



普通高中课程标准实验教科书



物理

(选修3-4)

广东教育出版社



普通高中课程标准实验教科书



物理

(选修3-4)


W U L I

广东基础教育课程资源研究开发中心物理教材编写组 编著

主 编: 保宗悌
副 主 编: 布正明 王笑君 姚跃涌
本册主编: 保宗悌 何琴玉
本册编者: 王笑君 布正明 叶明伟 刘志敏
朱美健 李卫红 何琴玉 保宗悌
詹伟琴

(以姓氏笔画为序)

绘 图: 李德安

 广东教育出版社

· 广 州 ·

前言

人类社会离不开信息，古人靠驿站传递信息，现代人靠光纤、卫星或互联网传递信息。前者的信息是以马作为载体，而后者以光或电磁波作为载体，两者传递的速度和容量是无法相比的。这正好反映了物理科学的进步，从机械运动的研究发展到电磁波、光波的研究，并且在一百多年间就应用到了人类生活的各个方面。

我们把本书要学习的知识分成四个主题：

- ◆ 机械振动与机械波
- ◆ 电磁振荡与电磁波
- ◆ 光
- ◆ 相对论

第一个主题属于机械运动，第二个主题属于电磁现象。在以往的学习中，这两个不同领域，无论从内容和研究方法都很不相同，为什么在这里把它们放在一起学习呢？从表面上看，一个用弹簧悬挂着小球的上下运动和奇妙的激光似乎毫无相似之处。

对于机械运动，首先，你可能会问：什么是振动？什么是波？它们之间有什么关系？我们从地震现象和海啸现象来分析，前者发生在陆地上，震源（中心）的运动可以看成一种振动，而波及的范围则由一种称为地震波的波将震源的能量传播到一个范围；后者发生在海底，在震源中有激烈的振动，海水将这些振动传播出去，可以远达1000千米，将灾难传到海岸。在这些例子中，我们会看到波不仅只是传递信息，还可以传递能量。

其次，你可能会问：上述的机械振动和机械波在电磁领域中也完全一样吗？单从主题字面上看，就有不同：在机械领域叫振动，而在电磁领域叫振荡，为什么？因为在电磁现象中的确没有一个像机械运动中的“小球”在运动，代替“小球”运动的是电场或磁场在变化，但“小球”运动的变化与电磁场变化规律却惊人地相似。

是不是可以用机械运动来解释电磁现象呢？在19世纪，曾经有人做过许多努力，结果都失败了，后来才知道电磁场是有别于机械运动的一种“物质”或者“运动”，直到法拉第、麦克斯韦和爱因斯坦等人从发现电磁感应现象到电磁波、光波，然后找到有关光传播信息与物体运动的关系——相对论，人们才将高速的机械运动和电磁现象在另一个新的高度上统一起来，这就是本书将上述四个主题放在一起学习的原因。

我们希望同学们能在学习的过程中更多地自主地获得知识、技能和方法，在教科书的设计上，我们尝试在一些条件许可的知识点，让同学们通过自己观察、设计、处理数据，猜想和设法验证、讨论与交流等环节，一步一步去体会、理解一些新的概念。比如对于简谐运动的运动特征，我们不是和一般教科书那样先讲解在回复力的作用下弹簧振子做的运动，虽然这种由理性认识到感性认识是一种途径，但由于多是先由老师讲授，学生往往很难从过程中学会自己思考、自己得出结论。所以，我们想探索不同的教学过程，但毕竟只是一种尝试和愿望，希望能得到老师和同学们的支持。

科学发展需要创新，教育呼唤创新。让我们共同努力，在获得知识的同时、在探索教育创新的征途中一步步迈进！

登录我们的网站 (<http://www.gjs.cn>)，为你提供较丰富的学习资源。

目 录

第一章 机械振动	1
第一节 初识简谐运动	2
弹簧振子	2
描述简谐运动特征的物理量	3
第二节 简谐运动的力和能量特征	5
简谐运动的力的特征	5
简谐运动的能量的特征	5
第三节 简谐运动的公式描述	7
第四节 探究单摆的振动周期	12
单摆振动周期的实验探究	13
第五节 用单摆测定重力加速度	15
第六节 受迫振动 共振	18
受迫振动	18
共振	19
共振的利用和防止	20
第二章 机械波	25
第一节 机械波的产生和传播	26
认识机械波	26
机械波的产生	26
机械波的传播	27
纵波与横波	28
第二节 机械波的图象描述	30
波的图象	30
描述波的特征的物理量	30
第三节 惠更斯原理及其应用	34
惠更斯原理	34
波的反射	35
波的折射	36
第四节 波的干涉与衍射	37

波的干涉	37
波的衍射	40
第五节 多普勒效应	43
认识多普勒效应	43
多普勒效应的成因	43
多普勒效应的应用	44
第三章 电磁振荡与电磁波	49
第一节 电磁振荡	50
电磁振荡电路的演变与构成	50
电磁振荡过程中电场能和磁场能的转化	51
电磁振荡的周期和频率	52
第二节 电磁场与电磁波	54
麦克斯韦电磁场理论的基本思想	54
电磁波的产生及其特点	55
电磁场的物质性	56
麦克斯韦电磁场理论的意义	57
第三节 电磁波的发射、传播和接收	59
模仿赫兹实验	59
电磁波的发射	60
电磁波的传播	61
无线电波的接收	63
第四节 电磁波谱	65
光是电磁波	65
电磁波谱	65
第五节 电磁波的应用	70
无线电广播与电视	70
移动通信	71
电磁波与科技、经济、社会发展的关系	71
第四章 光	75
第一节 光的折射定律	76
光的折射规律的实验探究	76
折射角与光速的关系	77
折射率	77
第二节 测定介质的折射率	80
第三节 光的全反射现象	83
光的全反射	83
光导纤维的结构与应用	84
第四节 光的干涉	87
双缝干涉现象	87

光产生干涉的条件	88
薄膜干涉	89
第五节 用双缝干涉实验测定光的波长	91
第六节 光的衍射和偏振	95
光的衍射	95
光的偏振	96
第七节 激光	99
激光的特性	99
激光的应用	100
全息照相	101
用激光观察全息照片	101
第五章 相对论	105
第一节 狭义相对论的基本原理	106
狭义相对论的诞生	106
狭义相对论的基本原理	107
“同时”的相对性	107
第二节 时空相对性	109
时间间隔的相对性	109
空间距离的相对性	110
相对论的时空观	111
第三节 质能方程与相对论速度合成定理	113
相对论质量	113
质能方程	114
相对论的速度合成定理	114
第四节 广义相对论	117
广义相对论基本原理	117
广义相对论的主要结论	118
第五节 宇宙学简介	120
人类对宇宙演化的认识	120
宇宙学的新进展	121

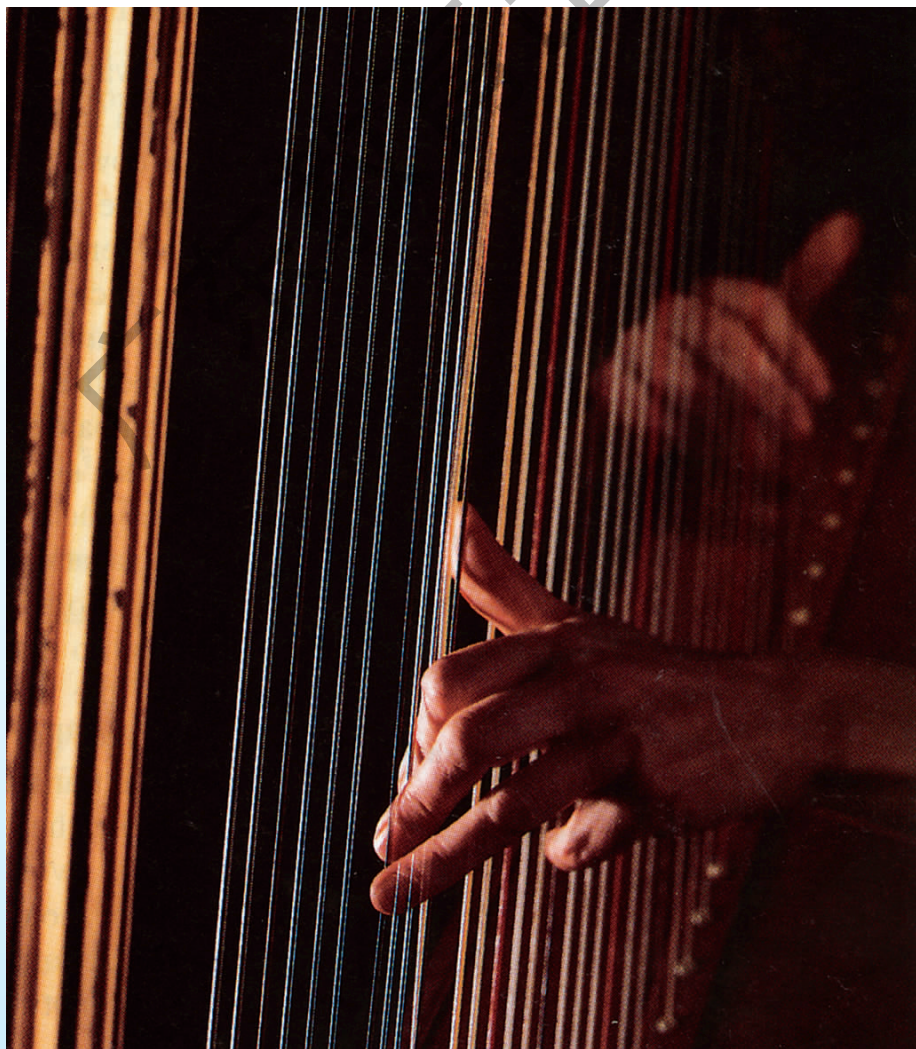
第一章

机械振动

我们曾经学过：物体在恒力作用下做匀变速直线运动，在大小不变的向心力作用下做匀速圆周运动。这些运动都是一种变速运动，不过前者是速度方向不变、大小改变的运动；后者则是速度大小不变、方向改变的运动。在本章，我们还会学到在某种力的作用下，物体的速度大小和方向都按一定规律变化的运动，比如，秋千的摆动、钟锤的摆动、一个被弹簧拉着的小球的振动……这些运动是一种周而复始的往复运动（称为周期性运动）。我们把物体在平衡位置附近做的往复运动，叫做机械振动，简称振动。

以后大家会学到，自然界中存在多种复杂的振动，甚至还包括力学以外的振动。虽然它们并不属于机械振动，但运动规律仍然是一样的。我们以力学的机械振动，特别是机械运动中的一种最简单、最基本的振动——简谐运动——作为入门知识来学习。这些知识是以后学习机械波和电磁波的基础。

在本章中以两种简谐运动的典型例子作为代表：第一种是弹簧振子，通过它认识简谐运动、力和能量特征；第二种是单摆，通过它认识简谐运动的频率（周期）特征。



第一节 初识简谐运动

专业术语

简谐运动

simple harmonic motion

振动

vibration

在理想化模型的情况下，弹簧与连接在弹簧一端的小球组成的系统称为弹簧振子。

简谐运动是最简单的振动，我们必须比较全面地理解这种运动。让我们先通过实验观察来认识最简单和最典型的简谐运动——弹簧振子的运动。

弹簧振子

弹簧振子的运动通常有两种：一种是如图 1-1-1 所示，将一个有孔的小球安装在弹簧的一端，弹簧的另一端固定，小球穿在光滑的水平杆上，当弹簧没有被拉伸或压缩的自然状态，小球静止的位置，称为平衡位置。将小球拉到离平衡位置附近的某一位置后松手，小球在弹簧的弹力作用下，做水平方向的往复运动；另一种是如图 1-1-2 所示，在弹簧下端挂一个小球，将小球竖直拉到离平衡位置的某一位置后松手，小球在重力和弹簧弹力的作用下，在此平衡位置附近做竖直方向的往复运动。

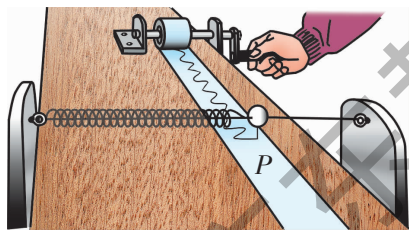


图 1-1-1 弹簧振子的运动

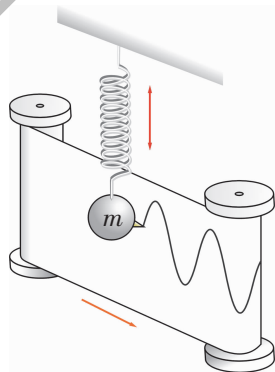


图 1-1-2 悬挂在弹簧下小球的上下运动

注意理想化处理需要的条件和理想化模型的特点。

实际弹簧振子的理想化处理：①弹簧的质量比小球的质量小得多，可以认为质量集中于振子（小球）；②当与弹簧相接的小球体积较小时，可以认为小球是一个质点；③当水平杆足够光滑时，可以忽略弹簧以及小球与水平杆之间的摩擦力；④小球从平衡位置拉开的位移在弹簧的弹性限度内。我们所讲的弹簧振子就是指这种理想化处理后的弹簧和小球组成的系统。

实验与探究

我们首先研究弹簧振子的运动特征，用实验的方法得出它的运动曲线，即物体（指弹簧振子中的小球）的位移随时间变化的曲线。

关于位移，必须注意它的情况和以前学过的直线运动有不

同的地方：在弹簧振子中的小球不是只朝一个方向上运动，如果将位移的坐标原点定在运动的起始点，则不便看清它的运动规律。因此，对于简谐运动，我们以小球的平衡位置作为坐标原点，由此来测量小球的位移。对于水平的弹簧振子，我们可以设小球离开平衡位置的右方为正，左方为负；而对于垂直的弹簧振子，可以设小球离开平衡位置的下方为正，上方为负。

1. 观察图 1-1-1 和图 1-1-2 两种弹簧振子中其中一种的运动规律，它有哪些运动特征？

2. 设计一个简易的方法，画出你所观察到的弹簧振子的位移—时间曲线 ($x-t$ 曲线)。

3. 根据较精确的仪器 (图 1-1-3) 实测出来的弹簧振子位移和时间的数据 (表 1-1-1)，作出弹簧振子的位移—时间曲线。



图 1-1-3 用运动传感器测量垂直悬挂的弹簧振子的运动

表 1-1-1 用图 1-1-3 的装置测量得到的弹簧振子的位移—时间数据

t/s	55.1237	55.1635	55.2033	55.2431	55.2829	55.3226	55.3623
x/m	0.2190	0.2164	0.2124	0.2067	0.2006	0.1937	0.1852
t/s	55.4021	55.4419	55.4817	55.5215	55.5613	55.6011	55.6409
x/m	0.1794	0.1754	0.1730	0.1727	0.1742	0.1782	0.1828
t/s	55.6808	55.7206	55.7605	55.8003	55.8401	55.8799	
x/m	0.1909	0.1980	0.2045	0.2104	0.2150	0.2183	

4. 尝试用三角函数的知识，判断绘出的位移—时间曲线较接近哪一种三角函数的曲线。

讨论与交流

1. 通过观察到的结果和作出的曲线，能说明弹簧振子的运动有什么独特的运动规律吗？

2. 为什么能从位移—时间曲线中看出弹簧振子的运动特征？

3. 如果弹簧振子的运动表明物体偏离平衡位置的位移随时间做正弦或余弦变化，你能从正弦或余弦函数的特征来说明简谐运动的特征吗？

简谐运动是物体偏离平衡位置的位移随时间做正弦或余弦规律而变化的运动，它是一种非匀变速运动，它的加速度在不同的位移都不相同，表明物体在运动过程中总是受到一个变力的作用。

描述简谐运动特征的物理量

现在我们将上面的探究结果与弹簧振子的位置变化的对应关系用图 1-1-4 表示，以此来分析弹簧振子运动的特征物理量。

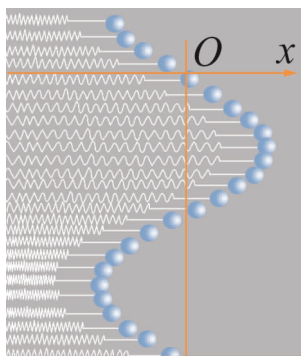


图 1-1-4 弹簧振子位移与时间关系频闪照片

图 1-1-5 是弹簧振子运动过程中, 振子在振动相同的时间间隔后的位置图. 将各个位置用平滑的曲线连起来, 就成了一条位移—时间曲线. 当 $t=0$ 时, 弹簧振子被拉到了点 B 释放, 经过点 O 运动到点 B' , 再经过点 O 回到点 B , 它就完成了一次全振动. 此后不停地重复这种往复运动.

弹簧振子完成一次全振动, 与之相对应的位移—时间曲线即变化了一个周期. 要知道弹簧振子的振动情况, 只要分析其位移—时间曲线即可. 图 1-1-4 是弹簧振子的频闪照片, 和表 1-1-1 的数据一样, 可以画出弹簧振子的位移—时间曲线, 它反映弹簧振子的小球在平衡位置附近来回运动时位移随时间的变化, 称为弹簧振子的运动图象.

实验表明, 弹簧振子完成一次全振动所用的时间是相同的.

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**, 用 T 表示, 单位是秒 (s).

单位时间内完成振动的次数, 叫做振动的**频率**, 用 f 表示, 单位是赫兹 (Hz).

周期与频率的关系为

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.1.1)$$

振动物体离开平衡位置的最大距离, 叫做振动的**振幅**, 用 A 表示. 如图 1-1-5 中 OB 或 OB' 的大小就是弹簧振子的振幅.

弹簧振子的频率只与弹簧的劲度系数和振子质量有关, 与振幅无关.

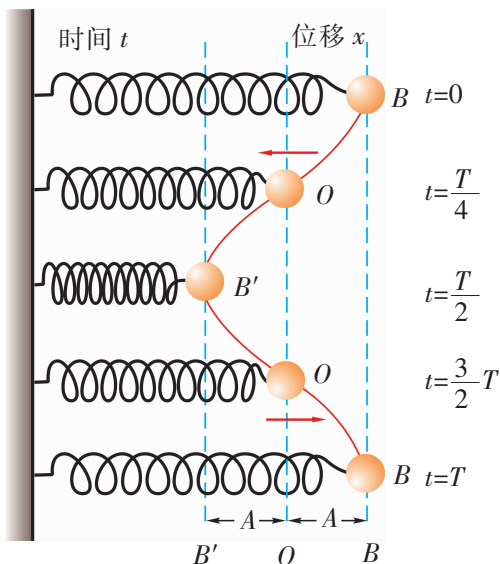


图 1-1-5 弹簧振子位移与时间的对应关系

实践与拓展

专业术语

周期

period

频率

frequency

振幅

amplitude

1. 在利用表 1-1-1 的数据绘出的曲线来分析弹簧振子时, 通过哪个位置观察其振动周期能使误差较小?

2. 想一想, 可否从位移—时间曲线得出速度—时间曲线, 再从速度—时间曲线得出加速度—时间曲线?

练习

1. 试举出几个日常生活和生产中常见的振动的实例.

2. 如果图 1-1-5 中弹簧振子的振幅是 3 cm , 完成一次全振动通过的路程是多少? 如果从点 O 直接运动到点 B' 用了 1 s , 弹簧振子的运动周期是多少?

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

第二节 简谐运动的力和能量特征

从弹簧振子运动的分析可以得到简谐运动有一个很重要的特征，即物体能在一个平衡位置附近来回运动，为什么能实现这样的运动？而且简谐运动是一种加速度大小和方向都在变化的变速运动，这说明它受到一种变力的作用，这是一种怎样的力呢？

观察与思考

观察如图 1-2-1 所示的弹簧振子，分析小球的受力情况。弹簧振子在什么位置所受的力最大？在什么位置所受的力最小？在什么位置的速度最快？在什么位置的速度最慢？

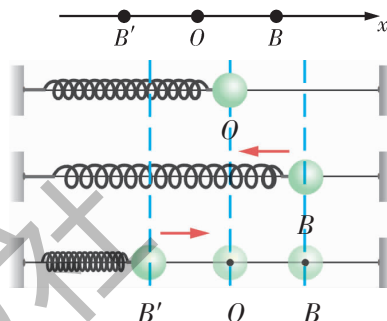


图 1-2-1 弹簧振子的简谐运动

简谐运动的力的特征

对于理想的弹簧振子，振子在运动过程中受到弹簧弹力的作用，力的大小与偏离平衡位置的位移大小成正比，方向总是指向平衡位置，用数学公式表示为

$$F = -kx \quad (1.2.1)$$

式中常数 k 为比例系数，在弹簧振子中 x 叫做弹簧的劲度系数；负号表示力的方向总是与位移的方向相反，力的效果总是使振子回到平衡位置，因此将这个力叫做回复力。

弹簧振子在运动过程中受到回复力，其方向总是与位移的方向相反，其效果总是使振子回到平衡位置，这一规律是简谐运动的另一个特征。这也决定了简谐运动的运动图象具有正弦或余弦函数的规律。所以，简谐运动是运动图象具有正弦或余弦函数规律、运动过程中受到大小与位移成正比、方向与位移相反的回复力的作用的运动。

简谐运动的能量的特征

弹簧振子在简谐运动的过程中，其动能和势能也不断地变化。当弹簧振子位于平衡位置点 O 时，其速度最快，位移为零，动能最大，势能为零；当弹簧振子位于点 B 或点 B' 时（图 1-2-1），速度为零，位移最大，势能最大，动能为零。弹簧振子是在弹力的作用下发生简谐运动的，如果忽略摩擦力，只有弹力做功，那么振动系统的动能与势能互相转换，如图 1-2-2

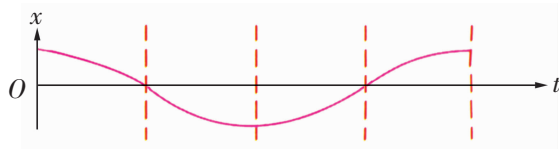


图 1-2-2 (a) 振动过程中弹簧振子的位移—时间曲线

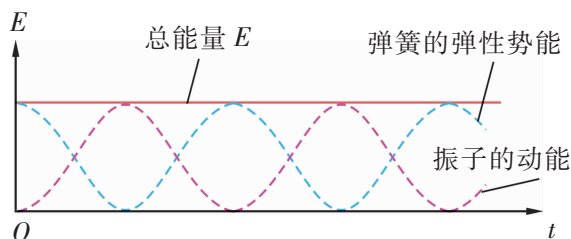


图 1-2-2 (b) 振动过程中弹簧振子的动能和弹性势能的相互转化

所示, 在任意时刻动能和势能的总和即系统的机械能保持不变. 机械能是开始时给定的 (拉开弹簧时外力做功给弹簧输入能量), 被拉开的距离越大, 即振幅越大, 机械能就越大. 也就是说, 如果开始时振子不动, 输入的能量变为弹性势能储存在弹簧振子中, 机械能由振幅决定.

讨论与交流

1. 分析图 1-2-1 中的弹簧振子在完成一次全振动的过程中位移、回复力、加速度、速度的变化情况, 完成下表. (大小填“增大”、“减小”、“最大”、“零”或“不变”, 方向填“+”或“-”)

表 1-2-1

简谐运动		B	$B \rightarrow O$	O	$O \rightarrow B'$	B'	$B' \rightarrow O$	O	$O \rightarrow B$
位移	大小								
	方向								
回复力	大小								
	方向								
加速度	大小								
	方向								
速度	大小								
	方向								
动能									
弹性势能									
机械能									
所用的时间 (以周期 T 为单位)									

2. 总结弹簧振子的三个特征: ①运动图象_____ ; ②力_____ ; ③能量_____ .

实践与拓展

一块均匀的木块竖直地浮在水中, 用力按下使之上下振动, 分析其振动是否为简谐振动.

练习

1. 简述物体做简谐运动时的受力特点.
2. 在如图 1-2-1 所示的弹簧振子中, 设小球的质量为 m , 试证明振子的加速度可用 $a = -\frac{k}{m}x$ 表示.

第三节 简谐运动的公式描述

如何用数学公式来描述简谐运动的运动图象呢？

表 1-3-1 是用频闪照相的办法得到的一组简谐运动的实验数据.

表 1-3-1

时间 t	0	$1t_0$	$2t_0$	$3t_0$	$4t_0$	$5t_0$	$6t_0$
位移 x/mm	20.0	17.8	10.1	-0.1	-10.3	-17.7	-20.0
时间 t	$7t_0$	$8t_0$	$9t_0$	$10t_0$	$11t_0$	$12t_0$	
位移 x/mm	-17.7	-10.3	-0.1	10.1	17.8	20.0	

表中 $t_0=0.11\text{ s}$ 是相邻两次闪光的时间间隔, x 表示振子偏离平衡位置 ($x=0$) 的大小, 起始时间 ($t=0$) 振子被拉伸到右侧距平衡位置 20 mm 处.

我们尝试用表 1-3-1 的实验数据来学习如何用参考圆的方法作出简谐运动的位移—时间曲线, 并判断它与正弦、余弦函数曲线是否比较吻合.

讨论与交流

一个小球在参考圆上做匀速圆周运动, 周期是 $12t_0$, 如图 1-3-1 所示, 以振幅值为半径作一个参考圆, 把圆周分成 12 等份, 测量圆周上每一个等分点在水平轴上的投影. 描出过点 t_0 、 $2t_0$ 、 $3t_0$ 、 $4t_0\cdots 12t_0$ 的曲线, 如图 1-3-2 所示. 这条曲线是哪一种函数的曲线?

将表 1-3-1 中的数据与用参考圆投影得到的 x_1 、 x_2 、 x_3 、 $x_4\cdots x_{12}$ 加以比较, 结果如何?

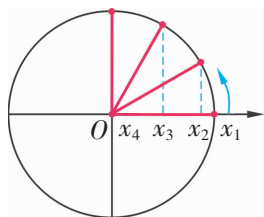


图 1-3-1 匀速圆周运动在 x 方向的投影——参考圆

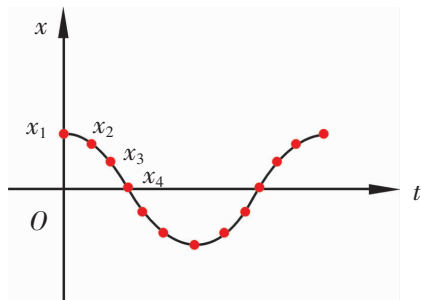


图 1-3-2 描出的 $x-t$ 函数曲线

研究表明, 匀速圆周运动在 x 轴上的投影和简谐振动的运动图象一样, 是余弦曲线或正弦曲线.

