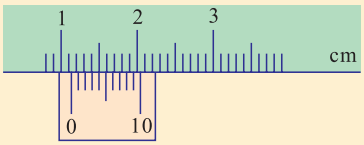
由上一节的实验可知，在双缝后的光屏上可以看到明暗相间的干涉条纹，相邻两条亮条纹（或暗条纹）中线的距离称为条纹间距，间距的大小与光屏到双缝的距离 l、双缝的间距 d 以及入射光的波长 λ 有关。定量研究（本节“发展空间”）可得，当 $l \gg d$ 时，相邻两条亮条纹（或暗条纹）的间距为

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

讨论交流

1. 你能根据双缝干涉条纹图样和公式 $\Delta x = \frac{l}{d}\lambda$ 设计一个测定单色光波长的方案吗？

2. 用游标卡尺可以测量 n 条条纹之间的距离，如果测量时游标卡尺的位置如图 4-5-1 所示，这时游标卡尺的示数是多少？

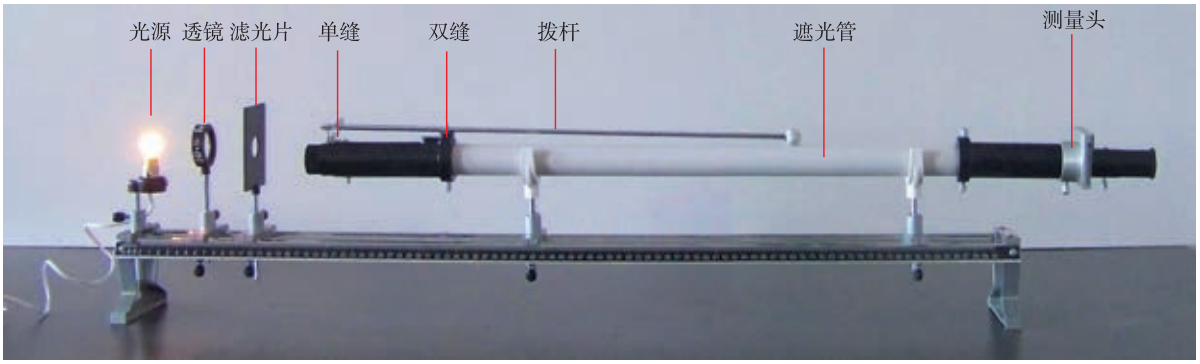


▲ 图4-5-1 游标卡尺

◎实验器材

双缝干涉实验仪一台，结构如图 4-5-2 所示。

双缝干涉的实验装置如图 4-5-2 所示，图中光源发出的白光通过透镜把单缝照亮，单缝相当于一个线光源，它又把双缝照亮，通过双缝的两束光产生干涉，在屏上出现彩色干涉条纹，为了测量单色光的波长，可在单缝前加上滤光片获得单色光，在屏上将出现明暗相间的干涉条纹，若已知双缝到屏的距离 l、双缝的间距 d，再通过调节目镜和测量头测出相邻亮条纹（或暗条纹）之间的距离 Δx，可由上述公式得出单色光的波长。



▲ **图4-5-2**　双缝干涉实验仪

实验操作

1. 把遮光管架在支架环上，其轴线与光具座的导轨基本平行。

2. 在遮光管的一端装上双缝，并转动双缝座，使双缝与水平面垂直。再装好单缝管，使单缝与双缝平行。

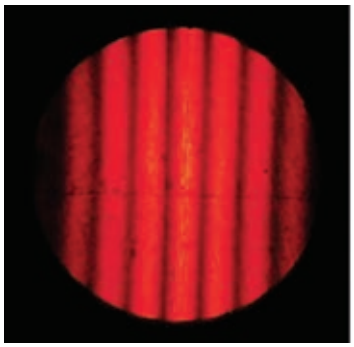
3. 让灯泡灯丝及透镜中心与单缝中心等高。灯丝与单缝之间的距离约为 25 cm。点亮灯泡，先把透镜移近单缝，直至在单缝面上见到灯丝的缩小像，然后把透镜移近灯泡，直至在单缝面上形成一放大的灯丝像，若灯丝的放大像不在单缝中心，则上下或左右调节灯泡，反复调节几次，使灯丝的放大像及缩小像均成在单缝中心。

4. 在遮光管的另一端装上测量头。在单缝管上装上拨杆，边观察，边左右移动拨杆，以调节单缝与双缝平行，直至看到白光的干涉条纹最清晰，这时看到的彩色干涉条纹的特征是：中央为一条白色亮条纹，称为零级亮条纹；其余各级亮条纹都是彩色的，彩色条纹的排列以零级亮条纹为中心左右对称。在第一级亮条纹中，红色在最外侧。

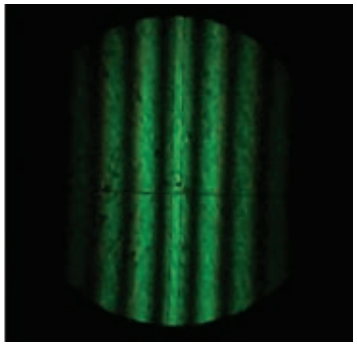
5. 测量单色光波长时，在单缝前面加上红色或绿色滤光片即可看到红黑相间或绿黑相间的干涉条纹，再调节目镜，就能同时清晰地看到分划线和干涉条纹，然后绕光轴转动测量头，使分划线与干涉条纹平行，固定好测量头后即可进行测量。

6. 先移动测量头上的手轮，把分划线对准最左边的一条干涉亮条纹（或者暗条纹），并记下它在游标卡尺上

如果用激光做光源，则可以直接用激光束照射双缝，透镜、滤光片及单缝都不需要了。



（a）红光干涉条纹



（b）绿光干涉条纹

▲ 图4-5-3 干涉图样

的读数 x_1，然后转动手轮，把分划线移向右边，并对准第 n 条（一般可取 7 左右）干涉亮条纹（或暗条纹），如图 4-5-3 所示。这时游标卡尺的读数为 x_n，则相邻两条亮条纹（或暗条纹）之间的距离为

$$\Delta x = \frac{x_n - x_1}{n-1}$$

待测的光波波长为

$$\lambda = \frac{d \cdot \Delta x}{l} = \frac{d}{l} \cdot \frac{x_n - x_1}{n-1}$$

