


普通高中课程标准实验教科书

# 物理

选修 3-4

人民教育出版社 课程教材研究所 编著  
物理课程教材研究开发中心



 人民教育出版社

总 主 编：张大昌  
副总主编：彭前程  
主 编：张维善  
执笔人员：谷维慧 黄恕伯 彭 征 张 颖 周蓉筠  
绘 图：王凌波 张 良  
责任编辑：彭 征  
版式设计：马迎莺  
审 读：王存志

普通高中课程标准实验教科书

物理

选修3-4

人民教育出版社 课程教材研究所 编著  
物理课程教材研究开发中心

人民教育出版社 出版发行

(北京市海淀区中关村南大街17号院1号楼 邮编：100081)

网址：<http://www.pep.com.cn>

××××印刷厂印装 全国新华书店经销

开本：890毫米×1240毫米 1/16 印张：7.5 字数：135 000

2007年4月第2版 年 月第 次印刷

印数：00 001—000 000册

ISBN978-7-107-18672-1 定价：8.70元  
G·11762(课)

著作权所有·请勿擅自用本书制作各类出版物·违者必究  
如发现印、装质量问题，影响阅读，请与出版社联系调换。

# 目 录

第十一章 机械振动	1
1 简谐运动	2
2 简谐运动的描述	5
3 简谐运动的回复力和能量	10
4 单摆	13
5 外力作用下的振动	17



第十二章 机械波	22
1 波的形成和传播	23
2 波的图象	27
3 波长、频率和波速	29
4 波的反射和折射	32
5 波的衍射	37
6 波的干涉	39
7 多普勒效应	41



第十三章 光	45
1 光的折射	46
2 光的干涉	50
3 实验：用双缝干涉测量光的波长	53
4 光的颜色 色散	56
5 光的衍射	60
6 光的偏振	64
7 全反射	68
8 激光	73



---

第十四章 电磁波	76
1 电磁波的发现	77
2 电磁振荡	80
3 电磁波的发射和接收	83
4 电磁波与信息化社会	87
5 电磁波谱	92



---

第十五章 相对论简介	97
1 相对论的诞生	98
2 时间和空间的相对性	100
3 狭义相对论的其他结论	106
4 广义相对论简介	109



---

课题研究 社会生活中的电磁波	112
----------------	-----

---



科学是一种方法，它教导人们：一些事物是如何被了解的，不了解的还有什么，对于了解的，现在了解到了什么程度……

——费恩曼<sup>①</sup>

## 第十一章 机械振动



琴弦的振动发出美妙的乐音

人类生活在运动的世界里，机械运动是最常见的运动。在机械运动中，除了平动和转动之外，振动也是一种常见的运动。琴弦的振动，让人们欣赏到优美的音乐；地震则可能给人类带来巨大的灾难。然而，振动并不限制在机械运动范围之内，在交流电路中电流和电压的变化，也是一种振动。振动现象，比比皆是。

我们将从最简单的情况出发，学习怎样描述振动，振动有什么性质。

<sup>①</sup>理查德·费恩曼 (R.P.Feynman, 1918—1988)，美国物理学家、杰出的物理学教育家。由于在量子电动力学方面的贡献而获得 1965 年诺贝尔物理学奖。

## 1

## 简谐运动

振动现象在自然界中广泛存在。钟摆的摆动、水中浮标的上下浮动、担物行走时扁担下物体的颤动、树梢在微风中的摇摆……都是振动，一切发声的物体都在振动，地震是地球的剧烈振动，振动与我们的生活密切相关。

**弹簧振子** 如图 11.1-1 所示，把一个有孔的小球装在弹簧的一端，弹簧的另一端固定，小球穿在光滑的杆上，能够自由滑动，两者之间的摩擦可以忽略，弹簧的质量与小球相比也可以忽略。把小球拉向右方，然后放开，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），小球在平衡位置附近的往复运动，是一种机械振动，简称振动（vibration）。这样的系统称为弹簧振子（spring oscillator）。

**弹簧振子的位移—时间图象** 为了研究弹簧振子的运动规律，我们以小球的平衡位置为坐标原点  $O$ ，沿着它的振动方向建立坐标轴。小球在平衡位置的右边时它对平衡位置的位移为正，在左边时为负。

图 11.1-2 是图 11.1-1 所示的弹簧振子的频闪照片。频闪仪每隔 0.05 s 闪光一次，闪光的瞬间振子被照亮。拍摄时底片从下向上匀速运动，因此在底片上留下了小球和弹簧的一系列的像，相邻两个像之间相隔 0.05 s。

图 11.1-2 中的两个坐标轴分别代表时间  $t$  和小球位移  $x$ ，因此它就是小球在平衡位置附近往复运动时的位移—时间图象，即  $x-t$  图象。

## 做一做

用数码相机和计算机绘制小球运动的  $x-t$  图象

图 11.1-2 的照片是通过频闪摄影得到的。使用数码相机和计算机也能得到类似的图片。

弹簧的下端悬挂一个钢球，上端固定，它们组成了一个振动系统。

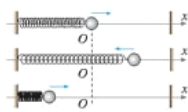


图 11.1-1 弹簧振子的振动

弹簧振子是小球和弹簧所组成的系统的名称，但有时也把这样的小球叫做弹簧振子或简称振子。

本书以后研究振动时所说的位移，都是对于平衡位置的位移。因此，书中字母  $x$  具有双重意义，它既表示小球的位置（坐标），又表示小球的位移。

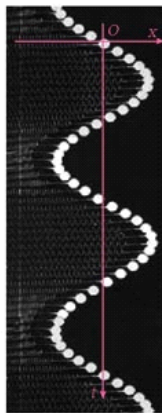


图 11.1-2 弹簧振子的频闪照片

用手把钢球向上托起一段距离，然后释放，钢球便上下振动。钢球原来静止时的位置就是振动的平衡位置（图 11.1-3）。

用摄像机或数码照相机拍摄钢球的运动。大约每隔 0.04 s 数码相机就会拍摄一张照片，拍摄时最好把钢球的位置放在取景框的最左侧。

在电脑中建立一个幻灯片的演示文稿，把这些照片插入文稿中的同一张空白幻灯片中，照片会按拍摄时间的先后一帧一帧自动向右平铺开来。把这些照片的上端对齐，便能得到与图 11.1-2 相似的画面。这样就可以在同一个画面上看到钢球在各个不同时刻的位置。



图 11.1-3 钢球释放后便上下振动

**简谐运动及其图象** 我们对弹簧振子的位移与时间的关系做些深入的研究。从图 11.1-2 可以看出，小球运动时的位移与时间的关系很像正弦函数的关系。是不是这样呢？

### 思考与讨论

#### 确定弹簧振子的位移与时间的关系

##### 方法一

数学课中我们已经学过正弦函数的振幅、周期(频率)等知识。假定图 11.1-2 中的曲线的确是正弦曲线，用刻度尺测量它的振幅和周期，写出具有这样振幅、周期的正弦函数的表达式。应该注意到，这个表达式中计时开始时位移应该是零，随后位移开始增加并为正值。

然后，在图 11.1-2 的曲线中选小球的若干个位置，用刻度尺在图中测量它们的横坐标和纵坐标，代入你所写出的正弦函数的表达式中进行检验，看一看这条曲线是否真的是一条正弦曲线。

##### 方法二

在图 11.1-2 中，测量小球在各个位置的横坐标和纵坐标，把测量值输入计算机中，用数表软件作出这条曲线，然后按照计算机的提示用一个周期性函数拟合这条曲线，看一看弹簧振子的位移—时间的关系可以用什么函数表示。

如果质点的位移与时间的关系遵从正弦函数的规律，即它的振动图象 ( $x-t$  图象) 是一条正弦曲线<sup>①</sup>，这样的振动叫做简谐运动 (simple harmonic motion)。简谐运动是最简单、最基本的振动。图 11.1-1 中的弹簧振子的运动就是简谐运动。

<sup>①</sup> 正弦函数的一般形式是  $y = A \sin(\omega x + \varphi)$ ，它的图象叫做正弦曲线，例如  $y = \sin x$ ， $y = \sin(x + \frac{\pi}{4})$  的图象，都是正弦曲线。 $y = \cos x$  的图象也是一条正弦曲线，因为它可以写成  $y = \sin(x + \frac{\pi}{2})$ 。

## 做一做

在弹簧振子的小球上安装一枝绘图笔,让一条纸带在与小球振动方向垂直的方向上匀速运动,笔在纸带上画出的就是小球的振动图象(图 11.1-4)。

这种记录振动的方法在实际中有很多应用。医院里的心电图仪(图 11.1-5)、地震仪中绘制地震曲线的装置(图 11.1-6)等,都用类似的方法记录振动情况。

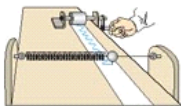


图 11.1-4 绘制弹簧振子的振动图象(示意图)

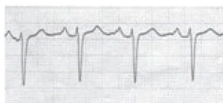


图 11.1-5 心电图



图 11.1-6 绘制地震曲线的装置

## 做一做

## 用传感器和计算机描绘简谐运动的图象

如图 11.1-7 甲,气垫导轨上的滑块系在一端固定的弹簧上,可以沿导轨做简谐运动。位移传感器的 A、B 两个小盒分别固定在滑块上和气垫导轨上。B 盒通过数据采集器与计算机相连,把各个时刻滑块的位置输入计算机。计算机对数据进行处理后在屏幕上作出滑块的  $x-t$  图象(图 11.1-7 乙)。

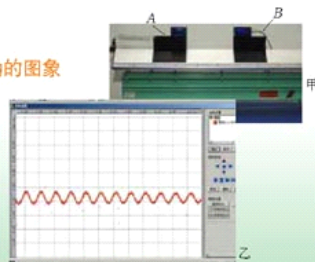


图 11.1-7 用传感器和计算机描绘简谐运动的图象

## 问题与练习

- 除了课文中介绍的心电图仪、地震仪之外,你还见过哪些绘制振动曲线的装置?请举出一个实例,并说明:这个实例中绘图笔尖的位移跟时间的关系是不是具有简谐运动的规律?为什么?
- 如图 11.1-8,两人合作,模拟振动曲线的记录装置。先在白纸中央画一条直线  $OO'$ ,使它平行于纸的长边,作为图象的横坐标轴。一个人用铅笔尖在白纸上沿垂直于  $OO'$  的方向

推动,另一个人沿  $OO_1$  的方向匀速拖动白纸,纸上就画出了一条描述笔尖推动情况的  $x-t$  图象。

请完成这个实验,并解释:白纸上  $OO_1$  坐标轴上的坐标代表什么物理量?纵坐标代表什么物理量?为什么必须匀速拖动白纸?如果拖动白纸的速度是  $5 \times 10^{-2}$  m/s,在  $OO_1$  坐标轴上应该怎样标出时间的坐标刻度?

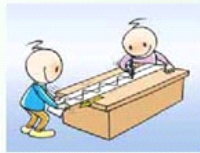


图 11.1-8 两人合作绘制振动图象

3. 图 11.1-9 是某质点做简谐运动的推动图象。根据图象中的信息,回答下列问题。

- (1) 质点离开平衡位置的最大距离有多大?
- (2) 在 1.5 s 和 2.5 s 这两个时刻,质点的位置各在哪里?
- (3) 在 1.5 s 和 2.5 s 这两个时刻,质点向哪个方向运动?

4. 如图 11.1-9,在  $t = 0$  到  $t = 4$  s 的范围内回答以下问题。

- (1) 质点相对平衡位置的位移方向在哪些时间内跟它瞬时速度的方向相同?在哪些时间内跟瞬时速度的方向相反?
- (2) 质点在第 2 s 末的位移是多少?
- (3) 质点在前 2 s 内走过的路程是多少?

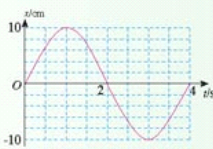


图 11.1-9 某质点的振动图象

## 2

### 简谐运动的描述

**描述简谐运动的物理量** 我们以弹簧振子为例来研究描述简谐运动的物理量。

#### • 振幅

如图 11.2-1, 振子在水平杆上的  $M$  点和  $M'$  点之间往复振动,  $O$  为它的平衡位置。图中  $OM = OM'$ , 它们是振动物体离开平衡位置的最大距离, 叫做振动的振幅 (**amplitude**)。振幅的两倍表示的是做振动的物体运动范围的大小。

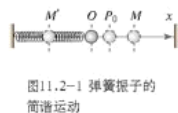


图 11.2-1 弹簧振子的简谐运动

#### • 周期和频率

简谐运动是一种周期性运动。图 11.2-1 中, 如果从振子向右通过  $O$  点的时刻开始计时, 它将运动到  $M$ , 然后向左回到  $O$ , 又继续向左运动到达  $M'$ , 之后又向右回到  $O$ 。这样一个完整的振动过程称为一次全振动。不管以哪里作为开始研究的起点, 例如从图中的  $P_0$  开始运动, 弹簧振子完成一次全振动的的时间总是相同的。



做简谐运动的物体完成一次全振动所需要的时间,叫做振动的周期 (**period**), 单位时间内完成全振动的次数,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,周期越小,频率越大,表示振动越快。用  $T$  表示周期,用  $f$  表示频率,则有

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

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

我们用周期和频率描述简谐运动,实际上,描述任何周期性过程时,即使不是简谐运动,也要用到这两个概念。它们的应用范围已经扩展到物理学以外的领域了。

### 做一做

如图 11.2-2, 弹簧上端固定, 下端悬吊钢球。把钢球从平衡位置向下拉下一段距离  $A$ , 放手让其运动。  $A$  就是振动的振幅。用秒表测出钢球完成  $n$  个全振动所用的时间  $t$ ,  $\frac{t}{n}$  就是振动的周期。  $n$  的值取大一些可以减小周期的测量误差。

再把振幅减小为原来的一半, 用同样的方法测量振动的周期。

通过这个实验你有什么发现? 由此你对简谐运动的周期与振幅的关系有什么猜想?



图 11.2-2 测量小球振动的周期

### • 相位

除了振幅、周期和频率外, 要完整地描述简谐运动以及任何周期性运动, 还需要另一个物理量。

### 实验

有并列悬挂的两个小球, 悬线的长度相同。把它们拉起同样的角度后同时放开。可以看到, 它们的振幅、周期(频率)也都相同。

但是如果先把第一个小球放开, 然后再放第二个, 这种情况下尽管两个小球运动的振幅和周期还都是相同的, 但它们运动的步调不再一致了。例如, 当第一个小球到达平衡位置时再放开第二个, 那么当第一个到达另一方的最高点时, 第二个刚刚到达平衡位置; 而当第二个到达另一方的最高点时, 第一个小球已经返回平衡位置了。与第一个小球相比, 第二个总是滞后  $\frac{1}{4}$  个周期, 或者说总是滞后  $\frac{1}{4}$  个全振动。

在物理学中, 我们用不同的相位 (**phase**) 来描述周期性运动在各个时刻所处的不同状态。例如, 对于同时放开的两个小球, 我们说它们的相位相同, 而对于上面说的不同时放开

的两个小球，我们说第二个小球的相位落后于第一个的相位。

### 科学漫步

#### 月 相

描述自然界的许多周期性变化都会用到相位的概念。例如，从地球上，月亮从圆到缺，又从缺到圆，这是一种周期性的变化（图 11.2.3）周期为 29.5 天。月亮的这种圆缺变化叫做月相变化。为了便于记忆，人们还给几个特殊的月相起了特殊的名称：

- 望——满月
- 下弦——恰好有半个月面是亮的
- 朔——这时实际上看不见月亮
- 上弦——恰好另半个月面是亮的

在望和下弦之间的“月芽”称为残月，在朔和上弦之间的“月芽”称为新月。

你是否注意观察过，上弦时月面的弧线是在月面的东侧还是在西侧？上弦月出现在黄昏还是出现在黎明？



图 11.2.3 如果平时注意观察月亮的圆缺变化，你就能判断这张照片是在黄昏拍摄的还是在黎明拍摄的！

**简谐运动的表达式** 在数学课中，我们已经学习了正弦函数  $y = A \sin(\omega x + \varphi)$  的图象。在上节我们已经得知，正弦函数可以描述简谐运动，那么用位移  $x$  表示函数值，用时间  $t$  表示自变量，这个正弦函数式便写为

$$x = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

因此，要描述简谐运动的位移  $x$  与时间  $t$  之间的定量关系，必须知道物理量  $A, \omega, \varphi$ 。它们是描述简谐运动的基本的物理量。

• 哪个量代表简谐运动的振幅？

因为  $|\sin(\omega t + \varphi)| \leq 1$ ，所以  $|x| \leq A$ ，也就是说，位移大小的最大值是  $A$ ，所以 (2) 式中的  $A$  代表了图 11.2-1 中的  $OM$ ， $A$  代表简谐运动的振幅。

• 哪个量代表简谐运动的频率？

在数学课上我们已经知道，对于  $\sin(\omega t + \varphi)$  来说， $(\omega t + \varphi)$  这个量在从 0 增加到  $2\pi$  的过程中， $\sin(\omega t + \varphi)$  的值先从 0 增加到极大值 1，又从极大值 1 经过 0 减小到极小值 -1，然后又回到 0，这样循环变化一次。现在的问题是，时间  $t$  每增加多少， $\sin(\omega t + \varphi)$  这个量循环变化一次？

设时间从  $t_1$  增加到  $t_2$  的过程中  $\sin(\omega t + \varphi)$  循环一次，即周期为

$$T = t_2 - t_1$$

于是有

$$(\omega t_2 + \varphi) - (\omega t_1 + \varphi) = 2\pi$$

由此解出

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

把(1)式代入,得

$$\omega = 2\pi f \quad (3)$$

可见,(2)式中的 $\omega$ 是一个与频率成正比的量,叫做简谐运动的“圆频率”。它也表示简谐运动的快慢。

• 哪个量代表简谐运动的相位?

数学课中我们已经学过,当 $(\omega t + \varphi)$ 确定时, $\sin(\omega t + \varphi)$ 的值也就确定了。所以 $(\omega t + \varphi)$ 代表了做简谐运动的质点此时正处于一个运动周期中的哪个状态,可见 $(\omega t + \varphi)$ 代表简谐运动的相位。 $\varphi$ 是 $t = 0$ 时的相位,称做初相位,或初相。

实际上经常用到的,是两个具有相同频率的简谐运动的相位差(phase difference),如果两个简谐运动的频率相等,其初相分别是 $\varphi_1$ 和 $\varphi_2$ ,当 $\varphi_2 > \varphi_1$ 时,它们的相位差是

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

此时我们常说2的相位比1超前 $\Delta\varphi$ ,或者说1的相位比2落后 $\Delta\varphi$ 。

综上所述,做简谐运动的质点在任意时刻 $t$ 的位移是

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

### 思考与讨论

从表达式 $\omega t + \varphi$ 看,相位的单位应该是怎样的?

### 科学漫步

#### 乐音和音阶

在音乐理论中,把一组音按音调高低的次序排列起来就成为音阶,也就是大家都知道的 do, re, mi, fa, sol, la, si, do (简谱记做“1”、“2”、“3”、“4”、“5”、“6”、“7”、“1̇”)。下表列出了某律 C 调音阶中各音的频率<sup>①</sup>。

<sup>①</sup>表中所列各唱名的频率组成了“自然音阶”。研究乐理时还常用到“等程音阶”,其中各唱名的频率与表中数值略有差异,人耳很难分辨。



唱名	do	re	mi	fa	sol	la	si	do(高)
该唱名的频率与 do 的频率之比	1:1	9:8	5:4	4:3	3:2	5:3	15:8	2:1
$f / \text{Hz}(\text{C调})$	264	297	330	352	396	440	495	528

有趣的是，高音 do 的频率正好是中音 do 频率的 2 倍，而且音阶中各音的频率与 do 的频率之比都是整数之比。

还有更有趣的事情。喜欢音乐的同学都知道，有些音一起演奏时听起来好听，有些音一起演奏时听起来不好听，前者叫做谐和音，后者叫做不谐和音。著名的大三和弦 do、mi、sol 的频率比是 4:5:6，而小三和弦 re、fa、la 的频率比是 10:12:15。大三和弦听起来更为和谐，那是因为三个音的频率比是更小的整数之比。随便拼凑在一起的三个音听起来不和谐，有兴趣的同学可以算一算它们的频率比，一定是三个大得惊人的整数。

从这个例子可以看到艺术后面的科学道理，但是，艺术远比  $1+1=2$  复杂。从上表中看出，频率增加一倍，音程高出 8 度。实际上这只对于中等音高是正确的。人的感觉十分复杂，对于高音段来说，频率要增加一倍多，听起来音高才高出一个 8 度。如果一个书呆子调钢琴按照“频率翻倍”的办法调钢琴，那就要砸饭碗了。

尽管如此，科学家们还是可以通过音乐家的实际测听，确定音高与频率的对应关系，并且据此设计出优美动听电子乐器。

### 做一做

#### 用计算机观察声音的波形

绝大多数计算机的操作系统都有录音、放音的功能，并能在放音时显示声振动的图象。

用计算机的录音功能录制两个乐音，例如笛声，一个是 do，另一个是 sol，把它们保存起来。用媒体播放软件复现这个声音，并把播放软件界面中“条形与波浪”的选项设为“波形”。这样可以从电脑屏幕上看到播放声音时的振动图象。按下“暂停”键得到静止图象。

把 do 和 sol 这两个声音的振动图象复制到

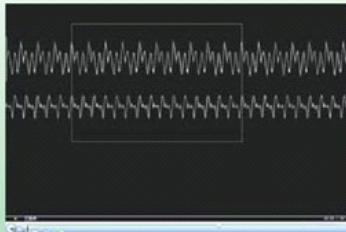


图 11.2-4 比较两个声音的频率

同一张空白幻灯片上,并把图象以外多余的区域剪裁掉,就得到图 11.2-4 所示的图形。在屏幕上作出矩形框,调节框的宽度,使框内包含“do”的 10 个周期。在屏幕上观察,多少个“sol”的周期与“do”的 10 个周期的时间相等?由此可以得到“sol”和“do”的频率之比。

采用这种方法可以比较两个声音的频率之比。如果已知其中一个声音的频率,还可以推知另一个声音的频率。

### 问题与练习

1. 有两个简谐运动:  $x_1 = 3\text{asin}(4\pi bt + \frac{\pi}{4})$  和  $x_2 = 9\text{asin}(8\pi bt + \frac{\pi}{2})$ , 它们的振幅之比是多少? 它们的频率各是多少?  $t=0$  时它们的相位差是多少?

2. 图 11.2-5 是两个简谐运动的振动图象, 它们的相位差是多少?

3. 有甲、乙两个简谐运动: 甲的振幅为 2 cm, 乙的振幅为 3 cm, 它们的周期都是 4 s, 当  $t=0$  时甲的位移为 2 cm, 乙的相位比甲落后  $\frac{\pi}{4}$ , 请在同一坐标系中作出这两个简谐运动的位移—时间图象。

4. 图 11.2-6 为 A、B 两个简谐运动的位移—时间图象。请根据图象写出这两个简谐运动的位移随时间变化的关系式。

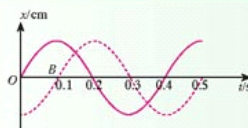


图 11.2-5 求两个简谐运动的相位差

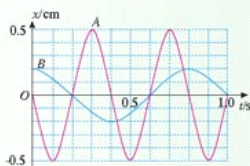


图 11.2-6 两个简谐运动的振动图象

## 3

### 简谐运动的回复力和能量

我们已经学过, 物体做匀变速运动时, 所受的合力大小、方向都不变; 物体做匀速圆周运动时, 所受的合力大小不变、方向与速度方向垂直并指向圆心。那么, 物体做简谐运动时, 所受的合力有什么特点?

**简谐运动的回复力** 如图 11.3-1, 在弹簧振子的例子中,

前两节只研究做简谐运动的质点的运动的特点, 不涉及它所受的力, 是从运动学的角度研究的。本节要讨论它所受的力, 是从动力学的角度研究的。

小球所受的力 $F$ 与弹簧的伸长量成正比。由于坐标原点就是平衡位置，弹簧的伸长量与小球位移 $x$ 的大小相等，因此有

$$F = -kx \quad (1)$$

式中 $k$ 是弹簧的劲度系数。因为当 $x$ 在原点的左侧，即 $x$ 取负值时，力 $F$ 沿坐标轴的正方向；而 $x$ 在原点右侧，取正值时，力 $F$ 沿坐标轴的负方向，所以式中有负号。

理论上可以证明，如果质点所受的力具有(1)式的形式，也就是说：如果质点所受的力与它偏离平衡位置位移的大小成正比，并且总是指向平衡位置，质点的运动就是简谐运动。由于力的方向总是指向平衡位置，它的作用总是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)。

**简谐运动的能量** 弹簧振子的速度在不断变化，因而它的动能在不断变化；弹簧的伸长量或压缩量在不断变化，因而它的势能也在不断变化。它们的变化具有什么规律？

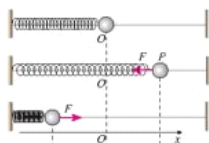


图 11.3-1 弹簧对小球的力的大小与弹簧的伸长量成正比，方向总是指向平衡位置。

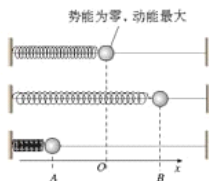


图 11.3-2 弹簧振子的运动和它的能量

### 思考与讨论

作为一个振动系统，弹簧振子的势能与弹簧的伸长量有关，动能与小球的速度有关。请在下表中填出图 11.3-2 中的弹簧振子在各位置的能量。某量取最大值、最小值用文字表示，某量为零用数字 0 表示，增加和减少分别用斜向上的箭头和斜向下的箭头表示。

位置	A	A→O	O	O→B	B
位移的大小					
速度的大小					
动能					
势能					
总能					

理论上可以证明，如果摩擦等阻力造成的损耗可以忽略，在弹簧振子运动的任意位置，系统的动能与势能之和都是一定的，这与机械能守恒定律相一致。

实际的运动都有一定的能量损耗,所以简谐运动是一种理想化的模型。

### 做一做

弹簧下面悬挂的钢球,它所受的力与位移之间的关系也具有(1)式的形式吗?由于平衡时弹簧已经有了一个静伸长量 $l_0$ ,问题稍稍麻烦一点。这时仍要选择钢球静止时的位置为坐标原点,而小球所受的回复力实际上是弹簧的弹力与重力的合力。

请你试着导出小球所受的合力与它的位移的关系。

### 问题与练习

- 一个振动,如果回复力与偏离平衡位置的位移成正比且方向与位移相反,就能判定它是简谐运动。请你据此证明:把图11.3-3中倾角为 $\theta$ 的光滑斜面上的小球沿斜面拉下一段距离,然后松开,小球的运动是简谐运动。
- 某人想判定以下振动是不是简谐运动,请你陈述求证的思路(可以不定量证明):
  - 粗细均匀的一条木筷,下端绕几圈铁丝,竖直浮在较大的筒中(图11.3-4)。把木筷往上提起一段距离后放手,木筷就在水中上下振动;
  - 光滑圆弧面上有一个小球,把它从最低点移开一小段距离,放手后,小球以最低点为平衡位置左右振动(图11.3-5)。

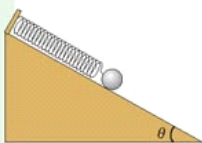


图 11.3-3 斜面上小球—弹簧振动系统

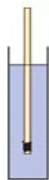


图 11.3-4 均匀木筷在水中的上下振动



图 11.3-5 圆弧面上小球的左右振动

- 做简谐运动的物体经过A点时,加速度的大小是 $2\text{ m/s}^2$ ,方向指向B点;当它经过B点时,加速度的大小是 $3\text{ m/s}^2$ ,方向指向A点。若AB之间的距离是10 cm,请确定它的平衡位置。
- 图11.3-6为某物体做简谐运动的图象,在所画曲线的范围内回答下列问题。
  - 哪些时刻物体的回复力与0.4 s时刻的回复力相同?

- (2) 哪些时刻物体的速度与0.4 s时刻的速度相同?
- (3) 哪些时刻的动能与0.4 s时刻的动能相同?
- (4) 哪些时间的加速度在减小?
- (5) 哪些时间的势能在增大?

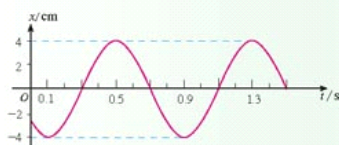


图 11.3-6 某物体做简谐运动的图象

## 4

### 单摆

生活中经常可以看到悬挂起来的物体在竖直平面内摆动,我们用细线悬挂着的小球来研究摆动的规律。

如图 11.4-1,如果细线的质量与小球相比可以忽略,球的直径与线的长度相比也可以忽略,这样的装置就叫做单摆 (simple pendulum)。单摆是实际摆的理想化模型。显然,单摆摆动时摆球在做振动,但它是不是在做简谐运动?



图 11.4-1 单摆

研究单摆时还有一个条件:与小球受到的重力及绳的拉力相比,空气等对它的阻力可以忽略。

为了更好地满足这个条件,实验时我们总要尽量选择质量大、体积小的小球和尽量细的线。

#### 演示

如图 11.4-2,细线下悬挂一个除去了柱塞的注射器,注射器向下喷出一细束墨水,沿着与摆动方向垂直的方向匀速拖动一张白纸,白纸上的墨迹便画出振动图象 ( $x-t$  图象)。

注射器的摆动是不是简谐运动?

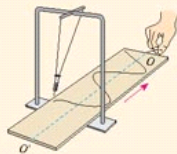


图 11.4-2 画出振动图象

**单摆的回复力** 我们在一般条件下研究单摆是不是做简谐运动,最简单的方法是看它的回复力是否满足  $F = -kx$  的条件。



摆球静止在  $O$  点时, 悬线竖直下垂, 摆球受到的重力  $G$  与悬线的拉力  $F'$  平衡。小球受的合力为零, 可以保持静止, 所以  $O$  点是单摆的平衡位置。拉开摆球, 使它偏离平衡位置, 放手后摆球所受的重力  $G$  与拉力  $F'$  不再平衡。在这两个力的合力的作用下, 摆球沿着以平衡位置  $O$  为中心的一段圆弧  $AA'$  做往复运动, 这就是单摆的振动。

因为摆球沿圆弧运动, 因此可以不考虑沿悬线方向的力, 只考虑沿圆弧方向的力。当摆球运动到某点  $P$  时 (图 11.4-3), 摆球在圆弧方向上受到的只是重力在这个方向的分力  $F = mgsin \theta$ , 这就是它的回复力。

在偏角很小时, 摆球对于  $O$  点的位移  $x$  的大小, 与  $\theta$  角所对的弧长、 $\theta$  角所对的弦都近似相等, 因而  $\sin \theta \approx \frac{x}{l}$ , 所以单摆的回复力为

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

其中  $l$  为摆长,  $x$  为摆球偏离平衡位置的位移, 负号表示回复力  $F$  与位移  $x$  的方向相反。由于  $m$ 、 $g$ 、 $l$  都有确定的数值,  $\frac{mg}{l}$  可以用一个常数  $k$  表示, 于是上式写成

$$F = -kx$$

可见, 在偏角很小的情况下, 摆球所受的回复力与它偏离平衡位置的位移成正比, 方向总是指向平衡位置, 因此单摆做简谐运动。

**单摆的周期** 一条短绳系一个小球, 它的振动周期很短, 天文馆里巨大的傅科摆, 周期很长。单摆的周期与什么因素有关?

#### 演示

单摆的振幅、质量、摆长对周期各有什么影响?

如图 11.4-4, 在铁架台的横梁上固定两个单摆, 按照以下几种情况, 把它们拉起一定角度后同时释放, 观察两摆的振动周期。

1. 两摆的振幅不同 (都在小偏角下)
2. 两摆的质量不同
3. 两摆的摆长不同

比较三种情况下两摆的周期, 可以得出什么结论?

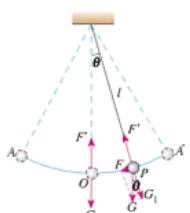


图 11.4-3 单摆的回复力

当角  $\theta$  很小时, 用弧度表示时  $\theta$  与它的正弦  $\sin \theta$  近似相等,  $\theta$  所对的弦长与它所对的弧长也近似相等。这两个关系的严格证明要用到高等数学, 本书不做讨论。



傅科摆。1851 年, 傅科 (J. Foucault) 在巴黎万神殿用长 67 m 的单摆演示了地球自转的效应。摆的周期超过 16 s。

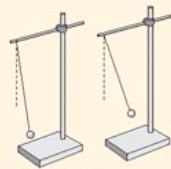


图 11.4-4 单摆振动的周期与什么因素有关?

