

中学物理教材编写组

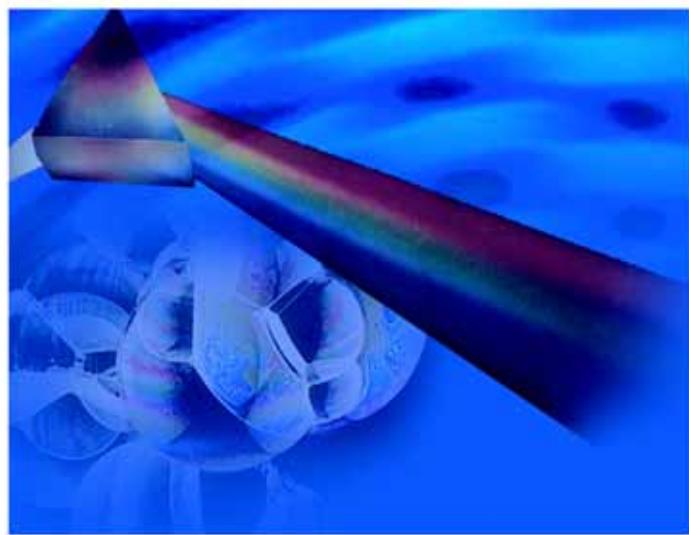
普通高中课程标准实验教科书

# 物理

---

# PHYSICS

(选修 3—4)



山东科学技术出版社

# 目录

# MULU

## 第1章 机械振动

导 入 从我国古代的“鱼洗”说起	2
第1节 简谐运动	3
第2节 振动的描述	7
第3节 单摆	13
第4节 生活中的振动	18

## 第2章 机械波

导 入 身边的波	25
第1节 波的形成和描述	26
第2节 波的反射和折射	34
第3节 波的干涉和衍射	40
第4节 多普勒效应及其应用	44

## 第3章 电磁波

导 入 无处不在的电磁波	49
第1节 电磁波的产生	50
第2节 电磁波的发射、传播和接收	55
第3节 电磁波的应用及防护	61

专题探究 振动与波的实验与调研 67

## 第4章 光的折射与全反射

导 入 美妙的彩虹	70
第1节 光的折射定律	71
第2节 光的全反射	81
第3节 光导纤维及其应用	87

## 第5章 光的干涉 衍射 偏振

导 入 从五彩斑斓的肥皂泡说起	92
第1节 光的干涉	93
第2节 光的衍射	100
第3节 光的偏振	106
第4节 激光与全息照相	111

专题探究 光学部分的实验与调研 115

## 第6章 相对论与天体物理

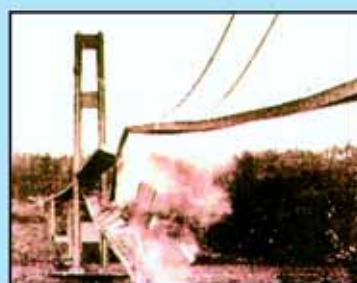
导 入 从双生子佯谬谈起	118
第1节 牛顿眼中的世界	119
第2节 爱因斯坦眼中的世界	124
第3节 广义相对论初步	130
第4节 探索宇宙	136



第 1 章

# 机械振动

- 导入 从我国古代的“鱼洗”说起
- 第1节 简谐运动
- 第2节 振动的描述
- 第3节 单摆
- 第4节 生活中的振动



# 导入

## 从我国古代的“鱼洗”说起

我国汉代有一种称为“鱼洗”的铜盆，盆的边缘有两只耳环，盆底有浮雕的鱼。在盆内注入适量清水，当用潮湿的双手来回摩擦铜盆两个耳环时，伴随着鱼洗发出的铮铮声，犹如泉涌的水柱从跃然欲出的鱼嘴中喷出，高可达数十厘米，令人惊叹不已。



图 1-2 为什么还不喷水呢



图 1-1 我国古代的鱼洗

经验丰富者轻轻摩擦几下，鱼洗便能喷水；而初试者往往费尽九牛二虎之力也无法让鱼洗喷出水来。这是为什么呢？

铜盆为什么会发生剧烈的振动？铜盆中的水为什么能飞溅出来？下面大家可以共同进行探究。

### 本章 要求

- 通过观察和分析，理解简谐运动的特征。能用公式和图象描述简谐运动的特征。
- 通过实验，探究单摆的周期与摆长的关系。
- 知道单摆周期与摆长、重力加速度的关系。会用单摆测定重力加速度。
- 通过实验，认识受迫振动的特点。了解产生共振的条件以及在技术上的应用。

# 第1节 简谐运动

## 1. 什么是机械振动

微风吹过，树上的枝条会左右摇摆；轻轻一推，激动人心的秋千就荡起来（图1-3）……其共同的特点是：物体在平衡位置附近做往复运动。这种运动叫做**机械振动**（mechanical vibration），简称振动。

机械振动是自然界和生活中常见的一种周期性运动。一切发声物体都在振动，有的振动比较简单，如音叉的振动；有的振动比较复杂，如吉他、小提琴等乐器弦的振动。

振动是怎样产生的呢？我们以小提琴琴弦的振动为例进行定性分析（图1-4）。



图1-4 琴弦的振动使我们听到了美妙的乐音



图1-3 泸沽湖转山节的秋千荡起来

演奏前，琴弦所受合力为零，静止于平衡位置。

演奏时，琴弓摩擦琴弦，使其偏离平衡位置。琴弦由于形变，产生一个指向平衡位置的弹力。如果琴弦在平衡位置的左方，则弹力的方向向右，指向平衡位置；如果琴弦在平衡位置的右方，则弹力的方向向左，也指向平衡位置。总之，只要琴弦偏离平衡位置，它所受弹力的方向总是指向平衡位置。这种总是指向平衡位置的力叫**回复力**。

回复力可以由振动物体受到的某一个力来提供，也可以由振动物体受到的几个力的合力来提供。回复力是产生振动的条件，它使物体总是在平衡位置附近振动。平衡位置是指物体所受回复力为零的位置。

## 2. 弹簧振子的振动

为了进一步探究振动的特征，我们从最简单、最基本的振动——弹簧振子的振动入手。

弹簧振子是一种理想模型，由一个质量可以忽略不计的弹簧与一个质量为 $m$ 的物体构成。弹簧的一端固定，另一端同物体连接。在不计摩擦力的情况下，物体沿直线做往复运动（图1-5）。

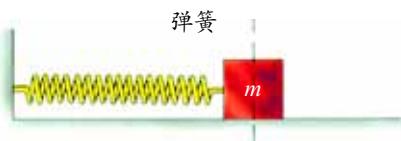


图1-5 弹簧振子

弹簧振子水平放置，物体处于平衡位置 $O$ 时，弹簧长度为原长，物体所受的弹力为零[图1-6(a)]；将物体向右拉至位置 $B$ 后释放，由于弹簧被拉长，弹簧对物体施加指向平衡位置的力，使物体向平衡位置方向运动[图1-6(b)]；到达平衡位置时，虽然物体所受弹力为零，但由于惯性，会继续向左运动；运动至平衡位置左边时，物体会挤压弹簧，弹簧对物体施加指向平衡位置的力，阻碍其运动，直至速度减小到零，到达位置 $C$ 处[图1-6(c)]；此后，在弹力的作用下，物体改变运动方向，返回位置 $B$ ，继续做相似的运动。物体就这样在平衡位置附近来回运动，形成振动。

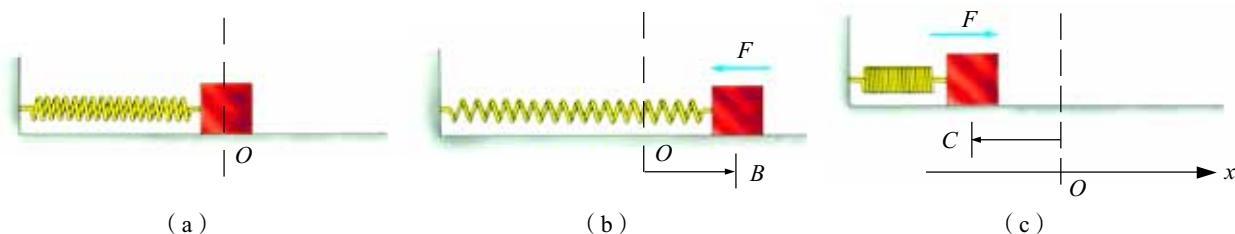


图1-6 弹簧振子的振动

取平衡位置 $O$ 为 $x$ 轴的原点，设 $x$ 轴的正方向向右。根据胡克定律，物体所受的弹力

$$F = -kx$$

式中， $k$ 是弹簧的劲度系数，负号表示力与位移的方向相反。

像弹簧振子那样，如果物体所受回复力的大小与位移大小成正比，并且总是指向平衡位置，则物体的运动叫做**简谐运动**（simple harmonic motion）。

设物体的质量为 $m$ ，根据牛顿第二定律，它的加速度

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

式中， $k$ 和 $m$ 都是正数，且为定值。弹簧振子加速度的大小与位移大小成正比，方向与位移方向相反。我们也把这种具有“加速度的大小与位移大小成正比、加速度的方向与位移方向相反”特征的运动，称为**简谐运动**。



## 讨论与交流

图1-7是做简谐运动的小球在振动过程中间隔相等的8个相继时刻的位置。试根据图示判断小球在此振动中位移大小和方向是怎样变化的，所受回复力、加速度又是如何变化的，并根据加速度与速度二者方向的关系，分析振子速度大小的变化情况。将你的判断填入表1-1的空格中。

表1-1

小球位置	位 移	弹 力	加速度	速 度
$O \rightarrow A$				
$A \rightarrow O$				
$O \rightarrow -A$				
$-A \rightarrow O$				

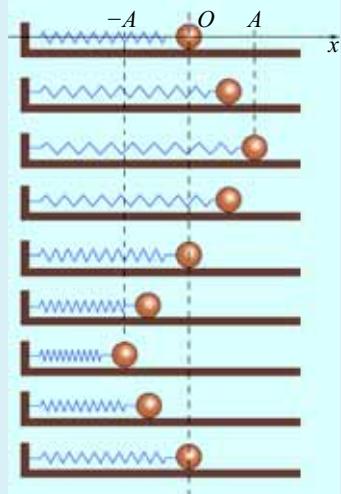


图1-7 小球的简谐运动

将你的结论与其他同学的结论比较，找出小球的位移、弹力、加速度以及速度何时最大，何时最小。



## 拓展一步

### 竖直方向的弹簧振子

如图1-8所示，在弹簧下端挂一重物，上端固定在支架上，组成竖直方向的弹簧振子。重物在竖直方向上受到弹力和重力的作用，这两个力的合力充当弹簧振子的回复力。当重物处于O点时，重力和弹力相互平衡，因此O点是弹簧振子的平衡位置。向下拉动重物，重物便在平衡位置附近振动起来。

竖直方向的弹簧振子所做的运动是否为简谐运动呢？

假设重物所受的重力为G，弹簧的劲度系数为k，重物处于平衡位置时弹簧的伸长量为 $l_1$ ，则

$$G = kl_1$$

设重物偏离平衡位置的位移为l时，弹簧的伸长量为 $l_2$ ，则

$$l = l_2 - l_1$$

取竖直向下的方向为正方向，则此时弹簧振子的回复力

$$F_{\text{回}} = G - kl_2 = kl_1 - kl_2 = k(l_1 - l_2) = -kl$$

所以，竖直方向弹簧振子的运动是简谐运动。

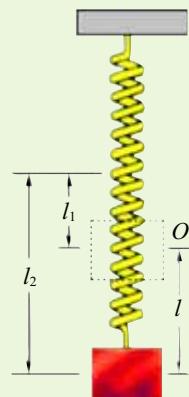


图1-8 竖直方向的弹簧振子

 作业 →

1. 小鸟从树枝上飞走后，树枝会上下抖动，是什么力使树枝在某一位置附近振动呢？
2. 滑板运动为青少年所喜爱。滑板上装有4个轮子，踩着滑板可以在碗形滑道的内壁来回滑行。滑板的这种运动可以看成振动吗？它的平衡位置在哪里？



(第1题)



(第2题)

3. 简述简谐运动物体的受力特点。
4. 关于简谐运动，下列说法错误的是
  - (A) 振动物体所受的回复力方向不变，永远指向平衡位置
  - (B) 振动物体如果速度越来越大，加速度一定越来越小
  - (C) 在恒力的作用下，物体不可能做简谐运动
  - (D) 物体的加速度和速度有时方向相同，有时方向相反
5. 做简谐运动的质点通过平衡位置时，具有最大值的物理量是
  - (A) 加速度
  - (B) 速度
  - (C) 位移
  - (D) 回复力



