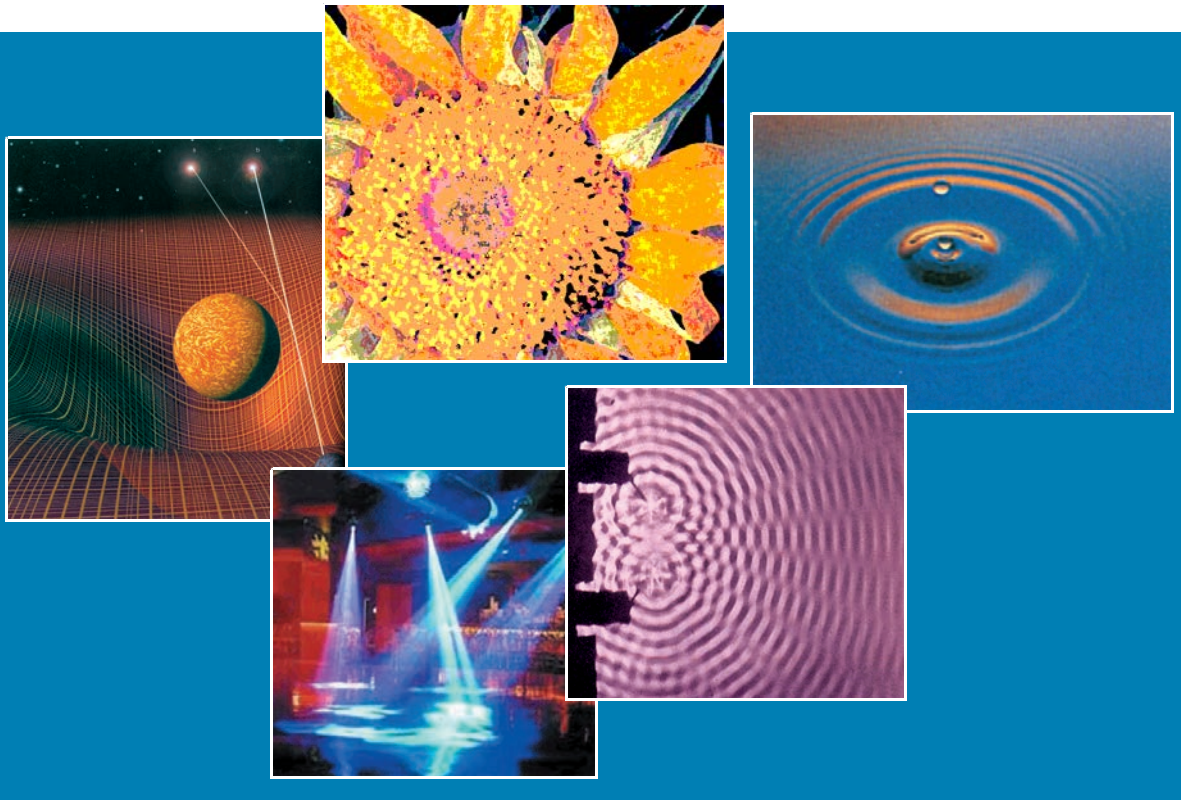
经全国中小学教材审定委员会 2005 年初审通过

普通高中课程标准实验教科书

物理 选修 3-4

PHYSICS

主编 束炳如 何润伟



上海科技教育出版社

亲爱的同学：

欢迎你选择学习《物理 3–4》！

物理学的巨大魅力，可能早已让你深爱物理学！我们愿继续与你携手，迈向一座座更加辉煌的物理学殿堂。

你正在跨入《物理 3–4》的大门。在这里，你将与波同行、与光为伴，乘着电磁波的翅膀，穿越时空的隧道，领略物理世界的奇光异彩；在这里，惠更斯波动理论的形象直观，麦克斯韦电磁理论的优美简洁，赫兹捕捉电磁波时的欣喜惊叹，爱因斯坦时空观的卓越超凡……这一切都会让你流连忘返。

《物理 3–4》将为你提供进一步探究的机会。你将通过实验和理论分析，探究振动、机械波、电磁波和光的有关现象和过程；这将使你充分发挥想象，尽情体验理想实验在研究时空问题中的作用，实现认识和观念的飞跃与发展。

为了在学习《物理 3–4》的过程中获得更大的成功，请你浏览以下的本书栏目介绍。



图 2–1　激动人心的冲浪



图 2–2　水滴在水面激起的水波

第 2 章

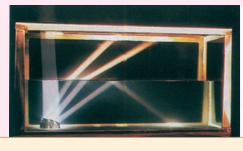
机械波

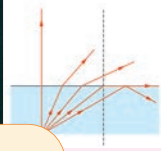
你知道冲浪运动吗？那汹涌的波涛时而把人推向高耸的巅峰，时而又将人卷入无底的深渊，让人们尽情享受冲浪的乐趣。

每章的开头都有一些情景，提出一些问题，让你明确本章研究的主要内容。

分析论证

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



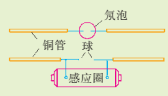


分析论证

在这里，你将经历分析、综合、应用数学工具进行推理，从而得出物理学规律和公式的过程，体会到高中物理理论思维的魅力。



a 模仿赫兹做实验



b 赫兹振荡器示意图

图 3–9

实验探究　模仿赫兹做实验

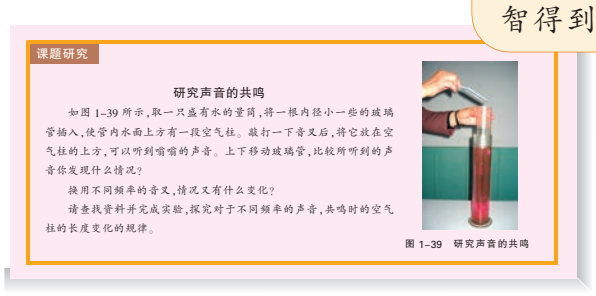
实验器材如图 3–9a 所示。用感应圈作振荡器，接收器由铜管[illegible]–9b）。当振荡器发出电磁波时，移动接收[illegible]离和方位，使接收器上的氖泡发亮。

实验探究

这里将要求你提出问题，设计实验方案，动手做一些有意义的实验，进行科学探究。

课题研究

这里提供了一些课题供你选择研究，这种研究会让你的才智得到充分的展示。



课题研究

研究声音的共鸣

如图 1–39 所示，取一只盛有水的量筒，将一根内径小一些的玻璃管插入，使管内水面上方有一段空气柱。敲打一下音叉后，将它放在空气柱的上方，可以听到嗡嗡的声音。上下移动玻璃管，比较所听到的声音你发现什么情况？

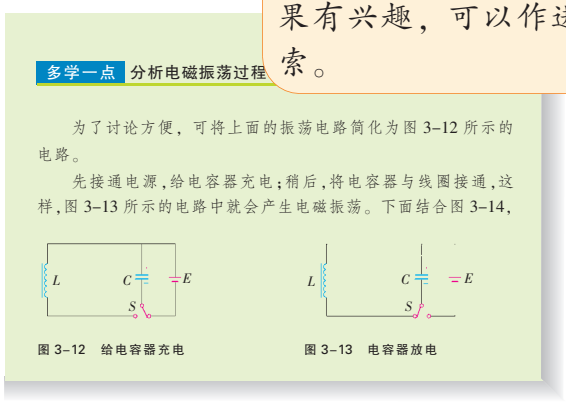
换用不同频率的音叉，情况又有什么变化？

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

图 1–39　研究声音的共鸣

多学一点

这里有更多更深的奥秘，将进一步开阔你的视野。你如果有兴趣，可以作进一步的探索。



多学一点　分析电磁振荡过程

为了讨论方便，可将上面的振荡电路简化为图 3–12 所示的电路。

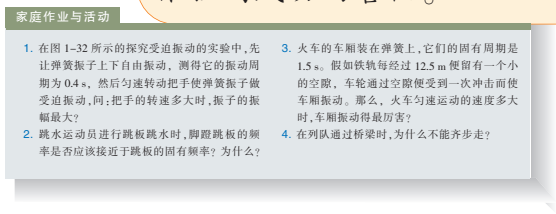
先接通电源，给电容器充电；稍后，将电容器与线圈接通，这样，图 3–13 所示的电路中就会产生电磁振荡。下面结合图 3–14，

图 3–12　给电容器充电

图 3–13　电容器放电

家庭作业与活动

这里为你提供了丰富多彩的学习活动，让你通过回顾进行自我评价，加深对知识的理解，提高解决有关问题的能力，体验到成功的喜悦。

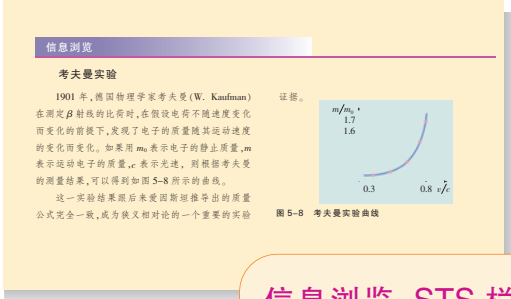


家庭作业与活动

1. 在图 1–32 所示的探究受迫振动的实验中，先让弹簧振子上下自由振动，测得它的振动周期为 0.4 s。然后匀速转动把手使弹簧振子做受迫振动，问：把手的转速多大时，振子的振幅最大？
2. 跳水运动员进行跳板跳水时，脚蹬跳板的频率是否应该接近于跳板的固有频率？为什么？
3. 火车的车厢装在弹簧上，它们的固有周期是 1.5 s。假如铁轨每经过 12.5 m 便留有一个小的空隙，车轮通过空隙便受到一次冲击而使车厢振动。那么，火车匀速运动的速度多大时，车厢振动得最厉害？
4. 在列队通过桥梁时，为什么不能齐步走？

信息浏览、STS 栏目

这里为你提供了各种有趣、有用的资料，包括物理学史上的经典事例、科学家小故事等，它们反映了物理学与科学、技术、社会的紧密联系。你的视野将更开阔，你会更加热爱科学。



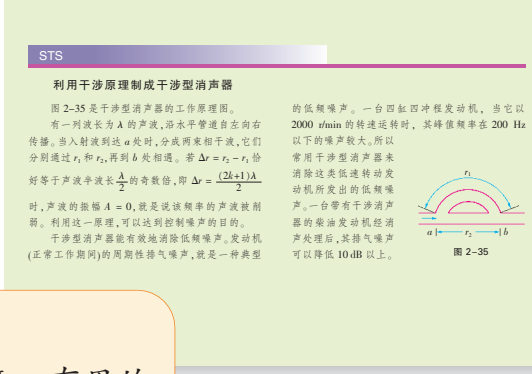
信息浏览

考夫曼实验

1901 年，德国物理学家考夫曼（W. Kaufman）在测定 β 射线的比荷时，在假设电荷不随速度变化而变化的前提下，发现了电子的质量随其运动速度的变化而变化。如果用 m_0 表示电子的静止质量，m 表示运动电子的质量，c 表示光速，则根据考夫曼的测量结果，可以得到如图 5–8 所示的曲线。

这一实验结果跟后来爱因斯坦推导出的质量公式完全一致，成为狭义相对论的一个重要的实验证据。

图 5–8　考夫曼实验曲线



STS

利用干涉原理制成干涉消声器

图 2–35 是干涉型消声器的工作原理图。

有一列波长为 λ 的声波，沿水平管道自左向右传播。当入射波到达 a 处时，分成两束相干波，它们分别通过 r_1 和 r_2，再到 b 处相遇。若 $\Delta r = r_2 - r_1$ 恰好等于声波半波长 $\frac{\lambda}{2}$ 的奇数倍，即 $\Delta r = \frac{(2k+1)\lambda}{2}$ 时，声波的振幅 $A = 0$，就是说该频率的声波被削弱。利用这一原理，可以达到控制噪声的目的。

干涉型消声器能有效地消除低频噪声。发动机（正常工作期间）的周期性排气噪声，就是一种典型的低频噪声。一台四缸四冲程发动机，当它以 2000 r/min 的转速运转时，其峰值频率在 200 Hz 以下的噪声较大。所以常用干涉型消声器来消除这类低速转动发动机所发出的低频噪声。一台带有干涉消声器的柴油发动机经消声处理后，其排气噪声可以降低 10 dB 以上。