式中 d 为双缝中心的距离，其数值刻在双缝座上，一个为 0.250 mm，另一个为 0.200 mm。l 为双缝至光屏（即分划板）之间的距离，当遮光管未接长管时，l=600 mm；当遮光管接上长管后，l=700 mm。

7. 改变双缝中心距离 d，重复上面的步骤，再测一次。

数据记录与分析

请自己设计表格，把测量数据记录在表中，算出波长并对结果进行分析。

讨论交流

1. 改变双缝宽度，观察干涉图样的变化，为什么会有这种变化？
2. 为什么不直接测量 Δx，而要测量 n 条条纹的间距？

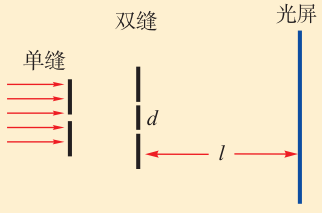
自我评价

1. 在“用双缝干涉测量光的波长”的实验中，光源与屏之间应依次放置（　　）

A. 单缝、滤光片、双缝　　B. 滤光片、单缝、双缝

C. 滤光片、双缝、单缝　　D. 双缝、单缝、滤光片

2. 双缝干涉实验装置如图 4-5-4 所示，双缝间距离为 d，双缝到光屏间距为 l，调整实验装置使光屏上见到清晰的干涉条纹，关于该干涉条纹及改变条件后其变化情况，下列叙述中正确的是（　　）



▲ 图4-5-4

A. 屏上所有亮线都是从双缝出来的两列光波的波峰与波峰

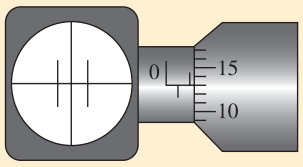
叠加形成的，而所有暗线是波谷与波谷叠加形成的

B. 若将光屏向右或向左平移一小段距离，屏上仍有清晰的干涉条纹

C. 若将双缝间距 d 减小，光屏上两相邻明条纹间距变小

D. 若改用频率较大的色光进行实验，在其他条件不变的前提下，光屏上两相邻暗条纹间距变小

3. 在“用双缝干涉测量光的波长”的实验中，测量头如图4-5-5所示，调节分划板的位置，使分划板中心刻线对齐某亮条纹的中心，此时螺旋测微器的读数为多少 mm？转动手轮，使分划线向一侧移动，到另一条亮条纹的中心位置，由螺旋测微器再读出一读数，若实验测得 4 条亮条纹中心间的距离 $\Delta x = 0.960$ mm，已知双缝间距 $d = 1.5$ mm，双缝到屏的距离 $l = 1.00$ m，则对应的光波波长为多少 nm？



▲ 图4-5-5

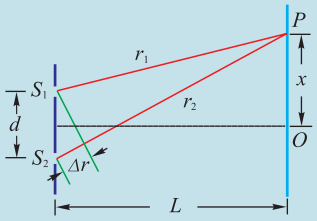
4. 用白光照射双缝出现彩色条纹，为什么中央是一条白色的亮条纹？各彩色条纹中的彩色是怎样排列的？

发展空间

课外阅览

双缝干涉明、暗条纹间距公式的推导

如图4-5-6所示，设双缝S_1和S_2的距离为d，到屏的距离为L，且$L \gg d$，O到S_1、S_2的距离相等。从S_1、S_2射出的光波到达O点的路程相等，所以两列波到O点时路程差为零，总是互相加强，在O点就出现亮条纹。现在我们来研究与O点距离为x的P点的情况。P到S_1、S_2的距离分别为r_1、r_2，从S_1、S_2发出的光波到达P点的路程差是$\Delta r = r_2 - r_1$，由图可知



▲ 图4-5-6

$$r_1^2 = L^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2,\quad r_2^2 = L^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2$$

两式相减，可得

$$r_2^2 - r_1^2 = (r_2 - r_1)(r_2 + r_1) = 2dx$$

由于$L \gg d$，且$L \gg x$，因此$r_2 + r_1 \approx 2L$，所以$\Delta r = \dfrac{d}{L}x$。

如果路程差Δr等于波长λ的整数倍，两列波到达P点时同相，因而互相加强，在P点就出现亮条纹；如果路程差Δr等于半波长$\dfrac{\lambda}{2}$的奇数倍，两列波到达P点时反相，因而互相削弱，在P点就出现暗条纹，即当$\Delta r = \pm k\lambda$，或在屏上满足$x = \pm k\dfrac{L}{d}\lambda$，$k = 1$，2…的地方出现亮条纹。当$k = 1$，2…时，分别为中央亮纹两边的第1条，第2条……亮条纹。

当$\Delta r=\pm(2k-1)\frac{\lambda}{2}$，或在屏上满足$x=\pm(2k-1)\frac{L\lambda}{2d}$，$k=1$，2…的地方出现暗条纹。当$k=1$，2…时，分别为中央亮纹两边的第1条，第2条……暗条纹。

相邻两条亮条纹（或暗条纹）间的距离Δx是相等的，$\Delta x=\frac{L}{d}\lambda$，这就是前面给出的用来求波长的公式。从此式看出，在d和L不变的情况下，干涉条纹间的距离Δx只跟波长λ有关系。用不同的色光做实验，可以看到Δx不同，红光的最宽，紫光的最窄。这表明不同色光的波长不同，红光的波长最长，紫光的波长最短。用白光做光源时，由于各色光的波长不同，Δx的宽度也不同，因此在中央白色亮纹两边出现彩色条纹。