## 第2节 振动的描述

### 1. 振动特征的描述

说话或唱歌时，用手摸喉部，能感觉到声带的振动（图1-9）。声音大小发生变化，声带的振动也有变化。一般情况下，女生的声音比男生的声音“高”。这些都表明振动具有不同的特征。如何科学地描述振动呢？这就需要引入新的物理量。

#### （1）振幅

做往复运动的物体有一个最大位移。振动物体离开平衡位置的最大距离叫做振幅（amplitude），用 $A$ 表示。如图1-10所示，做简谐运动的物体，它的振幅就是线段 $OB$ 或 $OC$ 的长度。振幅是表示振动幅度大小或振动强弱的物理量。



图1-9 感受声带的振动

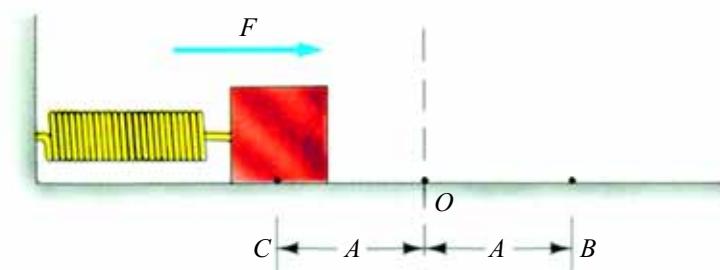


图1-10 物体以 $O$ 点为平衡位置在 $B$ 、 $C$ 间做简谐运动

声音大小就是由声带振动的振幅决定的，振幅越大，发出的声音就越大。当声音增大时，用手摸着喉部，就能感觉到声带振动加强。日常生活中，我们也常常利用增大振幅的方法来增大声音（如扩音器，图1-11）。



图 1-11 喇叭通过纸盆的振动发出声音，纸盆振动的振幅越大，音量越大

## (2) 周期和频率

振动的最大特点是周期性。所谓周期性，就是振动物体经过一定时间之后又重新回到原来的状态。例如，图 1-10 中，做简谐运动的物体由  $B$  点经过  $O$  点到达  $C$  点，再由  $C$  点经过  $O$  点返回  $B$  点，我们就说物体完成了一次**全振动**，重新回到原来的状态。完成一次全振动经历的时间叫做**周期** (cycle)。周期是表示振动快慢的物理量。

振动的快慢也可以用频率表示。振动物体在 1s 内完成全振动的次数叫做**频率** (frequency)。频率的单位是 Hz。

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

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

物体振动越快，周期越短，频率越高；物体振动越慢，周期越长，频率越低。

物体振动的振幅反映了振动的强弱，周期、频率反映了振动的快慢。那么，在自由状态下（振动系统不受外界作用），物体振动的周期或频率与其振幅有关吗？

大量研究发现，在自由状态下，振动物体的周期（或频率）与振幅的大小无关，只由振动物体本身的性质决定。物体在自由状态下的振动周期（或频率），叫做**固有周期**（或**固有频率**）。固有周期（或固有频率）是物体本身的属性，与物体是否振动无关。如一面锣、一根绷紧的弦、一座桥梁、一栋建筑都具有各自的固有周期和固有频率，一旦它们在自由状态下振动起来，就会以固有周期或固有频率振动。

物体的固有频率不同，发出的声音也不同。例如，一般情况下，女生声带振动的固有频率比男生大，因此女生音调比男生音调高。钢琴能够发出高低不同的声音，是因为钢琴每根弦的固有频率不同，弹奏时键槌击打不同的弦，就发出高低不同的声音（图 1-12）。



图 1-12 钢琴的键槌击打长短、粗细不一的弦，发出高低不同的声音

## 2. 简谐运动的图象描述

用振幅、周期和频率来描述简谐运动，只能从整体上把握振动的强度和快慢程度。做简谐运动的物体，运动情况每时每刻都在变化，用图象的方法可以形象地描述这种变化。



## 迷你实验室

### 描绘简谐运动的图象

如图1-13所示，把一小棍压在桌面上，将拴毛笔的绳子套在小棍上，毛笔杆上绑上一小重物。毛笔下放一标有 $x$ 轴、 $y$ 轴的白纸，当毛笔沿 $y$ 轴摆动时，操作者沿 $x$ 轴匀速拖动白纸，分析毛笔在白纸上画出的图象。

在矿泉水瓶的底部打一小洞，并装满浸有红颜料的水，用它替换毛笔做相似的摆动，分析矿泉水瓶摆动形成的图象。这两种图象哪种更接近简谐运动图象？为什么？

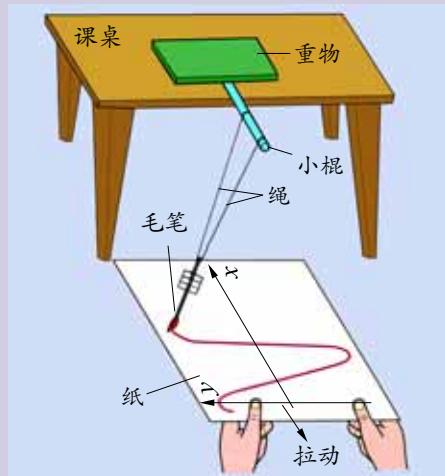


图1-13 哪种更接近简谐运动

实验和理论都表明，简谐运动的图象是一条正弦（或余弦）曲线，这一图线直观地表示了做简谐运动物体的位移随时间按正弦（或余弦）规律变化。在振动图象上还可以表示出振幅 $A$ 和周期 $T$ 。曲线在纵轴方向上的最大值等于振幅 $A$ ，相邻两个相同状态〔图1-14中两个正（或负）的最大值〕的时间间隔等于周期 $T$ 。

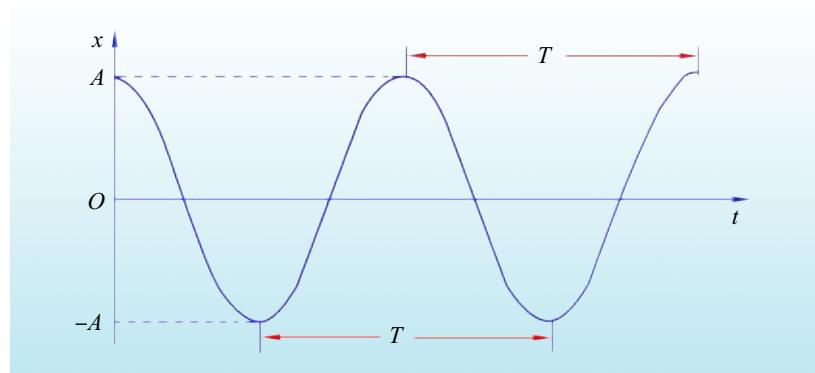


图1-14 简谐运动的图象

## 3. 简谐运动的公式表达

简谐运动的图象是一条正弦（或余弦）曲线，说明简谐运动的位移随时间按正弦（或余弦）规律变化。如何用公式来定量地表示这种变化呢？

如果以平衡位置为坐标原点,用 $x$ 代表振动物体的位移, $t$ 代表时间,将振动物体向坐标正方向运动至平衡位置的时刻取为计时零点(图1-15),则物体位移 $x$ 与时间 $t$ 之间的关系就可表述为

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

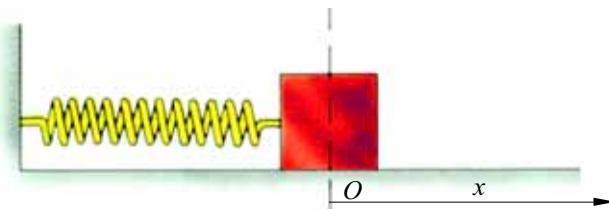


图1-15 弹簧振子做简谐运动

上式称为简谐运动公式。为了更好地理解简谐运动公式,我们来观察这样一个实验。

图1-16是演示匀速圆周运动与简谐运动关系的实验装置。固定在竖直圆盘上的小球 $P$ 随着圆盘以角速度 $\omega$ 做圆周运动,一束平行光自上而下照射小球,在圆盘下方的屏上可以观察到小球的投影。以圆盘圆心在屏上的投影为平衡位置,以小球到圆心的距离为振幅, $A$ 为小球到圆心的距离,小球在屏上投影的运动可以等效为振动。

若以圆盘圆心 $O$ 为坐标原点,建立图1-17所示坐标系,小球 $P$ 在顶点的时刻作为计时零点, $A$ 为小球到圆心的距离,则小球 $P$ 在 $x$ 轴上的投影随时间的变化关系为

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

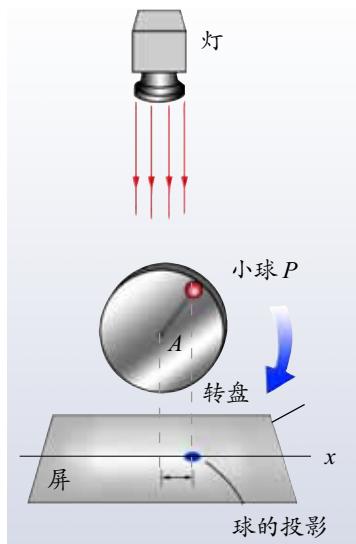


图1-16 实验装置

将此公式与简谐运动公式对比可知,小球在屏上投影的运动可视为简谐运动。因此,角速度 $\omega$ 也常被称为简谐运动的圆频率,它与简谐运动周期之间的关系为

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

该函数关系式进一步表明简谐运动的位移随时间按正弦或余弦规律变化。

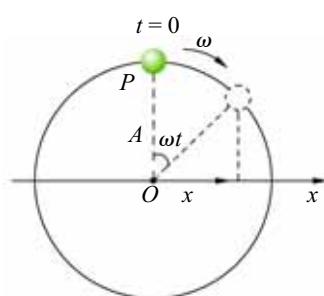


图1-17 小球顺时针旋转示意图



## 拓展一步

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

将一个振子拉伸，另一个振子推压相同距离，然后同时释放，两个弹簧振子运动的步调正好相反（图1-18）。因此，要详细地描述简谐运动，除了振幅和周期外，还需要引入“相位”的概念。 $t=0$ 时对应的相位，叫做初相位。当简谐运动的初相位不为零时，位移与时间的关系式可写成

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

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

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

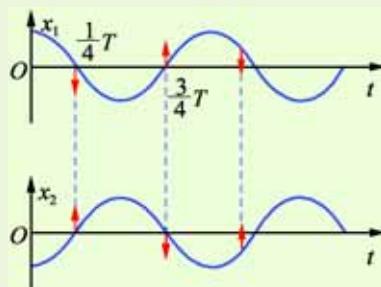
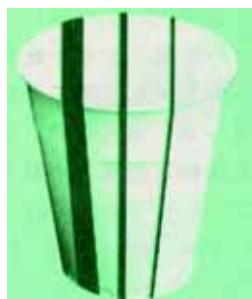


图1-18 两个振动步调相反的简谐运动图象对比



## 作业

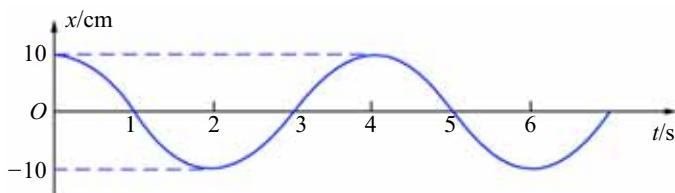
- 一弹簧振子的振幅是2 cm，振子完成一次全振动通过的路程是多少？如果频率是5 Hz，振子每秒钟通过的路程是多少？
- 将3根粗细不同的橡皮筋绕到杯子上，做成一个弦乐器。橡皮筋不要相互接触，分别拨动每根橡皮筋，找出哪一根发出的声音最低，哪一根发出的声音最高。
- 关于固有频率，以下说法正确的是
  - (A) 固有频率是由物体本身决定的
  - (B) 物体不振动时固有频率为零
  - (C) 振幅越大，固有频率越小
  - (D) 所有物体固有频率都相同



(第2题)



4.  $A$ 、 $B$ 两个物体同时振动。振动时，在 $A$ 完成18次全振动的时间内， $B$ 恰好完成15次全振动，求 $A$ 、 $B$ 两物体振动周期及振动频率之比。
5. 一个如图1-6所示的弹簧振子，振幅为3 cm，周期为2 s。取水平向右的方向为振子离开平衡位置的位移的正方向，振子向右运动到最大距离处开始计时，用适当的标度画出该弹簧振子的振动图象。
6. 下图是一个简谐运动的图象，根据图象确定它的振幅和周期，并判断出计时开始时振子处于什么位置。