图 2–35

目 录



第 1 章 机械振动 6

1.1 研究简谐运动 7

1.2 探究物体做简谐运动的原因 12

1.3 探究摆钟的物理原理 16

1.4 探究单摆振动的周期 19

1.5 受迫振动与共振 23



第 2 章 机械波 29

2.1 机械波的产生 30

2.2 机械波的描述 33

2.3 机械波的案例分析 37

2.4 惠更斯原理　波的反射与折射 39

2.5 波的干涉与衍射 43

2.6 多普勒效应 49



第 3 章 电磁场与电磁波 55

3.1 麦克斯韦的电磁场理论 56

3.2 电磁波的发现 59

3.3 无线电通信 65

3.4 电磁波家族 69

第 4 章　光的波动性　74

4.1 光的干涉　75

4.2 用双缝干涉仪测定光的波长　79

4.3 光的衍射　83

4.4 光的偏振与立体电影　86

4.5 光的折射　90

4.6 全反射与光导纤维　94

4.7 激光　98

第 5 章　新时空观的确立　102

5.1 电磁场理论引发的怪异问题　103

5.2 狭义相对论的基本原理　105

5.3 奇特的相对论效应　109

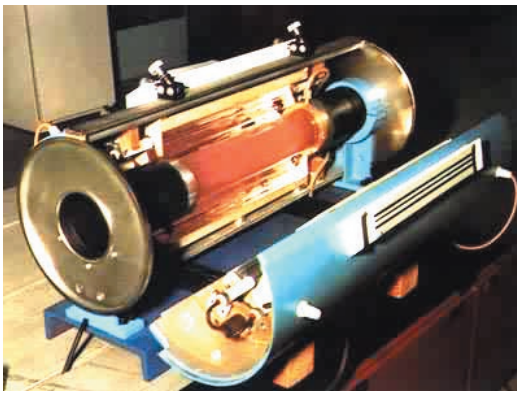
5.4 走近广义相对论　113

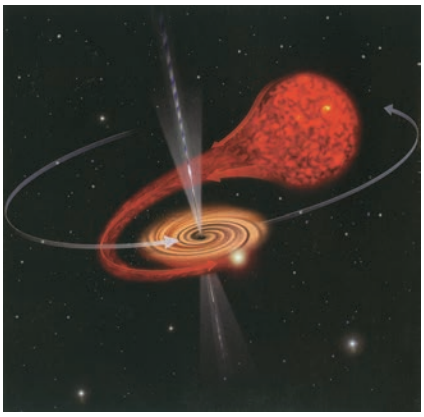
5.5 无穷的宇宙　116

总结与评价　课题研究成果报告会　118

研究课题示例　118

评价表　119





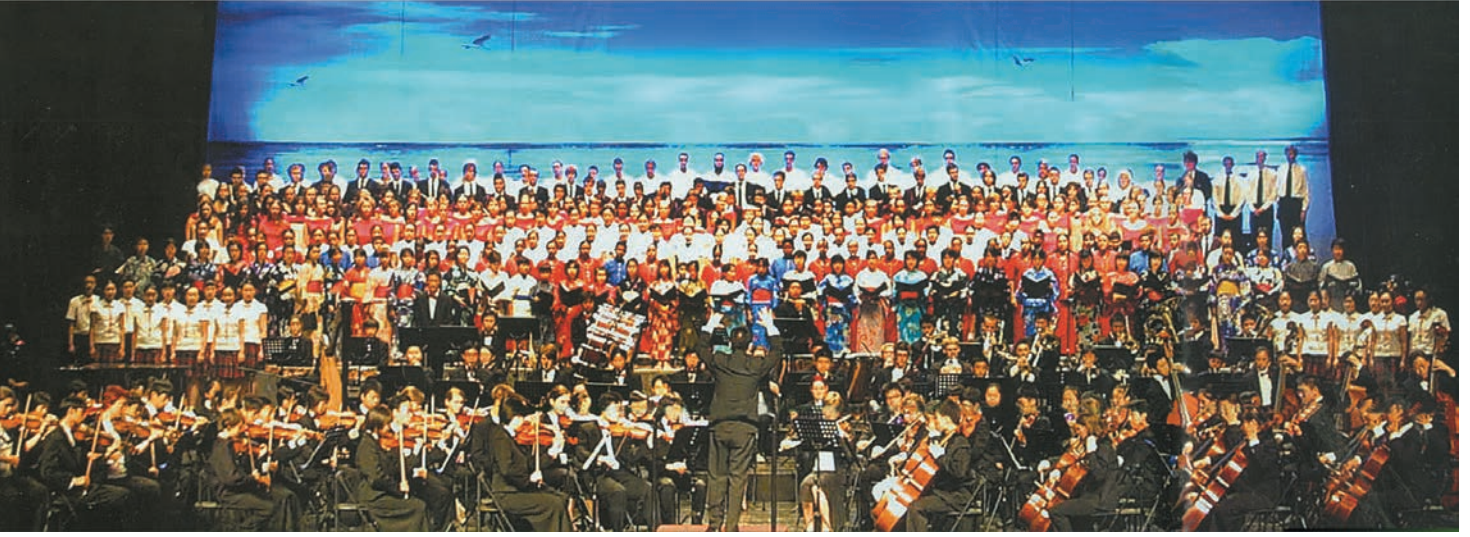


图 1–1　交响乐团演出

第 1 章
机械振动

大型交响乐团的演奏总会给我们留下深刻的印象，各种乐器（如锣、鼓、琴弦等）都在和谐地振动，不禁使人产生奇妙的遐想。其实，在我们的周围，振动无处不在。例如，钟摆的运动、微风中树枝的摆动、水面上漂浮物的上下运动、车辆行进时车身的振动、大地的抖动等。可以说，在这个世界上，几乎所有物体都会发生振动。

大弦嘈嘈如急雨
小弦切切如私语
嘈嘈切切错杂弹
大珠小珠落玉盘
——白居易《琵琶行》

振动是什么样的运动？

振动遵循什么规律？

摆钟为什么能正确计时？

怎样利用振动的规律来为人类服务？

如何避免振动可能带来的危害？

……

你想知道这些问题的答案吗？让我们从探究简谐运动的规律开始。



图 1–2　艺术家在演奏竖琴

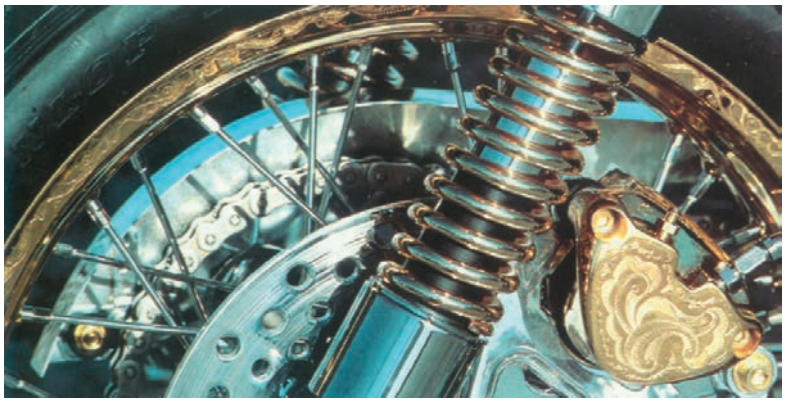


图 1–3　摩托车轮上的减震弹簧

1.1 研究简谐运动

简谐运动是最基本、最重要的振动。那么，什么是简谐运动呢？简谐运动有什么特点呢？怎样来描述简谐运动？

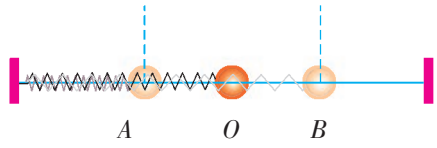


图 1–4

什么是简谐运动

实验探究 1　观察弹簧振子的振动过程

如图 1–4 所示，在一根水平的光滑金属杆上穿一根轻质螺旋弹簧，弹簧一端固定，另一端和一个质量为 m 的带孔小球（振子）相连接，这样就构成了一个弹簧振子（spring oscillator）。

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

将小球拉至右方 B 处放开，它就左右运动起来。小球原来静止时的位置叫做平衡位置（equilibrium position）；小球以平衡位置为中心的这种周期性的往复运动，是一种机械振动，简称振动（vibration）。小球从 O 到 B，再从 B 到 A，最后回到 O 的过程，叫做一次全振动。

图 1–5 中画出了小球在一次全振动过程中，每经相等的时间间隔所在的位置。图中纵轴表示时间，横轴表示小球球心离开平衡位置的位移。

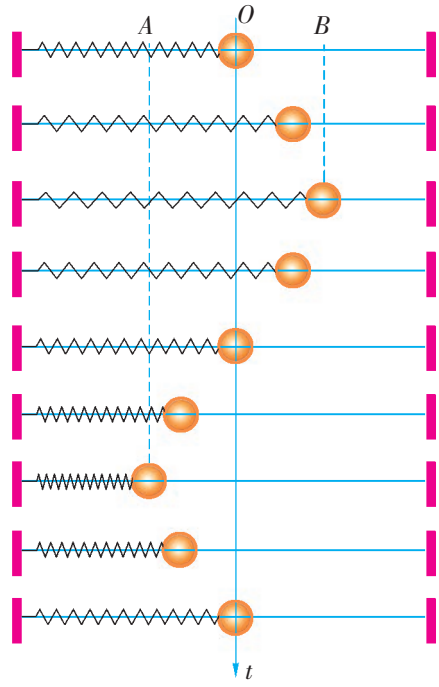


图 1–5　弹簧振子在一次全振动过程中间隔相等的 8 个相继时刻的位置

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

实验探究 2　研究弹簧振子的位移跟时间的关系

图 1–6 是振子小球运动的频闪照片。我们根据照片所提供的信息，进一步研究它的位移跟时间的关系。

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

在图 1–6 所示的频闪照片中，取小球在平衡位置 O 时为观察的起始时刻，在位置 O 右侧的水平位移为正，左侧的水平位移为负，每次曝光的时间间隔为 Δt。请你根据图 1–6 测量小球在不同时刻的位移，并记录在你设计的表格中。

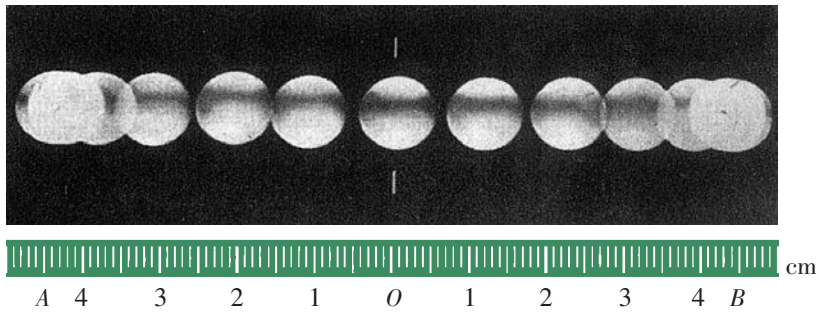
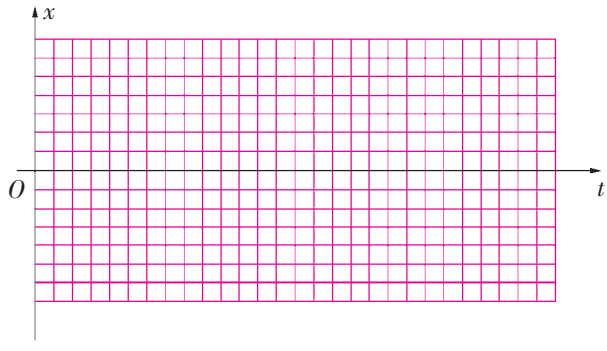


图 1–6　弹簧振子运动的频闪照片

在下面的坐标纸上以纵轴表示位移 x，横轴表示时间 t，每格表示一个 Δt。根据表中的数据在坐标平面上标出相应的点，用平滑的曲线将各点连接起来，画出一次全振动的图像。



互相交流一下，看看得到了怎样的图像？

理论和实验表明，弹簧振子振动时，其位移–时间图像是正弦曲线（或余弦曲线）。

如果做机械振动的质点，其位移与时间的关系遵从正弦（或余

弦)函数规律,这样的振动叫做**简谐运动**(simple harmonic motion)。图 1–6 中弹簧振子的运动就是简谐运动。

用图像描述振动

振动的位移–时间图像通常叫做振动图像，它是对振动的一种形象描述。

实验探究 3　用示波器研究振动图像

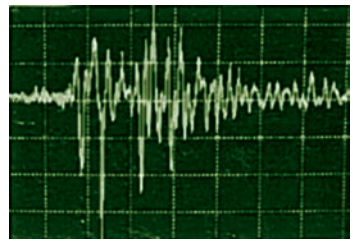
我们用音叉、话筒、示波器再来做一个实验:用橡皮锤敲打音叉,音叉的振动通过空气传递给话筒,话筒再把这种振动转化为音频电压输入示波器(图 1–7),示波器上就显示出这个振动的位移–时间图像。音叉的振动是简谐运动吗？为什么？

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

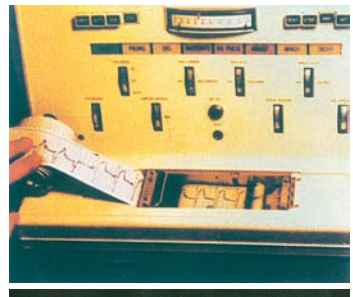
技术上还可以用多种方法来描绘振动图像。例如在弹簧振子上固定一枝笔，沿着垂直于振子振动方向匀速拉动一条纸带,笔就会在纸带上描出一幅振动图像,地震仪和心电图仪等描绘的都是振动图像(图 1–8)。振动图像在生产、科研等方面具有实际意义。

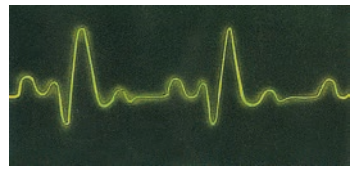


图 1–7　用示波器研究声振动



a　地震仪描绘的地震图像





b　心电图仪及其描绘的心脏振动图像

图 1–8

描述简谐运动的物理量

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

周期和频率

如图 1–4 所示，在振动中振子小球从 O 到 B，再从 B 经 O 到 A，最后回到 O 的过程，就完成了一次全振动。做简谐运动的物体完成一次全振动所经历的时间叫做振动的**周期**(period)；单位时间内物体完成全振动的次数叫做振动的**频率**(frequency)。周期和频率都是表示物体振动快慢的物理量，周期越大，频率就越小，表示振动就越慢。用 T 表示周期，用 f 表示频率，则

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

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

振幅

图 1–4 中的振子小球，在不同时刻离开平衡位置的位移是不同的，但偏离平衡位置的最大位移的数值是不变的，图中 OB(= OA) 就是小球离开平衡位置的最大位移。物理学中把简谐运动的物体离开平衡位置的最大位移叫做振幅(amplitude)，一般用 A 表示振幅。图 1–5 中，由 B 到 A 的距离为振幅的 2 倍，它反映了振子小球运动幅度的大小。

案例分析

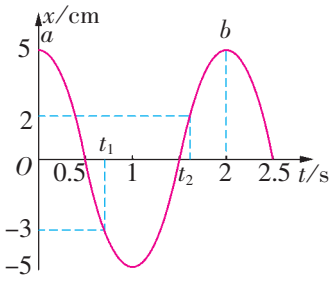


图 1–9　用图像分析简谐运动

案例　图 1–9 是物体做简谐运动的振动图像。请根据图像回答下列问题：

(1)在图中 t_1 时刻和 t_2 时刻，物体的位移各是多少？

(2)这个物体的振幅是多大？

(3)这个振动的周期是多少？频率是多大？

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

(2) 振幅指振动物体偏离平衡位置的最大位移。从图中读出位移最大值为 5 cm，因此振幅为 5 cm。

(3) 振动是一个周期性往复运动，图中 a 到 b 表示物体完成了一次全振动又回到原来的状态，经历的时间即周期。可见，这个振动的周期为 2 s，频率为 0.5 Hz。

信息浏览

复杂振动可以看成是由简谐运动合成的

在图 1–7 所示的实验中，如果使两个频率不同的音叉同时振动发声，观察示波器上的位移–时间图像，可以发现图像不再是正弦或余弦曲线，而是比较复杂的曲线。这是由两个简谐运动共同引起的振动。假如一个物体同时参与两个简谐运动 A 和 B。A 的位移–时间图像如图 1–10a 所示；B 的位移–时间图像如图 1–10b 所示。我们就得到物体合振动的位移–时间图像（图 1–10c）。这就是说，一个比较复杂的振动的图像，可以由几个简谐运动的图像合成得到。

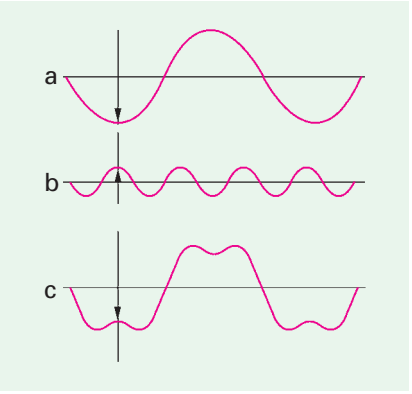


图 1–10　振动合成示意图

多学一点　推导简谐运动的位移公式

先来做如图 1–11 所示的实验。在可调转速的电动机的转动轴上固定一根细杆，杆的一端装一小塑料球。电动机通电后，从侧面用灯光照射，在墙壁上观察小球影子的运动。然后，在小球和墙壁之间放一个竖直方向的弹簧振子，调节电动机的转速，可以使小球与振子的影子的运动始终重合。