6 光的衍射与偏振

光的干涉现象证明了光具有波动性。光既然是一种波，那么光在传播中是否也能发生波所特有的衍射现象呢？

光的衍射

观察思考

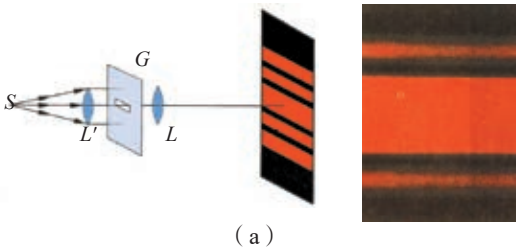
在不透明的屏上装一个宽度可以调节的单缝。在单缝后适当距离处放一个光屏，用激光照射单缝，观察当单缝由较宽逐渐变窄的过程中，屏上所呈现的现象，用白光直接照射单缝，在屏上又会看到什么现象？

也可以用直径大小可以调节的圆孔代替宽度可调的单缝进行实验。

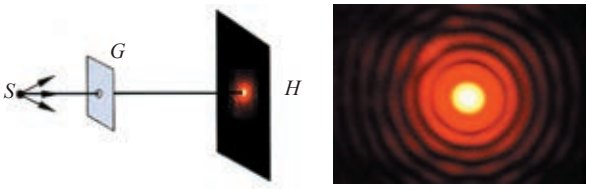
当单缝较宽时，光沿着直线方向通过单缝，在光屏上可以看到一条跟单缝宽度相当的亮线（或亮斑）；把单缝调窄些，可以看到屏上亮线也随之变细。

当单缝调到很窄时，光通过单缝后就明显地偏离了直线传播方向，在屏上出现的不再是一条很窄的亮线，而是扩展到了相当宽的地方，并且出现了明暗相间的条纹；

再调小单缝，条纹也随之变得清晰、细小，如图 4-6-1 所示。



（a）



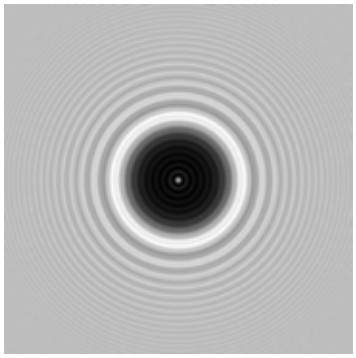
（b）

▲ **图4-6-1**　光的衍射现象

以上现象说明光通过很小的狭缝时，明显地偏离了直线传播方向。在屏上出现的不是在一般情况下狭缝的像，而是散开到相当大的范围。按照直线传播的规律应该属于阴影的区域也会出现亮条纹；反之，应该属于亮区的地方也会出现暗的区域。这种现象叫作光的**衍射**。衍射时产生的明暗相间的图样叫作衍射图样。各种不同形状的障碍物都能使光发生衍射，使得影像的轮廓模糊不清，甚至出现明暗相间的衍射条纹。光的衍射现象进一步证明了光具有波动性。

光的衍射图样具有一定的特征。单色光的单缝衍射图样的特点是中央有一条较宽较亮的条纹，两边是对称且明暗相间的条纹，亮条纹的强度向两边很快减弱，白光通过单缝产生的衍射图样中央是一条白色条纹，两边是很快减弱的彩色条纹。

著名的数学家泊松根据物理学家菲涅耳提出的波动理论推算出在光照射不透明的小圆板时，由于衍射，在圆板阴影的中心应该出现一个亮斑，他认为这是非常荒谬的，以此企图驳倒菲涅耳的波动理论。菲涅耳与阿拉果（同为法国物理学家）接受了泊松的挑战，反复实验，发现圆板中心确有一个亮斑，如图 4-6-2 所示。反过来，“泊松亮斑”实验却成了光的波动理论的有力证据，泊松本人心悦诚服，转而成了波动理论的支持者。



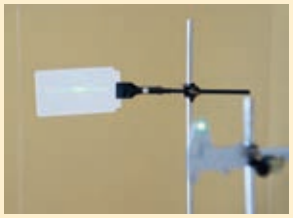
▲ **图4-6-2**　泊松亮斑

实验探究

将游标卡尺固定在铁架台上，并使它处于竖直平面内，将教学用激光笔固定在另一铁架台上。按照激光笔、游标卡尺、光屏的顺序安放，使激光笔射出的激光束垂直正对游标卡尺的测量爪之间的狭窄缝隙，如图 4-6-3 所示。调节缝隙的宽窄，观察光屏上光斑的变化。



▲ **图4-6-3**



▲ 图4-6-4

图 4-6-4 是激光笔发出的激光经过游标卡尺测量爪之间的狭窄缝隙时发生衍射现象的实际情形。

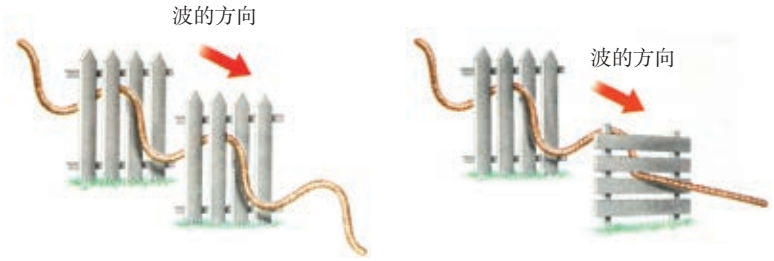
试着用游标卡尺进行实验，看看缝隙大小对衍射现象的影响。

活动

将两支铅笔并排放在一起，中间留一条狭缝，通过这一条狭缝去看与狭缝平行的线光源（例如教室里的日光灯管），你看到了什么现象？对此现象进行解释。

光的偏振

用手握住绳的一端，另一端固定。手做垂直于绳方向的抖动，在绳上就形成了横波。如果在绳波传播的路径中放置一个带有狭缝的栅栏（图 4-6-5），我们看到：当狭缝的方向与绳的振动方向相同时，绳上横波可以传过去；狭缝的方向与绳的振动方向垂直时，绳上横波就不能通过了，这种现象叫作**偏振**（polarization）。偏振现象是横波特有的现象，纵波不会出现偏振现象。光是否也有偏振现象呢？