(第6题)

7. 弹簧振子是研究简谐运动的一种理想模型吗？为什么？



## 第3节 单 摆

### 1. 单摆的运动

除了弹簧振子的运动可以看成简谐运动外，秋千、机械钟的钟摆、吊灯（图 1-19）等所做的小振幅摆动，也可以近似看成简谐运动。

为什么这些振动可以近似看成简谐运动呢？我们先来分析一个简化模型的振动。把一根细线上端固定，下端拴一个小球，线的质量和球的大小可以忽略不计，这种装置叫做**单摆**（simple pendulum）。单摆是一种理想模型（图 1-20），当摆球静止于  $O$  点时，摆线竖直下垂，摆球所受重力和摆线拉力彼此平衡， $O$  点是单摆的平衡位置。把摆球拉离平衡位置释放，摆球所受的重力和拉力不再平衡，在这两个力的共同作用下，摆球沿着以平衡位置  $O$  为中点的一段圆弧  $BC$  做往复运动。

在研究摆球沿圆弧的运动情况时，与摆球运动方向垂直的力只改变摆球运动的方向，不改变摆球运动速度的大小，可不予考虑，只考虑沿摆球运动方向的力。如图 1-21 所示，当摆球沿圆弧运动到某点  $P$  时，重力沿圆弧切线方向的分力  $F = G_1 = mgsin\theta$ ，使摆球在平衡位置  $O$  两侧振动。



图 1-19 吊灯可以在平衡位置附近做周期性摆动

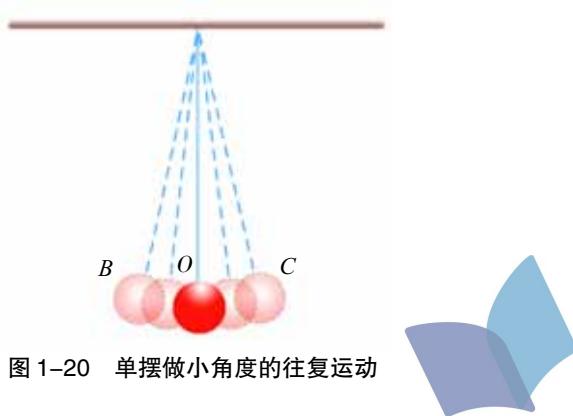


图 1-20 单摆做小角度的往复运动

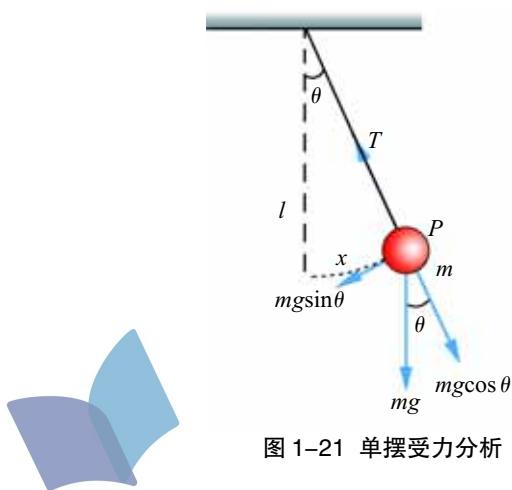


图 1-21 单摆受力分析

在摆角很小的情况下(通常 $\theta < 5^\circ$ ),  $\sin \theta \approx \theta \approx \frac{x}{l}$ ,  $F$ 可进一步表示为

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

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

对一个确定的单摆来说,  $m$ 、 $l$ 、 $g$ 是一定的,  $\frac{mg}{l}$ 是一个常数。上式表明: 在摆角很小的情况下, 单摆所受回复力的大小与摆球位移的大小成正比, 方向与摆球位移的方向相反。由此可知, 在摆角很小的条件下, 单摆的振动可近似看成简谐运动。



### 讨论与交流

在摆角很小的情况下, 单摆的运动可近似看成简谐运动, 而简谐运动可以用振动图象描述。你能用简单可行的实验方法画出单摆的振动图象吗? 试自己设计方案, 与同学讨论交流可行性, 再动手做一做。

## 2. 单摆的周期

单摆的振动周期是由哪些因素决定的呢? 要研究影响单摆振动周期的因素, 可能要涉及单摆装置本身及单摆在振动过程中的一些因素。我们可以这样猜想:

- (1) 单摆装置中, 摆球的质量(体积不计)、摆长等因素可能会影响单摆的振动周期。
- (2) 描述振动的物理量主要是振幅和周期, 二者之间可能有联系。
- (3) 单摆的回复力由重力的一个分力来提供, 因此重力加速度可能会影响单摆的周期。

下面我们采用控制变量法, 探究其中部分因素对单摆周期的影响。



### 实验与探究

#### 探究影响单摆振动周期的因素

考虑到各种可能的因素, 需要准备若干单摆[能够满足实验对摆球(铁球)质量大小和摆长的要求]和测量单摆振动周期的计时器。

(1) 取两个摆长和摆球质量都相等的单摆 $a$ 和 $b$ (图1-22), 将两个摆球拉离平衡位置, 其中一个摆球拉到摆角约 $4^\circ$ 处, 另一个摆球拉到摆角约 $2^\circ$ 处, 由静止释放, 分别测定两个单摆在相同时间内完成全振动的次数。

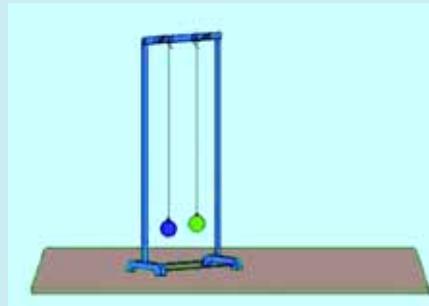


图1-22 单摆实验装置



表1-2

两个相同单摆的数据

单 摆	摆 角	摆动时间	全振动次数	结 论
<i>a</i>	约 4°			
<i>b</i>	约 2°			

(2) 取两个摆长相同、摆球质量不同的单摆*c*和*d*, 将两摆拉至相同的摆角, 进行上述实验, 分别测量两个单摆在相同时间内完成全振动的次数。

表1-3

两个质量不同单摆的数据

单 摆	质 量	摆动时间	全振动次数	结 论
<i>c</i>	大			
<i>d</i>	小			

(3) 取两个摆长不同、摆球质量相等的单摆*e*和*f*, 将两摆拉至相同的摆角, 再进行上述实验, 记录下两个单摆在相同时间内完成全振动的次数。

表1-4

两个摆长不同单摆的数据

单 摆	摆 长	摆动时间	全振动次数	结 论
<i>e</i>	长			
<i>f</i>	短			

请多次重复以上实验, 最后得出结论。

【结论】通过探究得出的结论是: \_\_\_\_\_。

进一步的研究表明, 单摆的振动周期  $T$  与摆长  $l$  的算术平方根成正比, 与重力加速度  $g$  的算术平方根成反比, 即

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

上式称为单摆周期公式, 是荷兰物理学家惠更斯首先提出的。

通过对单摆振动周期的研究我们发现,单摆的振动周期是由单摆振动系统本身性质(摆长和当地的重力加速度)决定的。在一定地点,重力加速度的值一定,一定摆长的单摆就有恒定不变的周期。人们利用摆的这个性质来计量时间,制成了摆钟(图1-23)。当然,如果能够测出单摆的摆长和周期,也可以利用单摆的周期公式计算出当地的重力加速度。



图1-23 摆钟

### 3. 利用单摆测定重力加速度

我们可以利用单摆测定重力加速度。由单摆的振动周期公式可得

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$$

精确地测出单摆的摆长和振动周期,根据上述公式,就可以计算出当地的重力加速度。我们可以设计一个实验进行实际测量。

#### 实验与探究

##### 测重力加速度

用一段长1 m左右的细线和一个有孔的小球制成单摆。把线的上端固定在铁架台上,让摆球自由下垂(图1-24)。

单摆的摆长是悬点到球心的距离。用米尺和游标卡尺测出单摆的摆长,测量精度要求达到毫米。想一想应该怎样测量。

把单摆从平衡位置拉开一个很小的角度(不超过5°)由静止释放。用秒表测出它完成30次全振动所用的时间,再计算出完成一次全振动的平均时间,这就是单摆的振动周期。

将数据代入单摆的周期公式,计算出当地的重力加速度。



图1-24 利用单摆测重力加速度



## 例题

某同学想测出当地的重力加速度，所用单摆摆长为 100.4 cm，测得完成 30 次全振动的时间为 60.3 s。当地的重力加速度是多少？

**解** 单摆的振动周期为

$$T = \frac{t}{n} = \frac{60.3}{30} \text{ s} = 2.01 \text{ s}$$

根据重力加速度的计算公式

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2} \approx \frac{4 \times 3.1416^2 \times 1.004}{2.01^2} \text{ m/s}^2 \approx 9.81 \text{ m/s}^2$$

## 作业

- 夏天和冬天摆锤摆动的快慢常不一致，影响计时的准确性。这是什么原因引起的？应如何校正？
- 周期等于 2.00 s 的摆叫秒摆，已知重力加速度等于 9.80 m/s<sup>2</sup>，求秒摆的摆长。
- 假如把单摆和弹簧振子都从地球移到月球，它们振动的频率是否改变？为什么？
- 振动着的单摆摆球，返回到平衡位置时
 

(A) 回复力指向悬点	(B) 合外力为零
(C) 合外力指向悬点	(D) 回复力为零
- 两个单摆，摆长之比是 1 : 4，求它们的周期之比。两个单摆，频率之比是 1 : 4，求它们的摆长之比。
- 测某地的重力加速度时，用了一个摆长为 2 m 的单摆，测得完成 100 次全振动所用的时间是 284 s。此地的重力加速度是多少？



(第1题)



## 第4节 生活中的振动

### 1. 阻尼振动

实际的振动过程总是存在阻力，系统的能量必然会损失。例如，弹簧振子或单摆在振动过程中，振子或摆球要克服摩擦力做功，系统的机械能不断减少，振幅也不断减小，机械能耗尽时，振动就停止了。我们通常把振幅不断减小的振动叫做**阻尼振动**( damped vibration )。图 1-25 是一种阻尼振动装置及其振动图象。

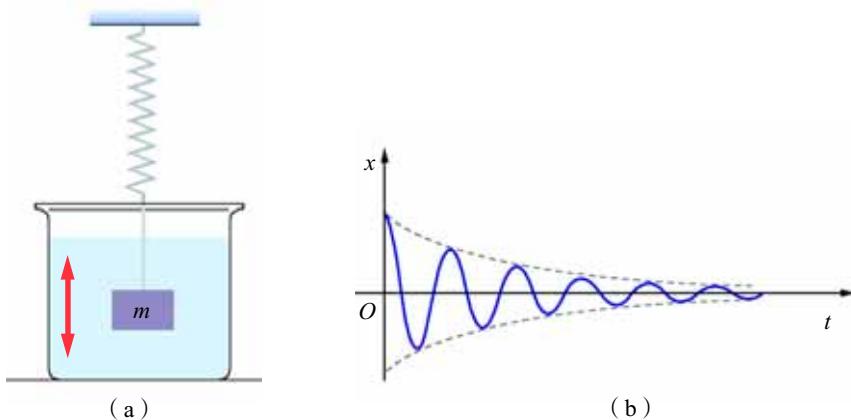


图 1-25 阻尼振动装置及振幅变化图象

在实际问题中，如果要求系统很快回到平衡位置，就需要增大阻力。例如，汽车在凸凹不平的路上行驶时，会发生剧烈振动，通过安装减震器，阻力作用可以使振动很快停止（图 1-26）。仪表的指针在指示测量结果时常左右摆动，不利于迅速读出测量结果，设计时常让指针的转动部分受到适当的阻力，使之能迅速停下来。

有时我们希望物体在某一段时间内的运动接近简谐运动，则应减小阻力。例如，我们隔一段时间就要对钟表进行清洗，并在轴承中加润滑油，以减小阻力。

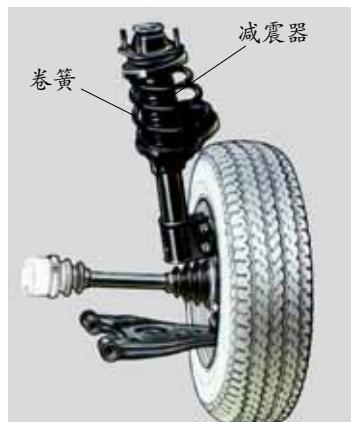


图 1-26 汽车上的减震器



## 2. 受迫振动与共振

在实际的振动过程中，摩擦阻力总是客观存在的，只能设法减小它而不能完全消除它。所以，实际的振动如果没有能量的不断补充最终都会停下来。为了获得稳定的振动，通常需要给振动物体施加一个周期性的外力。例如，电话耳机中膜片的振动等需要施加周期性外力。这种周期性的外力叫做驱动力（或强迫力）。在周期性外力作用下产生的振动叫做受迫振动（forced vibration）。