简谐振动可以看成质点做匀速圆周运动在 x 轴上的投影，它的数学公式可以借助匀速圆周运动的描述导出。

物体做匀速圆周运动，假设其半径为 A ，质点从 x_1 开始运动，则其在 t 时刻在 x 轴上的投影为

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

式中 ω 就是简谐运动所对应匀速圆周运动（参考圆）的角速度（单位时间转过的角度），故在研究简谐运动等周期性运动中便将它称为圆频率（或角频率）。

ω 与周期 T 、频率 f 的关系是

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

国际单位制中， ω 的单位是弧度/秒（rad/s）。

例：频率 $f=5000$ 赫兹的简谐运动的周期多长？它的角速度（圆频率）多大？

$$\text{解：} f=\frac{1}{T}=\frac{\omega}{2\pi}$$

$$\begin{aligned} \text{角速度：} \omega &=2\pi f=2\pi\times 5000 \text{ rad/s} \\ &=10^4\pi \text{ rad/s} \\ &=3.14\times 10^4 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{周期：} T &=\frac{2\pi}{\omega}=\frac{2\pi}{10^4\pi}=2\times 10^{-4} \text{ s} \\ &=0.0002 \text{ s} \end{aligned}$$

当 $t=0$ 时，如果做圆周运动的质点不是从 x_1 开始，而是从 x_7 开始，我们会得到从负的最大偏离位移开始的运动 [图 1-3-3 (a)] 用上述同样的办法可以绘出 $x-t$ 曲线，如图 1-3-3 (b) 的虚线所示。这时， t 时刻在 x 轴的投影刚好与图 1-3-2 的曲线大小相等，方向相反，我们称之为反相，或者称这两种振动的相位相反，也称为相位差等于 π 。数学公式为

$$x=A\cos(\omega t+\pi)=-A\cos\omega t$$

专业术语

相位

phase

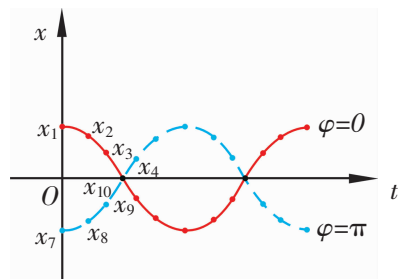
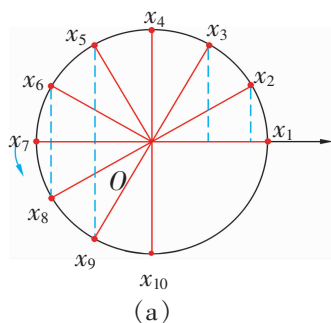


图 1-3-3 相位差为 π 的 $x-t$ 函数曲线

如果 $t=0$ 时，质点的运动不是由 x_7 开始，而是由任意一个角度 φ 开始 [图 1-3-4 (a)]，则写为

$$x=A\cos(\omega t+\varphi) \quad (1.3.1)$$

式 (1.3.1) 是简谐运动的公式描述。其中 A 是简谐运动的振

幅, ω 是圆频率 (或称角频率), $\omega t + \varphi$ 叫做简谐运动在 t 时刻的 **相位**. 由于时间 t 是变量, 所以相位也在变化, φ 是 $t=0$ (开始计时) 时的相位, 叫做 **初相**. 相位和初相都是描述简谐运动的重要物理量. 它与振幅、频率一起构成描述简谐运动的三个物理量.

从上面的分析可知, 位移 x 随时间的变化完全由相位 $\omega t + \varphi$ 决定. 如图 1-3-4 所示, 当 $\omega t + \varphi$ 从零增加到 2π 时, x 取一遍所有可能的值; 或者说, 相位每增加 2π , 振子完成一次全振动.

相位从零变到 α , 需要 $\frac{\alpha}{2\pi}T$ 的时间.

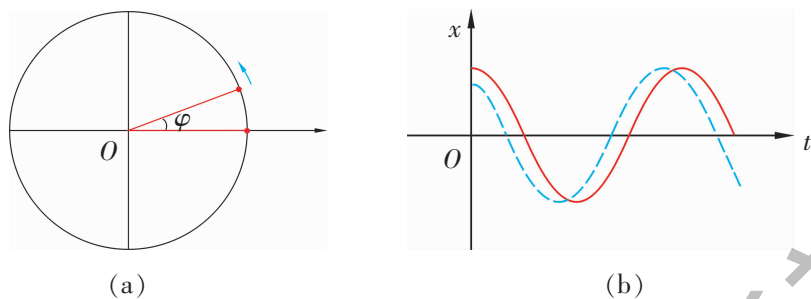


图 1-3-4 相位差为 φ 的 $x-t$ 函数曲线

因此, 对于频率相同、振幅相等、相位不同的振子, 我们可以通过比较它们相位的差别 (叫做相位差) 来比较它们. 相位差用 $\Delta\varphi$ 表示, 则

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

当相位差为 $\Delta\varphi$ 时, 振动相差的时间为 $\frac{\Delta\varphi}{2\pi}T$.

例: 图 1-3-5 是弹簧振子的振动图象, 试回答下列问题.

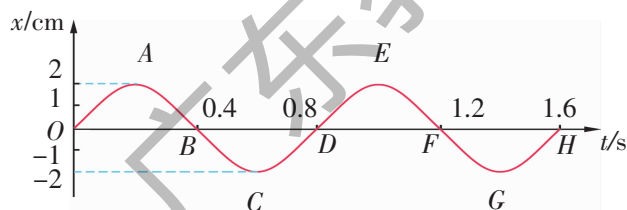


图 1-3-5

(1) 求弹簧振子振动的振幅、周期、频率和初相.

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

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

解: (1) 振幅是弹簧振子的最大位移, 从图中可以看出, 最大位移为 2 cm, 即振幅 $A=2$ cm.

周期是完成一次全振动所经历的时间, 图中 OD 之间表示一次全振动, 所对应的时间是 0.8 s, 所以 $T=0.8$ s.

频率是 1 s 内完成全振动的次数, 它和周期的关系是 $f=\frac{1}{T}$,

所以

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.8 \text{ s}} = 1.25 \text{ Hz}$$

初相位是 $t=0$ 时的相位, 所以 $\varphi = -\frac{\pi}{2}$.

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

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



资料活页

运动传感器

图 1-3-6 是一种可以在 $0.15 \sim 8 \text{ m}$ 范围内测量物体运动的传感器. 当传感器与相关的配套界面连接后, 它可以发出一个超声的脉冲, 射向被测量的物体, 并检测出从物体反射回来的脉冲回波. 和雷达的原理相似, 从超声波的波速和反射回波的时间的一半, 可以计算出物体对超声波源的准确距离. 图 1-3-7 是用运动传感器测出的简谐运动的位移—时间曲线.

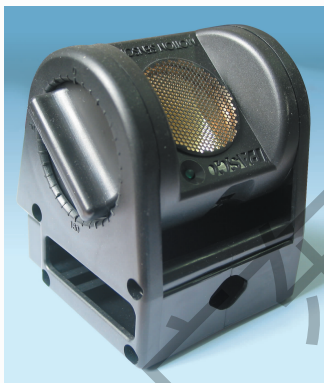


图 1-3-6 运动传感器

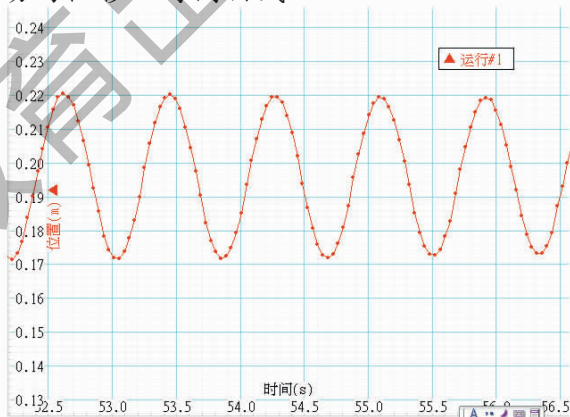


图 1-3-7 简谐运动的位移—时间曲线

从匀速圆周运动得出简谐运动的数学描述

如图 1-3-8 所示, 一辆玩具电动小车在一平面上做匀速圆周运动, 在同一平面上放置一台幻灯机, 灯光水平照射在这辆小车上, 小车运动时在墙壁上的影子正好和弹簧振子做简谐运动的情景相似: 圆周运动的圆心的投影就是简谐运动的平衡位置, 做匀速圆周运动的小车每一时刻在墙壁上水平方向的投影也能与简谐运动的振子位置一一对应.

设小车沿半径为 A 的圆周做匀速圆周运动, 其角速度为 ω , 则向心力

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

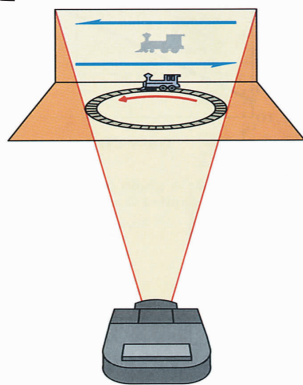


图 1-3-8 匀速圆周运动的投影照片

F 在水平方向的投影

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

上式的负号表示 F_x 与坐标 x 轴的正方向相反, 由几何关系可知

$$x = A \cos\theta$$

于是有

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

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

简谐运动的振动周期与物体做匀速圆周运动周期相等, 所以

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

简谐运动的位移函数关系为

$$x = A \cos\theta$$

把 $\theta = \omega t + \varphi$ 代入, 得

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

式中 A 表示振幅, ω 表示圆频率, $\omega = 2\pi f$, φ 表示初相位.

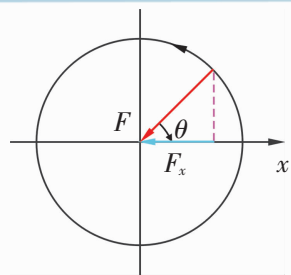


图 1-3-9 向心力在直径方向上的投影

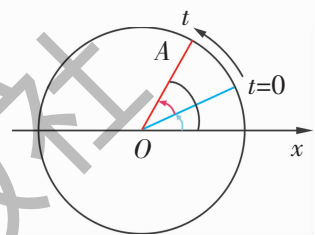


图 1-3-10 匀速圆周运动投影与简谐运动的情景相同

练习

1. 两个简谐运动的 $x_A = 10 \sin\left(4\pi t + \frac{\pi}{4}\right)$ cm, $x_B = 8 \sin(4\pi t + \pi)$ cm, 下列说法正确的是 ().

A. 振动 A 的相位超前振动 B $\frac{3}{4}\pi$

B. 振动 A 的相位滞后振动 B $\frac{3}{4}\pi$

C. 振动 A 的相位滞后振动 B $\frac{5}{4}\pi$

D. 两个振动没有位移相等的时刻

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

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

(1) 求振动的角频率、周期、频率、振幅和初相.

(2) 另一简谐运动 $x_2 = 0.05 \cos\left(8\pi t + \frac{5}{4}\pi\right)$ cm, 求它们的相位差.

第四节 探究单摆的振动周期

专业术语

单摆

the simple pendulum

在日常生活中，我们经常可以看到悬挂起来的物体在竖直平面内摆动，如秋千、挂钟钟锤的摆动等（图 1-4-1）。如果悬挂物体的细线的伸缩和质量可以忽略，线长比物体的直径大得多，这样的装置叫做单摆，如图 1-4-2 所示是单摆运动的频闪照片。我们从弹簧振子的简谐运动知道，振子之所以能够做来回的周期性运动，是因为振子受到弹簧的弹力——总是使它回到平衡位置的回复力的作用。

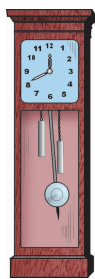


图 1-4-1 挂钟

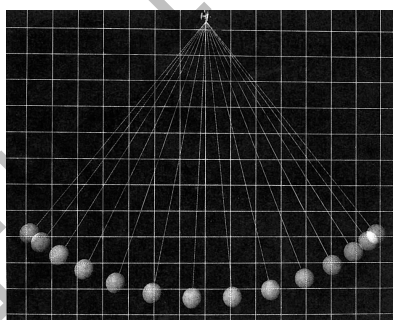


图 1-4-2 单摆运动的频闪照片

本节所讲单摆，也做来回的周期性运动。那么，单摆中的摆球是否也受到回复力的作用呢？原来在单摆中的摆球是有质量的，摆球受到重力的作用，当摆球在静止时，重力的方向竖直向下，与摆球的运动方向垂直，重力对摆球的运动不起作用，相当于弹簧振子在平衡位置时，弹簧的弹力为零的情况。而在摆球离开平衡位置（见图 1-4-3）时摆球受到的重力 G 方向仍然竖直向下，但它在摆球运动圆弧方向有一个分力 F ，这个分力随着摆球偏离平衡位置的距离而增大，分析表明（参看资料活页）这个分力 F 就是单摆的回复力。它等于

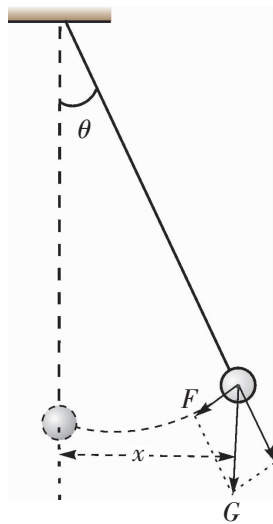


图 1-4-3

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

由于 m （摆球质量）、 l （摆长）、 g 都是确定数值，用常数 $k = \frac{mg}{l}$ 代表，则这就与弹簧振子的回复力公式（1.2.1）完全一致。单摆是实际摆的理想模型。单摆摆动的振幅很小即偏角很小时，单摆也做简谐运动。

单摆振动周期的实验探究

做简谐运动的单摆的周期（或频率）是否和弹簧振子的周期一样，具有固有周期（或频率）的特点呢？

探究影响单摆周期的因素可以从单摆的装置入手。单摆的装置包括细绳和小球。因此，影响单摆周期的因素可能有：细绳的长度（细绳的质量忽略）、小球的质量（小球的体积忽略）、小球摆到最高位置时绳子与竖直方向的夹角（叫做摆角）。

根据以上猜想，我们采用控制变量法进行实验探究。实验方案的设计和实验器材的选定应满足单摆做简谐运动的条件：细绳没有伸缩，小球的密度大，体积小，摆角小。

【设计实验】

实验方案：_____

实验步骤：_____

【进行实验与收集数据】

按设计好的实验步骤进行实验。进行实验时，应思考并注意以下几点：

- (1) 要保证单摆的摆动是在同一平面内。
 - (2) 参考弹簧振子做简谐运动时完成一个周期的过程，思考单摆摆动一个周期的过程是怎样的。
 - (3) 测量单摆的周期时，采用什么样的方法可以减少误差？以哪一个位置作为计时起点会更方便计时和减少误差？
- 设计实验表格，并记录实验数据。

【分析与论证】

分别以细绳的长度、小球的质量、摆角为横坐标，相应的周期为纵坐标作图，观察这三个因素对单摆周期的影响，即周期 T 与它们的函数关系：_____

【评估与交流】

- (1) 分析实验结果中存在误差的原因。
- (2) 写出实验探究报告。

荷兰物理学家惠更斯（Christian Huygens, 1629—1695）研究单摆的振动，于 1659 年发现单摆做简谐运动的周期 T 跟摆长 l 的二次方根成正比，跟重力加速度 g 的二次方根成反比，跟振幅、摆球的质量无关。用公式表示为

$$T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \quad (1.4.1)$$

固有周期是指周期与单摆本身的固有因素（如摆长）有关，与外界条件（如摆角）无关。对于弹簧振子，其振动周期也是固有周期，只与振子本身的质量和弹簧的劲度系数有关，与振幅无关。

先初步观察单摆的摆动过程，然后制订实验步骤。

讨论与交流

1. 分析单摆摆动时哪个力充当了回复力.
2. 同样摆长的单摆, 放在地球上的另一个地方, 它的周期一样吗?

实践与拓展

1. 人们通常将振动周期为 2 s 的单摆称为秒摆, 尝试制作一个秒摆.
2. 如果改变秒摆的摆动振幅 (偏角不要太大, $\theta \leq 5^\circ$), 它的周期会受到影响吗? 如果改变摆球的质量呢?

资料活页

单摆的周期、频率由简谐运动的系统决定

当质量为 m 的摆球静止在点 O 时, 摆球受到的重力 G 和悬线的拉力 F' 彼此平衡, 点 O 是单摆的平衡位置. 拉开摆球, 使它偏离平衡位置一个很小的偏角, 然后释放, 摆球受到的重力 G 和悬线的拉力 F' 不再平衡, 在这两个力的共同作用下, 摆球将沿着以平衡位置 O 为中心的一段圆弧 AA' 做往复运动, 这就是单摆的振动.

在研究单摆的振动时, 可以不考虑与摆球运动方向垂直的力, 而只考虑沿摆球运动圆弧 AA' 切线方向的力. 当摆球运动到任一点 P 时 (图 1-4-4), 重力 G 沿摆球运动圆弧 AA' 切线方向的分力 $G_1 = mg \sin \theta$, 正是这个力提供了使单摆振动的回复力 $F = G_1 = mg \sin \theta$. 当偏角 θ 很小时, $\sin \theta \approx \theta \approx \frac{x}{l}$, 所以单摆

振动的回复力为
$$F = -\frac{mg}{l}x$$

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 都是由单摆系统决定的确定数值, $\frac{mg}{l}$ 可以用一个常数表示, 上式可以写成

$$F = -kx$$

因此, 在偏角很小的情况下, 单摆的振动也是一种典型的简谐运动. 弹簧振子做简谐运动时, $k = m\omega^2$, 则单摆做简谐运动时

$$\omega^2 = \frac{g}{l}$$

单摆的振动周期为
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

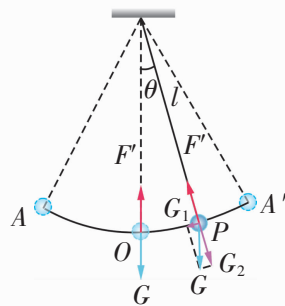


图 1-4-4

练习

1. 在通常情况下, 单摆的摆动不一定是简谐运动, 只有当摆球在_____面内来回摆动, 且最大摆角_____时, 单摆的摆动才能看成是简谐运动.
2. 已知秒摆的摆长是 1 m, 当摆长改变为 0.81 m 时, 振动周期是多少? 要使振动周期为 4 s, 摆长应是多少?

第五节 用单摆测定重力加速度

由单摆的振动周期公式 $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, 可得, $g=\frac{4\pi^2l}{T^2}$, 因此, 通过实验方法测出摆长 l 和周期 T , 即可计算得到当地的重力加速度值.

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

【方法指导】

将细线穿过金属小球上的小孔, 在细线的一端打一个稍大一点的结, 制成一个单摆. 如图 1-5-1 所示, 将铁夹固定在铁架台上端, 铁架台放在桌边, 使铁架台伸出桌面, 然后把单摆固定在铁夹上, 使摆球自由下垂.

用刻度尺量出摆长 (摆球静止时悬点到摆球球心的距离): 用米尺测出悬线长度 l_0 (精确到 1 mm), 用游标卡尺测出摆球的直径 d , 则摆长为 $l=l_0+\frac{d}{2}$.

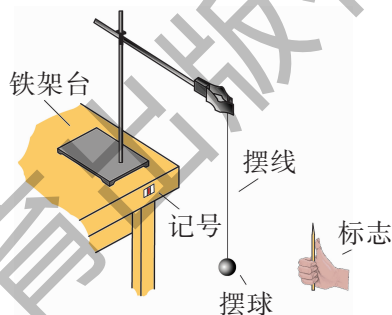


图 1-5-1

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

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

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

讨论与交流

1. 单摆摆线的长度是长些好还是短些好? 为什么?
2. 为什么要保证摆球在竖直平面内摆动? 测周期时为什么要测出单摆完成 30~50 全振动的时间, 再算出平均完成一次全振动所用的时间 (即单摆的振动周期)?

3. 记录振动次数时, 为什么要以摆线通过平衡位置处的标记为准?

【数据处理】

改变摆长, 重做几次实验, 可得一系列的测量值.

(1) 计算法.

将每次实验测得的摆线长度 l_0 、振动次数 n 和振动总时间 t , 以及算出的摆长 l 、周期 T 和重力加速度 g 记录在表 1-5-1 中. 可得一系列重力加速度的值, 最后算出其平均值.

表 1-5-1 实验数据记录表

实验次数	摆线长 l_0/m	摆球直径 d/m	摆长 l/m	振动次数 n	振动时间 t/s	振动周期 $T=\frac{t}{n}$	重力加速度 g	重力加速度的平均值 $\bar{g}=\frac{1}{n}(g_1+g_2+\cdots+g_n)$
1								
2								
3								
4								
5								

(2) 图象法.

以 T^2 为横坐标, 以 l 为纵坐标建立坐标系, 如图 1-5-2 所示, 根据表 1-5-1 中的数据 (算出 T^2) 作 $l-T^2$ 图线, 由函数关系 $l=\frac{g}{4\pi^2}T^2$ 知, 它应该是过原点的一条直线 (尽量让各数据点对称地分布在这条直线的两侧).

斜率 k 的求法可以选取图线中容易读数的两个点 (l_1, T_1^2) 和 (l_2, T_2^2) , 求出摆长的差值 $\Delta l=l_2-l_1$, 周期平方的差值 $\Delta T^2=T_2^2-T_1^2$, 从而求出 $k=\frac{\Delta l}{\Delta T^2}$, 最后得出本地区重力加速度 $g=\frac{4\pi^2\Delta l}{\Delta T^2}$.

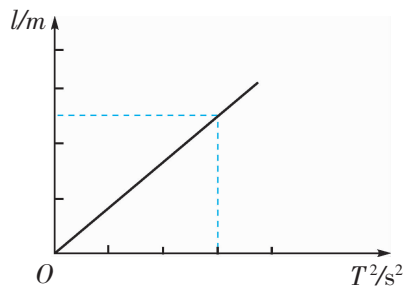


图 1-5-2

练习

1. 某同学做用单摆测重力加速度的实验时, 操作上错误或合理的有 ().

- 取单摆的最大偏角大于 10°
- 摆球摆到最高点时开始计时
- 防止摆球在水平面内做圆周运动或椭圆运动
- 测出的摆线长就是摆长

E. 在平衡位置启动秒表, 并开始计数, 当摆球第 30 次经过平衡位置时制动秒表, 若读数为 t , 则 $T = \frac{t}{30}$

2. 在做“用单摆测定重力加速度”的实验时, 用摆长 l 和周期 T 计算重力加速度的公式是 $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$. 如果已知摆球直径为 2.00 cm, 让刻度尺的零点对准摆线的悬点, 摆线竖直下垂, 如图 1-5-3 所示, 那么单摆摆长是 _____, 如果测定了 40 次全振动的时间如图中秒表所示, 那么秒表读数是 _____ 秒, 单摆的摆动周期是 _____ s.

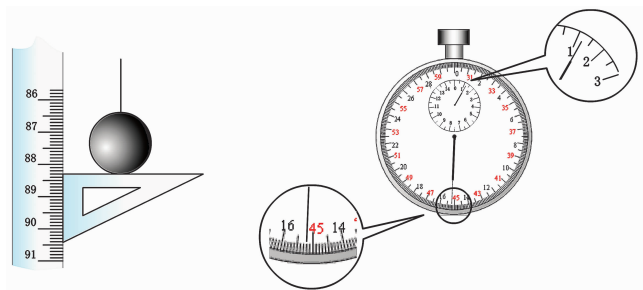


图 1-5-3

3. 下表是用单摆测定重力加速度实验中获得的有关数据:

摆长 L/m	0.5	0.6	0.8	1.1
周期 T^2/s^2	2.0	2.4	3.2	4.8

(1) 利用上述数据, 在图 1-5-4 坐标系中描出 $L-T^2$ 图象.

(2) 利用图象, 取 $T^2 = 4.2 \text{ s}^2$ 时, $L = \underline{\hspace{2cm}} \text{ m}$, 重力加速度 $g = \underline{\hspace{2cm}} \text{ m/s}^2$.

4. 一位同学用单摆做测量重力加速度的实验, 他将摆挂起后, 进行了如下步骤:

(1) 测摆长 l : 用米尺量出摆线的长度.

(2) 测周期 T : 将摆球拉起, 然后放开, 在摆球某次通过最低点时, 按下秒表开始计时, 同时将此次通过最低点作为第一次, 接着一直数到摆球第 60 次通过最低点时, 按秒表停止计时, 读出这段时间 t , 算出单摆的周期 $T = \frac{t}{60}$.

(3) 将所测得 l 和 T 代入单摆的周期公式 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, 算出 g , 将它作为实验的最后结果写入报告中去.

指出上面步骤中遗漏或错误的地方, 写出该步骤的字母, 并加以改正 (不要求进行误差计算).

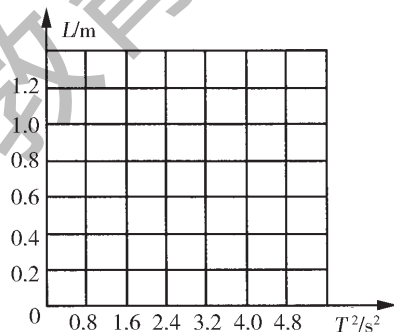


图 1-5-4

第六节 受迫振动 共振

在现实生活中，当我们拨动琴弦或其他物体使其振动时，它们可以永不停止地振动下去吗？

受迫振动

简谐运动是实际振动的理想化模型，只要提供给振动系统一定的能量，使它开始振动，由于系统的机械能守恒，振子就以一定的振幅永不停止地振动下去，这种振动叫做**等幅振动**。

在实际的振动系统中，除了受到回复力以外，还受到摩擦力和其他阻力，系统由于要克服阻力做功，机械能就会损耗，所以系统的机械能随着时间逐渐减少，振动的振幅也逐渐减小，最终停止振动。这种振幅逐渐减小的振动，叫做**阻尼振动**，也叫**减幅振动**。

那么，怎样才能得到持续的周期性振动呢？家里的挂钟，游乐场里的秋千，要想使它们不停地摆动，就要给它们提供一个周期性的力。因此，用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，使系统持续地振动下去，这种周期性的外力叫做**驱动力**，物体在外界驱动力作用下的振动叫做**受迫振动**。

专业术语

受迫振动

forced vibration



推力频率与秋千的固有频率相同，
秋千的摆动振幅逐渐增大

图 1-6-1 秋千的受迫振动

简谐运动的振动频率是由振动系统决定的，那么，受迫振动的振动频率是否也是由系统决定的呢？

观察与思考

在图 1-6-2 和图 1-6-3 中，分别使驱动力的频率由小变大，图中的受迫振动会发生什么变化？



图 1-6-2 人蹦跳引起吊桥的受迫振动

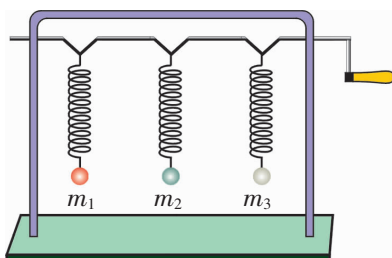


图 1-6-3 三个不同质量的小球做受迫振动

实验表明，物体做受迫振动，振动稳定后的频率等于驱动力的频率，与物体的固有频率无关。

共振

受迫振动的振幅是否也只与外力的大小有关，而与振动系统的固有频率无关呢？让我们先来观察下面的实验。

观察与思考

如图 1-6-4 所示，在一根张紧的绳上挂几个摆球，其中 A、B、C 的摆长相等。当摆球 A 振动时，观察其他摆球中哪一个振动得最剧烈。

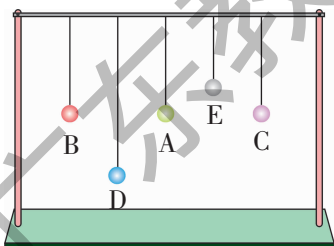


图 1-6-4 研究共振装置

实验表明，对于摆长与摆球 A 相同的摆球 B 与 C，即固有频率 f' 与驱动力频率 f 相等的摆球的振动，振幅最大；固有频率与驱动力频率相差最大的摆球的振动，振幅最小。如图 1-6-5 所示的曲线表示受迫振动的振幅 A 与驱动力频率 f 的关系。

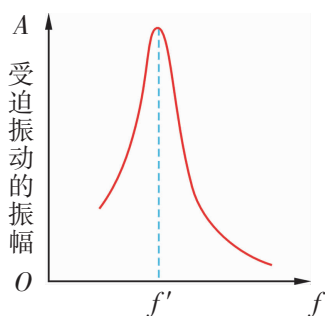


图 1-6-5 共振曲线

专业术语

共振

resonance

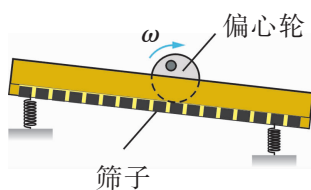


图 1-6-6 共振筛

驱动力频率等于物体的固有频率时，受迫振动的振幅最大，这种现象叫做共振。

共振的利用和防止

共振现象有许多应用。共振筛（图 1-6-6）就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。偏心轮在电动机的带动下发生转动，适当调节偏心轮的转速，可以使筛子受到的驱动力频率接近筛子的固有频率，这时筛子发生共振，从而提高了筛除杂物的效率。

收音机利用电磁的共振进行选台，一些乐器利用共振来提高音响效果，核内的核磁共振被利用来进行物质结构的研究以及医疗诊断等。

共振也有不利的一面。如图 1-6-7 和图 1-6-8 所示。共振时因为系统振幅过大会造成机器设备的损坏。军队或火车过桥时，整齐的步伐或车轮对铁轨接头处的撞击会对桥梁产生周期性的驱动力，如果驱动力的频率接近桥梁的固有频率，就有可能使桥梁的振幅显著增大，致使桥梁断裂。因此，军队过桥时步伐要打乱，以免产生周期性的驱动力；火车过桥要慢开，使驱动力的频率远小于桥梁的固有频率。



图 1-6-7 某些乐器发出与玻璃杯固有频率相同的音乐，如果该音乐持续不断，则玻璃杯可能因发生共振而破碎



图 1-6-8 桥梁的共振会引起桥梁断裂

在需要利用共振时，应使驱动力的频率接近或等于振动物体的固有频率；而在需要防止共振时，应使驱动力的频率与振动物体的固有频率不同，而且相差越大越好。

实践与拓展

在如图 1-6-3 所示的实验中, 设小球的质量 $m_1 > m_2 > m_3$, 当驱动力的频率 f 增大时, 不同质量的小球依次发生振幅较大的振动, 对应的驱动力的频率为 $f_1 < f_2 < f_3$. 这是为什么?