（a）竖条栅栏允许上下振动的波通过

（b）沿竖直方向振动的波不能通过横条栅栏

▲ 图4-6-5 偏振

活动

买一副 3D 眼镜，这两个镜片就是偏振片（图 4-6-6），将它们从镜架上取下。取一块偏振片，通过它去观察一个发光的灯，我们看到它是透明的。绕过偏

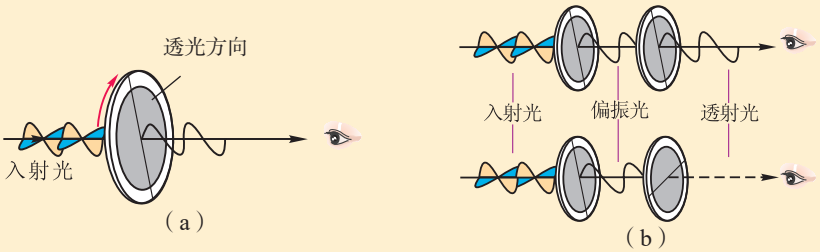
振片中心并垂直其平面的轴转动偏振片，透过的光并没有发生变化。如图 4-6-7（a）所示。

再取一块同样的偏振片，把它放在前一块偏振片的后面，让它们互相平行。固定前一块偏振片，绕中心轴转动后一块偏振片，如图 4-6-7（b）所示，你看到了什么现象？



▲ 图4-6-6　3D眼镜

这其中发生了什么变化？这两块偏振片算不算透光的物体？



▲ 图4-6-7　光的偏振

可以发现，当只有一块偏振片时，无论怎样转动偏振片都能看到光通过。若有两块偏振片，固定前一块，转动后一块，到一定程度时就看不到光通过了。

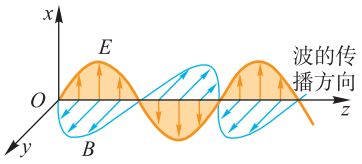
这就是光的偏振现象，它说明光是横波。从理论上可以证明电磁波是横波，电磁波在空间自由传播的过程中，变化电场 E 和变化磁场 B 的方向都与传播方向垂直。图 4-6-8 表示一列沿 z 方向传播的光波，光是电磁波，平时所说光振动的方向就是指 E 的方向，在图中 E 沿 $\pm x$ 方向。

如果光振动的方向限在一个平面，这种光叫线偏振光。通常光源发出的光（包括太阳光）是由大量的、振动方向不同的线偏振光组成，称为自然光。

如果在自然光（如灯光、太阳光）传播的方向上放一偏振片，其中只有那些振动方向与偏振片透光方向平行的成分可以通过偏振片，于是就得到了线偏振光。

使线偏振光射向另一块偏振片时，如果这块偏振片的透光方向正好和入射的线偏振光振动方向垂直，这束线偏振光就不能通过了；如果这两个方向相同，它就可以通过第二块偏振片；如果这两个方向成一个任意角度，将只有部分线偏振光通过第二块偏振片。

偏振片用特定的材料制成，它有一个特殊的方向叫作透光方向。只有振动方向与透光方向平行的成分才能通过偏振片。



▲ 图4-6-8　沿z方向传播的光波

太阳光、灯光等被墙壁、水面、云层等反射后，变为部分偏振光，即沿某一方向振动较为强烈，而沿另一方向振动较微弱。

自我评价

1. 什么是光的衍射现象？在什么情况下能观察到明显的光的衍射现象？

2. 下列现象中，属于光的衍射的是（　　）

A. 雨后天空出现彩虹

B. 通过一个狭缝观察日光灯可看到彩色条纹

C. 海市蜃楼现象

D. 日光照射在肥皂膜上出现彩色条纹

3. 分别用红色和蓝色激光照射同一个狭窄的单缝观察衍射现象，哪个的中心条纹宽度较大？为什么？

4. 透过一块偏振片去看平静湖面反射的光，当转动偏振片时，会看出明暗有明显的变化，但不会出现完全黑暗的情况。这是否说明由湖面反射的光是偏振光？它是不是线偏振光？

发展空间

物理在线

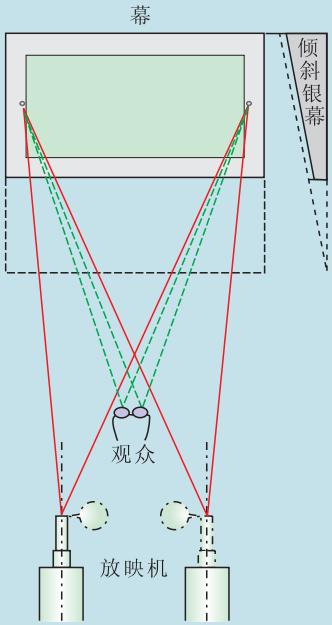
上网查找有关光的偏振的资料，了解有关光的偏振的应用。

课外阅览

立体电影的摄制和放映

人眼对于周围的物体之所以会产生立体的感觉，是由于“双目效应”。原来，当我们注视一个物体的时候，这个物体发出的光在左右眼的视网膜上面分别成像，它们的形态略有差异，左眼看到物体的左侧面较多，右眼看到的右侧面较多，左右眼的视像产生的视觉信息通过视神经分别传递到脑的视觉中心（“视丘”），使我们能判断物体的远近，产生了立体图像的感觉。

立体电影是用两个镜头如人眼那样从两个不同方向，同时拍摄下景物的像，制成电影胶片。立体放映机也是双镜头的，但在镜头上分别安装偏振片。放映机射出的光，通过偏振片后，就成了偏振光，左右镜头上的偏振片透光方向互相垂直，因而产生了两束偏振方向互相垂直的线偏振光，这两束光投射到银幕上，再反射到观众处，偏振方向不变。看立体电影的观众戴上特制的偏振光眼镜，这样，银幕上的“左视”画面就只能由观众的左眼看到，银幕上的“右视”画面就只能由右眼看到。这个过程和眼睛直接观看的效果一样，于是银幕上的画面就有了立体感（图 4-6-9）。