受迫振动的周期和振幅遵循什么样的规律呢？我们可以通过实验来探究。



### 实验与探究

#### 影响受迫振动周期的因素

实验装置如图1-27所示。匀速转动摇把，摇把对弹簧振子施加周期性的驱动力，使振子做受迫振动，驱动力的周期与摇把转动的周期相同。

先让弹簧振子做自由振动，测量它的固有周期，并记录在表1-5中。

然后转动摇把，记录下摇把转动的周期，待弹簧振子振动稳定后，记录下弹簧振子的振动周期。改变摇把的转速，重复上述步骤实验，再记录2组数据。

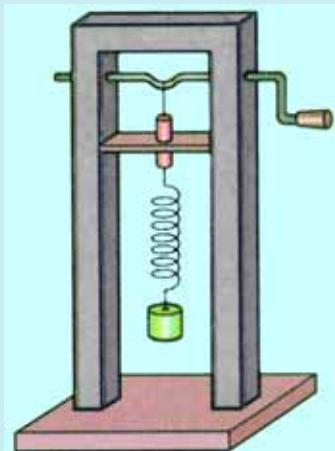


图1-27 弹簧振子做受迫振动

表1-5

受迫振动实验数据

弹簧振子的固有周期	$T_{\text{固}} =$		
摇把转动的周期	$T'_1 =$	$T'_2 =$	$T'_3 =$
弹簧振子受迫振动的周期	$T_1 =$	$T_2 =$	$T_3 =$

将弹簧振子的受迫振动周期分别与弹簧振子的固有周期以及摇把转动的周期比较，找出弹簧振子受迫振动周期的变化规律。

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

在上述实验中,改变摇把转速,使摇把的转动周期逐渐接近弹簧振子的固有周期,我们会发现,摇把转动周期越接近弹簧振子的固有周期,弹簧振子做受迫振动时的振幅越大。因此我们猜想物体做受迫振动时,固有周期会对振幅产生一定的影响。下面我们通过单摆实验进一步探究二者之间的关系。



### 迷你实验室

在支架上拴一条水平细绳,在细绳上悬挂一些单摆,其中A摆和C摆的摆长相等(固有周期相同)(图1-28)。

将A摆拉离平衡位置后释放,A摆在自由振动中通过细绳对其他摆施加了一个周期性驱动力,且驱动力的周期等于A摆的固有周期,其他摆在此驱动力的作用下做受迫振动。

待各摆振动稳定以后,我们发现与A摆周期相差越小的单摆振幅越大,与A摆周期相同的C摆的振幅最大。

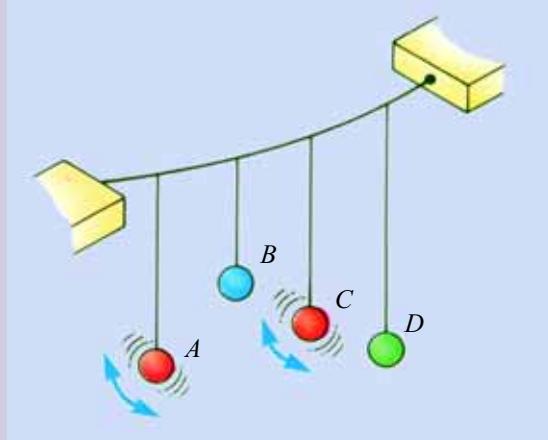


图1-28 物体做受迫振动时,固有周期对振幅的影响

上述实验表明,物体做受迫振动时,驱动力的周期(或频率)与物体的固有周期(或固有频率)相差越小,受迫振动的振幅越大(图1-29)。当驱动力的周期(或频率)与物体的固有周期(或固有频率)相等时,受迫振动的振幅达到最大,这种现象叫做**共振**(resonance)。

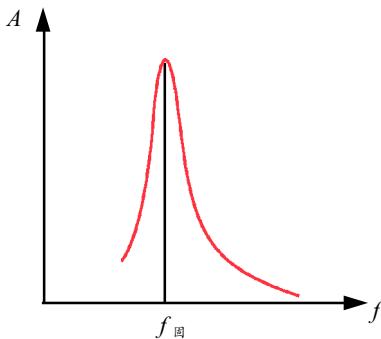


图1-29 受迫振动的振幅与驱动力频率的关系



## 讨论与交流

秋千可近似看成一个摆，有它的固有频率。荡过秋千的人都有这种经验：轻推一下使它微微摆动以后，只要按着它的固有频率周期性地施加推力，尽管每次的推力都很小，经过一段时间，秋千也会荡得很高。这是什么原因呢？请与同学讨论交流。



图 1-30 秋千的摆动

## 3. 共振的应用与防止

### (1) 共振的应用

在生活和生产中，共振现象是常见的。例如，在修建桥梁时，需要将管柱打入江底。工人常使打桩机打击管柱的频率接近管柱的固有频率，让管柱接近共振状态而激烈振动，加快周围泥沙的松动，提高打桩的速度。

音叉共鸣箱(图1-31)也是应用共振的一个典型例子。把某一频率的音叉插在一端开口的共鸣箱上，当敲击音叉使它振动时，箱内的空气柱就能产生共振，发出较响的声音，这种现象叫做共鸣，共鸣是一种声共振现象。一些乐器如吉他、二胡、小提琴等为增大音量，都带有一个共鸣箱。

鱼洗能够喷水，与摩擦引起鱼洗共振有关。手摩擦铜盆双耳，引起铜盆壁及盆内水的振动，使鱼洗出现喷水现象。随着科学技术的发展，共振的应用也越来越多，如检查身体用的核磁共振仪就是利用了共振的原理。

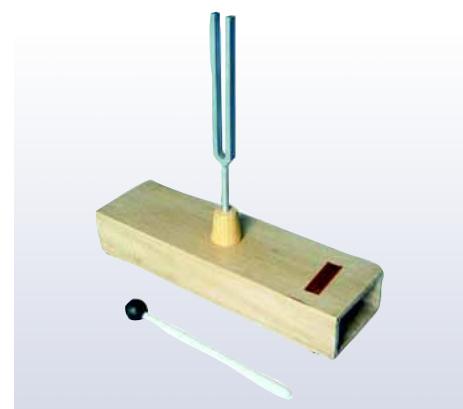


图 1-31 音叉共鸣箱

**信息窗**

把一些固有频率不同的钢片装在同一个支架上，可制成测量发动机振动频率的装置（图1-32）。将该装置与开动着的机器紧密接触，机器的振动引起固有频率与机器振动频率一致的那个钢片发生共振，产生较大的振幅。读出这个钢片的固有频率，就可以知道机器的振动频率。



图1-32 用共振现象测量机器的振动频率

## （2）共振的预防

有些情况下共振会造成严重后果。集体列队经过桥梁时要便步走，以防对桥梁形成周期性驱动力使桥梁发生共振。轮船航行时，常会受到周期性的海浪冲击而左右摇摆。如果海浪冲击力的频率跟轮船的固有频率相同，就会发生共振，造成轮船倾覆。人们常通过改变轮船的航向和速率，使海浪冲击力的频率与轮船的固有频率相差很大，防止发生共振现象。许多机电设备，如车床、磨床、电锯等，工作时都会伴随不同程度的振动，要防止产生共振现象。

科学研究表明，人体各个部位的固有频率不同，如大脑的固有频率为8~12 Hz，胃的固有频率为4~8 Hz。人们在生活和生产中会接触到各种振动源，外界振动源很容易引起人体器官的共振，对人体造成一定伤害。因此，接近振动源时，应该设法防止共振对身体造成不良影响。

**信息窗**

### 塔科马悬索桥的垮塌

桥梁，特别是悬索桥，很容易受到风的危害。1940年，美国建成了塔科马悬索桥。然而，4个月后，该桥在实际风速不到设计风速限值 $\frac{1}{3}$ 的暴风袭击下遭到破坏。

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



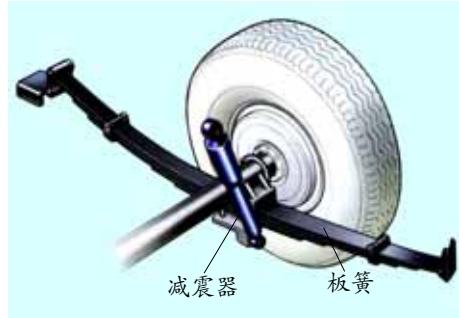
图1-33 塔科马悬索桥风毁时的景象



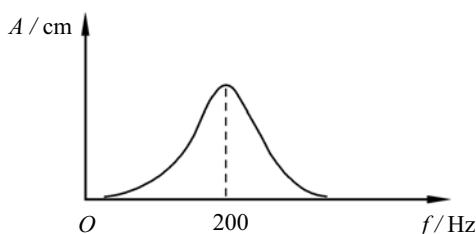


## 作业

1. 请列举几个自由振动和受迫振动的实例。
2. 汽车的车身是装在弹簧上的，如果它的固有周期是 1.5 s，汽车在一条起伏不平的路上行驶，路上各凸起处相隔的距离都大约是 8 m，汽车以多大的速度行驶时车身的起伏振动最激烈？
3. 如图所示为某物体做受迫振动时的共振曲线，从图可知该物体振动的固有频率为 \_\_\_\_\_ Hz，在驱动力的频率由 150 Hz 增大到 250 Hz 的过程中，物体振动的振幅变化情况是 \_\_\_\_\_。



(第2题)



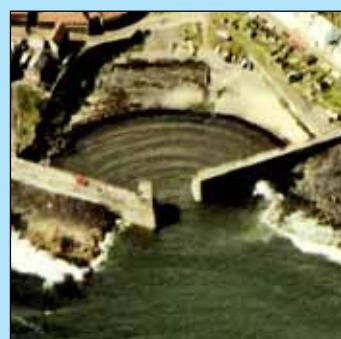
(第3题)



第 2 章

## 机械波

- 导入 身边的波
- 第1节 波的形成和描述
- 第2节 波的反射和折射
- 第3节 波的干涉和衍射
- 第4节 多普勒效应及其应用



# 导入

## 身边的波

各式各样的波就在我们身边。池塘里碧波荡漾、大海中波浪滔天，这是看得见的水波；音乐厅琴声缭绕使人心潮激荡，这是听得到、看不见的声波；地震时房屋倒塌、桥梁断裂，这是破坏力极大的地震波。除此之外，在我们的身边还有五彩斑斓的光波、传递信息的无线电波等。像水



图 2-1 池塘里——碧波荡漾



图 2-2 音乐会——声波缭绕

波、声波、地震波那样传播时需要介质的波称为机械波；光波、无线电波在真空中就能传播，传播时不需要介质，这些波称为电磁波。

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

下面，让我们共同去揭示机械波的奥秘吧！

### 本章 要求

- 通过观察，认识波是振动传播的形式和能量传播的形式。能区别横波和纵波。能用图象描述横波。理解波速、波长和频率（周期）的关系。
- 了解惠更斯原理，能用其分析波的反射和折射。
- 通过实验认识波的干涉现象和衍射现象。
- 通过实验感受多普勒效应。解释多普勒效应产生的原因。列举多普勒效应的应用实例。

# 第1节 波的形成和描述

## 1. 波的形成与传播

机械波是生活中常见的现象，那么波是怎样产生的呢？首先，让我们用实验展现一些常见的波。

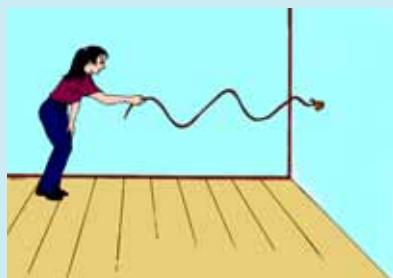


### 实验与探究

#### 波的产生

(1) 如图 2-3 (a) 所示，把一根软绳的一端系在墙壁上，用手抓住绳子的自由端上下振动，可以看见沿绳传播的波。

(2) 在水池内装适量的水。用干净针管（或滴管）将水持续滴到水池的水面上，保持大约每秒 2 滴的速度，这时将在水面上形成一圈圈的水波 [ 图 2-3 (b) ]。如果停止滴水，将发现已经传播开的波继续向四周传播。