这个实验表明：做匀速圆周运动的质点在直径上的投影的运动是简谐运动。

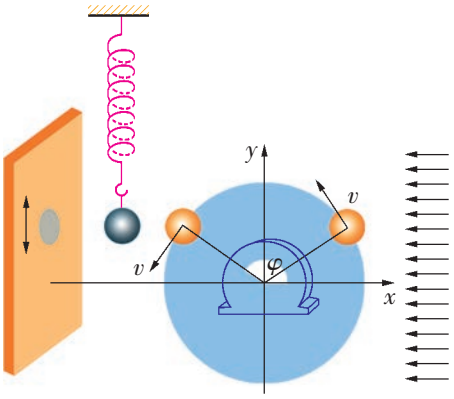


图 1–11　匀速圆周运动的小球在墙壁上的影子的运动是简谐运动

由于简谐运动与匀速圆周运动存在上述关系，我们可以借用匀速圆周运动来推导简谐运动的位移公式。如图 1–12 所示，设质点 P 以原点为圆心，以简谐运动的振幅 A 为半径，在圆周上以角速度 ω 做匀速圆周运动。当 $t = 0$ 时，它在直径上的投影在 O 点，在某一时刻 t，质点到了 P' 点，它的投影 a 相对 O 点的位移 x 为

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

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

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

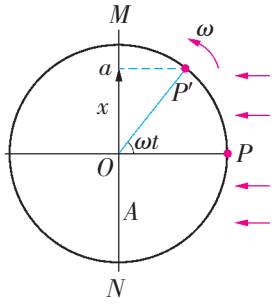


图 1–12

可见，简谐运动的位移跟时间的关系是正弦函数，它的图像是正弦曲线。

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

家庭作业与活动

1. 图 1–13 是某质点做简谐运动的振动图像。根据图像所提供的信息，回答下列问题：

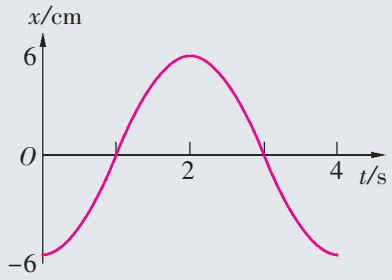


图 1–13

(1) 质点的振幅有多大？频率有多大？

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

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

课题研究

如图 1–14 所示，将钢锯条的一端夹在实验台的边缘，拨动钢锯条，它就上下振动起来。请你猜想一下，钢锯条的振动是简谐运动吗？请你再设计一个实验方案来检验你的猜想是否正确。

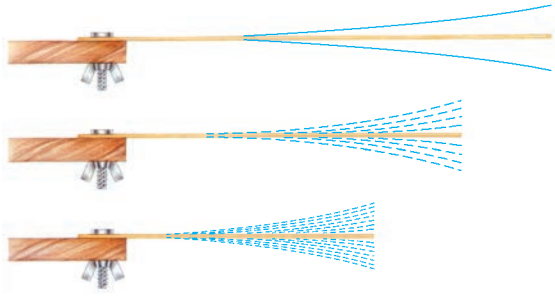


图 1–14

1.2 探究物体做简谐运动的原因

在如图 1–4 所示的弹簧振子的实验中，为什么振子小球会做周期性的往复运动？显然，这是由于它受到弹簧弹力作用的缘故。

回复力使物体做简谐运动

请分析图 1–15 所示的弹簧振子的受力和运动情况，并回答下列问题：

1. 物体在平衡位置 O 的右侧时，所受的弹力 F 的方向是怎样的？位移 x 的方向是怎样的？F 与 x 的方向有什么关系？

2. 物体在平衡位置 O 的左侧时，所受的弹力 F 的方向又是怎样的？位移 x 的方向是怎样的？F 与 x 的方向有什么关系？

3. 由胡克定律可知，弹簧的弹力 F 的大小与位移 x 的大小（即弹簧的伸长量或压缩量）间有着怎样的关系？

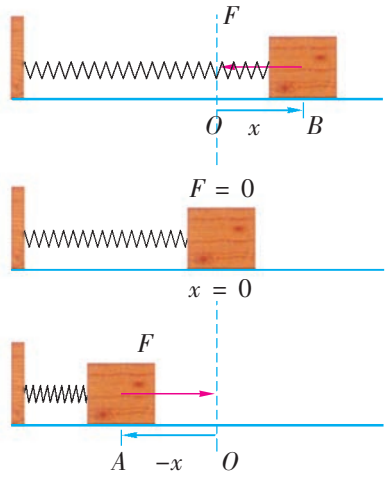


图 1–15

综合以上讨论，可得出物体所受的弹力 F 与位移 x 间存在以下关系：

$$F = -kx$$

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

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

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

案例分析

案例　图 1–16 画出了弹簧振子的 5 个不同位置。图的右边给出了物体在该位置时的位移 x、回复力 F、加速度 a 和速度 v 的大小和方向。

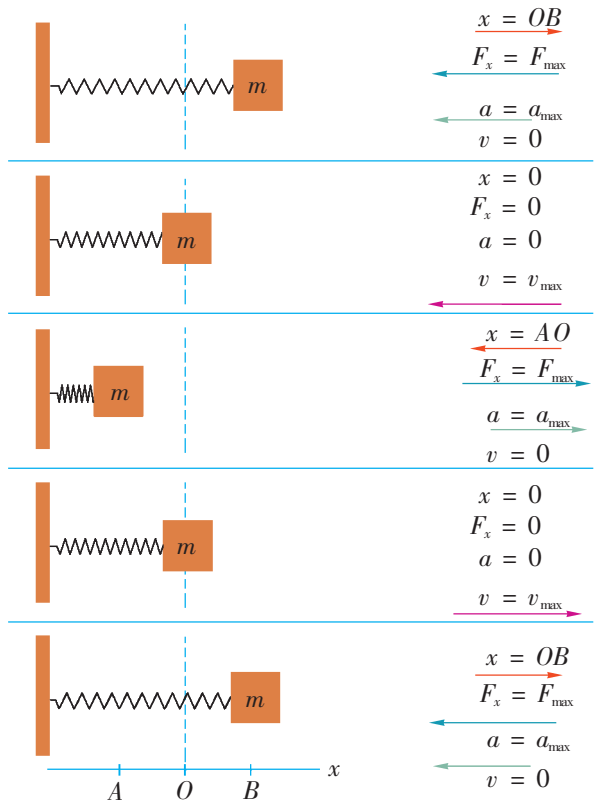


图 1–16

请你研究图 1–16,分析弹簧振子在完成一次全振动的过程中,x、F、a、v 各物理量值的变化情况,并填入下表中。

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

研究简谐运动的能量

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

请进一步分析图 1–16 所示的弹簧振子在不同位置时的动能和势能及其变化情况，并将你的研究结果填入下表。

运动的位置(或范围)	O	$O\rightarrow B$	B	$B\rightarrow O$	O	$O\rightarrow A$	A	$A\rightarrow O$	O
动能 E_k									
势能 E_p									
总能量 E									

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

讨论与思考

1. 做弹簧振子的实验时，总是发现振子的振幅会越来越小，最后会停止振动，从能量的观点分析其原因。

2. 弹簧振子振动时的总能量跟哪些因素有关？请你猜想一下，并设计一个实验方案来验证你的猜想。

家庭作业与活动

1. 水平弹簧振子的质量是 0.1 kg，运动到平衡位置左侧 2 cm 处时，受到的回复力是 4 N，那么，当它运动到平衡位置右侧 1 cm 处时，它的加速度大小为多少？方向如何？
2. 一根弹簧的上端固定，下端系一小球，将小球向下拉开一点距离后放手，小球便上下振动起来，试证明小球做简谐运动。(提示：使小球振动的回复力是小球所受到的重力和弹簧弹力的合力。)
3. 学习了简谐运动的规律之后，请你谈一谈为什么最好用气垫导轨来做图 1–4 所示的实验。

课题研究

研究弹簧振子振动的周期和频率跟哪些因素有关。(本课题只要求定性研究，不要求定量研究。)请设计实验方案，并进行实验。

1.3 探究摆钟的物理原理

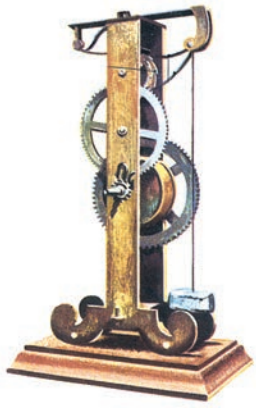


图 1–17　最早的摆钟模型

惠更斯的这个思想，不论在理论上还是在实验方法上，都是一个独到的创见。

你仔细观察过摆钟吗？它为什么能够准确计时？怎样调节它走时的快慢？伽利略(G. Galileo)最早发现了教堂里吊灯摆动的等时性。1641 年，惠更斯(C. Huygens)按照伽利略的构想，发明制作了一个摆钟（图 1–17），经后人逐渐改进成为目前常见的计时工具。怎样研究钟摆的运动？钟摆的运动有什么规律呢？

惠更斯的科学抽象——单摆

惠更斯分析了钟摆摆动过程及其特性后，将钟摆简化为一个简单模型——一根很轻的细线系着一个有质量的质点，这个模型叫做**单摆**(simple pendulum)，如图 1–19 所示。质点的质量即单摆的质量，摆球重心到悬挂点的距离叫做单摆的摆长。

在实验室里，如果悬挂小球的细线的伸缩和质量可以忽略，细线的长度比小球直径大得多，这样的装置就可看成单摆。

由此可见，单摆是实际摆的理想化模型。

单摆摆动时摆球在做振动，那么单摆的振动是简谐运动吗？



图 1–18　摆钟

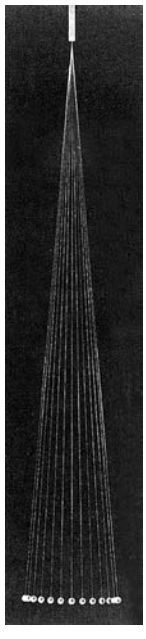


图 1–19　钟摆被抽象为单摆

探究单摆运动的特点

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

分析论证

单摆静止时摆球所处的位置 O 是单摆的平衡位置（图 1–20）。将摆球从平衡位置拉开一定距离后再释放，摆球就以平衡位置为中心沿着一段圆弧来回往复运动。

当摆球运动到图 1–20 中的任意位置 P 时，摆球受到的回复力是摆球所受重力 G 沿着圆弧

切线方向的分力 G_1。

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

若摆角 θ 很小（图 1–21），则有 $\sin\theta \approx \theta = \frac{\overset{\frown}{OP}}{l}$，并且位移 $x \approx \overset{\frown}{OP}$，考虑了位移和回复力的方向后，有

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

请思考：上式中“–”号表示的物理意义是什么？

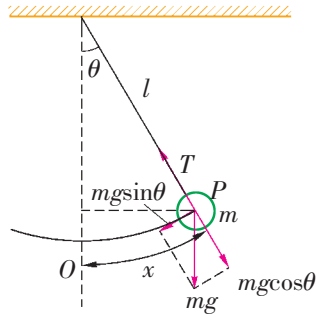


图 1–20　单摆的受力分析

上式中，m 是摆球的质量，l 是摆长，g 是重力加速度，都有确定的数值，$\frac{mg}{l}$ 可以用一个常数 k 来表示，则上式又可以写成

$$F = -kx$$

这就是说，在摆角很小时，单摆所受到的回复力跟位移成正比而方向相反，所以单摆做简谐运动。

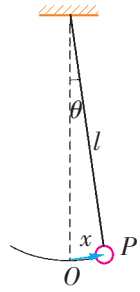


图 1–21　单摆做简谐运动的条件

讨论与思考

当摆角很大时，单摆的运动还是简谐运动吗？

你能设计一个实验，描绘出单摆的振动图像吗？

研究振动的步调问题

利用单摆模型，我们来探究描述振动的另一个重要的物理量。

实验探究　比较两个振动的“步调”

1. 如图 1–22 所示，在铁架台上悬挂两个相同的单摆，将两个摆球拉离平衡位置，使两摆线跟竖直方向有相同的角度，然后同时放开，这两个单摆的运动情况应该是完全一样的。那么，当先、后放开它们，这两个单摆的运动情况也一样吗？有什么不同？

可以看到，两个单摆同时放开时，除了周期、振幅相同外，还总是同时沿着相同的运动方向经过平衡位置，并同时达到同一侧的最大位移处。也就是说，这两个单摆的振动的“步调”是一致的。当两个单摆先、后放开时，虽然周期、振幅相同，但“步调”却不一致。

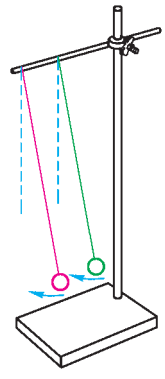


图 1–22

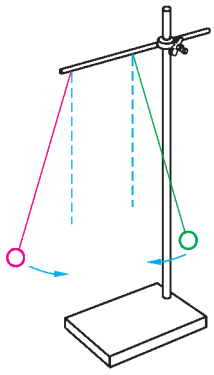


图 1–23

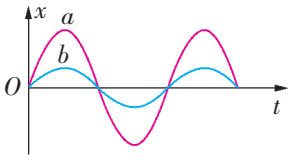


图 1–24　两个同相振动的图像

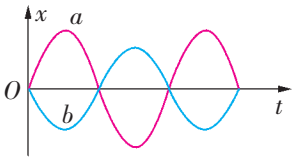


图 1–25　两个反相振动的图像

2. 如图 1–23 所示，再将两个单摆的摆球拉开到相同位置，先放开一个，等它摆动到另一边最大位移处时，再放开第二个。

请仔细观察，这两个单摆的运动又有什么不同？

分析论证

从上面的实验可知，先后放开的两个单摆的振幅、频率是一样的，但它们振动的“步调”却是不一样的。为了描述这种区别，物理学中引入“相”（或称为“相位”、“位相”、“周相”）这个概念来描述振动的步调。在上述第一个实验中，两个单摆振动步调一致，就说它们的“相”是相同的，简称同相；当两个振动的“步调”不一致时，就说它们振动的“相”不同，或者说它们存在着相差。在第二个实验中，它们的振动“步调”正好相反，叫做反相。