实验表明：单摆振动的周期与摆球质量无关，在振幅较小时与振幅无关，但与摆长有关，摆长越长，周期也越长。

单摆周期与摆长之间有什么定量的关系？

### 实验

#### 探究单摆周期与摆长的关系

如图11.4.5，细线的上端固定在铁架台上，下端系一个小钢球，于是做成了一个单摆。测量摆长和摆的周期，得到一组数据；改变摆长，再得到几组数据。从中可以找出周期与摆长的关系。

实验过程中要注意以下几点。

##### 1. 摆的振幅不要太大

前面的分析中利用了一些近似条件，这些近似只有当摆的振幅不大时才能成立，否则摆的振动不是简谐运动，周期与摆长的关系将会十分复杂。

##### 2. 摆线和摆球的选择

摆线要尽量选择细些的、伸缩性小些的，并且要尽可能长一些。摆球要尽量选择质量大些的、体积小些的。

为什么这样做？

##### 3. 细线上端的悬挂方式

图11.4.6甲、乙两图画出了细线上端的不同悬挂方式。哪种较好？为什么？

##### 4. 摆长的测量

可以用刻度尺测量细线的长度，用游标卡尺测量小球的直径，算出它的半径，两者之和作为摆长的测量值。

##### 5. 周期测量的要点

按下停表开始计时，再按下停表计时终止。为了测量周期，摆球到达哪个位置的时刻作为计时开始与终止的时刻比较好？图11.4.7给出了两个选择。你选择哪个？说出道理。

可以测量单摆做一次全振动的时间作为它

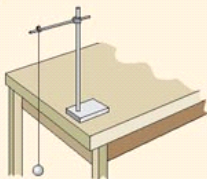


图 11.4.5 测量不同摆长的单摆的周期

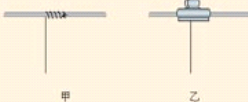


图 11.4.6 细线上端的两种悬挂方式

选择摆线长度和测量摆的周期时，都要考虑到测量的绝对误差和相对误差。建议复习《必修1》后面“学生实验”中的相关知识。

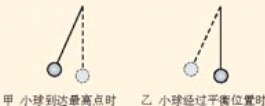


图 11.4.7 哪个位置作为计时的开始与终止更好些？

的周期的测量值；也可以测量单摆做多次全振动（例如几十次）的时间，然后通过计算求出它的周期的测量值。哪个方法比较好？为什么？

#### 6. 数据分析

先通过数据分析，对周期  $T$  与摆长  $l$  的定量关系做出猜测，例如可能是  $T \propto l$ 、 $T \propto l^2$ ，或者  $T \propto \sqrt{l}$ 、 $T \propto \sqrt{l}$ ……然后按照猜测来确定纵坐标轴和横坐标

轴。例如，通过估算我们认为可能是  $T \propto l^2$ ，那么可以用纵坐标表示  $T$ ，横坐标表示  $l^2$ ，作出图象。如果这样作出的图象确实是一条直线，说明的确实有  $T \propto l^2$  的关系，否则再做其他尝试。

设计表格时要注意，表中一定要有原始记录。例如，摆长是由细线长度与小球半径相加得到的，表中不能只出现摆长，一定要有细线长度和球的直径的测量值的记载。

建议在计算机上用  
数表软件处理数据，这  
样节省时间，效果又好。

荷兰物理学家惠更斯曾经详尽地研究过单摆的振动，发现单摆做简谐运动的周期  $T$  与摆长  $l$  的二次方根成正比，与重力加速度  $g$  的二次方根成反比，而与振幅、摆球质量无关。惠更斯确定了计算单摆周期的公式<sup>①</sup>

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

**用单摆测定重力加速度** 由单摆周期公式可得  $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$ ，如果测出单摆的摆长  $l$ 、周期  $T$ ，就可以求出当地的重力加速度。

我们在图 11.4-5 的实验中已经获得了摆长和周期的实验数据，可以从中选择几组，分别计算重力加速度，然后取平均值。

除了计算平均值外，还可以分别以  $l$  和  $T^2$  为纵坐标和横坐标，作出函数  $l = \frac{g}{4\pi^2} T^2$  的图象，它应该是一条直线。根据这条

直线的倾斜程度求出  $\frac{g}{4\pi^2}$ ，进而求出重力加速度  $g$ 。



惠更斯 (Christiaan Huygens, 1629—1695)，荷兰物理学家、天文学家、数学家。

<sup>①</sup>利用高等数学研究单摆的运动就会看到，该式是个近似公式，由它算出的周期与精确值之间的差别随着偏角的增加而增加。当偏角为  $5^\circ$  时两者相差 0.01%， $7^\circ$  时相差 0.1%， $15^\circ$  时相差 0.5%， $23^\circ$  时相差 1%。



## 问题与练习

- 一个理想的单摆, 已知其周期为  $T$ 。如果由于某种原因 (如转移到其他星球) 自由落体加速度变为原来的  $\frac{1}{2}$ , 振幅变为原来的  $\frac{1}{3}$ , 摆长变为原来的  $\frac{1}{4}$ , 摆球质量变为原来的  $\frac{1}{5}$ , 它的周期变为多少?
- 周期是 2 s 的单摆叫做秒摆, 秒摆的摆长是多少? 把一个地球上的秒摆拿到月球上去, 已知月球上的自由落体加速度为  $1.6 \text{ m/s}^2$ , 它在月球上做 50 次全振动要用多少时间?
- 图 11.4.8 是两个单摆的振动图象。  
(1) 甲、乙两个摆的摆长之比是多少?  
(2) 以向右的方向为摆球偏离平衡位置的位移的正方向, 从  $t=0$  起, 乙第一次到达右方最大位移时, 甲振动到了什么位置? 向什么方向运动?
- 一条细线下挂一个小球, 让它自由摆动, 作出它的振动图象如图 11.4.9。问:  
(1) 你能根据图中的数据算出它的摆长吗?  
(2) 你能根据图中的数据估算它振动的最大偏角吗?

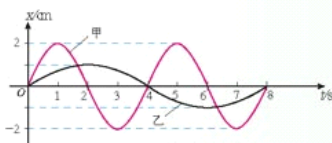


图 11.4-8 两个单摆的振动图象

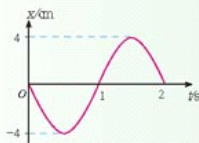


图 11.4-9 一个单摆的振动图象

## 5

## 外力作用下的振动

做简谐运动的物体受到的回复力, 是振动系统内部的相互作用力。如果振动系统不受外力的作用, 此时的振动叫做固有振动, 其振动频率称为固有频率 (natural frequency)。倘若振动系统受到外力作用, 它将如何运动?

**阻尼振动** 振动系统最常见的外力是摩擦力或其他阻力。当系统受到阻力的作用时, 我们说振动受到了阻尼。系统克服阻尼的作用要做功, 消耗机械能, 因而振幅减小, 最后停下来。这种振幅逐渐减小的振动, 叫做阻尼振动 (damped vibration)。图

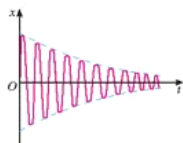


图 11.5-1 阻尼振动的图象

11.5-1 是阻尼振动的图象。

振动系统受到的阻尼越大, 振幅减小得越快。阻尼过大时, 系统不能发生振动。阻尼越小, 振幅减小得越慢, 当阻尼很小时, 在不太长的时间内看不出振幅有明显的减小, 于是可以把它当做简谐运动来处理。前面关于简谐运动的演示就属于这种情形。

设想弹簧振子在泥浆中, 把小球拉开再放开, 它只能缓慢地回到平衡位置, 而不能振荡。

**受迫振动** 阻尼振动最终要停下来, 那么怎样才能产生持续的振动呢? 最简单的办法是使周期性的外力作用于振动系统, 外力对系统做功, 补偿系统的能量损耗, 使系统的振动维持下去。这种周期性的外力叫做驱动力, 系统在驱动力作用下的振动叫做**受迫振动 (forced vibration)**。机器运转时底座发生的振动、扬声器纸盆的振动, 都是受迫振动。

受迫振动的频率与什么因素有关呢?

#### 演示

如图11.5-2, 架子上的电动机向弹簧—小球系统施加周期性的驱动力, 使小球做受迫振动。改变电动机的转速可以调整驱动力的频率。

接通电源, 使小球做受迫振动, 记录驱动力的周期和小球振动的周期。改变驱动力的周期(频率), 再做记录。小球做受迫振动的周期(频率)与驱动力的周期(频率)有什么关系?

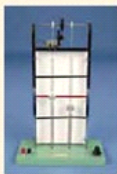


图 11.5-2 研究受迫振动的频率

**共振** 通过以上研究我们知道, 不管系统的固有频率如何, 它做受迫振动的频率总等于驱动力的频率, 与系统的固有频率无关。但是, 在一定驱动力作用下的受迫振动, 其振幅是否也跟它的固有频率无关呢?

#### 实验

如图11.5-3, 在一条张紧的绳子上挂几个摆, 其中A、B的摆长相等。当A摆振动的时候, 通过张紧的绳子给其他各摆施加驱动力, 使其余各摆做受迫振动。驱动力的频率等于A摆的频率。其他各摆的固有频率取决于自己的摆长。

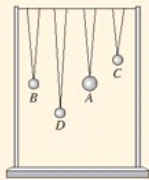


图 11.5-3 观察摆幅的差别

B、C、D 三个摆在驱动力的作用下开始摆动，观察它们振幅的差别。  
三个摆的振幅与它们的固有频率有什么关系？

实验表明，当系统做受迫振动时，如果驱动力的频率十分接近系统的固有频率，系统的振幅会很大。

如果驱动力的频率可以调节，把不同频率的驱动力先后作用于同一个振动系统，其受迫振动的振幅将不同。图 11.5-4 的曲线表示某振动系统的受迫振动的振幅  $A$  随驱动力频率  $f$  变化的关系。可以看出：驱动力频率  $f$  等于系统的固有频率  $f_0$  时，受迫振动的振幅最大，这种现象叫做共振<sup>①</sup> (resonance)。

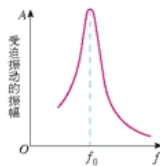


图 11.5-4 共振曲线。当驱动力的频率等于系统的固有频率时，振动的振幅最大。

### 科学漫步

#### 生活中的共振和减振

我国古代对共振早有了解。据《天中记》一书记载，晋初（公元3世纪）时，京城有户人家挂着的铜盘每天早晚轻轻自鸣两次，人们十分惊恐。学者张华判断，这是铜盘与皇宫早晚的钟声共鸣所致。后来把铜盘磨薄一些（改变固有频率），它就不再自鸣了。我国古代乐器的研制，也反映了当时人们对共振的认识。

共振在现代生活中有着许多应用。一些不同长度的钢片安装在同一个支架上，可以制作转速计。把这样的转速计与开动着的机器紧密接触，机器的振动引起转速计的轻微振动，这时固有频率与机器转速一致的那个钢片发生共振，振幅最大。读出这个钢片的固有频率，就知道机器的转速。

共振筛是利用共振现象制成的。把筛子用四根弹簧支起来，在筛架上安装一个偏心轮，就成了共振筛。偏心轮在发动机的带动下转动时，适当调节偏心轮的转速，可以使筛子受到的驱动力的频率接近筛子的固有频率，筛子发生共振，提高了筛选工作的效率。

在某些情况下，共振可能造成损害。军队或火车过桥时，整齐的步伐或车轮对铁轨接头的撞击会对桥梁产生周期性的驱动力，如果驱动力的频率接近桥梁的固有频率，就可能使桥梁的振幅显著

<sup>①</sup>对于有阻尼的真实振动，当驱动力的频率略小于固有频率时，系统的振幅达到最大值，阻尼越大，这两个频率的差别越明显。

增大, 致使桥梁断裂。因此, 部队过桥要便步走, 以免产生周期性的驱动力, 火车过桥要慢速, 使驱动力的频率远小于桥梁的固有频率。

轮船航行时, 如果所受波浪冲击力的频率接近轮船左右摇摆的固有频率, 轮船可能倾覆。这时应该改变航向, 使波浪冲击力的方向与轮船摇摆的方向不一致, 同时要改变航速, 使波浪冲击的频率远离轮船摇摆的固有频率。

机器运转时, 零部件的运动, 如活塞的运动、轮的转动, 会产生周期性的驱动力。如果驱动力的频率接近机器本身或支持物的固有频率, 就会发生共振, 使机器或支持物损坏。这时要采取措施, 如调节机器的转速, 使驱动力的频率与机器或支持物的固有频率不一致。同样, 厂房建筑物的固有频率也不能处在机器转动的频率范围之内。

除了避免共振之外, 有时我们还需要减振, 以降低外界冲击力对物体的破坏作用。减振的思路之一是给被保护的物体加一层减振的阻尼材料, 使冲击过程的机械能尽量多地转化为阻尼材料的内能, 减轻被保护物受到的冲击作用。例如, 用泡沫塑料作为商品的内包装, 就能起到这种作用。

减振的另一个思路是在物体与外界冲击作用之间安装一个“质量—弹簧”系统。对一个周期性变化的驱动力来说, 在一段较长时间内(远大于1周期)内, 其驱动力的平均值是非常小的。外界冲击力作用在一个质量—弹簧系统上时, 如果该系统的固有周期比外界冲击力的周期大很多, 它不会及时地把冲击力传递给物体, 这种延缓的过程实际上对冲击力起到了“平均”的作用。图 11.5-6 是汽车三级减振的示意图。最下面的是由车轮的轴和轮胎组成的第一级质量—弹簧系统, 车身和底座弹簧构成第二级, 乘客和座椅弹簧构成第三级, 这些质量—弹簧系统的固有频率都比较低, 能对来自地面的频率较高的振动起到很好的减振作用。



图 11.5-5 桥梁的共振。1831 年, 一队骑兵通过曼彻斯特附近的一座便桥时, 由于马跨节奏整齐, 桥梁发生共振而断裂(漫画)。



图 11.5-6 汽车的减振系统

## 问题与练习

- 如图 11.5.7 所示, 一个竖直圆盘转动时, 固定在圆盘上的小圆柱带动一个 T 形支架在竖直方向振动, T 形支架的下面系着一个弹簧和小球组成的振动系统, 小球浸没在水中。当圆盘静止时, 让小球在水中振动, 其阻尼振动的频率约为 3 Hz。现使圆盘以 4 s 的周期匀速转动, 经过一段时间后, 小球振动达到稳定, 它振动的频率是多少?
- 如图 11.5.8 所示, 张紧的水平绳上吊着 A、B、C 三个小球, B 靠近 A, 但两者的悬线长度不同; C 远离球 A, 但两者的悬线长度相同。
  - 让球 A 在垂直于水平绳的方向摆动, 将会看到 B、C 球有何表现?
  - 在 C 球摆动起来后, 用手使 A、B 球静止, 然后松手, 又将看到 A、B 球有何表现?
- 汽车的车身是装在弹簧上的, 某车的车身—弹簧系统的固有周期是 1.5 s。这辆汽车在一条起伏不平的路上行驶, 路面凸起之处大约都相隔 8 m。汽车以多大速度行驶时, 车身上下颠簸得最剧烈?
- 图 11.5.9 是一个单摆的共振曲线。
  - 试估计此单摆的摆长。
  - 若摆长增大, 共振曲线的最大值将怎样移动?

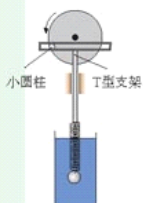


图 11.5.7 小球做受迫振动

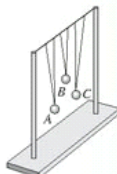


图 11.5.8 判断摆的运动

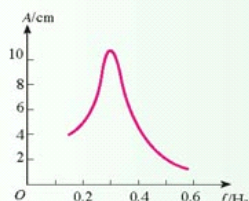


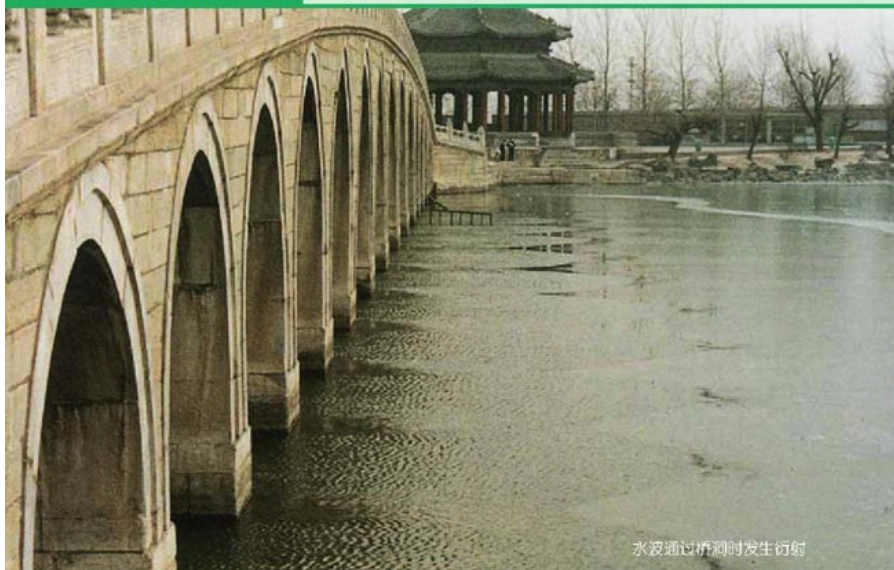
图 11.5.9 单摆的共振曲线



水波离开了它产生的地方，而那里的水并不离开，  
就像风在田野里掀起的麦浪。我们看到，麦浪滚滚地在  
田野里奔去，但是麦子却仍停留在原来的地方。

——达·芬奇<sup>①</sup>

## 第十二章 机械波



水波通过桥洞时发生衍射

有一些概念是如此普遍，其意义是如此深远，以致对于我们还理解不深的某些事物，这些概念也能提供一些重要的情况。在这些概念中，最了不起的应该算是波了。

我们会遇到各种各样的波：具有极大破坏力的地震波、海洋湖泊中的水波、空气中的声波、弥漫在空中的无线电波以及光波……

我们会问：波究竟是什么？不过，还不如问：关于波，我们能够说些什么？

<sup>①</sup>达·芬奇 (Leonardo da Vinci, 1452—1519)，意大利文艺复兴时期的画家、科学家，著名画作有《蒙娜丽莎》等。他对数学、物理学、天文学、地学、生物学、工程学都有研究，对光的波动性、颜色、小孔成像等问题都提出过正确的见解。

这是一个波动的世界：我们每天听到各种声音，我们熟悉水波，知道光波，我们要用到无线电波，还听说过引力波……我们用超声波清洗眼镜，用“B超”诊断疾病……狂风巨浪使船舶颠簸，地震波对建筑物造成破坏……波具有能量、携带信息。我们应该认识波，了解波的特性和规律，以便更好地利用它，并预防和减轻它造成的破坏。

# 1

## 波的形成和传播

**波的形成和传播** 你看过艺术体操中的“带操”表演吗？运动员手持细棒抖动彩带的一端，彩带随之波浪翻卷。这是波在彩带上传播的结果。



图 12.1-1 彩带飞舞，是波在彩带上传播。

### 演示

取一条较长的软绳，用手握住一端拉平后向上抖动一次，可以看到绳上形成一个凸起部分，这个凸起部分向另一端传去。向下抖动一次，可以看到绳上形成一个凹下部分，这个凹下部分也向另一端传去。连续向上、向下抖动长绳，可以看到一列波的传播。

用红颜色在绳上做个标记，在波传播的过程中，这个标记怎样运动？它是否随着波向绳的另一端移动？



图 12.1-2 沿绳传播的波

一条绳子可以分成一个个小段，一个个小段可以看做一个个相连的质点，这些质点之间存在着相互作用。当手握绳端上下振动时，绳端带动相邻的质点，使它也上下振动。这个质点又带动更近一些的质点……绳子上的质点都跟着振动起来，只是后面的质点总比前面的质点迟一些开始振动。这样，绳端这种上下振动的状态就沿绳子传出去了，从整体上看，就是一些凹凸相间的波形。

图 12.1-3 更清楚地描绘了绳中质点的运动与波的传播的关系。最上面一行中的圆点代表绳中的质点，相邻质点之间有相互作用力，这使得一个质点的运动会影响相邻质点的运动。

质点  $P_0$  在沿上下方向振动，依次牵动质点  $P_1, P_2, P_3, \dots$  使它们也运动起来。在  $t = \frac{1}{4}T$  时刻，质点  $P_0$  到达了最高点，而  $P_2$  则刚要开始运动。质点  $P_0$  到达最高点后又开始下落，当  $t = \frac{1}{2}T$  时它又回到平衡位置，而这时  $P_2$  刚刚到达最高点，质点  $P_3$  则刚要开始运动。其他几个图是随后几个时刻各质点的运动情况。

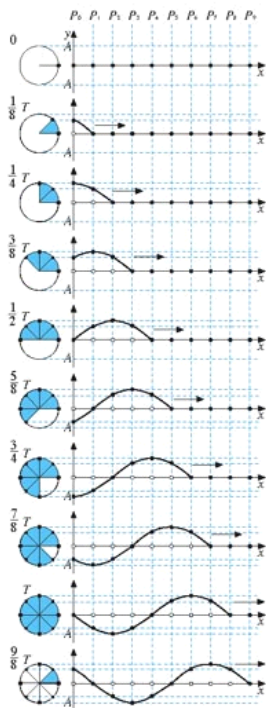


图 12.1-3 横波的形成

### 做一做

一组学生排成一行，从左边第一位同学开始，周期性地下蹲、起立。第二位同学、第三位同学……重复他的动作，只是后边的一位总比前边的一位稍迟一点点。这样就会看到凹凸相间的波沿着队伍传播开来，而每个学生的脚并没有移动（图 12.1-4）。

运动会上的团体操表演，常常用这种办法来表现波浪。



图 12.1-4 学生依次下蹲、起立，看起来好像波浪在前进。



**横波和纵波** 图12.1-3表现的是绳子中传播的波。在这列波中质点上下振动，波向右传播，二者的方向相互垂直。质点的振动方向与波的传播方向相互垂直的波，叫做横波（**transverse wave**）。在横波中，凸起的最高处叫做波峰（**crest**），凹下的最低处叫做波谷（**trough**）。

我们再看另外一种波。

将一根长而软的弹簧水平放于光滑平面，沿着弹簧轴线的方向不断推、拉弹簧，于是产生了弹簧圈密集的部分和弹簧圈稀疏的部分。这样的密集部分和稀疏部分向右传播，在弹簧上形成一列波。

我们把一系列弹簧圈看成一系列质点，它们之间由弹力联系着。手执弹簧左右振动起来以后，前面的质点依次带动后面的质点左右振动，但后一个质点总比前一个质点迟一些开始振动，也就是说，后一个质点振动的相位总比前一个质点落后一些。这样，弹簧一端左右振动的状态就沿弹簧传播开来。从整体上看，就是疏密相间的波在弹簧上传播。

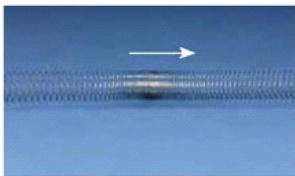


图 12.1-5 纵波的形成

在图 12.1-5 所示的波中，质点左右振动，波向右传播，二者的方向在同一直线上。质点的振动方向与波的传播方向在同一直线上的波，叫做纵波（**longitudinal wave**）。在纵波中，质点分布最密的位置叫做密部，质点分布最疏的位置叫做疏部。

发声体振动时在空气中产生的声波是纵波。例如振动的音叉，它的叉股向一侧振动时，压缩邻近的空气，使这部分空气变密，叉股向另一侧振动时，又使这部分空气变得稀疏。这种疏密相间的状态向外传播，形成声波（图 12.1-6）。声波传入人耳，使鼓膜振动，就引起声音的感觉。声波不仅能在空气中传播，也能在液体、固体中传播。



图 12.1-6 声波

**机械波** 绳上和弹簧上的波是在绳和弹簧上传播的，水波是在水面传播的，声波通常是在空气中传播的。绳、弹簧、水、空气等是波借以传播的物质，叫做介质（**medium**）。组成介质的质点之间有相互作用，一个质点的振动会引起相邻质点的振动。机械振动在介质中传播，形成了机械波（**mechanical wave**）。

介质中有机械波传播时，介质本身并不随波一起传播。例如绳上或弹簧上有波传播时，它们的质点发生振动，但质点并不随波迁移，传播的只是振动这种运动形式。

介质中本来静止的质点，随着波的传来而发生振动，这表示它获得了能量。这个能量是从波源通过前面的质点依次传来的，所以波在传播“振动”这种运动形式的同时，也将波源的能量传递出去。波是传递能量的一种方式。

波不但传递能量，而且可以传递信息。我们用语言进行交流，是利用声波传递信息。广播、电视利用无线电波传递信息，光缆利用光波传递信息。

## 做一做

你面前有一盆平静的水。用笔尖轻点水面，观察水波的产生。

使笔尖周期性地轻点同一处水面，观察水波的传播。

在水面任意位置放一片纸屑，重复前面的操作，观察纸屑的运动。

回答下面的问题：

1. 笔尖在做什么运动？与笔尖接触的水面在做什么运动？
2. 盆中其他位置的水面在做什么运动？
3. 水波向外传播的过程中，纸屑怎样运动？

## 问题与练习

1. 货运列车静止在轨道上，车厢间的挂钩是松驰的。当机车开始倒退时，各车厢依次开始运动，我们会听到“哐、哐……”的响声，这是挂钩压紧时相邻两个车厢碰撞时发出的。如果把挂钩从松驰到压紧的短暂过程比喻为一个脉冲，脉冲向后传播的速度与机车向后运动的速度相同吗？你认为这个现象与空气中传播的声音在哪些方面有相似之处？

2. 举出一个生活中的例子，说明机械波是“质点振动”这种运动形式在介质中的传播，质点并没有迁移。

3. 图12.1-7是某绳波形成过程的示意图。质点1在外力作用下沿竖直方向做简谐运动，带动2、3、4……各个质点依次上下振动，把振动从绳的左端传到右端。已知 $t=0$ 时，质点1开始向上运动； $t=\frac{T}{4}$ 时，1到达最上方，5开始向上运动。问：

(1)  $t=\frac{T}{2}$ 时，质点8、12、16的运动状态（是否运动、运动方向）如何？

(2)  $t=\frac{3T}{4}$ 时，质点8、12、16的运动状态如何？

(3)  $t=T$ 时，质点8、12、16的运动状态如何？



图 12.1-7 绳波的形成

# 2

## 波的图象

过去我们研究的是一个质点的运动情况，波却是很多质点的运动。为了表示这么多质点在同一时刻的运动情况，图象是一个很有用的工具。我们以横波为例研究波的图象。

用横坐标  $x$  表示在波的传播方向上各质点的平衡位置，纵坐标  $y$  表示某一时刻各质点偏离平衡位置的位移。我们还规定，在横波中，位移向上时  $y$  取正值，向下时  $y$  取负值。

把平衡时位于  $x_1, x_2, x_3, \dots$  的质点的位移  $y_1, y_2, y_3, \dots$  画在  $xOy$  坐标平面内，得到一系列坐标为  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), \dots$  的点，这些点的集合就是这一时刻波的图象（图 12.2-1 甲）。

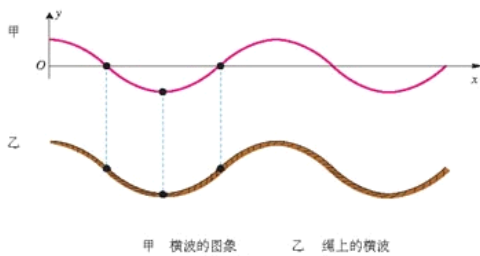


图 12.2-1 横波的图象

波的图象表示的是某个时刻波的状态，就像照相机拍摄的照片。

波的图象有时也称波形图，简称波形。

如果波的图象是正弦曲线，这样的波叫做正弦波（sinusoidal wave），也叫简谐波。可以证明，介质中有正弦波传播时，介质的质点在做简谐运动。

简谐波的波形曲线与质点的振动图象都是正弦曲线，但它们的意义是不同的。波形曲线表示介质中的“各个质点”在“某一时刻”的位移，振动图象则表示介质中“某个质点”在“各个时刻”的位移。

## 问题与练习

1. 简谐横波某时刻的波形如图12.2-2所示,  $P$ 为介质中的一个质点。以下说法正确的是

- A. 若波沿  $x$  轴正方向传播, 则质点  $P$  此刻的速度沿  $x$  轴正方向;  
 B. 若波沿  $x$  轴正方向传播, 则质点  $P$  此刻的加速度沿  $y$  轴正方向;  
 C. 再过半个周期时, 质点  $P$  的位移为负值;  
 D. 经过一个周期, 质点  $P$  通过的路程为  $4a$ 。

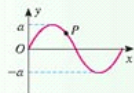


图12.2-2 某横波的图象

2. 一列横波某时刻的波形如图12.2-3甲所示, 图乙表示介质中某质点此后一段时间内的振动图象。

- (1) 若波沿  $x$  轴正方向传播, 图乙为  $K$ 、 $L$ 、 $M$ 、 $N$  四点中哪点的振动图象?  
 (2) 若波沿  $x$  轴负方向传播, 图乙为  $K$ 、 $L$ 、 $M$ 、 $N$  四点中哪点的振动图象?



图12.2-3 横波图象和某点的振动图象

3. 图12.2-4是一列波的图象。

- (1) 如果波沿着  $x$  轴正方向传播,  $K$ 、 $L$ 、 $M$  三个质点, 哪一个最先回到平衡位置?  
 (2) 如果波沿着  $x$  轴负方向传播,  $K$ 、 $L$ 、 $M$  三个质点, 哪一个最先回到平衡位置?

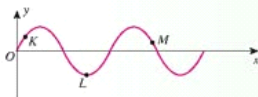
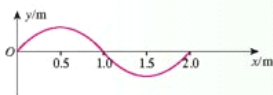


图12.2-4 某简谐横波的图象

4. 图12.2-5的横波正在沿  $x$  轴的正方向传播, 波速为  $0.5 \text{ m/s}$ , 试画出经过  $1 \text{ s}$  后和  $4 \text{ s}$  后的波形曲线。

图12.2-5 沿  $x$  轴正方向传播的横波

# 3

## 波长、频率和波速

我们以横波为例讨论波长。

在图 12.1-3 中, 从  $t=0$  到  $t=T$  这段时间里, 由质点  $P_0$  发出的振动传到质点  $P_8$ , 使质点  $P_8$  开始振动。这时质点  $P_0$  恰好结束了一次全振动而开始下一次全振动, 因而质点  $P_0$  和质点  $P_8$  的振动步调完全一致。也就是说, 这两个质点振动的相位相同, 它们在任何时刻对平衡位置的位移的大小和方向总是相等的。同样, 质点  $P_1$  和  $P_9$ 、 $P_2$  和  $P_{10}$ ……它们每一对在振动中的相位也总是相同的。

在波动中, 振动相位总是相同的两个相邻质点间的距离, 叫做波长(wavelength), 通常用  $\lambda$  表示(图 12.3-1)。

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。

在波动中, 各个质点的振动周期或频率是相同的, 它们都等于波源的振动周期或频率, 这个周期或频率也叫做波的周期或频率。在图 12.1-3 中, 由质点  $P_0$  发出的振动, 经过一个周期  $T$ , 振动在介质中传播的距离等于一个波长  $\lambda$ , 所以机械波在介质中传播的速度为

$$v = \frac{\lambda}{T} \quad (1)$$

由于周期  $T$  与频率  $f$  互为倒数, 即  $f = \frac{1}{T}$ , 所以上式也可以写成

$$v = f\lambda \quad (2)$$

(1)、(2) 两式的关系虽然是从机械波得到的, 但是它对于以后要学习的电磁波也适用。

机械波在介质中的传播速度由介质本身的性质决定, 在不同的介质中, 波速是不同的。下表列出了  $0^\circ\text{C}$  时声波在几种介质中的传播速度。声速还与温度有关, 如  $20^\circ\text{C}$  时空气中的声速为  $344\text{ m/s}$ , 比  $0^\circ\text{C}$  时略大些。

0°C 时几种介质中的声速 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$			
空气	332	玻璃	5 000 ~ 6 000
水	1 450	松木	约 3 320
铜	3 800	软木	430 ~ 530
铁	4 900	橡胶	30 ~ 50

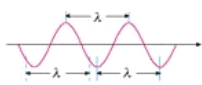


图 12.3-1 波长

在波长的定义中为什么要有“相邻”一词?