▲ **图4-6-9**　立体电影原理

7 激　光

在“光的干涉”一节中，我们已经知道用普通光源做双缝干涉实验时，需要用光先照射一条单缝，再用从单缝中射出的光照射双缝。如果以激光作为光源进行实验，就可以不用单缝，直接照射双缝即可。这是为什么呢？

激光的特性

1960 年，科学家在实验室里制成第一台激光器，用它激发出了一种自然界中没有的光，那就是**激光**（laser）。激光与普通光相比，有一系列特殊的性质。

1. 强度大

激光的强度可达 $10^{17}\ W/cm^2$。而氧炔焰的强度不过 $10^3\ W/cm^2$。针头大的半导体激光器的功率可达 200 mW。用于热核反应实验的激光器的脉冲平均功率已达 $10^{14}\ W$，可以产生 $10^8\ K$ 的高温。

2. 方向性好

光束方向性的好坏，是由光束的发散角的大小来量度的。普通光源是向四面八方发射的，好的探照灯由于附加了抛物面形反射镜而改善了方向性，发散角也只可减小到0.1 rad；而激光光束的发散角在 10^{-3} rad数量级（图 4-7-1）。

例如，氦氖激光器发射的激光束的发散角仅为 0.5×10^{-3} rad。把它投射到 3.8×10^5 km 外的月球上，光照面的直径只有 2 km 左右。



▲ **图4-7-1**　射向太空的激光束

3. 单色性好

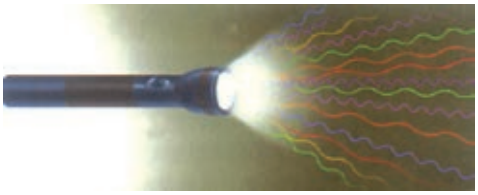
激光出现之前，在普通光源中，氪 86（^{86}Kr）灯发出的波长为 605.7 nm 的光谱线的单色性最好，在低温条件下，其光谱宽度 $\Delta\lambda = 0.000\ 47$ nm。同时，在普通光源中，光一般都是由几条分立的谱线或更复杂的成分所组成的，

因此，单色性的提高总是伴随着亮度的牺牲。激光出现以后，状况大为改观。例如，单模稳频氦氖激光器所输出的波长为 632.8 nm 的激光，作为一种高亮度的单色光源，其谱线宽度 $\Delta\lambda<10^{-8}$ nm，这比普通光源中单色性最好的氪灯的单色性提高了四五个数量级。

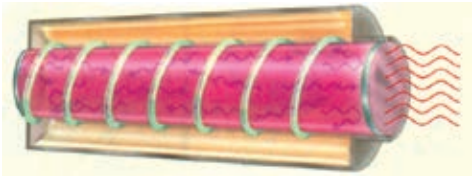
4. 相干性好

光是从物质的原子中发射出来的。原子获得能量后处于不稳定状态，它以光子的形式把能量发射出去。普通光源比如白炽灯，灯丝中每个原子在什么时候发光，朝哪个方向发光，是不确定的，发光频率也不一样，这样的光不能产生干涉（图 4-7-2）。而一束激光中所有光子的频率是相同的，振动情况也完全相同，所以激光是最好的相干光（图 4-7-3）。这就是不用单缝而将激光直接照射到双缝上，也可以清晰地观察到干涉条纹的原因。

《物理 选择性必修 第三册》。



▲ **图4-7-2** 手电筒发出的光是不相干光



▲ **图4-7-3** 激光器发出相干光

5. 覆盖波段宽而且可调谐

用不同类型的激光器已经获得从 X 射线到远红外波段的激光，这为深入探索物质结构等复杂问题提供了条件，人们利用各种物理效应，制造出了不同类型的可调谐激光器，像无线电波那样进行调制，用来传递信息。

激光的应用



▲ **图4-7-4** 这是汽车生产线上的机器人在对汽车车身进行激光焊接

激光由于具备以上这些特点，在军事、工业、农业、科技、医学、环境保护、公安以及社会生活各个方面都有着极其广泛的应用。现选择几个方面简介如下。

1. 激光加工

由于激光具有能量高度集中的特点，聚焦后可以在焦斑上达到很高的能量密度，因此可用来对材料或工件进行打孔、焊接（图 4-7-4）、切割、划片、热处理、雕刻等。

其优点是：可对高熔点、高硬度和脆性材料加工；热变形、热影响区域小；可避免杂质污染；可加工复杂图形，等等。

2. 激光全息照相

利用激光的相干性，可以不用镜头或其他成像装置，而将与物体反射光波的振幅和相位有关的信息转换成强度的变化，作用在感光材料上，记录下物体三维图像的信息，这对于只能记录平面图像的一般摄影，是一重大突破。

用全息照相摄下的全息照片在防伪上可起到很大作用。例如在信用卡上贴上全息照片，将使卡片难以仿制。

3. 激光检测

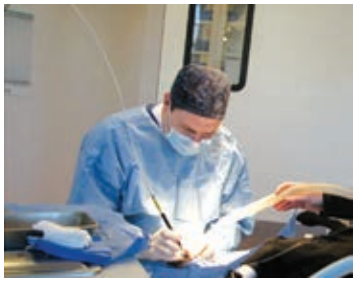
由于激光作用在特定几何形状上会产生特定的散射图形（称为散斑），用它来对产品进行检测，可以发现产品的质量缺陷。激光检测具有速度快，漏检率低，能快速分类、记录、数据储存等诸多优点。

4. 激光通信

随着光导纤维的出现，近年来激光通信得到迅速发展。与常规通信相比，激光通信的特点是容量大，例如，从理论上讲用集成光路和光纤组成的激光通信系统，能同时传播 100 万套电视节目。另外，激光通信还有保密性好、抗干扰能力强、安全可靠等优点。