用振动图像可以直观地表示不同振动的相。图 1–24 是在同一个坐标系里画出的两个同相振动的图像；图 1–25 是在同一个坐标系里画出的两个反相振动的图像。

相和相差在波的研究中是很重要的，随着学习的深入，你将体会到它们的作用。

家庭作业与活动

1. 关于单摆，下列认识中正确的是
   A. 一根线系着一个球悬挂起来，这样的装置就是单摆
   B. 可以看成单摆的装置中，细线的伸缩和质量忽略不计，线长比小球直径大得多
   C. 单摆的振动总是简谐运动
   D. 两个单摆只要结构相同，它们的振动步调便相同
2. 对单摆的运动过程中所受到的力（不计各种摩擦），有以下几个认识，其中正确的是
   A. 受三个力，重力、线的拉力、回复力
   B. 受四个力，重力、拉力、回复力、向心力
   C. 只受两个力，重力和线的拉力
   D. 视具体情况而定
3. 对于单摆做振动的回复力，下列各项认识中正确的是
   A. 回复力是重力和线的拉力的合力
   B. 回复力是重力沿着运动圆弧切线方向的分力
   C. 在平衡位置处，摆球受的回复力为零，而合力不为零
   D. 在平衡位置处，摆球受力平衡而回复力仍然存在
4. 一个单摆摆长为 l，摆球的质量为 m，单摆做简谐运动。当摆角为 θ 时，摆球振动的加速度为多大？当它摆动到平衡位置时，若速度为 v，那么它振动的加速度又为多大？此时的实际加速度是多大？

1.4 探究单摆振动的周期

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

单摆振动的周期跟哪些因素有关

提出问题

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

猜想与假设

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

制定计划与设计实验

根据图 1–26 给出的器材(几个质量不同的摆球、细线、米尺、秒表、铁架台)，再给一把游标卡尺，请制定一个实验方案来验证你的猜想是否正确。

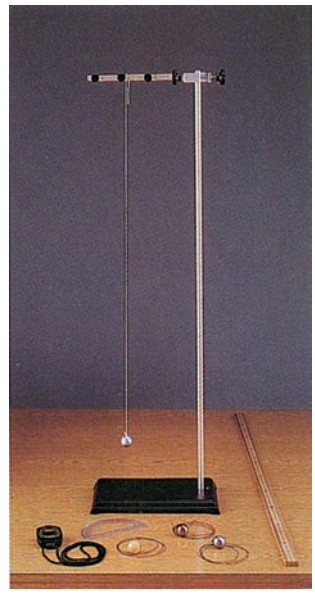


图 1–26　探究单摆周期的装置

请与同学讨论以下问题：

1. 根据单摆“摆长”的涵义，怎样用米尺和游标卡尺测单摆的摆长？

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

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

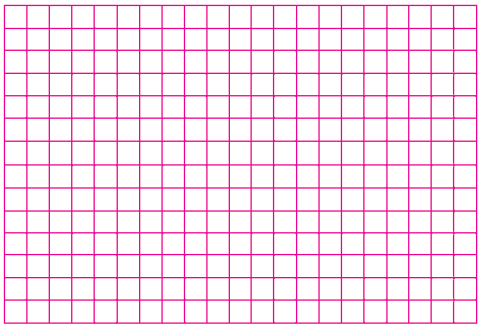
4. 单摆的周期比较短，要用怎样的方法才测得更准确？

在这里，测量周期的方法常用微小量累积法。

进行实验与收集证据

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

格中。



分析与论证

设单摆周期为 T，摆长为 l，请根据你的实验数据，尝试在坐标纸上画出 T–l 图像或 T^2–l 图像。

你能看出它们是什么曲线？从图像中能看出单摆周期跟摆长的关系吗？

交流与合作

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

评估

请比较 T–l 图像和 T^2–l 图像，哪一种能更直观简便地看出周期跟摆长之间的关系？图像法在研究物理问题时有什么优点？

单摆的周期公式

惠更斯推导出在摆角很小时，单摆的周期公式为

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

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

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

摆钟“慢”了，实际上是其振动周期过长。调节摆钟“快”、“慢”，就是调节其振动周期。根据单摆的周期公式，在同一地区（g 相同）往往要调节摆长（把摆锤下方的螺母向上或向下拧一拧）。

案例分析

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

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

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

在地球上，$t = nT_1 = 1$ h

在月球上，$t' = nT_2 = x$ h

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

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

可见，在月球上时针从“1”走到“2”时，在地球上已经过了 2.45 h。

追寻惠更斯的足迹

实验探究　测定当地的重力加速度

惠更斯得出了单摆的周期公式后，在巴黎用一个周期为 2 s 的单摆，精确测量出它的摆长为 3.0565 英尺，从而计算出重力加速度为 30.1666 英尺/秒^2，换算成国际单位制约为 9.8 m/s^2。现在，我们仿照他的思路，来测定我们居住地区的重力加速度值。

由单摆周期公式推知，为了测定重力加速度，你需要测量哪些物理量？

为了减小误差，要变更摆长，重复几次实验，计算出每次实验的重力加速度值，最后得到重力加速度的平均值。

请将你的实验数据和测定的重力加速度值填写在自己设计的表格中。并在网上查询你所在地区的重力加速度值，与你的测定值进行比较。

多学一点　单摆周期公式的推导

在推导简谐运动位移公式时，已经知道简谐运动的周期就是对应的匀速圆周运动的周期。

设匀速圆周运动的周期为 T，角速度为 ω，向心加速度为 a，半

径为 R。由 $T=\dfrac{2\pi}{\omega}$ 和 $a=\omega^2R$，可得 $T=2\pi\sqrt{\dfrac{R}{a}}$。

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

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

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

家庭作业与活动

1. 如图 1–27 所示，一个单摆在 B、C 之间摆动，O 为最低位置，α 很小，周期是 T，则
   A. 摆球质量增加时 T 增大
   B. 摆动角度变小时 T 减小
   C. 摆球从 B 到 O 和从 O 到 C 的时间都是 $\dfrac{T}{4}$
   D. 摆球从 B 到 O 过程中速度增大，加速度减小
2. 有甲、乙两个单摆，甲的摆长是乙的 4 倍，那么，在甲摆动 5 次的时间内，乙摆动了几次？
3. 一个单摆的摆长是 98.1 cm，当地的重力加速度是 9.81 m/s^2，单摆振动的周期是多少？将单摆放到月球上时，周期变为多少？（已知月球上的重力加速度是地球上的 0.16 倍）
4. 用细长线系住一个装满细沙的漏斗做成一个沙摆，它摆动时漏出的细沙在匀速抽动的木板上便显示出沙摆的振动图像。请思考，随着细沙慢慢地流出，沙摆振动的周期会不会变化？
5. 在探究单摆振动周期的过程中，你是怎样测量单摆周期的？为什么要这样测量？

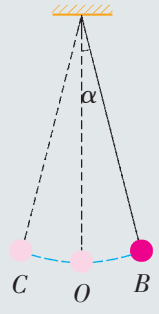


图 1–27

6. 图 1–27 所示的单摆经过中心位置 O 在 B、C 之间来回摆动，请将单摆能量的转化情况填写在下表中。

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

课题研究

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



图 1–28　倒塌的大桥

1.5 受迫振动与共振

一个物体在振动过程中，总会或多或少地受到空气阻力或摩擦阻力的影响，使其振幅逐渐减小，最后静止。那么，为什么有些物体（如摆钟）能够长时间维持其振动而不衰减呢？有些物体的振动不仅不衰减，反而振幅越来越大，甚至造成事故呢？图 1–28 的照片是 1940 年美国 Tacoma 大桥在风中倒塌的情景，当时的风速还不到设计风速的 1/3，那么坚固的桥梁怎么会在风的吹动下倒塌呢？

振动中的能量损失

实验探究　探究振动中的能量损失

1. 如图 1–29 所示，置于空气中的弹簧振子振动时，它的振幅有没有变化？它会一直振动下去吗？

2. 将振子浸没在装有水的量杯中，重复上面的实验，它的振动情况有什么显著变化？



图 1–29　研究弹簧振子能量的损失

振动系统的能量与振幅有关，振幅越大，能量越大。

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

当介质阻力较大时，振动很快就会停止。振幅逐渐减小的振动叫做**阻尼振动**（damped vibration）。阻尼振动的图像如图 1–30

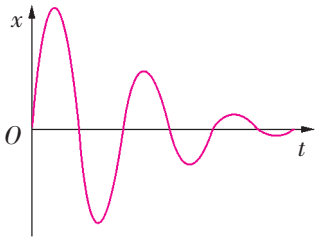


图 1–30　阻尼振动图像



图 1–31　摆钟的擒纵齿轮和擒纵叉

所示。

如果想使振动不衰减，就需要不断地补充因阻力影响而损失的能量。儿童荡秋千时，母亲总是不断地用力推动秋千，就是不断给系统补充能量。在工程技术中，则通过自动装置来控制能量的补充。摆钟能保持其振幅不变，其补充的能量源于重物的重力势能，并依靠擒纵齿轮和擒纵叉一份一份地供给钟摆(图 1–31)。电子摆钟是依靠电池的化学能来补充能量的。

受迫振动

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



图 1–32　研究受迫振动

实验探究　探究受迫振动

1. 将弹簧振子挂在曲轴的弯曲部位(图 1–32)，放在空气中，使其上下振动。振子做自由振动时的频率叫做振动系统的**固有频率**(natural frequency)。固有频率是由振动物体本身的结构和特征决定的。请通过观察，估计一下振子固有频率的大小。

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

使轴的转速依次改变(但每次改变后仍保持新转速恒定)，每次都注意观察和比较上述三种频率。



图 1–33　汽车底盘的弹簧减震片

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

在生活和生产中，物体做受迫振动的事例是很多的，像汽车底盘上弹簧减震片的振动(图 1–33)、扬声器纸盆的振动、缝纫机缝针的运动、汽缸里活塞的运动等都是受迫振动。

共振及其产生的条件

我们已经知道，不同物体受同样的周期性驱动力作用时，不管其固有频率如何，它做受迫振动的频率总等于驱动力的频率，与物体的固有频率无关。但是，物体的振幅也与它的固有频率无关吗？对此，我们通过实验来进行研究。



图 1–34　研究摆的共振

实验探究　研究摆的共振

图 1–34 所示的装置中，几个不同的单摆悬挂在同一根较粗的绳子上，其中 A、D 的摆长相等。使 A 摆摆动起来后，A 摆的振动带动绳子做同样频率的晃动，就给了其他几个摆周期性变化的驱动力，使它们都振动起来。观察实验现象，并回答下列问题：

1. B、C、D、E 摆振动的频率是否相等？等于什么？

请思考：在这个实验中，驱动力的频率等于什么？

2. 仔细比较 B、C、D、E 摆振动的振幅。

哪个摆的振幅最大？从摆长的角度去思考，讨论一下，振幅最大的那个摆的固有频率跟驱动力频率（即 A 摆的频率）有什么关系？

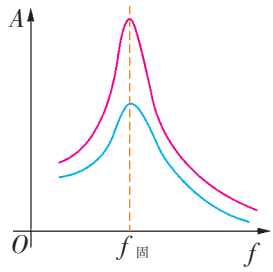


图 1–35　共振图像

理论与实验都表明，受迫振动的振幅 A 跟驱动力频率 f 之间的关系图像如图 1–35 所示（常称为共振图像）。从图中可以看到，当驱动力的频率 f 等于物体的固有频率 $f_{固}$，即 $f = f_{固}$ 时，受迫振动的振幅最大；f 跟 $f_{固}$ 相差越大，受迫振动的振幅越小。

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


图 1–36　模拟机器共振

我们用图 1–36 所示的装置来模拟厂房因机器运转而做受迫振动的情况。当有偏心结构的电动机转动时，连着弹簧的平板便跟电动机一起振动起来，改变电动机转速至某个值时，可以看到振动系统的振幅特别大。这个实验表明，如果机器转动施加给厂房的驱动力的频率很接近厂房的固有频率，厂房便会处于共振状态，这样很可能会出现危险情况。

图 1–28 所示的这座悬索桥倒塌，是由于出事那一天的一场风所致。风施加的驱动力的频率跟桥的固有频率恰好很接近，桥梁就处于共振状态，使振幅变得很大，酿成了这场事故。

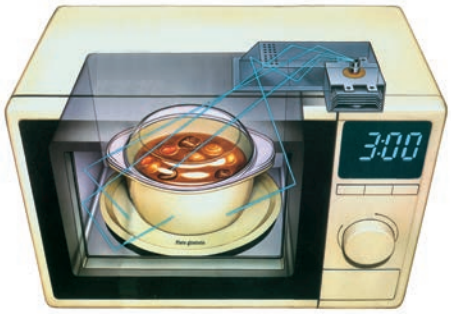


图 1–37　微波炉



图 1–38　乐器的共鸣箱

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

微波炉已经是比较普及的家用炊具(图 1–37)，它的基本原理也是利用了“共振”。微波炉的微波频率与被加热的食物中水分子振动的固有频率 2500 MHz 非常接近，因此，当微波照射到食物时，微波施加的驱动力使食物中的水分子做受迫振动，并且处于共振状态而剧烈振动，从而使食物的温度迅速升高。由于这种“加热”方式是从里到外同时发生的，所以它比其他煮熟食物的方式更快捷。

乐器发出的声音也作为驱动力使乐器箱内的空气做受迫振动。当满足共振条件时，乐器箱内空气处于共振状态而有较大的振幅，这种声音的共振现象通常叫做共鸣。参加大型音乐会时，不妨去看一看各种各样的乐器，小提琴、大提琴、二胡、琵琶……它们都有形状不同、构造各异的共鸣箱(图 1–38)，靠箱内空气的共鸣，才发出洪亮、美妙、动听的声音。

在第 3 章中还可以看到，无线电接收技术中用到“电谐振”原理，它是“共振”的另外一种表现形式。此外，医院里常用的一种先进检测手段——磁共振，同样也是利用了共振原理。

总之，在需要利用共振时，应设法使驱动力的频率等于或者接近物体的固有频率；在需要防止共振产生危害时，应设法使驱动力的频率偏离物体的固有频率，偏离得越多越好。

家庭作业与活动

1. 在图 1–32 所示的探究受迫振动的实验中，先让弹簧振子上下自由振动，测得它的振动周期为 0.4 s，然后匀速转动把手使弹簧振子做受迫振动，问：把手的转速多大时，振子的振幅最大？
2. 跳水运动员进行跳板跳水时，脚蹬跳板的频率是否应该接近于跳板的固有频率？为什么？
3. 火车的车厢装在弹簧上，它们的固有周期是 1.5 s。假如铁轨每经过 12.5 m 便留有一个小的空隙，车轮通过空隙便受到一次冲击而使车厢振动。那么，火车匀速运动的速度多大时，车厢振动得最厉害？
4. 在列队通过桥梁时，为什么不能齐步走？

课题研究

研究声音的共鸣

如图 1–39 所示，取一只盛有水的量筒，将一根内径小一些的玻璃管插入，使管内水面上方有一段空气柱。敲打一下音叉后，将它放在空气柱的上方，可以听到嗡嗡的声音。上下移动玻璃管，比较所听到的声音你发现什么情况？

换用不同频率的音叉，情况又有什么变化？

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



图 1–39　研究声音的共鸣

1.x

第 1 章家庭作业与活动

1. 一质点做简谐运动，其振动图像如图 1–40 所示。由图可知

A. 质点振动的振幅随时间变化

B. 质点振动的频率为 4 Hz

C. 在 $t = 2.5$ s 时，质点偏离平衡位置运动

D. 在 $t = 4$ s 时，质点受到的回复力为最大值

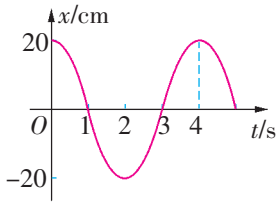


图 1–40

2. 有一个振动系统，它做自由振动时的频率为 $4f$，现在用频率分别为 f、$2f$、$4f$、$5f$ 的驱动力依次对它施加作用，比较每次振动稳定后的情况，下列判断中正确的是