(a) 绳上的波



(b) 水波

图 2-3 波的产生

实验表明，当绳子的一端在手的作用下发生振动时，绳子上的各点也受到影响，跟着振动起来，于是在绳子上形成了波。同样，水面上某点的连续振动沿水面传播，就形成了水波。声带振动可以在空气中传播形成声波，地球内部的运动可以在地壳中传播形成地震波。



这里，绳子、水、空气、地壳等都是传播波的物质，叫做介质。机械振动在介质中的传播称为机械波（mechanical wave），简称波。

机械振动在介质中是怎样传播的呢？我们以绳上的波为例说明这个问题。设想把绳分成许多小部分，每一小部分可以看成质点，相邻两质点间有相互作用力。如图2-4所示，质点1在外力作用下振动后，就会带动质点2振动，只是质点2的振动要比质点1落后。这样，前一个质点的振动总是要带动后一个质点振动，依次带动下去，振动也就由发生区域向远处传播，从而形成了波。

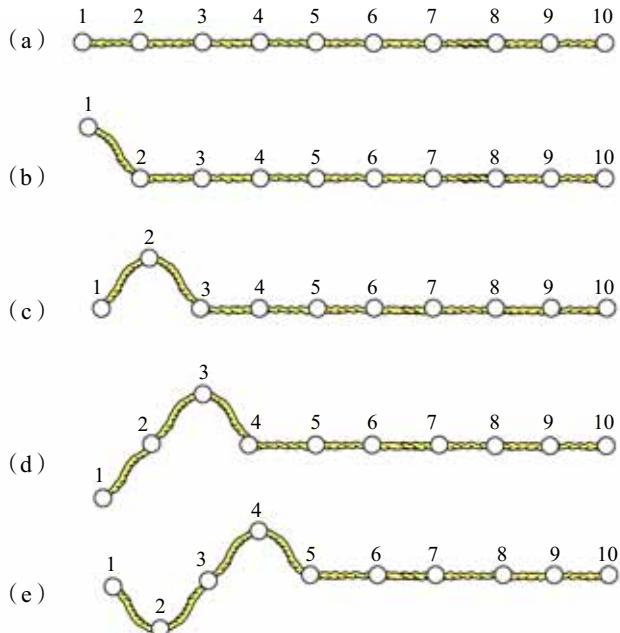


图2-4 沿传播方向各质点的运动状态

在前面的实验探究中，若在绳上系一个红带，红带只上下振动，并不随波前进。若在水槽中的水面上放一些小纸片，你会发现这些纸片上下振动，不会随波而远离波源。由此可见，机械波向外传递的是运动形式——机械振动，介质中每个质点仅在平衡位置附近做与波源相同形式的振动，并不随波迁移。因此，机械波只是机械振动这种运动形式的传播，介质本身不会沿着波的传播方向移动。

介质中本来静止的质点，随着波的传播而发生振动，表明这些振动质点获得了能量，这个能量是从波源通过前面的质点依次传来的。所以，波在传递振动的同时，也将波源的能量传递出去（图2-5）。持续地给波源提供能量，就能够持续地从波源以波的形式把能量传递出去。因此，波也是传递能量的一种方式。



图2-5 水波可以传递巨大的能量



## 2. 波的分类

随着机械波的传播，介质中的质点振动起来。根据质点的振动方向和波的传播方向之间的关系，可以把机械波分为横波和纵波两类。

**横波** 当波在绳上沿水平方向传播时，绳上各质点做上下振动，二者的方向相互垂直。物理学中把质点的振动方向与波的传播方向垂直的波，叫做**横波** ( transverse wave )。在横波中，凸起的最高处称为波峰，凹下的最低处称为波谷 ( 图 2-6 )。

**纵波** 如果我们沿着长弹簧的轴线方向来回推拉，就会在弹簧中看到波动现象，这个波动情景与绳子上的波的波动不同 ( 图 2-7 )。弹簧形成密集的部分和稀疏的部分，质点分布最密的地方称为密部，质点分布最疏的地方称为疏部，密部和疏部相间地从一端传到另一端形成波，弹簧内部的质点在波的传播方向上来回振动。在物理学中，把质点的振动方向与波的传播方向在同一直线上的波称为**纵波** ( longitudinal wave )。

声波就是纵波。在空气中，发声物体的振动会使它周围的空气发生疏密变化，这种疏密相间的状态向外传播便形成声波 ( 图 2-8 )。

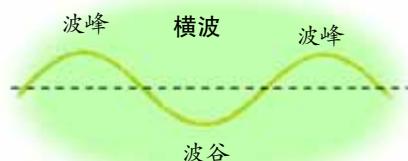


图 2-6 绳上质点的振动方向和波的传播方向相互垂直



图 2-7 弹簧上形成疏密相间的纵波

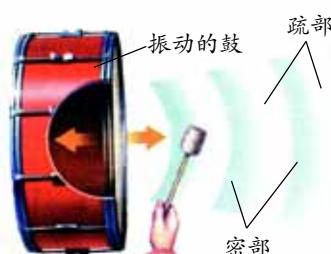


图 2-8 鼓皮的前后振动使空气形成了密部和疏部



### 迷你实验室

#### 会跳舞的火焰

如图 2-9 所示，将一支燃烧的蜡烛放在音响喇叭的纸盆前，让音响播放音乐，开大音量，蜡烛的火焰会随着音乐来回摆动，就像在跳舞一样。请思考，蜡烛火焰的摆动与纵波有什么联系。



图 2-9 会跳舞的火焰



### 3. 波的描述

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

#### (1) 波的图象描述

如果在绳子波动的某个时刻拍下照片（图2-10），就能够得到该时刻的波形。这个波形是由同一时刻具有不同位移的绳上各质点组成的。如果在波形上添加一个坐标系，就可以得到该时刻这个波的图象。用横坐标 $x$ 表示沿波传播方向上各个质点的平衡位置，用纵坐标 $y$ 表示各个质点离开平衡位置的位移，规定位移方向向上为正值。在坐标平面上，以某一时刻各个质点的 $x$ 、 $y$ 值描出各对应点，再把这些点用光滑的曲线连接起来，就得到该时刻波的图象，也称波形曲线或波形。在波的图象上，通常用箭头标出波的传播方向（图2-11）。

如果介质中各个质点做简谐运动，它所形成的波就是一种最基本、最简单的波，叫做简谐波（simple harmonic wave），它的波形曲线是正弦（或余弦）曲线。其他波可以看成由若干个简谐波合成的。通过某一时刻的波形图，可以直接得到各个质点在该时刻的位移。



图2-10 艺术体操运动员摇晃系有绸带的短棍，使绸带变幻出多种多样的波，令人赏心悦目

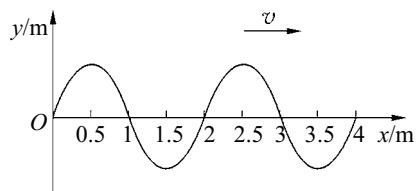


图2-11 简谐波的图象



#### 讨论与交流

简谐运动的图象是一条正弦（或余弦）曲线；横波中的各质点做简谐运动时，其波形图也是一条正弦（或余弦）曲线。图2-12所示的两条曲线，其中一条是振动曲线，另一条是波形曲线，你能将它们区分出来吗？请说出理由，并与同学讨论交流。

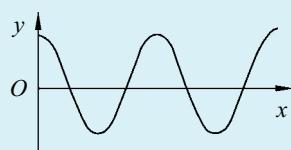
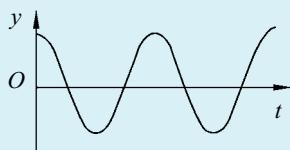


图2-12 振动曲线与波形曲线

## (2) 波的特征

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

**波长** 我们在观察一列横波沿绳传播时，发现质点都在自己的平衡位置附近做周期性的振动（图2-13），质点完成一次全振动经历的时间叫做波的**周期**，用 $T$ 表示。波在介质中传播时，各质点的振动周期相同，都等于波源的振动周期。介质中的质点每秒完成全振动的次数叫做波的**频率**，用 $f$ 表示。波的周期和频率互为倒数。

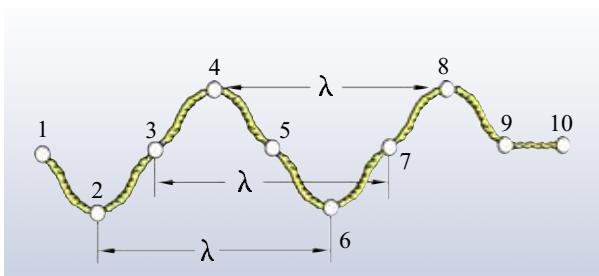


图 2-13 波在绳上传播

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

进一步观察还可知，图2-13中的质点1和质点5之间正好出现一个完整的波形。随着振动的继续传播，这两质点的振动步调完全一致；在振动过程中的任意时刻，它们相对平衡位置的位移总是相同的。我们通常把沿着波的传播方向，两个相邻的、相对平衡位置的位移和振动方向总是相同的质点间的距离，叫做**波长**（wave length），用 $\lambda$ 表示（图2-14）。在横波中，两个相邻波峰（或波谷）之间的距离等于波长；在纵波中，两个相邻密部（或疏部）中央的距离等于波长。

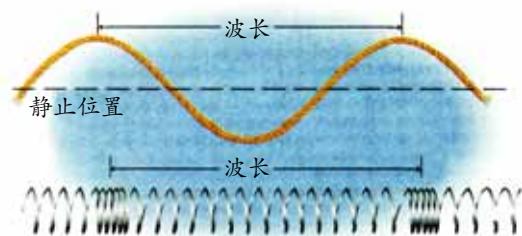


图 2-14 横波与纵波的波长



### 讨论与交流

一位同学认为，图2-15中的M点和N点是位移相同的两个质点，根据波长的定义，它们之间的距离就等于该波的波长。另一位同学认为，位移总是相同的M点和P点之间的距离才等于波长。这两位同学的观点对吗？试说出理由，并与同学讨论交流。

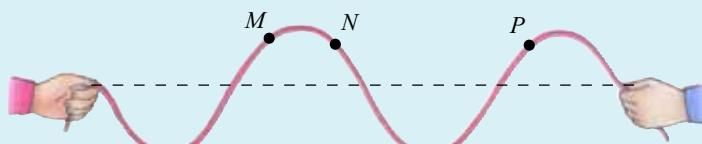


图 2-15 怎样确定一个波长



**波速** 在波的传播方向上，距离等于一个波长的两个质点，振动步调完全一致；但在振动的时间上，后面的质点却落后于前面的质点一个周期。因此，经过一个周期，振动在介质中传播的距离等于一个波长。由此可以得到**波速** (wave speed)

$$v = \frac{\lambda}{T} \quad \text{或} \quad v = \lambda f$$

机械波在介质中的传播速率是由介质本身的性质决定的。在不同的介质中，波速是不同的。表2-1列出了0℃时声波在几种介质中的传播速率。

表2-1 0℃时声波在几种介质中的传播速率

介质	空气	洁净水	盐水	橡胶	软木	铜	铁
波速 $v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	332	1 490	1 531	30~50	430~530	3 800	4 900

波速与波长、频率的关系式虽然是从机械波得到的，但是它对于我们以后要学习的电磁波、光波也是适用的。

### 例题

图2-16(a)所示为一列简谐横波在 $t=2\text{ s}$ 时的波形图，图2-16(b)是这列波中P点的振动图线，求该波的传播速度和传播方向。

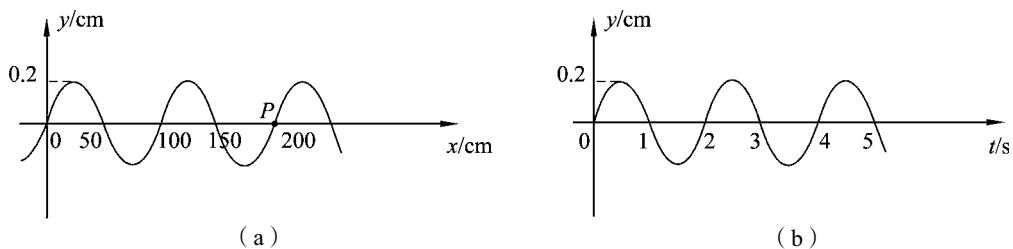


图2-16

**解** 由图2-16(a)可知这列波的波长 $\lambda=100\text{ cm}$ ；由图2-16(b)可知这列波的周期 $T=2\text{ s}$

根据公式  $v = \frac{\lambda}{T}$

可得到波速  $v = 50\text{ cm/s}$

由图2-16(b)可知，P点在 $t=2\text{ s}$ 时向上运动，故这列波向左传播

## 例题

甲、乙两人分乘两只船在湖中钓鱼，两船相距24 m。一列水波在湖面上传播开来，使船每分钟上下振动20次。当甲船位于波峰时，乙船位于波谷，这时两船之间还有另一个波峰，求这列水波的波长和波速。