在波动图像中, 曲线上相邻两个最大值之间的间隔等于周期  $T$ , 显示出时间的周期性。

在波形曲线中, 曲线上相邻两个最大值之间的间隔等于波长  $\lambda$ , 显示出空间的周期性。

游泳时耳朵在水中听到的音乐与在岸上听到的是一样的,说明机械波从一种介质进入另一种介质,频率并不改变;但由于波速变了,所以波长会改变。

**例题1** 某乐律C调“la”的频率为 $f = 440$  Hz,试求这个乐音在空气中的波长和在水中的波长。

解 根据波速、频率、波长的关系 $v = f\lambda$ ,可以求出波长

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

水中的声速为 $1\,450$  m/s,空气中的声速为 $332$  m/s(设温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),把两个值分别代入上式,得到

$$\lambda_{\text{水}} = \frac{v_{\text{水}}}{f} = \frac{1\,450}{440} \text{ m} = 3.3 \text{ m}$$

$$\lambda_{\text{气}} = \frac{v_{\text{气}}}{f} = \frac{332}{440} \text{ m} = 0.75 \text{ m}$$

通过这个例子可以看出,频率一定的声音,在不同的介质中的波长是不同的。

**例题2** 图12.3-2中的实线是一列正弦波在某一时刻的波形曲线。经 $0.5$  s后,其波形如图中虚线所示。设该波的周期 $T$ 大于 $0.5$  s。

- (1) 如果波是向左传播的,波的速度是多大? 波的周期是多大?
- (2) 如果波是向右传播的,波的速度是多大? 波的周期是多大?

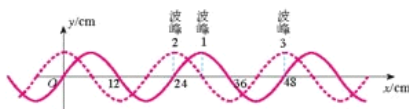


图 12.3-2 一列正弦波的波形曲线

**分析** 根据题意,这列波的周期大于 $0.5$  s,所以经过 $0.5$  s的时间,这列波传播的距离不可能大于一个波长 $\lambda$ 。当波向左传播时,图中的波峰1只能到达波峰2,而不可能向左到达更远的波峰。当波向右传播时,图中的波峰1只能到达波峰3,而不可能向右到达更远的波峰。

已知波传播的时间为 $t = 0.5$  s,由图可以知道波的传播距离 $\Delta x$ ,由公式 $v = \frac{\Delta x}{t}$ 就能够求出波的传播速度 $v$ 。

又,由图可以知道波长 $\lambda$ ,由公式 $v = \frac{\lambda}{T}$ 就能够求出周期 $T$ 。

解 (1) 如果波是向左传播的,从图12.3-2看出,虚线所示的波形相当于实线所示的



波形向左移动了  $6\text{ cm}$  ( $\frac{1}{4}$  个波长), 由此可求出波速的大小

$$v = \frac{\Delta x}{t} = \frac{0.06}{0.5} \text{ m/s} = 0.12 \text{ m/s}$$

波的周期为

$$T = \frac{\lambda}{v} = \frac{0.24}{0.12} \text{ s} = 2.0 \text{ s}$$

(2) 如果波是向右传播的, 从图 12.3-2 看出, 虚线所示的波形相当于实线所示的波形向右移动了  $18\text{ cm}$  ( $\frac{3}{4}$  个波长), 由此可以求出波速的大小

$$v = \frac{\Delta x}{t} = \frac{0.18}{0.5} \text{ m/s} = 0.36 \text{ m/s}$$

波的周期为

$$T = \frac{\lambda}{v} = \frac{0.24}{0.36} \text{ s} = 0.67 \text{ s}$$

### 问题与练习

1. 一个高个子人和一个矮个子人并肩行走 (图 12.3-3), 哪个人的双腿前后交替更为频繁? 如果拿这两个人与两列波做类比, 波长、频率、波速分别可以比做什么?
2. 据你所知, 人能听到的声音的最低频率和最高频率大致各是多少? 你知道自己能听到的声音的最高频率吗? 你认为可以用什么方法来测定?
3. 海面上停着一条船, 一个人观察到每隔  $10\text{ s}$  有一个波峰经过这条船, 他还注意到相邻波峰间的距离大约是  $150\text{ m}$ . 试由这些数据估算海面波浪的速度。
4. 湖面上停着 A、B 两条小船, 它们相距  $20\text{ m}$ . 一列水波正在湖面上传播, 每条小船每分钟上下浮动 20 次. 当 A 船位于波峰时, B 船在波谷, 两船之间还有一个波峰. 求水波的波速。



图 12.3-3 把两个人比做两列波, 波长、频率、波速分别可以比做什么?

5. 第一次测定声音在水中的传播速度是 1827 年在日内瓦湖上进行的 (图 12.3-4): 两条船相距  $14\text{ km}$ , 实验员在一条船上敲响水里的一口钟, 同时点燃船上的火药使其发光; 另一条船上的实验员在看到火药发光后  $10\text{ s}$ , 通过水里的听音器听到了水下的钟声. 试根据这些数据计算水中的声速。



图 12.3-4 第一次测定水中声速的示意图

## 4

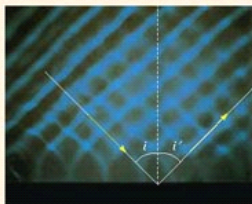
## 波的反射和折射

对着悬崖喊一声,过一小会儿就会听到回声,这是声波在悬崖上的反射。绳子的一端系在墙上,将另一端迅速上下抖动一次,可以看到凸起和凹下部分向墙的方向传播,在到达绳的固定端后又被反射回来。

## 演示

## 观察水波的反射

在水槽的一端放置振动发生器,它的窄条形平板能够周期性地打击水面,产生水波。可以看到,水波传播到挡板后被反射出去。图 12.4-1 中带箭头的直线表示波的传播方向。



12.4-1 水波的反射

为了解释与波的传播相关的现象,惠更斯提出了一个原理,不过在学习这个原理之前先要了解几个概念。

**波面和波线。**假设水面 $O$ 点有一个波源,水波向四周传开。由于向各个方向的波速都一样,所以向四面八方传播的波峰组成了一个圆,波谷也组成了一个圆;实际上,任何振动状态相同的点都组成了一个圆。我们把这些圆叫做一个个波阵面或波面(图 12.4-2),而与波面垂直的那些线代表了波的传播方向,叫做波线。

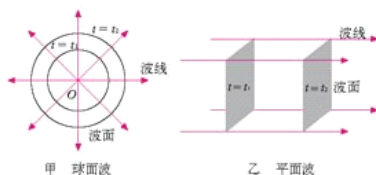


图 12.4-2 波阵面与波线

当然,在水波的例子中,波面还不是面,因为水波只在水面传播。可以想像,对于空间一点发出的球面波,它的波阵面就是以波源为球心的一个个球面,而波线就是这些球面的半径。如果波面是平面,它就是平面波(图 12.4-2 乙)。当然,如果在纸上画出来,平面波的波面只是一条直线。



**惠更斯原理** 惠更斯在 1690 年提出：介质中任一波面上的各点，都可以看做发射子波的波源，其后任意时刻，这些子波在波前进方向的包络面就是新的波面。这就是常说的惠更斯原理（**Huygens principle**）。

如果知道某时刻一列波的某个波面的位置，还知道波速，利用惠更斯原理可以得到下一时刻这个波面的位置，从而确定波的传播方向。下面以球面波为例做些说明。

如图 12.4.3，以  $O$  为球心的球面波在时刻  $t$  的波面为  $\gamma$ ，按照惠更斯原理， $\gamma$  面上每个点都是子波的波源。在  $\Delta t$  时间之后各子波的波面如图中浅色线所示。假设波在同种均匀介质中传播，波向各个方向传播的速度都相等，所以浅色线圆的半径  $v\Delta t$  也都相等。 $\gamma'$  是这些子波波面的包络面，它就是原来球面波的波面  $\gamma$  在时间  $\Delta t$  后的新位置。可以看出，新的波面仍是一个球面，它与原来球面的半径之差为  $v\Delta t$ ，表示波向前传播了  $v\Delta t$  的距离。这个结论与常识一致。

与此类似，可以用惠更斯原理说明平面波的传播（图 12.4.4）。

**波的反射** 用惠更斯原理不但可以说明为什么波在两种介质的界面会发生反射，而且可以得到反射角与入射角的关系。

如图 12.4.5，一列平面波到达两种介质的界面， $AB$  是这列波的一个波面。由于入射波的传播方向与界面并不垂直， $a$ 、 $c$ 、 $b$  三条波线并不同时到达界面，它们到达界面时产生子波的时间也就有先有后，子波传播的距离也就有远有近。当波面上的  $B$  点刚刚到达界面上的  $B'$  点时， $A$ 、 $C'$  两点发出的子波的波面如图中两小段圆弧所示，它们的包络面为图中的  $A'B'$ ，这是反射后新的波面， $a'$ 、 $c'$ 、 $b'$  三条射线与波面  $A'B'$  垂直，是反射波的波线，代表了反射波的传播方向。

下面推导反射角与入射角的关系。

在直角三角形  $AB'B$  与直角三角形  $B'AA'$  中， $AB'$  是公共边，波从  $B$  传播到  $B'$  所用的时间与子波从  $A$  传播到  $A'$  所用的时间是一样的，而波在同种介质中的波速不变，所以  $B'B = AA'$ 。

因此

$$\text{直角三角形 } AB'B \cong \text{直角三角形 } B'AA'$$

惠更斯原理不是从某个定律推导出来的，也不是直接由实验总结出来的，它之所以正确，是因为由它得出的结论都与事实相符。

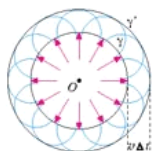


图 12.4.3 用惠更斯原理解释球面波的传播

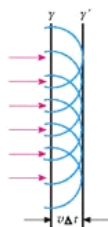


图 12.4.4 用惠更斯原理解释平面波的传播

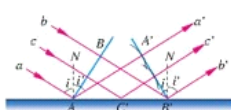


图 12.4.5 用惠更斯原理解释波的反射

所以

$$\angle A'AB' = \angle BB'A$$

从图 12.4-5 看出, 入射角  $i$  和反射角  $i'$  分别为  $\angle BB'A$  和  $\angle A'AB'$  的余角, 所以

$$i' = i$$

也就是说, 在波的反射中, 反射角等于入射角。

在初中学习光学时已经知道了入射角和反射角的概念。类似地, 我们把入射时波线与法线的夹角叫做入射角, 反射时波线与法线的夹角叫做反射角。

**波的折射** 当波由一种介质进入另一种介质时会发生什么现象? 我们尝试用惠更斯原理做出预言。

如图 12.4-6, 一束平面波中的波线  $a$  首先于时刻  $t$  由介质 1 到达界面。波线  $a$  进入介质 2 后, 又经过时间  $\Delta t$ , 波线  $b$  也到达界面。这时  $A$ 、 $C'$  两点发出的子波的波面如图中两小段圆弧所示, 它们的包络面为图中的  $A'B'$ , 这是波进入介质 2 之后的新的波面。由于是两种不同的介质, 其中波的传播速度  $v_1$ 、 $v_2$  不一定相同, 在  $\Delta t$  这段时间内, 两条波线  $a$  和  $b$  前进的距离  $AA'$  和  $BB'$  也不一定相同。因此波进入第二种介质后传播方向常常发生偏折。

波在第 1 种介质中的传播方向 (波线的方向) 与法线间的夹角称为入射角 (incident angle), 如图 12.4-6 中的  $\theta_1$ ; 波进入第 2 种介质后, 它的传播方向 (波线的方向) 与法线间的夹角称为折射角 (refraction angle), 如图 12.4-6 中的  $\theta_2$ 。利用平面几何的知识可以得到折射角  $\theta_2$  与入射角  $\theta_1$  的以下关系

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (1)$$

如果有兴趣, 可以试着证明 (1) 式。

由于一定介质中的波速是一定的, 所以  $\frac{v_1}{v_2}$  是一个只与两种介质的性质有关而与入射角度无关的常数, 叫做第 2 种介质对第 1 种介质的折射率 (refractive index), 以  $n_{12}$  表示<sup>①</sup>

$$n_{12} = \frac{v_1}{v_2} \quad (2)$$

从 (1) 式可以看出, 如果第 2 种介质中的波速小于第一种介质中的波速, 波在进入第 2 种介质后, 传播方向将向法线靠拢。这个结论与实验得到的波的折射定律 (refraction law) 是一致的。

<sup>①</sup> 在国内外各种参考书中, 有的用  $n_{21}$  表示“第 2 种介质对第 1 种介质的折射率”, 有的用  $n_{12}$  表示, 还有的用  $n_1 n_2$  表示。阅读时要通过上下文明确所用符号的意义。本书采用第一种符号。

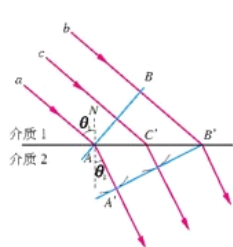


图 12.4-6 用惠更斯原理研究波的折射

做一做

观察水波的折射

在水槽中放入一块厚度均匀的玻璃板，注意使它的一条边不与波传来的方向垂直，如图 12.4.7 中虚线  $a$  所示的位置。然后加水，使水面高出玻璃板。接通电源产生水波，观察水波经过水深不同的区域时传播方向的变化。

通过这个实验，你认为水槽中水波的波速与水的深浅有什么关系？  
海边的波涛，为什么总是沿着与海岸垂直的方向袭来？

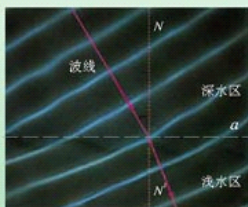


图 12.4.7 观察水波的折射



图 12.4.8 海边波涛涌进的方向总与海岸垂直

科学漫步

回声、混响和建筑声学

各种波在传播过程中如果遇到大的障碍物，都会发生反射，声波也是一样。同学们都有这样的经验，在山谷中大喊一声，过一会儿能够听到回声。知道了声速就可以根据回声到来的时间测出人与山的距离。打雷时听到的隆隆声可以持续很久，原因之一就是声波在地面、云层以及山谷之间发生了多次反射。



回声

声波遇到普通房间的墙壁、地面、天花板也会反射，但是由于回声与原声几乎同时到达，而人耳只能分辨相差 0.1 s 以上的两个声音，所



音乐厅舞台上的声音反射板

以在房间里不能听到回声，但会感到声音比在野外时大些。由于墙壁、地面、天花板对声波的多次反射，当声源停止发声后，声音要经过一段时间才会消失，这种现象叫做混响，这段时间叫做混响时间。混响时间的长短是音乐厅、剧院、礼堂等建筑物的重要声学特性。对讲演厅来说，混响时间不能太长。我们平时讲话，每秒大约发出 2 至 3 个音节，如果混响时间太长，发出下

一个音节的时候上一个音节的声音还很强,那就不容易听清楚。混响时间也不能太短,太短了听起来就像在旷野里说话,同样听不清。北京科学会堂有一个会议厅,坐满人时实测的混响时间是1 s。

音乐厅的最佳混响时间要比会议厅长些,不过也不完全一样。上演轻音乐时,混响时间要短些,这样能使节奏更为鲜明,交响乐的混响时间可以长些,这样听起来更加浑厚有力。北京的首都剧场,坐满观众时的混响时间是1.36 s,空的时候是3.3 s,这是因为满座时人的衣服、皮肤等吸声表面增大,所以混响时间缩短。

高级的音乐厅或剧场,为了不同的要求,需要人工调节混响时间。其中一种办法是改变厅堂的吸声情况。在大厅墙壁上嵌入一组可以转动的圆柱体,柱面的一半是反射面,另一半是吸声面。把反射面转到厅堂内部,混响时间增加,把吸声面转到厅堂外部,混响时间变短。有的剧场座椅的下表面也是软的,没人坐的时候椅面翻起,软面朝向舞台,能够增加吸声的表面,这样可以避免观众较少时混响时间过长。

高水平的音乐会都不使用扩音设备,目的是使观众直接听到舞台上的声音,完整地体会演员表达的情感。为了让全场观众都能清楚地听到较弱的声音,音乐厅的天花板上挂着许多反射板。这些反射板的大小、角度和安放位置都经过精确设计,能把舞台上的声音反射到大厅的各个角落。

处理各种建筑物的声学特性,取得好的声音效果,这门学问叫做建筑声学。

### 问题与练习

- 一个人在高处用望远镜看到,远处地面的木工以每秒一次的频率钉钉子,他听到声音时恰好看到锤子打在钉子上。木工停止敲击后,他还听到一次敲击声,木工离他有多远?
- 一列声波在空气中的波长为25 cm,传播速度为340 m/s。这列声波传入另一介质中时,波长变为80 cm,它在这种介质中的传播速度是多少?
- 如图12.4-9,一列平面波朝着两种介质的界面传播, $A_1A_2$ 是它在介质I中的一个波面, $A_1C_1$ 和 $A_2C_2$ 是它的两条波线,其入射角为 $53^\circ$  ( $\sin 53^\circ$ 取0.8), $C_1$ 和 $C_2$ 位于两种介质的界面上, $B_1B_2$ 是这列平面波进入介质II后的一个波面。已知 $A_1A_2$ 的长度为0.6 m,介质I和介质II中的波速之比为4:3,问: $A_1C_1B_1$ 与 $A_2C_2B_2$ 的长度相差多少?

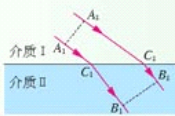


图 12.4-9 平面波经过界面发生折射

# 5

## 波的衍射

在水波槽里，水波遇到挡板会发生反射。如果把挡板换成一个小障碍物，小障碍物的大小比波长还小，水波会绕过它继续传播。在水塘里，微风激起的水波遇到小石、芦苇等细小的障碍物，会绕过它们继续传播，好像它们并不存在。在波的前进方向上放一个有孔的屏，可以看到波通过小孔而在屏的后面各个方向传播。

波可以绕过障碍物继续传播。这种现象叫做波的衍射（diffraction）。

现在用实验研究在什么条件下能够发生明显的衍射现象。

### 演示

在水槽里放两块挡板，中间留一个狭缝，观察水波通过狭缝后的传播情况。

保持水波的波长不变，改变狭缝的宽度，观察水波的传播情况有什么变化。

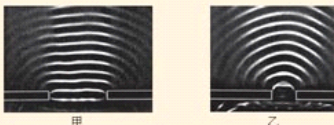


图 12.5-1 波长一定的水波通过宽度不同的狭缝

通过实验可以看到，在狭缝宽度比波长大得多的情况下，波的传播如同光沿直线传播一样，在挡板后面产生“阴影区”（图 12.5-1 甲）；在狭缝宽度与波长相差不多或者狭缝宽度比波长更小的情况下，发生明显的衍射现象，水波可以绕到挡板后面继续传播（图 12.5-1 乙）。

保持狭缝的宽度不变，改变水波的波长，观察波的传播情况有什么变化。图 12.5-2 是实验时拍摄的照片。在甲、乙、丙三幅照片中，波长分别是狭缝宽度的  $\frac{7}{10}$ 、 $\frac{5}{10}$ 、 $\frac{3}{10}$ 。对比这三张照片会再次看到，波长与狭缝宽度相差不多时，有明显的衍射现象，随着波长的减小，衍射现象变得不明显。可以预料，当波长与狭缝宽度相比非常小时，水波将沿直线传播，观察不到衍射现象。

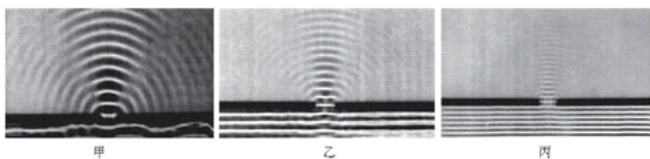


图 12.5-2 波长不同的水波通过宽度一定的狭缝



实验表明,只有缝、孔的宽度或障碍物的尺寸跟波长相差不多,或者比波长更小时,才能观察到明显的衍射现象。

不只是水波,声波也能发生衍射。“闻其声而不见其人”这是司空见惯的现象。通常的声波,波长在 $1.7\text{ cm} \sim 17\text{ m}$ 之间,可以跟一般障碍物的尺寸相比,所以声波能绕过一般的障碍物,使我们听到障碍物另一侧的声音。后面我们将会学到,光也是一种波,光波的波长约在 $0.4 \sim 0.7\ \mu\text{m}$ 的范围内,跟一般障碍物的尺寸相比非常小,所以通常的情况下看不到光的衍射,我们就说光沿直线传播。

一切波都能发生衍射。衍射是波特有的现象。

按照惠更斯原理,波面上的每一点都可以看做子波的波源,位于狭缝的点也是子波的波源,因此,波自然可以到达挡板后的位置(图 12.5.3)。惠更斯原理只能解释波的传播方向,不能解释波的强度,所以无法说明衍射现象与狭缝或障碍物的大小的关系。

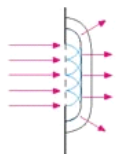


图 12.5.3 用惠更斯原理说明波的衍射

### 说一说

#### 为什么用超声波定位?

医生诊断时用一种俗称“B超”的仪器探测人体内脏的位置,发现可能的病变。这种仪器通过它的探头不断向人体发出短促的超声波(频率很高,人耳听不到的声波)脉冲,超声波遇到人体不同组织的分界面时会反射回来,又被探头接收。这些信号经电子电路处理后可以合成体内脏器的像,医生分析这些影像,做出医学诊断。

说一说,这样的仪器为什么要使用超声波而不用普通的声波?

### 问题与练习

- 以下关于波的衍射的说法,正确的是
  - 波遇到障碍物时,一定会发生明显的衍射现象;
  - 当障碍物的尺寸比波长大得多时,会发生明显的衍射现象;
  - 当孔的大小比波长小时,会发生明显的衍射现象;
  - 通常的讲话产生的声波,经过尺寸为 $1\text{ m}$ 左右的障碍物时会发生明显的衍射现象。

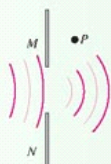


图 12.5.4 水波衍射实验俯视图

- 如图 12.5.4,挡板 $M$ 是固定的,挡板 $N$ 可以上下移动。现在把 $M$ 、 $N$ 两块挡板中的空隙当做一个“小孔”做水波的衍射实验,出现了图示的图样, $P$ 点的水没有振动起来。为了使挡板左边的振动传到 $P$ 点,可以采用什么办法?

## 6

## 波的干涉

**波的叠加** 在介质中常常有几列波同时传播,例如把两块石子在不同的地方投入池塘,就有两列波在水面传播。两列波相遇时,会不会像两个小球相碰时那样,改变各自的运动状态呢?

**演示**

在一根水平长绳的两端分别向上抖动一下,就分别有两个凸起状态 1 和 2 在绳上相向传播(图 12.6-1 甲)。

观察两个凸起随后的传播情况。

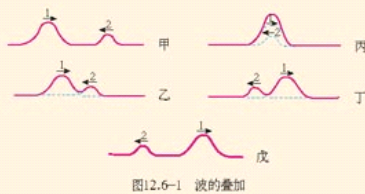


图12.6-1 波的叠加

仔细观察两列相遇的水波,也可以看到,两列水波相遇后彼此穿过,仍然保持各自的运动状态,继续传播,就像没有跟另一列水波相遇一样。

事实表明,几列波相遇时能够保持各自的运动状态,继续传播,在它们重叠的区域里,介质的质点同时参与这几列波引起的振动,质点的位移等于这几列波单独传播时引起的位移的矢量和(图 12.6-1 丙)。

**波的干涉** 两列周期相同的波相遇时,在它们重叠的区域里会发生什么现象?我们先观察,然后再做解释。

**演示**

水槽中,波源是固定在同一振动片上的两根细杆,当振动片振动时,两根细杆周期性地触动水面,形成两个波源。这两个波源发出的是频率相同的波,两列波的振动方向也相同;水面质点的振动都沿上下方向。

这两列波相遇后,在它们重叠的区域形成如图 12.6-2 所示的图样,水面上出现了一条条相对平静的区域和激烈振动的区域,这两种区域在水面上的位置是稳定不变的。



图 12.6-2 水槽中水波的干涉

怎样解释上面观察到的现象呢?

如图 12.6-3 所示,用两组同心圆表示从波源发出的两列波的波面,浅色线圆表示波峰,黑线圆表示波谷。浅色线圆与黑线圆间的距离等于半个波长,浅色线与浅色线、黑线与黑线之间的距离等于一个波长。

如果在某一时刻,水面上的某一点(例如图中的  $M$  点)是两列波的波峰与波峰相遇,那么经过半个周期,一定是波谷与波谷相遇。波峰与波峰相遇时,质点向上的位移最大,等于两列波的振幅之和;波谷与波谷相遇时,尽管质点的位移是向下的,但也是最大,也等于两列波的振幅之和。因此,在这一点,两列波引起的振动始终是加强的,质点的振动最剧烈,振动的振幅等于两列波的振幅之和。

如果在某一时刻,水面上的某一点(例如图中的  $N$  点)是两列波的波峰与波谷相遇,经过半个周期,就变成波谷与波峰相遇。在这一点,两列波引起的振动始终是相互削弱的,质点振动的振幅等于两列波的振幅之差。如果两列波的振幅相同,质点振动的合振幅就等于零,水面保持平静。

在图 12.6-3 中,浅色线圆与浅色线圆的交点,或者黑线圆与黑线圆的交点,是振动的加强区,它们连成的区域用粗实线画出;浅色线圆与黑线圆的交点为振动的减弱区,它们连成的区域用粗虚线画出。从图中可以看出,情况与实验结果是一致的。

可见,频率相同的两列波叠加,使某些区域的振动加强、某些区域的振动减弱,这种现象叫做波的干涉 (interference),形成的图样常常称为干涉图样。

产生干涉的必要条件是,两列波的频率必须相同。如果两列波的频率不同,相互叠加时各个质点的振幅是随时间变化的,不会出现振动总是加强或总是减弱的区域,因而不能产生稳定的干涉图样。

不仅水波,声波、电磁波等一切波都能发生干涉。跟衍射一样,干涉也是波特有的现象。

### 做一做

#### 操场上声音的干涉

在操场上安装两个相同的扬声器,并且使它们由同一个信号源带动,发出相同频率的声音。同学们分成两组,手持不同颜色的标志(如  $A$  组持白,  $B$  组持黑),分散在操场上两个扬声器之间,注意听扬声器发出的声音,并且小范围地移动。 $A$  组同学移动到声音最大位置停住,  $B$  组同学移动到声音最小(或听不到声音)位置停住。找到位置后都把标志举起,看看  $A$  组和  $B$  组同学所在位置的分布有什么规律。

这个实验成功的关键是:操场附近没有高大建筑物,并且只安装两个扬声器。

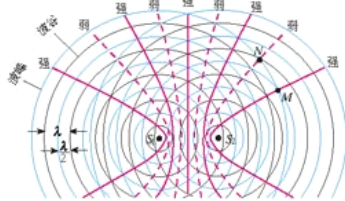


图 12.6-3 波的干涉的示意图

## 问题与练习

1. 当两列水波发生干涉时, 如果两列波的波峰在  $P$  点相遇, 下列说法正确的是

- A. 质点  $P$  的振动始终是加强的;
- B. 质点  $P$  的振幅最大;
- C. 质点  $P$  的位移始终最大;
- D. 质点  $P$  的位移有时为零。

2. 图 12.6-4 表示两列频率相同的横波相遇时某一时刻的情况, 实线表示波峰, 虚线表示波谷。

(1) 请描述一个周期内  $M$ 、 $N$  两个质点的运动情况。

(2) 用空心小圆圈把半个周期后图中具有最大正位移的点标出来, 用实心小圆点把半个周期后图中具有最大负位移的点标出来。

(3) 把图中比较“平静”的地方用虚线标出来。

3. 在图 12.6-4 所描述的时刻,  $M$  是波峰与波峰相遇的点, 是凸起最高的位置之一。

(1) 随着时间的推移, 这个凸起最高的位置在向哪个方向移动? 是不是  $M$  质点在那个方向迁移?  $M$  质点在哪个方向上运动?

(2) 请指出图中哪个位置是凹下最低的位置(只要指出一个)。随着时间的推移, 这个凹下最低的位置在向哪个方向移动?

(3) 由图中时刻经过  $\frac{T}{4}$  时,  $M$  质点的位移是多大?

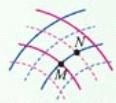


图 12.6-4 两列频率相同的横波相遇

## 7

## 多普勒效应

## 演示

## 蜂鸣器音调的变化

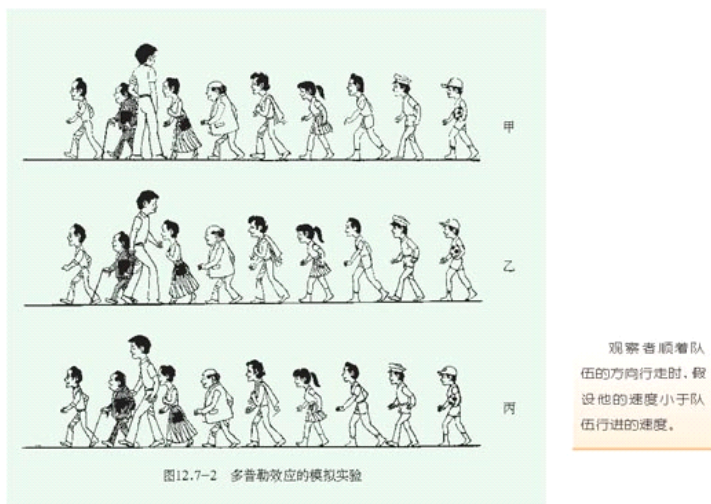
将一个以电池做电源的蜂鸣器固定在长竹竿的一端, 闭合开关后听一听它发出的声音。用竹竿把蜂鸣器举起后在头顶快速转动(图 12.7-1), 听听它的声音有什么变化。



图 12.7-1 蜂鸣器的声音有什么变化?