A. 振动的振幅越来越大

B. 振动的频率越来越大

C. 振动的振幅先变大再变小

D. 振动的频率保持不变

3. 如图 1–41 所示，用两条长度都为 L 的细线，在天花板上悬挂一个小球，使两个悬挂点之间的距离等于 $2L\cos\alpha$，这样便组成了一个双线摆。让摆球在整个装置的中垂面内摆动。若摆动的摆角很小，则这个双线摆摆动的周期是多少？

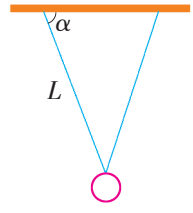


图 1–41

4. 用洗衣机洗衣服，在甩干衣服的一道工序中，当甩水桶的转速慢慢减小到一定程度时，洗衣机会抖动得特别厉害，请你在家中试验一下，仔细观察是不是会发生这个现象，然后给出解释。

5. 一弹簧振子做简谐运动，周期为 T。下列判断中正确的是

A. 若 t 时刻和 $(t + \Delta t)$ 时刻振子位移的大小相等、方向相同，则 Δt 一定等于 T 的整数倍

B. 若 t 时刻和 $(t + \Delta t)$ 时刻振子速度的大小

相等、方向相反，则 Δt 一定等于 $\frac{T}{2}$ 的整数倍

C. 若 $\Delta t = T$，则在 t 时刻和 $(t + \Delta t)$ 时刻振子的加速度一定相等

D. 若 $\Delta t = \frac{T}{2}$，则在 t 时刻和 $(t + \Delta t)$ 时刻弹簧长度一定相等

6. 若单摆的摆长不变，摆球的质量增加为原来的 4 倍，摆球经过平衡位置的速度减为原来的 $\frac{1}{2}$，则单摆振动的物理量变化的情况是

A. 频率不变，振幅不变

B. 频率不变，振幅改变

C. 频率改变，振幅改变

D. 频率改变，振幅不变

7. 有一个单摆摆长为 L，摆球的质量是 m，做简谐运动的最大摆角为 α，问：

(1) 它从摆角为 α 摆到摆角为 β 时，速度有多大？

(2) 在上述过程中摆球所受到的合外力做了多少功？

8. 图 1–42 是探究单摆共振条件时得到的图像，它表示振幅跟驱动力频率之间的关系，请回答：

(1) 这个单摆的摆长是多少？

(2) 如果摆长变长一些，画出来的图像的高峰将向哪个方向移动？

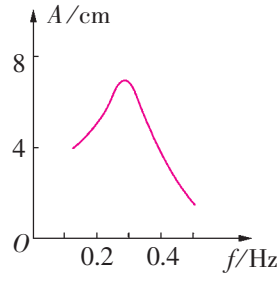


图 1–42



图 2–1　激动人心的冲浪



图 2–2　水滴在水面激起的水波

第 2 章
机械波

你知道冲浪运动吗？那汹涌的波涛时而把人推向高耸的巅峰，时而又将人卷入无底的深渊，让人们尽情享受冲浪的乐趣。

儿童嬉水时，常将小石子扔进平静的水中，形成阵阵涟漪。如果将两颗小石子扔进平静的水面，你又会看到什么现象？

为什么平静的水面会形成起伏的水波向四周扩散？

为什么两列水波看起来会相安无事地独立扩散？

为什么有时候会出现“闻其声而不见其人”的现象？

为什么我们可以根据高空飞机轰鸣声的音调变化，判断它是飞来还是离去？

你想知道这些现象的物理原理吗？

除了水波、声波这些机械波外，你还知道无线电波、光波吗？

那么，波究竟是什么？它是怎样产生的？它在传播过程中遵循怎样的规律？

本章我们将与水波、绳波、弹簧波相伴，通过观察实验和理论分析，撩开机械波的层层面纱。



图 2–3　水波在一定条件下改变了传播方向

2.1 机械波的产生

在汉语中,“波”这个词源于水波。考古出土的仰韶文化时期的陶器上就有水波纹饰。

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



图 2–4　出土陶器上的水波纹饰

机械波是怎样形成的

实验探究　观察机械波



图 2–5　观察水波的实验

1. 如图 2–5 所示。用滴管把一滴水滴入盛水的容器中,仔细观察水面的变化。

2. 如图 2–6 所示,将一根细绳的右端固定在一块板上,用手上下摆动细绳的左端,仔细观察细绳的形状变化。

讨论与思考

水波和细绳上的波是怎样形成和传播的呢？

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

分析论证　机械波的形成过程

下面以绳子上的波为例,研究机械波形成的过程。

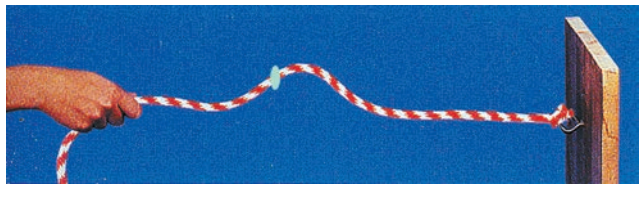


图 2–6　绳中的横波

设想绳子由很多小段组成，每一小段可以看成是一个质点，质点间存在着相互作用，当绳子的一端做上下方向的简谐运动时，绳端质点就带动其相邻的质点振动，相邻的质点又带动更远一些的质点振动……于是，绳子上的各个质点都相继跟着振动起来。绳中就形成了一系列凸部、凹部向前移动的波形。

下面让我们通过作图来展示波的具体形成过程。

如图 2–7 所示，在绳子上选取若干个质点 1、2、3、…作为研究对象。

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

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

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

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

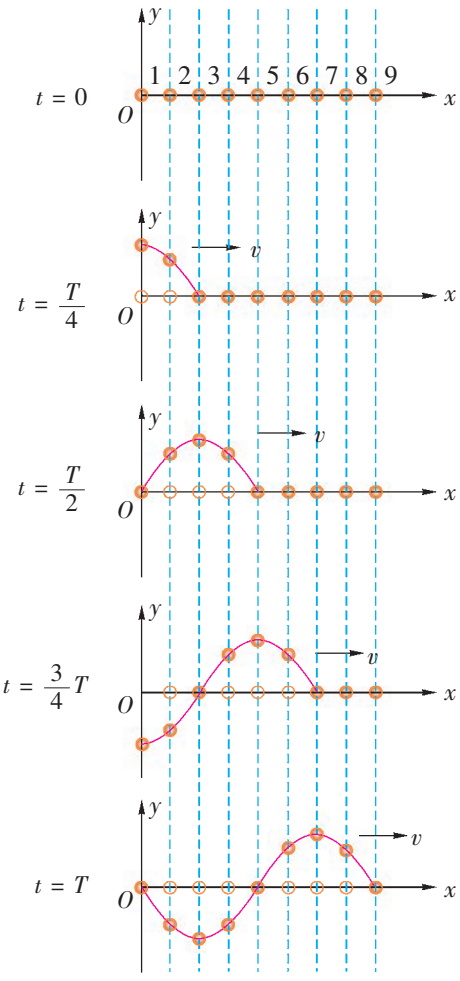


图 2–7 探究机械波的形成

讨论与思考

1. 在波的形成过程中，介质中的各质点有没有随波而向传播方向“迁移”？波在形成过程中，传播的是什么呢？

2. 绳中各质点的振动方向跟波的传播方向有什么关系？

横波与纵波

如图 2–8a 所示，取一根较长的轻质弹簧，上下摆动弹簧的左端，波就向右传播了。此时，弹簧上各质点做上下振动，波向右传播，两者的方向是相互垂直的。物理学中，把介质质点的振动方向跟波的传播方向垂直的波叫做**横波**(transverse wave)。在横波中，凸起部分的最高处叫做波峰，凹下部分的最低处叫做波谷。

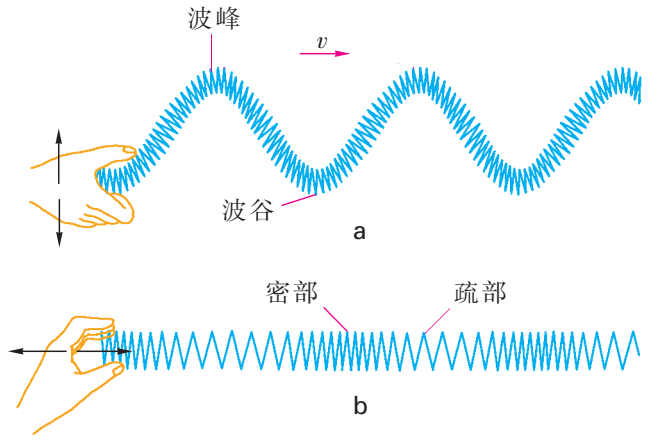


图 2–8　弹簧上的横波与纵波

实验探究　观察弹簧上的纵波

如图 2–8b 所示，用手轻轻推动水平悬挂的弹簧的左端，使弹簧的左端沿左、右方向振动。仔细观察弹簧的疏密分布及较密部分的运动情况。

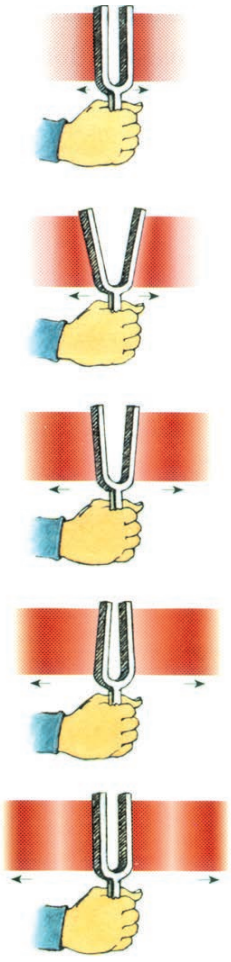


图 2–9　声波是纵波

讨论与思考

弹簧各段的振动方向跟波的传播方向有什么关系？

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

在纵波中，质点分布较密集的部分叫做密部，质点分布较稀疏的部分叫做疏部。声波也是纵波。敲击音叉时，音叉的振动推动周围的空气，空气中就产生疏密相间的纵波向远处传播(图 2–9)。

波传递的是能量和信息

在图 2–5 观察水波的实验中，如果在水面上放一片小纸片，在水波传播的过程中，小纸片会“随波逐流”吗？波传播的是什么呢？

在绳波和弹簧波的实验中，机械波传播时，绳和弹簧上的各质点都相继发生振动，但介质并不随波而迁移，传播的只是振动这种运动形式。介质中原来静止的质点，随着波的传来而相继振动起来，这表明它获得了能量，这个能量是从波源传递过来的。因

而,波是传递能量的一种形式。冲浪运动员就是利用海浪传来的巨大能量运动的。

波不仅能传递能量,而且能传递信息,如声波可以传递各种语言和声音的信息;无线电波和光波可以传递各种声音、图像和文字信息等。

家庭作业与活动

1. 皮球掉入水塘中,请尝试往水塘中投石头,看看水波能否把皮球冲到岸边,并解释原因。
2. 2004 年 12 月 26 日,印度洋发生的地震引起海啸,造成十几万人死亡和数以万计的房屋倒塌。从这一事件中,你能进一步理解(地震)波本质上传播的是什么吗?
3. 关于振动和波的关系,下列说法中正确的是
   A. 有振动就一定有波
   B. 波是质点由近及远的移动过程
   C. 波是传递波源振动能量的一种方式
   D. 波源停止振动,则波也立即停止传播
4. 区分横波与纵波的依据是
   A. 质点沿水平方向还是沿竖直方向振动
   B. 质点的振动方向跟波的传播方向互相垂直还是在一条直线上
   C. 波沿水平方向还是沿竖直方向传播
   D. 波传播的距离近还是远

课题研究

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

你对建立我国地震或海啸的预警机制,有哪些想法和建议?

2.2 机械波的描述

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

用图像描述机械波

某一时刻介质各质点的空间分布,直观地描述了该时刻的机

械波。如果用横坐标 x 表示在波的传播方向上各个质点的平衡位置，用纵坐标 y 表示某一时刻各个质点偏离平衡位置的位移，就能描绘出这一时刻波的图像。下面以横波为例，描绘波的图像。

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

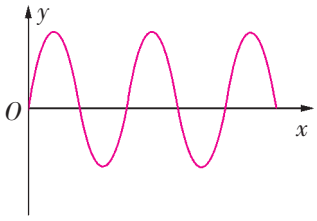


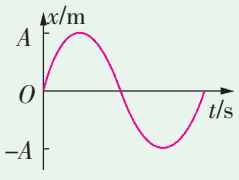
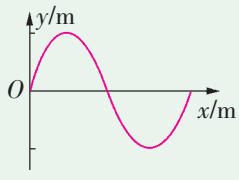
图 2–10　波的图像

图 2–10 所示的波的图像是正弦曲线，它所表示的波叫做简谐波。当波源做简谐运动时，介质的各个质点也随着做简谐运动，所形成的波就是简谐波。简谐波是一种最基本、最简单的波，其他的波可以看作是由若干简谐波合成的。