**解** 画出水波的波形，根据题意确定甲、乙两船的位置，由此判断甲、乙之间的距离是1.5个波长。

水波的波长

$$\lambda = \frac{s}{1.5} = \frac{24}{1.5} \text{ m} = 16 \text{ m}$$

这列波的频率

$$f = \frac{20}{60} \text{ Hz} = \frac{1}{3} \text{ Hz}$$

由  $v = \lambda f$  得波速

$$v = 16 \times \frac{1}{3} \text{ m/s} \approx 5.3 \text{ m/s}$$

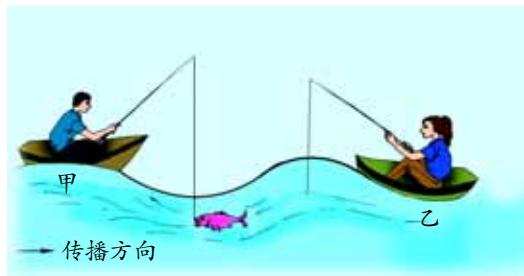
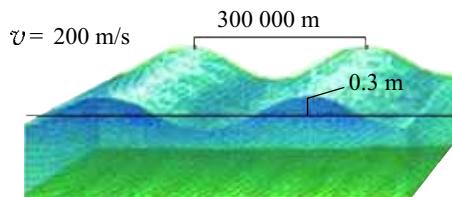


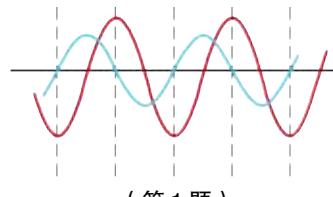
图 2-17


**作业**

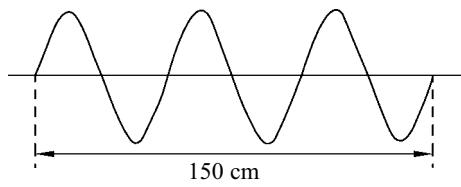
- 如图所示，两列波的振幅和周期相同吗？
- 下图中的波是由地震引发的，此波的振幅和频率是多少？这个波传播5 000 km 需要多少时间？
- 抖动绳子的一端，每秒钟做两次全振动，产生如图所示的横波。求绳上横波的频率、波长和波速，并画出再过 1.25 s 的波形图。



(第2题)

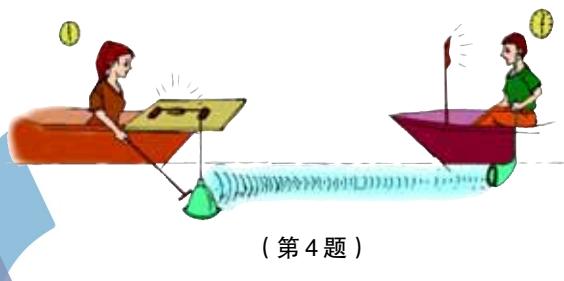


(第1题)



(第3题)

- 第一次测定声音在水中的传播速率是1827年在日内瓦湖上进行的：两只船相距14 km，在一只船上，实验员向水里放一口钟，当他敲钟时，船上的火药同时发光；另一只船上的实验员向水里放一个听音器，他看到火药发光后10 s，听到了水下的钟声。请根

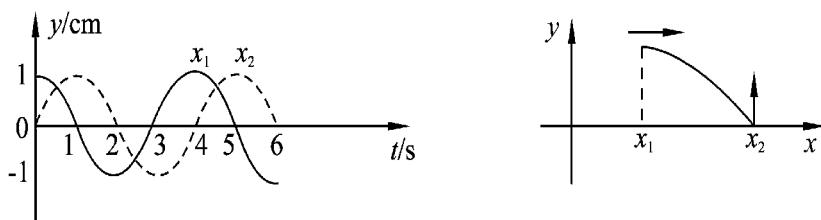


(第4题)



据这些数据计算水中的声速。

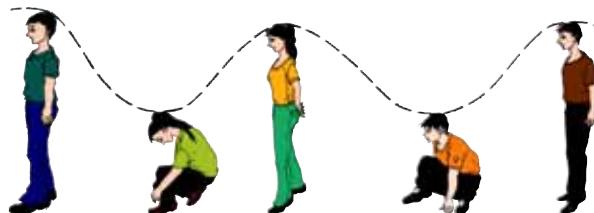
5. 一列沿  $x$  轴正向传播的简谐波，在  $x_1=10\text{ cm}$  和  $x_2=110\text{ cm}$  处的两质点的振动图线如图所示。则质点振动的周期为 \_\_\_\_\_ s，这列简谐波的波长为 \_\_\_\_\_ cm。



(第5题)

6. 请设计一种测量常温下声音在空气中传播速率的方法，并实际试一试。

7. 全组同学站在课桌边的走道上排成一条直线，从第一位同学开始，周期性地下蹲和起立，第二位、第三位……依次被动地被前一位同学带动后也做这个动作，这时，将会看到凹凸相间的波从第一位同学向最后一位同学传播。请你从这一模拟实验体会绳子上的波是怎么形成和传播的，写一篇小论文。



(第7题)



## 第2节 波的反射和折射

### 1. 惠更斯原理

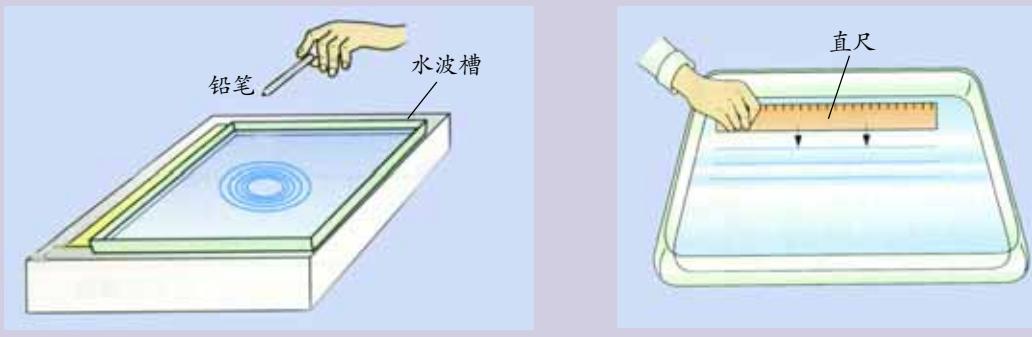
作为一种运动的形式，波既具有一般运动所具有的普遍规律，又具有区别于其他运动形式的特殊规律。现在，我们就一起来学习与波的传播特性有关的现象和规律。

 迷你实验室

#### 球面波与平面波

(1) 取一水波槽，在槽里装入约2 cm深的水。用铅笔笔头持续触动能槽中心的水面，保持大约每秒触动两次的速率，可产生水波 [图2-18 (a)]。

(2) 将直尺横放，在槽中水面上来回推动，也会不断地产生水波 [图2-18 (b)]。  
从上述两个实验中可得到如图所示的水波波面图形。



(a) (b)

图2-18 水槽中产生球面波和平面波的实验

如何描述这两种波呢？通常我们把从波源发出的波，经过同一传播时间到达的各点所组成的面，叫做波阵面或波面。实验中产生的水波，每一道水波纹就是一个波面。波面是球面





的波称为球面波 [ 图 2-19 ( a ) ] , 波面是平面的波称为平面波 [ 图 2-19 ( b ) ] 。用来表示波的传播方向的线称为波线, 波线与各个波面总是垂直的。

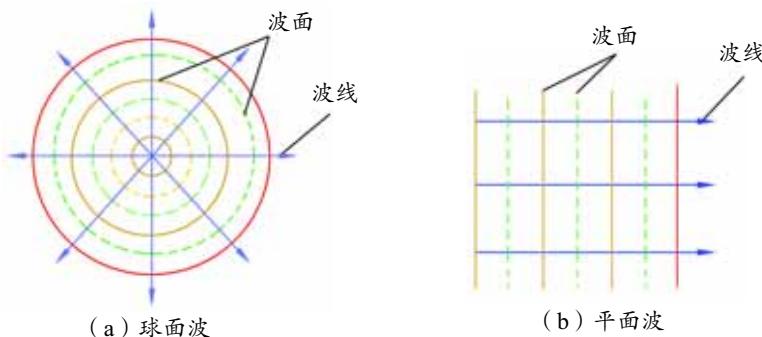


图 2-19 球面波和平面波

了解了上述几个基本概念之后, 我们来研究波在传播过程中遵循的规律。



## 实验与探究

### 子波源的形成

在图 2-20 所示的实验中, 若在水槽里放入带有小孔的挡板, 用铅笔笔头持续触动水面, 激起水波, 观察:

- (1) 水波能否穿过小孔继续传播。
- (2) 小孔前后的水波形状有什么不同。

变换铅笔触点, 重复上述实验, 情况又怎样呢?

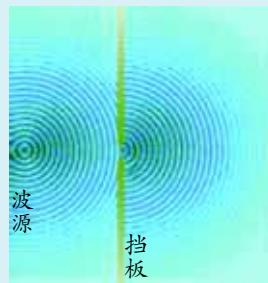


图 2-20 子波的产生

实验发现, 水波不断穿过小孔继续传播, 在挡板右侧水面看到的波面是以小孔为圆心的半圆形, 这个半圆形波面的形状与挡板左侧原波形无关, 与原波源的位置也无关。因此, 我们可以认为挡板右侧的半圆波面就是从新波源(小孔)发出的波。

在总结了许多实验现象的基础上, 荷兰物理学家惠更斯提出: **介质中波阵面上的每一个点, 都可以看成一个新的波源, 这些新波源发出子波。经过一定时间后, 这些子波的包络面就构成下一时刻的波面。**这就是**惠更斯原理** (Huygens principle)。所谓包络面, 就是某时刻与所有子波波面相切的曲面。

根据惠更斯原理, 我们可以解释实验中球面波的波面是怎样形成的。如图 2-21 所示, 点波源  $O$  发出的波在  $t$  时刻的波面是一个球面  $S$ , 该球面上的每一个点都可以看成一个新的点波源, 它们各自向前发出球面子波, 下一个时刻 ( $t+\tau$ ) 新的波面  $S'$ , 就是与这些子波波面相切的包络面。

了解了球面波的波面形成后, 请你用惠更斯原理解释平面波波面的形成。

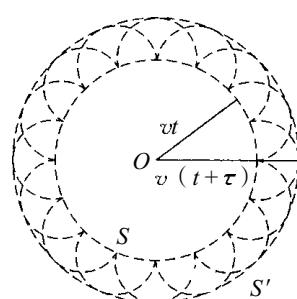


图 2-21 球面波的波面形成

## 2. 波的反射

波在空气、水、玻璃等均匀介质中传播时，波面的形状不变，波线也保持为直线，不会改变波的传播方向。可是，当波在传播过程中遇到障碍物时，又是怎样的情形呢？让我们通过一个实验来观察。

 实验与探究

### 水波的反射

在水波演示槽中放一块长木板，让振动片激发平面波，使平面波波面与长木板约成 $45^{\circ}$ 角（图2-22）。可以看到，从波源发出的平面波遇到长木板后，波的传播方向发生了变化。

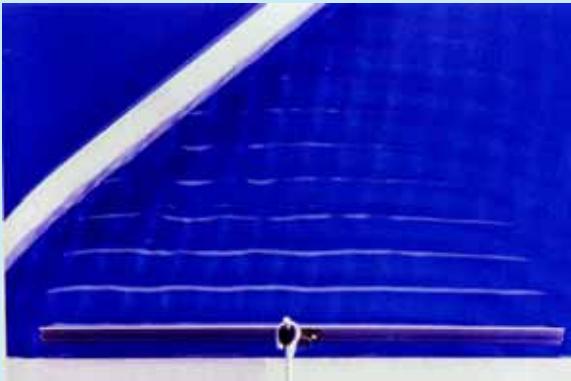


图2-22 水波反射实验

实验发现，从波源发出的平面波向前传播，遇到长木板后产生反射，平面波向右传播。在物理学中，把波遇到障碍物时会返回来继续传播的现象叫做**波的反射**（reflection of wave）。