资料活页

不敲自鸣的大钟

在三国时代, 魏国的都城是现在的洛阳. 一天, 魏元帝曹奂正在宫里与他的文武大臣们商讨攻打蜀国的事情. 突然, 宫门口的大钟发出了“嗡、嗡”的声音, 元帝此时正为蜀、吴联合抗魏的事大伤脑筋, 听到钟声后很生气, 立即派太监去查看究竟是谁在敲钟.

太监匆忙赶到宫门口询问守钟的士兵, 士兵回答说: “没有人敲钟, 是它自己响的.”

太监一听, 吓得浑身发抖, 急忙向元帝禀告了这一怪事. 这在当时被认为是灾难的预兆. 元帝与众文武大臣立刻惶恐不安起来, 不知道会有什么灾难要降临到魏国.

元帝立即下旨召见博学多才的太傅张华, 并把刚才的怪事向张华说了一遍, 最后问道: “张爱卿, 依你看会有什么灾难降到魏国呢?”

张华向元帝及众文武解释了大钟不敲自鸣的原因, 听完张华的话, 众人都松了一口气, 气氛一下子又活跃起来了.

原来, 前不久四川地区发生了地震, 地震波传到洛阳. 由于地震波的频率正好与宫门口的大钟的固有频率相同, 于是大钟就产生了共振——即共鸣, 大钟就不敲自鸣了.

http 我们的网站

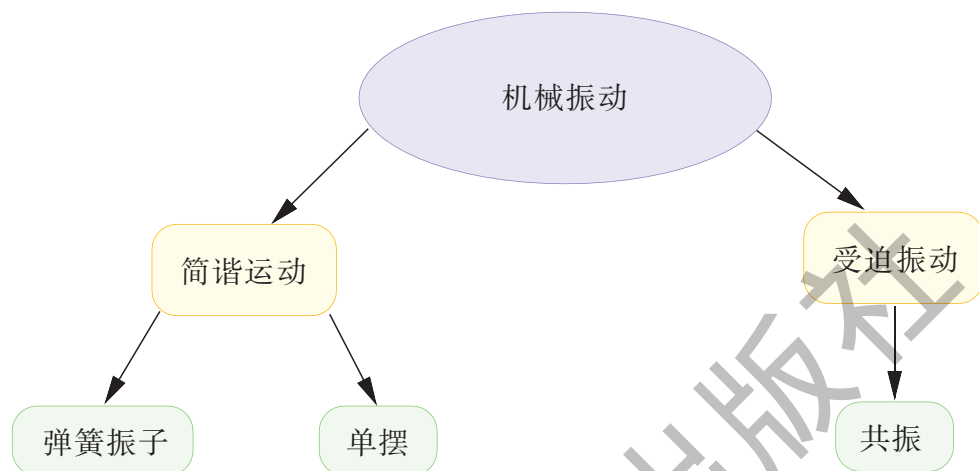
1. 人体的固有频率.
2. 最早的共振实验.

练习

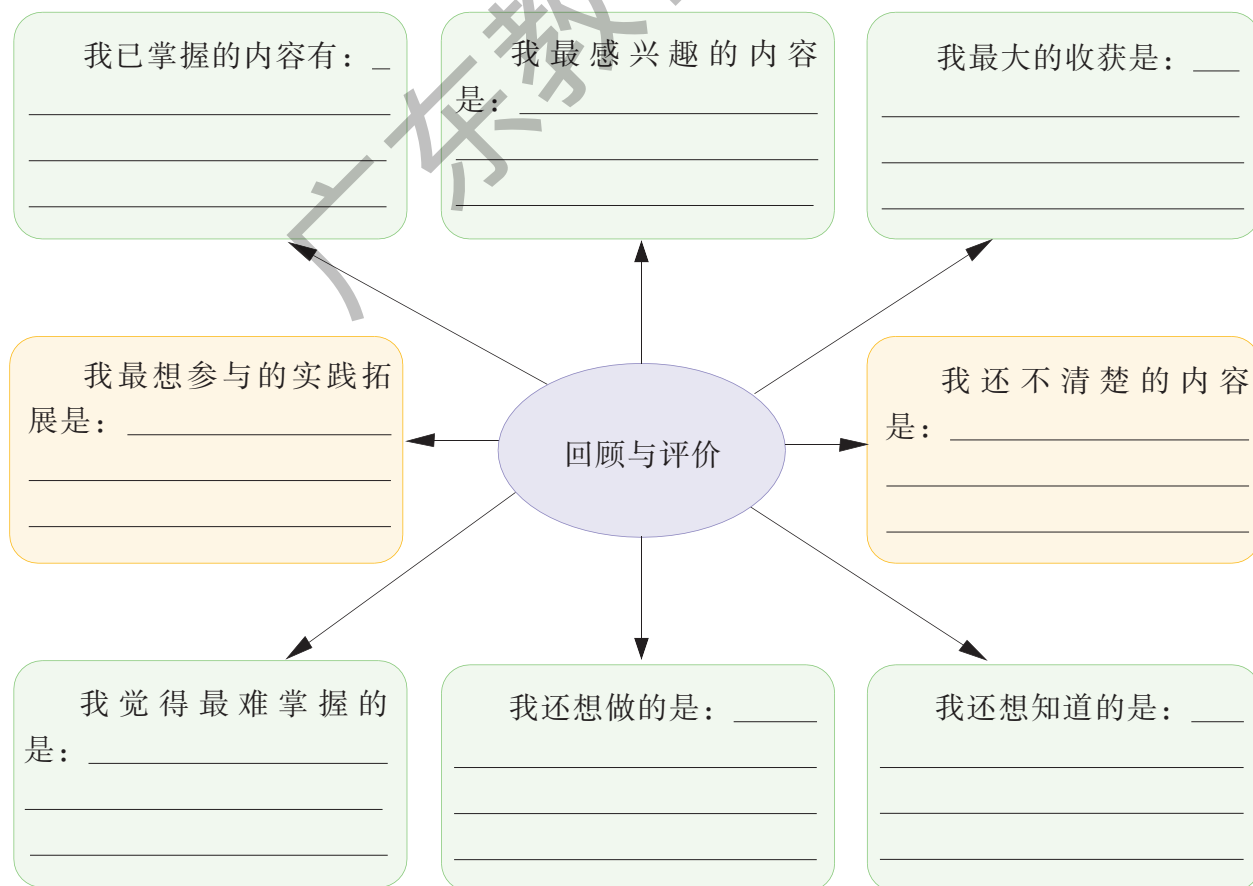
1. 在生活中, 哪些地方需要共振? 哪些地方需要防止共振?
2. 有人在家里靠近电冰箱的地方摆放了一个橱柜, 柜内装了一些瓶子和罐子. 当电冰箱的压缩机启动时, 有一些瓶子和罐子就会发出声音. 这些声音的来源是什么? 怎样才能消除?

本章小结

一、知识结构



二、回顾与评价



习 题 一

1. 在如图 1-1 所示的图象中, 振子在 $t=$ _____ s 时, 具有正向最大加速度; $t=$ _____ s 时, 具有负方向最大加速度. 在时间从 _____ s 至 _____ s 内, 振子所受回复力沿 $-x$ 方向并不断增大; 在时间从 _____ s 至 _____ s 内, 振子的速度沿 $+x$ 方向并不断增大.

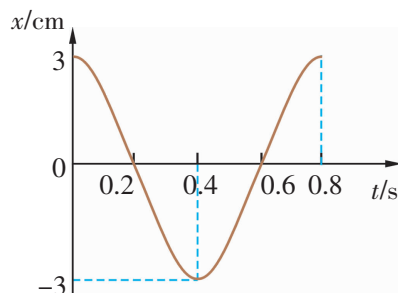


图 1-1

2. 做简谐运动的质点通过平衡位置时, 具有最大值的物理量是 ().

- A. 加速度 B. 速度 C. 位移
D. 动能 E. 回复力 F. 势能

3. 如图 1-2 所示, 由轻质弹簧和物块组成的弹簧振子, 悬挂于天花板上. 当其处于静止状态时的位置是 O . 现将物块向下拉一小段距离后放手, 此后振子在平衡位置上下做简谐运动. 不计空气阻力, 指出振子在振动过程中, 加速度不断减小而速度不断增大是发生在哪几段?



图 1-2

4. 对单摆在竖直平面内的振动, 下面说法正确的是 ().

- A. 摆球所受的向心力处处相同
B. 摆球的回复力是它所受的合外力
C. 摆球经过平衡位置时所受回复力为零
D. 摆球经过平衡位置时所受合外力为零

5. 一个摆球质量为 100 g 的单摆, 在摆角等于 5° 时, 使它回到平衡位置的作用力是多少? 这时沿振动方向的加速度是多少? ($g=10\text{ m/s}^2$, $\sin 5^\circ=0.087$)

6. 某个摆的周期为 3.0 s . 如果摆长增加 60% , 它的周期如何改变? 如果摆长减少 60% 呢?

7. 一个做简谐运动的单摆, 原来的周期等于 2 s , 在下列情况下, 周期有没有变化? 如有变化, 变为多少?

- (1) 摆长减少为原长的 $1/4$.
(2) 振幅减少为原来的 $1/4$.
(3) 摆球质量减小为原来的 $1/4$.
(4) 重力加速度减小为原来的 $1/4$.

8. 如图 1-3 所示, 曲轴上悬挂一弹簧振子, 转动摇把, 曲轴可以带动弹簧振子上下振动. 开始时不转动摇把, 让振子自由上下振动, 测得其频率为 2 Hz , 然后匀速转动摇把, 角速度为 240 rad/s , 当振子振动稳定时, 它的振动周期为多少?

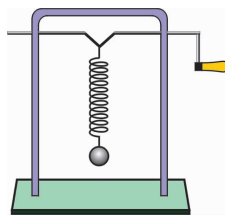


图 1-3

9. 汽车的车身是装在弹簧板上的，如果它的固有周期是 1.5 s ，汽车在一条起伏不平的路上行驶，路上各突起处相隔的距离都是 9 m ，那么汽车以多大的速度行驶时，车身的起伏振动最激烈？

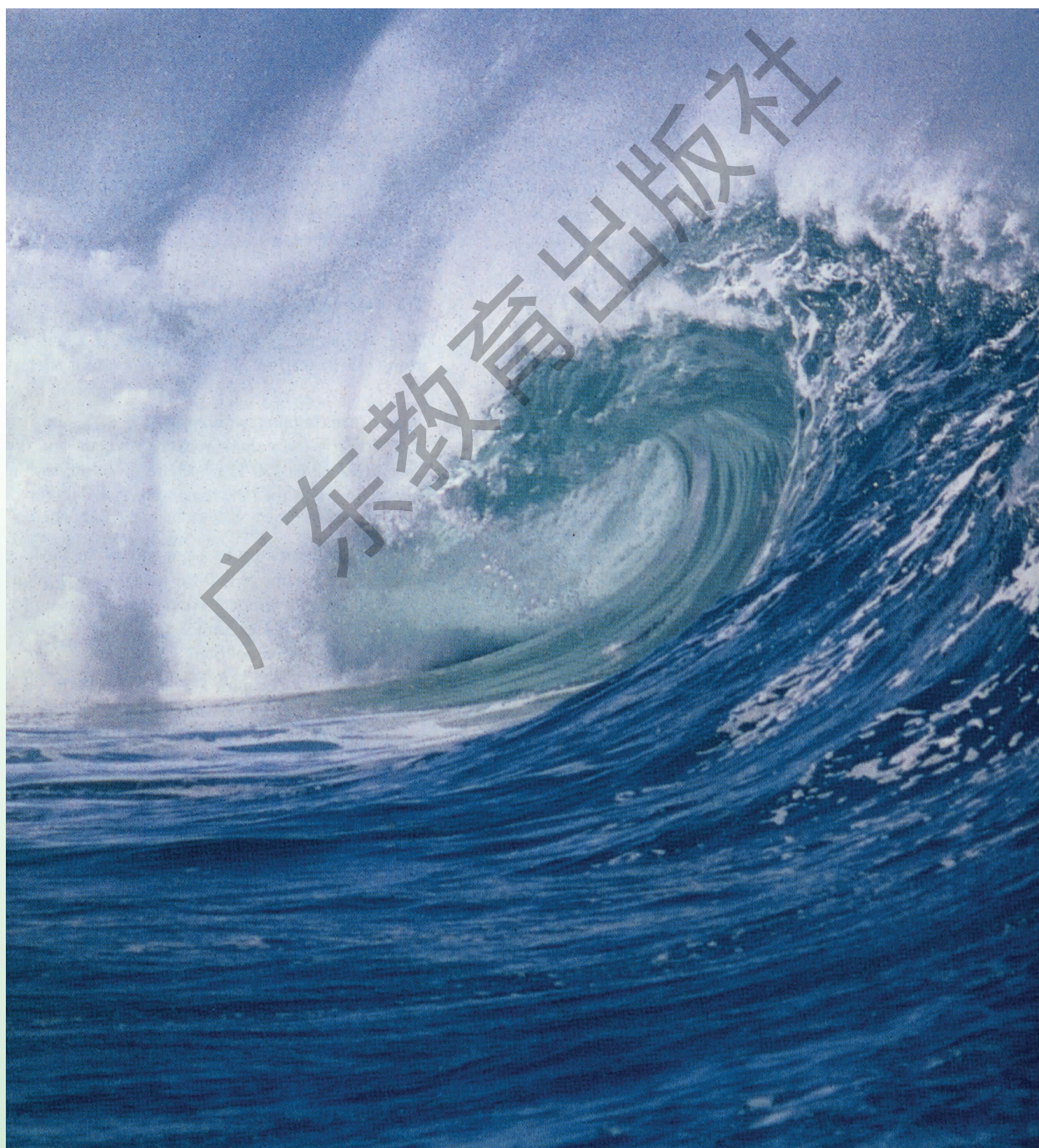
10. 跳水运动员在跳板上跳水时，用脚蹬踏跳板的频率是否应接近跳板的固有频率？为什么？

广东教育出版社

第二章

机械波

帆船驶过水面上泛起的水波，抖动绳子上下起伏的运动，阵阵微风吹过麦田产生的麦浪，山谷里的回声，这些都是机械波。以千差万别的物质作为载体的机械波是如何定义的？它是如何产生和传播的呢？它又有一些什么样的运动特征和规律呢？



第一节 机械波的产生和传播

机械波在生活中随处可见. 在歌剧院里, 每个人都能听到台上的歌声, 这是因为有声波为我们传递信息; 在江河上, 一艘大船经过河面后能使停泊在岸边的小船上下摇荡, 这是大船激起的水波在“作怪”……

认识机械波

观察与思考

将一根长软绳的一端拴在门把上, 另一端用手握住, 如图 2-1-1 所示, 分别观察在下列情况下会出现什么现象: 向上抖动一次; 向下抖动一次; 上下抖动一次; 持续上下抖动.

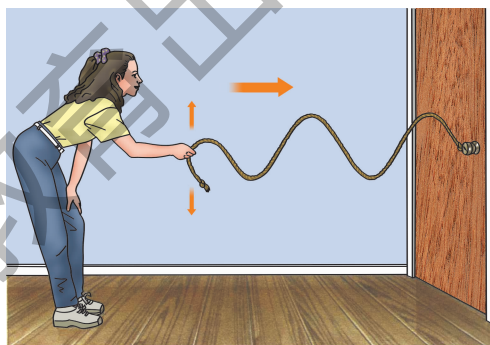


图 2-1-1 抖动的绳子产生的机械波

专业术语

机械波
mechanical wave



图 2-1-2 运动员抖动着丝带

实验表明, 向上抖动一次, 在绳子上形成一个凸起波形, 并向另一端传去; 向下抖动一次, 在绳子上形成一个凹下波形, 并向另一端传去; 持续的上下抖动, 会在绳子上形成一系列凸凹相间的波形, 并向另一端传去. 可以说, 手的上下抖动在绳子上形成了**机械波**. 机械波将上下抖动的形式以及能量从绳子的一端传播到了另一端.

机械波的产生

图 2-1-1 中绳子的上下抖动实际上是一种机械振动. 当女孩上下抖动绳子的自由端时, 才能产生一个沿绳子传播的波. 同理, 在图 2-1-2 中, 只有当艺术体操运动员抖动一根附有一条丝带的短棍, 才能形成由丝带传播的波动. 大量事实表明, 要产

生机械波，必须有一个振动源，我们把它叫做**波源**。

但是，只有波源并不能产生机械波。绳上和丝带上的波是振动沿着绳子和丝带传播的，水波是振动沿着水传播的，声波通常是振动沿着空气传播的，地震波是振动沿着地面传播的。绳、丝带、水、空气、地壳等借以传播波的物质，叫做**介质**。机械振动在介质中的传播称为**机械波**。

总之，形成机械波需要两个条件：**机械振动的波源和传播振动的介质**。

专业术语

波源

wave source

介质

medium

机械波的传播

尽管机械波通过介质传播，但波并没有携带介质本身与它一起传播。就好比图 2-1-3 中的小船，当一个波从小船下面经过时，小船只是上下浮动，并不沿着水面运动；波通过后，水和小船都回复到它们的起点。因此，波传播的只是一种振动形式。

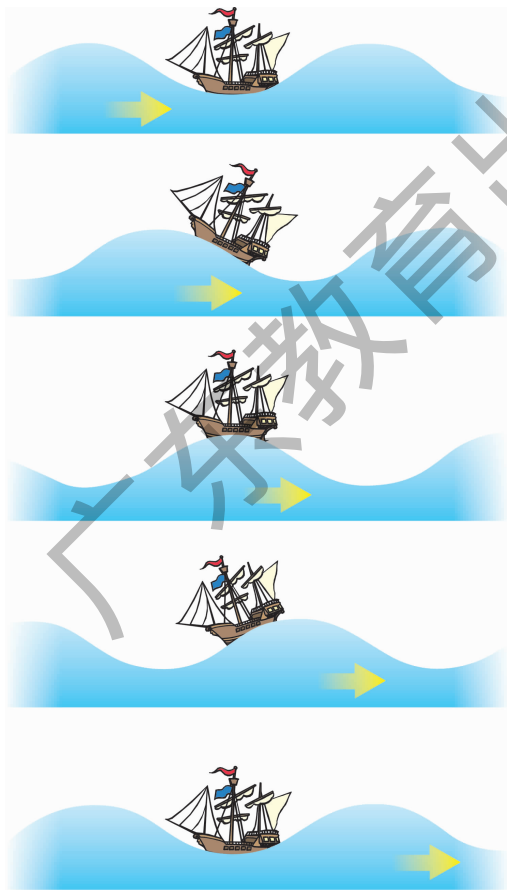


图 2-1-3 波通过水传播，但它没有携带水一起传播

介质中本来静止的质点（静止的小船），随着波的传来而发生振动（小船上下浮动），表明它获得了能量。这个能量是从波源通过前面的质点依次传来的，所以波在传播振动的运动形式的同时，也将波源的能量传递出去。波是传递能量的一种

专业术语

横波

transverse wave

纵波

longitudinal wave

波峰

wave crest

波谷

trough

密部

compression

疏部

rarefaction

形式.

波不但能携带能量,也能传递信息.我们用语言进行交流,就是利用声波传递信息.

纵波与横波

如图 2-1-4 所示,当我们用绳子制造一个波时,绳子上的质点上下振动,而波沿绳子向右传播,两者的方向是垂直的.像这样绳子上的质点的振动方向与波的传播方向垂直的波,叫做**横波**.在横波中,凸起的最高处叫做**波峰**,凹下的最低处叫做**波谷**.而和波的传播方向在同一直线上的波叫做**纵波**.在纵波中,弹簧上的质点紧缩在一起的部分称为**密部**,最稀疏的部分称为**疏部**.

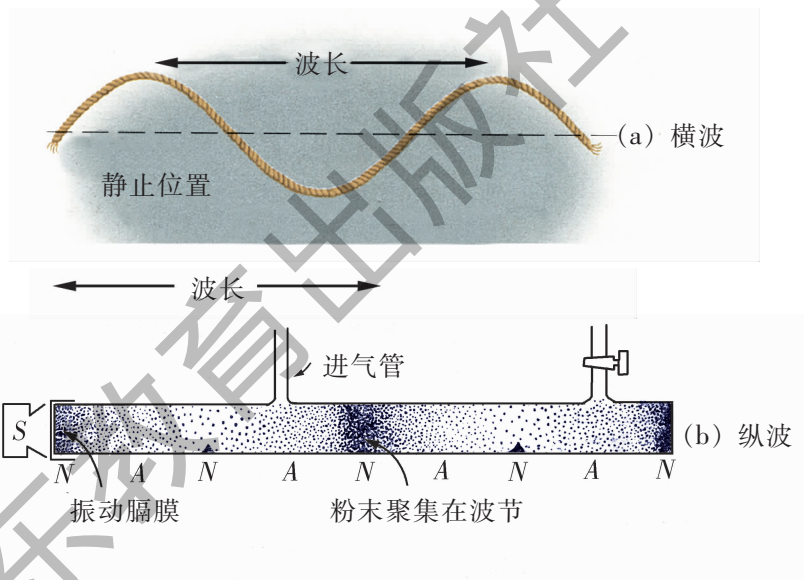


图 2-1-4 横波与纵波

讨论与交流

从生活中的经验可知,真空可以隔音,耳朵贴在铁轨上可以清晰地听到远处驶来的火车的声音.其原理是什么?

实践与拓展

为什么机械波可以传播能量与运动形式而不能传播质点呢?

资料活页

地震波

在地球介质中由震源向四周传播的机械波,叫地震波.它是由于地球内部的介质(岩石)突然发生破坏、运动而引起的.地震波又分为体波和面波.

体波是在地球内部向三维方向传播的地震波. 为简单起见, 一般都假设岩石是一种完全弹性体, 任意形变都可以分解为两部分, 一部分是体积发生形变(膨胀、收缩)而形状不变, 由此引起压缩波, 它是纵波; 另一部分是形状发生变化而体积不变, 由此引起剪切波, 它是横波. 在同一种介质中, 两种波的传播速度不同, 纵波的波速要比横波的波速大, 因而, 在离震源稍远处, 这两种波的波阵面便明显地分开.

面波是沿着界面传播的地震波. 这种波在与界面垂直的方向上不能传播. 面波又分为以下两种:

瑞利波: 包括纵波和横波两种成分, 存在于地球表面以下.

洛夫波: 它是横波, 存在于两层介质的分界面以下.

这两种面波的传播速度随频率的变化而变化, 变化的曲线关系称为频散曲线.

总之, 地震波是非常复杂的机械波.

地震同地球的构造和地壳运动有关. 在地壳运动中, 当地壳的岩层经不住冲击而发生断裂, 或是有裂缝的地方再次发生错动, 或大陆板块间发生碰撞和挤压, 都会发生地震. 地球上每年大约要发生 500 万次地震, 平均不到 10 s 便有一次. 不过, 其中绝大多数都很轻微, 人们能感觉到的地震约占地震总次数的 1%, 而强度达到能够破坏建筑物的地震的发生率就更低了.

地震波引起地面的震动, 是造成一系列破坏的原因. 地震能引起建筑物倒塌、滑坡、裂缝、河流改道、地下水喷出、海啸等. 强烈地震可以在短时间内造成巨大灾难.

研究地震波对研究地球结构十分重要. 对地震波的传播速度及其变化的测定表明, 地球有四个重要的分层结构, 即地壳、地幔、外核和内核, 研究体波速度的变化、面波的频散曲线可以探究地幔的成层结构和地壳的岩石分层; 由体波(纵波和横波)及面波的速度随深度的变化关系, 可以从理论上算出地球内密度及压力的分布; 从研究地震和核爆炸两类震源所产生的波动现象的差异, 可以进行核爆炸监测.