讨论与思考

1. 在图 2–10 中，标明波峰与波谷。

2. 从研究对象、物理意义等方面比较波的图像和振动图像，并将你理解的内容填入下表中。

	振动图像	波的图像
图　　像		
研究对象		
物理意义		
横 坐 标		
能从图上直接得到的信息		

用频率、波长描述机械波

频率和周期

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

波长

在波动中,对平衡位置的位移总是相等的两个相邻质点间的距离叫做**波长**(wavelength)。通常用 λ 表示(图 2–11)。

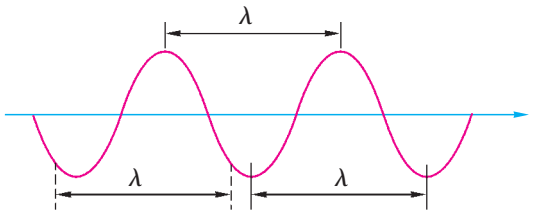


图 2–11 波长

如图 2–12 所示,在横波中,两个相邻波峰(或两个相邻波谷)之间的距离等于波长。在纵波中,两个相邻密部(或两个相邻疏部)之间的距离等于波长。

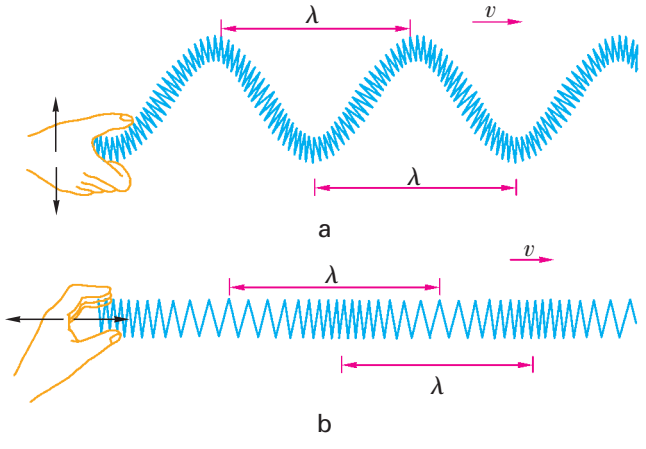


图 2–12 横波与纵波的波长

波长、频率与波速的关系

波传播的速度叫做**波速**(wave speed)。波在均匀介质中是匀速传播的。

由图 2–7 可知,质点 1 的振动经过一个周期 T,传到质点 9,传播的距离恰好就是一个波长 λ。

由此可得

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

波速还可写成

$$v = \lambda f$$

即波速等于波长跟频率的乘积。

这两个公式对于光波、电磁波同样适用。

实验和理论表明，波在不同介质中传播时，其频率（周期）保持不变。由于波在不同介质中传播的速度不同，因此，波长也不同。

案例分析

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

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

$$v = \lambda f$$

得

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

如果这列声波在纯净水中传播，波速是 1531 m/s，它的波长多大？

家庭作业与活动

1. 一列横波某时刻的波形图如图 2–13 所示。如果波沿着 x 轴正方向传播，A、B、C 三个质点中，哪一个最先回到平衡位置？波沿着 x 轴负方向传播，这三个质点中，哪个最先回到平衡位置？

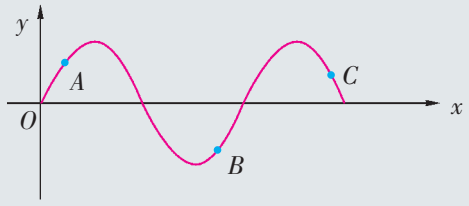


图 2–13

2. 某乐律 C 调“la”的频率为 $f = 440$ Hz，试求这个音在空气中的波长和水中的波长。已知声波在空气中传播的速度为 332 m/s。声波在水中的传播速度为 1450 m/s。
3. 湖面上停着甲、乙两条船，它们相距 30 m。一列水波正在湖面上传播，每条船每分钟上下浮动 30 次。当甲船位于波峰时，乙船在波谷，两船之间还有一个波峰。求水波的波速。
4. 简谐波在给定的介质中传播时，下列说法中正确的是
   A. 振幅越大，则波传播的速度越大
   B. 振幅越大，则波传播的速度越小
   C. 在一个周期内，振动质点走过的路程等于一个波长
   D. 质点振动的频率越大，则波传播一个波长所用的时间越短

2.3 机械波的案例分析

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

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

案例分析 1

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

设地震波纵波(P 波)的速度 $v_P = 9.9$ km/s、横波(S 波)的速度 $v_S = 4.5$ km/s，表面波(L 波)的速度 $v_L < v_S$。

P 波和 S 波传到地球表面会发生反射，产生沿地表传播的表面波(L 波)。

(1) 如图 2–14 所示，位于震中某实验室内有摆 A 与摆 B，地震发生时，最先摆动的是哪一个？

(2) 该实验室的地震观测仪记录到的地震图像如图 2–15 所示，由图推断 a、b、c 三种波形各对应于哪种地震波？

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

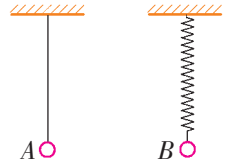


图 2–14

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

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

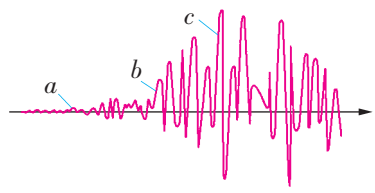


图 2–15 地震波示意图

(3) 假设地震观测仪距离震源的距离为 s，由 $\frac{s}{v_S} - \frac{s}{v_P} = \Delta t$ 得

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

讨论与思考

利用波长、频率、波速三者之间的关系，还能解决哪些问题？请举例说明。

波的图像与振动图像十分相似，这两者有何联系与区别呢？

案例分析 2

案例 波是振动状态的传播。对某一列波来说，图 2–16a、b 两个图像中，哪一个是波的图像，哪一个是波源的振动图像？你能根据两个图像提供的信息，计算出波长、周期和波速吗？

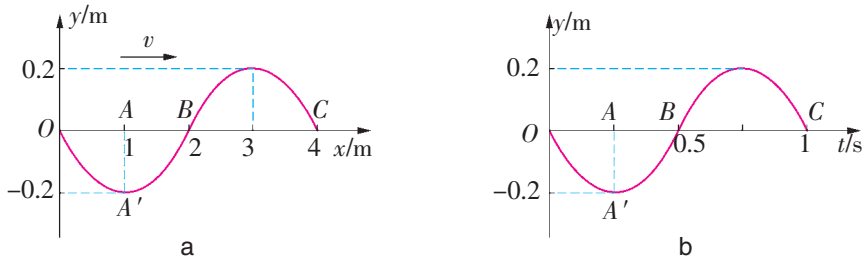


图 2–16 波的图像与振动图像

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

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

图 b 中 AA' 是波源质点振动的振幅，为 0.2 m；OC 表示该质点的振动周期，$T = 1.0\,\mathrm{s}$。

由于两图像描述的是同一列波的有关情况，所以波速为

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

你怎样区分振动图像和波的图像？

案例分析 3

案例 某时刻一列横波的图像如图 2–17 红线所示，若已知该时刻质点 a 的运动方向向下，试判断这列波的传播方向。

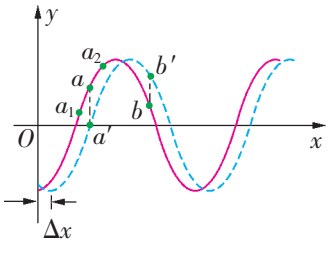


图 2–17 波的传播示意图

分析 对这个问题，一般可用两种方法进行分析。

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

2. 可假设波沿某方向传播，将图像沿着波的传播方向移动一段距离 $\Delta x = v\Delta t\left(\Delta t < \frac{T}{4}\right)$，然后观察图中质点 a 位置变化是否符合实际振动情况，从而确定波的传播方向。

讨论与思考

1. 假如已知波的传播方向，根据波的图像，你能确定某一质点的振动方向吗？

2. 图 2–16a 中，OA、AB 间各质点的运动方向怎样？

3. 图 2–16b 中，质点在 0 ~ 0.25 s 内是远离还是向着平衡位置运动？在 0.25 ~ 0.5 s 内的情况又怎样呢？

家庭作业与活动

1. 下列关于波长的说法中正确的是
   A. 一个周期内介质质点走过的路程
   B. 横波中相邻的两个波峰间的距离
   C. 一个周期内振动状态所传播的距离
   D. 两个振动速度相同的介质质点间的距离

2. 一列波在第一种均匀介质中的波长为 λ_1，在第二种均匀介质中的波长为 λ_2，且 $\lambda_1 = 3\lambda_2$，那么波在这两种介质中的频率之比和波速之比分别为
   A. 3∶1，1∶1　　B. 1∶3，1∶1
   C. 1∶1，3∶1　　D. 1∶1，1∶3

3. 如图 2–18 所示，绳子右端固定，一列波刚传播到 B 点，据图可判断出质点 A 开始振动的方向是
   A. 向上　　B. 向下
   C. 向左　　D. 向右

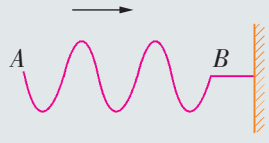


图 2–18

2.4 惠更斯原理　波的反射与折射

你游览过北京天坛（建于永乐十八年，即 1420 年）吗？那里有著名的“回音壁”和“三音石”。当你紧贴回音壁小声讲话时，在回音壁的另一处，你的朋友可以很清楚听见你的讲话声；当你站在三音石上击掌一次，就能听到几声回音。这些现象跟波的传播规律有关。要研究波的传播规律，首先就必须研究惠更斯原理。

惠更斯原理

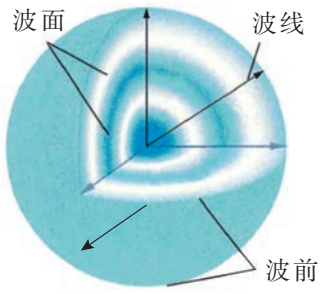


图 2–19　球面波

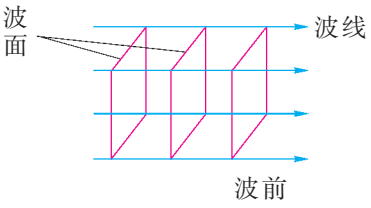


图 2–20　平面波

在均匀介质中，质点的振动会向各个方向匀速传播，形成球面波（图 2–19）。波在介质中传播时，任一时刻介质振动步调相同的点的包络面叫做**波面**（wave surface）；最前面的波面又叫波前；垂直于波面并指向波传播方向的直线叫做**波线**（ray）。波面是平面的波叫做平面波（图 2–20）。

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

如图 2–21 所示，已知 S_1 是球面波和平面波在 t 时刻的波前，根据惠更斯原理，其上各点都可以作为新的波源，向各个方向发出子波。经 Δt 时间，子波半径为 $v\Delta t$，其包络面 S_2 即为 $t + \Delta t$ 时刻的新波前，这样就可以在图中画出 $t + \Delta t$ 时刻的各个子波及波面（波前）。

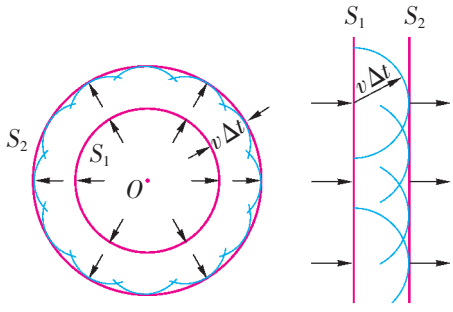


图 2–21　球面波与平面波的传播



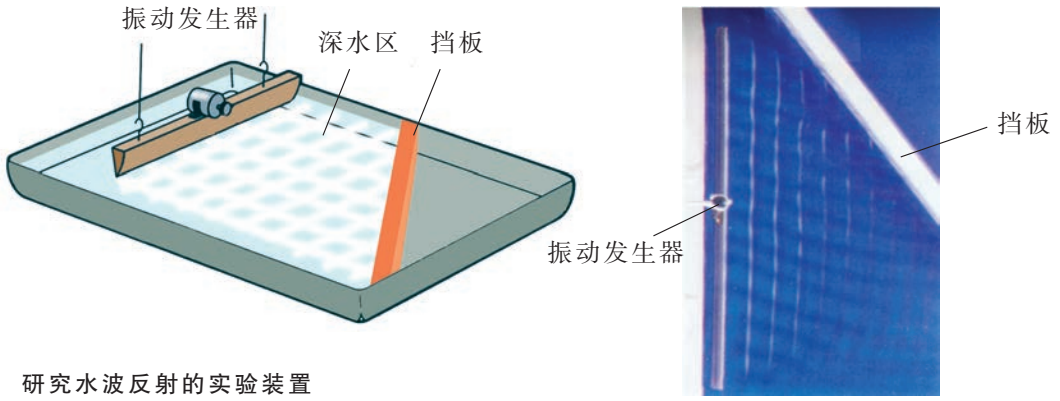
惠更斯（C. Huygens，1629—1695），荷兰物理学家和数学家，研究出制作显微镜玻璃透镜的技术。他第一个提出光的波动说。

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

研究机械波的反射规律

实验探究　观察波的反射现象

如图 2–22 所示，在矩形水槽的一端放置一窄条形的平板状



a　研究水波反射的实验装置

b　水波的反射图样

图 2–22

振动发生器，平板上装有小电动机，电动机的轴上装有偏心轮。当电动机转动后，便带动振动器在竖直方向振动，于是在水槽中便激发了水波。

当水波碰到挡板时，便发生反射，观察反射波的传播情况，并与入射波进行比较。请根据图 2–23 分析，入射到挡板上的水波的方向跟反射的水波的方向有什么关系？

通过振动装置在矩形水槽中激发的水波可以看成是平面波。

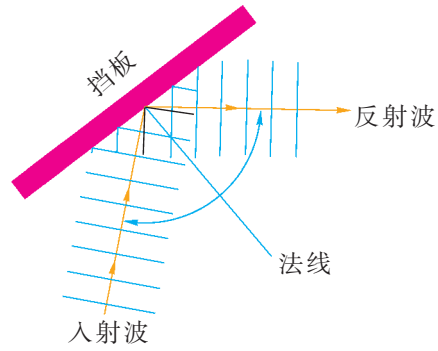


图 2–23　水波的反射规律

分析论证　研究机械波的反射规律

如图 2–24 所示，设入射的平面波的波面和两种介质的分界面均垂直于纸面。在时刻 t，波面 AB 的 A 点和界面相遇。经过三个相等的时间间隔，此波面依次到达分界面上等间距的 E_1、E_2 和 C 点。

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

过 A 点作界面的法线 AN，标出入射角和反射角。请根据图 2–24 证明，反射角等于入射角。这就是波的**反射定律**（reflection law）。

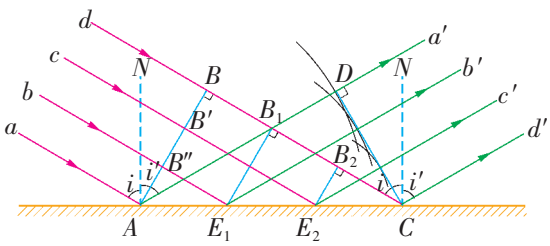


图 2–24　波的反射

研究机械波的折射规律

实验探究　观察波的折射现象

水波的传播速度与水深有关，水越深，波速越大。实验中因深水区和浅水区的波速不同，故可将深水、浅水区域视为两种介质。

如图 2–25 所示，在矩形水槽底部一半区域内垫一块厚度均匀的玻璃板，形成深水区和浅水区。利用振动发生器激起水波，当水波从深水区传播到浅水区时，可以观察到如图 2–26 所示的折射图样。