5. 激光医学

利用激光能量的高度集中以及激光对人体组织的各种效应，已制成“激光刀”，并广泛运用于眼科、整形外科、耳鼻喉科等，与常规手术方式相比，使用激光刀时病人出血量少、手术时间短、恢复快（图 4-7-5）。激光治疗癌症也是令人感兴趣的一个课题。利用某些癌组织对不同波长激光的选择性吸收，可在不破坏正常组织的情况下杀死或破坏癌组织。



▲ **图4-7-5**　用激光做手术

6. 激光照排

已经得到广泛应用的激光照排技术是印刷技术及办公自动化的一次重大革命。激光照排的基本原理是将文字通过计算机分解为点阵，然后控制激光在感光底片上进行扫描，用曝光点的点阵组成文字和图像。由于采取了激光照排技术，我国古老的汉字印刷技术重新焕发了

青春，引起了世界瞩目。

7. 激光的其他一些新技术、新应用

（1）人类第一次实际探测到引力波

2016 年，人类第一次直接探测到了引力波。来自汉诺威激光中心公司的激光技术专家在这一发现中发挥了重要作用，因为探测所使用的激光干涉引力波天文台（LIGO）中的核心仪器具有超精密激光技术，能够进行弱引力波信号的检测。

（2）中国首次发现激光驱动流体新技术

2017 年 10 月 12 日，在电子科技大学激光驱动流体技术学术成果媒体交流会上，该校基础与前沿研究院王志明教授团队与来自河南工程学院、美国休斯敦大学、美国哈佛大学、美国普渡大学等国内外高校的合作者提出了一种全新的光流体学机理，并成功利用脉冲激光在纯水中实现持续高速的水流喷射，首次实现激光驱动流体。这一突破性的实验发现结合了纳米光子学、声学、微流体学和材料等科学，未来有望实现在光控微流体、激光手术、激光清洗、医学等领域中广泛应用。

激光的应用数不胜数。随着时代的发展，激光将逐渐深入到我们生活的每一个角落，提高我们的生活质量，对人类文明的进步起着巨大的推动作用。

自我评价

1. 关于激光，下列说法中正确的是（　　）

A. 激光是由自然界中某种物质直接发光产生的

B. 激光在真空中传播的速度大于 3×10^8 m/s

C. 激光反射也遵循反射定律

D. 激光通过小孔时能产生衍射现象

2. 纳米科技是跨世纪新科技，将激光束的宽度聚集到纳米级范围内可恢复人体已损坏的器官，对 DNA 分子进行超微型基因修复，把至今尚令人类无奈的癌症彻底根除。这主要是利用了激光的（　　）

A. 单色性　　B. 方向性　　C. 高能量　　D. 偏振性

3. 激光的特点是什么？请举两到三个实例来说明激光的用途。

发展空间

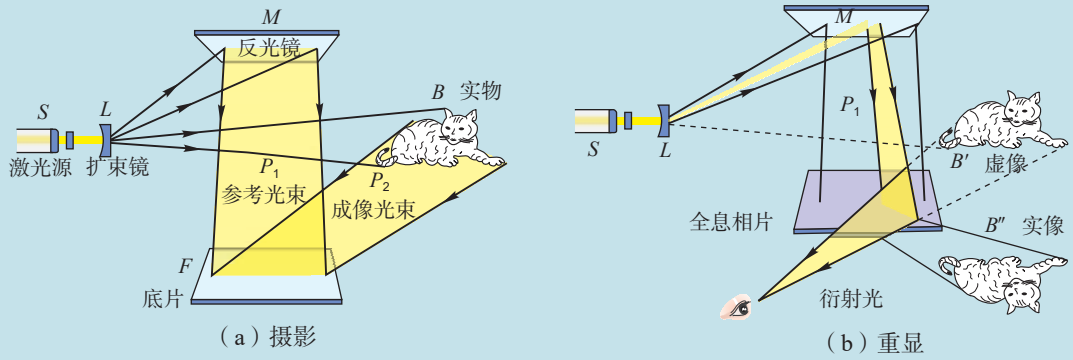
课外阅览

全息照相

全息照相是利用干涉和衍射原理在20世纪60年代发展起来的新技术，它在工程测量、显微技术、生物、农业、军事等各方面都有重要应用。普通的摄影仅能记录实物在某一角度上所产生的视觉印象，全息摄影则能记录实物在各种不同角度的视觉印象，即它能记录“全部信息”。全息技术包括“摄影”和“重显”两个过程。

全息照相基本原理见图4-7-6。从激光源（如氦氖激光器）发出的光束被透镜扩展后，使一部分光束 P_1 在反光镜上反射后，照射到底片上，另一部分光束 P_2 将实物 B 照亮，并让 B 的漫反射光束也射在同一底片上；由于激光具有严格的单色性和良好的传播性能，因此两束单色相干光在底片上产生出一套记录实物形状的干涉条纹的潜像。经显影处理后获得一种布满不规则干涉斑纹的“全息相片”，它和原物毫不相似，但却包含着实物形象的信息。

“重显”过程：将光源、反光镜放置在摄影时的位置上，将全息相片放在底片的位置上。这时如果隔着相片看去可以看到和实物同状的虚像，移动眼部位置进行观察，会看到不同角度的立体视觉印象，就像观察立体物体一样。重显的原理是全息相片起着“衍射光栅”的功用。能够证明，从相片各点上射到眼中的各条衍射光的强度，恰巧和摄影时从实物上各点直接射入眼中的光的强度一样。



▲ 图4-7-6

反思·小结·交流

• 学后反思

1. 几何光学的特点是什么？哪些典型的光学现象用几何方法进行研究？
2. 波动光学的特点是什么？哪些典型的光学现象说明光具有波动性？

• 自主小结

1. 准确表述光的折射定律。利用光的折射定律解释生活中的光学现象。
2. 什么是光的全反射？利用光的全反射知识解释生活中的光学现象。
3. 什么是光的干涉与衍射？
4. 什么是光的偏振？