同学们可能注意过这样的现象：当一辆汽车响着喇叭从你身边疾驶而过的时候，喇叭的音调会由高变低，好像汽车驶来的时候唱着音符“ $\hat{1}$ ”，离开的时候就唱音符“7”了。1842年，奥地利物理学家多普勒带着女儿在铁道旁散步时就注意到了类似的现象，他经过认真的研究，发现波源与观察者互相靠近或者互相远离时，接收到的波的频率都会发生变化，并且做出了解释。人们把这种现象叫做多普勒效应（Doppler effect）。

要了解多普勒效应，可以做如下的模拟实验。让一队人沿街行走，观察者站在街旁不动，假设每分钟有30个人从他身边通过（图12.7-2甲），这种情况下的“过人频率”是30人每分。如果观察者逆着队伍行走，每分钟与观察者相遇的人数增加，也就是频率增加（图12.7-2乙）；反之，如果观察者顺着队伍行走，频率降低（图12.7-2丙）。



对于声波和其他波动，情况相似：当波源与观察者相对静止时，1s内通过观察者的波峰（或密部）的数目是一定的，观察到的频率等于波源振动的频率；当波源与观察者相向运动时，1s内通过观察者的波峰（或密部）的数目增加，观察到的频率增加；反之，当波源与观察者互相远离时，观察到的频率变小。

多普勒效应在科学技术中有广泛的应用。交通警向行进中的车辆发射频率已知的超声波，同时测量反射波的频率，根据反射波频率变化的多少就能知道车辆的速度。装有多普勒测速仪的监视器有时就装在公路上方，在测速的同时把车辆牌号拍摄下来，并把测得的速度自动打印在照片上。



宇宙中的星球都在不停地运动。测量星球上某些元素发出的光波的频率，然后与地球上这些元素静止时发光的频率对照，就可以算出星球靠近或远离我们的速度。

医生向人体内发射频率已知的超声波，超声波被血管中的血流反射后又被仪器接收。测出反射波的频率变化，就能知道血流的速度。这种方法俗称“彩超”，可以检查心脏、大脑和眼底血管的病变。



多普勒测速仪测量水在河底的流速，为养殖场寻找适合鲜蚕生长的场所。

## 科学漫步

### 超声波

人耳最高只能感觉到大约 20 000 Hz 的声波，频率更高的声波就是超声波（supersonic wave）了。超声波广泛地应用在多种技术中。

与可闻声相比，超声波有两个特点：一个是比较容易地产生大功率的超声波，一个是它几乎沿直线传播。超声波的应用就是按照这两个特点展开的。

理论研究表明，在振幅相同的情况下，一个物体振动的能量与振动频率的二次方成正比。超声波在介质中传播时，介质质点振动的频率很高，因而能量很大。在我国北方干燥的冬季，如果把超声波通入水罐中，剧烈的振动会使罐中的水破碎成许多小雾滴，再用小风扇把雾滴吹入室内，就可以增加室内空气的湿度。这就是超声波加湿器的原理。对于咽喉炎、气管炎等疾病，药品很难通过血流达到患病的部位。利用加湿器的原理，把药液雾化，让病人吸入，能够增进疗效。利用超声波的巨大能量还可以使人体内的结石做剧烈的受迫振动而破碎。

金属零件、玻璃和陶瓷制品的除垢是件麻烦事。如果把这些物品放入清洗液中，再通入超声波，清洗液的剧烈振动冲击物品上的污垢，能够很快清洗干净。

有人在墙的一侧说话，另一侧的人也能听到，这是波的衍射现象。我们已经知道，与障碍物的尺寸相比，波长越短，衍射现象越不明显。超声波的频率很高，波长很短，所以它基本上是沿直线传播的，可以定向发射。如果渔船载有水下超声波发生器，它旋转着向各个方向发射超声波，超声波遇到鱼群会反射回来，渔船探测到反射波就知道鱼群的位置了。这种仪器叫做声呐（sonar）。声呐也可以用来探测水中的暗礁、潜艇、测量海水的深度。



超声波鱼群探测仪

根据同样的道理也可以用超声波探测金属、陶瓷、混凝土制品，甚至水库大坝，检查内部是否有气泡、空洞和裂纹。

有趣的是很多动物都有完善的发射和接收超声波的器官。以昆虫为食的蝙蝠，视觉很差，飞行中不断发出超声波的脉冲，依靠昆虫身体的反射波来发现食物。海豚也有完善的“声呐”系统，使它能在混浊的水中准确地确定远处小鱼的位置。

现代的无线电定位器——雷达，质量有几十、几百、几千千克，蝙蝠的超声定位系统只有几分之一克，而在一些重要性能上，如确定目标方位的精确度、抗干扰的能力等，蝙蝠远优于现代的无线电定位器。深入研究动物身上各种器官的功能和构造，将获得的知识用来改进现有的设备和创新的设备，这是近几十年来发展起来的一门新学科，叫做仿生学。

问题：除了上文提到的以外，你还知道哪些超声波应用的实例？列举两个，分别说明它们利用了超声波的哪方面的特点。

### 问题与练习

- 为了理解多普勒效应，可以设想一个抛球的游戏。设想甲每隔1s向乙抛一个球，如果甲、乙都站着不动，乙每隔1s接到一个球。如果甲抛球时仍然站着不动，而乙以一定速度向甲运动，这时乙是否仍然每隔1s接到一个球？
- 火车上有一个声源发出频率一定的乐音。当火车静止，观察者也静止时，观察者听到并记住了这个乐音的音调。以下情况中，观察者听到这个乐音的音调比原来降低的是
  - 观察者静止，火车向他驶来；
  - 观察者静止，火车离他驶去；
  - 火车静止，观察者乘汽车向着火车运动；
  - 火车静止，观察者乘汽车远离火车运动。
- 在有搜索功能的网站上键入“多普勒”一词，查找多普勒效应的应用，并写出一篇介绍文章，全班同学交流。



抛球时两人站着不动



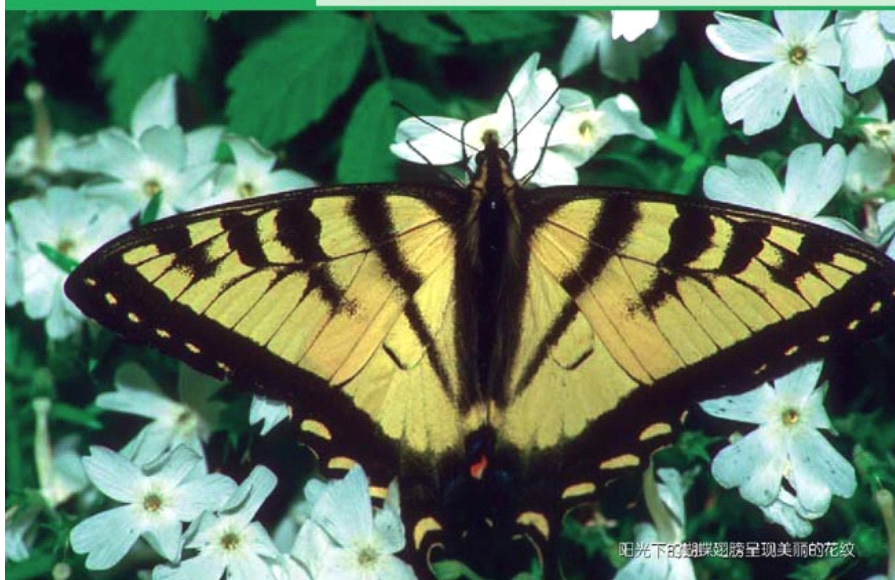
抛球时乙向甲跑来

图12.7-3 两种情况下小人每秒接球的个数相同吗？

固执于光的旧有理论的人们，最好是从它自身的原理出发，提出实验的说明。并且，如果他的这种努力失败的话，他应该承认这些事实。

——托马斯·杨<sup>①</sup>

## 第十三章 光



阳光下的蝴蝶翅膀呈现美丽的花纹

光给了我们一个明亮的世界，可是它自己却像一团谜。人们不断争论着关于光的问题。光学既是物理学中一门古老的基础科学，又是现代科学领域中最活跃的前沿科学之一，具有强大的生命力和不可估量的发展前景。

按照不同的研究目的，光学可以粗略地分为两大分支：一支利用几何学的概念和方法研究光的传播规律，称为几何光学；另一支主要研究光的本性以及光与物质相互作用的规律，通常称为物理光学。我们先学习几何光学，然后学习物理光学。

<sup>①</sup>托马斯·杨 (T.Young, 1773—1829)，英国物理学家、考古学家、医生，光的波动说的奠基人之一。

光到底是什么？这个问题早就引起了人们的注意，不过在很长的时期内对它的认识却进展得很慢。

到 17 世纪时，科学界已经形成了两种学说：一种是微粒说，认为光是从光源发出的一种物质微粒，在均匀的介质中以一定的速度传播；另一种是波动说，是惠更斯首先提出的，认为光是在空间传播的某种波。微粒说和波动说都能解释一些光现象，但又不能解释当时观察到的全部光现象。

到了 19 世纪初，人们在实验中观察到了光的干涉和衍射现象，这是波动的特征，不能用微粒说解释，因而证明了波动说的正确性。19 世纪 60 年代，麦克斯韦预言了电磁波的存在，并认为光也是一种电磁波。此后，赫兹在实验中证实了这种假说，这样，光的电磁说使光的波动理论发展到相当完美的地步，取得了巨大的成功。

但是，19 世纪末又发现了新的现象——光电效应，这种现象用波动说无法解释。爱因斯坦于 20 世纪初提出了光子说，认为光具有粒子性，从而解释了光电效应。不过，这里所说的光子已经不同于过去所说的“微粒”了。

现在人们认识到，光既具有波动性，又具有粒子性。

# 1

## 光的折射

**折射定律** 阳光能够照亮水中的鱼和水草，同时我们也能通过水面看到烈日的倒影，这说明：光从空气射到水面时，一部分光射进水中，另一部分光返回到空气中。一般说来，光从第 1 种介质射到它与第 2 种介质的分界面时，一部分光会返回到第 1 种介质，这个现象叫做光的**反射 (reflection)**；另一部分光会进入第 2 种介质，这个现象叫做光的**折射 (refraction)**。

光从一种介质射到两种介质的分界面时发生反射，**反射光线与入射光线、法线处在同一平面内。反射光线与入射光线分别位于法线的两侧。反射角等于入射角。这就是光的反射定律 (reflection law)。**

光在折射时遵循哪些规律呢？

如图 13.1-2，让窄光束由一种介质斜射向另一种介质表面，例如，从空气射向水，或从水射向玻璃，我们研究入射光的折射情况。图中入射光线与法线间的夹角  $\theta_1$  叫做**入射角**，折射光线与法线间的夹角  $\theta_2$  叫做**折射角**。实验表明，当入射角变化时折射角随着改变。但是折射角与入射角之间有什么

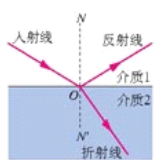


图 13.1-1 光的反射和折射同时存在

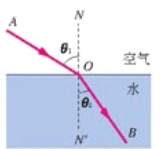


图 13.1-2 光的折射



定量的关系呢？

直到1621年，荷兰数学家斯涅耳在分析了大量数据后终于找到了两者之间的关系，并把它总结为光的折射定律（refraction law）：折射光线与入射光线、法线处在同一平面内，折射光线与入射光线分别位于法线的两侧，入射角的正弦与折射角的正弦成正比。即

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = n_{12} \quad (1)$$

式中  $n_{12}$  是比例常数。

### 说一说

我们在上一章研究波的折射时已经见过这个等式，那是从惠更斯原理得出的推论，而这里的(1)式是由实验得出来的。由此我们是否可以推测：光可能是一种波，我们常说的“光线”就是光波的波线？

所有事实都表明，在光的折射现象中，当光从水射向空气后（图13.1-2）也会发生偏折，而且光线沿  $BO$  的方向进入空气时，会沿  $OA$  的方向射出。也就是说，与光的反射现象一样，在光的折射现象中，光路也是可逆的。

光路可逆现象很有用处。例如，我们只对光从空气射入介质的情况做过深入的研究，但如果遇到光从介质射入空气的问题，由于光路可逆，也能得出结论。

**折射率** 光从第1种介质射入第2种介质时，入射角的正弦与折射角的正弦之比  $n_{12}$  是个常数，它与入射角、折射角的大小无关，只与两种介质的性质有关。在实际应用中，遇到最多情形是光从空气射入某种介质，或从某种介质射入空气，而空气对光的传播的影响很小，可以作为真空处理。因此，以后我们只讨论光从真空射入介质的情形。这时，常数  $n_{12}$  可以简单地记为  $n$ 。

对于不同的介质来说，常数  $n$  是不同的。例如，光从空气射入水中时， $n = 1.33$ ；光从空气射入某种玻璃时， $n = 1.50$ 。可见常数  $n$  与介质有关系，是一个反映介质的光学性质的物理量。常数  $n$  越大，光线从空气斜射入这种介质时偏折的角度越大。

光从真空射入某种介质发生折射时，入射角的正弦与折射角的正弦之比，叫做这种介质的绝对折射率，简称折射率（refractive index），用符号  $n$  表示。

研究表明，光在不同介质中的速度不同；某种介质的折射率，等于光在真空中的传播速度  $c$  与光在这种介质中的传播速度  $v$  之比，即

$$n = \frac{c}{v} \quad (2)$$



由于光在真空中的传播速度  $c$  大于光在任何其他介质中的传播速度  $v$ ，因而任何介质的折射率  $n$  都大于 1。所以，光从真空射入任何介质时， $\sin \theta_1$  都大于  $\sin \theta_2$ ，即入射角总是大于折射角。下表列出了几种介质的折射率

(2) 式也与惠更斯原理的结论一样，见第十二章第 4 节。

表 1 几种介质的折射率

介质	折射率	介质	折射率
金刚石	2.42	岩盐	1.55
二硫化碳	1.63	酒精	1.36
玻璃	1.5~1.8	水	1.33
水晶	1.55	空气	1.000 28

### 说—说

光从介质 1 射入介质 2 (二者都不是真空)，可能有几种折射情况？

### 实验

#### 测定玻璃的折射率

如图 13.1-3，当光以一定的入射角透过一块玻璃砖时，只要找出与入射光线  $AO$  相对应的出射光线  $O'D$ ，就能够画出光从空气射入玻璃后的折射光线  $OO'$ ，于是就能测量入射角  $\theta_1$ 、折射角  $\theta_2$ 。根据折射定律，就可以求出玻璃的折射率了。

怎样确定与入射光线  $AO$  相对应的折射光线  $OO'$ ？

把玻璃砖放在木板上，下面垫一张白纸，在纸上描出玻璃砖的两个边  $a$  和  $a'$ 。然后，在玻璃砖的一侧插两个大头针  $A$ 、 $B$ ， $AB$  的延长线与直线  $a$  的交点就是  $O$ 。

眼睛在另一侧透过玻璃砖看两个大头针，使  $B$  把  $A$  挡住 (图 13.1-3)。如果在眼睛这一侧再插第三个大头针  $C$ ，使它把  $A$ 、 $B$  都挡住，插第四个大头针  $D$ ，使它把前三个都挡住，那么后两个大头针就确定了从玻璃砖射出的光线。

在白纸上描出光线的径迹，测量相应的角度，就能计算玻璃的折射率了。

实验中，应该采取哪些措施以减小误差？

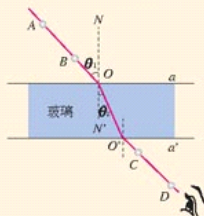


图 13.1-3 测定玻璃的折射率

**例 题** 如图 13.1.4 所示, 一个储油桶的底面直径与高均为  $d$ 。当桶内没有油时, 从某点  $A$  恰能看到桶底边缘的某点  $B$ 。当桶内油的深度等于桶高的一半时, 仍沿  $AB$  方向看去, 恰好看到桶底上的点  $C$ ,  $C$ 、 $B$  两点相距  $\frac{d}{4}$ 。求油的折射率和光在油中传播的速度。

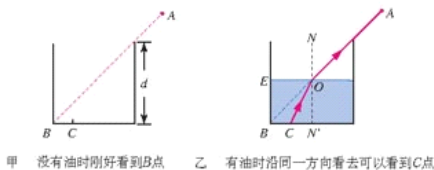


图 13.1.4 计算油的折射率和油中的光速

**分析** 在图乙中过直线  $AB$  与油面的交点  $O$  做油面的垂线, 交桶底于  $N'$  点。此题是说, 来自  $C$  点的光线沿  $CO$  到达油面后沿  $OA$  方向射入空气。折射现象中光路是可逆的, 因此如果光线沿  $AO$  方向由空气射到油面, 折射光将沿  $OC$  进入油中。以  $\angle AON$  作为入射角, 以  $\angle CON'$  作为折射角, 由折射定律可以求出油的折射率  $n$ 。

**解** 因为底面直径与桶高相等, 所以

$$\angle AON = \angle BON' = 45^\circ$$

由  $ON' = 2CN'$  可知

$$\sin \angle CON' = \frac{CN'}{\sqrt{CN'^2 + ON'^2}} = \frac{1}{\sqrt{5}}$$

因此, 油的折射率

$$n = \frac{\sin \angle AON}{\sin \angle CON'} = \frac{\frac{\sqrt{2}}{2}}{\frac{1}{\sqrt{5}}} = \sqrt{\frac{5}{2}} = 1.58$$

光在油中的传播速度

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3.0 \times 10^8}{1.58} \text{ m/s} = 1.9 \times 10^8 \text{ m/s}$$

## 问题与练习

1. 图 13.1-5 是光由空气射入半圆形玻璃砖, 再由玻璃砖射入空气的光路图,  $O$  点是半圆形玻璃砖的圆心, 猜出哪些情况是可能发生的, 哪些情况是不可能发生的。
2. 光以  $60^\circ$  的入射角从空气射入折射率  $n = \sqrt{3}$  的玻璃中, 折射角是多大? 画出光路图。
3. 根据水和水晶的折射率, 分别算出光在其中的传播速度。水中的光速大约是真空中的光速的几分之几?
4. 图 13.1-6 是光由空气射入某种介质时的折射情况, 试由图中的数据求出这种介质的折射率和这种介质中的光速。
5. 图 13.1-7 是射水鱼在水中准确射中水面上约 1 m 远的小昆虫的照片, 请你利用光的折射的知识分析, 水中的鱼看到小昆虫的位置是在实际昆虫的上方还是下方?
6. 关于图 13.1-3 测定玻璃折射率的实验, 回答以下问题。
  - (1) 证明图中的入射光线与射出玻璃砖的光线是平行的。
  - (2) 如果光射入和射出玻璃的两个平面是平行的, 射出玻璃砖的光线相对入射光线来说产生了侧移。证明: 入射角越大侧移越大。
  - (3) 为减小实验误差, 入射角大一些好还是小一些好?

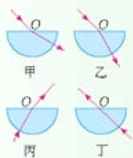


图 13.1-5 哪些情况可能发生?

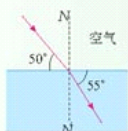


图 13.1-6 求介质的折射率



图 13.1-7 射水鱼射中小昆虫

## 2

## 光的干涉

**杨氏干涉实验** 如果光真的是一种波, 两束光在一定的条件下应该发生干涉。1801年, 英国物理学家托马斯·杨成功地观察到了光的干涉现象。

## 演示

## 光的双缝干涉实验

在暗室中用氦氖激光器发出的红色激光照射金属挡板上的两条平行的狭缝(图13.2-1甲)、在后面的屏上观察光的干涉情况(图13.2-1乙)。

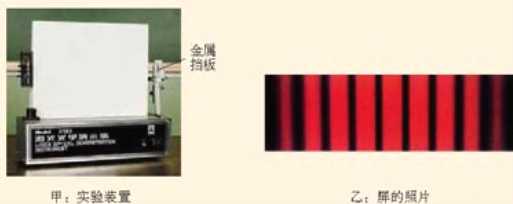


图13.2-1 用氦氖激光器做双缝干涉实验

如图13.2-2,让一束单色光投射到一个有两条狭缝 $S_1$ 和 $S_2$ 的挡板上,狭缝 $S_1$ 和 $S_2$ 相距很近。如果光是一种波,狭缝就成了两个波源,它们的振动情况总是相同的。这两个波源发出的光在挡板后面的空间互相叠加,发生干涉现象:光在一些位置相互加强,在另一些位置相互削弱,因此在挡板后面的屏上得到明暗相间的条纹。

杨氏实验证明,光的确是一种波。

**决定条纹间距的条件** 如图13.2-3所示, $S_1$ 和 $S_2$ 相当于两个频率相同的波源,它们到屏上 $P_0$ 点的距离相同。由于 $S_1$ 和 $S_2$ 发出的两列波到达 $P_0$ 点的路程一样,所以这两列波的波峰或波谷同时到达 $P_0$ 点。在这点,两列波的波峰与波峰叠加、波谷与波谷叠加,它们在此点相互加强,因此这里出现亮条纹。

再考察 $P_0$ 点上方的另外一点,例如 $P_1$ 。它距 $S_2$ 比距 $S_1$ 远一些,两列波到达 $P_1$ 点的路程不相同,两列波的波峰或波谷不一定同时到达 $P_1$ 。如果路程差正好是半个波长,那么当一列波的波峰到达 $P_1$ 时,另一列波正好在这里出现波谷。这时两列波叠加的结果是互相抵消,于是这里出现暗条纹。

对于更远一些的点,例如 $P_2$ ,来自两个狭缝的光波的

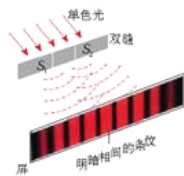


图13.2-2 杨氏双缝干涉的示意图

杨氏那时没有激光,他用强光照亮一条狭缝,通过这条狭缝的光再通过双缝,发生干涉,如今用激光直接照射双缝,亮度大,便于观察。

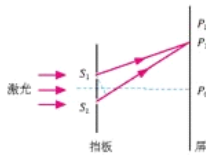


图13.2-3 距离中心 $P_0$ 点越远的点,两条狭缝射来的光的路程差越大。

路程差更大。如果路程差正好等于波长 $\lambda$ ，那么，两列光波的波峰或波谷会同时到达这点，它们相互加强，这里也出现亮条纹。距离屏的中心越远，路程差越大。每当路程差等于 $\lambda$ ， $2\lambda$ ， $3\lambda$ ， $\dots$ 时，也就是每当路程差等于 $\frac{2\lambda}{2}$ ， $\frac{4\lambda}{2}$ ， $\frac{6\lambda}{2}$ ， $\dots$ 时两列光波得到加强，屏上出现亮条纹；每当路程差等于 $\frac{\lambda}{2}$ ， $\frac{3\lambda}{2}$ ， $\frac{5\lambda}{2}$ ， $\dots$ 时，两列光波相互削弱，屏上出现暗条纹。

综合以上分析，可以说，当两个光源与屏上某点的距离之差等于半波长的偶数倍时（即恰好等于波长的整数倍时）两列光在这点相互加强，这里出现亮条纹；当两个光源与屏上某点的距离之差等于半波长的奇数倍时，两列光在这点相互削弱，这里出现暗条纹。

### 做一做

可以用自制的器材来观察双缝干涉现象。取经过曝光的黑色摄影胶片，放在玻璃板上。把两只剃须刀片并拢，以刀刃的前端沿直尺在胶片上一次划出两道细缝，缝间距离小于 $0.1\text{ mm}$ ，这样就做成了双缝。也可以取一小块玻璃片，用蜡烛火焰熏黑，然后用刀片以同样方法划出两道透光的狭缝。

通过双缝观看大约 $0.5\text{ m}$ 以外的白炽灯的灯丝，可以看到在灯丝两侧细密地分布着彩色的干涉条纹。双缝离灯越近，干涉条纹越清晰。

“两个光源与屏上某点的距离之差等于半波长的偶数倍”，包括了“距离之差为零”这种情况。这时在 $P_0$ 点出现亮条纹。

既然光是一种波，为什么同时打开两盏灯时观察不到干涉现象？稍后学习激光时我们会做些粗浅的讨论。

### 问题与练习

1. 光的干涉现象对认识光的本性有什么意义？

2. 两列光干涉时，光屏上的亮条纹和暗条纹到两个光源的距离与波长有什么关系？

声的干涉也遵从类似的规律。设想在空旷的地方相隔一定位置有两个振动完全一样的声源，发出的声波波长是 $0.6\text{ m}$ ，观察者A离两声源的距离分别是 $4.5\text{ m}$ 和 $5.4\text{ m}$ ，观察者B离两声源的距离分别是 $4.3\text{ m}$ 和 $5.5\text{ m}$ ，这两个观察者听到声音的大小有什么区别？

3. 在双缝干涉实验中，光屏上某点P到双缝 $S_1$ 、 $S_2$ 的路程差为 $7.5 \times 10^{-7}\text{ m}$ ，如果用频率 $6.0 \times 10^{14}\text{ Hz}$ 的紫光照射双缝，试通过计算分析P点出现的是亮条纹还是暗条纹。



## 3

## 实验：用双缝干涉测量光的波长

**实验原理** 如图 13.3-1，与两缝之间的距离  $d$  相比，每个狭缝都很窄，宽度可以忽略。两缝  $S_1$ 、 $S_2$  的连线的中垂线与屏的交点为  $P_0$ ，双缝到屏的距离  $OP_0 = l$ 。

我们考察屏上与  $P_0$  的距离为  $x$  的一点  $P_1$ ，两缝与  $P_1$  的距离分别为  $P_1S_1 = r_1$ 、 $P_1S_2 = r_2$ 。

在线段  $P_1S_2$  上作  $P_1M = P_1S_1$ ，于是  $S_2M = r_2 - r_1$ 。由于两缝之间的距离  $d$  远远小于缝到屏的距离  $l$ ，所以能够认为三角形  $S_1S_2M$  是直角三角形。根据三角函数的关系，有

$$r_2 - r_1 = d \sin \theta$$

另一方面

$$x = l \tan \theta \approx l \sin \theta$$

消去  $\sin \theta$ ，有

$$r_2 - r_1 = d \frac{x}{l}$$

根据上一节的分析，当两列波的路程差为波长的整数倍，

即  $d \frac{x}{l} = \pm k\lambda$ ，( $k = 0, 1, 2, \dots$ ) 时才会出现亮条纹，也就

是说，亮条纹中心的位置为

$$x = \pm k \frac{l}{d} \lambda$$

相邻两个亮条纹或暗条纹的中心间距是

$$\Delta x = \frac{l}{d} \lambda \quad (1)$$

根据这个公式可以测出波长。

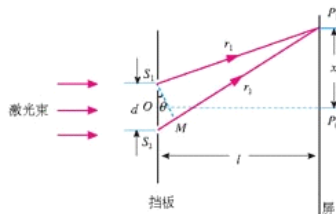


图 13.3-1 导出相邻亮条纹距离的表达式

这里的推导用到了几个关系：当角  $\theta$  很小时，用弧度表示的  $\theta$  与它的正弦  $\sin \theta$ 、正切  $\tan \theta$ ，三者近似相等。这些关系的严格证明要用到高等数学，本书不做讨论。

## 思考与讨论

1. 利用(1)式估算：按照你所用的器材、光源，实验中相邻两个亮条纹的距离预期为多少？从(1)式看，改变什么条件可以增大相邻亮条纹的距离以便于测量？在你的实验器材中，哪些条件可以改变，哪些难以改变？

2. 不同颜色的单色光的干涉条纹会有什么不同？请你做出猜想，并在后面的实验中验证。

**观察双缝干涉图样** 双缝的实验装置如图 13.3-2 所示。光源发出的光经滤光片成为单色光，把单缝照亮。单缝相当于一个线光源，它又把双缝照亮。来自双缝的光在双缝右边的空间发生干涉。遮光筒的一端装有毛玻璃屏，我们将在这个屏上观察干涉条纹。

在这个实验中我们不用激光，而像杨氏当初的实验那样，用通过单缝的光把双缝照亮。

实验前先取下双缝，打开光源，调节光源的高度和角度，使它发出的光束沿着遮光筒的轴线把屏照亮。然后放好单缝和双缝。注意使单缝与双缝相互平行，缝的中点大致位于遮光筒的轴线上。

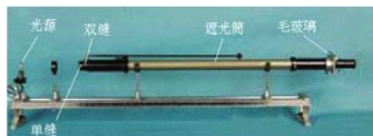


图 13.3-2 双缝干涉的实验装置

做好以上调整后，在单缝与光源之间放上滤光片就可见到单色光的双缝干涉图样。分别改变滤光片的颜色和双缝的距离，观察干涉条纹的变化。

**测定单色光的波长** 在 (1) 式中，双缝间的距离  $d$  是已知的，双缝到屏的距离  $l$  可以用米尺测出，相邻两条亮条纹间的距离  $\Delta x$  需用测量头 (图 13.3-4) 测出。

测量头由分划板、目镜、手轮等构成。转动手轮，分划板会左右移动。测量时，应使分划板的中心刻线与条纹的中心对齐 (图 13.3-5)，记下此时手轮上的读数。然后转动测量头，使分划板中心刻线与另一条纹的中心对齐，再次记下手轮上的读数。两次读数之差表示这两个条纹间的距离。测出  $n$  个亮条纹间的距离  $a$ ，就可以求出相邻两个亮条纹间的距离  $\Delta x = \frac{a}{n-1}$ 。最后，根据 (1) 式算出波长。

换用不同颜色的滤光片，观察干涉条纹间距的变化，求出相应的波长。

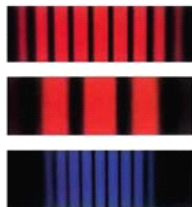


图 13.3-3 不同双缝、不同色光的双缝干涉条纹

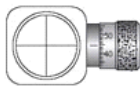


图 13.3-4 测量头



图 13.3-5 分划板中心刻线应与条纹的中心对齐

## 做一做

## 用光传感器做双缝干涉的实验

用光传感器可以方便、直观地演示双缝干涉现象。

图 13.3-6 是实验装置图。光源在铁架台的最上端，中间是刻有双缝的挡板，下面是光传感器。这个实验的光路是自上而下的。

光传感器是一个小盒，在图中白色狭长矩形部分，沿矩形的长边分布着许多光敏单元。这个传感器各个光敏单元得到的光照信息经计算机处理后，在荧光屏上显示出来。

在荧光屏显示的干涉图象上移动鼠标，可以得到条纹间距，从而算出光的波长。

与图 13.3-4 的方法相比，这种方法除了同样可以测量条纹间距外，它还可以方便地、形象地在荧光屏上展示亮条纹的分布，并能定量地描绘传感器上各点的光照强度。



图 13.3-6 用传感器和计算机观察双缝干涉的实验装置

## 问题与练习

- 用图 13.3-2 的实验装置观察双缝干涉图样，双缝之间的距离是  $0.2\text{ mm}$ ，用的是绿色滤光片，在毛玻璃屏上可以看到绿色干涉条纹。
  - 毛玻璃屏上的干涉条纹与双缝垂直还是平行？
  - 如果把毛玻璃屏向远离双缝的方向移动，相邻两亮条纹中心的距离如何变化？
  - 把绿色滤光片换为红色，相邻两亮条纹中心的距离增大了，说明哪种色光波长更长？
  - 如果改用间距为  $0.3\text{ mm}$  的双缝，相邻两亮条纹中心的距离如何变化？
  - 如果把灯泡与双缝间的单缝向双缝移近，相邻两亮条纹中心的距离是否变化？
- 用双缝干涉测量光的波长的实验中，为什么不直接测  $\Delta x$ ，而要测过  $n$  个条纹的间距求出  $\Delta x$ ？
- 用双缝干涉测量光的波长的实验中，已知两缝间的距离为  $0.3\text{ mm}$ ，以某种单色光照明双缝时，在离双缝  $1.2\text{ m}$  远的屏上，用测量头测出 10 个亮条纹间的距离为  $22.78\text{ mm}$ ，求这种单色光的波长。

## 4

## 光的颜色 色散

**光的颜色 色散** 在双缝干涉的实验中,各种颜色的光都会发生干涉,但条纹之间的距离不一样。用黄光做这个实验,条纹之间的距离比用红光时小;用蓝光时更小。

根据上节(1)式,条纹之间的距离与光波的波长成正比,因此能够断定,不同颜色的光,波长不同。

## 演示

## 用白光做双缝干涉实验

在图13.3-2的实验中,光源与单缝之间不加滤色片,观察屏上的干涉条纹,它们与使用单色光时的条纹有什么不同?