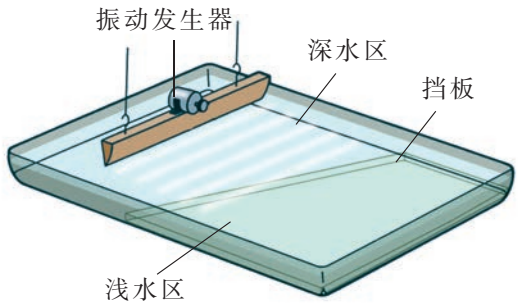


图 2–25　研究水波折射的实验装置

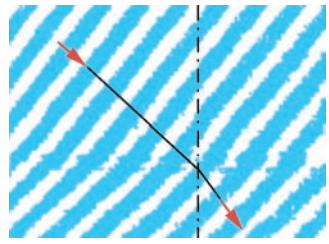


图 2–26　水波折射图样

分析论证　研究机械波的折射规律

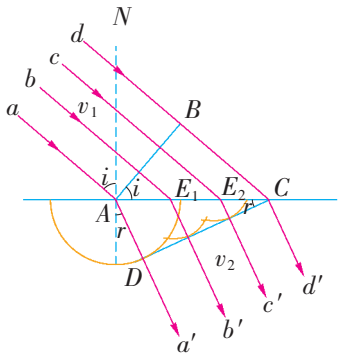


图 2–27　波的折射

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

如图 2–27 所示，设 v_1、v_2 分别表示波在第一和第二种介质中的波速，且 $v_1 > v_2$。时刻 t 入射波波面 AB 到达图示位置，其后经过三个相等的时间间隔，此波面依次到达等间距的 E_1、E_2 和 C 点。

仿照波的反射的作图方法，在图 2–27 中，从 A 向第二种介质发出的子波的半径为 $v_2\Delta t$，它必小于 $BC = v_1\Delta t$。而从 E_1、E_2 向第二种介质发出的子波的半径分别为 $\frac{2}{3}v_2\Delta t$ 和 $\frac{1}{3}v_2\Delta t$。这些子波的包络面也是与纸面垂直的平面。它与纸面的交线为 CD，$\Delta t = \frac{BC}{v_1} = \frac{AD}{v_2}$。作垂直于此波面的直线，即得折射线。由图可以看出，入射波的波线跟折射波的波线不在一条直线上。作 AN 垂直于分界面，即为分界面的法线。以 r 表示折射角，则有 $\angle ACD = r$，再以 i 表示入射角，则有 $\angle BAC = i$。由图可看出

$$BC = v_1 \Delta t = AC\sin i$$
$$AD = v_2 \Delta t = AC\sin r$$

两式相除得

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

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

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

家庭作业与活动

1. 影剧院的内墙壁是不是很光滑？请实地观察后谈谈影剧院为什么这样处理墙壁。
2. 旅游者走过一个山谷，他拍手以后经过 0.5 s 听到右边山坡反射回来的声音，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_____m。
3. 为了测一根长铁管的长度，甲同学把耳朵贴在长铁管一端，乙同学在另一端敲一下这根铁管，测得甲同学听到的两次响声的时间间隔为 0.5 s。已知声音在铸铁和空气中传播的速度分别为 3910 m/s 和 340 m/s，问这根铁管有多长？
4. 如图 2–28 是一列机械波从一种介质进入另一种介质中发生的折射现象。已知在介质 I 中的波速为 v_1，在介质 II 中的波速为 v_2，则 $v_1 : v_2$ 为

A. $1:\sqrt{2}$　　B. $\sqrt{2}:1$

C. $\sqrt{3}:\sqrt{2}$　　D. $\sqrt{2}:\sqrt{3}$

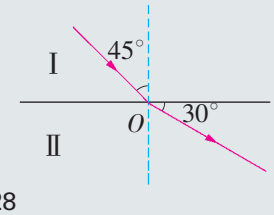


图 2–28

2.5 波的干涉与衍射

湖面上，几艘飞驰的快艇劈波斩浪，其后留着彼此独立的波形(图 2–29)。

这些波相遇时以及相遇后的情况会怎样呢？



图 2–29　几列水波独立传播

波的叠加原理

实验探究　研究绳波的叠加

两位同学分别站在一根长绳(8~10 m)的两端,在水平方向上将绳稍稍拉紧,然后分别上下摆动一下,各使绳产生一个凸(或凹)的波。

由于绳子中波的传播速度较快,人眼很难看清楚波的传播和叠加情况。用摄像机将其拍摄下来,截取不同时刻的几个画面,就可以清楚地看到图 2–30 所示的叠加过程。两列波彼此穿过,继续传播,波的形状和传播情况跟相遇前一样吗?

在水面上,有两个圆形水波,波前逐渐扩展,到一定时候两波相遇,然后又分开(图 2–31)。两列波在相遇后,各自的传播状况是否发生变化?

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

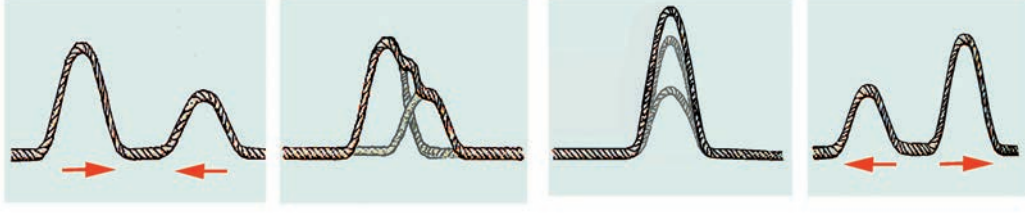


图 2–30　绳波的叠加

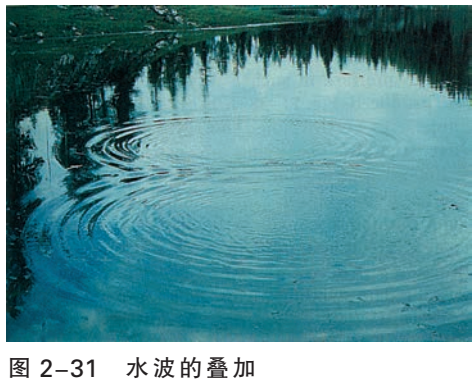


图 2–31　水波的叠加

研究波的干涉

实验探究 研究水波的干涉

实验装置如图 2–32 所示。波源是固定在同一振动发生器上的两个振动小球。当振动器上下振动时,两振动小球便周期性地触动水面,形成两个振动频率和振动步调相同的波源。这两个波源产生的是两列步调相同、频率也相同的波。两列波水面质点的振动方向都沿上下方向。两列波相遇后,在它们的重叠区域会形成奇妙而稳定的图样(图 2–33)。仔细观察水面振动的图样,可以看出,存在着一条条从两个波源中间伸展出来的相对平静的区域和激烈振动的区域。

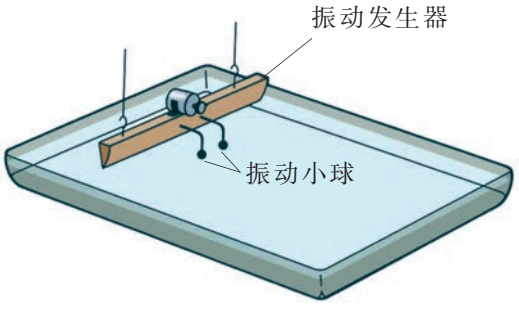


图 2–32 水波干涉实验装置

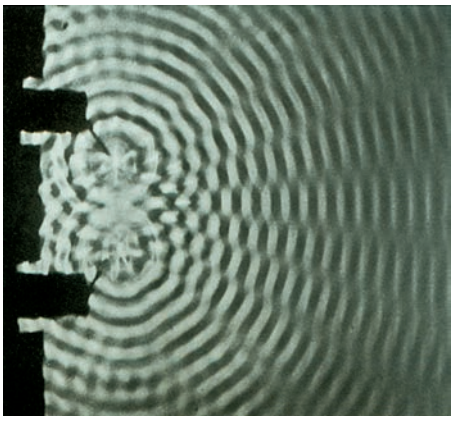


图 2–33 水波干涉图样

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

分析论证 研究波的干涉规律

为了分析方便,将图 2–33 所示的照片画成图 2–34。某一时刻水面上的某一点(图 2–34 中的 a 点)是两列波的波峰跟波峰相遇,经过半个周期,就变成波谷跟波谷相遇。波峰跟波峰相遇时,质点的位移最大,等于两列波的振幅之和;波谷跟波谷相遇时,质点的位移也是最大,也等于两列波的振幅之和。在这一点上,两列波引起的振动始终是加强的,质点振动的振幅等于两列波的振幅之和。

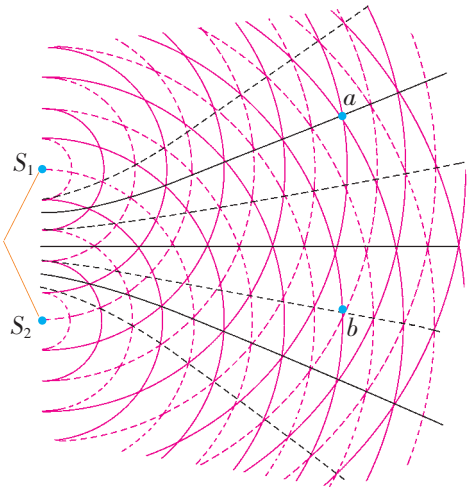


图 2–34　两列波的干涉（实线表示波峰，虚线表示波谷）

请讨论：某一时刻水面上的另一点（图 2–34 中的 b 点）是两列波的波峰跟波谷相遇，经过半个周期，就变成波谷跟波峰相遇。在这一点上，两列波引起的振动是加强还是减弱？

图 2–34 中实线与实线的交点（或虚线与虚线的交点）为振动的加强区（用放射状实线画出）；实线与虚线的交点为振动的减弱区（用放射状虚线画出）。可以看出，这一图样跟实验所得到的图样是一致的。

由上面的实验和分析可知，振动频率相同、步调一致的两列波叠加，使某些区域的振动加强，某些区域的振动减弱，而且振动加强的区域和振动减弱的区域相互隔开，始终稳定，这种现象叫做波的**干涉**（interference）。能够产生干涉的波源叫做相干波源，干涉所形成的图样叫做干涉图样。

讨论与思考

两列波相遇，一定会产生干涉现象吗？要产生干涉现象，对波源有什么要求？

一切波只要符合相干条件都能发生干涉。

STS

利用干涉原理制成干涉型消声器

图 2–35 是干涉型消声器的工作原理图。

有一列波长为 λ 的声波，沿水平管道自左向右传播。当入射波到达 a 处时，分成两束相干波，它们分别通过 r_1 和 r_2，再到 b 处相遇。若 $\Delta r = r_1 - r_2$ 恰好等于声波半波长 $\frac{\lambda}{2}$ 的奇数倍，即 $\Delta r = \frac{(2k+1)\lambda}{2}$ 时，声波的振幅 $A = 0$，就是说该频率的声波被削弱。利用这一原理，可以达到控制噪声的目的。

干涉型消声器能有效地消除低频噪声。发动机（正常工作期间）的周期性排气噪声，就是一种典型的低频噪声。一台四缸四冲程发动机，当它以 2000 r/min 的转速运转时，其峰值频率在 200 Hz 以下的噪声较大。所以常用干涉型消声器来消除这类低速转动发动机所发出的低频噪声。一台带有干涉消声器的柴油发动机经消声处理后，其排气噪声可以降低 10 dB 以上。

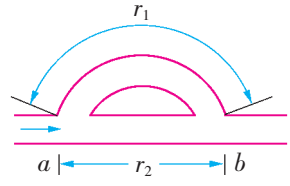
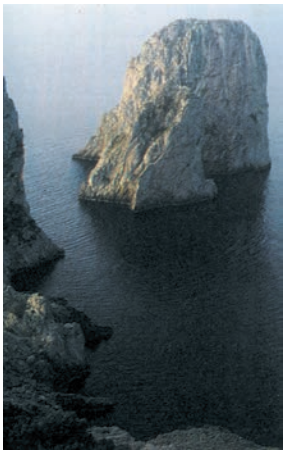


图 2–35



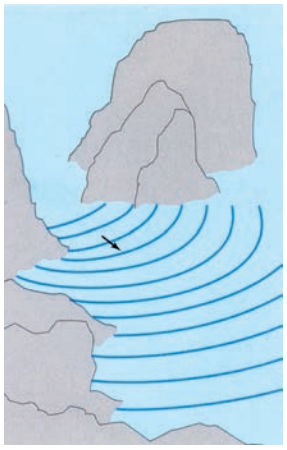


图 2–36 水波绕过小山



图 2–37 水波绕过桥墩

研究波的衍射

图 2–36 中,我们看到水波通过两山之间狭窄的水面时,形成半圆形的水波向外扩散,可以绕过小山。这是为什么呢?

图 2–37 中,雄伟的大桥下,悠悠江水,层层波浪绕过桥墩却“若无其事”。

波还会转弯,这是什么缘故?

实验探究 观察水波的衍射

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

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

在水槽里放两块挡板,当中留一窄缝,保持水波的波长不变,逐渐改变窄缝的宽度(由宽到窄改变),观察波的传播情况(图 2–38)。

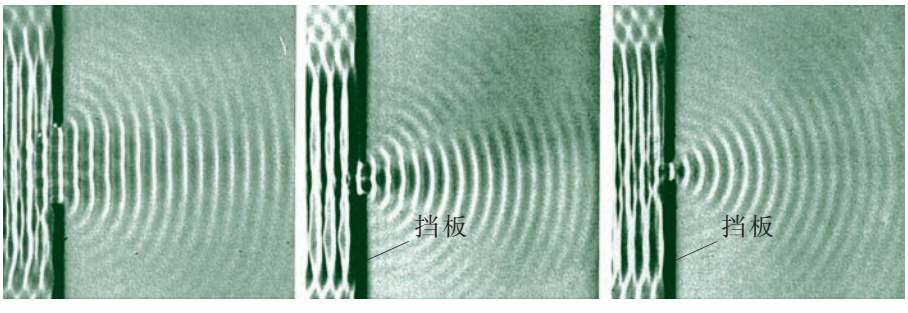


图 2–38 水波发生明显衍射的条件

讨论与思考

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

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

请解释生活中“闻其声而不见其人”的现象。

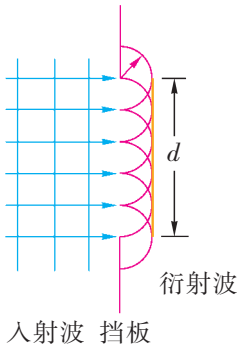


图 2–39　平面波的衍射

分析论证　研究水波的衍射

如图 2–39 所示，波面为直线形的水波，传到宽为 d 的缝时，缝上各点成为新的子波源，它们都要发射半球形子波。以这些子波源为中心作半径为 vt（v 为波速）的半圆面，再作与半圆面相切的包络面，这个包络面就是波通过缝后在时刻 t 的波前。从图中可以看出，直线形水波通过缝后，除与缝的宽度等宽部分的波面仍为直线外，在缝的边缘处，波面发生了弯曲，波线改变了方向，传播到了障碍物的后面，说明产生了衍射现象。