• 相互交流

1. 查阅资料，说说光在生产、生活中的广泛应用，并简要分析其原理。
2. 查阅资料，了解光污染，并谈谈对光污染的治理措施。

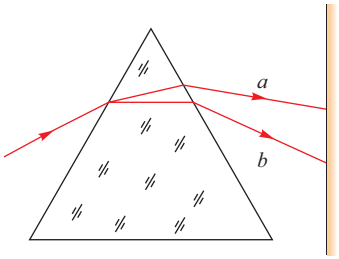
本章复习题

1. 一束单色光由空气进入水中，则该光在空气和水中传播时（　　）

A. 速度相同，波长相同
B. 速度不同，波长相同
C. 速度相同，频率相同
D. 速度不同，频率相同

2. 如图所示，一束光经玻璃三棱镜折射后分为两束单色光a、b，波长分别为λ_a、λ_b，该玻璃对单色光a、b的折射率分别为n_a、n_b，则（　　）

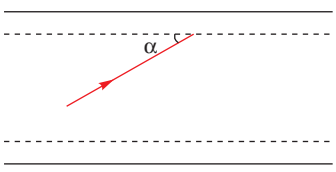
A. $\lambda_a<\lambda_b$，$n_a>n_b$　　B. $\lambda_a>\lambda_b$，$n_a<n_b$
C. $\lambda_a<\lambda_b$，$n_a<n_b$　　D. $\lambda_a>\lambda_b$，$n_a>n_b$



▲ 第2题图

3. 光导纤维是利用光的全反射来传输光信号的，光导纤维由内、外两种材料制成，内芯材料的折射率为n_1，外层材料的折射率为n_2。如图所示的一束光信号与界面间的夹角为α，由内芯射向外层，要想在此界面发生全反射，必须满足的条件是（　　）

A. $n_1>n_2$，α大于某一值
B. $n_1<n_2$，α大于某一值
C. $n_1>n_2$，α小于某一值
D. $n_1<n_2$，α小于某一值



▲ 第3题图

4. 如图所示，市场上有一种灯具俗称“冷光灯”，用它照射物品时能使被照物品处收到的热量大大降低，从而广泛地应用于博物

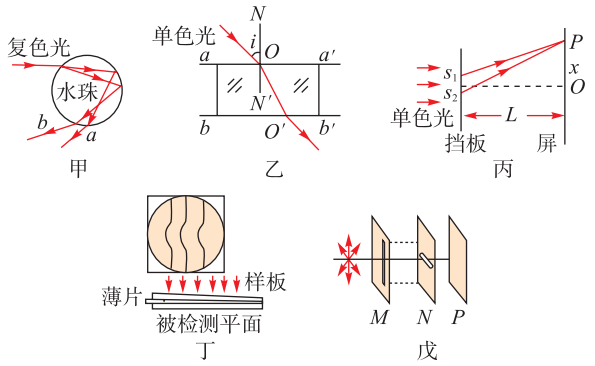
馆、商店等处。这种灯与普通灯具的不同在于灯泡后面放置的反光镜玻璃表面上镀了一层薄膜（例如氟化镁），这种膜能消除不镀膜时玻璃表面反射回来的热效应最显著的红外线。以λ表示红外线的波长，则所镀薄膜的厚度应为（　　）

A. $\frac{1}{8}\lambda$　　B. $\frac{1}{4}\lambda$　　C. $\frac{1}{2}\lambda$　　D. λ



▲ 第4题图

5. 关于如图所示的几种情况，下列说法中正确的是（　　）



▲ 第5题图

A. 图甲是一束复色光进入水珠后传播的示意图，其中a束光在水珠中传播的速度一定大于b束光在水珠中传播的速度

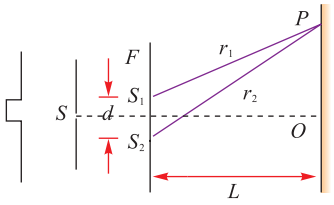
B. 图乙是一束单色光进入平行玻璃砖后传播的示意图，当入射角i逐渐增大到某一值后不会再有光线从bb'面射出

C. 图丙是双缝干涉示意图，若只减小屏到挡板间的距离L，两相邻亮条纹间距离将减小

D. 图丁是用干涉法检测工件表面平整程度时得到的干涉图样，弯曲的干涉条纹说明被检测的平面在此处是凸起的

E. 图戊中的M、N是偏振片，P是光屏。当M固定不动、缓慢转动N时，光屏P上的光亮度将会发生变化，此现象表明光波是横波

6. 某质检部门为检测一批矿泉水的质量，利用干涉原理测定矿泉水的折射率。方法是将待测矿泉水填充到特制容器中，放置在双缝与荧光屏之间（之前为空气），如图所示（特制容器未画出）。通过比对填充后的干涉条纹间距x_2和填充前的干涉条纹间距x_1就可以计算出该矿泉水的折射率。则下列说法正确的是（设空气的折射率为1）（　　）



▲ 第6题图

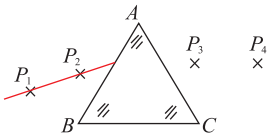
A. $x_2 < x_1$

B. $x_2 > x_1$

C. 该矿泉水的折射率为$\frac{x_1}{x_2}$

D. 该矿泉水的折射率为$\frac{x_2}{x_1}$

7. 如图所示，在测量玻璃折射率的实验中，两位同学先在白纸上放好截面是正三角形$\triangle ABC$的三棱镜，并确定AB和AC界面的位置。然后在棱镜的左侧画出一条直线，并在线上竖直插上两枚大头针P_1和P_2，再从棱镜的右侧观察P_1和P_2的像。