白光的干涉条纹

白光干涉时条纹是彩色的。可见,白光是由多种色光组成的。发生干涉时由于不同颜色的条纹间距不同,白光被分解了。含有多种颜色的光被分解为单色光的现象叫做光的色散(**dispersion**)。

人眼的视网膜上有两种感光细胞,一种叫做视杆细胞,它对光非常敏感,但不能区分不同波长(频率)的光;另一种叫做视锥细胞,它对光的敏感度不如视杆细胞,但能区分不同波长(频率)的光,人眼依靠视锥细胞分辨颜色。

表1 各色光在真空中的波长和频率<sup>①</sup>

光的颜色	波长/nm	频率/ $10^{14}$ Hz	光的颜色	波长/nm	频率/ $10^{14}$ Hz
红	700~620	4.3~4.8	绿	580~490	5.2~6.1
橙	620~600	4.8~5.0	蓝	490~450	6.1~6.7
黄	600~580	5.0~5.2	紫	450~400	6.7~7.5

含有多种颜色的光被分解后,各种色光按其波长的有序排列,就是光谱(spectrum)。图13.4-1是太阳光谱。



图13.4-1 太阳光谱

<sup>①</sup>不同的人对颜色的感觉不完全一样,因此对不同人群测量所得的数据也不一样。这些数据仅供参考。

**薄膜干涉中的色散** 肥皂泡看起来常常是彩色的，雨后公路积水上面漂浮的油膜，看起来也是彩色的。这些现象是怎样形成的？

## 实验

## 用肥皂膜做薄膜干涉实验

在酒精灯的灯芯上撒一些食盐，灯焰就能发出明亮的黄光。把铁丝圈在肥皂水中蘸一下，让它挂上一层薄薄的液膜。把这层液膜当作一个平面镜，用它观察灯焰的像。这个像与直接看到的灯焰有什么不同？

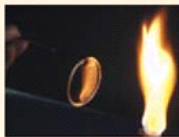


图 13.4-2 灯焰在肥皂膜上所成的像

灯焰的像是液膜前后两个面反射的光形成的。来自两个面的反射光相互叠加，发生干涉。

竖直放置的肥皂薄膜受到重力的作用，下面厚、上面薄，因此在膜上不同的位置，来自前后两个面的反射光，即图 13.4-3 中的实线和虚线波形代表的两列光，所走的路程差不同。在某些位置，这两列波叠加后相互加强，出现了亮条纹；在另一些位置，叠加后相互削弱，于是出现了暗条纹。

如果用另一种波长的光做这个实验，由于波长不同，从肥皂膜的前后两面反射的光将在别的位置相互加强，所以从肥皂膜上看到的亮条纹的位置也会不同。

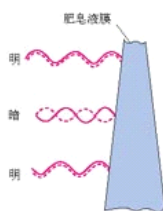


图 13.4-3 薄膜前后两个面的反射光发生了干涉



图 13.4-4 肥皂膜的干涉现象



图 13.4-5 镜头玻璃的颜色也是光的干涉造成的

图 13.4-3 是个示意图，实际上，液膜两面的夹角没有这么大，同一条入射光线从液膜前后两面反射之后在传播方向上没有多大差别，所以能够叠加在一起，出现干涉现象。

在白光下观察肥皂泡，白光中不同波长的光，也就是不同颜色的光，从肥皂泡的内外表面反射后，在不同的位置相互加强，所以看起来肥皂泡是彩色的。

照相机、望远镜的镜头表面常常镀了一层透光的膜，膜的上表面与玻璃表面反射的光发生干涉。由于只有一定波长（一定颜色）的光干涉时才会相互加强，所以镀膜镜头看起来是有颜色的。镀膜的厚度不同，镜头的颜色也不一样。



## 科学漫步

## 利用光的干涉检查平整度

光的干涉现象在技术中有重要应用。例如，在磨制各种镜面或其他精密的光学平面时，可以用干涉法检查平面的平整程度。如图 13.4-6，在被测平面上放一个透明的样板，在样板的一端垫一个薄片，使样板的标准平面与被测平面之间形成一个楔形空气薄层。用单色光从上面照射，空气层的上下两个表面反射的两列光波发生干涉。空气层厚度相同的地方，两列波的路程差相同，两列波叠加时相互加强或相互削弱的情况也相同。所以，如果被测表面是平的，干涉条纹就是一组平行的直线（图 13.4-7 甲），如果干涉条纹发生弯曲，就说明被测表面不平（图 13.4-7 乙）。这种测量的精度可达  $10^{-6}$  cm。

问题：图 13.4-7 乙中，弯曲的干涉条纹说明被检查的平面在此处是凹下还是凸出？

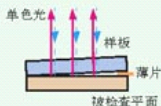


图 13.4-6 从样板的标准平面和被检查的平面反射的两列光发生干涉



图 13.4-7 从干涉条纹判断被测表面是否平整（图 13.4-6 的俯视图）

## 做一做

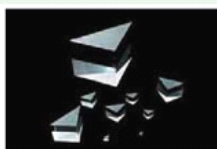
取两块质量较好的平板玻璃，例如显微镜的载玻片，用清水洗净晾干，再用绒布擦去表面的灰尘和水汽，然后把两块玻璃叠在一起。

把这两块玻璃拿到明亮的地方，玻璃片上会出现干涉条纹。

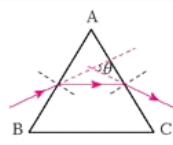
用手指捏住两块玻璃加压，条纹会移动，这是为什么？

**折射时的色散** 光学研究常常用到如图 13.4-8 所示的三棱镜，简称棱镜（**prism**）。根据折射定律，一束光线射入后将沿图 13.4-8 乙的方向射出，即光通过棱镜后将向它的横截面的底边方向偏折。

实验表明，一束白光进入棱镜而被折射后，在屏上的光斑是彩色的，这说明光在折射过程中发生了色散。从图 13.4-9 可以看出，红光（波长较长）通过棱镜后偏折的程度比其他颜色的光要小，而紫光（波长较短）偏折的程度比其他颜色的光要大。这说明透明物质对于波长  $\lambda$  不同的光的折射率  $n$  不一样， $\lambda$  越小， $n$  越大。从表 2 可以看出某种玻璃对不同色光的折射率的差别。



甲 各种棱镜



乙 光线通过棱镜的光路

图 13.4-8 棱镜



图 13.4-9 光在折射时发生色散的示意图

表 2 某种玻璃对各种色光的折射率

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

由于折射率  $n$  与波速  $v$  的关系是  $n = \frac{c}{v}$ ，所以能够得出结论：在同一种物质中，不同波长的光波的传播速度不一样，波长越短，波速越慢。

### 问题与练习

- 在用白光做双缝干涉的实验时，除了中心的一个亮条纹外，在其他各级亮条纹中，红色为什么总是在最外侧？
- 无色的肥皂液，吹出的肥皂泡为什么是彩色的？
- 凸透镜的弯曲表面是个球面，球面的半径叫做这个曲面的曲率半径。把一个凸透镜压在一块平面玻璃上，让单色光从上方射入（图 13.4-10），从上往下看凸透镜，可以看到亮暗相间的圆环状条纹。这个现象是牛顿首先发现的，这些环状条纹叫做牛顿环，它是两个玻璃表面之间的空气膜引起的薄膜干涉造成的。如果换一个表面曲率半径更大的凸透镜，观察到的圆环半径是更大还是更小？如果改用波长更长的单色光照射，观察到的圆环半径是变大还是变小？
- 描绘地势高低可以用等高线，描绘静电场可以用等势线，薄膜干涉条纹实际上是等厚线，同一干涉条纹上各个地方薄膜的厚度是相等的。用本节“科学漫步”中介绍的方法检测平整度时，观察到了干涉条纹的形状，就等于知道了等厚线的走向，因而不难判断被检测平面的凹下或凸出的位置。
  - 为什么薄膜干涉条纹就是等厚线？
  - 当单色光源的波长是  $\lambda$  时，相邻两亮条中心处薄膜的厚度差是多少？

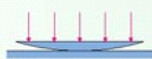


图 13.4-10 观察牛顿环

5. 图 13.4-11 中,  $a$  是一束白光, 射向半圆玻璃砖的圆心  $O$ , 折射后发生了色散。折射后哪一侧是红光? 哪一侧是紫光? 请在甲、乙图中标明。

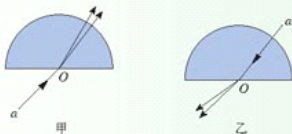


图 13.4-11 白光经过半圆玻璃砖后发生色散

## 5

### 光的衍射

#### 思考与讨论

我们知道, 波能够绕过障碍物发生衍射。既然光也是一种波, 为什么在日常生活中我们观察不到光的衍射, 而且常常说“光沿直线传播”呢?

**光的衍射** 在挡板上安装一个宽度可调的狭缝, 缝后放一个光屏 (图 13.5-1)。用单色平行光照射狭缝, 我们看到, 当缝比较宽时, 光沿着直线通过狭缝, 在屏上产生一条与缝宽相当的亮条纹。但是, 当缝调到很窄时, 尽管亮条纹的亮度有所降低, 但是宽度反而增大了。这表明, 光没有沿直线传播, 它绕过了缝的边缘, 传播到了相当宽的地方。这就是光的衍射现象。图 13.5-2 是在一次实验中拍摄的屏上亮条纹的照片, 上图的狭缝较窄, 衍射后在屏上产生的中央亮条纹较宽。

在单缝衍射和圆孔衍射的照片中, 都有一些亮条纹和暗条纹。这是由于来自单缝或圆孔上不同位置的光, 通过缝或孔之后叠加时光波加强或者削弱的结果。如果用白光做衍射实验, 得到的亮条纹是彩色的, 这是由于不同波长的光在不同位置得到了加强。各种不同形状的障碍物都能使光发生衍射, 致使影的轮廓模糊不清, 出现明暗相间的条纹 (图 13.5-3)。

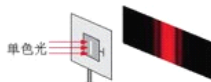


图 13.5-1 单缝衍射示意图

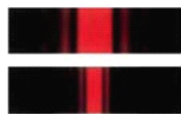


图 13.5-2 单缝衍射产生的图样

对衍射现象的研究表明，我们平时说的“光沿直线传播”只是一种特殊情况。光在没有障碍物的均匀介质中是沿直线传播的，在障碍物的尺寸比光的波长大得多的情况下，衍射现象不明显，也可以认为光是沿直线传播的。但是，在障碍物的尺寸可以跟光的波长相比，甚至比光的波长还小的时候，衍射现象十分明显，这时就不能说光沿直线传播了。

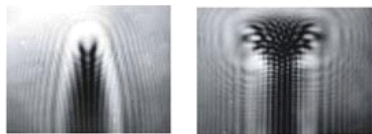


图 13.5.3 光经过大头针尖（左）和针孔（右）时的衍射照片

### 做一做

#### 一、用激光笔做单缝衍射实验

将镜子镀银那一面以剃须刀划一条单缝，用玩具激光笔发出的激光投射在单缝上，观察在墙上形成的图样。思考产生这一现象的原因。

#### 二、用传感器做单缝衍射实验

用光传感器也可以做单缝衍射实验，所用器材与图 13.3-6 相似，只需把铁架台中部的双缝换成单缝即可。荧光屏上显示的衍射图样和光强分布图象如图 13.5-4 所示。

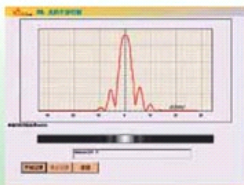


图 13.5.4 单缝衍射图样和光强分布图象

## 科学足迹

### 泊松亮斑

图 13.5-5 是一个不透光的圆盘的影。要特别注意中心的亮斑，它是光绕过盘的边缘在这里叠加后形成的。这个亮斑还有一段有趣的故事。

1818 年，法国的巴黎科学院为了鼓励对衍射问题的研究，悬赏征集这方面的论文。一位年轻的物理学家菲涅耳（A. Fresnel, 1788—1827）按照波动说深入研究了光的衍射，在论文中提出了严密地解决衍射问题的数学方法。

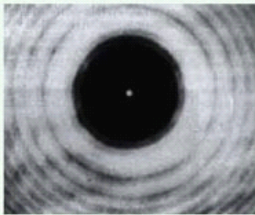


图 13.5.5 泊松亮斑

当时的另一位法国科学家泊松 (S. Poisson, 1781—1842) 是光的波动说的反对者。他按照菲涅耳的理论计算了光在圆盘后的影的问题。发现对于一定的波长, 在适当的距离上, 影的中心会出现一个亮斑! 泊松认为这是非常荒谬可笑的, 并认为这样就取倒了光的波动说。

但是, 就在竞赛的关键时刻, 评委阿拉果 (D. Arago, 1786—1853) 在实验中观察到了这个亮斑, 这样, 泊松的计算反而支持了光的波动说。后人为了纪念这个有意义的事件, 把这个亮斑称为泊松亮斑。

**衍射光栅** 单缝衍射的条纹比较宽, 而且距离中央亮条纹较远的条纹, 亮度也很低。因此, 无论从测量的精确度, 还是从可分辨的程度上说, 单缝衍射都不能达到实用要求。

实验表明, 如果增加狭缝的个数, 衍射条纹的宽度将变窄, 亮度将增加。光学仪器中用的衍射光栅就是据此制成的。它是由许多等宽的狭缝等距离地排列起来形成的光学元件。在一块很平的玻璃上用金刚石刻出一系列等距的平行刻痕, 刻痕产生漫反射而不太透光, 未刻的部分相当于透光的狭缝, 这样就做成了透射光栅 (图 13.5-6)。如果在高反射率的金属上刻痕, 就可以做成反射光栅。

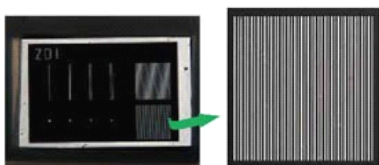


图 13.5-6 透射光栅

### 做一做

#### 用羽毛做光栅衍射实验

找一根鸡翅膀上的羽毛, 鹅、鸭的翎毛也可以, 最好是白色的。白天隔着羽毛观看太阳, 或在晚上拿羽毛去看 1 m 外的白炽灯, 可以观察到衍射图样。羽毛上细密的羽丝充当了衍射光栅。试试看!

### 科学漫步

#### X 射线衍射与双螺旋

在 20 世纪 50 年代, 生物学家已经知道 DNA 是细胞中携带遗传信息的物质, 下一步就是要搞

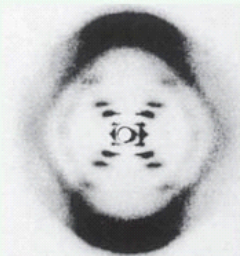


清楚DNA的结构,从而确定它的化学作用。这项研究所根据的原理,已经早在几十年前由物理学家准备好了。

一定波长的光通过某种光栅发生衍射时的图样是确定的。反过来,根据某个衍射图样就可以确定相应光栅的结构。晶体中原子的排列是规则的,它们可以充当天然的衍射光栅。然而,原子之间的间隙大约为 $10^{-10}$  m,远小于可见光的波长,因此不能用可见光的衍射来研究分子的结构。X射线却很适合这个工作。

物理学家布拉格父子(W. H. Bragg, 1862—1942, W. L. Bragg, 1890—1971)首先研究了晶体对X射线的衍射。图中斑点的强度和位置包含着有关晶体的大量信息。他们的工作奠定了X射线晶体结构分析的实验和理论基础。为此,布拉格父子荣获1915年诺贝尔物理学奖。

从1951年开始,英国生物学家威尔金斯和弗兰克林研究了DNA对X射线的衍射,获得了一系列DNA纤维的X射线衍射图样,而美国生物学家沃森(J. D. Watson, 1928— )和英国生物学家克里克(F. H. C. Crick, 1916—2004)则根据这些数据提出了DNA的双螺旋结构模型。这是生物学史上划时代的事件,它宣告了分子生物学的诞生,标志着生物学已经进入了分子水平。沃森、克里克和威尔金斯因此获得了1962年的诺贝尔生理学或医学奖。



弗兰克林使用X射线拍照的DNA分子

### 问题与练习

1. 用两枝铅笔夹成一条狭缝,将眼睛紧贴着狭缝并使狭缝与日光灯管或其他线状光源平行,你会观察到什么现象?试解释这个现象。
2. 在不透光的挡板上安装一个宽度可以调节的狭缝,缝后放一个光屏。用平行单色光照射狭缝,当缝的宽度很小时,我们会从光屏上看到衍射条纹。此时,如果进一步调小狭缝的宽度,所看到的衍射条纹有什么变化?做这个实验,看你的判断是否正确。

用游标卡尺两个卡脚之间的缝隙做单缝,眼睛通过这个单缝观察线状光源,减小两个卡脚之间的距离,也可以看到衍射条纹的变化情况。

3. 太阳光照着一块遮光板,遮光板上有一个较大的三角形孔,太阳光透过这个孔,在光屏上形成一个三角形光斑。请说明:遮光板上三角形孔的尺寸不断减小时,光屏上的图形将怎样变化?说出其中的道理。

## 6

## 光的偏振

光的干涉和衍射现象说明光具有波动性,但不能由此确定光究竟是横波还是纵波。本节讨论光的偏振现象,可以说明光是横波。

**偏振现象** 在纵波中,各点的振动方向总与波的传播方向在同一直线上。在横波中,各点的振动方向总与波的传播方向垂直。不同的横波,振动方向可能不同。

**演示**

取一根软绳,一端固定在墙上,手持另一端上下抖动,软绳上形成一列横波,质点在竖直平面内沿着上下方向振动。

现在让软绳穿过一块带有狭缝的木板,分别将狭缝与振动方向平行放置及与振动方向垂直放置,观察发生的现象(图13.6-1甲、乙)。

如果将这根绳换成细软的弹簧,前后推动弹簧形成纵波,又会出现什么现象?



图 13.6-1 横波可能有不同的振动方向

一列横波沿水平方向传播,质点可能沿着上下方向振动,也可能沿着左右方向振动,还可能沿着其他“斜”的方向振动。这是横波与纵波的区别。我们可以利用这种区别来判断某种波是横波,还是纵波。

某机械波是横波还是纵波,可以根据观察来判断,并不需要图 13.6-1 那样的专门实验。可是受这个实验的启发,我们可以利用类似的实验来判断光波是横波还是纵波。

现在利用“偏振片”代替上面实验中带有狭缝的木板,来做光学实验。偏振片由特定的材料制成,每个偏振片都有一个特定的方向,只有沿着这个方向振动的光波<sup>①</sup>才能通过偏振片,这个方向叫做“透振方向”。偏振片对光波的作用就像图 13.6-1 中的狭缝对于机械波的作用一样。我们来看下面的实验。

对于一列确定的横波,它的振动方向是确定的。

<sup>①</sup> 学过下章就会知道,光是传播中的电磁场,即电磁波。“电磁波的振动方向”通常指其中电场的方向。

## 演示

如图13.6-2甲所示,让阳光或灯光通过偏振片P,在P的另一侧观察,可以看到偏振片是透明的。

以光的传播方向为轴旋转偏振片P,透射光的强度变化吗?

在偏振片P的后面再放置另一个偏振片Q,以光的传播方向为轴旋转偏振片Q,观察通过两块偏振片的透射光的强度变化。

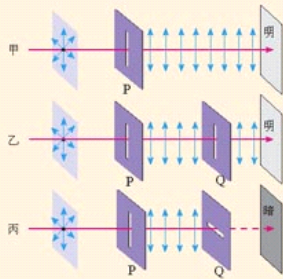


图13.6-2 检验光波是不是横波

怎样解释上面的实验呢?

如果光波是纵波,上面的现象是不会发生的。

实际上,太阳、电灯等普通光源发出的光,包含着在垂直于传播方向上沿一切方向振动的光,而且沿着各个方向振动的光波的强度都相同。这种光是“自然光”。

自然光通过偏振片P(叫做起偏器)之后,只有振动方向与偏振片的透振方向一致的光波才能通过。也就是说,通过偏振片P的光波,在垂直于传播方向的平面上,只沿着某个特定的方向振动。这种光叫做偏振光(**polarized light**)。只有横波才有偏振现象。

通过偏振片P的偏振光再通过偏振片Q(叫做检偏器)时,如果两个偏振片的透振方向平行,那么,通过P的偏振光的振动方向与偏振片Q的透振方向一致,可以透过Q;如果两个偏振片的透振方向垂直,那么,偏振光的振动方向跟偏振片Q的透振方向垂直,不能透过Q。这跟图13.6-1中机械波的情形类似。

上面的演示实验表明,光是一种横波。

光的偏振现象并不罕见。除了从太阳、电灯等光源直接发出的光以外,我们通常看到的绝大部分光,都是不同程度的偏振光。自然光在玻璃、水面、木质桌面等表面反射时,反射光和折射光都是偏振光(图13.6-4),入射角变化时偏振的程度也有所变化。

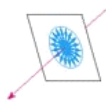


图13.6-3 太阳光是自然光

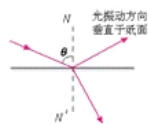


图13.6-4 反射引起自然光的偏振

**偏振现象的应用** 光的偏振现象有很多应用。例如，摄影师在拍摄池中的游鱼、玻璃橱窗里的陈列物时，由于水面和玻璃表面的反射光的干扰，景象会不清楚。如果在照相机镜头前装一片偏振滤光片，让它的透振方向与反射光的偏振方向垂直，就可以减弱反射光而使景象清晰。

电子表的液晶显示也用到了偏振光。两块透振方向互相垂直的偏振片当中插进一个液晶盒，盒内液晶层的上下是透明的电极板，它们刻成了数字笔画的形状。外界的自然光通过第一块偏振片后，成了偏振光。这束光在通过液晶时，如果上下两极板间没有电压，光的偏振方向会被液晶旋转 $90^\circ$ （这种性质叫做液晶的旋光性），于是它能通过第二块偏振片。第二块偏振片的下面是反射镜，光线被反射回来，这时液晶盒看起来是透明的。但在上下两个电极间有一定大小的电压时，液晶的性质改变了，旋光性消失，于是光线通不过第二块偏振片，这个电极下的区域变暗，如果电极刻成了数字的笔画的形状，用这种方法就可以显示数字。



图 13.6-5 拍摄玻璃橱窗中的图画时，透过偏振镜可以减弱反射光的影响（右图）。



图 13.6-6 液晶显示用到了偏振光

### 做一做

#### 偏振光的实验研究

实验前的准备：寻找几件带有液晶显示器的废旧物件，例如数字式电子表、空调遥控器、数字调谐收音机、计算器、数字多用表、带液晶显示的玩具等，小心取下其中液晶显示器最前面的一块塑料片，这就是一个偏振片。用这样的偏振片研究光的偏振，装置简单，效果好。

1. 将一个偏振片放于眼睛的前方，观察通过窗户进入室内的自然光。转动偏振片，你感觉到的明暗有没有明显的变化？
2. 通过偏振片观察玻璃表面、光滑桌面反射来的灯光或窗外的光，同时转动偏振片。你感觉到的明暗有没有明显的变化？玻璃表面、光滑桌面反射的光是偏振光吗？
3. 将偏振片叠放在数字式电子表的液晶显示屏上，观察显示屏亮度的变化。为什么沿不同方向放置时会有不同的亮度？

## 科学漫步

## 立体电影和偏振光

你看过立体电影吗？你知道它的道理吗？它就是应用光的偏振现象的一个例子。在观看立体电影时，观众要戴上特制的眼镜，这副眼镜就是一对透振方向互相垂直的偏振片。如果不戴这副眼镜，银幕上的图像就模糊不清了。这是为什么？

这要从人眼看物的立体感说起。人的两只眼睛同时观察物体，不但能扩大视野，而且能判断物体的远近，产生立体感。这是由于人的两只眼睛同时观察物体时，在两眼的视网膜上形成的两个像并不完全相同。左眼看到物体的左侧面较多，右眼看到物体的右侧面较多，这两个像经过大脑综合以后就能区分物体的前后、远近，从而产生立体感。

拍摄立体电影时，用两个镜头如人眼那样从两个不同方向同步拍摄景物的像，制成电影胶片。放映时可以通过两台放映机，同步放映两组胶片，使略有差别的两幅图像重叠在银幕上。这时如果直接用眼睛直接观看，看到的画面好像是电视天线不好时出现的“重影”。

实际上，每架放映机前还要安装一块偏振片，两架放映机射出的光，通过偏振片后成了偏振光。左右两架放映机前的偏振片的透振方向互相垂直，因而产生的两束偏振光的偏振方向也互相垂直。这两束偏振光投射到银幕上再反射到观众那里，偏振方向不变。观众用上述的偏振眼镜观看，每只眼睛只看到相应的偏振光图像，即左眼只看到左机映出的画面，右眼只看到右机映出的画面，这样就会像直接观看物体那样产生立体感。

实际放映立体电影时只用一个镜头，两套图像交替地印在同一条电影胶片上，为了实现上述功能还需要一套复杂的装置，但原理就是上面所说的那些。

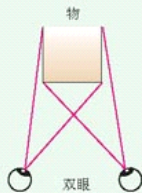


图13-6-7 两眼看到的情景稍有差别，大脑分析后就产生了立体感。

## 问题与练习

1. 什么是光的偏振现象？光的偏振现象对认识光的本性有什么意义？
2. 市场上有一种太阳镜，它的镜片是偏振片。查找资料或向有经验的人请教，回答以下问题。

为什么不用普通的带色玻璃而用偏振片？安装镜片时它的透振方向应该沿什么方向？利用偏振眼镜可以做哪些实验、做哪些检测？



## 7

## 全反射

不同介质的折射率不同,我们把折射率较小的介质称为光疏介质 (**optically thinner medium**),折射率较大的介质称为光密介质 (**optically denser medium**)。光疏介质与光密介质是相对的,例如水、水晶和金刚石三种物质相比较,水晶对水来说是光密介质,对金刚石来说则是光疏介质。从关系式  $n = \frac{c}{v}$  可以知道,光在光密介质中的传播速度比在光疏介质中的传播速度小。

根据折射定律,光由光疏介质射入光密介质(例如由空气射入水)时,折射角小于入射角;光由光密介质射入光疏介质(例如由水射入空气)时,折射角大于入射角。

前面学习光的折射时,我们只研究了光从真空(空气)射入介质和从介质射入真空(空气)的情形,没有深入讨论光在两种介质之间传播时(例如光从玻璃射入水中)的折射情况,但是,在学习惠更斯原理时对于这类情况做了分析。

## 思考与讨论

既然光由光密介质射入光疏介质时,折射角大于入射角,可以预料,当入射角增大到一定程度,但还没有达到  $90^\circ$  时,折射角就会增大到  $90^\circ$ 。如果入射角再增大,会出现什么现象?画几张草图可能有助于思考。

## 演示

如图13.7-1所示,让光沿着半圆形玻璃砖的半径射到它的平直的边上,在这个边与空气的界面上会发生反射和折射。逐渐增大入射角,观察反射光线和折射光线的变化。

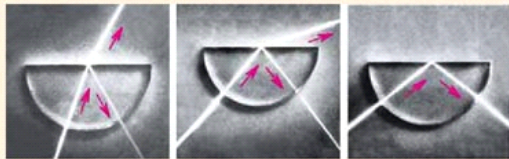


图 13.7-1 观察全反射现象

当光从光密介质射入光疏介质时,同时发生折射和反射。如果入射角逐渐增大,折射光离法线会越来越远,而且越来越弱,反射光却越来越强。当入射角增大到某一角度,使折射角达到 $90^\circ$ 时,折射光完全消失,只剩下反射光,这种现象叫做**全反射 (total reflection)**,这时的人射角叫做**临界角 (critical angle)**。

当光从光密介质射入光疏介质时,如果入射角等于或大于临界角,就会发生全反射现象。

### 思考与讨论

不同的介质,由于折射率不同,在空气中发生全反射的临界角是不一样的。请大家计算折射率为 $n$ 的某种介质在空气(真空)中发生全反射时的临界角 $C$ 。

计算时可以先考虑图13.7-2的情形:先以接近 $90^\circ$ 的入射角从空气掠射进入介质,求出这时的折射角,根据光路可逆的道理,也就知道光从介质射入空气时发生全反射的临界角了。

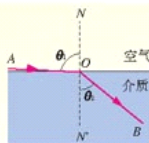


图13.7-2 首先计算光线掠射进入介质时的折射角

光从介质射入空气(真空)时,发生全反射的临界角 $C$ 与介质的折射率 $n$ 的关系是

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

从这个关系式可以看出,介质的折射率越大,发生全反射的临界角越小。水的临界角为 $48.8^\circ$ ,各种玻璃的临界角为 $32^\circ \sim 42^\circ$ ,金刚石的临界角为 $24.4^\circ$ 。

全反射是自然界里常见的现象。例如,水中或玻璃中的气泡,看起来特别明亮,就是因为光从水或玻璃射向气泡时,一部分光在界面上发生了全反射的缘故。

**例题** 在潜水员看来,岸上的所有景物,都出现在一个倒立的圆锥里,为什么?这个圆锥的顶角是多大?

**分析和解** 岸上所有景物发出的光,射向水面时入射角分布在 $0^\circ$ 到 $90^\circ$ 之间,射入水中后的折射角在 $0^\circ$ 至临界角之间。

可以求出光从水中射向空气的临界角 $C$ 。如图13.7-3,几乎贴着水面射入水里的光线,在潜水员看来是从折射角为 $C$ 的方向射来的,水面上其他方向射来的光线,折射角都小于 $C$ 。因此认为水面以上所有的景物都出现在顶角为 $2C$ 的圆锥里。

由公式 $\sin C = \frac{1}{n}$ 和水的折射率 $n = 1.33$ ,可求得临界角

$$C = \arcsin \frac{1}{1.33} = 48.8^\circ$$

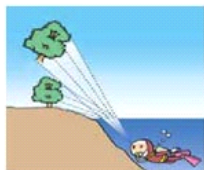


图13.7-3 潜水员认为水面以上所有景物都出现在一个倒立的圆锥里

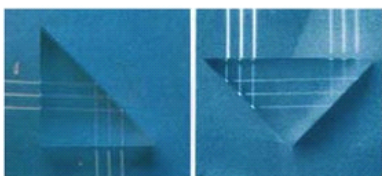
设圆锥的顶角为  $\theta$ ，则有

$$\theta = 2C = 97.6^\circ$$

**全反射棱镜** 如图 13.7-4，棱镜的截面为等腰直角三角形。当光以图甲或图乙所示的方向射入玻璃时，由于光的方向与玻璃面垂直，光线不发生偏折。但在玻璃内部，光射向玻璃与空气的界面时，入射角大于临界角，发生全反射。与平面镜相比，它的反射率高，几乎可达 100%；由于反射面不必涂敷任何反光物质，所以反射时失真小。这种棱镜在光学仪器中用来改变光的方向，用得十分广泛。



旧式航海用的望远镜，  
镜筒很长。



甲 乙

图 13.7-4 全反射棱镜

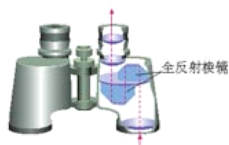


图 13.7-5 双筒望远镜中的全反射棱镜

**光导纤维** 我们常常听到的“光纤通信”，就是利用了全反射的原理。这里说的光纤，就是光导纤维（optical fiber）的简称。

#### 演示

如图 13.7-6 所示，激光笔发出的光射入一根弯曲的有机玻璃棒的一端，观察光传播的路径有什么特点。



图 13.7-6 弯曲的丙烯酸树脂棒能导光

当光在玻璃棒内传播时，如果从玻璃射向空气的入射角大于临界角，光会发生全反射，于是光在玻璃棒内沿着锯齿形路线传播。这就是光导纤维导光的原理<sup>①</sup>。

<sup>①</sup> 本书用全反射的知识解释了光在有机玻璃棒中的传播，并且由此粗略地说明了光纤导光的原理。实际上两者并不完全一样。

实用光导纤维的直径只有几微米到一百微米。因为很细，一定程度上可以弯折。它由内芯和外套两层组成。内芯的折射率比外套的大，光传播时在内芯与外套的界面上发生全反射（图 13.7-7）。

如果把光导纤维聚集成束，使纤维在两端排列的相对位置一样，图像就可以从一端传到另一端（图 13.7-8 甲）。医学上用光导纤维制成内窥镜，用来检查人体胃、肠、气管等脏器的内部<sup>①</sup>。实际的内窥镜装有两组光纤，一组把光传送到人体内部进行照明，另一组把体内的图像传出供医生观察。

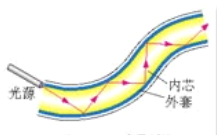


图 13.7-7 光导纤维

一束光纤，外面用塑料及其他材料做的保护层包起来，用于激光信号传输，这就是常说的“光缆”。

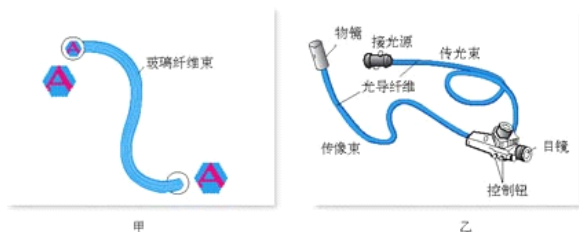


图 13.7-8 内窥镜

光也是一种电磁波，它可以像无线电波那样，作为载体来传递信息。载有声音、图像以及各种数字信号的激光从光纤的一端输入，就可以传到千里以外的另一端，实现光纤通信。

光纤通信的主要优点是容量大。例如，一路光纤的传输能力理论值为二十亿路电话，一千万路电视。此外，光纤传输还有衰减小、抗干扰性强等多方面的优点。

尽管光纤通信的发展只有三十多年的历史，但是发展速度却是惊人的。我国的光纤通信起步较早，现已成为技术较为先进的几个国家之一，目前已经建立了纵横城市之间的光缆通信网络，而且与邻国建立了海底光缆。光缆线路已经与通信卫星、微波接力站、普通电缆相结合，构成了现代国家的“神经系统”。



图 13.7-9 光缆线路是国家重要的基础设施，全体公民都有责任保护。

<sup>①</sup>这里介绍的是纤维式内窥镜。现在医院用的大多是电子式内窥镜，把微型摄像头送入人体，图像信号经过电缆传出，用计算机屏幕显示。电子式内窥镜的探头体积小、分辨率高，可供多人观察，所得图像能以电子文件的形式存储。

## 做一做

## 水流导光

将塑料瓶下侧开一个小孔，瓶中灌入清水，水就从小孔流出。用激光水平射向塑料瓶小孔（图 13.7-10，激光可由激光笔产生），观察光的传播路径。

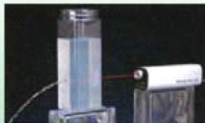


图 13.7-10 水流导光

## 问题与练习

- 光从介质  $a$  射向介质  $b$ ，如果要在  $a$ 、 $b$  介质的分界面上发生全反射，那么必须满足的条件是  
A.  $a$  是光密介质， $b$  是光疏介质。  
B. 光在介质  $a$  中的速度必须大于在介质  $b$  中的速度。  
C. 光的入射角必须大于或等于临界角。  
D. 必须是单色光。
- 光由折射率为 1.5 的玻璃和 2.42 的金刚石进入空气时的临界角各是多大？
- 光从折射率为  $\sqrt{2}$  的介质中以  $40^\circ$  的入射角射到介质与空气的界面上时，能发生全反射吗？
- 图 13.7-11 中的  $S$  是一个水下的点光源。借助量角器和三角函数表，画出图中各条光线的折射光线和反射光线。
- 为了从坦克内部观察外部目标，在坦克壁上开了一个长方形孔。假定坦克的壁厚 20 cm，孔的左右两边距离 12 cm，孔内安装一块折射率 1.52 的玻璃，厚度与坦克的壁厚相同（图 13.7-12，俯视图）。坦克内的人通过这块玻璃能看到的外界的角度范围为多大？
- 图 13.7-13 是一个用折射率  $n = 2.4$  的透明介质做成的四棱柱的横截面图，其中  $\angle A = \angle C = 90^\circ$ ， $\angle B = 60^\circ$ 。现有一条光线从图示的位置垂直入射到棱镜的  $AB$  面上，画出光路图，确定射出的光线。注意：每个面的反射光线和折射光线都不能忽略。

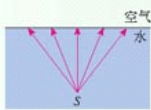


图 13.7-11 水下的点光源

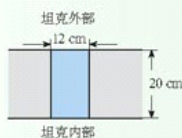
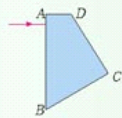
图 13.7-12 坦克壁上的玻璃  
(俯视图)

图 13.7-13 四棱柱棱镜的横截面图



## 8

## 激光

1958年,人类在实验室里激发出了一种自然界中没有的光,那就是激光(laser)。半个世纪以来,激光已经深入我们生活的各个方面。打长途电话、看DVD、医院里做手术、煤矿里挖掘抗道……都用得着激光。

激光到底是怎样的光,它为什么有这么大的用途?