波在遇到障碍物发生反射时，入射波线与反射面法线的夹角叫做**入射角**，反射波线与反射面法线的夹角叫做**反射角**。实验表明，反射波的波长、频率和波速都与入射波的相同。入射波与反射波的方向遵循**反射定律：反射波线、入射波线和法线在同一平面内，反射波线和入射波线分别位于法线两侧，反射角等于入射角**（图2-23）。

波在反射时为什么会有这样的规律呢？我们可以用惠更斯原理来解释。

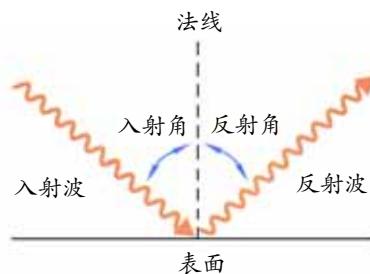


图2-23 反射角等于入射角



如图2-24所示，设有一波速为 $v$ 的波向介质分界面MN传播。在 $t_0$ 时刻入射波的波面到达AB，且A点与界面相遇；此后，波面上的 $A_1$ 点（ $AA_1=A_1B$ ）将到达界面上的C点；设在 $t_1$ 时刻，B点的波到达界面上的D处。将入射波到达界面上的各点（即A、C、D）作为子波源，以A点为中心，以 $v(t_1 - t_0)$ 为半径作球面，可得 $t_1$ 时刻A的子波面；同理，以C为中心，以 $\frac{1}{2}v(t_1 - t_0)$ 为半径作球面，可得 $t_1$ 时刻C的子波面。这些子波面的包络面DE即为反射波的波面。由图中不难得出反射角 $i'$ 等于入射角 $i$ ，而且入射波线、反射波线、分界面的法线都在同一平面内，这就解释了波的反射定律。

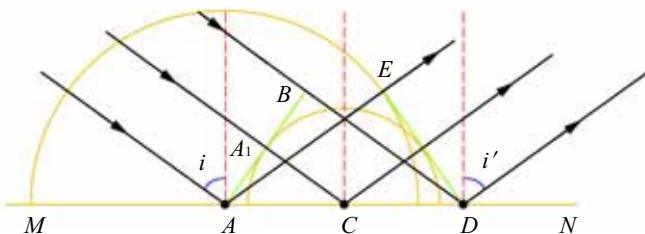


图2-24 用惠更斯原理解释波的反射现象

## 信息窗

### 声 喇

声呐（sonar，图2-25）是一种声音导航和测距系统，它利用了声波反射的原理。声呐仪发出一束在水中传播的声波，当声波碰到障碍物时，就被反射回来。反射的声波被声呐仪检测到，通过测量声波从发射到返回经历的时间，就可以计算出声波传播的距离，从而间接测得物体的位置。

声呐已经被广泛地用于鱼群探测、海洋石油勘探、船舶导航、水文测量和海底地质地貌的勘测等。声呐在军事上还有着重要的用途，如利用声呐对水下目标进行探测、分类、定位和跟踪；利用声呐，可进行水下通信和导航，可定位失事沉没的船舶（图2-26），可保障舰艇和水中武器的使用。



图2-25 声呐装置

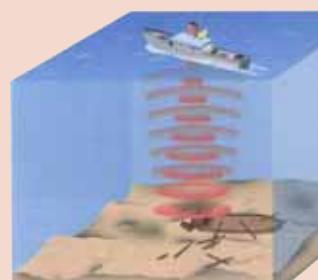


图2-26 声呐定位沉没的船舶

### 3. 波的折射

波从一种介质进入另一种介质时，将会发生什么现象呢？我们通过一个实验来探究。



#### 实验与探究

##### 水波传播方向的变化

在水波演示槽的中部放置一块厚玻璃板，将水波槽分成深水区（无玻璃板的区域）和浅水区两个区域。

让槽中产生的平面波由深水区入射到浅水区，能够看到图 2-27 所示的情景：明暗相间的直线是平面波的波面，波面的垂线（波线）表示波的传播方向。注意观察水波从深水区入射到浅水区时，在两个区域的分界面上，水波的传播方向是否发生变化。

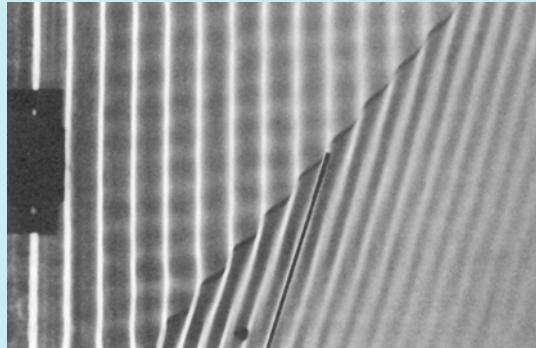


图 2-27 水波的传播方向发生改变

实验发现，水波从深水区入射到浅水区时，在分界面上波纹前进方向发生了改变，波纹的间距也发生了变化。这一现象说明，水波从深水区进入浅水区，波的传播方向和传播速度都会发生变化。波从一种介质进入到另一种介质的现象与水波传播方向的改变相似。在物理学中，我们把波在传播过程中，由一种介质进入另一种介质时，传播方向发生偏折的现象，叫做**波的折射**（refraction of wave，图 2-28）。

在波的折射中，入射波的波线与法线的夹角叫做**入射角 i**，折射波的波线与法线的夹角叫做**折射角 r**，进一步的研究表明，入射角与折射角和波速之间有下述关系

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

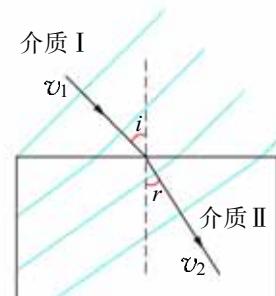


图 2-28

式中， $v_1$  和  $v_2$  分别是波在介质 I 和介质 II 中的波速。这个公式就是波的折射定律。

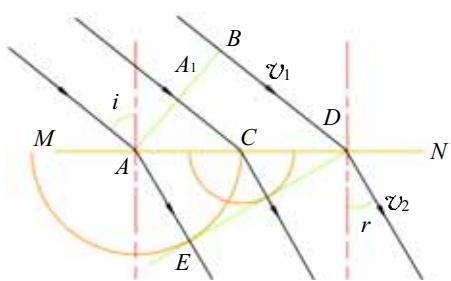


图 2-29

如何用惠更斯原理来解释波的折射现象呢？设波从一种介质进入另一种介质时，波速由  $v_1$  变为  $v_2$ ，且  $v_1 > v_2$ 。如图 2-29 所示，在  $t_0$  时刻，入射波波面  $AB$  上的  $A$  点到达界面；在  $t_1$  时刻，波面上的  $A_1$  点到达界面的  $C$  点；在  $t_2$  时刻，波面上的  $B$  点到达界面  $D$  处。以  $A$  点为中心，以  $v_2 (t_2 - t_0)$  为半径作球面可得  $t_2$  时刻  $A$  的子波面；同理，以  $C$  为中心，以  $v_2 (t_2 - t_1)$  为半径作球面，可得  $t_2$  时刻  $C$  的子波面。这些子波面的包络面  $DE$  即为折射波的波面。由图中可得

$$\begin{aligned} BD &= v_1 (t_2 - t_0) = AD \sin i \\ AE &= v_2 (t_2 - t_0) = AD \sin r \end{aligned}$$

两式相除得

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

这就是波的折射定律。波的折射定律虽然是从机械波的实验总结出来的，却适用于一切波。因此，光在折射时也遵循折射定律。

## 作业

- 关于波的以下认识，正确的是
  - 潜艇利用声呐探测周围物体的分布情况，用的是波的反射原理
  - 隐形飞机怪异的外形及表面涂特殊隐形物质，是为了减少波的反射，达到隐形目的
  - 雷达的工作原理是利用波的反射
  - 水波从深水区传到浅水区时改变传播方向的现象，是波的折射现象
- 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，这个山谷的宽度大约是多少？（取  $v_{声} = 340 \text{ m/s}$ ）
- 一列波以  $60^\circ$  的入射角入射到两种介质的界面上，反射波刚好与折射波垂直，反射角和折射角分别是多大？



# 第3节 波的干涉和衍射

## 1. 波的干涉现象

我们时常会看见这样的现象：几列在水面上传播的波相遇时，波形会发生变化，有时几乎很难再辨别出它们原来的形态。然而，这些波一旦脱离接触，又会恢复原来的形态（图2-30）。为什么会产生这样的现象呢？为了便于分析，我们先做一个实验。



图 2-30 几列水波同时在水面上传播

 **迷你实验室**

如图2-31所示，两位同学分别握着长绳的一端，左右抖动一下，使长绳产生两列凸起且相向传播的波。仔细观察两列波相遇时和相遇后各自的运动。



图 2-31 相向传播的波

从实验可以看出，两列波相遇时变成了一列波，相遇后这两列波又保持原来各自的运动状态继续传播（图2-32）。大量研究表明，波在相遇时仍然能够保持各自的运动状态继续传播，在相遇的区域里，介质内部的质点同时参加相遇的波列的振动，质点的位移等于相遇波列单独存在时到达该处引起的位移的叠加，相遇的波一旦脱离接触又会按照原来的

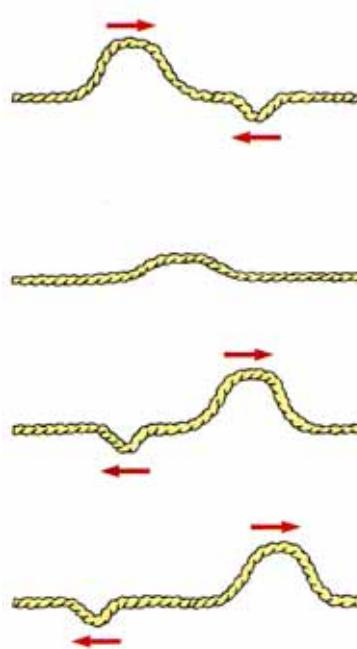


图 2-32 波的叠加



运动状态继续传播。这在物理学中称为**波的叠加原理**。

下面我们通过实验认识一种特殊的波的叠加现象——波的干涉。



## 实验与探究

### 水波的干涉

图2-33是一个水波槽，在振动棒上固定两个小球，让小球刚刚接触到水波槽的水面。当振动棒带动两个小球振动时，将会产生振动方向和振动频率都相同的两列水波。

打开电动机的电源，产生两列振动方向和振动频率都相同的水波，观察这两列波叠加时的现象。

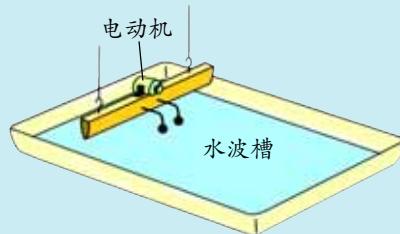


图2-33 水波槽

由上面的实验可以得到图2-34所示的波的叠加图样：在振动的水面上，出现了一条条从两个波源中间伸展开的相对平静的区域和剧烈振动的区域，这两种区域相互交替，并且出现的位置是固定的。我们把振动频率和振动方向相同的两列波叠加后，振动加强和振动减弱的区域互相间隔、稳定分布的现象，叫做**波的干涉** (interference of wave)，形成的图样叫做干涉图样。



图2-34 水波的干涉图样

波的干涉现象是怎样产生的呢？我们可以用波的叠加原理来解释。图2-35为某时刻两列水波相遇时的波形图，图中实线表示波峰，虚线表示波谷。图中红点处是两列波的波峰与波峰叠加，绿点处是波谷与波谷叠加，这些位置的振

动都得到加强。如果两列水波的频率相同，那么再经过 $T/2$ ，两列波的叠加又使这些质点同时到达波谷（或波峰），因此这些质点的振动始终是加强的，这些区域就成为振动加强区。图中画“×”处是一列波的波峰与另一列波的波谷相叠加，该处质点的振动减弱，并且始终是减弱的，这些点就形成了振动减弱区。这样就形成振动加强区与振动减弱区相间隔而存在的稳定的干涉图样。因此，**只有频率和振动方向相同的波才可能互相干涉**。