练习

1. 机械波是怎样产生的? 为什么说波是传播能量的一种方式?
2. 请举出横波和纵波的实例.
3. 关于横波, 下列说法中正确的是 ().
 - A. 波的传播过程就是介质中的质点由近及远的移动过程
 - B. 波的传播过程就是波源提供的能量由近及远在介质中的传播过程
 - C. 质点振动的方向总是垂直于波传播的方向
 - D. 波在传播过程中, 介质中的质点所做的振动属于自由振动

第二节 机械波的形象描述

从机械振动的图象中，我们可以了解弹簧振子的运动特征。下面，我们也可以通过机械波的图象描述来了解机械波的运动规律。

波的图象

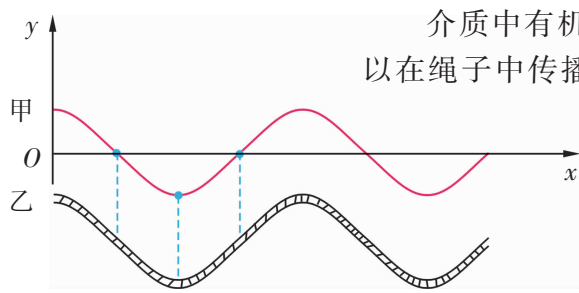


图 2-2-1 横波的图象

介质中有机械波传播时，介质中的物质并不随波一起传播。以在绳子中传播的机械横波为例，质点都是以没有波存在时的位置为平衡位置做垂直于传播方向的振动。如果将在波的传播方向上各个质点（介质粒子）的平衡位置作为横坐标 x ，某一时刻各质点偏离平衡位置的位移作为纵坐标 y （规定质点的位移方向向上时为正值，相反的为负值）；在 xOy 坐标平面上，画出各个质点的平衡位置 x 与各个质点偏离平衡位置的位移 y 的各个点 (x, y) ，并把这些点连成曲线，就得到某一时刻的**波的图象**，如图 2-2-1 所示。它表示各个质点同一时刻的位移。

专业术语

波的图象
diagram of wave

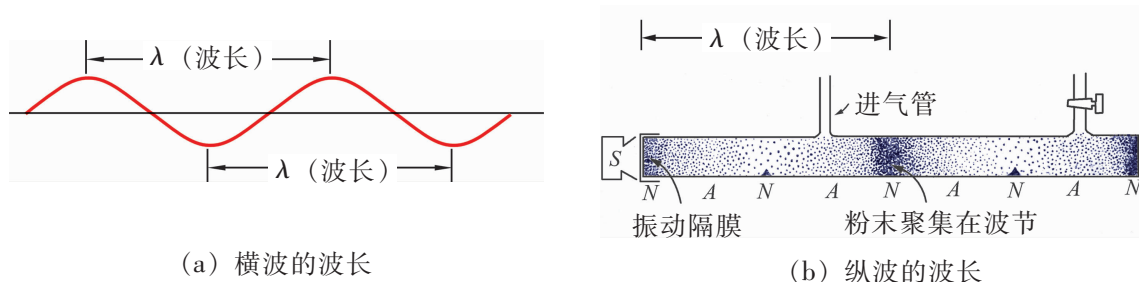
波源做简谐运动时，介质的各个质点随之做简谐运动，所形成的波就是简谐波。表示各个质点同一时刻的位移的图象是一条正弦或余弦曲线。但它与上面学过的简谐运动的 $x-t$ 曲线不同的是，前者的横坐标表示各质点与振源间的平衡位置的距离，后者的横坐标表示时间。简谐波是一种最基本、最简单的波，其他的波可以看作是由若干简谐波合成的。

专业术语

波长
wave length

描述波的特征的物理量

在波动中，对平衡位置的位移总是相同的两个相邻质点间的距离，叫做**波长**。波长通常用 λ 表示。如图 2-2-2 所示，横波的相邻波峰或相邻波谷的距离等于波长；同样，纵波的两个相邻最密部或相邻最疏部的距离等于波长。



(a) 横波的波长

(b) 纵波的波长

图 2-2-2 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 T （或频率 f ），单位分别是秒（s）和赫兹（Hz）。同样有

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

波动中振动（以波峰或波谷作为标志）在介质中的传播速度叫做波速，用 v 表示

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

由上面两式可得

$$v = \lambda f \quad (2.2.1)$$

式 (2.2.1) 表示波速等于波长和频率的乘积。

机械波在介质中的传播速度由介质的性质决定，在不同介质中，波的传播速度也不同。在给定的介质和同样的条件下，波的速度是个常量。表 2-2-1 列出了 25 °C 时声波在几种介质中的传播速度。一旦气压或温度发生变化，声音的传播速度也会发生相应的变化。例如，15 °C 时在空气中的声速为 340 m/s，比 25 °C 时的小。

表 2-2-1 25 °C 时几种介质中的声速 ($v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

空气	344	铅	1210
水	1500	玻璃	4540
铜	3100	硬木	4000
铁	5000	塑料	1800
钢	5200	砖	3650

波长、周期（或频率）、波速这三个物理量中，只要知道其中两个，则可以求出另外一个物理量。

如图 2-2-3 所示，知道在某一时刻 t 时波的图象，波以一定的波速 v 在介质中传播，经过 Δt 的时间，波的图象沿着波的传播方向移动了一段距离 $\Delta x = v\Delta t$ ，就得到时刻 $t + \Delta t$ 时波的图象。

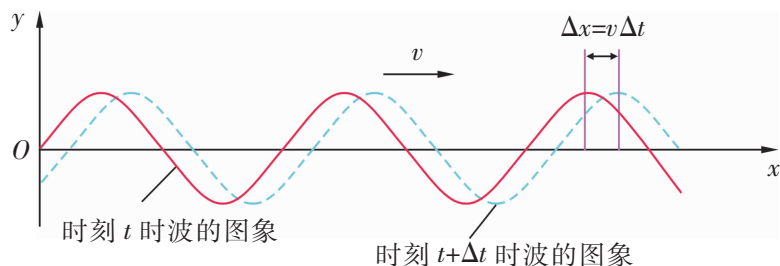


图 2-2-3 时刻 t 和时刻 $t + \Delta t$ 时波的图象

专业术语

波速

wave velocity

例：两人分别乘坐甲、乙两只小船，两船在湖面上相距 20 m. 有一列水波沿甲船到乙船的方向传播，使每只小船每分钟上下浮动 30 次. 当甲船位于波峰时，乙船刚好在波谷，此时两船间还有 2 个波峰. 问这列水波的传播速度是多少？

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

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

甲船在波峰，乙船在波谷，两船间还有 2 个波峰，即甲、乙两船相距 2.5 个波长. 则水波波长为 $\lambda = \frac{20}{2.5} \text{ m} = 8 \text{ m}$.

$$\text{波速 } v = \frac{\lambda}{T} = \frac{8}{2} \text{ m/s} = 4 \text{ m/s}.$$

答：这列水波的传播速度是 4 m/s.



讨论与交流

1. 有一列波，当它在不同的介质中传播时，什么物理量发生了变化？是不是频率 f 、波长 λ 、速度 v 都可以改变？
2. 简述振动图象和波的图象的相同点与不同点.



资料活页

声音是人体的“身份证”

时下，一项被称为声纹鉴别术的先进的身份标识查证技术备受青睐. 研究发现，一个人的嗓音，如同他的指纹一样，也是长期稳定的密码信号，从某种意义上说，声纹也是人体的一张“身份证”. 由于每个人的声音器官，如咽腔、鼻腔、口腔、唇、齿、上颌等，在发音时呈现千姿百态，哪怕是微小的差异，以及年龄、性格、语言习惯等多种原因，再加上发音容量的大小不一，发音频率不尽相同，因而导致这些器官发出的声音必然有着各自的特点.

即使是两个身高、体重都相同，并在同一环境中长大的双胞胎，他们的嗓音可能连父母也难以区别，但声纹仪器却能有效地加以甄别. 所以说，人的声纹千差万别，每个人都有自己独特的嗓音，这是一个人的基本标识之一. 换句话说，任何一个模仿者，都不可能逼真地模仿出他人嗓音的全部音色和其他要素. 利用专门仪器，可以很快区别那些“装腔作势”者.

目前已可以根据一个人的嗓音特征，大致推断出他的身高、体型、年龄等一系列个人信息，使人们对其有一个大致的了解.

也正是因为嗓音能够提供如此丰富的信息，所以目前在许多方面，声纹学已经成为一门非常有用的学问. 借助现代科学技术，仅仅需要花两秒的时间，经过反复比较，就能够从数以百万计的人群中分辨出某个特定人的声音.

因此，声纹可以为认定犯罪分子提供依据，这无疑对于电话犯罪的侦破

有着极大的帮助. 当年, 就是因为有从发案现场采集到的声纹, 才最终查获了杀害菲律宾反对党领袖阿基诺的凶手.

日本科学家研制出一种声纹测谎仪, 只要根据说话者的声音和心跳状况, 就可以测出其是否在说谎. 英国科学家发明了一种声纹锁, 把它安装在房门上, 这种锁只“记认”这家主人的声纹, 对其他的声纹一概不理睬. 设置在金融机构的验声仪, 根据嗓音资料足以判断领款人是否是账户的所有人, 其准确度非常高.

http 我们的网站

高速的波峰焊接.



练习

1. 把一张硬纸片的一端伸进自行车的辐条中间, 然后转动车轮, 就会听到纸片振动发出的声音. 加快或减慢车轮的转速, 你能听到声音有什么变化? 请说明产生这种变化的原因.

2. 一列简谐波在沿 x 轴传播, 波速为 50 m/s , 已知在 $t=0$ 时波的图象如图 2-2-4 所示, 图中 M 处的质点此时正经过平衡位置沿 y 轴的正方向运动, 则从 $t=0$ 到 $t=0.5 \text{ s}$ 这段时间内, 质点 M 通过的路程是 _____, 它的位移是 _____.

在图中画出在 $t=0.5 \text{ s}$ 时的波的图象 (至少要画出一个波长).

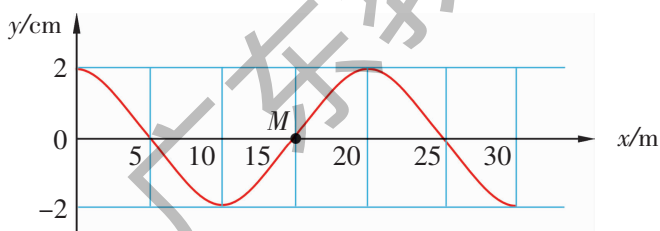


图 2-2-4

3. 空气中的声速为 340 m/s , 某人只能听到频率为 $30\sim 17000 \text{ Hz}$ 之间的声音, 他能听到的声音的最短波长和最长波长各是多少?

第三节 惠更斯原理及其应用

波在传播的过程中，当遇到不同的介质或者碰到障碍物时，波是否还会按原来的样子传播呢？如图 2-3-1 和图 2-3-2 所示，当在传播中的水波遇到障碍物和小孔时，障碍物和小孔处似乎出现了一个新的波源。这是什么原因呢？



图 2-3-1 水波遇到小障碍物

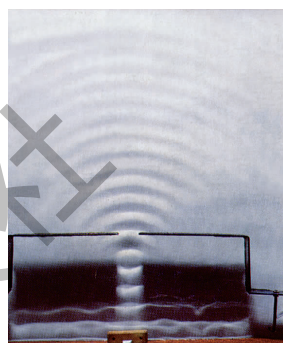


图 2-3-2 水波遇到小孔

惠更斯原理

惠更斯在研究了波动现象后，于 1690 年提出：介质中任一波阵面上的各点，都可以看作是发射子波的波源，其后任一时刻，这些子波的包迹就是新的波阵面，这就是惠更斯原理。

如图 2-3-3 所示的圆形是沿着传播方向的波峰（或波谷）在同一时刻构成的，叫做**波面**。在某一时刻，最前面的波面叫做**波前**或**波阵面**；与各个波面垂直的线叫做**波线**，用来表示波的传播方向。如图 2-3-4 所示，当一列圆形波遇到一个很小的孔时，到达小孔的波阵面上的各点可以看作是发射子波的波源。由于小孔很小，原来的波阵面被障碍物挡住，只剩这个小孔发出的新波阵面，所以小孔似乎成了一个新的波源，发出球面波。

专业术语

波面

wave surface

波前

wavefront

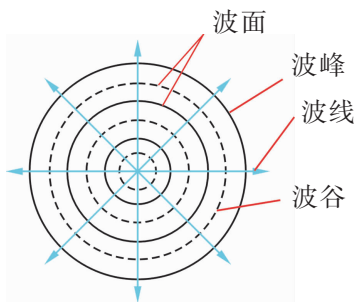


图 2-3-3 波面

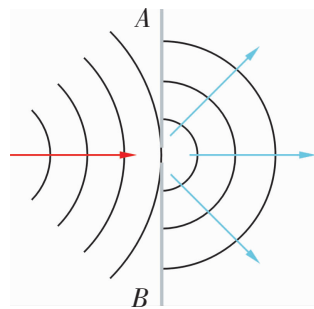


图 2-3-4 障碍物的小孔成为新波源

如图 2-3-5 所示的平面波和如图 2-3-6 所示的球面波，已知某一时刻的波阵面 S_1 ，应用惠更斯原理可以求出下一时刻的波阵面。具体方法是：以此波阵面上的各点为圆心，以 $v\Delta t$ 为半径，画出面向波的传播方向的半圆；新的波阵面是与这些半圆相切的面，即图 2-3-5 和图 2-3-6 中的 S_2 面。对于球面波，其波阵面是以波源为圆心的球面，波线是球的半径；对于平面波，其波阵面是平行平面，波阵面与波线垂直。

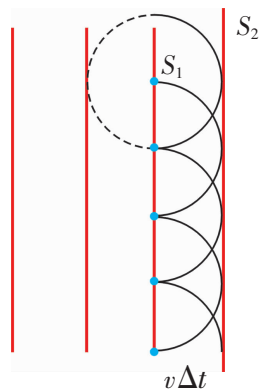


图 2-3-5 平面波的波阵面

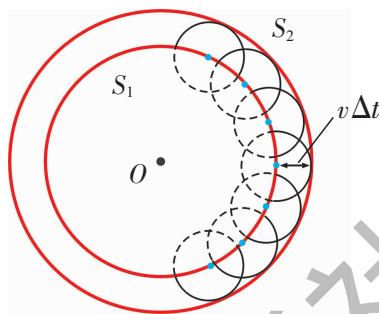


图 2-3-6 球面波的波阵面

当波动在各向同性的均匀介质中传播时，用惠更斯原理求出的波阵面的几何形状保持不变，波线也不发生弯曲而保持原来的方向。

波的反射

观察与思考

在水波槽中放置一块木板，让波源发出圆形波，观察波遇到木板后会发生什么现象。尝试用惠更斯原理解释这一现象。

研究表明，如图 2-3-7 所示，当波遇到障碍物时，会返回到原来的介质中继续传播，而且反射角等于入射角（图 2-3-8）；反射波的波长、频率和波速都与入射波的相同。这种现象叫做波的反射。

专业术语

波的反射
reflection of wave

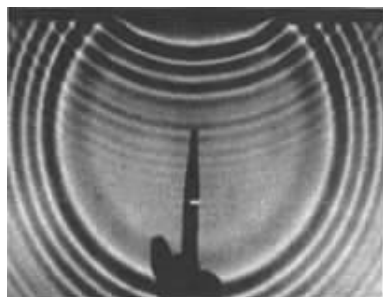


图 2-3-7 水波反射实验

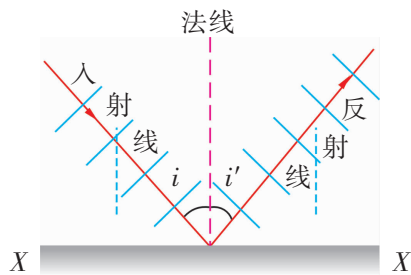


图 2-3-8 波的反射

下面我们用惠更斯原理解释波的反射.

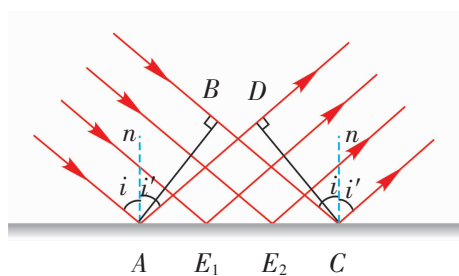


图 2-3-9 波的反射定律图示

如图 2-3-9 所示, 一列平面波入射到平面上, 入射波的波线与平面法线的夹角 i 叫做入射角, 反射波的波线与平面法线的夹角 i' 叫做反射角. 根据惠更斯原理, 这列平面波的点 A 、点 E_1 、点 E_2 、点 C 分别与界面相遇, 它们都是子波的波源, 依次发出子波, 波在相同的均匀介质中传播时, 波阵面的几何形状保持不变, 波线仍然为直线. 因为波在同一介质中传播, 波速 v 不变, 在相同时间内, 波前进的距离相等.

由图 2-3-9 可以看出, 直角三角形 BAC 和直角三角形 DCA 全等, 则 $\angle BAC = \angle DCA$, 而 $\angle BAC = i$, $\angle DCA = i'$. 所以 $i' = i$, 即反射角等于入射角. 这就是波的**反射定律**.

在日常生活中, 波的反射现象非常普遍. 除了上面提到的水波的反射外, 还有声波的反射. 夏日的雷声有时轰鸣不绝, 那是声波在云层界面多次反射造成的.

波的折射

专业术语

波的折射
refraction of wave

波传播到两种不同的可传播波的介质界面时, 除了上面提到的反射外, 会有一部分进入第二种介质中, 但波线(波的传播方向)会发生变化, 这种现象叫做**波的折射**. 在波的折射中, 波的频率不变, 波速和波长都会改变.

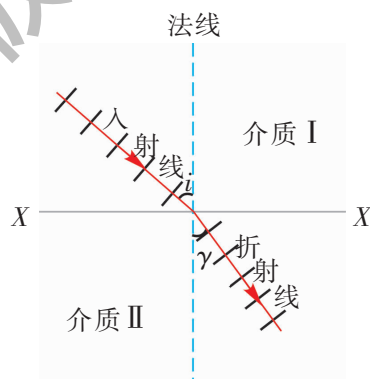


图 2-3-10 波的折射

讨论与交流

参考以上应用惠更斯原理解释反射现象, 尝试用此原理解释波的折射现象.

我们的网站

声发射检测.

练习

1. 一列机械波从甲介质进入乙介质中继续传播, 一定不发生变化的物理量是 ().
A. 波长 B. 波速 C. 频率 D. 传播方向
2. 人面对着墙壁拍手, 0.5 s 后听到对面墙壁反射回来的回声, 求人与墙壁之间的距离.
3. 频率为 1000 Hz 的声音, 由空气传入水中 (水的声速为 1450 m/s), 它的波长变化如何?

第四节 波的干涉与衍射

波的反射和折射是讨论波在传播的过程中遇到两种不同介质的界面时波的变化. 如果两列波在相同的介质中相遇, 会不会与两个小球相碰后的情况一样, 也改变了原来的方向呢? 如果波遇到与波长相近的小障碍物, 波会发生什么现象呢? 本节中我们将会解释这些问题.

波的干涉

当两列波在相同的介质中相遇时, 它们会发生什么情况呢?

观察与思考

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

(1) 将两根金属丝固定在不同的振动片上, 使生成的两列波的频率不同, 观察两列波相遇时, 是否会像两个小球相碰时的情况一样, 都改变了原来的运动状态. 相遇后, 两列波的运动状态是否受影响?

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

如图 2-4-1 所示, 两列水波相遇后, 彼此穿过, 并仍然保持各自的运动状态继续传播下去.

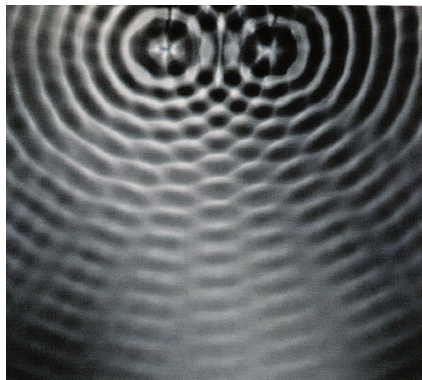
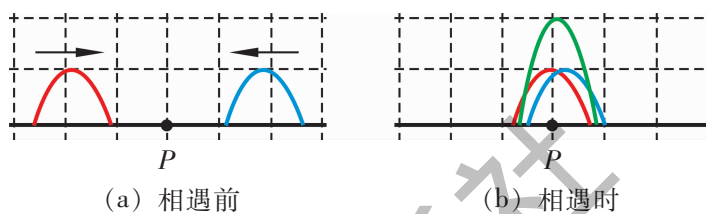


图 2-4-1 频率相同的两列波相遇

同时，对于频率相同的两列波相遇的区域，如图 2-4-1 所示，在振动着的水面上，出现了一条条从两个波源中间伸展出来的相对平静的区域和剧烈振动的区域，这两种区域在水面上的位置是固定的，而且互相隔开。

如何解释这些现象呢？

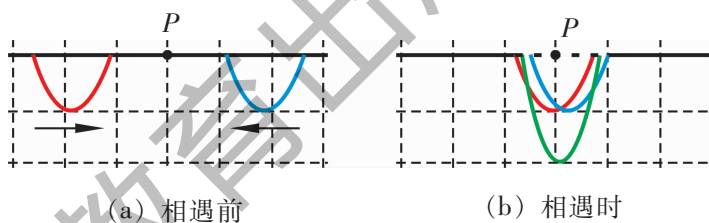
如图 2-4-2 和图 2-4-3 所示，两列频率相同的波在某一时刻，在波的振幅相同的情况下，波峰与波峰、波谷与波谷在空间 P 点相遇时 P 点的振动情况。图 2-4-4 和图 2-4-5 是频率相同的两列波在相遇前、后各自的情形。图中的红线和蓝线各表示频率相同的两列波，绿线表示相遇后的波。



(a) 相遇前

(b) 相遇时

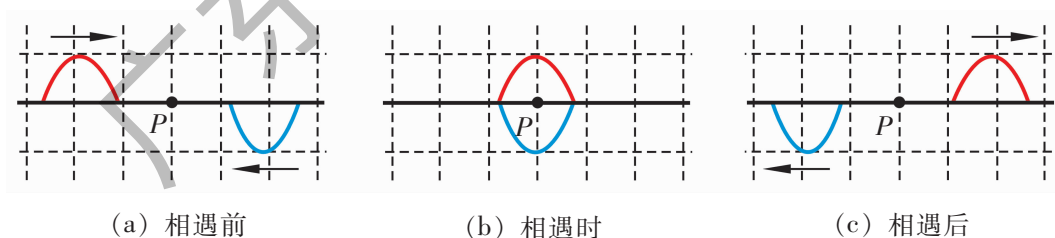
图 2-4-2 频率相同的两列波的波峰相遇



(a) 相遇前

(b) 相遇时

图 2-4-3 频率相同的两列波的波谷相遇

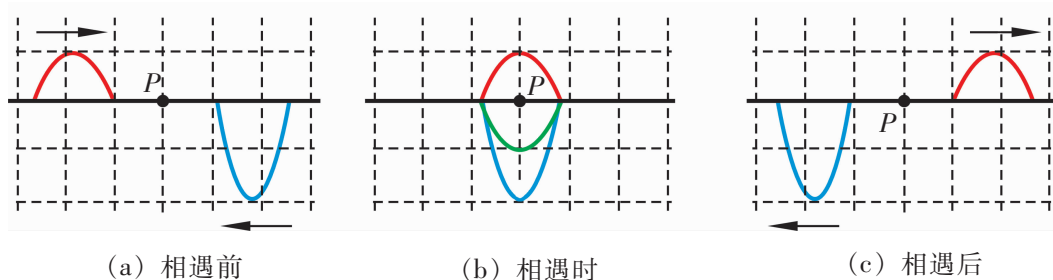


(a) 相遇前

(b) 相遇时

(c) 相遇后

图 2-4-4 频率相同的两列波，一列波的波峰与另一列波的波谷相遇前后的情况



(a) 相遇前

(b) 相遇时

(c) 相遇后

图 2-4-5 频率相同振幅不同的两列波在相遇前后的情况

频率相同的两列波相遇时引起 P 点相对于平衡位置的位移见表 2-4-1.

表 2-4-1 频率相同的两列波相遇时引起 P 点相对于平衡位置的位移

波 1 的位移	波 2 的位移	两列波相遇时的合位移
+1	+1	+2
-1	-1	-2
+1	-1	0
+1	-2	-1

如图 2-4-6 所示, 对于频率相同的两列波 (图中用两组同心圆表示从波源传播开来的波阵面, 实线表示波峰, 虚线表示波谷. 实线与虚线之间相差半个波长, 实线与实线、虚线与虚线相差一个波长), 如果在某一时刻波峰与波峰 (实线与实线) 相遇, 振动加强 (+2); 半个周期后, 两列波的波谷同时到达此点, 波谷与波谷 (虚线与虚线) 相遇, 振动同样得到加强 (-2); 再过半个周期, 又是波峰与波峰相遇, 振动得到加强. 如果第一列波的波谷和第二列波的波峰相遇, 则振动相消 (实线与虚线); 半个周期后, 第一列波的波峰到达此点, 而第二列波的波谷也到达此点, 振动同样相消, 即此点的振动始终相消.

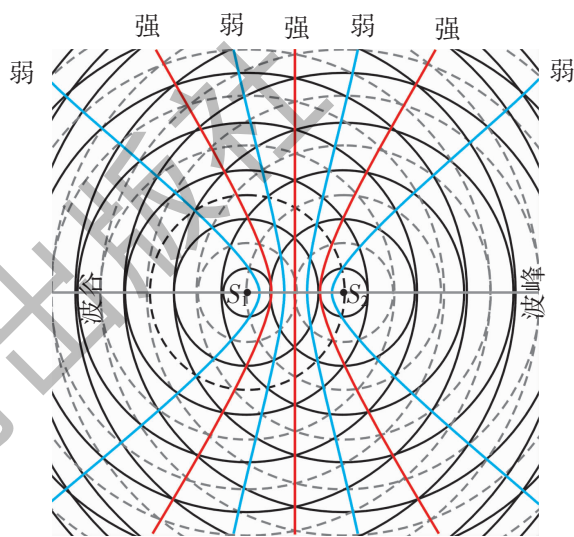


图 2-4-6 波的干涉示意图

因此, 在两列频率相同的波相遇的区域, 某些地方 (图 2-4-6 中实线与实线相交的区域和虚线与虚线相交的区域) 的振动始终加强, 某些区域 (图 2-4-6 中实线与虚线相交的区域) 的振动始终减弱, 这样的现象叫做**波的干涉**. 波产生干涉会形成一种加强和减弱相间的图样, 这样的图样叫做干涉图样.

不只是水波, 所有的波只要满足一定条件, 都能发生干涉, 干涉也是波特有的现象.

讨论与交流

结合以上的分析, 任何两列波都能产生干涉现象吗? 为什么?

研究和分析表明, 产生干涉的必要条件是两列波的频率相同.

专业术语

波的干涉
interference of wave

波的衍射

专业术语

波的衍射

diffraction of wave

如图 2-4-7 所示, 当波浪遇到狭窄的港口时, 能绕过狭窄的入口继续进入港湾. 这种波绕过障碍物继续前行的现象叫做**波的衍射**. 在什么条件下能观察到波的衍射呢?

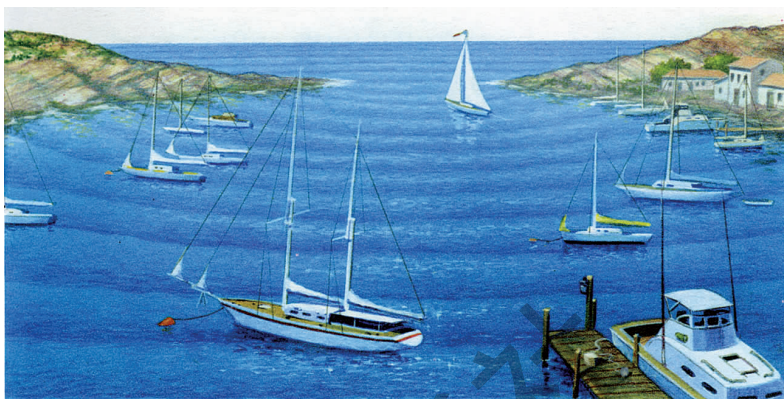


图 2-4-7 波浪从狭窄的入口进入港湾

观察与思考

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

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

实验表明, 当缝、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, 能观察到明显的衍射现象, 如图 2-4-8 和图 2-4-9 所示. 衍射也是波特有的现象.