**激光的特点及其应用** 光是从物质的原子中发射出来的。原子获得能量以后处于不稳定状态,它会以光的形式把能量发射出去。但是,普通的光源,例如白炽灯,灯丝中某个原子在什么时刻发光、在哪个方向偏振,完全是随机的,发光的频率也不一定相同。因此,两个独立的普通光源发出的光在叠加时,一会儿在空间的某点相互加强,一会儿又在这点相互削弱,不能形成稳定的亮区和暗区,不会发生干涉。这样的光是非相干光。只有频率相同、相位差恒定、偏振方向一致的光才是相干光。激光是一种人工产生的相干光,具有高度的相干性,这是它的第一个特点。

由于激光是相干光,所以它能像无线电波那样被调制,用来传递信息。光纤通信就是激光和光导纤维相结合的产物。信息论的理论告诉我们,电磁波的频率越高,它所能携带的信息量越大,所以激光可以比无线电波传递更多的信息。

激光的另一个特点是它的平行度非常好。由于平行度好,所以在传播很远的距离后仍能保持一定的强度。激光的这个特点使它可以用来进行精确的测距。对准目标发出一个极短的激光脉冲,测量发射脉冲与收到反射回波的时间间隔,就可以求出目标的距离。激光测距雷达就是根据这个原理制成的。多用途的激光雷达不仅可以测量距离,而且能根据多普勒效应测出目标的运动速度,从而对目标进行跟踪。

由于平行度好,激光可以会聚到很小的一点。让这一点照射到DVD机、CD唱机或计算机的光盘上,就可以读出光盘上记录的信息,经过处理后还原成声音和图像。由于会聚点很小,光盘记录信息的密度很高。

激光还有一个特点是亮度高,也就是说它可以在很小的空间和很短的时间内集中很大的能量。如果把强大的激光束会聚起来照射到物体上,可以使物体的被照部分在不到千分之一秒的时间内产生几千万度的高温,最难熔化的物质在这一瞬间也要汽化了。因此,可以利用激光束来切割、焊接以及在很硬的材料上打孔。医学上可以用激光做“光刀”来切开皮肤、切除肿瘤,还可以用激光“焊接”剥落的视网膜。

原子核聚变时释放的核能是一种很有希望的能源。怎样使原子核在人工控制下进行聚变反应,这是各国科学家研究的重要课题。一个可能的实现途径是,把核燃料制成小颗粒,用激光从四面八方对它进行照射,利用强激光产生的高压引起核聚变。

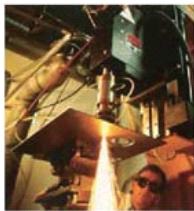


图 13.8-1 用激光打孔

**全息照相** 日常照相所采用的是乳剂成像技术。照相底片的片基上涂敷了一层由卤化银制作的感光乳剂。乳剂被光照射以后发生化学反应，反应的强弱由被摄影物的亮暗决定，从而在底片上记录了明暗的差别。

普通照相技术所记录的只是光波的强弱信息，而全息照相技术还可以记录光波的相位信息。

图13.8-2是拍摄全息照片的基本光路。同一束激光被分为两部分，一部分直接照射到底片上(称为参考光)，另一部分通过被拍摄物反射后再到达底片(称为物光)。参考光和物光在底片上相遇时发生干涉，形成复杂的干涉条纹。底片上某点的明暗程度反映了两束光叠加后到达这点时光波的强弱。

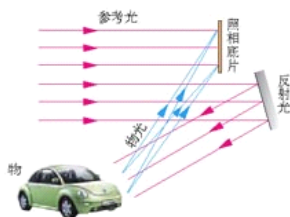


图 13.8-2 全息照片的拍摄



图 13.8-3 全息影像

**提示****观察全息照片**

观察全息照片时要用激光束照射照片，如图13.8-4。从照片的另一侧向照片看，可以看到原物体的立体的像。<sup>①</sup>

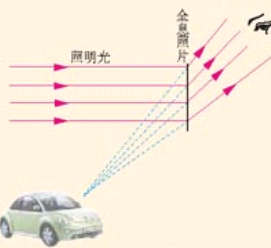


图 13.8-4 观察全息照片

全息照片的拍摄利用了光的干涉原理，这就要求参考光和物光有很高的相干性。激光符合这个要求，因此，在激光出现后，全息技术得到了长足的发展。

激光的应用远不止这些，而且还在不断发展。这方面的介绍文章很多，报刊、电视中也常有最新进展的报道。

<sup>①</sup>现在已经有了用白光观察全息照片的技术。

 做一做

全息技术有着重要的应用价值。请你查阅资料,了解人们已经在哪些领域利用了全息技术。你还能设想新的应用前景吗?

## 问题与练习

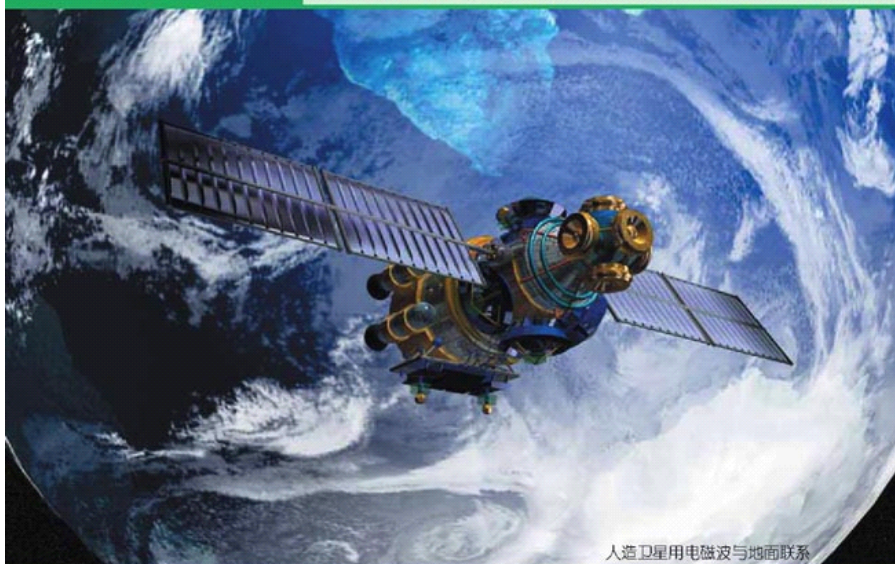
1. 激光是相干光源。根据激光的这个特点,可以将激光应用在哪些方面?
2. 一张光盘可以记录几亿个字节,其信息量相当于几千本十多万字的书,其中一个重要的原因就是光盘上记录信息的轨道可以做得很密,1 mm 的宽度至少可以容纳650条轨道。这是应用了激光的什么特性?
3. 激光可以在很小的空间和很短的时间内聚集很大的能量。例如一台红宝石巨脉冲激光器,激光束的发散角只有 $10^{-5}$ rad,在垂直于激光束的平面上,平均每平方厘米面积的功率达到 $10^9$ W。激光的这一特性有哪些应用价值?请你举例说明。
4. 激光的应用在不断拓展,激光与人们生活的联系越来越广泛。请你观察自己生活中的事物,收集有关资料,写一篇跟自己生活有联系、反映激光应用实例的短文:我周围的激光。

自从牛顿奠定了理论物理学的基础以来,物理学的公理基础的最伟大变革,是由法拉第、麦克斯韦在电磁现象方面的工作所引起的。

—— 爱因斯坦<sup>①</sup>

## 第十四章

## 电磁波



人造卫星用电磁波与地面联系

自古以来,人类一直在用自己的智慧解决远距离通信的问题。大约3 000年前,在我国商代就出现了利用火和烟传递信息的设施——烽火台。然而,直到100多年前,信息主要还是依靠人或动物的移动来传递,即便使用车、船,传递的速度仍然很慢。19世纪末,电磁波的发现为信息插上了飞翔的翅膀。100多年来,通信技术得到了飞速发展,电报、电话、广播、电视等现代化通信技术的应用,大大加快了现代生活的节奏,使古代人“顺风耳、千里眼”的梦想成了现实。

<sup>①</sup>爱因斯坦(A. Einstein, 1879—1955), 20世纪最伟大的科学家之一。

## 1

## 电磁波的发现

我们的生活中处处存在着波动。水的涟漪，音乐的律动……是机械振动形成的机械波。而我们看电视、听广播时接收的是电磁波。尽管它们都是波，但是却有本质的区别。从这节课开始，我们要比较深入地讨论电磁波。

机械波是由机械振动产生的，电磁波又是如何产生的？

尽管自然界到处存在着电磁波，但是直到1886年，人类才第一次主动地发射、接收电磁波。令人惊奇的是，这一切来源于一个伟大的预言。

法拉第发现电磁感应现象那年，麦克斯韦在苏格兰爱丁堡附近诞生了。他从小热爱科学，喜欢思考，1854年从剑桥大学毕业以后，精心研读了法拉第的著作。法拉第关于“场”和“力线”的思想深深地吸引着麦克斯韦，但他也看到了法拉第定性表述的弱点，因此，这位初出茅庐的科学家决定用他的数学才能来弥补。

1860年初秋，麦克斯韦特意去拜访法拉第。两人虽然在年龄上相差四十岁，在性情、爱好、特长方面也迥然各异，可是对物质世界的看法却产生了共鸣。法拉第鼓励麦克斯韦：“你不应该停留在用数学解释我的观点，而应该突破它！”

**伟大的预言** 麦克斯韦系统地总结了人类直至19世纪中叶对电磁规律的研究成果，其中有库仑、安培、奥斯特、法拉第和亨利的开创之功，也有他本人的创造性工作。在此基础上，最终建立了经典电磁场理论。

下面我们定性地介绍麦克斯韦关于电磁场的一些讨论。

• 变化的磁场产生电场

在变化的磁场中放一个闭合电路，电路里会产生感应电流（图14.1-1）这是法拉第发现的电磁感应现象。麦克斯韦进一步想到，既然产生了感应电流，一定是有了电场，它促使



麦克斯韦 (J. C. Maxwell, 1831—1879)，英国物理学家。麦克斯韦少年时代受过很好的教育，显示出了数学和物理学方面的才能。他在电磁场理论和统计物理学方面都做出了杰出的贡献。



图 14.1-1 变化的磁场产生电场

“变化的磁场产生电场”，这实际上是个假设。这个假设基于电磁感应现象，是很自然的。



导体中的自由电荷做定向运动。因此，麦克斯韦认为：这个现象的实质是变化的磁场在空间产生了电场。电路中的自由电荷就是在这个电场的作用下做定向运动，产生了感应电流。即使在变化的磁场中没有闭合电路，同样要产生电场。变化的磁场产生电场，这是一个普遍规律。

#### • 变化的电场产生磁场

既然变化的磁场能够产生电场，那么，变化的电场就不能产生磁场吗？麦克斯韦确信自然规律的统一性与和谐性，相信电场与磁场的对称之美。他大胆地假设：变化的电场就像导线中的电流一样，会在空间产生磁场，即变化的电场产生磁场。

根据这两个基本论点，麦克斯韦推断：如果在空间某区域中有周期性变化的电场，那么它就在空间引起变化的磁场，这个变化的磁场又引起新的变化的电场……于是，变化的电场和变化的磁场交替产生，由近及远地向周围传播。一个伟大的预言诞生了——空间可能存在电磁波（electromagnetic wave）。

“变化的电场产生磁场”，这是另一个假设。这个假设没有直接的实验做基础，它出于对自然规律的洞察力，是很大胆的，但却更具有创造性。

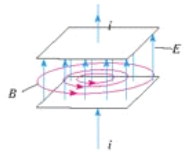


图 14.1.2 变化的电场产生磁场

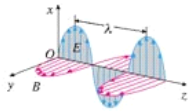


图 14.1.3 沿  $z$  轴传播的电磁波。与  $z$  轴垂直的箭头表示此刻轴上各点的电场方向和磁场方向。

**电磁波** 根据麦克斯韦的电磁场理论，电磁波在真空中传播时，它的电场强度与磁感应强度互相垂直，而且二者均与波的传播方向垂直（图 14.1-3）。因此电磁波是横波。

电磁波以多大的速度传播呢？麦克斯韦得出的答案令人惊奇：电磁波的速度等于光速  $c$ ！麦克斯韦指出了光的电磁本质，他说：“我们有充分的理由断定，光本身是……按电磁波规律传播的一种电磁振动。”在机械波中，位移这个物理量随时间和空间做周期性的变化，而在电磁波中， $E$  和  $B$  这两个物理量随时间和空间做周期性的变化。

麦克斯韦集电磁学研究成果之大成，不仅预言了电磁波的存在，而且揭示了电、磁、光现象在本质上的统一性，建立了完整的电磁场理论。麦克斯韦电磁理论的意义足以跟牛顿力学体系相媲美，它是物理学发展中一个划时代的里程碑。

**赫兹的电火花** 遗憾的是，麦克斯韦英年早逝，他没有看到科学实验对电磁场理论的证明。把天才的预言变成世人公认的真理，是德国科学家赫兹的功劳。

1886 年，赫兹制作了一套仪器，试图用它发射和接收电



赫兹  
(H. R. Hertz, 1857—1894)

磁波。仪器中有一对抛光的金属小球，两球之间有很小的空气间隙。两个球连接到能够产生高压的感应圈的两端。当两球之间放电时，看上去就是一个火花。

仪器的另一部分是弯成环状的导线，导线两端也安装两个金属小球，小球之间也有空隙。当把这个导线环放在距感应圈不太远的位置时，他观察到：当感应圈两个金属球间有火花跳过时，导线环两个小球间也跳过了火花。

这是一个令人振奋的现象！电磁波从发射器到达了接收器。

当感应圈使得与它相连的两个金属球间产生电火花时，空间出现了迅速变化的电磁场。这种变化的电磁场以电磁波的形式在空间传播。当电磁波到达导线环时，它在导线环中激发出感应电动势，使得导线环的空隙中也产生了火花。这个导线环实际上是电磁波的检测器。

在以后的一系列实验中，赫兹观察到了电磁波的反射、折射、干涉、偏振和衍射等现象。他还通过测量证明，电磁波在真空中具有与光相同的速度 $c$ 。这样，赫兹证实了麦克斯韦关于光的电磁理论，赫兹在人类历史上首先捕捉到了电磁波。

赫兹的实验为无线电技术的发展开拓了道路，后人为了纪念他，把频率的单位定为赫兹。

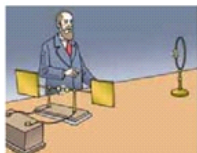


图 14.1-4 令人振奋的电火花

### 做一做

#### 捕捉电磁波

高压发生器 $G$ 上安装两根长约 $1\text{ m}$ 、带有放电极的铜管 $A$ 、 $B$ ，两极的间隙约 $0.5\text{ cm}$ （图 14.1-5），构成发射天线。绝缘架上固定同样的两根金属管 $C$ 、 $D$ ，两管成一直线，中间连接一个电流表，作为接收天线。

闭合高压发生器的电源，在两个电极间产生放电火花。让接收天线与发射天线平行，改变两个天线的距离，观察电流表读数的变化。

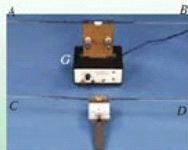


图 14.1-5 演示电磁波发射与接收的装置

### 问题与练习

1. 麦克斯韦根据什么现象认为“变化的磁场产生电场”？关于“变化的电场产生磁场”的观点，他是在什么情况下提出的？为什么说他的两个假设是正确的？
2. 麦克斯韦关于电磁场理论的主要论点是什么？请用麦克斯韦的电磁场理论说明电磁波是怎样产生的。你家的照明电路在工作时会产生电磁波吗？
3. 你能否用实验说明电磁波的存在？

## 2

## 电磁振荡

要产生持续的电磁波，需要变化的电磁场；要产生变化的电磁场，需要变化的电流。

## 演示

把线圈、电容器、电流表、电源和单刀双掷开关照图 14.2-1 连成电路。

先把开关置于电源一边，为电容器充电；稍后再把开关置于线圈一边，使电容器通过线圈放电。观察电流表指针的变化。

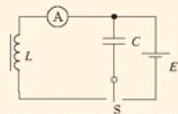


图 14.2-1 产生电磁振荡的电路

**电磁振荡的产生** 大小和方向都做周期性迅速变化的电流，叫做振荡电流（oscillating current），产生振荡电流的电路叫做振荡电路（oscillating circuit）。图 14.2-1 中，当开关置于线圈一侧时，由线圈  $L$  和电容器  $C$  组成的电路，就是最简单的振荡电路，称为  $LC$  振荡电路。

当开关掷向线圈的一瞬间（图 14.2-2 甲 a），也就是电容器刚要放电的瞬间，电路里没有电流，电容器两极板上的电荷最多。从场的观点来看，此时电容器里的电场最强，电路里的能量全部储存在电容器的电场中。

电容器开始放电后，由于线圈的自感作用，放电电流不能立刻达到最大值，而是由零逐渐增大，同时电容器极板上的电荷逐渐减少。到放电完毕时，电容器极板上没有电荷，放电电流达到最大值（图 14.2-2 甲 b）。在这个过程中，电容器里的电场逐渐减弱，线圈的磁场逐渐增强，电场能逐渐转化为磁场能。在放电完毕的瞬间，电场能全部转化为磁场能。

电容器放电完毕时，由于线圈的自感作用，电流并不会立即减小为零，而要保持原来的方向继续流动，并逐渐减小。由于电流在继续流动，电容器在与原来相反的方向重新充电，电容器两极板带上相反的电荷，并且电荷逐渐增多。到反方向充电完毕的瞬间，电流减小为零，电容器极板上的电荷量达到最大值（图 14.2-2 甲 c）。在这个过程中，线圈的磁场逐渐减弱，电容器里的电场逐渐增强，磁场能逐渐转化为电场能。到反方向充电完毕的瞬间，磁场能全部转化为电场能。

振荡电流实际上就是交变电流，不过习惯上指频率很高的交变电流。

机械振动与电磁振荡的本质不同，但它们具有共同的特点。

在机械振动中，例如在单摆的振动中，位移  $x$ 、速度  $v$ 、加速度  $a$  这几个物理量周期性地变化。

在电磁振荡中，电荷量  $q$ 、电流  $i$ 、电场强度  $E$ 、磁感应强度  $B$  这几个物理量周期性地变化。

在机械振动中，动能与势能周期性地相互转化，在电磁振荡中，磁场能与电场能周期性地相互转化。

此后电容器再放电、再充电（图 14.2-2 甲 d、e）。这样不断地充电和放电，电路中就出现了大小、方向都在变化的电流，即出现了振荡电流。在这个过程中，电容器极板上的电荷量  $q$ 、电路中的电流  $i$ 、电容器里的电场场度  $E$ 、线圈里的磁感应强度  $B$ ，都在周期性地变化着。这种现象就是电磁振荡。在电磁振荡的过程中，电场能和磁场能发生周期性的转化。图 14.2-2 乙、丙表示电路中的电流  $i$  和电容器极板上的电荷量  $q$  周期性变化的情况。

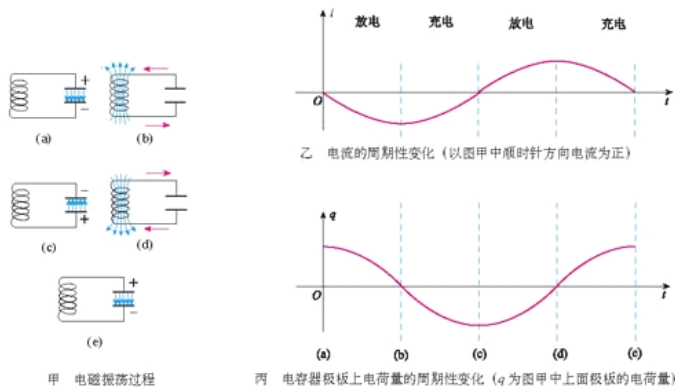


图 14.2-2 LC 振荡电路及其电流、电荷的变化

如果没有能量损失，振荡可以永远持续下去，振荡电流的振幅保持不变。但是，任何电路都有电阻，电路中有一部分能量会转化为内能。另外，还会有一部分能量以电磁波的形式辐射出去。这样，振荡电路中的能量会逐渐减少，直到最后停止振荡。

如果能够适时地把能量补充到振荡电路中，以补偿能量损耗，就可以得到振幅不变的等幅振荡。实际电路中由电源通过晶体管等电子器件为  $LC$  电路补充能量。

### 做一做

#### 用传感器和计算机观察振荡电流

$LC$  电路产生的电磁振荡的频率一般都比较高，电流变化十分迅速。如果用电流传感器代替图中的电流表，或把电压传感器的两端连在电容器的两个极板上，不但可以反映电流、电压的迅速变化，还可以把电流、电压的变化在荧光屏上描出图象。线圈自感系数的大小、电容大小对振荡频率的影响，也可以很清楚地反映出来。



图 14.2-3 用传感器观察振荡电流

**电磁振荡的周期和频率** 电磁振荡完成一次周期性变化需要的时间叫做周期, 1s内完成的周期性变化的次数叫做频率。如果没有能量损失, 也不受其他外界影响, 这时的周期和频率叫做振荡电路的固有周期和固有频率, 简称振荡电路的周期和频率。

### 思考与讨论

#### LC电路的周期(频率)与哪些因素有关?

电容较大时, 电容器充电、放电的时间长些还是短些? 线圈的自感系数较大时, 电容器充电、放电的时间长些还是短些?

根据上面的讨论结果, 定性地讲, LC电路的周期(频率)与电容C、电感L的大小有什么关系?

理论分析表明, LC电路的周期T与自感系数L、电容C的关系是

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

由于周期跟频率互为倒数, 即 $f = \frac{1}{T}$ , 所以

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

式中的T、f、L、C的单位分别是秒(s)、赫兹(Hz)、亨利(H)、法拉(F)。

由以上两式可知, 适当地选择电容器和线圈, 就可以使振荡电路的周期和频率符合我们的需要。也可以用可变电容器或可变电感的线圈组成电路, 改变电容器的电容或线圈的电感, 振荡电路的周期和频率就随着改变。

现代的实际电路中使用的振荡器多数是晶体振荡器(图14.2-4), 其工作原理与LC振荡电路的原理基本相同。



图14.2-4 石英电子钟的振荡器里用的晶体



## 3

## 电磁波的发射和接收

**无线电波的发射** 在上节演示的 $LC$ 电路中,电场主要集中在电容器的极板之间,磁场主要集中在线圈内部,在电磁振荡过程中,电场能和磁场能主要在不同元件之间互相转化,辐射出去的能量很少。

要有效地发射电磁波,振荡电路必须具有如下特点。

第一,要有足够高的振荡频率。理论的研究证明,振荡电路向外界辐射能量的本领,与振荡频率密切相关。频率越高,发射电磁波的本领越大。

第二,振荡电路的电场和磁场必须分散到尽可能大的空间,这样才能有效地把能量辐射出去。因此,要改造图14.3-1甲中的 $LC$ 振荡电路,像图乙、丙那样,增大电容器极板间的距离,使电场和磁场扩展到电容器的外部。这样的振荡电路叫做开放电路。

实际应用中的开放电路,线圈的一端用导线与大地相连,这条导线叫做地线;线圈的另一端与高高地架在空中的天线(antenna)相连。无线电波就由这样巨大的开放电路发射出去。

为了利用电磁波传递信号,例如传递声音、电视图像,就要让电磁波随着待传递的信号而改变。在电磁波发射技术中,使电磁波随各种信号而改变的技术叫做调制(modulation)。

一种调制的方法是使高频电磁波的振幅随信号的强弱而变,这种调制叫做调幅(AM,图14.3-2);另一种调制的方法是使高频电磁波的频率随信号的强弱而变,这种调制叫做调频(FM,图14.3-3)。

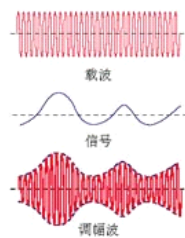


图 14.3-2 调幅

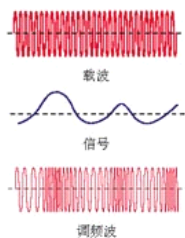


图 14.3-3 调频

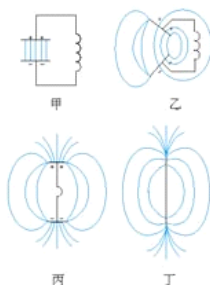


图 14.3-1 由闭合电路变成开放电路

这里描述的天线用于长波、中波、短波的无线电广播和通信,电视广播和微波通信的天线,在结构和原理上都与这种天线不同。

如果说待传递的信号相当于货物,那么未被调制的电磁波就像运载工具,所以称为“载波”。

**无线电波的接收** 电磁波在传播时如果遇到导体,会使导体中产生感应电流。因此,空中的导体可以用来接收电磁波,这就是接收天线。

世界上有许许多多的无线电台、电视台以及各种无线电通信设备,它们不断地向空中发射各种频率的电磁波,这些电磁波弥漫在我们周围。如果不加选择地把它们都接收下来,那必然是一片混乱的信号。所以,接收电磁波后首先要从诸多的信号中把我们需要的选择出来,这就要设法使我们需要的电磁波在接收天线中激起的感应电流最强。

在无线电技术里,利用电谐振可以达到这个目的。当接收电路的固有频率跟收到的电磁波的频率相同时,接收电路中产生的振荡电流最强,这种现象叫做电谐振,相当于机械振动中的共振。

使接收电路产生电谐振的过程叫做调谐(**tuning**),图 14.3-4 是收音机的一种调谐电路。调节可变电容器的电容可以改变电路的固有频率,使它跟要接收的电磁波的频率相同,这个电磁波在调谐电路里激起较强的感应电流,于是就选出了这个电台。

由调谐电路接收到的感应电流,是经过调制的高频电流,还不是我们需要的声音或图像信号。因此还要使声音或图像信号从高频电流中还原出来,这个过程是调制的逆过程,所以叫做解调(**demodulation**)。调幅波的解调也叫检波。

解调之后我们得到了原来的信号,经过放大就可以在扬声器或显像管中重现了。

技术上把波长大于 1 mm (频率低于 300 GHz) 的电磁波称做无线电波,并按波长(频率)把无线电波分为若干波段。不同波段的无线电波的传播特点不一样,发射、接收所用的设备和技术也不相同,因此有不同的用途(见表 1)。

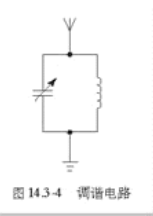


图 14.3-4 调谐电路

表 1 无线电波的波段划分

波段	波长 / m	频率 / MHz	传播方式	主要用途
长波	30 000~3 000	0.01~0.1	地波	广播 导航
中波	3 000~200	0.1~1.5	地波和天波	
中短波	200~50	1.5~6	天波	调幅(AM)
短波	50~10	6~30		广播 电报 通信
微波	米波(VHF)	10~1	近似直线传播	调频(FM) 广播 电视 导航
	分米波(UHF)	1~0.1	直线传播	电视
	厘米波	0.1~0.01		雷达
	毫米波	0.01~0.001		30 000~300 000

## 做一做

## 制作简易无线话筒

本实验介绍的无线话筒，它的发射频率在100 MHz左右，与调频收音机配合，工作距离可达30 m。

图14.3-5是无线话筒的电路图。三极管VT、线圈L和电容器 $C_1$ 构成高频振荡电路，其作用是输出高频电流，这个高频电流的频率能够随声音的变化而变化。振荡的中心频率由L、 $C_1$ 的数值决定。电源E和电阻R给三极管VT和驻极体话筒BM供电。当话筒输出的音频电压加到三极管的发射极时，发射极电流发生变化，振荡频率就会随着音频信号变化，从而达到调频的目的。调频后的高频电流经电容 $C_2$ 通过天线发射出去。

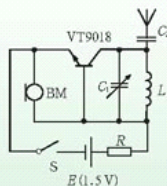


图14.3-5 无线话筒电路图

按电路图在教师或其他有经验的人的指导下设计、制作一块电路板，将检测好的元件焊接在电路板上。整机工作电流调为0.4 mA，振荡频率调在远离广播电台的地方。调好后用调频收音机检验效果。

简易无线话筒元件参数表（供参考）

序号	名称	规格型号	使用说明
1	三极管VT	9018	NPN型高频三极管
2	电容器 $C_1$	18 pF半可变电容	高频瓷介质电容
3	电容器 $C_2$	4.7 pF	瓷片电容
4	线圈L	自制	用1 mm漆包线在圆铅笔上绕4匝
5	电阻R	1.8 k $\Omega$	1/8 W金属膜电阻
6	发射天线	直径1 mm，长30 cm	1 mm漆包线
7	电源E	5号电池	
8	驻极体话筒BM	CRZ-2	

## 科学足迹

## 无线电通信

在赫兹发现电磁波后的第二年，当有人来信问到利用电磁波进行通信的可能性时，他在回信中竟这样写道：“如果要利用电磁波进行无线通信，那非得有一面和欧洲大陆面积差不多大的巨型反射镜才行。”赫兹顽强的探索精神和卓越的实验才能令人惊叹，但他却没有看到电磁波诱人的应用前景。

1895年,俄罗斯物理学家波波夫(A. C. Gajgd, 1859—1906)和意大利青年马可尼(G. Marconi, 1874—1937)各自独立地发明了无线电报机。马可尼使他的发明发展为完整的系统,从而成功地实现了商业应用。1897年5月18日,马可尼进行的横跨布里斯托尔海峡的无线电通信取得成功。



1915年,第一条跨越大西洋的无线电通信线路开通了。

由于无线电通信不需要昂贵的地面线路和海底电缆,因而很快受到人们的重视。它首先用于铺设线路困难的海上通信。第一艘装有无线电台的船只是美国的“圣保罗”号邮船。后来,海上无线电通信接二连三地在援救海上遇险船只中发挥作用,从而初露头角。

1901年,无线电波越过了大西洋,人类首次实现了隔洋无线电通信。两年后,无线电电话试验成功。其他利用电磁波的技术,也像雨后春笋般相继问世。无线电广播、电视广播、雷达、微波接力通信、卫星通信……它们使世界的面貌发生了深刻变化。

### 问题与练习

- 有5个容易混淆的名词:调制、调幅、调频、调谐、解调。请设计一个方框图来明确它们的关系,并特别说明调幅与调频的区别。
- 请向你的同学描述:调幅波(经调幅后的电磁波)图象的形状是怎样的?描述时,要求用到“载波”“音频信号”这两个名词。
- 我国第一颗人造卫星用20.009 MHz和19.995 MHz的电磁波发送信号,求这两种电磁波的波长。它们属于什么波段?
- 某同学自己绕制天线线圈,制作一个最简单的收音机,用来收听中波的无线电广播。他发现有一个频率最高的中波电台收不到,但可以接收其他中波电台。为了收到这个电台,他应该增加还是减少线圈的匝数?说明理由。

## 4

## 电磁波与信息化社会

**电磁波与信息的传递** 从语言的出现到文字的创造,人类文明的每一次重大进步都伴随着信息交流的发展。纸和印刷术的发明使得信息能够大量流通,书籍、报纸、杂志因此发展起来了。

由于电磁学的进步,人们又开始利用电来传递信息。1844年电报的发明揭开了电信的序幕,电磁波的发现又实现了无线通信。

电磁波可以通过电缆、光缆进行有线传输,也可以实现无线传输。根据信息论的研究,电磁波的频率越高,相同时间传递的信息量越大。光的频率比无线电波的频率高得多。因此光缆可以传递大量信息。

**电视** 1927年,英国发明家贝尔德在伦敦公开表演了向远处传递活动图像的技术。虽然这些图像又小又暗而且摇晃不定,但它们却是人类第一次用电来传递的活动图像。这个表演标志着电视的诞生。

在现代电视发射系统中,摄像管的作用是摄取景物的图像并将其转换为电信号(图14.4-1)。镜头把景物的像成在摄像管的屏上。电子枪发出的电子束按一定规律对屏上的图像扫描。扫描的路线如图14.4-2所示,从A开始,逐行进行,直到B。通过电子束的扫描,显像管把一幅图像按照各个部分的明暗情况,逐点地变为强弱不同的信号电流。然后用电信号调制高频电流,最后通过天线把带有信号的电磁波发射出去。