▲ 第7题图

（1）此后正确的操作步骤是_____。

A. 插上大头针P_3，使P_3挡住P_2的像

B. 插上大头针P_3，使P_3挡住P_1、P_2的像

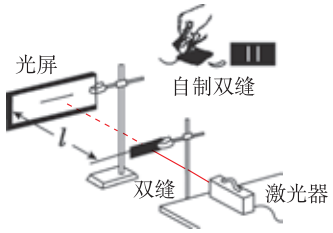
C. 插上大头针P_4，使P_4挡住P_3的像

D. 插上大头针P_4，使P_4挡住P_1、P_2的像和P_3

（2）正确完成上述操作后，在原图上大致标出大头针P_3、P_4的位置，并通过作图说明不用量角器，只用刻度尺和圆规测量玻璃折射率的方法。

8. 在“观察光的干涉现象”的实验中，将两片

刀片合在一起，在涂有墨汁的玻璃片上划出不同间隔的双缝；按如图所示的方法，让激光束通过自制的双缝，观察在光屏上出现的现象。



▲ 第8题图

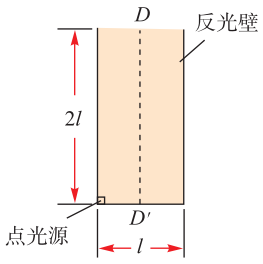
（1）保持双缝到光屏的距离不变，换用不同间隔的双缝，双缝的间隔与屏上明暗条纹间距的关系如何？

（2）保持双缝的间隔不变，光屏到双缝的距离与屏上明暗相间的条纹间距的关系如何？

（3）在双缝间的距离以及双缝与屏的距离都不变的条件下，分别用蓝色和红色的激光照射，屏上明暗相间的条纹间距有什么不同？

（4）在该实验中，若所用激光的波长为 5.300×10^{-7} m，屏上 P 点距双缝 S_1 和 S_2 的路程差为 1.855×10^{-6} m，则在这里出现的是“亮条纹”还是“暗条纹”？为什么？

9. 一竖直桶状容器的高为$2l$，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D点射出的两束光线相互垂直，求该液体的折射率。

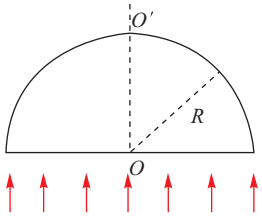


▲ 第9题图

10. 如图所示，一半径为R的玻璃半球，O点是半球的球心，虚线OO'表示光轴（过球心O与半球底面垂直的直线）。已知玻璃的折射率为1.5，现有一束平行光垂直入射到半球的底面上，有些光线能从球面射出（不考虑被半球的内表面反射后的光线）。求：

（1）从球面射出的光线对应的入射光线与光轴距离的最大值；

（2）距光轴$\frac{R}{3}$的入射光线经球面折射后与光轴的交点到 O 点的距离。



▲ 第10题图

中英文索引

（名词后面的数字是它第一次出现的页码）

B

波长 wavelength 69
波形 waveform 72

C

冲量 impulse 8

D

动量 momentum 6
动量定理 theorem of momentum 8
动量守恒定律 law of conservation of momentum 13
单摆 simple pendulum 48
多普勒效应 Doppler effect 86

F

非弹性碰撞 inelastic collision 23
反冲 recoil 29
反射 reflection 76

G

共振 resonance 57
干涉 interference 82
光密介质 optically denser medium 95
光疏介质 optically thinner medium 95

H

回复力 restoring force 45
横波 transverse wave 66

J

激光 laser 121
简谐运动 simple harmonic motion 39
介质 medium 66
机械波 mechanical wave 66

L

临界角 critical angle 102

P

碰撞 collision 2
频率 frequency 40
偏振 polarization 118

Q

驱动力 driving force 55
全反射 total reflection 102

S

受迫振动 forced vibration 56
色散 dispersion 100

T

弹性碰撞 elastic collision 22

W

完全非弹性碰撞 perfect inelastic collision 23

X

相位 phase 40
相位差 phase difference 42
固有频率 natural frequency 55

Y

衍射 diffraction 83

Z

振动 vibration 38
振子 oscillator 39
振幅 amplitude 40
周期 period 40
阻尼振动 damped vibration 55
自由振动 free vibration 55
纵波 longitudinal wave 67
折射 refraction 78
折射定律 refraction law 93
折射率 refractive index 94

后　记

为全面落实立德树人根本任务，着力发展学生的核心素养，根据《普通高中课程方案（2017 年版）》的精神，我们按照《普通高中物理课程标准（2017 年版）》对高中物理教科书进行了全面修订。

本书在修订过程中，保留了原教科书的部分内容，并得到了许多专家、学者和老师的指导与帮助。邱小文、王平、王磊、薛祝其、姜峰等同志参与了原教科书的编写；朱行建、查雪娟、吕彤等同志审阅了本书修订稿的部分章节；在复审阶段，吕彤、钱奇兰、刘和平、袁建平、杨佩霞、陈丰波、王少玲等同志对教科书进行了审读和试教，并提出了宝贵意见。在此，我们对所有关心、支持本书编写与修订的专家、学者和老师表示衷心的感谢。

本书选用了一些图片和文字资料，对相关作者和出版社，我们一并表示诚挚的谢意。

编者

2019 年 2 月

出 版 人　李　东
责任编辑　莫永超
版式设计　李勤学　郝晓红
责任校对　马明辉
责任印制　叶小峰

普通高中教科书

物理　选择性必修　第一册

WULI　XUANZEXING　BIXIU

教育科学出版社出版发行
（北京·朝阳区安慧北里安园甲9号）
邮编：100101
市场部电话：010-64989009　010-64891796（传真）
编辑部电话：010-64989537　010-64989519（传真）
总编室电话：010-64981290　出版部电话：010-64989487
编辑部邮箱：wuli@esph.com.cn
网址：http://www.esph.com.cn
各地新华书店经销
天津市光明印务有限公司印装
开本：890毫米×1240毫米　1/16　印张：8.5
2021年1月第1版　2022年5月第4次印刷

ISBN 978-7-5191-2325-3
定价：9.85元
批准文号：京发改规〔2016〕13号　价格举报电话：12315
图书出现印装质量问题，本社负责调换。