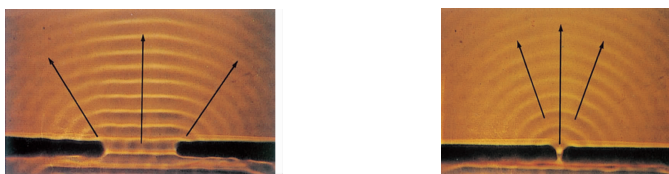


图 2-4-8 波长相同的水波通过宽度不同的窄缝

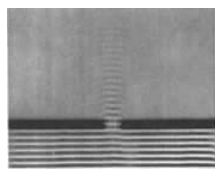
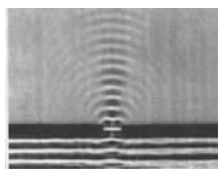
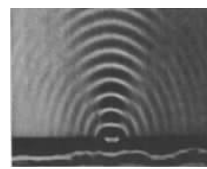
(a) 波长是窄缝宽度的 $\frac{3}{10}$ (b) 波长是窄缝宽度的 $\frac{5}{10}$ (c) 波长是窄缝宽度的 $\frac{7}{10}$

图 2-4-9 波长不同的水波通过宽度相同的窄缝

讨论与交流

1. 声波和光都能发生衍射（光也是一种波）. 为什么人们常说“先闻其声未见其人”？尝试用物理知识进行解释.（声波的波长在 1.7 cm~17 m 的范围内，光波的波长在 0.4~0.8 μm 的范围内）
2. 在图 2-4-7 中，如果港湾的开口较大，水波会发生什么变化？

实践与拓展

1. 学校操场上的两个扬声器播放着同样的音乐，人在操场上行走时，能感觉到音量的不同，这是为什么？
2. 尝试用惠更斯原理解释波的衍射现象.

资料活页

奇妙的孔脱管

振动频率相同、振动方向一致的两列波（称为相干波）在空中相遇时会发生干涉. 在波的干涉现象中，还有一种更为奇妙的干涉现象：若两列相干波的振幅相同而传播方向相反，则它们在相遇时将产生一种称为驻波的干涉现象. 正如细小的铁屑可以显示磁感线一样，用细小的软木屑也可以看到驻波，这得借助于孔脱管.

孔脱管（图 2-4-10）是一根一端封闭的小玻璃管. 将玻璃管水平放置，在管内底壁上均匀撒上一层轻细的软木屑，用一个中心插有一根铜棒的软木塞把玻璃管的开口端密封起来，这就构成了孔脱管. 取一片粘有松香的布，均匀地来回摩擦铜棒，这时铜棒就会发出“啾、啾”的尖锐响声. 不一会儿就可以看到，原来均匀撒在管底部的软木屑，有的地方增厚，有的地方变薄，变成了类似于正弦波正半周的周期性隆起.

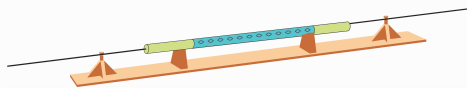


图 2-4-10 孔脱管内显示驻波

原来，在摩擦铜棒使其振动发声时，声音即通过铜棒传到玻璃管内，引起管内空气振动，形成一系列向前传播的声波. 当声波传到玻璃管的闭端时，声波被反射，形成与原来传播方向相反、但振幅相同的相干波. 这两列波在管内相遇，即形成驻波，使得木屑也按驻波方式堆集.

驻波中振动最弱的地方称为波节，振动最强的地方称为波腹. 相邻波节或波腹间的距离称为驻波的半波长. 由力学可知，孔脱管产生驻波的波长 λ 除了与孔脱管长度 L 有关外，还与摩擦的频率有关，它们的关系是

$$L = n \cdot \frac{\lambda}{2}$$

式中 n 是正整数， λ 是驻波的波长. 这就是驻波形成的条件.

 我们的网站

1. 无形的杀手——噪声.
2. 噪声与声音的“净化”和“提取”.

 练习

1. 两列波产生干涉的条件是什么？如果两列波能产生稳定的干涉，干涉图样中两相邻波峰或波谷之间的距离是多少？
2. 波产生衍射的条件是什么？试举出生活中其他衍射的例子.
3. 两列波相遇后，波的振幅会发生变化吗？波的频率呢？如果两列波的频率相同，情况又如何？在两列波相遇的区域，以上情况又如何？

广东教育出版社

第五节 多普勒效应

当警车从远处驶来时，人们会感觉到警笛的音调逐渐变高；当警车向远处驶去时，人们会感觉到警笛的音调逐渐变低。但实际上，警笛的频率并没有改变，而是由于波源和观察者之间有相对运动，使观察者感觉到频率的变化，这样的现象叫做**多普勒效应**。

专业术语

多普勒效应

Doppler effect

认识多普勒效应

下面通过实验来感受一下多普勒效应。

观察与思考

在绳子的一端系上一个蜂鸣器，用手握着绳子的另一端使其快速转动，蜂鸣器发出的音调有变化吗？为什么会出现这种现象？

当蜂鸣器随着绳子运动时，由于对于我们有相对运动，因此听起来有音调的变化。

多普勒效应的成因

讨论与交流

图 2-5-1、图 2-5-2 和图 2-5-3 是多普勒效应的原理图，尝试根据这些图分析多普勒效应的原理。

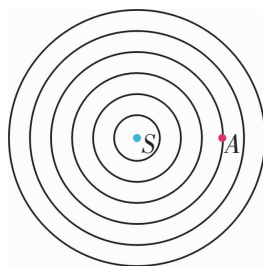


图 2-5-1 波源 S 和在 A 处的观察者都不动，设波源频率为 20 Hz ，则波源每秒发出 20 个完全波，观察者每秒接收到 20 个完全波

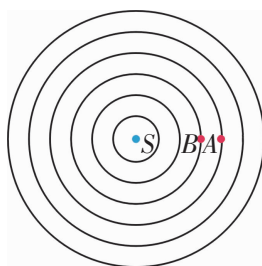


图 2-5-2 波源 S 不动，观察者运动，观察者在 1 s 内由位置 A 移至位置 B ，波源每秒发出 20 个完全波，但观察者每秒接收到 21 个完全波

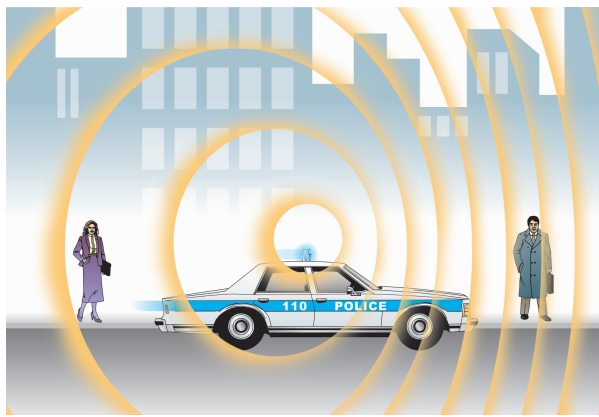


图 2-5-3 当警车从人身边高速驶过时，波源的音调改变了。如果人站在运动警车前方，人接收到的声波波长变短，音调就提高了；如果人站在运动警车后方，人接收到的声波波长变长，音调就降低了

根据大家的讨论结果，完成表 2-5-1。

表 2-5-1

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

多普勒效应的应用

在图 2-5-4 中，如果汽车超速了，接收到的频率如何变化？

多普勒效应有很多实际的应用。修理铁路的工人可以从火车的汽笛声判断火车的运行方向和快慢。交通警察向行进中的汽车发射一个已知频率的电磁波，波被运动的汽车反射回来时，接收到的频率发生变化，由此可知汽车的速度（图 2-5-4）。根据光的多普勒效应，由地球上接收到遥远天体发出的光波的频率，可以判断遥远天体相对地球的运动速度。

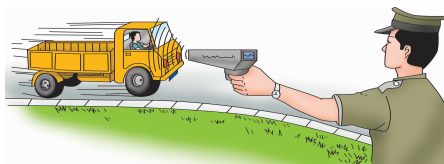


图 2-5-4 多普勒测速雷达

应用多普勒效应还可以跟踪人造地球卫星. 在图 2-5-5 中, 一旦有卫星经过跟踪站的上空, 地面接收到的讯号频率就会先增大后减小. 天文学家将来自星球的光谱与地球上相同元素的光谱进行比较, 发现星球光谱的频率几乎都变小, 这说明星体都正在远离地球向四面飞去.

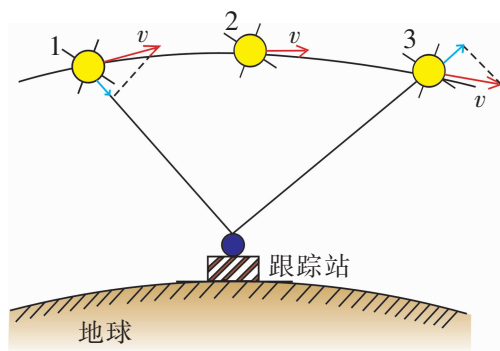


图 2-5-5 卫星跟踪站

讨论与交流

坐在警笛鸣叫的救护车上的人感受不到多普勒效应, 这是为什么?

http 我们的网站

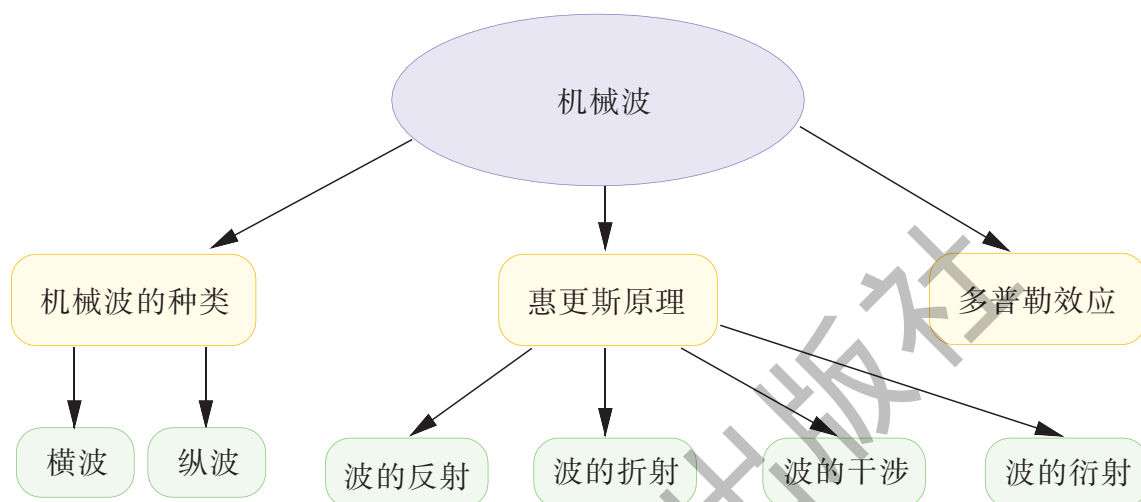
“红移”现象.

练习

1. 人造地球卫星经过跟踪站的上空, 并向远离跟踪站的方向飞去时, 为什么地面接收到的讯号频率是先增大后减小的呢?
2. 声源向观察者运动和观察者向声源运动, 都会产生音频增高的多普勒效应, 这两种情形有何区别?

本章小结

一、知识结构



二、回顾与评价

我已经掌握的内容是：_____

我最感兴趣的内容是：_____

我最有收获的是：_____

我学得最好的内容是：_____

我觉得不清楚的内容是：_____

我最难理解的内容是：_____

我最想参与的实践活动是：_____

我还想知道的问题是：_____

回顾与评价

习 题 二

1. 下面关于机械波的说法中, 正确的是 ().
 - A. 在简谐波中, 各质点的振动步调完全相同
 - B. 简谐横波向右传播时, 介质中的各个质点也向右移动
 - C. 一列简谐横波在介质中传播, 各质点的振动频率各不相同
 - D. 简谐横波向左传播时, 介质中左边质点的振动总比相邻的右边质点的振动滞后一些
2. 一列横波沿 x 轴正向传播, 某一时刻的图象如图 2-1 所示, 经过 $\frac{1}{4}$ 周期, 质点 M 将会 ().
 - A. 向上运动至最大位移处
 - B. 向下运动至最大位移处
 - C. 向左运动至原点处
 - D. 向右运动至 20 cm 处

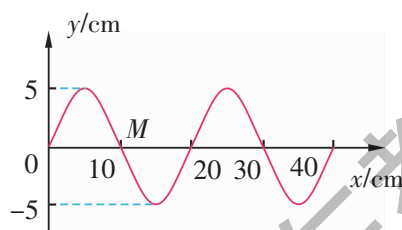


图 2-1

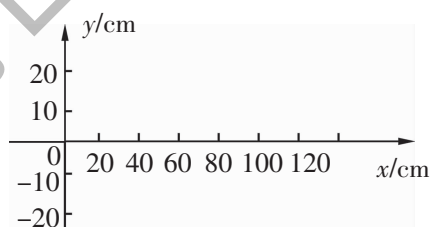


图 2-2

3. 一列横波的波长是 80 cm, 波幅是 20 cm. 它从左向右传播, 在某一时刻, 原点 O 处的质点正向上运动. 请在图 2-2 中画出此时刻这一列波的图象.
4. 一艘渔船停泊在岸边, 如果海浪的两个相邻波峰的距离是 6 m, 海浪的速度是 15 m/s, 这艘渔船摇晃的周期是多少?
5. 用手握着绳子的一端, 使绳子每秒做 2 次全振动, 产生一列横波. 这列横波从左向右传播, 当绳上某点向上运动到最大位移时, 在其右方相距 0.3 m 的质点刚好向下运动到最大位移处, 两点之间还有一个波峰. 求这列波的波长与波速.
6. 在百米赛跑中, 假如站在终点的计时员在听到起跑枪声才开始计时, 他记下的成绩有多大的误差?
7. 地震波的纵波和横波在地表附近的传播速度分别是 9.1 km/s 和 3.7 km/s. 在一次地震发生时, 某观测站记录到纵波和横波的到达时刻相差 5.0 s. 地震的震源距离这个观测站有多远?
8. 水中的声速大约是 1530 m/s, 如果一束声波从海底返回监测站的时间是 3 s, 那么此处海水的深度是多少?

9. 下列说法正确的是 ().

A. 由 $v=\lambda f$ 可得, 频率越高, 波速越大

B. 由 $\lambda=\frac{v}{f}$ 可得, 频率越高, 波长越短

C. 波从一种介质进入另一种介质, 其频率一定不变

D. 波从一种介质进入另一种介质, 其方向一定不变

10. 一声源的频率为 1080 Hz, 相对于地面以 30 m/s 的速度向右运动. 向右发射一列声波, 在其右方有一反射面相对于地面以 65 m/s 的速度向左运动. 设空气中的声速为 331 m/s. 求:

(1) 声源在空气中发出声音的波长.

(2) 反射回来的声音的频率和波长.

11. 如图 2-3 所示, 图 (a) 为某一波动在 $t=1.0$ s 时的图象, 图 (b) 为参与这一波动的点 P 处上质点的振动图象.

(1) 求这一波动的波速.

(2) 在图 (a) 中画出再经过 3.5 s 时的波形.

(3) 求再经过 3.5 s 时 P 点的路程和位移.



图 2-3

第三章

电磁振荡与电磁波

在我们的周围，除了充满空气外，还弥漫着一种神奇的物质——电磁场。

人类已经步入信息社会，我们可以通过广播、电视、互联网获取各种信息。功能越来越强大的移动电话，给我们的工作和生活带来了极大的方便。昔日神话传说中的“千里眼”、“顺风耳”，如今都一一变成了现实。所有这一切都离不开信息的载体——电磁波。

电磁波的应用已经渗透到了各个领域：飞机、导弹的导航，人造卫星、宇宙飞船与地面的联系和控制，以及全球卫星定位系统（GPS）等，都要利用电磁波。我们熟悉的微波炉、消毒碗柜、各类家用电器的遥控器等，也都有电磁波的功劳。

那么，到底什么是电磁波？它是怎样产生的呢？它有哪些性质？与机械波相比有何异同？怎样利用它来传递各种信息？它还有哪些其他的用途……学完本章内容后，自然会有答案。



第一节 电磁振荡

在第一章中，我们学习了物体在平衡位置附近往复的运动，称之为简谐运动的机械振动。那么，电学中是否也有一种类似于机械振动的现象？它是一种怎样的现象？

电磁振荡电路的演变与构成

如图 3-1-1 (a) 所示，一个电流计与一个闭合线圈连接，一条形磁铁不断地插入和拔出线圈时，电流计的指针会不断地摆动，这说明电路中产生了大小和方向都不断变化的电流。如果将电流计拿走，如图 3-1-1 (b) 所示，当条形磁铁不断地插入和拔出线圈时，电路中似乎不再有电流，但电路断开处的 A 、 B 两点间仍存在感应电动势，即 A 、 B 两点间仍存在变化的电势差。这都是我们熟悉的电磁感应现象。

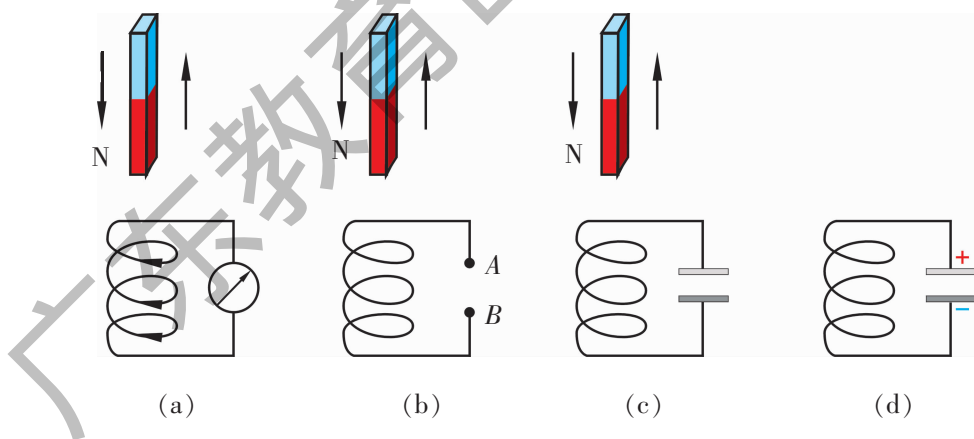


图 3-1-1 振荡电路的演变

如果在 A 、 B 两点间接一个平行板电容器，如图 3-1-1 (c) 所示，当条形磁铁不断地插入和拔出线圈时，在两板之间的空间内就会产生大小和方向不断变化的电场，即电容器在不断地进行充、放电。

那么，如果一个充满了电的电容器与线圈连接，如图 3-1-1 (d) 所示，会发生什么现象呢？

观察与思考

在图 3-1-2 所示的电路中：

(1) 先把开关扳到 a ，此时电容器正在充电，电流表指针是否会摆动？

(2) 再将开关扳到 b ，电流表指针是否会摆动？如何摆动？

电路中产生了大小和方向做周期性迅速变化的电流叫做**振荡电流**。能产生振荡电流的电路叫做振荡电路。图 3-1-3 是由自感线圈和电容器组成的最简单的振荡电路，称为 LC 回路。

那么，振荡电流是按什么规律变化的呢？

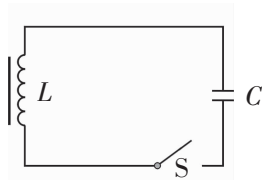


图 3-1-3 由 LC 组成的振荡电路

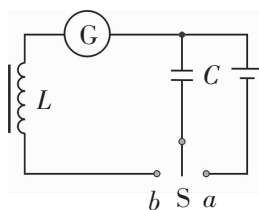


图 3-1-2 用 LC 回路观察电流的实验

专业术语

振荡电流
oscillating current

观察与思考

振荡电流的频率很高，我们可以用如图 3-1-4 所示的示波器来观察 LC 回路中振荡电流的图象。



图 3-1-4 观察振荡电流

实验表明， LC 回路里产生的振荡电流是按正弦或余弦规律变化的。

电磁振荡过程中电场能和磁场能的转化

LC 回路里，产生振荡电流的过程中，由于自感线圈的自感作用和电容器的充放电作用，线圈中的电流 i 及其对应的磁场、磁场能与电容器极板上的电荷 q 及其对应的电场、电场能在不断地相互转化，都发生了周期性的变化，这种现象叫做**电磁振荡**。

电磁振荡的过程与单摆的振动过程非常类似，如图 3-1-5 所示。

专业术语

电磁振荡
electromagnetic oscillation

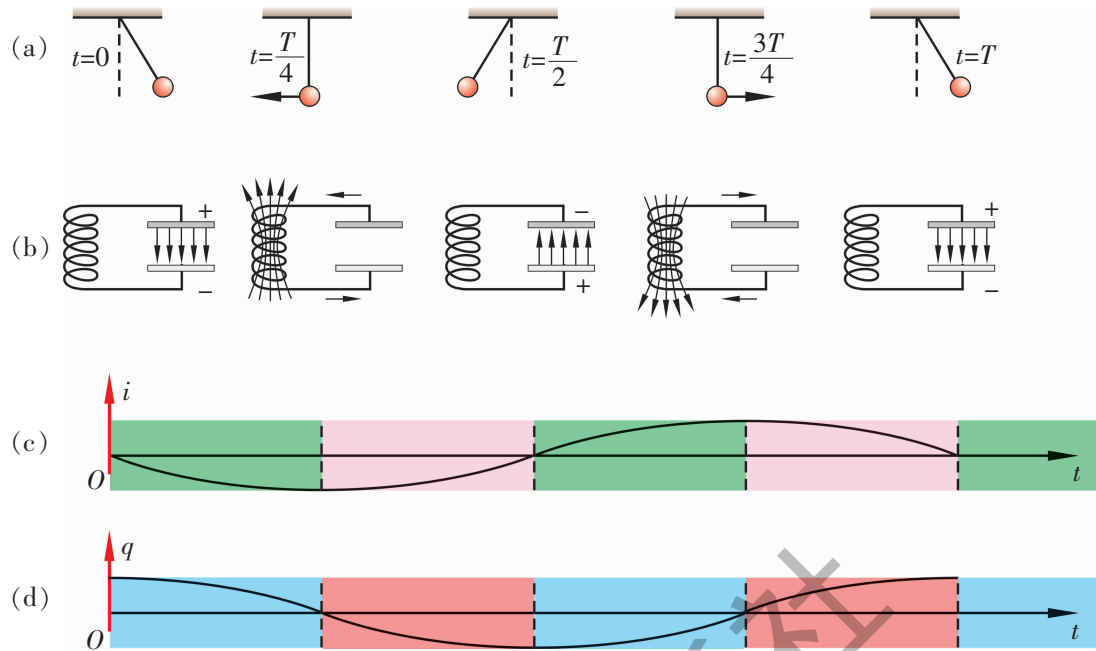


图 3-1-5 电磁振荡过程与单摆振动过程的比较

LC 回路不是纯电阻电路, 要注意克服学习欧姆定律所形成的电流与电压成正比的思维定势.

分析电磁振荡的过程, 应注意抓住两条线索: 电和磁(此长彼消)及两个过程: 充电和放电.

凡是周期性变化的事物都有描述其变化快慢的物理量——周期和频率.



讨论与交流

1. 单摆振动过程中的摆高 h 、重力势能 E_p 、摆球运动的速率 v 、动能 E_k 和电磁振荡过程中电容器极板上的带电量 q 、电场能 $E_{电}$ 、流过线圈的电流 i 、磁场能 $E_{磁}$ 是怎样的对应关系?
2. 通过类比, 说出在电磁振荡的全过程中, 电场能和磁场能是怎样转化的.

电磁振荡的周期和频率

电磁振荡完成一次周期性变化所用的时间叫做周期. 1 s 内完成周期性变化的次数叫做频率.

单摆的振动周期由系统自身的摆长和当地的重力加速度决定, 那么 LC 回路振荡的周期和频率跟哪些因素有关呢?

精确的实验表明, LC 回路的振荡周期 T 和频率 f 只跟自感系数 L 和电容 C 有关, 与其他因素无关. 它们的关系式为

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

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

根据上述公式可知, 我们可以通过改变回路中电容器的电容和线圈的自感系数来达到我们需要的振荡频率. 例如, 收音机、电视机中用于调台的调谐电路就是通过调节可变电容器的电容来改变回路的振荡周期和频率的.

 资料活页

阻尼振荡和无阻尼振荡

在电磁振荡中,假如没有能量损失,振荡应该永远持续下去,振荡电流的振幅应该永远保持不变,如图 3-1-6 所示,这种振荡叫做无阻尼振荡.

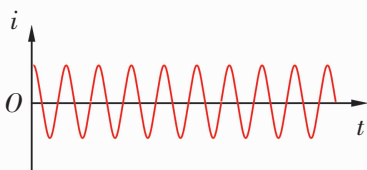


图 3-1-6 无阻尼振荡

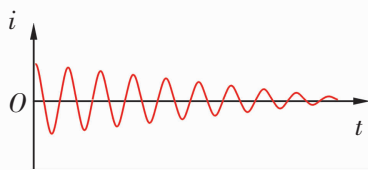


图 3-1-7 阻尼振荡

实际电路都有电阻,电流流过时都要发热而损耗电能, LC 回路中还有一部分能量以电磁波的形式损耗掉,振荡电流的振幅要逐渐减小,直到最终停止振荡为止,如图 3-1-7 所示,这种振荡叫做阻尼振荡.

实际的自由振荡都是阻尼振荡,而通常我们需要的多数是等幅振荡.等幅振荡是用振荡器产生的.振荡器适时、恰当地将电源的能量补充到振荡电路中去,使之产生持续的等幅振荡.石英电子表上的晶体振荡器就是用来产生等幅振荡的.本节实验所用到的 J2434-1 型电磁振荡演示仪就自带振荡器.

 练习

1. 结合图 3-1-5,说出在 LC 回路里产生电磁振荡的过程中,电场能和磁场能是怎样变化的?

2. 在 LC 回路里产生电磁振荡的过程中,下列说法中正确的是 ().

- A. 电容器两极板间的电压增大时,流过线圈的电流也增大
- B. 磁场能减小时,电场能增大
- C. 在放电过程中,电流增大,磁场能增强,电场能转化为磁场能
- D. 在充电过程中,电容器极板上的电荷增加,板间电场增强,磁场能转化为电场能

3. 某收音机的 LC 振荡电路由自感系数为 L 的线圈和可变电容器 C 构成.若 L 保持不变,要求 LC 振荡回路的频率范围是 $535\text{ kHz}\sim 1605\text{ kHz}$,则电容的最大值与最小值之比是 ().

- A. 3:1
- B. 1:3
- C. $\sqrt{3}:1$
- D. 9:1

4. 中央人民广播电台在某地区的发射频率为 95.8 MHz ,某车载调频收音机的 LC 回路由自感系数为 $L=2\text{ }\mu\text{H}$ 的线圈和可变电容器构成,可变电容器的最大电容是 2 pF ,电容器动片完全旋出时,电容变为 1.125 pF .这一 LC 回路能否产生 95.8 MHz 的振荡频率,从而接收到中央人民广播电台的节目?