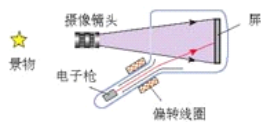


图 14.4-1 摄像管

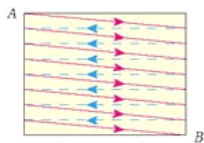


图 14.4-2 扫描的路径

在电视接收端,天线接收到高频信号以后,经过调谐、解调,将得到的图像信号送到显像管。显像管里的电子枪发射电子束的强弱受图像信号的控制,同时也像摄像管的电子枪那样,在荧光屏上扫描。这样,当电子束射到显像管的荧光屏上时,在屏上便出现了与摄像管屏上相同的图像。

摄像机在1s内要传送25幅画面,电视接收机也以相同的速率在荧光屏上显示这些画面。由于画面更换迅速和视觉暂留效应,我们感觉到的便是活动的影像。

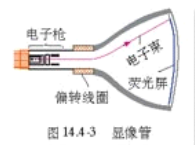
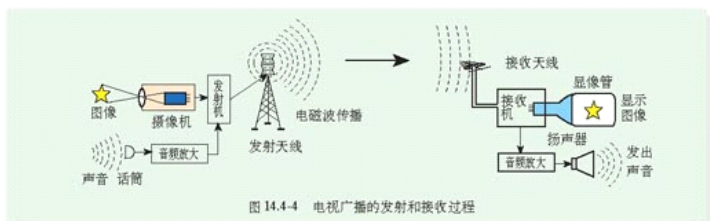


图 14.4-3 显像管



接收天线收到的电磁波除了载有图像信号外,还有伴音信号。伴音信号经解调后送到扬声器。图 14.4.4 是电视广播的发射和接收过程的示意图。



电视的应用正在日益扩大。例如,在自动化工厂的控制中心,可以利用电视来监视各条生产线的工作情况。一些不便直接观察的地方,如存在有毒气体或有放射性的地方,可以通过电视进行间接观察。现在,电视技术已经应用到工业、交通、文化教育、国防和科学研究等各个方面。



图 14.4-5 雷达天线

**雷达** 雷达是利用无线电波来测定物体位置的无线电设备。

电磁波遇到障碍物要发生反射,雷达就是利用电磁波的这个特性工作的。波长短的电磁波,由于衍射现象不明显,传播的直线性好,有利于用电磁波定位,因此雷达用的是微波。

雷达有一个可以转动的天线(图 14.4-5),它能向一定方向发射无线电脉冲,每次发射的时间短于  $1\ \mu\text{s}$ ,两次发射的时间间隔大约是  $0.1\ \text{ms}$ 。这样,发射出去的无线电波遇到障碍物时,可以在这个时间间隔内反射回来被天线接收。

无线电波的传播速度是  $c$ ,测出从发射无线电波到接收反射波的时间  $t$ ,就可以确定障碍物的距离  $s$ ,再根据发射无线电波的方向和仰角,便可以确定障碍物的位置了。实际上,障碍物的距离等数据由电子电路自动计算并在荧光屏上显示。

利用雷达可以探测飞机、舰艇、导弹以及其他军事目标。除了军事用途外,雷达可以为飞机、船只导航,可以用来研究行星、卫星,可以探测暴风、雷雨、云层等。



图 14.4-6 一些雷达天线外面装有球形防护罩。防护罩由能够透过无线电波的材料制成。

**移动电话** 现在,移动电话的使用已经十分普遍,随身携带一部手机,就可以在城市的任何地方进行通话。有的旅客列车和民航班机上还开通了公用移动电话业务。

公用移动电话系统是城市电话网的一部分。每一部移动电话都是一个无线电台，它将用户的声音转变为高频电信号发射到空中；同时它又相当于一台收音机，捕捉空中的电磁波，使用户接收到通话对方送来的信息。

移动电话的体积很小，发射功率不大；它的天线也很简单，灵敏度不高。因此，它与其他用户的通话要靠较大的固定无线电台转接（图 14.4-7）。这种固定的电台叫做基地台或基站。在城市中，移动通信基地台的天线建在高大建筑物上。



图 14.4-7 移动电话靠基站转换

**因特网** 1946年，世界上第一台电子计算机诞生了。20世纪90年代中期，世界最大的计算机互联网——因特网（**Internet**）出现了爆炸式的发展，数据通信的业务量飞速增加。一个世纪以来电信业的主要业务是电话，21世纪初期，它将发展为主要以因特网为基础的信息业务。这将从根本上改变我们的生活和工作方式。人们可以通过互联网听音乐、看电影、聊天、购物；可以通过互联网查阅各种资料，进行远程教学、远程医疗，甚至可以为身处世界各地的人召开电视会议。现代通信使我们的地球真的成了“地球村”。数以亿计的人们通过信息联系起来，实现了更大程度的资源共享和更有效的全球合作。



互联网改变了我们的生活和工作的方式

### 说一说

#### 你的信息化生活

信息的掌握和信息的交流在日常生活和工作、学习中很重要。谈谈你常采用什么方法收集和交流信息。你的爷爷、奶奶小时候又是怎样收集和交流信息的？

### 科学漫步

#### 模拟信号与数字信号

现代生活中数字信号用得越来越多，数字信号在许多方面比模拟信号优越。什么是模拟信号，什么又是数字信号？

我们来看两个例子。

打电话的时候，话筒把声音变成电流，电流的波形反映了声音的响度、音调和音色。它模仿着声音的强弱、高低和音色。这样连续变化的音频电流信号是模拟信号 (analog signal, 图 14.4-8)。



图 14.4-8 音频电流的大小模拟声压的变化，是模拟信号。

电报信号要简单得多，它用长短不同的脉冲传递信息。例如，可以用一个短脉冲和一个长脉冲“·-”代表数字 1，用短、短、长“···-”代表 2……另一方面，把汉字编码，例如用“7193”代表“电”字。这样，一系列长短不同的脉冲就代表了一系列汉字，可以传递各种信息。

丰富多彩的声音也能用脉冲信号传递吗？回答是肯定的。有关声音的响度、音调和音色的信息包含在音频模拟信号里，我们给音频模拟信号编码，问题就解决了。

首先，把语音的模拟信号“截断”成一个个短脉冲（图 14.4-9），即变成幅度不同的脉冲信号——脉冲幅度调制信号，这个过程叫做取样。如果取样的次数足够多，这种脉冲信号可以令人满意地代表原来的语音信号。现在常用的取样速率是 8 000 次每秒，也就是每隔 125  $\mu\text{s}$  取样一次。

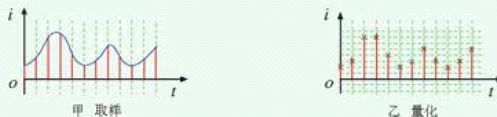


图 14.4-9 脉冲幅度调制信号

然后，把各个脉冲的幅度量化，也就是说，把脉冲的最大幅度分为若干级，通常是 256 级，用来对每个脉冲进行测量，得到它的幅度值。例如，图 14.4-9 中最大的幅度值是 210，最小是 60。

最后，把幅度值“翻译”成二进制代码。

二进制是表示数的一种方法，它只需要0和1两个数字。例如十进制中的数5，在二进制中表示为并列写出的“1”“0”“1”三个数字。如果在电路用“有电流”表示二进制中的“1”，用“无电流”表示二进制中的“0”，那么，任何一个二进制数可以很方便地用一系列脉冲来表示。

这样，一系列脉冲代替了声音模拟信号，这就是现代电信所用的脉冲编码调制信号，或者简称为数字信号（digital signal）。数字信号与模拟信号一样，可以用有线或无线方式传输。

数字信号有一系列优点。

数字信号抗干扰能力强，可以长距离传输。信号传输过程中总会变弱，同时有各种干扰混进来。对于模拟信号，可以在中途设置增音器，也就是放大器，但是干扰信号同样会被放大，而且放大器本身也会引起失真，所以用模拟信号长距离传输的语音质量是比较差的。对于数字信号来说，尽管也有信号的衰减和外界的干扰，但是只要没有把信号脉冲“抹平”，我们都可以用“再生中继器”把它恢复。在长距离传输和许多次中继之后，数字信号几乎与传送时的一模一样，这样就保证了通话质量。

除了声音之外，图像和各种其他数据也都可以转变成数字信号，因此，同样的线路可以综合传输声音、图像和各种数据。

数字电子计算机也是以数字的方式工作的。信号数字化后就可以利用电子计算机进行处理和交换。人们常说的程控电话，就是计算机程序控制的电话交换系统。

信号数字化以后还可以利用一定的技术使得多路信号在同一条电话线路上传输。

### 问题与练习

1. 记录收音机上MW、SW、FM波段的频率范围，计算三个波段相应的波长范围。查阅电视机说明书规格页上调频器接收频率一栏中VHF（L）、VHF（H）、UHF三个波段的名称，记录它们的频率范围，计算相应的波长范围。
2. 某雷达站正在跟踪一架飞机，此时飞机正朝着雷达站方向匀速飞来。某一时刻雷达发出一个无线电脉冲，经200  $\mu\text{s}$ 后收到反射波；隔0.8 s后再发出一个脉冲，经198  $\mu\text{s}$ 收到反射波。求飞机的飞行速度。

## 5

## 电磁波谱

**电磁波谱** 电磁波的频率范围很广。无线电波、光波、X射线、 $\gamma$ 射线，都是电磁波。其中，人眼可见的电磁波——可见光，只是电磁波中的一小部分。按电磁波的波长或频率大小的顺序把它们排列成谱（图 14.5-1），叫做电磁波谱（electromagnetic wave spectrum）。

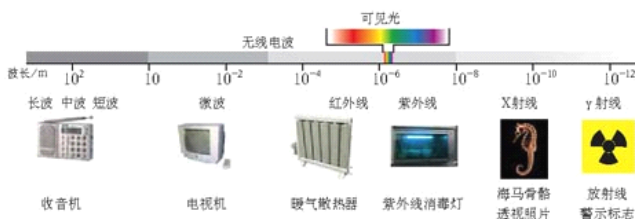


图 14.5-1 电磁波谱

电磁波是一个很大的家族。有的电磁波的波长很长，例如无线电波；有的电磁波的波长很短，例如 $\gamma$ 射线。不同电磁波由于具有不同的波长<sup>①</sup>（频率），才具有不同的特性。

**无线电波 (radio wave)** 波长大于 1 mm（频率小于 300 GHz）的电磁波是无线电波。无线电波用于通信、广播及其他信号传输。

广播电台和电视台都有发射无线电波的设备，许多自然过程也辐射无线电波。如天文学家用射电望远镜接收天体辐射的无线电波，进行天体物理研究。

**红外线 (infrared ray)** 红外线是一种光波，它的波长比无线电波短，比可见光长。所有物体都发射红外线。热物体的红外辐射比冷物体的红外辐射强。肉眼看不见红外线，但能够感受它。当你在炉火旁感受到温暖时，你的皮肤正在接收红外线。



人体在发射红外线，体温越高，发射的红外线越强。根据这个原理，红外体温计不与身体接触也可以测体温。

<sup>①</sup>描述电磁波谱的不同区段时，可以用波长，也可以用频率。对于无线电波，特别是微波以外的无线电波，习惯上用频率，对于其他电磁波，习惯上用波长。



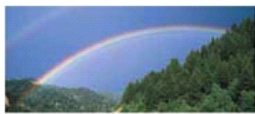
红外探测器能在较冷的背景上探测出较热物体的红外辐射,这是夜视仪器和红外摄影的基础。用灵敏的红外探测器吸收远处物体发出的红外线,然后用电子电路对信号进行处理,可以得知被测对象的形状及温度、湿度等参数。这就是红外遥感技术。利用红外遥感可以在飞机或人造地球卫星上勘测地热、寻找水源、监视森林火情、预报风暴和寒潮。红外遥感在军事上的应用也十分重要。

### 说一说

许多动物具有发达的红外感受器官,因此在夜间也可以“看到”物体。你知道哪些动物有这方面的功能吗?

**可见光 (visible light)** 可见光的波长在700 nm到400 nm之间<sup>①</sup>。

阳光是由各种色光组成的。科学研究发现,不同颜色的光是波长(频率)范围不同的电磁波。



大气中的水滴把阳光分解为色光

颜色	红	橙	黄	绿	蓝-靛	紫
真空中的波长 $\lambda$ /nm	700~620	620~600	600~580	580~490	490~450	450~400

天空为什么是亮的,因为大气把阳光向四面八方散射。在没有大气的太空,即使太阳高悬在空中,它周围的天空也是黑暗的。由于波长较短的光比波长较长的光更容易被大气散射,所以天空看起来是蓝色的。大气对波长较短的光的吸收也比较强,傍晚的阳光在穿过厚厚的大气层时,蓝光、紫光大部分被吸收掉了,剩下红光、橙光透过大气射入我们的眼睛,所以傍晚的阳光比较红。

**紫外线 (ultraviolet ray)** 人眼看不到比紫光波长更短的电磁波。在紫光之外,波长范围在5 nm到370 nm之间的电磁波是紫外线。紫外线具有较高的能量,足以破坏细胞核中的物质。因此,可以利用紫外线灭菌消毒。太阳光里有许多紫外线,人体接受适量的紫外线照射,能促进钙的吸收,改善身体健康。但过强的紫外线会伤害眼睛和皮肤。

许多物质在紫外线的照射下会发出荧光,根据这一点可以设计防伪措施。

**X射线 (X-ray) 和γ射线 (γ-ray)** 波长比紫外线更短的电磁波就是X射线和γ射线了。

人们用X射线管来产生X射线。X射线对生命物质有较强的作用,过量的X射线辐射会引起生物体的病变。X射线能够穿透物质,可以用来检查人体内部器官。在工业上,利用X射线检查金属零件内部的缺陷。机场等地进行安全检查时,X射线能轻而易举地窥见

<sup>①</sup>不同人所感受的光的波长范围有差异,因此各种资料所载的可见光波长范围不完全一致。

箱内的物品。

波长最短的电磁辐射是 $\gamma$ 射线，它具有很高的能量。 $\gamma$ 射线能破坏生命物质。把这个特点应用在医学上，可以摧毁病变的细胞，用来治疗某些癌症。 $\gamma$ 射线的穿透能力很强，也可用于探测金属部件内部的缺陷。



“CT”是“计算机辅助X射线断层摄影”的简称。X射线以不同角度照射人体，计算机对其投影进行分析，给出类似于生理解剖片一样的人体组织照片。医生可以从图中看出是否发生了病变。

**电磁波的能量** 法拉第用“力线”形象地描述了电磁场，麦克斯韦用数学语言表述了电磁场。但在当时，人们只把电磁场看做研究电磁现象的一种方法。赫兹通过实验证实了电磁波的存在，这意味着，电磁场不仅是一种描述方式，而且是一种真正的物理实在。

微波炉的工作应用了一种电磁波——微波。食物中的水分子在微波的作用下热运动加剧，温度升高，内能增加。增加的能量是微波给它的，可见电磁波的确具有能量，电磁波是物质存在的一种形式。

除了可见光外，虽然我们看不到电磁波，却能通过它的能量而感觉到它。收音机能收到广播电台的声音，那是因为电台发射的电磁波在收音机的天线里感应出了电流。电流的能量是从哪里来的？它来自电台发射的无线电波。

我们有各种各样的仪器，能够探测到许许多多电磁波。所有这些都表明电磁波具有能量，电磁波是一种物质。



微波炉

**太阳辐射** 阳光从太阳辐射出来，其中含有可见光，还有无线电波、红外线，也有紫外线、X射线、 $\gamma$ 射线。太阳辐射的能量集中在可见光、红外线和紫外线三个区域。从图 14.5-2 可以看到，波长在  $5.5 \times 10^{-7} \text{m}$  的黄绿光附近，辐射的能量最强。我们的眼睛正好对这个区域的电磁辐射最敏感。眼睛把太阳在最强辐射区的辐射作为自己的接收对象，这样就能看到最多的东西，获得最丰富的信息。读到这里，你是否又一次感受到了自然万物的绝妙与和谐？这是巧合呢，还是生物进化的结果？

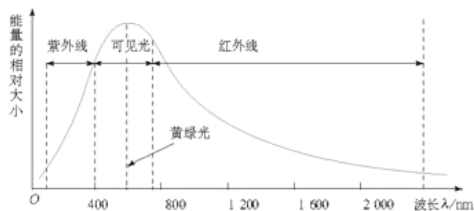


图 14.5-2 太阳辐射的能量大部分集中在可见光及附近的区域

## 科学漫步

## 寻找地外文明

天文学家不仅用眼睛“看”宇宙，也在用耳朵“听”宇宙。这个“耳朵”就是射电望远镜。从外观上看，大多数射电望远镜都有抛物面形的天线。我们知道，折射望远镜靠凸透镜会聚光线，反射望远镜靠抛物面形状的反射镜面会聚光线。金属制成的抛物面天线，能把来自遥远天体的无线电波会聚起来，从而捕捉来自太空的信息。

望远镜的直径越大，会聚的无线电波越多，于是就能观察更弱的射电源。望远镜的直径越大，分辨能力也越高。射电望远镜可以造得很大，几十米直径的射电望远镜在技术上也能够实现。修建很多小射电望远镜，再把它们组合起来，其分辨能力也能达到大口径射电望远镜的效果。20世纪60年代，很多重大的天文学发现都与射电天文学有关。

人类探索自然奥秘的活动从来没有停止过。20世纪，“外星人”成了科幻小说的主题之一。1960年美国国立射电天文台执行了一项计划：寻找“外星人”。他们使用一台直径26 m的射电望远镜，接收21 cm波长的无线电信号。宇宙中最多的元素是氢，21 cm波长是氢原子辐射的波长之一。如果存在着任何智慧生物，他们都会对氢元素做透彻的研究。同年4月8日，这架射电望远镜开始搜索。遗憾的是至今没有发现什么有价值的信息。研究人员又在1972~1975年用两台直径更大的射电望远镜和更精密的仪器，在同一波段对660颗与太阳类似的恒星进行无线电监听，结果仍未发现有价值的信息。现在，有人准备建造更多、更大的射电望远镜天线，完全用电子计算机控制，来搜索更为遥远的天体发射的无线电波。

除了千方百计接收来自太空的“外星人来电”之外，地球上的人也主动向宇宙发射过几次无线电信号。1974年11月16日，设在波多黎各的一个天文台用波长12.6 cm的调频电磁波第一次向银河系发送了人类对外星人的友好问候（图14.5.3）。

亲自登门拜访其他星球可能更有意义。1957年第一颗人造卫星上天，人类开始了飞向其他星球的努力。1969年7月20日，人类的足迹登上了月球，发现月球上没有生命。后来，几只飞船肩负人类的重托飞向太空，拜访了金星、火星，甚至离开太阳系去寻找人类的知音。1977年8月和9月，一对“孪生兄弟”，宇宙飞船“旅行者（Voyager）”1号和2号分别出发，它们携带的“介绍信”是一套灌满“地球之音”的铜制唱片，其直径为30 cm，表面喷金，并与一枚钻石唱针一起装在铝盒中。这套唱片在宇宙中经历10亿年时间也不会变音，可放音乐120 min。它向太空宣告：“这是来自一个遥远的小小星球的礼物，它代表了我们的声音、科学、形象、音乐、思想和感情。我们正在努力，相信将来有朝一日将会解决面临的问题，参加到银河系



射电望远镜



图14.5.3 人类在1974年发给外星人的电报的内容

的文明大家庭中来。这套唱片代表了我们的希望、决心和对遥远世界的良好祝愿！”唱片收集了雨声、风声等地球上 35 种自然界的音响、27 首世界名曲、60 种不同语言的问候声，包括汉语“祝你们大家好”。这套唱片还介绍了地球的山川海空、树草花卉、飞禽走兽，以及人体、人的 DNA、太阳系的情况等等，共有 115 张图片。人类派出的这对探测器已经在太阳系内漫游了二十九年，现在差不多飞到了太阳系的边缘，它们将担负起寻访地外文明和传递人类信息的使命。

时至今日，人们虽然已经发现了几颗太阳系外的行星，但还没有找到地外文明。目前已知的文明星球只有一个——地球。生活在地球上的人们应该更加爱护自己的地球母亲。

### 问题与练习

1. 我们根据什么说电磁波是一种物质？
2. 波长为  $0.6 \mu\text{m}$  的红光，从 10 m 外的交通信号灯传到你的眼睛，大约需要多长时间？这个距离是波长的多少倍？
3. 除了可见光外，红外线、紫外线、无线电波（中波、短波、微波）、X 射线、 $\gamma$  射线，都是电磁波大家族中的成员。请在这些看不见的电磁波中，每种选一个与你关系最密切的，或者令你印象最深的实例，按照波长由长至短的顺序，列举出来。



上下四方曰宇，古往今来曰宙。

——尸佼<sup>①</sup>

## 第十五章 相对论简介



高速列车上发生了什么事情？小姑娘为什么感到惊奇？<sup>②</sup>

牛顿物理学在人类活动的“正常”范围内是非常准确的。所谓“正常”范围是指：其中遇到的速度远小于光速，尺寸远大于分子但又不比银河系大很多倍，引力也不比地球引力大很多倍。在这个范围之外，牛顿物理学的结论就与观测结果不一致了。只有在相对论问世以后，我们才开始了解神奇的高速世界、认识变化多彩的星空，奥秘无穷的宇宙才为我们掀开又一层神秘的面纱。

爱因斯坦的相对论以深奥难懂著称。其实，以少数不深奥、不难懂的原理为基础，经过可信的逻辑推理，你将看到，那些神奇的结论竟是十分自然的！

<sup>①</sup> 尸佼（约前390—约前330），战国时期的杂家。引文见《尸子》。

<sup>②</sup> 图片选自辽宁教育出版社《人物摄影》，2003年4月第1版。



## 1

## 相对论的诞生

19世纪末期,以经典力学、热力学和统计物理学、电磁场理论为主要内容的物理学形成了完整的科学体系,自然界的各种物理现象几乎无一不能用它们来解释。为了庆祝新世纪的到来,在1900年英国皇家学会的新年庆祝会上,著名物理学家,享有“开尔文勋爵”称号的威廉·汤姆孙(W. Thomson, 1824—1907),展望了新的世纪。他回顾了物理学在过去几百年中的发展,充满自信地宣称:科学的大厦已经基本完成,未来的物理学家只要做一些修修补补的工作就可以了。不过他也承认,“明朗的天空中还有两朵小小的、令人不安的乌云”。其中一朵乌云与黑体辐射有关,另一朵与光的速度有关。

黑体辐射的研究催生了量子理论,我们将在《选修3-5》中学习;而当光速问题的乌云散尽,迎来的则是相对论的曙光。从此物理学来到了一片前所未有的广阔天地。

**经典的相对性原理** 我们在《必修1》中已经看到,如果牛顿运动定律在某个参考系中成立,这个参考系就做惯性系,相对一个惯性系做匀速直线运动的另一个参考系也是惯性系。

## 思考与讨论

在不同的惯性参考系中,人们观察到的现象可能不同。例如在匀速行驶的船上,桅杆上掉下来的物体沿直线运动,在岸边看,这个物体沿抛物线运动……

如果你是船上的观察者,你怎样用高中物理的知识解释物体的运动?

如果你是地面的观察者,你怎样用高中物理的知识解释物体的运动?

分别以船和地面为参考系研究问题,高中物理的知识是否都是正确的?

人们可以通过观察与实验知晓物理规律。但是,早在1632年,伽利略就已经在《关于两个世界的对话》一书中指出:在一艘平稳行驶的大船里,无法通过船上得到的物理规律与地面得到的规律的比较,来判断大船是否在行驶。

实际上,大家都会相信这样一个论述:力学规律在任何惯性系中都是相同的。这个论述叫做伽利略相对性原理(**relativity principle**)。相对性原理可以有不同的表述。例如,还可以表述为:在一个惯性参考系内进行的任何力学实验都不能判断这个惯性系是否相对于另一个惯性系做匀速直线运动;或者说,任何惯性参考系都是平权的。

**相对性原理与电磁规律** 相对性原理是这样简单而自然,不但没有人去怀疑它,甚至设

有人去思考它。然而，在电磁学的领域里，相对性原理遇到了麻烦，这个麻烦与光速有关。

根据麦克斯韦的电磁理论可以直接得到真空中电磁波的速度，并不涉及参考系的问题，也就是说，“电磁波的速度是 $c$ ”这本身就是电磁规律的一部分，而不是电磁规律应用于某个具体事物的结论。于是，问题出现了：麦克斯韦的电磁理论相对哪个参考系成立？如果它相对参考系 $S$ 是正确的，另外还有一个参考系 $S'$ ， $S'$ 相对于 $S$ 以速度 $v$ 运动（图 15.1-1），那么光相对于 $S'$ 的速度似乎应该是 $c - v$ 而不是 $c$ 。好像电磁规律不是对任何惯性系都一样！

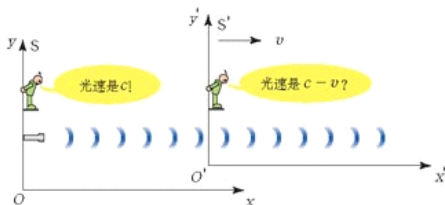


图 15.1-1 难道电磁规律对两个参考系不一样？

那么，麦克斯韦的电磁理论到底对哪个惯性参考系成立？换句话说，电磁波对哪个惯性参考系的速度是 $c$ ？许多物理学家通过实验和天文观测研究这个问题，1887年的麦克耳孙—莫雷实验是最著名的一个。然而，这些实验和观测都得到了一个奇怪的结果：不论光源与观察者做怎样的相对运动，光相对于观察者的速度都是一样的！



图 15.1-2 学校中麦克耳孙—莫雷实验仪器的照片

在令人困惑的事实面前，物理学家有两种选择：多数人力图修正现有的理论，去适应实验结果；而爱因斯坦、庞加莱等人则主张彻底摆脱“麦克斯韦电磁理论只适用于某一特殊惯性系”的观念。

**狭义相对论的两个基本假设** 爱因斯坦坚信，自然界不存在特殊的惯性参考系，不论是力学规律还是电磁规律，它们对任何惯性参考系都是一样。也就是说，相对性原理对一切自然规律都适用。这就是狭义相对论的第一个假设：

• **狭义相对性原理**

在不同的惯性参考系中，一切物理规律都是相同的。

物体的位移、速度以及电场强度、磁感应强度等物理量有可能因为所选择参考系的不同而不同，但是它们所遵从的物理规律却是同样的。也就是说，在一切惯性参考系中物理定律的数学形式完全相同。

当时许多人认为宇宙中弥漫着一种叫做以太的物质，麦克斯韦电磁理论是相对于以太而言的。所以以太指的就是我们所说的特殊参考系。狭义相对性原理认为没有这样的特殊参考系，实际上也就否定了以太的存在。

狭义相对论的另一个基本原理是：

- 光速不变原理

真空中的光速在不同的惯性参考系中都是相同的，光速与光源、观察者间的相对运动没有关系。

这两个假设似乎是麦克耳孙—莫雷实验等观测和实验的直接结论。为什么还要叫做假设？这是因为，虽然实验表明了假设所说的内容，但这终究是有限的几次实验。只有再从这两个假设出发，经过逻辑推理（包括数学推导）所得出的大量结论都与事实相符，那时它们才能成为真正意义上的原理。

下面将要看到，到目前为止，这两个基本原理的所有推论都与事实相符，这就证实了它们的正确性。

### 问题与练习

1. 假设你正坐在一列火车的车厢中，你能想出几个办法来分辨火车是静止的还是在做匀速直线运动。这些办法是否都同火车外的世界有某种联系？
2. 你怎样在一个封闭的汽车内部判断汽车是在加速、减速、转弯还是在做匀速直线运动？这些判断与狭义相对性原理冲突吗？
3. 火箭以  $0.75c$  的速度离开地球，从火箭上向地球发射一个光信号，火箭上测得光离开火箭的速度是  $c$ ，根据过去熟悉的速度合成法则，光到达地球时地球上测得的光速是多少？根据狭义相对性原理呢？

## 2

### 时间和空间的相对性

“同时”的相对性 作为相对论的两个假设的直接推论，现在讨论“同时”的相对性，以体会相对论描述的世界与我们日常的经验有多大的差别。

先研究两个“事件”的同时性。在这里，“事件”可以指一个电子与观测仪器的碰撞，也可以指闪电对地面的打击，还可以指一个婴儿的诞生……在数学上，一个事件表示为空间和时间的一组坐标  $(x, y, z, t)$ 。

假设一列火车在沿平直轨道飞快地匀速行驶。车厢中央的光源发出了一个闪光，闪光照到了车厢的前壁和后壁，这是两个事件。车上的观察者认为两个事件是同时的。在他看来这很好解释，因为车厢是个惯性系，光向前、后传播的速度相同，光源又在车厢的中央，闪光当然会同时到达前后两壁（图15.2-1甲）。

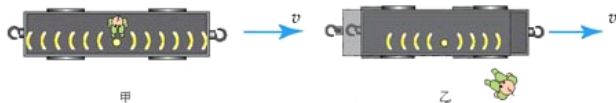


图 15.2-1 闪光是否同时到达前后两壁?

车下的观察者不以为然。他观测到,闪光先到达后壁,后到达前壁。他的解释是:地面也是一个惯性系,闪光向前、后传播的速度对地面也是相同的,但是在闪光飞向两壁的过程中,车厢向前行进了一段距离,所以向前的光传播的路程长些,到达前壁的时刻也就晚些(图 15.2-1 乙),这两个事件**不同时**。

车上下两位观察者推理的根据相同,都是狭义相对论的两个假设:他们都认为在自己的参考系中闪光向前、向后传播的速度是一样的;他们都认为“ $\text{时间} = \frac{\text{距离}}{\text{速度}}$ ”这个公式是正确的。他们谁都没有错。

在经典物理学家的头脑中,如果两个事件在一个参考系中是同时的,在另一个参考系中一定也是同时的,这一点似乎天经地义,无需讨论。但是,如果接受了爱因斯坦的两个假设,我们自然会得出“同时是相对的”这样一个结论。为什么在日常生活中没有人觉察到这种相对性?原来,火车运动的速度远远小于光速,光从车厢中央传播到前后两壁的短暂时间内,火车前进不了多大距离,因此地面观察者不会发现闪光到达前壁、后壁的时间差。

如果将来的某一天,火车速度能够达到光速的四分之一或者更快,同时的相对性就会习以为常,那时的学生学习相对论也就容易多了。

### 思考与讨论

与图 15.2-1 的例子相似,列车 K 的某车厢的中央发出了一个闪光,车厢中的人认为闪光同时到达了前后两壁(事件 A 和 B)。不同的是,列车 K 静止在车站里,另一列火车 L 从旁边呼啸而过(图 15.2-2)。那么,在运动的火车 L 里,观察者认为,沿着运动方向位置靠前一些的事件 A 先发生,还是靠后一些的事件 B 先发生?

考虑这个问题时可以仿照讨论图 15.2-1 的思路,也可以直接应用图 15.2-1 问题的结论,只是认为地面在相对于火车 L 运动。

**暂时**记住这个结论,讨论下面的问题会方便些。

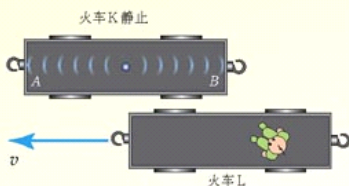


图 15.2-2 运动的观察者认为 A 先发生还是 B 先发生?