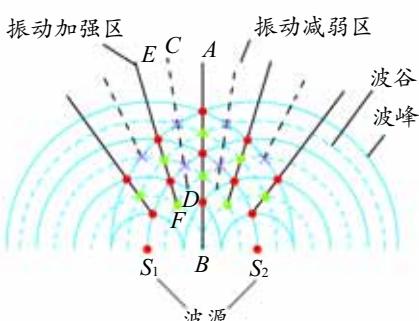


图2-35 干涉现象原理图



## 讨论与交流

在干涉现象的原理图中，为什么两波源连线的垂直平分线上的每一点振动都是加强的？能否利用两波源到达某质点的距离来判断该质点振动加强或减弱的情况？

水波、声波、光波、电磁波等都能产生干涉，干涉现象是波的重要特征之一。例如，在空旷处放置两个相同的扬声器，让它们同时发出同样的声音，如果在与两个扬声器连线平行的路线上走过，可以听到强弱相间的声波，这就是两个频率相同的扬声器发出的声波的干涉现象。

## 2. 波的衍射现象

向平静的水面投入一块小石子，水面上会形成一圈圈美丽的波纹。这些波纹遇到露出水面的石块会产生怎样的现象呢？如果石块较大，水波会被反射回来；如果石块较小，水波会绕过石块继续往前传播，好像石块不存在一样。波绕过障碍物或通过孔隙继续传播的现象，叫做波的衍射（diffraction of wave）。图 2-36 为水波通过蓄水池入口时产生衍射的情景。

下面我们通过实验来进一步认识波的衍射现象。



图 2-36 水波通过蓄水池入口时产生衍射



## 实验与探究

### 水波的衍射现象

在水槽中放入两块挡板，挡板之间留一狭缝，调节挡板位置，就可改变狭缝宽度（图 2-37）。产生持续的平面波，并保持波长不变，观察以下 3 种情况下的实验现象。

(1) 调节狭缝，使其宽度远大于水波的波长，观察水波通过狭缝的现象。

(2) 调节狭缝的宽度，使其接近水波的波长，观察实验现象。

(3) 进一步调节狭缝的宽度，使其更接近水波的波长，观察此时的实验现象。

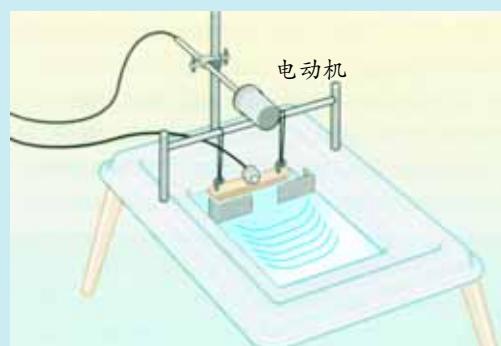


图 2-37 水波槽产生持续的波长不变的平面波



图2-38记录了同一波长的水波经过不同宽度狭缝时的现象。从图中可以看出，当狭缝的宽度远大于水波的波长时，没有明显的衍射现象；当狭缝的宽度接近水波的波长时，水波在狭缝的边缘发生了弯曲；当狭缝的宽度更接近水波的波长时，水波通过狭缝后成为近似于点波源发出的球面波，衍射现象更加明显。进一步的实验证明，当障碍物或狭缝的尺寸跟波长相差不多时，衍射现象十分明显。

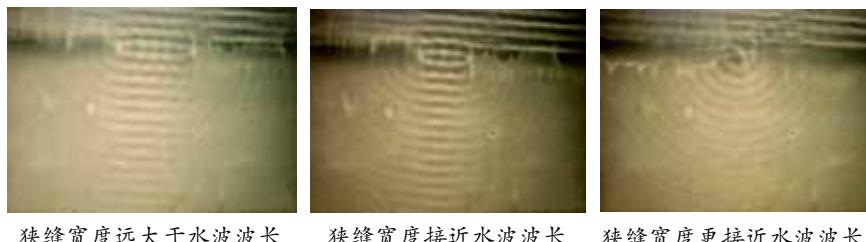


图 2-38

不仅水波能发生衍射现象，一切波都能发生衍射现象，衍射是波特有的现象。例如，有人在墙的一边说话，在墙的另一边的人“闻其声而不见其人”的现象与声波的衍射有关（图2-39）。人耳听到声音的频率范围在 $20 \sim 20000\text{ Hz}$ ，对应的声波波长为 $17 \sim 0.017\text{ m}$ ，可以跟一般障碍物相比，因此声波可以绕过障碍物，使我们能听到障碍物另一侧的声音。



图 2-39 声波发生衍射，隔墙能闻声

### 作业

1. 你能否从生活中找到更多机械波的干涉和衍射现象？
2. 观察发生干涉的两列波，当它们的振幅相同或振幅不同时，观察到的干涉现象有什么区别？
3. 在干涉现象中，合振幅最大的地方是否振动的位移总是最大？给干涉现象拍照时，照片显示的干涉图样是否与拍摄时间无关？
4. 下列判断正确的是
  - (A) 北京天坛回音壁的回音是由声音的衍射形成的
  - (B) 北京天坛回音壁的回音是由声音的反射形成的
  - (C) 在墙外能听到墙内人讲话，这是声波反射形成的
  - (D) 在墙外能听到墙内人讲话，这是声波衍射形成的



# 第4节 多普勒效应及其应用

## 1. 多普勒效应

你是否注意过这样的现象：当警车鸣笛从身边飞速驶过时，警笛的音调会发生变化。警车向你驶来时，音调变高；离你而去时，音调变低（图2-40）。

实际上，警笛的频率并没有变化，只是由于警车与地面观察者之间发生了相对运动，从而使观察者接收到的声波频率发生了变化。这种由于波源和观察者之间有相对运动而使观察者接收到的频率发生变化的现象称为**多普勒效应**（Doppler effect），它是奥地利科学家多普勒发现的。

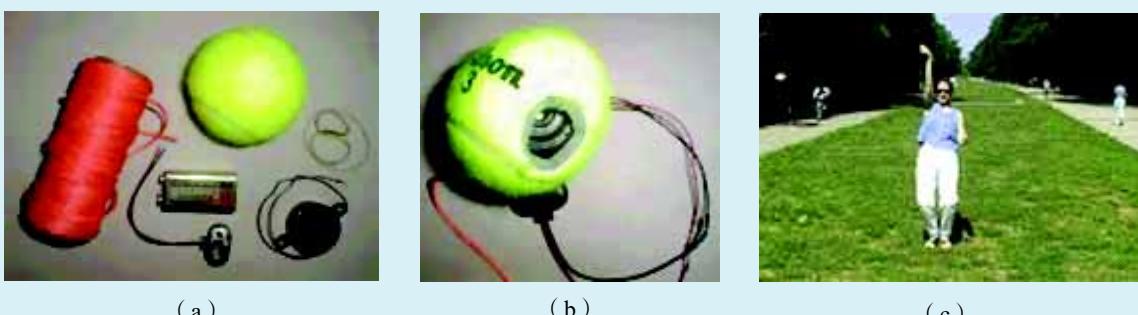


图2-40 地面观察者听到警笛音调发生了变化

 **实验与探究**

### 多普勒效应

用蜂鸣器等器材〔图2-41(a)〕制作一个发声装置〔图2-41(b)〕，演示多普勒效应。为了安全，将发声装置装入网球中，用结实的绳子捆绑好并在室外做实验〔图2-41(c)〕，听听蜂鸣器的音调有什么变化。



(a) (b) (c)

图2-41 多普勒效应实验装置及实验



如何解释多普勒效应呢?

声源每完成一次全振动,就向外发出一个波长的波;而声源的频率等于单位时间(如1 s)内声源完成的全振动的次数,所以声源振动的频率等于单位时间内声源向外发出完全波的个数。对观察者来说,他接收到的声音的频率等于他在单位时间内接收到的完全波的个数。

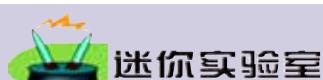
当声源和观察者相对介质都不动(即二者没有相对运动)时,声源1 s发出几个完全波,观察者在1 s内就接收到几个完全波。在这种情况下,观察者接收到的声音频率等于声源的频率。而当声源和观察者之间有相对运动时,观察者接收到的声音频率就不再等于声源的频率。

首先假设声源S静止不动,观察者以一定的速度 $v_0$ 向靠近声源的方向运动(图2-42)。在1 s内,观察者向着波源移动了一段距离,与观察者不动的情况比较,观察者在1 s内接收到完全波的个数就会增多,也就是接收到的声音频率增大,听到的声音音调变高。

同样道理,当观察者远离声源时,在单位时间里接收到完全波的个数就会减少,也就是接收到的声音频率减小,听到的声音音调变低。



图2-42 声源不动,观察者运动



### 迷你实验室

#### 模拟多普勒效应

为了进一步理解多普勒效应,可以做这样一个模拟实验(图2-43):让一队人沿街行走,当观察者站在街旁不动时,每秒有3个人从他身边通过。这种情况下,观察者接收到的“频率”是每秒3人。如果观察者逆着队伍前进方向行走,那么每秒内和观察者相遇的人数就会增加,也就是观察者的接收“频率”增大(这种情景和观察者逆着波的传播方向走向波源的情况是相似的)。如果观察者顺着队伍前进方向行走,又是怎样的情景呢?



图2-43 观察者每秒钟遇到的人数的变化

如果观察者相对介质静止不动，波源运动，观察者接收到的频率又如何变化呢？

如图 2-44 所示，点波源在均匀介质中发出球面波，球面波的每一波面的球心就是发出该波时波源所在的位置。当波源不运动时，波纹间距是均匀的；而当波源向右运动时，相当于波面的球心向右运动，波源右方的波面变得密集，左方的波面变得稀疏。因此，在波源右方的观察者，单位时间内接收到完全波的个数就增多，即接收到的频率增大。同样道理，观察者在波源左方，即波源远离观察者时，接收到的频率减小。

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

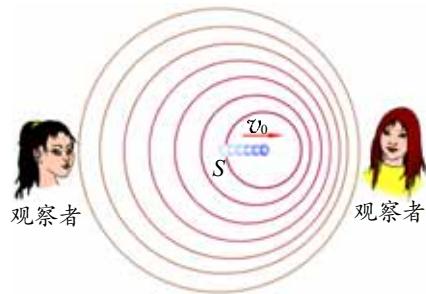


图 2-44 观察者不动，波源运动

## 2. 多普勒效应的应用

多普勒效应在生活中有着广泛应用。交通警察使用多普勒测速仪来测定汽车的行驶速度（图 2-45），确定车辆是否超速。多普勒测速仪是这样工作的：向行进的汽车发射某个频率的无线电波，无线电波遇到车辆发生反射，车辆相当于反射波的波源。测速仪接收到反射波，通过分析反射波的频率就可以显示出车辆的行驶速度。

医学上用来诊断人体心脏、人体血管等疾病的彩色超声多普勒心动图仪（图 2-46），基本工作原理也利用了多普勒效应。先向人体组织发射高频率的超声波，根据接收的反射超声波频率变化来测定心脏跳动情况、血管血流情况，依此对病变做出诊断。



图 2-45 多普勒测速仪

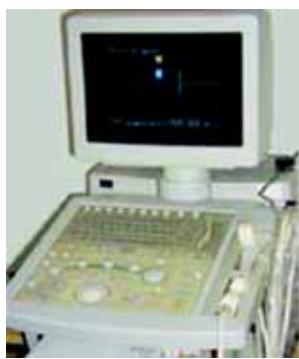


图 2-46 彩色多普勒心动图仪

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



## 讨论与交流

(1) 观察一辆正在行进中鸣笛的汽车。如果只听汽车鸣笛，你能判断汽车与你之间的距离如何变化吗？

(2) 设想你以波的传播速度远离波的振源，你接收到的频率将如何变化，接收到的频率会为零吗？



## 作业

1. 举例说明多普勒效应的现象、产生原因和应用。
2. 关于多普勒效应，下列说法正确的是
  - (A) 多普勒效应是由波的干涉引起的
  - (B) 多普勒效应说明波源的频率在发生改变
  - (C) 多普勒效应是由于波源与观察者之间有相对运动而产生的
  - (D) 只有声波可以产生多普勒效应
3. 有一种用钢丝操纵做圆周飞行的模型飞机，以二冲程活塞式发动机为动力。操纵者站在圆心，在他听来，发动机工作时发出的声音的音调是平稳不变的。场边的观察者则听到发动机的声音的音调忽高忽低地周期性变化，这是由于 \_\_\_\_\_，这种现象叫做 \_\_\_\_\_。
   
\_\_\_\_\_。
4. 根据多普勒效应，下列说法正确的是
  - (A) 当波源与观察者有相对运动时，观察者接收到的频率一定与波源发出的频率相同
  - (B) 当波源与观察者同向运动时，观察者接收到的频率一定比波源发出的频率低
  - (C) 当波源与观察者相向运动时，观察者接收到的频率一定比波源发出的频率高
  - (D) 当波源与观察者反向运动时，观察者接收到的频率一定比波源发出的频率低