第二节 电磁场与电磁波

振荡电路中电荷的周期性运动产生电磁振荡，电磁振荡能像机械振动那样产生波吗？

19世纪60年代，英国物理学家麦克斯韦（Maxwell，1831—1879）在总结了前人大量研究成果的基础上，经过严谨的数学论证，展开了大胆的猜想与假设，建立了具有划时代意义的电磁场理论，并且预言了电磁波的存在。

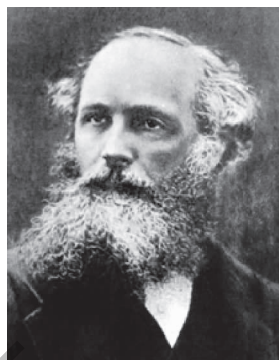


图 3-2-1 麦克斯韦

麦克斯韦电磁场理论的基本思想

在麦克斯韦建立电磁场理论之前，已有这样的实验事实：如图 3-2-2 所示，在变化的磁场中放置一个闭合电路，电路中将会产生感应电流，这就是我们熟悉的电磁感应现象。

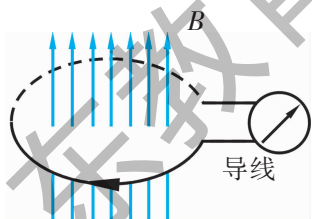


图 3-2-2 电磁感应现象

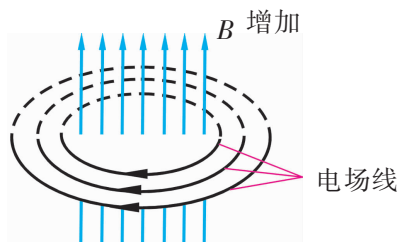


图 3-2-3 变化的磁场产生电场

通过以上现象，麦克斯韦认为：电路里产生了感应电流，是由于导体中的自由电荷受到电场力的驱使而做定向移动，说明电路所在的空间存在电场，这个电场是由变化的磁场引起的。闭合电路只起到了检验其空间所在处是否产生电场的作用，即使没有闭合电路，空间仍然存在电场。也就是说，变化的磁场周围产生电场是一种普遍存在的现象，与闭合电路是否存在无关。



讨论与交流

变化的磁场产生的电场与我们熟悉的静电场有何不同？

麦克斯韦由电现象和磁现象的诸多相似性，作出进一步猜想：既然变化的磁场能产生电场，那么变化的电场是否也能产生磁场呢？

实验事实及分析:

(1) 如图 3-2-4 (a) 所示, 静止电荷周围的小磁针不偏转. 电荷一旦运动起来, 其周围的小磁针就发生偏转, 如图 3-2-4 (b) 所示.



(a) 静止电荷周围的小磁针不偏转

(b) 运动电荷使其周围的小磁针偏转

图 3-2-4

(2) 如图 3-2-5 所示, 变化的电场 (如用手摇起电机给电容器充电时或电容器放电时电容器两极板间产生变化的电场) 周围的小磁针发生摆动.

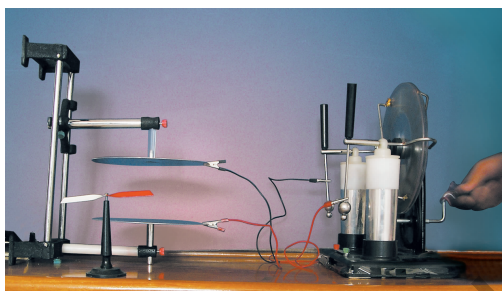


图 3-2-5 电容器充电时其附近的小磁针发生摆动

麦克斯韦认为, 在图 3-2-4 中, 静止电荷周围是稳定的电场, 不产生磁场; 而电荷运动时, 周围的小磁针摆动, 说明小磁针所在处产生了另一个磁场, 使小磁针摆动, 这个磁场是由电荷运动在周围空间产生了变化的电场引起的. 小磁针只是起检验作用, 即使不放小磁针, 运动电荷周围空间仍然产生磁场. 也就是说, 变化的电场周围产生磁场是一种普遍存在的现象.

麦克斯韦研究了大量的实验事实, 作出以下进一步推断:

①均匀变化的磁场(或电场)产生稳定的电场(或磁场).

②非均匀变化的磁场(或电场)产生变化的电场(或磁场).

③按某三角函数规律变化的振荡磁场(或电场)产生同频率的按该三角函数规律变化的振荡电场(或磁场).

讨论与交流

1. 磁现象和电现象有哪些相似之处?
2. 仿照麦克斯韦的思考, 从场的观点分析图 3-2-5 的实验事实, 可得出什么结论?

总之, 变化的磁场产生电场, 变化的电场产生磁场, 变化的电场和磁场总是相互联系的, 形成一个不可分离的统一场, 这就是**电磁场**. 电场和磁场只是这个统一的电磁场的两种具体表现.

专业术语

电磁场

electromagnetic field

电磁波的产生及其特点

麦克斯韦预言: 如果在空间某区域有周期性变化的电场, 这个变化的电场就会在周围空间产生周期性变化的磁场; 这个变化的磁场又会在较远的空间引起周期性变化的电场……这样,

专业术语

电磁波

electromagnetic wave

变化的电场和磁场并不局限于空间某个区域，而是要由近及远地向周围空间传播出去。电磁场这样由近及远的传播，就形成电磁波。

麦克斯韦进一步预言电磁波具有以下特点，如图 3-2-6 所示。

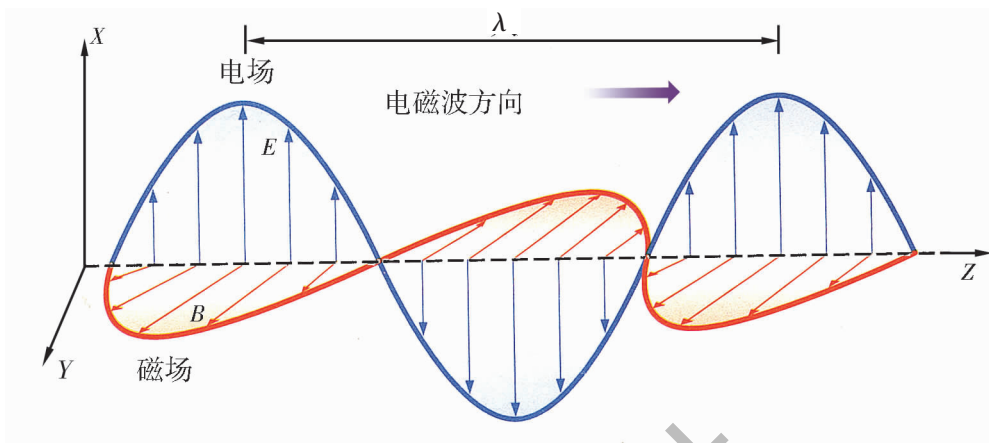


图 3-2-6 沿 z 轴传播做正弦变化的电磁波在某一时刻的图象

(1) 电磁波中电场和磁场相互垂直，电磁波在与两者均垂直的方向传播。因此，电磁波是横波。

(2) 两个相邻的波峰（或波谷）之间的距离等于电磁波的波长。电磁波在空间以一定的速度传播，经过一个周期的时间，传播一个波长的距离。即其波长 λ 、频率 f （或周期 T ）和波速 v 之间遵从波动的一般关系： $v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$ 。

(3) 电磁波的频率即为电磁振荡的频率，它由波源决定，与介质无关。电磁波在真空中的传播速度等于光在真空中的传播速度，即 $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

(4) 电磁波与机械波一样，也能产生反射、折射、干涉、衍射等现象，也是传播能量的一种形式。

(5) 电磁波传播不需要借助任何介质，在真空中也能传播。因为电磁波的传播是依靠电场和磁场的相互“激发”，而不是依靠介质的机械传递。

麦克斯韦的以上预言，后来都得到了实验验证。

讨论与交流

从电磁波的特点出发，你认为电磁场是客观存在的物质吗？

电磁场的物质性

电磁场没有固定的形状和体积，也没有静止的质量，几个电磁场可以同时占有同一空间，这些都与我们熟悉的由分子、原子组成的实物物质大不相同。电磁场到底是不是一种客观存在的物质呢？

麦克斯韦预言了电磁场能以波的形式传播——电磁波，并

指出光就是一种电磁波. 这些后来都被德国物理学家赫兹用实验证明了其正确性, 人们对电磁场的物质性有了越来越清晰的认识.

微波炉 (图 3-2-7) 就是利用电磁波来加热食物的, 这说明电磁场具有能量.



图 3-2-7 微波炉



图 3-2-8 彗星尾

俄国物理学家列别捷夫 (П.Н.Лебедев, 1866—1911) 测量出光对被照射的物体有压力, 用实验证明了由电磁场理论预言的“光压”. 在天文现象中, 彗星尾 (图 3-2-8) 就是太阳光的“光压”压迫彗星尘埃物质而形成的. 这表明电磁场具有与其他物质相互作用的属性.

后来, 科学家们还推知: 电磁场具有运动质量、能量以及与其他物质相互作用的属性, 这都是物质的性质. 可见, 电磁场也是物质存在的基本形态之一.

尽管电磁场看不见、摸不着, 但它的确是一种特殊的物质, 它既具有物质一般属性, 也具有特殊的性质.

麦克斯韦电磁场理论的意义

麦克斯韦总结了近百年来电磁学的研究成果, 他深信: 自然界是按照和谐优美的数学方式设计的, 是合理的、简单的、有序的, 并且自然界在许多方面都是对称的. 他凭着非凡的物理智慧和坚实的数学功底, 历时 15 年的深思熟虑、精雕细琢, 终于总结出饱含其伟大思想的电磁场理论, 使经典电磁学达到了前所未有的高峰. 正如普朗克所说的: 麦克斯韦的名字将永远闪耀在经典物理学的大门之上. 麦克斯韦还以其强有力的逻辑理论思维预言了电磁波的存在, 并大胆地指出: 光就是一种看得见的电磁波, 实现了电、磁、光的统一, 被认为是 19 世纪科学史上最伟大的统一.

电磁场理论的建立, 经历了“实践—理论—实践”这一科学发展的过程, 是物理学发展史上的典型案例.

麦克斯韦的电磁场理论, 实现了从经典物理学向现代物理学的重大转折.

实践与拓展

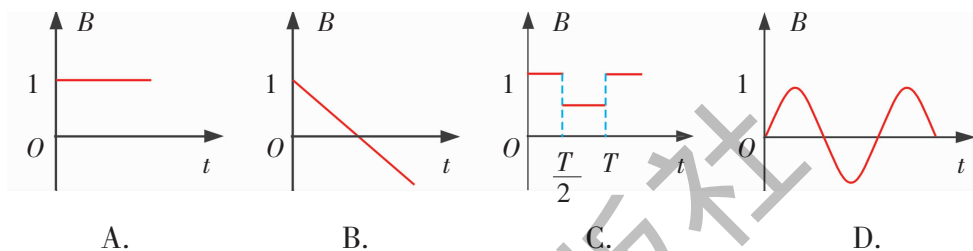
试归纳出电磁波与机械波的异同.

我们的网站

麦克斯韦的生平.

练习

1. 下列磁感应强度 B 随时间 t 变化的图象中, 能在磁场周围产生稳定电场的是 ().



2. 声波与电磁波相比较, 下列说法正确的是 ().

A. 声波是由声源产生的机械振动向远处的传播, 电磁波是由场源产生的电磁场向远处的传播

B. 声波只能在介质中传播, 电磁波可以在真空中传播

C. 由空气进入水中传播时, 声波的传播速度变大, 电磁波的传播速度变小

D. 由水中进入空气时, 声波的波长变长, 电磁波的波长变短

3. 在经典物理学发展史上, 出现过四个里程碑式的人物: 伽利略、牛顿、法拉第和麦克斯韦. 爱因斯坦认为他们同样伟大, 你如何理解? 查找相关资料, 找几个对此有兴趣的同学一起讨论.

第三节 电磁波的发射、传播和接收

1864年，麦克斯韦建立了电磁场理论，预言了电磁波的存在。当时，这个预言震动了整个物理学界。真的存在电磁波吗？有人怀疑，有人相信，更有人全身心地投入了捕捉电磁波的研究中。

1888年，德国物理学家赫兹（H.R.Hertz，1857—1894）终于在实验室里捕捉到了电磁波。

模仿赫兹实验

根据麦克斯韦的预言，只要空间某处存在非均匀变化的电场（或磁场），就可能会在周围空间激起电磁波。赫兹认为，非均匀变化的电场（或磁场）是比较容易得到的，如图3-3-1所示，两个金属小球分别与莱顿瓶的两极相连，两球间有一小段间隙，给莱顿瓶充电，让两小球带上足够多的电荷，便能产生火花放电，两小球A、B间产生了非均匀变化的电场，由此激起了电磁波。但是，怎样捕捉这个看不见、听不到、摸不着的电磁波呢？

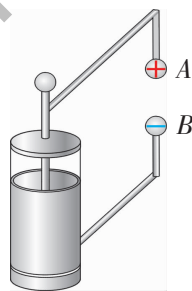


图3-3-1 两小球间放电产生电磁波

如图3-3-2所示，A、B两组装置相同，敲击A的音叉，B的音箱不敲自鸣，这是我们熟悉的声波共鸣现象。从音叉的共鸣得到启示：电磁波能否发生“共鸣”呢？

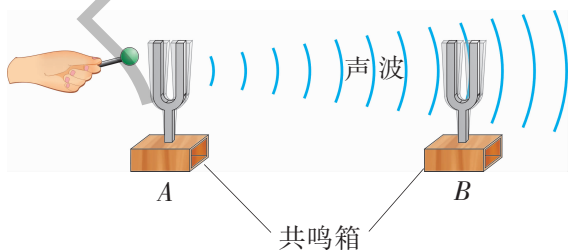


图3-3-2 音叉共鸣的启示

观察与思考

我们用如图3-3-3所示的装置来模仿赫兹实验。

有4根铜管完全相同（长约1m），将其中两根接在高压感应圈的两极，组成发射器。感应圈的高压能使两管间不断产生电火花。在另外两根铜管之间接一发光二极管，组成接收器。观察其现象。

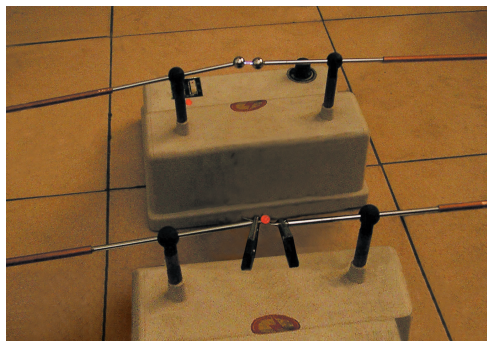


图3-3-3 模仿赫兹实验的装置

专业术语

无线电波
radio wave

- (1) 接收器上的发光二极管在什么情况下才会亮?
- (2) 接收器处于不同位置, 发光二极管的亮度如何变化?

赫兹的电火花又一次引起了物理学界的震动.

1894年, 意大利的马可尼、俄国的波波夫分别发明了无线电报, 揭开了无线电通信的新篇章.

在无线电技术中使用的电磁波叫做**无线电波**.

电磁波的发射

LC 振荡电路能产生振荡电场和磁场, 但能否有效地发射电磁波呢? 在电磁振荡过程中, 电场能 (主要集中在电容器内) 和磁场能 (主要集中在线圈内) 大都是在电路内相互转化, 辐射出去的能量是很少的. 怎样才能有效地发射电磁波呢?

研究表明, 要有效地发射电磁波, 振荡电路必须具备以下两个条件:

(1) 要有足够高的振荡频率. 频率越高, 发射电磁波的本领越大. 单位时间内辐射出去的电磁波的能量与振荡频率的四次方成正比.

(2) 要使振荡电路的电场和磁场分散到尽可能大的空间.

为了满足以上两个条件, 应将如图 3-3-4 (a) 所示的 LC 振荡电路, 按如图 3-3-4 (b)、(c)、(d) 所示进行改造.

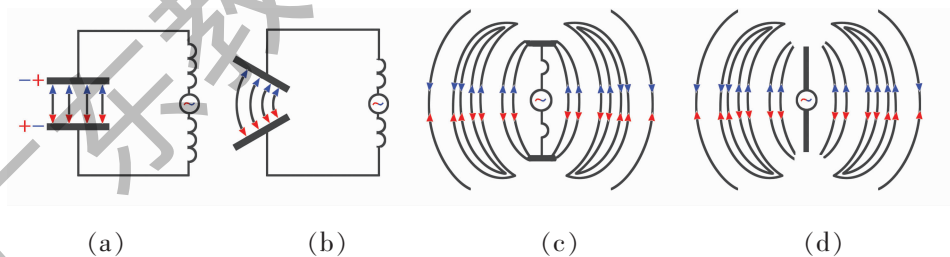


图 3-3-4 开放电路

 讨论与交流

进行如图 3-3-4 所示的电路改造对有效发射电磁波有什么好处?

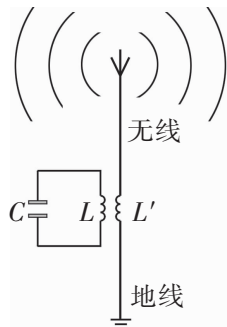


图 3-3-5 无线电波的发射

实际发射无线电波可以用感应耦合开放电路, 如图 3-3-5 所示. 天线被安装在高大的发射塔上, 发射塔越高, 向外发射电磁波的本领越强.

在无线电通信中, 电磁波是用来传输信号的. 例如, 无线电报传递的是电码符号, 无线电广播传递的是声音, 无线电传真传递的是图片或文字, 电视传递的不仅有声音还有图像. 这就要求发射出去的电磁波随传输信号的变化而改变. 所以, 在发射电

磁波前，应将需要传输的信息转换成电信号“加载”在高频振荡电流上，这个过程叫做调制。

调制的方式有两种：调幅（AM）和调频（FM），如图 3-3-6 所示。其中图（c）为调幅信号：振幅随低频传输信号的变化而变化；图（d）为调频信号：频率随低频传输信号的变化而变化。

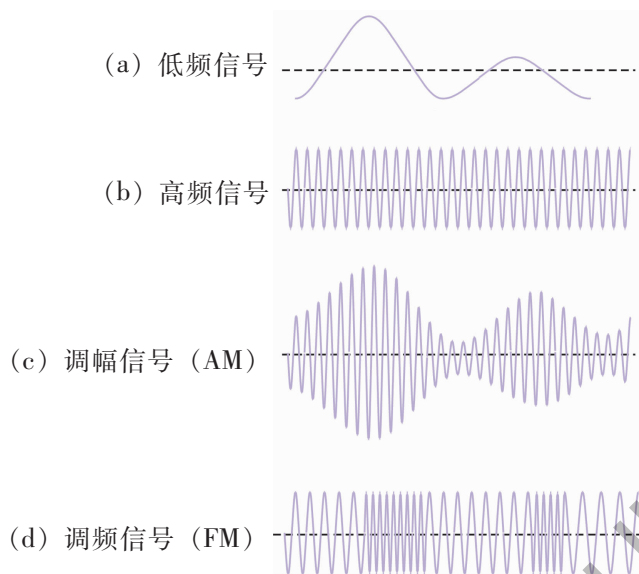


图 3-3-6 调制方式

电磁波的传播

无线电波的波长范围是 1 mm~30 km. 通常根据波长或频率，可以把无线电波分为几个波段。不同波段的无线电波，其传播方式和主要用途也不同，如表 3-3-1 所示。

表 3-3-1 不同波段电磁波传播的方式及其应用

波 段	波长 λ/m	频率 f/kHz	传播方式	主要用途	
长波	30 000~3000	10~100	地波	超远程无线电通信和导航	
中波	3000~200	100~1500	地波和天波	调幅（AM）无线广播、电报、通信	
中短波	200~50	1500~6000			
短波	50~10	6000~30 000	天波		
微波	米波（VHF）	10~1	30 000~300 000	近似直线传播	调频（FM）无线电广播、电视、导航
	分米波（UHF）	1~0.1	300 000~3 000 000	直线传播	电视、雷达、导航
	厘米波	0.1~0.01	3 000 000~30 000 000		
	毫米波	0.01~0.001	30 000 000~300 000 000		

无线电波的传播方式有三种：天波、地波和直线传播，如图 3-3-7 所示。

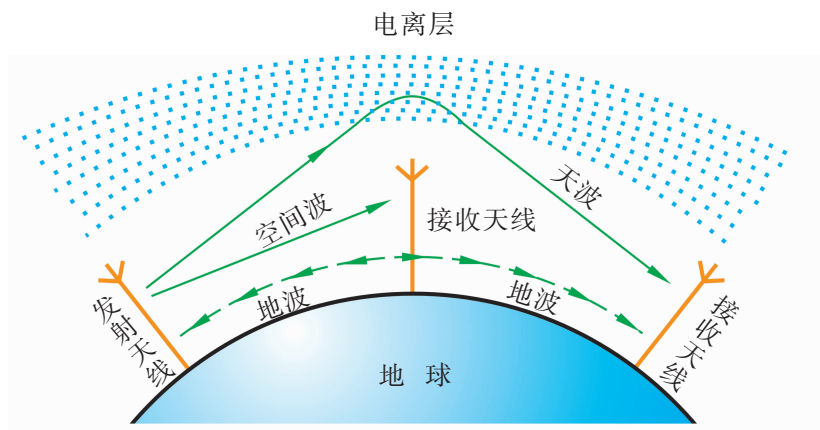


图 3-3-7 电磁波的传播方式

利用大气中的电离层的反射来传播无线电波的方式叫做**天波传播**。无线电波的波长越长，越不容易穿透电离层，也即越容易被电离层反射，但同时也越容易被电离层吸收。

沿地球表面传播无线电波的方式叫做**地波传播**。无线电波的波长越长，越容易绕过地面的障碍物。

沿直线传播无线电波的方式叫做**直线传播**，又叫做空间波。由于地球是一个近似的球体，无线电波沿直线传播的距离一般只有几十千米，需要设立许多中继站，不断地接收、放大、再传到下一站，就像接力赛跑一样，一站一站地把信号传送到远方。

如今我们有了同步通信卫星，它是一个很好的中继站。把无线电信号先传给通信卫星，然后由通信卫星把信号转发回地面，能大大地增加信号的覆盖面积。一般只要合理设置三颗同步通信卫星，其信号就几乎可以覆盖全球，如图 3-3-8 所示。

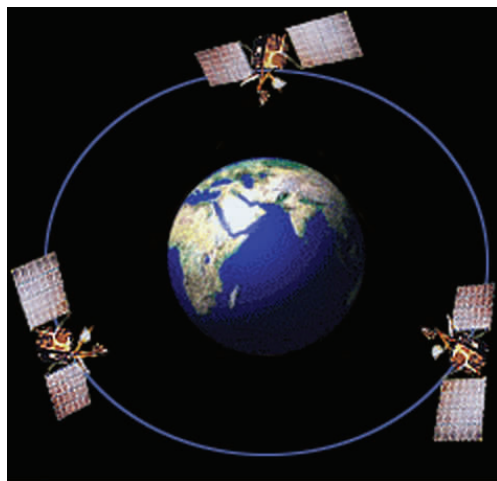


图 3-3-8 三颗同步通信卫星可覆盖全球



讨论与交流

微波为什么要采用直线传播的方式？

无线电波的接收

在空间传播的电磁波如果遇到导体，就会在导体中产生微弱的感应电流，感应电流的频率跟激起它的电磁波的频率相同。因此，我们可以用导体制成的天线和地线组成的接收电路来接收电磁波。

在我们周围的空间弥漫着许多不同频率的电磁波，从中把需要的选出来，就叫做**选台**。怎样选呢？我们可以从机械振动中的共振现象得到启示：当接收电路的固有频率被调到与需要接收的电磁波的频率相同时，这个频率的电磁波就在接收电路里激起最强的振荡电流，这个过程叫做**调谐**。能够调谐的接收电路叫做调谐电路，如图 3-3-9 所示是收音机的调谐电路。

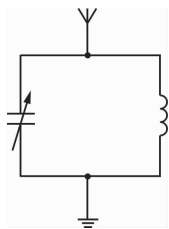


图 3-3-9 收音机调谐电路

至此，我们得到的只是经过调制的高频振荡电流，还必须设法从中取出我们需要的低频信号电流。从高频振荡电流中“检”出它所携带的低频信号电流的过程叫做**检波**。检波是调制的逆过程，所以又叫**解调**。检波之后的信号再经过放大、重现，就可以还原成声音、文字、图片或图像了。

实践与拓展

1. 自制并演示电磁波发射与接收的简易装置。
2. 有条件的学校可以组织参观当地的广播电视发射台。

资料活页

赫兹与无线电报的发明

海因利希·赫兹是德国著名的物理学家、电磁波的发现者、现代通信技术的奠基人。

20岁时，赫兹考入慕尼黑大学，第二年，他又转到柏林大学专攻物理学，成为著名物理学家赫尔姆霍茨的学生。在一次物理竞赛中，一道“如何用实验验证麦克斯韦电磁场理论的正确性”的竞赛题难住了所有的参赛者。从此，赫兹对麦克斯韦的理论产生了浓厚的兴趣，并下决心攻克它。

赫兹很快领悟了麦克斯韦高深理论的精髓，他发现：发射电磁波并不难，难的是用什么装置接收它。他从音叉共振实验得到启发，敏感地意识到电学中也许存在类似的“电谐振”，这样就有办法捕捉到电磁波。

1888年的一天，赫兹在实验室里用简单的电波环终于捕捉到了电磁波。人们期待了二十多年的电磁波终于被找到了！整个物理学界不由得为之惊叹。

赫兹的卓越实验，为麦克斯韦的理论添上了至关重要的一笔，其后迅速发展起来的无线电通信技术，则是直接受惠于赫兹无与伦比的实验。遗憾的是，年仅37岁的赫兹被病魔无情地夺去了生命。

赫兹去世后的第二天，在意大利帕多瓦大学门口张贴的赫兹的讣告前，一个小伙子两眼直瞪讣告，陷入了沉思，久久不肯离去。他就是后来因为发明无线电报而获得诺贝尔物理学奖的意大利物理学家马可尼。

马可尼想，对死者最好的纪念莫过于继承他的事业，发扬他的成果，造福人类。他决心让“死”波变“活”，用电磁波来传递信息，传递人们的意志。

马可尼开始广泛收集资料，又在他父亲的别墅里架天线、埋地线，白天试，晚上调。他改进了检波器、发报机和收报机，后来将发报机安装在 2.7 km 以外的一座小山上，当他的小伙伴按下小山上的发报机按钮时，守候在小阁楼收报机旁边的马可尼立即听到了一阵悦耳的电铃声，他兴奋极了，不顾一切地冲出家门，放声高呼：“我成功了！”

1896 年，马可尼取得了无线电报的发明专利权。

几乎就在同时，俄国物理学家波波夫也成功地研制出无线电收、发报装置。

1896 年 3 月，波波夫在 250 m 的距离内发射了第一份无线电报，并由接收机上的一个莫尔斯记录器记录了下来，电文是：“海因利希·赫兹”。波波夫以最好的形式纪念了这位电磁波的发现者。

无线电报的发明，揭开了现代无线电通信的新篇章。

练习

1. 一台简单的收音机，除接收天线和扬声器外，至少必备的是 ()。
 - A. 开放电路
 - B. 调谐电路
 - C. 调制电路
 - D. 检波电路
2. 无线电波有几种传播方式？各适用于什么波段？为什么？
3. 找一台收音机，看看上面有几个波段，记录下每个波段对应的频率范围，再算出对应的波长范围。
4. 某无线电广播的中波波段波长限定在 300~3000 m 的范围内。为了避免邻近电台的干扰，两个电台的频率范围至少应相差 10^4 Hz，则此波段中最多能容纳的电台数约为多少个？

第四节 电磁波谱

无线电波是电磁波，那么，我们熟悉的光也是电磁波吗？电磁波家族中还有其他成员吗？

光是电磁波

17世纪中叶，荷兰物理学家惠更斯提出了光的波动说，认为光是空间传播的一种波。19世纪初，光的干涉、衍射、偏振现象相继被发现，证明光是一种波。但始终有个问题无法解决，就是光的传播介质问题，因为机械波必须通过介质才能传播，而光却能在真空中传播。

19世纪60年代，麦克斯韦预言了电磁波的存在，并且发现，从理论上推算出电磁波在真空中的传播速度和当时用实验测得的光速非常接近。麦克斯韦并不认为这是一种巧合，他敏锐地意识到光和电磁波之间有着本质的联系，于是提出了**光的电磁说**，认为光是一种电磁波。这样就可以很好地解释光的传播介质问题，因为电磁波是靠电场和磁场的相互“激发”向外传播的，并不需要借助介质，在真空中也能传播。

1886—1888年间，赫兹做了大量的实验，不仅证实了电磁波的存在，而且证实了电磁波像光一样也能发生反射、折射、干涉、衍射等现象，并测出了电磁波的频率和波长，从而算出了电磁波的传播速度，验证了真空中电磁波的传播速度确实与光速相同。这都为光的电磁说提供了有力的证据。

光的电磁说使光的波动理论发展到了相当完美的地步，取得了巨大的成功。至此，人们已经清晰地认识到，光就是一种看得见的电磁波。

讨论与交流

从哪些现象可以说明光是电磁波而不是机械波？

电磁波谱

电磁波是一个庞大的家族。下面让我们一起来认识无线电波以外的其他电磁波。

能够引起人的视觉的光只在一个很窄的波段内，通常叫做可见光，它的波长范围约为440~770 nm。不同频率（或波长）的可见光颜色不同，频率最高（波长最短）的是紫光，频率最

低（波长最长）的是红光. 比红光波长还长的光不能引起人的视觉, 叫做**红外线**. 比紫光频率还高的光也不能引起人的视觉, 叫做**紫外线**. 比紫外线频率还高的电磁波依次有伦琴射线（ X 射线）和 γ 射线.