**长度的相对性** 经典物理学家认为,一条杆的长度不会因为观察者是否与杆做相对运动而不同。但是下面的分析表明,杆的长度的确与观察者和杆之间的相对运动有关。

假设杆 $MN$ 沿着车厢运动的方向固定在火车上(图 15.2-3),与车一起运动。火车上的观察者认为杆是静止的。他利用固定在火车上的坐标轴,读出杆的两端 $M$ 、 $N$ 的位置坐标,坐标之差就是他测出的杆长 $l'$ 。地面观察者利用固定在地面上的坐标轴,读出杆两端的位置坐标,坐标之差就是他测出的杆长 $l$ 。不过,地面观察者读数时要谨慎,因为对他来说杆是运动的,要使这种测量有意义,他必须同时读出 $M$ 、 $N$ 两点的坐标。

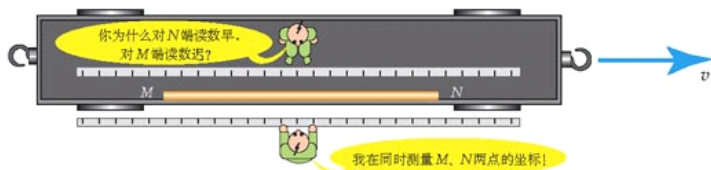


图 15.2-3 地面观察者认为自己同时测得了杆两端的坐标,火车上的观察者却认为他不是同时测量的,所以两个参考系的测量值有了差异。

然而,火车上的观察者会怎样评论地面观察者的测量过程呢?我们已经认识到,由于同时的相对性,尽管地面观察者认为自己对 $M$ 、 $N$ 两端的读数是同时的,但火车上的观察者认为他对两端的读数不是同时的。根据上面“思考与讨论”的结论,火车上的观察者认为,地面观察者先在 $N$ 点读数,而后才在 $M$ 点读数,在这期间杆已经相对地面向前运动了一截!因此火车上的观察者断定,地面观察者测得的杆长会比自己测得的数值小一些。

讨论这个问题时要记住:杆固定在车厢中,它相对于车上的观察者是静止的。

通过严格的数学推导可以得到,如果与杆相对静止的人认为杆长是 $l_0$ ,与杆相对运动的人认为杆长是 $l$ ,那么两者之间的关系是

$$l = l_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad (1)$$

由于 $1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2 < 1$ ,所以总有 $l < l_0$ ,即与杆相对运动的人观察到的杆长 $l$ 总小于与杆相对静止的人观察到的杆长 $l_0$ 。一条沿自身长度方向运动的杆,其长度总比杆静止时的长度小。严格的数学推导还表明,在垂直于运动方向上,杆的长度没有变化。

可以想像这样一幅图景:一列火车以接近光的速度从我们身边飞驰而过,我们测得车厢前后壁的距离变小了,车窗变窄了……火车越快,这个现象越明显,但是车厢和车窗的高度都没有变化。车上的人有什么感觉呢?他认为车上的一切都与往常一样,因为他与火车是相对静止的。但是,他对地面景物测量的结果却有些异常:沿铁路电线杆的距离变短



了,面对铁路的正方形布告牌由于宽度变小而高度未变竟成了窄而高的矩形<sup>①</sup>……车上的人和车下的人谁说都对?都对。这就好像相向行走的两个人,一个说小桥在左边,另一个说小桥在右边。

车辆、飞机等常见物体的运动速度  $v$  远远小于光速  $c$ ,

$$1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2 \approx 1, \quad l' \approx l, \quad \text{所以日常生活中观察不到长度的相对性。}$$

特别需要指出的是,这种长度的变短是相对的。如果两条平行的、相同的杆在沿自己的长度方向做相对运动,与它们一起运动的两位观察者都会认为对方的杆比自己的杆短一些。

**时间间隔的相对性** 经典物理学认为,某两个事件,在不同的惯性参考系中观察,它们的时间间隔总是相同的。例如,一个单摆从一端摆到另一端,守候在旁进行实验的人测得所用的时间是  $1\text{ s}$ ,那么乘坐飞机经过实验室上空的人测得的时间间隔一定也是  $1\text{ s}$ 。但是,在相对论物理学看来,两者测得的时间并不一样。

还以高速列车为例(图 15.2-4)。假定车厢安装着一个墨水罐,它每隔一定时间滴出一滴墨水。车上的人测得,墨水在  $t_1'$ 、 $t_2'$  两个时刻在地面形成  $P$ 、 $Q$  两个墨点,也就是说发生了两个事件。车上的人认为两个事件的时间间隔是

$$\Delta\tau = t_2' - t_1'$$

地面观察者测得的时间间隔为

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

根据(1)式,通过一定的数学推导可以得到

$$\Delta t = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad (2)$$

$\Delta\tau$  是与墨水罐相对静止的观察者测得的两次滴下墨汁的时间间隔。

(2)式具有普遍意义。可以设想,飞船上有一只表,在航天员看来,表针走过一个小格所用的时间为  $\Delta\tau$ 。飞船与地面的相对速度是  $v$ ,根据(2)式,地面的人认为表针走过一个小格的时间为  $\Delta t$ ,比  $\Delta\tau$  大。

从地面上观察,飞船上的时间进程比地面上慢。由于飞船在运动,船上的一切物理、化学过程和生命过程都变慢了;时钟走得慢了,化学反应慢了,甚至人的动作、人的新陈代谢



桥在左边还是在右边?那要看是谁在说话。

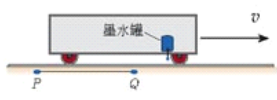


图 15.2-4 车上与车下的观察者认为两次滴水的  
时间间隔不一样

$t_2' - t_1'$  表示与墨水罐(墨水罐可以看做一个钟表)相对静止的观察者测得的时间间隔,本来可以用  $\Delta t'$  表示,或者仍照前面讨论长度的相对性时用到的符号,用  $\Delta t_0$  表示,但在相对论中,习惯上把与“钟表”相对静止的观察者测得的时间间隔用  $\Delta\tau$  表示。

<sup>①</sup> 观察者对于沿垂直于速度方向有一定厚度的物体的视觉印象比较复杂,如果将来继续学习相对论就会了解这些问题。

也变慢了……可是飞船上的人自己没有这种感觉,他们反而认为地面上的时间进程比飞船上的慢,因为他们看到,地面正以同样的速度朝相反的方向运动!

**时空相对性的验证** 从(1)、(2)两式可以看到,只有当两个参考系的相对速度 $v$ 可与光速 $c$ 相比时,时间和空间的相对性才比较明显。目前的技术还不能使宏观物体达到这样的速度。但是随着对微观粒子研究的不断深入,人们发现,许多情况下粒子的速度会达到光速的90%以上,时空的相对性应该是不容忽略的。事实正是如此。时至今日,不但狭义相对论的所有结论已经完全得到证实,而且它已经成为微观粒子研究的基础之一。

一个学说,总是先以有限数量的事实为基础提出科学的假设,然后依据这些假设进行逻辑推理,得出结论。只有在大量结论都与事实相符时,这个学说才能成为理论。

时空相对性的最早证据跟宇宙线的观测有关。原始宇宙线是来自太阳和宇宙深处的高能粒子流,它与大气作用,又产生多种粒子,叫做次级宇宙线。次级宇宙线中有一种粒子叫做 $\mu$ 子,寿命不长,生成之后很快就衰变为别的粒子。

原始宇宙线在高至几百千米、低至十几千米的高度都能与大气中的粒子作用产生 $\mu$ 子, $\mu$ 子的速度、寿命各不相同,因此不同高度都能在宇宙线中观测到 $\mu$ 子。根据牛顿力学和统计物理学可以算出 $\mu$ 子的数量随高度变化的情况,但是实际观测到的 $\mu$ 子的数量大于经典理论做出的预言。这只能用狭义相对论做如下解释。

在实验室中测量, $\mu$ 子低速运动时的平均寿命是 $3.0\mu\text{s}$ ,但宇宙线中的 $\mu$ 子以 $0.99c$ 甚至更高的速度飞行,这种情况下再在地面上测量,它的平均寿命就远大于 $3.0\mu\text{s}$ 了。因此,在地面上观察,它将飞行较长的距离才会转变为其他粒子。

如果观察者与 $\mu$ 子一起运动,这个现象也好解释。这位观察者认为 $\mu$ 子的平均寿命仍是 $3.0\mu\text{s}$ ,但是大地正向他扑面而来,因此大气层的厚度比地面上的测量值小得多, $\mu$ 子在短短的寿命中可以达到更接近地面的位置。

1941年美国科学家罗西和霍尔做这项研究时在不同高度统计了宇宙线中 $\mu$ 子的数量,结果与相对论的预言完全一致。

相对论的第一次宏观验证是在1971年进行的。当时在地面上将四只铯原子钟调整同步,然后把它们分别放在两架喷气式飞机上做环球飞行,一架向东飞,另一架向西飞。两架飞机各绕地球飞行一周后回到地面,与留在地面上的铯原子钟进行比较。实验结果与相对论的理论预言符合得很好。<sup>①</sup>

**相对论的时空观** 什么是时间?什么是空间?时间和空间有什么性质?经典物理学对这些问题并没有正面回答。但是从它对问题的处理上,我们会体会到,经典物理学认为空间好像一个盒子,一个没有边界的盒子,它是物质运动的场所。至于某一时刻在某一空间区域是否有物质存在,物质在做什么样的运动,这些对于空间本身没有影响,就像盒子里是否装了东

<sup>①</sup>在这个实验中,原子钟的差异实际是狭义相对论和广义相对论两种效应的结果。

西对于盒子的性质没有影响一样。时间与此相似,它在一分一秒地流逝,与物质的运动无关。换句话说,经典物理学认为空间和时间是脱离物质而存在的,是绝对的,空间与时间之间也是没有联系的。

相对论则认为空间和时间与物质的运动状态有关。前面已经看到,在一个确定的参考系中观察,运动物体的长度(空间距离)和它上面物理过程的快慢(时间进程)都跟物体的运动状态有关。

我们生活在低速运动的世界里,因此自然而然地接受了经典的时空观,过去谁都未曾有意识地考虑过空间与时间的性质。只有当新的实验事实引出的结论与传统观念不一致时,人们才回过头来认真思考过去对于空间和时间的认识。科学的发展和人类对于自然的认识就是这样一步一步地前进的。新科学没有全盘否定经典物理学,经典物理学的结论受到了无数次实践的检验。虽然相对论更具有普遍性,但是经典物理学作为相对论在低速运动时的特例,在自己的适用范围内还将继续发挥作用。

## 科学足迹

### 狭义相对论出现的前夜

19世纪末,对于物理学来说,大有“山雨欲来风满楼之势”。许许多多实验和理论的研究,已经使狭义相对论呼之欲出了。

麦克斯韦的电磁理论取得的成就不容置疑,为了能使它与新的实验事实相协调,特别是为了解释迈克尔逊实验和其他有关光速的实验,很多科学家试图修正以太理论。其中最有成效的是荷兰物理学家洛伦兹。他试图利用物体通过以太时的“收缩”来解释实验的结果,并且得到了相应的公式。狭义相对论中非常重要的坐标变换公式甚至就是以洛伦兹命名的。然而,他的思想仍被“以太”这个物化的绝对时空所束缚,未能建立新物理学的框架。

在想要创建新理论的科学家中,法国数学家、物理学家庞加莱走到了前面。1895年,他首次提出了相对性原理的思想。他认为,“要证明物质的绝对运动,或者更明确地说,要证明物质相对于以太的运动是不可能的”。1899年,他又进一步提出,“对于所有观察者来说,光速都是常数”,并强调了这一假设的必要性。庞加莱还论证了“两个事件历时相等”和“在两地同时发生的两个事件”的说法是没有意义的。与洛伦兹一样,庞加莱已经十分接近狭义相对论了。

1904年,就在爱因斯坦发表相对论的前一年,庞加莱在数学上给出了洛伦兹变换的更简捷的形式并正式命名为洛伦兹变换。他还通过论证指出,惯性应该随速度的增大而增大。他还指出,原有的力学只是新力学在一定条件下的近似。“相对性原理”一词也是庞加莱首先使用的。然而,尽管他的很多天才预见后来都被证明与爱因斯坦的相对论是一致的,他自己却找不到合适的方案来把这些预见放到一个逻辑体系中。



庞加莱

(H. Poincaré, 1854—1912)

如果没有爱因斯坦，其他人也会建立狭义相对论，我们仍然能够享受到它所带来的进步。正如爱因斯坦本人在一封信中所写的那样：“毫无疑问，如果我们从回顾中去看狭义相对论的发展，那么它在1905年已经到了发现的成熟阶段。洛伦兹已经注意到，为了分析麦克斯韦方程，那些后来以他的名字而闻名的变换是重要的，庞加莱在有些方面甚至更深入了一步。”

### 问题与练习

- 地面上的人认为A、B两个事件同时发生。对于坐在火箭中沿两个事件发生地点连线飞行的人来说(图15.2-5)，哪个事件先发生?



图 15.2-5 哪个事件先发生?

- 一列火车以速度 $v$ 相对地面运动(图15.2-6)，如果地面上的人测得，某光源发出的闪光同时到达车厢的前壁和后壁，那么按照火车上的人的测量，闪光是先到达前壁还是后壁? 火车上的人怎样解释自己的测量结果?

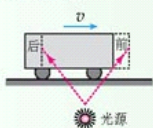


图 15.2-6 车上人认为闪光先到前壁还是后壁?

- 一枚静止时长30 m的火箭以3 km/s的速度从观察者的身边掠过，观察者测得火箭的长度应为多少? 火箭上的人测得火箭的长度应为多少? 如果火箭的速度为光速的二分之一呢?
- A、B、C是三个完全相同的时钟，A放在地面上，B、C分别放在两个火箭上，以速度 $v_1$ 和 $v_2$ 朝同一方向飞行， $v_1 < v_2$ 。地面上的观察者认为哪个时钟走得最慢? 哪个走得最快?
- 以8 km/s的速度运行的人造卫星上，一只完好的手表走过了1 min，地面上的人认为它走过这1 min“实际”花了多少时间? 通过这个题目我们可以看到，即使对于人造卫星的飞快速度，相对论效应也是微不足道的。

## 3

### 狭义相对论的其他结论

大家早已熟悉了这样的问题：河水的流速是3 m/s；小船顺流而下，由于划船，它相对河水的速度是1 m/s；那么，船相对于岸的速度是多少？答案是

$$3 \text{ m/s} + 1 \text{ m/s} = 4 \text{ m/s}$$

这种情况下应该把两个速度相加，这似乎是不言而喻的，无需证明。但是，实验表明，

光对任何运动物体的速度都是一样的,好像对于以 $3 \times 10^8$  m/s的速度传播的光,速度变换的法则不再适用。那么,对于一列火车、一艘飞船、一个微观粒子,如果它们高速运动,速度的变换要遵守什么法则?

由于这个法则的导出比较烦琐,这里直接给出结果。本节其他两个结论也是这样处理的。

**相对论速度变换公式** 仍以高速火车为例,设车对地面的速度为 $v$ ,车上的人以速度 $u'$ 沿着火车前进的方向相对火车运动,那么他相对地面的速度 $u$ 为

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u'v}{c^2}} \quad (1)$$

在狭义相对论的书籍中,通常用 $v$ 表示两个参考系的相对速度,所以物体相对于参考系的速度就用 $u$ 表示,以免混淆。

如果车上人的运动方向与火车的运动方向相反,则 $u'$ 取负值。当这两个速度的方向垂直或成其他角度时,情况比较复杂,上式不适用,我们不讨论这种情况。

按照经典的时空观, $u = u' + v$ 。而从(1)式来看,实际上人对地面的速度 $u$ 比 $u' + v$ 之和要小,不过只有在 $u'$ 和 $u$ 的大小可以与 $c$ 相比时才会观察到这个差别。

### 思考与讨论

(1) 如果 $u'$ 和 $v$ 都很大,例如 $u' = 0.6c$ ,  $v = 0.6c$ ,它们的合速度会不会超过光速?如果 $u'$ 和 $v$ 更大些呢?

(2) 若 $u' = c$ ,即在运动参考系中观察光的速度是 $c$ ,求证: $u = c$ ,即在另一个参考系中光的速度也是 $c$ ,而与 $v$ 的大小无关。

这两项讨论的重要性在于,任何理论都应该是自恰的,即不应该自相矛盾。狭义相对论的基本假设之一是光对任何参考系的速度都是一样的,这两项结果应该与它一致。这种自恰性检验是对一个学说、一项工作的最基本的评估。

**相对论质量** 按照牛顿力学,物体的质量是不变的,因此一定的力作用在物体上,产生的加速度也是一定的,这样,经过足够长的时间以后物体就会达到任意的速度。但是相对论的速度叠加公式表明,物体的运动速度不能无限增加,这个矛盾启发我们思考:物体的质量是否随物体速度的增加而增大?严格的论证证实了这一点,实际上,物体以速度 $v$ 运动时的质量 $m$ 与静止时的质量 $m_0$ 之间有如下关系

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}} \quad (2)$$

由于物体的速度 $v$ 不可能达到光速,所以总有 $v < c$ ,  $1 - (\frac{v}{c})^2 < 1$ ;根据(2)式,物体运



动时的质量  $m$  总要大于静止时的质量  $m_0$ 。

微观粒子的运动速度很高，它的质量明显地大于静止质量，这个现象必须考虑。例如，回旋加速器中被加速的粒子，在速度增大后质量增大，因此做圆周运动的周期变大，它的运动与加在 D 形盒上的交变电压不再同步，回旋加速器粒子的能量因此受到了限制。

**质能方程** 相对论另一个重要结论就是大家都很熟悉的爱因斯坦质能方程

$$E = mc^2 \quad (3)$$

式中  $m$  是物体的质量， $E$  是它具有的能量。

关于回旋加速器，可以  
复习《选修3-1》第三章。



图15.3-1 爱因斯坦的质能方程震撼了人类社会，它甚至反映在街头雕塑中。

### 思考与讨论

静止时质量是1 kg的物体，以10 m/s的速度运动，它具有的动能是多少？与这个动能相对应，它的质量增加了多少？

按照运动物体的质量与速度的关系式(2)，这个物体的质量增加了多少？

学过《选修3-5》第十九章后就会发现，这个关系使我们看到了蕴藏在原子核中的巨大能量。

### 问题与练习

1. 两个电子相向运动，每个电子对于实验室的速度都是  $\frac{4}{5}c$ ，它们的相对速度是多少？在实验室中观测，每个电子的质量是多少？本题和下题计算结果中的光速  $c$  和电子的静质量  $m_0$  不必代入数值。
2. 上题中，在实验室观测，两个电子的总动能是多少？以一个电子为参考系，两个电子的总动能又是多少？计算时应由电子运动时的能量减去静止时的能量得到电子的动能。

物理学研究常常要用到高速粒子的相互撞击。通过这个问题我们看到，为使相互碰撞的粒子达到一定的相对速度，同时加速两束粒子，使它们迎头相撞，这样所需的能量要比只加速一束粒子，用它去轰击静止靶所需的能量少，因而在技术上容易实现。由于这个原因，有时候人们使用粒子对撞机，而不用普通加速器。

3. 一个原来静止的电子, 经过  $100\text{ V}$  的电压加速后它的动能是多少? 质量改变了百分之几? 速度是多少?

## 4

### 广义相对论简介

**超越狭义相对论的思考** 狭义相对论出现以后, 整个世界都处于震惊和争论之中, 这时爱因斯坦自己却在冷静地思考着狭义相对论无法解决的问题。

万有引力与电磁力有很多相似之处, 例如, 两个相互作用的物体之间都不需要直接接触。狭义相对论指出, 电磁相互作用的传播速度  $c$  是自然界中速度的极限。引力的作用以什么速度传递? 现成的理论都不涉及这个问题。难道一个星球的运动能够以超过光速的速度影响到远处的另一个星球吗? 这是狭义相对论所不允许的。所以, 万有引力理论无法纳入狭义相对论的框架。

另一方面, 狭义相对论是惯性参考系之间的理论。为什么惯性参考系具有这样特殊的地位? 狭义相对论无法解释。

**广义相对性原理和等效原理** 在前述思考的基础上, 爱因斯坦向前迈进了一大步, 把相对性原理推广到包括非惯性系在内的任意参考系, 认为在任何参考系中, 物理规律都是相同的, 这就是广义相对性原理 (**principle of general relativity**)。

下面介绍广义相对论的另一个基本原理。

假设宇宙飞船是全封闭的, 航天员与外界没有任何联系。但是, 航天员观察到, 飞船内没有支撑的物体都以某一加速度落向舱底。这是为什么? 这可能是由于飞船处于某个星球的引力场中, 但也可能飞船正在远离任何天体的空间加速飞行。后者的现象就像在加速前进的火车中, 水平桌面上的小球不受水平方向的力也会加速运动。实际上, 不仅是自由落体的实验, 飞船内部的任何物理过程都不能告诉我们, 飞船到底是在加速运动, 还是停泊在一个行星的表面。这里谈到的情景与本章第 1 节所述伽利略大船中的情景十分相似。这个事实使我们想到: 一个均匀的引力场与一个做匀加速运动的参考系等价。爱因斯坦把它作为广义相对论的第二个基本原理, 这就是著名的等效原理 (**equivalence principle**)。

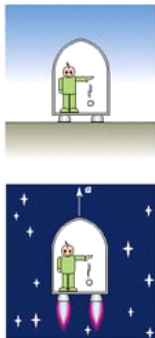


图 15.4-1 一个均匀的引力场与一个做匀加速运动的参考系等价

**广义相对论的几个结论** 从广义相对论的两个基本原理出发，可以直接得出一些意想不到的结论。

假设在引力可以忽略的空间有一艘宇宙飞船在做匀加速直线运动，一束光垂直于运动方向射入飞船。船外静止的观察者认为这束光是沿直线传播的（图 15.4-2），但是航天员以飞船为参考系观察到的却是另外一番情景。

为了记录光束在飞船中的径迹，航天员在船里等距离地放置一些半透明的屏，光可以透过这些屏，同时在屏上留下光点。由于飞船在前进，光到达右边一屏的位置总会比到达左边一屏的位置更加靠近船尾。如果飞船做匀速直线运动，飞船上的观察者记录下的光的径迹仍是一条直线（图中的虚线）。然而，如果飞船做匀加速直线运动，在光向右传播的同时，飞船的速度也在不断增加，因此船上观察者记录下的光的径迹是一条曲线（图中的实线）。

根据等效原理，航天员也完全可以认为飞船没有加速运动，而是在船尾方向存在一个巨大的物体，它的引力场影响了飞船内的物理过程。因此我们得出结论：物质的引力使光线弯曲。

通常物体的引力场都太弱，20 世纪初只能观测到太阳引力场引起的光线弯曲。由于太阳引力场的作用，我们有可能看到太阳后面的恒星（图 15.4-3）。但是，平时的明亮天空使我们无法观星，所以最好的时机是发生日全食的时候。1919 年 5 月 29 日恰好有一次日全食，两支英国考察队分赴几内亚湾和巴西进行观测，其结果完全证实了爱因斯坦的预言。这是广义相对论的最早的验证。

广义相对论还告诉我们，引力场的存在使得空间不同位置的时间进程出现差别。例如在强引力的星球附近，时间进程会变慢，就像我们看到高速运动的火车上时间进程变慢一样。

这个结论也在天文观测中得到了证实。宇宙中有一类恒星，体积很小，质量却不小，叫做矮星。矮星表面的引力很强，按照广义相对论，那里的时间进程比较慢，那里原子发光的频率比同种原子在地球上发光的频率低，看起来应该偏红。这个现象叫做引力红移。天文观测证实了这样的预言。现代技术也能在地球上验证引力红移。

还有其他一些事实也支持广义相对论。目前，广义相对论已经在宇宙结构、宇宙演化等方面发挥重要作用。

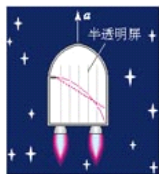


图 15.4-2 以加速运动的飞船为参考系，光线会弯曲。



图 15.4-3 远处来的星光经过太阳附近时发生偏折

## 科学漫步

## 科学家对宇宙的研究

“上下四方曰宇，古往今来曰宙”。我们的祖先从空间和时间的角度深刻地描绘了宇宙。在我国古代有“天圆地方”的说法，认为天空像大碗一样倒扣在平整的大地上。古希腊哲学家亚里士多德认识到地球是一个球体，并由此发展了地心说。到了16世纪，人们认识到地球和其他行星都在绕太阳运动。随着视野的不断扩大，人们对整个宇宙的兴趣越来越浓。然而，只有在广义相对论诞生后，宇宙学才成为一门真正的科学。

1929年，美国天文学家哈勃（E. P. Hubble）发现，银河系以外的大多数星系都在远离我们而去，距离越远，离开的速度越大。后来的分析表明，这是由于我们所处的宇宙正在膨胀，因此其中星系间的距离在不断增大，在任何地方看起来其他星系都在远离自己。

既然宇宙在不断膨胀，那么它在以前一定比现在小。多方面的分析表明，我们的宇宙是在约200亿年以前从一个尺度极小的状态发展演化出来的。这个学说已经被大多数科学家所接受，叫做大爆炸宇宙学（big-bang cosmology）。

大爆炸宇宙学成功地解释了很多观测事实。例如，它预言早期的宇宙发出温度极高的辐射，随着宇宙的膨胀，温度降低，辐射波长变长，至今应该在微波波段。1964~1965年，美国贝尔实验室的科学家彭齐亚斯和威尔孙<sup>①</sup>检测到了这种微波背景辐射。这是对于大爆炸宇宙学的最有力的支持之一。但是，宇宙是否会永远膨胀下去？将来会变成什么样子？大爆炸宇宙学无法预言宇宙的未来。

广义相对论指出：存在着一个临界密度，如果宇宙物质的平均密度大于临界密度，在引力的作用下膨胀会越来越慢，然后变为收缩；如果宇宙的平均密度小于临界密度，引力不足以阻止宇宙的膨胀。

目前我们的技术手段还无法准确地测量宇宙的密度。不但如此，除了恒星等发光物质外，宇宙中还有很多不发光但是具有质量的物质，它们表现出引力的效应但无法用望远镜等观测到，它们叫做暗物质。许多观测结果表明，宇宙中可能存在着大量的暗物质。可以说，是暗物质影响着宇宙的密度，因此也就影响着宇宙的命运。

随着理论研究的发展，随着技术手段的进步，人们对于宇宙的认识还会不断深入。



我们观测到的宇宙

## 问题与练习

- 怎样由广义相对论的基本原理推断出光在引力场中将发生弯曲？
- 阅读有关相对论的科普书刊，在同学中举办小型讨论会。

<sup>①</sup>彭齐亚斯（A. Penzias, 1933—）和威尔孙（R. W. Wilson, 1936—）由于发现了微波背景辐射获得1978年诺贝尔物理学奖。

## 课题研究 社会生活中的电磁波

现在许多方面应用了与电磁波相关的技术,社会生活因此有了很大的变化。通过社会调查或从书籍、报刊、因特网中查找资料,同学们可以做一些相关问题的研究。下面的题目和资料仅供参考:

1. 与电磁波有关的家用电器的使用方法;
  2. 无线电技术的发展与军事思想的改变;
  3. 与电磁波相关的技术给我们的生活带来的变化;
  4. 电磁污染;
- .....

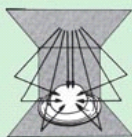
将你的研究结果及感受向全班同学介绍,与大家交流。

### 课题研究资料

下面以微波炉为例提出与家用电器相关的研究内容、研究方法的建议,供你参考。

#### 一、一种微波炉的说明书(节选)

微波是一种高频率的电磁波。微波炉利用其内部的磁控管,将电能转变成微波,以 2 450 MHz 的振荡频率穿透食物。当微波被食物吸收时,食物内的极性分子(如水分子等)会以 24.5 亿次每秒的频率快速振荡,使得分子间互相作用而产生大量热。微波炉利用食物分子本身产生的热,里外同时快速加热食物。



受到微波照射时



被含水食物吸收



穿过陶瓷器、玻璃等

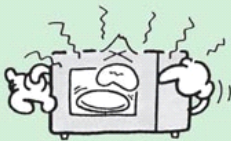


被金属反射



#### 使用微波炉的一般知识

1. 切勿让微波炉空着运转，因为没有食物或水分在炉内吸收能量时，微波能量会不停地在炉内反射。
2. 如果炉内起烟、着火，请关紧炉门，并按“停止/再调校”键或关掉“时间/重量”选择旋钮。然后拔下电源导线，或关闭电源总闸。
3. 不要在炉内烘干布类、报纸或其他东西。
4. 不可使用再生纸类制品，因其含有容易引起电弧和着火的杂质。
5. 不可敲打控制面板以免控制器失效。
6. 取出已煮完的食物时必须使用锅夹，因为热量会从高温的食物传至烹调容器，然后再由烹调容器传至玻璃转盘。此时，烹调容器和玻璃转盘都很烫。
7. 不可将易燃物品放在炉内、炉侧、炉顶，以免起火。
8. 没有放入玻璃盘和转盘时，不可使用微波炉。
9. 如非食谱所指定，不可直接在玻璃盘上烹煮食物。食物必须放入合适的烹调器皿中。
10. 不可使用微波炉加热化学药品或其他非食物制品。不可用腐蚀性物质清洗微波炉。在炉内加热腐蚀性物质可能引起微波外泄。



#### 二、关于微波炉的原理

微波炉中微波的频率是多少？为什么选用这样频率的电磁波？

微波炉中的电磁波是怎样产生的？它从什么地方进入炉腔？

微波炉内为什么要安装电风扇？

微波炉门为什么安装网状金属片？

.....

#### 三、与微波炉使用有关的问题

为什么干燥食物在微波炉中不易加热？

为什么带壳鸡蛋、肉皮等不宜放在微波炉中加热？

为什么带“金边”的瓷器在微波炉内会损坏？

为什么微波炉内不能使用金属餐具？

关于微波炉的国家安全标准是怎样规定的？

.....

#### 四、微波炉使用中的几项禁止行为

使用微波炉时有哪些禁止行为？这些行为可能产生什么危害？

从说明书可以获得家用电器的原理、使用常识、安全要求等知识。但这些还不够，还应该从书籍、杂志、因特网，以及懂技术的人那里寻找更多的信息。

## 后记

根据《基础教育课程改革纲要(试行)》的精神,我们按照《普通高中物理课程标准(实验)》的要求编写了共同必修及其他三个系列的全套教科书,本册经全国中小学教材审定委员会2004年初审通过,供普通高中试用。

这套教科书在编写中,得到了诸多教育界前辈和各学科专家学者的热情帮助和大力支持。在本套教科书同课程改革实验区的师生见面时,我们特别感谢担任教科书总顾问的丁石孙、许嘉璐、叶至善、顾明远、吕型伟、王梓坤、梁衡、金冲及、白春礼、陶西平同志,感谢担任教科书编写指导委员会主任委员的柳斌同志和编写指导委员会委员的江蓝生、李吉林、杨焕明、顾泠沅、袁行霈等同志。

这套书的编写者以教育部物理课标组的核心成员为基础,由高校教师、中学教师和出版社的编辑人员三结合组成。共同必修部分和三个选修系列的编写小组分别起草,然后全体编写人员反复讨论、相互修改,因此,本书是编写组集体创作的成果。

在本书的编写过程中,由刘彬生、汪维澄组成的实验研究小组做过了全书所有的实验,检验和改进了书稿中的实验部分;由黄恕伯、陈伟平、李友安、叶柯、毛宗致组成的习题研究小组筛选和设计了全书的“问题与练习”。

张同伦、董振邦、窦国兴、意剑华在编写的不同阶段审阅了书稿,提出了重要修改意见。

我们还要感谢使用本套教材的实验区的师生们。希望你们在使用本套教材的过程中,能够及时把意见和建议反馈给我们,对此,我们深表谢意。让我们携起手来,共同完成教材建设工作。

我们的联系方式如下:

电 话:010-58758389

E-mail: jcfk@pep.com.cn

网 址: <http://www.pep.com.cn>

人民教育出版社 课程教材研究所  
物理课程教材研究中心  
2005年4月

### 谨向为本书提供照片的人士和机构致谢

11.1-1甲,朱京/11.5-2,朱京/11.5-6,《世界科学》、《海路交通》、浙江教育出版社/第12章章首图,《Physics at work》、Oxford University Press / 12.1-4,《自然科学辞典》物理-化学,华视出版社/12.1-5,朱京/12.4-1,《新编物理图解》第一学习社/12.4-7,《新编物理图解》第一学习社/12.4-8,《The Physics of Everyday Phenomena》、McGraw-Hill/超声波鱼群探测仪,《自然科学辞典》物理-化学,华视出版社/13.2-2甲,朱京/13.3-2,朱京/13.3-6,彭征/13.4-1,《新编物理图解》第一学习社/13.4-2,彭征/13.4-4,《新编物理图解》第一学习社/13.4-5,朱京/13.4-9,《自然科学辞典》物理-化学,华视出版社/13.5-3,张大昌/13.5-6,朱京/13.6-5,朱京/13.7-4,《牛顿科学研习百科》物理,《牛顿》杂志/13.7-6,《新订理科》山林社/13.7-9,中国图片网/13.7-10,《Physics College Preparation》、Nelson/13.8-1,《Physics》John Murray/13.8-3,《PHYSICS PRINCIPLES AND PROBLEMS》、Gleason/McGraw-Hill/14.1-5,朱京/14.2-3,彭征/14.2-4,朱京/第15章章首图,《人物摄影》、辽宁教育出版社

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

人民教育出版社 课程教材研究所 编著  
物理课程教材研究开发中心



 人民教育出版社