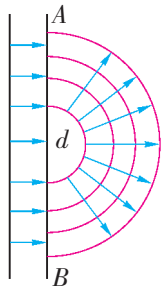


图 2–40　平面波窄缝衍射

如图 2–40 所示，如果缝很狭窄，宽度 d 跟波长相差不多时，水波经过狭缝后的波前是圆形的，衍射现象非常明显。

总之，当缝很宽，其宽度远大于波长，则波通过缝后基本上是沿直线传播的，衍射现象就很不明显。当缝的大小（或障碍物的大小）跟波长相差不多时，就能发生明显的衍射现象。

家庭作业与活动

1. 准备一台收录机、两个相同的扬声器，请设计一个实验，体验声波发生的干涉现象。如果学校操场上已经安装有落地音箱，请在播放音乐时体验一下。
2. 两列波长相等的水波发生干涉现象，若在某一时刻，恰好 P 点处两列波的波峰相遇，Q 点处两列波的波谷相遇，则
   A. P 点振动加强，Q 点振动减弱
   B. P、Q 两点振动都加强
   C. P、Q 两点振动周期相同
   D. P、Q 两点始终处在最大或最小位移处
3. 下列有关干涉图样的说法中正确的是

A. 振动加强的区域和振动减弱的区域相间

B. 两个振动源连线的垂直平分线上的质点的振动是减弱的

C. 两列波的波谷与波谷相遇处的质点的振动是减弱的

D. 两列波的波峰和波谷相遇处的质点的振动是加强的

4. 在做水波通过小孔衍射的实验时，激发水波的振子振动频率为 5 Hz，水波在水槽中传播速度为 0.05 m/s，为使实验效果更明显，使用小孔直径 d 应为_____。

5. 如图 2-41 所示，B 为波源，M、N 为两块挡板，其中，M 板固定，N 板可上下移动，两板中间有一狭缝。此时测得 A 点没有振动，为了使 A 点能发生振动，可采用的方法是

A. 增大波源的频率

B. 减小波源的频率

C. 将 N 板向上移动一些

D. 将 N 板向下移动一些

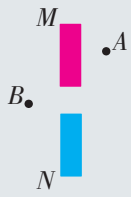


图 2-41

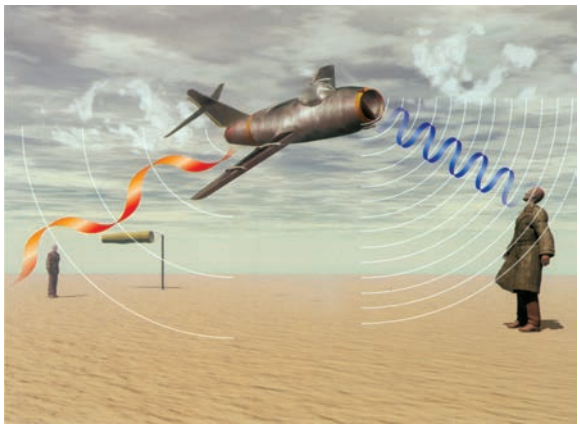


图 2-42　空中飞机轰鸣声与多普勒效应

2.6 多普勒效应

生活中，我们能否从飞机飞行时轰鸣声调的高低，判断它是从远处飞来，还是掠过头顶而离去？

站在马路边，一辆鸣着喇叭的汽车从身边驶过，你听到的喇叭音调是否变化？

1842 年初夏的一天，奥地利物理学家多普勒(J. C. Doppler)带着心爱的女儿在铁道旁散步。这时远处有一列高速行驶的火车鸣笛而来，火车经过他们身旁后又鸣笛离去，多普勒发现汽笛音

调先变高,后又变低。多普勒对这种现象十分惊奇,他再次来到铁路旁,体验当初的感觉,证实了自己的直觉没错。

偶然中孕育着必然。多普勒对这种现象进行了认真的研究,总结出了其中的规律。

感受多普勒效应

1845 年,荷兰皇家气象学院院长白贝罗(Buys-Ballot)在乌得勒支铁路上进行了实验,让机车牵引一节平板车厢,上边坐了一队小号手奏乐。当机车快速驶来驶去时,由一些训练有素的音乐家用自己的耳朵判断音调的变化。然后音乐家与小号手对调位置,重新实验。实验进行了两天,观测到管乐器音调确实有明显的变化。

实验探究　感受多普勒效应

对于上述现象,我们可以通过如下两个实验来体验。

1. 将一个哨子系在长约 1.5 m 的细绳一端,另一端系在手上,让手臂晃动,使哨子在我们头上旋转。另一些人坐在凳子上,聆听哨声的音调变化情况。相互交换一次,亲身体验一下。

2. 两位同学相隔一段距离(约 10 m),一人手持小收音机播放音乐(或吹口哨),另一人坐在秋千上来回摆动(图 2-43),经过图中 A、B、C、D、E 不同位置,体会一下音调是如何变化的。

这种由于波源跟观察者之间有相对运动,使观察者感受到波

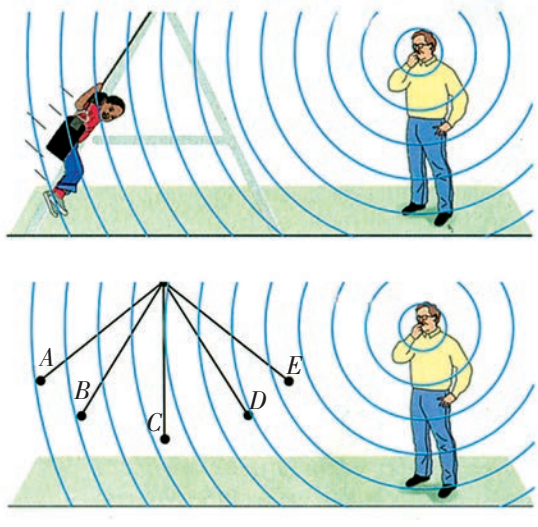


图 2-43　体验哨声的变化

的频率发生了变化的现象，叫做**多普勒效应**(Doppler effect)。

分析论证

多普勒效应表明：观察者相对波源运动时，观察者接收到的频率与波源的频率不同(图 2–44)。这种效应是怎样发生的呢？

设波源频率为 f，波在介质中的传播速度为 V，观察者接收到的频率为 f'。当波源和观察者均相对于介质静止时，单位时间内观察者接收到的“完整波”的个数等于波源发出的“完整波”的个数，即接收频率等于波源频率。

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

请思考：当观察者以速度 v 离开波源运动时，接收频率跟波源频率有什么关系？

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

请思考：当波源以速度 u 离开观察者运动时，接收频率跟波源频率有什么关系？

波源频率是指单位时间内波源发出的“完整波”的个数。

接收器收到的频率是指单位时间内接收器接收到的“完整波”的个数。

波的频率是指单位时间内通过介质中某点的“完整波”的个数。

身边的多普勒效应

多普勒效应在科学研究、工程技术、交通管理、医疗诊断等多

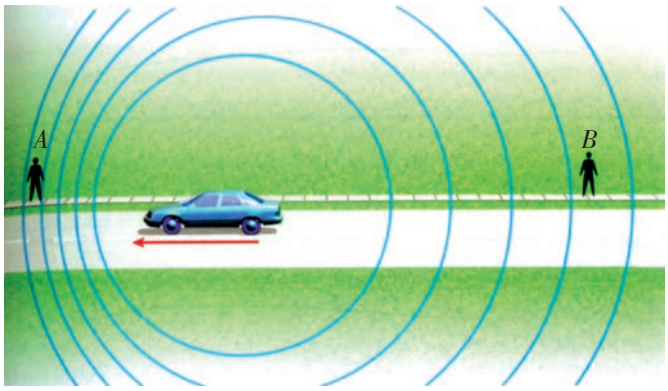


图 2–44 产生多普勒效应的原理示意图

个领域有广泛的应用。工业生产中,根据多普勒效应制成的流量计,可以测定各种封闭管道中流体或悬浮物液体的流速。医学中根据多普勒效应制成的胎心控制器、血流测定仪,可以探测人体内脏器官因病变而引起的异常状况。利用激光的多普勒效应可以精确地测定各种运动物体的速度。天文学上,根据多普勒效应可以准确地计算出天体相对于地球运动的速度、人造卫星的运动速度等。观察恒星光谱,天文学家发现谱线向红端移动,也就是说频率在减小,可以判断出它们在向远方离去。美国科学家哈勃(E. P. Hubble)经过仔细测量得知,恒星越远,红移量越大,离开速度越大。这是大爆炸理论的重要依据之一。

案例分析

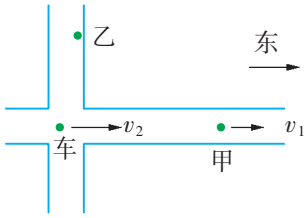


图 2-45

案例 如图 2-45 所示,在公路的十字路口东侧路边,甲骑车以速度 v_1 向东行驶,在路口北侧,乙站在路边,一辆汽车以速度 v_2 通过路口向东行驶并鸣笛。已知汽车笛声的频率为 f_0,车速 $v_2 > v_1$。设甲听到的笛声频率为 f_1,乙听到的笛声频率为 f_2,司机自己听到的笛声频率为 f_3,则此三人听到笛声的频率由高至低应如何排列?_____。

分析 已知汽车(波源)靠近甲,所以 $f_1 > f_0$,而汽车远离乙,所以 $f_2 < f_0$。汽车相对司机是静止的,有 $f_3 = f_0$。因此三人听到笛声的频率由高至低依次为 $f_1 > f_3 > f_2$。

信息浏览

冲击波

图 2-46d 中波源速度 v_S 超过波速 v_0。这时,任一时刻波源本身超过它此前发出的波前。当波源在 A 位置时,发出的波在其后 t 时刻的波面半径为 $v_0 t$,而此时刻波源已前进了 $v_S t$ 的距离,到达 B 位置。在波源的前方,没有任何波动产生。在时间 t 内,系列波面的包络面形成圆锥面,这个圆锥面叫马赫锥。有时可以看到当船速超过水波的波速,就会在水中激起以船为顶端的 V 形波。当飞机或炮弹超音速飞行时,就会在空气中激起圆锥形的波,这就是冲击波。

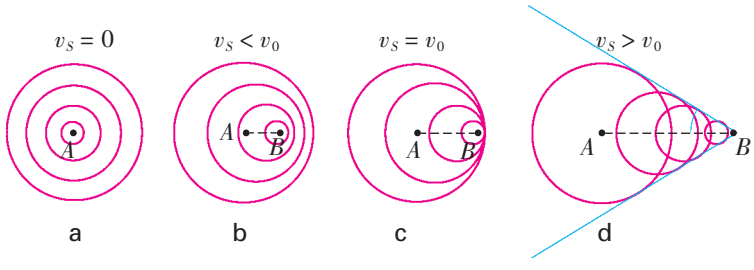


图 2-46 冲击波的形成过程

家庭作业与活动

1. 站在火车轨道旁，一列高速驶来的火车正在鸣笛，然后高速离人而去，则人听到的鸣笛声的频率将
   A. 变大　　B. 变小
   C. 先变大后变小　　D. 先变小后变大
2. 振源所发出的机械波的频率为 180 Hz，观察者所接收到的机械波频率也为 180 Hz，则下列判断中正确的是
   A. 若振源静止不动，则观察者一定静止不动
   B. 振源和观察者之间的相对距离不变
   C. 振源和观察者之间的相对距离增大
   D. 振源和观察者之间的相对距离减小
3. 有一种由钢丝操纵做圆周飞行的飞机模型，装有两冲程的活塞式发动机作为动力。操纵者站在圆心，在他听来发动机工作时发出的声音是平稳不变的，场边的观察者则听到发动机的声音忽高忽低地做周期性变化，这是由于_____，这种现象叫做_____。

2.x

第 2 章家庭作业与活动

1. 图 2–47 是同一机械波在两种介质中传播的波动图像。从图中可以直接观察到发生变化的物理量是
   A. 波速　　B. 频率
   C. 周期　　D. 波长

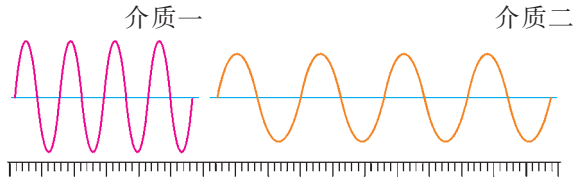


图 2–47

2. 图 2–48 是两列波叠加的示意图，这两列波的振动方向、振幅、频率完全相同，M、N、Q 为叠加区域的三个点，Q 点为两个波谷相遇，M 点为两个波峰相遇，N 点为波峰和波谷相遇，则下列说法中正确的是
   A. Q 点为振动加强点
   B. N 点始终静止不动
   C. 经 $\frac{1}{2}T$，质点 Q 传播到 N 点
   D. M 点为振动加强点，过 $\frac{1}{2}T$，此点振动减弱
3. 关于波的衍射，下列说法中正确的是
   A. 衍射是一切波的特性
   B. 波长比孔的宽度大得越多，衍射现象越不明显
   C. 发生波的衍射时必须有两个波源
   D. 波的衍射也是由于波的叠加产生的

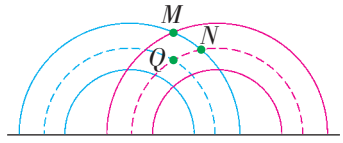


图 2–48

4. 有一测速雷达，发射的电磁波频率为 f_1，想用它来测量一辆迎面开来的汽车的车速，设该雷达接收到的汽车反射波频率为 f_2，则有
   A. $f_1 > f_2$　　B. $f_1 = f_2$
   C. $f_1 < f_2$　　D. 无法确定
5. 图 2–49 为一简谐横波在某一时刻的波形图。已知此时质点 A 正向上运动，如图中箭头所示。由此可判定此横波
   A. 向右传播，且此时质点 B 正向上运动
   B. 向右传播，且此时质点 C 正向下运动

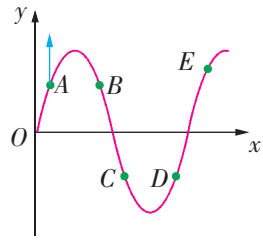


图 2–49

C. 向左传播，且此时质点 D 正向上运动

D. 向左传播，且此时质点 E 正向下运动

6. 如图 2–50 所示，A、B 是 Ox 轴上的两个质点，有一列简谐波沿 Ox 正方向传播。某一时刻，当 A 点沿竖直向上的方向通过其平衡位置时，B 点刚好沿竖直向下的方向通过其平衡位置。如果这列波的周期为 T，则这列波到 A、B 两点的时间差为

A. $(2n+1)T$　　B. $\dfrac{(2n+1)T}{2}$

C. $\dfrac{3(2n+1)T}{4}$　　D. $\dfrac{(2n+1)T}{4}$



图 2–50

7. 关于声波，下列说法中正确的是

A. 空气中的声波一定是纵波

B. 声波不仅能在空气中传播，也能在固体、液体和真空中传播

C. 声音在水中的传播速度大于在空气中的传播速度

D. 空中有时雷声不绝，这是由声波的干涉引起的

8. 已知空气中的声速为 340 m/s，现有几种声波：①周期为 $\dfrac{1}{20}$ s，②频率为 10^4 Hz，③波长为 10 m。它们传播时若遇到宽度约为 13 m 的障碍物，能产生显著衍射现象的是

A. ①和②　　B. ②和③

C. ①和③　　D. 都可以

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