1800年, 由英国物理学家赫歇耳（F. W. Herschel, 1738—1822）发现的**红外线**, 它的波长范围约为 $770\sim 10^6$ nm. 红外线的频率比可见光更接近固体物质分子振动的固有频率, 更容易引起分子的共振, 所以有明显的热效应, 可以用来加热物体、烘干油漆和谷物. 烤制食品的远红外线烤箱利用的就是红外线的热效应.

一切物体都在不断地向外辐射红外线, 不同的物体或物体的温度不同时, 向外辐射的红外线强度和频率都不同. 利用灵敏的红外线探测器接收物体发出的红外线, 然后用电子仪器对接收到的信号进行处理, 就可以探明被探物体的特征. 这种技术叫做红外线遥感. 红外线的波长比可见光更长, 其衍射现象更明显, 更容易透过云雾、烟尘, 因此, 可实现全天候红外线遥感和红外线高空摄影（图 3-4-1）. 军事上用的红外线夜视装置可实现全天候作战.



图 3-4-1 红外线高空摄影地球图



图 3-4-2 红外线遥控器

红外线还用于遥控技术, 各种家用电器的遥控器（图 3-4-2）都是利用红外线脉冲信号来实现各种操作的.

1801年, 由德国物理学家里特（J. M. Ritter, 1776—1810）发现的**紫外线**, 它的波长范围约为 $5\sim 400$ nm. 紫外线有较强的荧光效应, 荧光物质受到紫外线照射时能发出可见光. 我们常用的日光灯和农业上消灭害虫的黑光灯, 都是通过紫外线激发荧光物质发光的. 紫外线验钞机则是利用紫外线照射印刷在大额钞票上的荧光文字, 发出可见光, 使这些文字能被肉眼看到. 紫外线有明显的化学作用, 被普遍用于杀菌、消毒. 紫外线还能促使人体合成维生素 D, 这种维生素有助于人体对钙的吸收, 防止佝偻病.

1895年，由德国物理学家伦琴（W. K. Rontgen，1845—1923）发现的伦琴射线又叫做 **X 射线**，X 射线得到了广泛的应用，为此，伦琴在 1905 年获得第一届诺贝尔物理奖。

X 射线的穿透能力很强，能使包在黑纸里的照相底片感光，并且，X 射线穿透物质的本领跟被穿透物质的密度有关，这种特性在工业上可以用来检测部件内部有没有砂眼、裂纹或气孔；在医学上可以用来透视人体，检查体内的病灶及骨骼情况（图 3-4-3）。



图 3-4-3 手的 X 射线透视片

产生 X 射线的装置称为 X 射线管。它的阴极灯丝通电后能发出热电子，管内被抽成真空。如果在阴、阳极之间接上几万伏的高压电源，两极间就产生很强的电场，使从阴极发出的热电子以很高的速率射向阳极，激发阳极发出很强的 X 射线。

γ 射线是从放射性元素的原子核中放射出来的，它的穿透本领极强，能穿过几厘米厚的铅板。γ 射线的相关知识和应用将在以后介绍。

无线电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线、γ 射线都是电磁波，将它们按波长或频率排列起来，就构成了范围非常广阔的**电磁波谱**（图 3-4-4）。

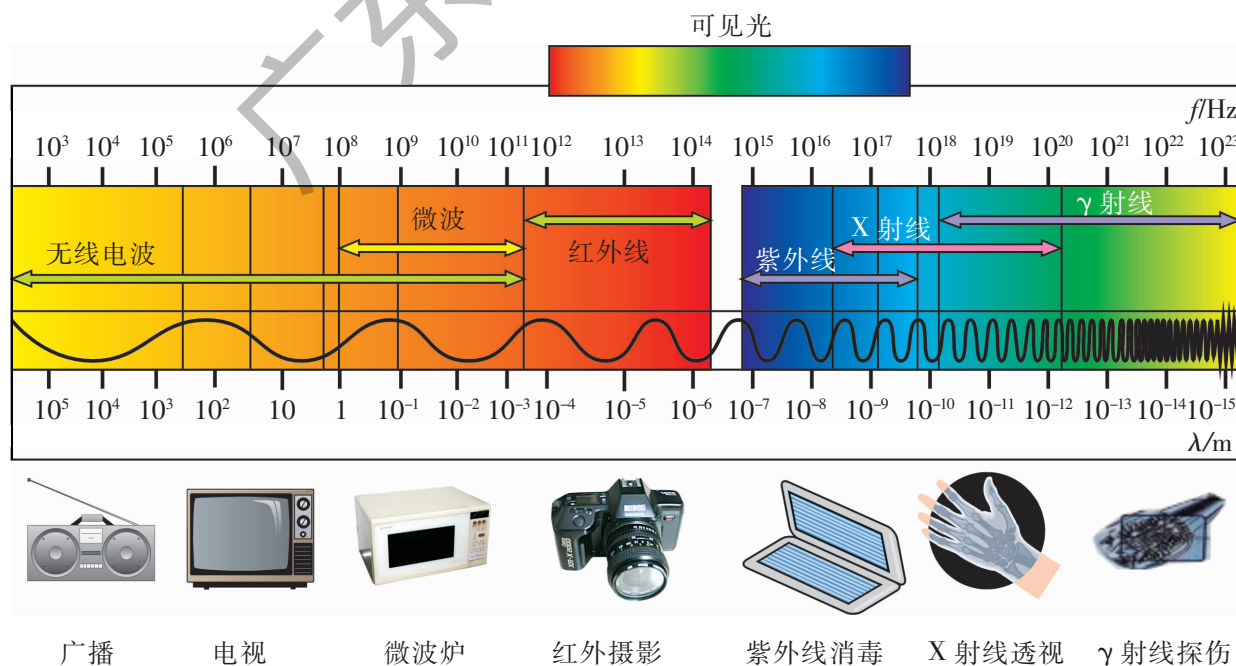


图 3-4-4 电磁波谱及应用

电磁波家族中各个成员之间既有统一性，又表现出多样性。它们都是本质上相同的电磁波，都具有电磁波的一切性质；但它们的频率和波长各异，最高的和最低的频率相差 10^{24} 倍。频率低的无线电波由于波长长，容易发生干涉和衍射现象，而频率高的 X 射线、 γ 射线，虽然也能观察到干涉、衍射现象，但相当困难。

不同的电磁波，产生机理也表现出多样性。无线电波是自由电子振荡产生的；红外线、可见光、紫外线是原子的外层电子受到激发后产生的；X 射线是原子的内层电子受到激发后产生的； γ 射线是原子核受到激发后产生的。

讨论与交流

在电磁波谱中，能引起人视觉的只是波长为 $400\sim 770\text{ nm}$ 这一很窄的部分。有趣的是，太阳辐射的各种波长的电磁波中，也是这部分最强，你如何理解这种“巧合”？（提示：从生物进化的角度考虑）

实践与拓展

结合本节的知识，再通过查阅资料或调查，试将电磁波谱中各成员的产生、主要特征和应用实例总结、归纳成一个表。

资料活页

电磁波对人体的危害

电磁波为人类物质文明的发展和社会进步作出了巨大的贡献，也给我们的生活带来了极大的方便和无穷的乐趣。


随着电磁波应用的日益广泛，它对人体的危害也被人们逐渐认识。电磁波无色、无味、无影、无踪，无所不在，对人体产生着潜移默化的危害却常常被人们忽视，因此它被科学家们称为“隐形杀手”。也有专家称，电磁波污染是继大气污染、水污染、噪音污染之后的第四大污染。

科学研究表明，电磁波对人体的危害随着电磁辐射强度、频率及累积时间的增大而增大。长期处在强电磁波充斥的环境中，人会出现头晕、头痛、记忆力减退、嗜睡、乏力等症状。强电磁辐射对人体的心血管系统、中枢神经系统、视觉系统、内分泌系统、生殖系统都会造成不同程度的危害。

较强的红外线会对皮肤造成高温伤害。波长为 $770\sim 1300\text{ nm}$ 的红外线可造成眼底视网膜的伤害；波长在 1900 nm 以上的红外线会造成角膜烧伤；人眼若长期暴露在红外线下，可能会导致白内障。

紫外线也会对人的眼角膜和皮肤造成伤害。

X 射线会破坏细胞的内部结构，过强的 X 射线甚至会破坏 DNA，诱发某些癌细胞。



我们身边的电磁辐射主要来源于：计算机、移动电话、电视机、空调机、电冰箱、微波炉、电热毯、高压电线、X射线发生器、激光发射器等。

电磁波对人体的危害，我们既不能掉以轻心，也无须过度恐慌，而是应该尽量避免一些不必要的电磁辐射对自己的伤害。



练习

1. 将各种电磁波频率按由高到低的顺序排列出电磁波谱。
2. 说出电磁波谱中各波段的典型应用实例。
3. 响尾蛇能感知红外线，它能在夜里“看见”东西吗？为什么？“响尾蛇”导弹是一种被动制导（导弹本身不发射电磁波，靠接受目标的电磁辐射来制导）的空对空导弹，是靠探测敌方飞机发动机辐射的红外线来攻击目标的。“隐形”飞机能躲过一般的雷达，它能躲过“响尾蛇”导弹吗？

广东教育出版社

第五节 电磁波的应用

电磁波在通信、遥感、空间探测、工农业生产、国防、科学研究及日常生活中都得到了广泛的应用。

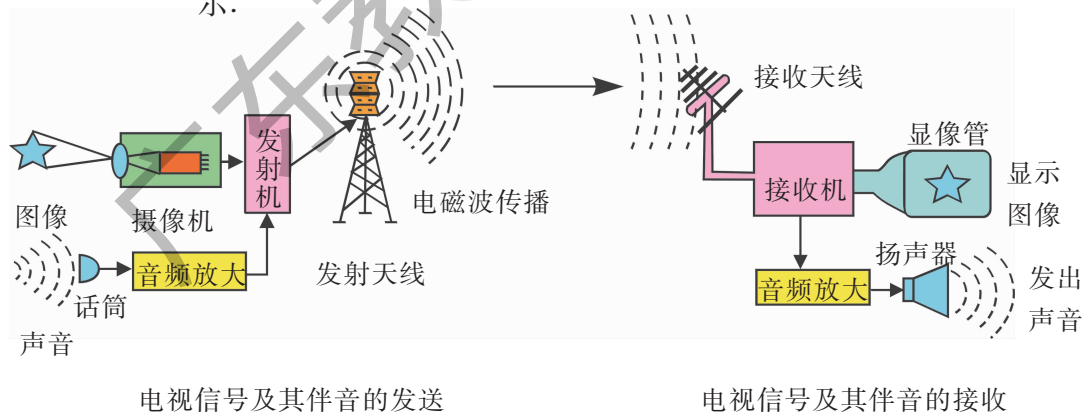
进入 20 世纪，无线电通信事业得到了迅猛发展，相继出现了无线电广播、雷达、无线电传真机、电视、无线电寻呼机、移动电话。1957 年，第一颗人造卫星发射成功，人类开始步入卫星通信的新时代。

无线电广播与电视

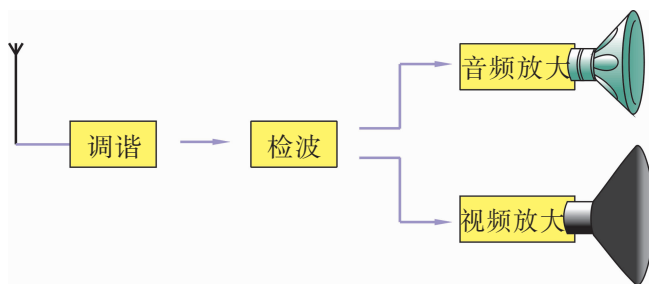
从赫兹用实验证实电磁波的存在后，电磁波很快就应用在远距离无线电通信上。1906 年，美国做了一次试验性的广播。以后无线电广播就逐渐进入千家万户。

1932 年，英国广播公司播出了世界上第一个规范的电视节目，从此，人类开始步入了电视时代。

电视系统的原理与广播系统的原理基本相同，它们主要由发射系统和接收系统组成，电视系统有图像和声音两部分，而广播系统则只有声音部分。电视系统及接收流程图如图 3-5-1 所示。



(a) 电视图像和声音信号的形成、发射与接收、重现



(b) 电视接收系统流程图

图 3-5-1

移动通信

移动通信是指通信双方至少有一方可以自由移动进行信息交换的通信方式。

移动通信以其特有的灵活、便捷的优点符合现代社会人们对通信技术的要求，成为 20 世纪 80 年代中期以来发展最为迅速的通信方式。目前，我国拥有移动用户达 7.76 亿，已成为拥有移动用户最多的国家。

移动通信的工作模式如图 3-5-2 所示。

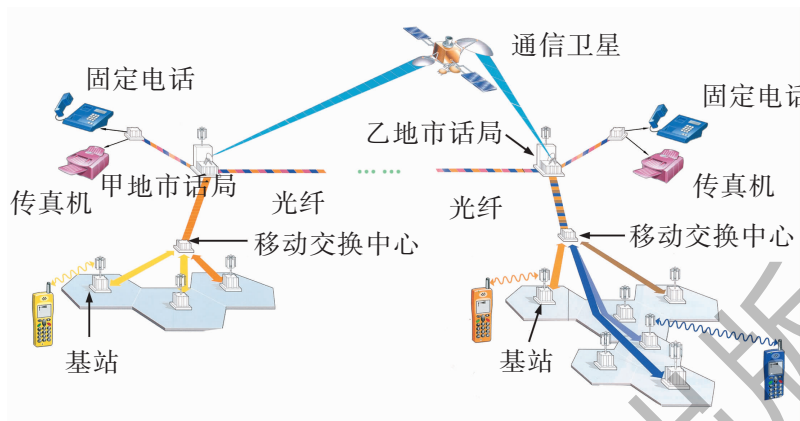


图 3-5-2 移动通信的工作模式

移动通信系统是一个有线与无线相结合的综合通信系统。以甲市移动用户 A 与乙市移动用户 B 进行移动通信为例，其信号流程图如图 3-5-3 所示。

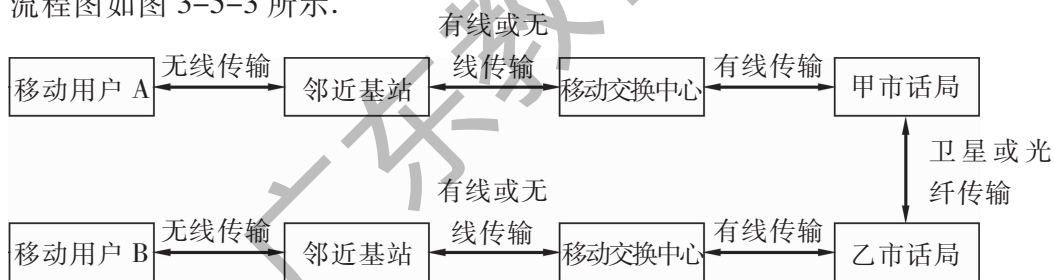


图 3-5-3 移动通信信号流程图

电磁波与科技、经济、社会发展的关系

麦克斯韦的伟大预言和赫兹神奇的电火花开创了人类文明的新纪元。从此，人类的文明进程和社会发展就与电磁波息息相关。

相继出现的无线电报、广播、传真、电视、移动通信、卫星通信、互联网，将人类推进了信息时代。

电磁波的应用和相关技术的发展加速了产品的更新换代，带动了经济的快速发展，同时也推动了人们生活方式的变革。我们每天都遨游在电磁波的海洋中，尽情地享受着它给人类带来的巨大物质文明和精神财富。

 讨论与交流

1. 除了本章所介绍的电磁波的应用，电磁波还有哪些应用？与同学交流一下。
2. 请大胆地设想一下，电磁波还可能带来哪些技术变革？
3. 科学技术是一把“双刃剑”，与同学交流电磁波的负面作用。

 实践与拓展

调查本地移动通信的发展情况。

 资料活页

卫星通信技术

卫星通信是用通信卫星作为中继站来转发微波信号，从而实现远距离通信的一种通信方式。卫星通信系统由通信卫星和卫星地球站组成。

卫星通信与电缆、光缆通信、地面电波通信相比，有不受地理条件的限制、通信容量大、传播距离远、覆盖面积大、费用少等特点。现在，一颗卫星有几十个转发器，可提供几万路电话同时通话或转发几十套电视节目。

目前，卫星通信系统有两种基本类型，一是地球同步卫星系统，二是中、低轨道卫星系统。

地球同步卫星在地球赤道上空约 36 000 km 的圆形轨道上，属高轨道卫星，将三颗这样的卫星合理分布，就几乎能覆盖整个地球。现在，在太平洋、大西洋、印度洋上空各有一颗国际通信卫星，它们与地面诸多的地球站共同组成一个全球卫星通信网。

由于高轨全球卫星通信网现在已不能满足急剧膨胀、数目巨大的个人手机用户的通信需求，人们开始致力于开发中、低轨道卫星系统。这些卫星不再相对地球静止，为了确保地球上任一点均可实现 24 小时不间断通信，必须精心配置多条轨道及一大群具有强大处理能力的通信卫星。这样一个庞大而又复杂的空间系统要实现稳定可靠的运转，涉及到技术上和经济上的一系列难题。虽然目前正在运营的中、低轨道卫星系统大都举步维艰，但我们由相信，随着社会和科技的发展，在 21 世纪，以手机用户为核心的中、低轨道卫星移动通信系统，必将在“全球个人通信网”中成为重要的组成部分。

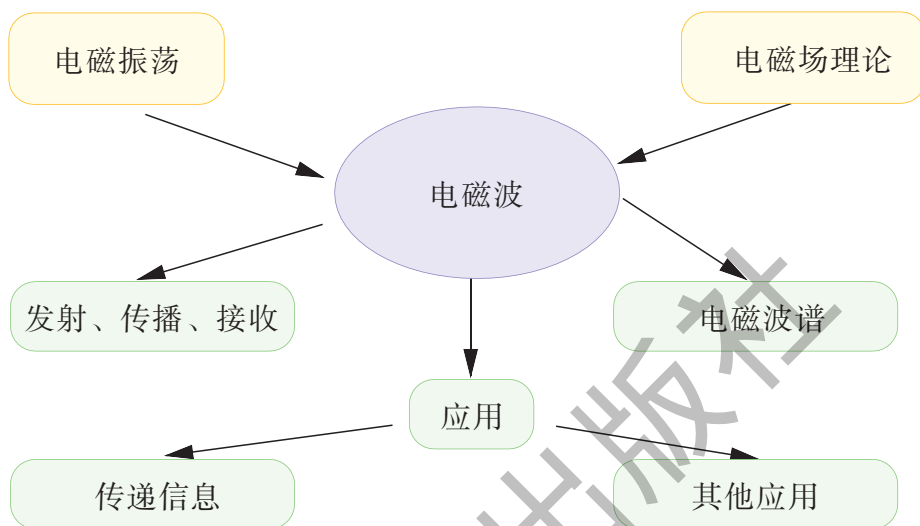
卫星通信使人类通信联络进入了崭新的阶段，广阔的地球变成了一个在其中可随意联络、交流的“小村落”。

 练习

1. 在信息传媒高度发达的今天，你认为无线电广播会很快退出历史的舞台吗？
2. 请描述一下，现在的手机有哪些功能？再设想一下，将来的手机可能还会有哪些功能？
3. 收集资料，完成一篇电磁波应用的小论文。

本章小结

一、知识结构



二、回顾与评价

回顾与评价

麦克斯韦的电磁场理论可概括为：_____

我最感兴趣的内容是：_____

在和同学们讨论与交流的过程中，我最大的收获是：_____

我还想知道：_____

我还有些不太清楚的地方：_____

在实践与拓展中，我又有了收获：_____

我对物质世界统一性和多样性的新体会：_____

我还想说：_____

习 题 三

1. 电磁波是怎样被发现的, 现在你能用多少种办法证明电磁波的存在?
2. 你认为赫兹实验有哪些意义?
3. 利用电视机的遥控器来感知红外线的反射, 可以通过红外线的反射来实现各种遥控操作. 试试看, 会有什么发现?
4. 电磁波谱中各个波段对人类都有重要意义, 但同时电磁波也给人类造成了一定的危害. 如何评价电磁波的“功”与“过”?

5. 下列说法中正确的是 ().

- A. 电磁波就是无线电波
- B. 在真空中, 紫外线传播的速度比红外线快
- C. 光也是电磁波
- D. 电磁波都是由振荡电路产生的

6. 如图 3-1 所示是 LC 振荡电路和通过点 P 的电流随时间变化的规律. 若把流过点 P 向右的电流规定为正方向, 那么 ().

- A. 在 $t_1 \sim t_2$ 内, 电容器 C 在充电
- B. 在 $t_1 \sim t_2$ 内, 电容器 C 的上板带正电
- C. 在 $t_2 \sim t_3$ 内, 磁场能正在转化为电场能
- D. 在 $t_2 \sim t_3$ 内, 点 Q 的电势比点 P 高

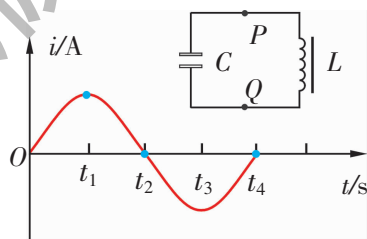


图 3-1

7. 甲、乙两地进行无线电通信, 把太平洋上空的通信卫星作为中继站. 若甲、乙两地到达卫星的距离都是 $4.2 \times 10^7 \text{ m}$, 那么甲地发射的电磁波要经过多长时间才能到达乙地?

8. 某电磁波发射装置中的电感 L 和电容 C 均是可调的, 已知可变电容器的电容可调范围是 $C_0 \sim 16C_0$, 它发射的电磁波波长范围是 $\lambda_0 \sim 8\lambda_0$, 求该装置中电感 L 的最大值与最小值之比.

9. 发挥想象力, 勾画一幅未来人类通信的蓝图, 并编写一个科幻小故事.

第四章

光

光也是一种电磁波，与其他电磁波相比，它具有更为特殊的意义。

有了光，世界更美丽。蔚蓝的天空、雨后的彩虹、梦幻般的海市蜃楼、肥皂泡上美丽的彩色条纹、都市夜晚的华灯……组成了一幅幅绚丽多彩的图景。

激光、光纤等应用技术的发展促进了人类信息技术的革命。

光是如此的熟悉和重要，然而，你了解光吗？



第一节 光的折射定律

我们知道，光在均匀的介质中是沿着直线传播的；当它遇到另一种透明物质时，光束不再按照原来的方向前进，而是偏向另一个方向传播——发生了光的折射（图 4-1-1）。光的折射有什么规律呢？

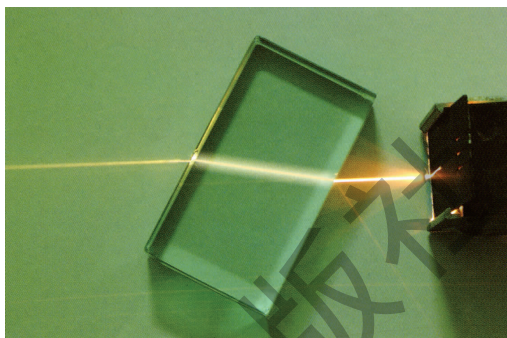


图 4-1-1 光在遇到另一种透明介质时发生折射

光的折射规律的实验探究

【实验或演示】

参考图 4-1-2，让光以不同的入射角进入不同的介质界面（如空气和玻璃界面、空气和水界面），找出相应的入射角与折射角的关系，将实验数据填入表 4-1-1 中。

表 4-1-1 入射角和折射角的关系

入射角 i	折射角 γ			
30°				
45°				
60°				

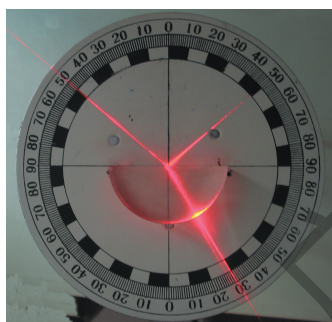


图 4-1-2 实验装置图

在处理表中的数据时，是应该计算入射角和折射角的正弦值还是余弦值，或者其他数值？

【分析与论证】

1. 建立合适的坐标系，根据表 4-1-1 的数据，作出能明确反映入射角和折射角关系的图象。
2. 从实验中总结出折射光线的传播方向和入射光线的关系

是：_____

通过大量实验探究可以得出：折射光线、入射光线和法线在同一平面内，折射光线和入射光线分别位于法线的两侧；入射角的正弦跟折射角的正弦成正比。如果用 n 来表示这个比例常数，就有

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

这就是光的折射定律。

专业术语

折射定律

refraction law

折射角与光速的关系

光发生折射的原因是由于光在不同介质中传播速度不同：光在某些介质中的传播速度慢，这些介质叫做**光密介质**；在某些介质中的传播速度快，这些介质叫做**光疏介质**。光密介质和光疏介质是相对的，例如，当界面为空气和水时，水为光密介质；当界面为水和玻璃时，水为光疏介质。

专业术语

光密介质

dense medium

光疏介质

thin medium

如图 4-1-3 所示，当一列平面波以一定入射角 i 从一种透明介质进入另一种透明介质时，该平面波与界面相遇在点 A 、点 E_1 、点 E_2 和点 C 。根据惠更斯原理，它们都是子波的波源，依次发出子波通过界面进入另一种介质。此时传播速度发生改变，设在界面两边的传播速度分别为 v_1 、 v_2 ，在时刻 t 入射波的波阵面到达图中的 AB 位置，经过 Δt 后，从 A 、 B 两点发出的子波分别到达点 D 、 C ，即波阵面 AB 前进到波阵面 DC 。

由图 4-1-3 中可知

$$BC = v_1 \Delta t = AC \sin i$$

$$AD = v_2 \Delta t = AC \sin \gamma$$

从以上两式可得

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

(4.1.2)

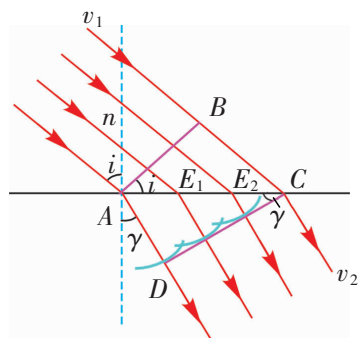


图 4-1-3 波的折射

折射率

从折射定律可知，光从一种介质射入到另一种介质时，入射角的正弦跟折射角的正弦之比是一常数 n 。实际上，对不同的介质来说，这个常数 n 是不同的。它与介质有关，是一个反映介质的光学性质的物理量。常数 n 越大，光线偏折越厉害。物理学中把光从真空射入某种介质发生折射时，入射角 i 的正弦与折射角 γ 的正弦之比 n ，叫做这种介质的**折射率**。

专业术语

折射率

refractive index

另一方面，介质的折射是由于光在不同的介质中的速度不同引起的。因此，折射率 n 与光在此介质中的传播速度有关。研

究表明,某种介质的折射率 n 与光在此介质中的传播速度 v 之间存在如下关系

$$n = \frac{c}{v} \quad (4.1.3)$$

式中 c 为光在真空中的传播速度.

例:如图 4-1-4 所示,光线从一种液体经过界面进入空气.入射角为 30° ,折射角为 45° .问这种液体的折射率和光在这种液体中的传播速度是多少?

$$\begin{aligned} \text{解: } n &= \frac{\sin 45^\circ}{\sin 30^\circ} = \frac{\frac{\sqrt{2}}{2}}{\frac{1}{2}} \\ &= \sqrt{2} \approx 1.41 \\ v &= \frac{c}{n} = \frac{3.0 \times 10^8}{1.41} \text{ m/s} \\ &= 2.1 \times 10^8 \text{ m/s} \end{aligned}$$

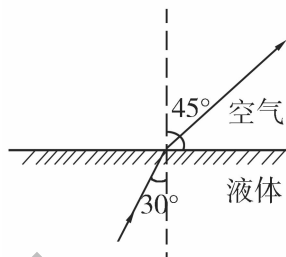


图 4-1-4

答:这种液体的折射率为 1.41,光在这种液体中的传播速度是 2.1×10^8 m/s.



讨论与交流

1. 当光线垂直地通过两种介质的界面时(即入射角为 0° 时),折射角是多少?这说明了什么?
2. 在两个相同的杯子里分别放置一些透明的油和水,在相同的位置各斜插一根相同的筷子,观察并分析比较它们的现象,说出理由.



实践与拓展

尝试用光的折射定律解释魔术师表演的将人“切割”的假象.



资料活页

绝对折射率与相对折射率

在折射现象中,光通过两种介质,所以光的偏折程度与这两种介质有关.设光从介质 1 射入介质 2,这时光的折射率叫做介质 2 对介质 1 的相对折射率,通常用 n_{21} 来表示,即

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

光从真空中射入某种介质时的折射率,叫做该介质的绝对折射率,简称为某介质的折射率,用 n 来表示.通常所说的某种介质的折射率,指的就是这种介质的绝对折射率.

介质的折射率跟光在介质中的传播速度有关.设光在介质 1 中的传播速

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

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2}; n_{12} = \frac{v_2}{v_1}$$

由上式可以推导

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

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

由折射率与光速的关系，可以求得绝对折射率和相对折射率的关系

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{c}{n_1} \right) / \left(\frac{c}{n_2} \right) = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{②}$$

式中 n_1 和 n_2 分别是介质 1 和 2 的绝对折射率。

知道了绝对折射率和相对折射率的关系后，①式可以写成

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

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

http 我们的网站

海市蜃楼的成因。



练习

- 下列现象中，属于光的折射的是（ ）。
 - 岸上的人看到水中的月亮
 - 司机从观后镜中看到车后的景物
 - 战士从潜望镜中看到被掩蔽物遮住的敌人
 - 水中的潜水员看到天空中的太阳
- 光线以 30° 的入射角从玻璃中射到玻璃与空气的界面上，它的反射光线与折射光线的夹角为 90° ，则这块玻璃的折射率为 _____。
- 水中的物体看上去比实际位置要浅，这是因为 _____。
- 在烧杯中加入一些白砂糖，待其溶解并静置一段时间后，用激光笔向烧杯斜射入一束光，观察这束光会发生什么变化。为什么？

第二节 测定介质的折射率

折射率是介质本身的一种重要的光学属性，这一节我们通过实验来测定玻璃的折射率。根据上一节所学知识，折射率 $n = \frac{\sin i}{\sin \gamma} = \frac{c}{v}$ ；这里提供了测定介质折射率的两条途径：一是通过测光速（难度太大）再算出折射率；另一种是通过测定入射角 i 和折射角 γ 再算出折射率。我们选用第二种方法。

现在我们用白纸、图钉、平木板、刻度尺、铅笔、大头针、量角器这些简单的器材，用一种巧妙而有趣的方法来测长方体玻璃砖的折射率。

【方法指导】

如图 4-2-1 所示，将白纸用图钉钉在平木板上。在白纸上画出一条直线 aa' 作为界面，过 aa' 上的一点 O 画出界面的法线 NN' ，并画一条线段 AO 作为入射光线。把长方体玻璃砖放在白纸上，使它的上边跟 aa' 对齐，画出玻璃砖的另一边 bb' 。

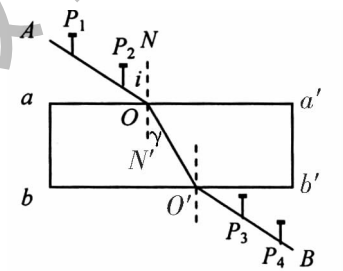


图 4-2-1

在直线 AO 上竖直插上两枚大头针 P_1 、 P_2 ，透过玻璃砖观察大头针 P_1 、 P_2 的像，调整视线方向直到 P_2 的像挡住 P_1 的像，再在观察者一侧竖直插上两枚大头针 P_3 、 P_4 ，使 P_3 挡住 P_1 、 P_2 的像， P_4 挡住 P_3 及 P_1 、 P_2 的像，记下 P_3 、 P_4 的位置。

移去大头针和玻璃砖，过 P_3 、 P_4 所在处作直线 $O'B$ 交 bb' 于点 O' ，直线 $O'B$ 就代表了沿 AO 方向入射的光线通过玻璃砖后的传播方向，连接 OO' 即为折射光线。如图所示，入射角 $i = \angle AON$ ，折射角 $\gamma = \angle O'ON'$ ，用量角器量出其入射角 i 和折射角 γ ，从三角函数表中查出它们的正弦值，由 $n = \frac{\sin i}{\sin \gamma}$ 算出玻璃的折射率。我们将这种奇妙的方法通俗地称为“插针法”。

实验时，尽可能将大头针竖直插在纸上，还应控制入射角适当大一些，以减少测量角度的误差，但不宜太大，太大不易准确观察。在操作时，要注意保护玻璃砖的光洁面，不能用手触摸，更不能将玻璃砖当尺子使用。

【数据处理】

再任意选取一些入射光线，重复以上步骤，可得一系列的测量值。

1. 计算法.

将每次实验测得的入射角 i , 折射角 γ , 以及从三角函数表中查出的正弦值 $\sin i$, $\sin \gamma$ 和由 $n = \frac{\sin i}{\sin \gamma}$ 算出的折射率记录在表 4-2-1 中. 可得一系列折射率的值, 最后算出其平均值.

表 4-2-1 实验数据记录表

测量数据组	入射角 i	折射角 γ	$\sin i$	$\sin \gamma$	$n = \frac{\sin i}{\sin \gamma}$	$\bar{n} = \frac{n_1 + n_2 + \dots + n_5}{5}$
1						
2						
3						
4						
5						

2. 图象法.

以折射角的正弦 $\sin \gamma$ 为横坐标, 以入射角的正弦 $\sin i$ 为纵坐标建立坐标系, 如图 4-2-2 所示, 根据表 4-2-1 中的数据作出一条直线, 尽量让各数据点对称地分布在这条直线的两侧, 则直线斜率的大小便为玻璃的折射率. 设斜率为 k , 则玻璃砖的折射率 $n = k$.

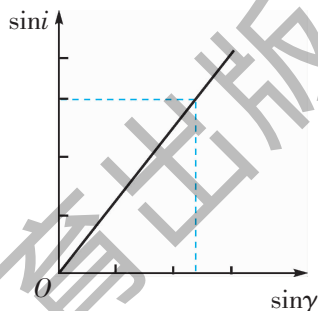


图 4-2-2 用作图法求折射率

讨论与交流

1. 实验时, 大头针 P_1 和 P_2 之间, P_2 与 O 点之间, P_3 与 P_4 之间, P_3 与 O' 之间的距离是稍大一些好还是稍小一些好? 为什么? (从误差的角度来分析)

2. 实验时入射角和折射角往往不能同时为特殊角, 所以必须查《三角函数表》才能确定其正弦值, 这显得有点麻烦, 能否将角度的测量转化为长度的测量呢?

如图 4-2-3 所示, 过 O 点以 OO' 长度为半径 (设为 R) 作圆交入射光线 AO 于 C 点, 过 C 作法线的垂线作法线的垂线交法线于 D , 过 O' 点作法线的垂线作法线的垂线交法线于 E 点, 如图所示:

$\sin i = \frac{CD}{R}$; $\sin \gamma = \frac{O'E}{R}$, 所以玻璃的

折射率 $n = \frac{\sin i}{\sin \gamma} = \frac{CD}{O'E}$.

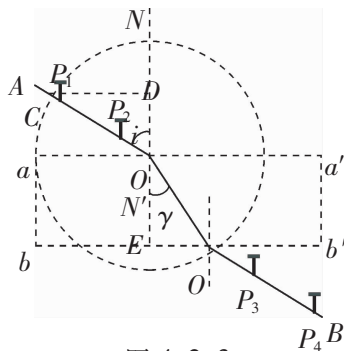


图 4-2-3

这样就可以巧妙地将角度的测量转化为长度的测量.

表 4-2-2 几种常见介质的折射率

介质	折射率	介质	折射率
空气	1.0003	钻石	2.419
冰	1.309	玻璃	1.5~1.7
乙醇	1.36	翡翠	1.57
水	1.333	红/蓝宝石	1.77

实践与拓展

自行设计适合测液体折射率的实验方案，并测出水和酒精的折射率。

练习

1. 某实验小组在做测定折射率的实验时，用图象法处理实验数据，他们分别画出了如图 4-2-4 所示的 a 、 b 、 c 、 d 四种透明材料的 $\sin\gamma - \sin\alpha$ 图象，则这四种透明介质的折射率相比（ ）。

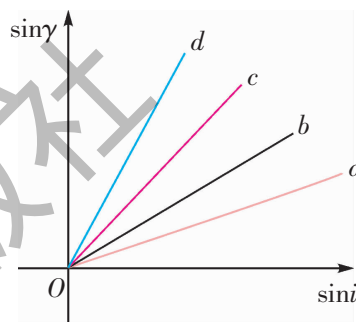


图 4-2-4

- A. a 介质的折射率最大
 B. a 介质的折射率最小
 C. d 介质的折射率最大
 D. d 介质的折射率最小

2. 如图 4-2-5 所示，某同学在用“插针法”测定玻璃的折射率的实验中，先在合适的位置插上两枚大头针 P_1 、 P_2 ，再用眼睛透过玻璃观察 P_1 、 P_2 的像，插上第三枚大头针 P_3 ，让它挡住 P_1 、 P_2 的像，插上第四枚大头针 P_4 ，让它挡住 P_3 和 P_1 、 P_2 的像。但在插第四枚大头针 P_4 时，没有插准而是插在了 P_4' 点。这会使测得的折射率（ ）。

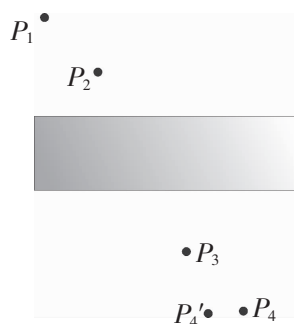


图 4-2-5

- A. 偏大 B. 偏小 C. 准确 D. 无法确定

3. 小明同学用“插针法”测量一半圆柱形玻璃砖的折射率。图 4-2-6 中的半圆是玻璃砖的截面， A 、 B 、 C 、 D 是小明同学插下的四枚针的位置。

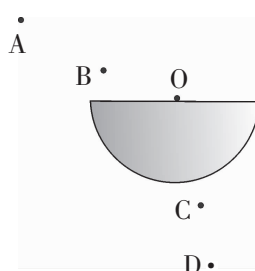


图 4-2-6

(1) 请你完成测量玻璃折射率的光路。

(2) 在只有一对三角板（带刻度尺），没有量角器的情况下，你怎样测量玻璃的折射率？试在图中画出所需的线段，标出相关字母。说出需测量哪些线段的长度，并写出计算折射率的表达式（用需测量的线段表示）。

第三节 光的全反射现象

从第一节的实验可知，当光从光疏介质斜射入光密介质（如从空气射入玻璃、水）时，折射角总是小于入射角。倘若反过来，让光束从玻璃射入空气，也会有类似的现象发生吗？

光的全反射

观察与思考

如图 4-3-1 所示，让光沿着半圆形玻璃砖的半径射到直边上。逐渐增大入射角，观察实验现象，并思考下列问题。

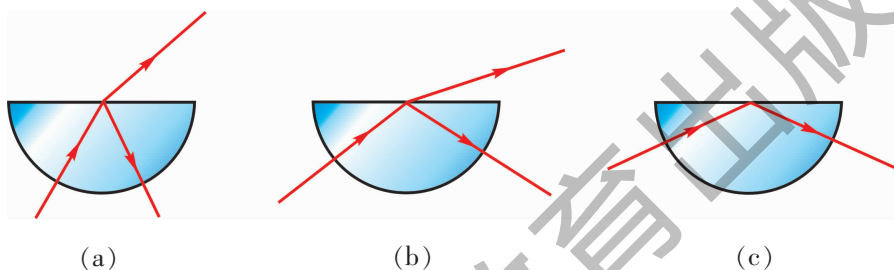


图 4-3-1 光的全反射现象

1. 折射角_____（选填“大于”、“小于”或“等于”）入射角。
2. 在入射角逐渐增大时，折射角的大小发生什么变化？
_____.
3. 在入射角逐渐增大时，反射光线和折射光线的亮度发生什么变化？
_____.

从以上实验可以看出，当光以较小入射角从玻璃砖（光密介质）射入空气（光疏介质）时，一部分光从玻璃砖的直边上折射到空气中，另一部分光反射回玻璃砖内。逐渐增大入射角，会看到折射光线偏离法线越来越远，而且越来越弱，反射光线却越来越强。当入射角增大到某一角度，折射光线完全消失，只剩下反射光线，这种现象叫做**光的全反射**。

光从光密介质（即折射率较大的介质）射入光疏介质（即折射率较小的介质）时，只要入射角大于某一数值，在它们的界面上都会发生全反射，恰好发生全反射时的入射角叫做**临界角**（即折射角为 90° 时的入射角）。

专业术语

光的全反射
total reflection
临界角
critical angle

例：如图 4-3-2 所示，玻璃的折射率为 1.5，空气的折射率为 1。问能从玻璃入射到空气产生全反射的临界角等于多少？

解：利用推导式

$$n_1 \sin i = n_2 \sin \gamma$$

其中， $n_1=1.5$ ， $n_2=1$ ， $\sin \gamma = \sin 90^\circ = 1$

$$\sin i = \sin \theta_c = \frac{1}{n_1} = \frac{1}{1.5} \approx 0.667$$

所以，临界角 $\theta_c \approx 41.8^\circ$

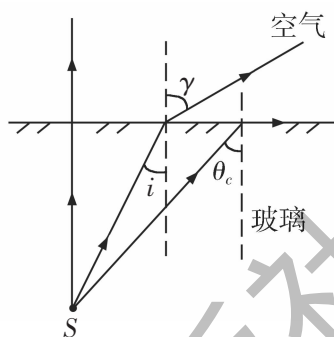


图 4-3-2

讨论与交流

在如图 4-3-1 所示的实验中，光的能量在这两种介质中的分配是如何变化的？

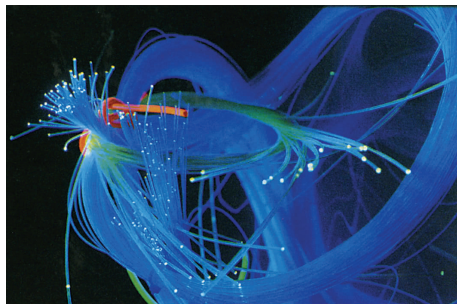
光导纤维的结构与应用

专业术语

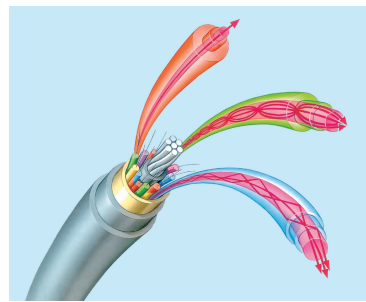
光纤（光导纤维）
optical fiber

人们设计出用光密介质制成的纤维状的东西来传导光信号，**光纤**就是这样一种装置。光纤也叫做**光导纤维**。

光纤是一种非常细的特制玻璃丝，如图 4-3-3 所示，其直径只有几微米到一百微米之间，由内芯和外套两层组成。内芯的折射率比外套的大，光在光纤内传播时，在内芯与外套的界面上发生全反射，因此，光信号能携带着数码信息、电视图像、声音等沿着光纤传输到很远的地方。



(a) 光纤



(b) 光纤的结构示意图

图 4-3-3 光纤及其结构

观察与思考

观察光纤的结构，它有什么特点？

如果将光导纤维聚集成束，使其两端纤维排列的位置相同，具有亮暗色彩的图像就可以从一端传到另一端（图 4-3-4）。医学上用光导纤维制成内窥镜，用来检查人体消化道等内脏的内部情况。

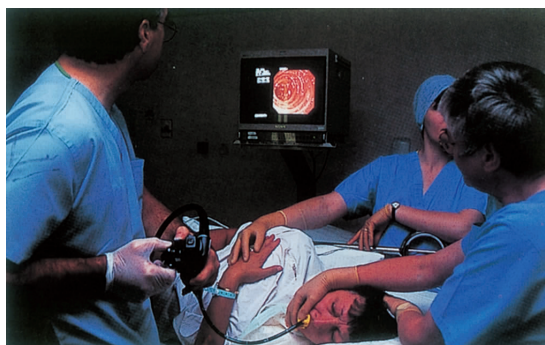


图 4-3-4 可用于检查消化道疾病的内窥镜

我们知道，光是一种电磁波，它可以像无线电波那样作为一种载体来传递信息。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，就可以沿着光纤传到千里以外的另一端，实现光纤通信。

光纤通信的主要优点是容量大、衰减小、抗干扰性强。例如，一路光纤的传输能力理论值为 20 亿路电话或 1 万路电视；而“国际通信卫星 6 号”也只能传输 3.3 万路电话或 4 路电视。

光纤通信的发展带动了整个信息科学的发展。互联网、光纤电话、有线电视等，正以惊人的速度进入千家万户。人们的距离因此拉近了，信息检索的效率提高了。要想知道某种信息，只要在互联网上输入关键词，即可得到互联网上所有此类的信息。另外，由于光晶体管的问世，大容量、高速度的光计算机也有望在 21 世纪初得到广泛应用，这都离不开光纤的使用。

资料活页

塑料光纤

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



图 4-3-5 我国自主生产的塑料光纤

输介质，适合用于接入网的最后 100~1000 米，应用于各种汽车、飞机等运载工具的传输数据系统，以及消费电子产品、照明、军事通信等方面。

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

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

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

实践与拓展

1. 自己设计一种方案来演示“光的全反射”现象。
2. 身边取一些材料，制作一条属于你自己的“光纤”。

我们的网站

光纤和光缆的利用。

练习

1. 发生全反射的条件是：

(1) _____；

(2) _____。

2. 什么是临界角？如何推导出临界角的公式？

第四节 光的干涉

在阳光的照射下，肥皂泡上的彩色条纹（图 4-4-1）仿佛把人们带回了童年的岁月，也给人们带来了无尽的遐想。肥皂泡上的彩色条纹是如何产生的呢？

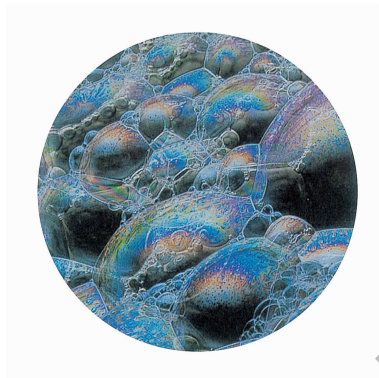


图 4-4-1 肥皂泡上的彩色条纹

双缝干涉现象

既然光是一种波，与机械波的干涉相比，光的干涉又是怎样的呢？先让我们来观察下面的实验现象。

观察与思考

如图 4-4-2 所示，将一激光笔发出的光照射在双缝上，双缝平面平行于墙壁，在墙壁上即可观察到光的干涉图样——明暗相间的条纹。这些明暗相间的条纹代表什么？

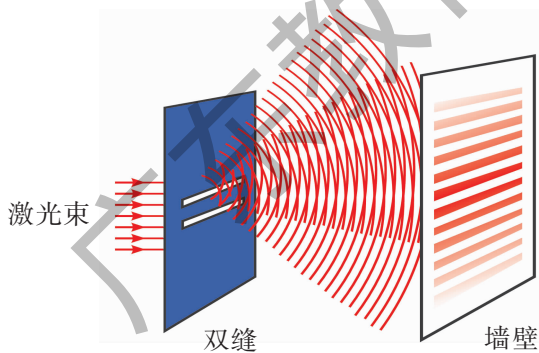


图 4-4-2 激光笔发出的光照射双缝后的干涉图样

和机械波的干涉一样，在如图 4-4-2 所示的实验中，激光笔发出的单色光经过双缝后成为两列频率相同的光，它们在空间产生干涉，某些区域得到了加强，出现明条纹；某些区域得到了削弱，出现暗条纹；而且这些明暗的区域也是相间的，从而形成如图 4-4-2 所示的光的干涉图样。

讨论与交流

把两支同样的激光笔发出的光射向墙上的同一个地方，可以观察到什么现象？为什么？

双缝是一种本身不透明的光学元件，上面有互相靠近的两条平行的透光缝，波面平行于缝的光线经过双缝后成为两条线光源。如果在光学元件上的缝只有一条，则此光学元件称为单缝。

在上面的实验中，两支激光笔发出的光经过叠加后，并没有形成干涉图样. 这又是为什么呢？光产生干涉需要什么条件呢？

光产生干涉的条件

研究表明，光和机械波一样，产生稳定的干涉图样需要一定的条件：频率相同，相差恒定，振动方向相同，即光波为相干光波，而且两列相干光波到达明（暗）干涉条纹的位置的路程差 Δr 必须是波长的整数倍（半波长的奇数倍），即满足

$\Delta r = k\lambda$, $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ （明条纹：波峰与波峰叠加或波谷与波谷叠加）

$$\Delta r = (2k+1)\frac{\lambda}{2}, k=0, \pm 1, \pm 2, \dots \text{（暗条纹：波峰与波谷叠加）}$$

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

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

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

式中介质的折射率 n 与光在该介质中传播的几何路程的乘积 nr ，叫做光程. 两列相干光从相位相同的地方达到空间某点 P 的光程的差，叫做光程差. 在真空和空气中，由于折射率 n 分别为 1 和近似等于 1，则光程差即为路程差.

专业术语

光程差

optical path difference

对于图 4-4-2 的双缝干涉实验，如果观察屏（墙）到双缝挡板的距离为 L ，双缝之间的距离为 d ，光的波长为 λ ，如图 4-4-3 所示，则观察屏（墙）上的相邻明条纹（或暗条纹）间的距离 Δx 为

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

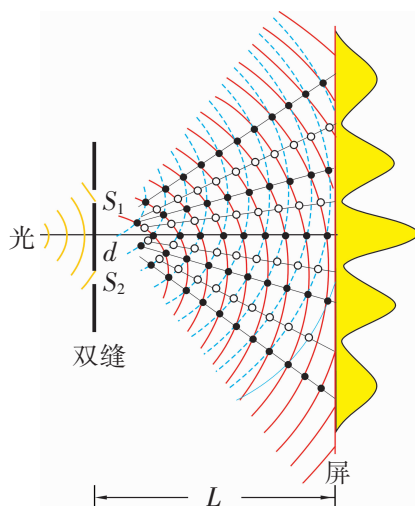


图 4-4-3 双缝干涉实验光路示意图

讨论与交流

如何从光的传播速度和折射率的概念出发理解光程差的概念？

薄膜干涉

肥皂泡上的颜色是由肥皂膜的前、后表面反射回来的两组光波相遇后形成的。由于重力的作用，从膜的上部到膜的下部，膜的厚度是逐渐增加的，形成了如图 4-4-4 所示的楔子形状。当太阳光照射在膜上时，一部分从膜表面 A_1B_1 上直接反射回来，另一部分折射进入膜内，在膜的内表面 A_2B_2 进行再一次的部分反射，在膜的外表面折射后与第一次反射后的光形成相干光。在膜不同的地方，其内、外表面反射光的光程差不同，因而在不同的地方形成明条纹和暗条纹。又由于太阳光是由许多不同颜色的单色光组成的，在膜的另一位置，不同颜色的光的光程差不同，因此明条纹的位置可能不同，因此不同颜色的光的明条纹是错开的，从而形成了肥皂泡上的彩色光带。

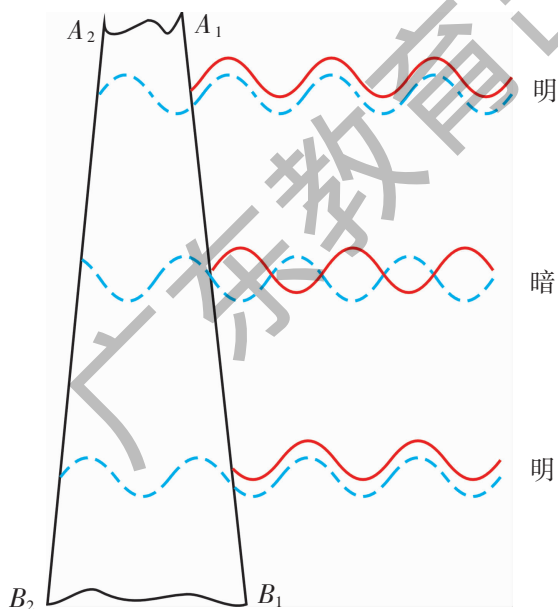


图 4-4-4 肥皂泡的薄膜干涉示意图

生活中时常可以见到光的干涉现象，例如，雨后柏油路面上的油膜在阳光的直接或间接照射下显出五颜六色；蝴蝶翅膀的颜色也是由于光在薄鳞片上产生的薄膜干涉引起的。

实践与拓展

1. 尝试在家中观察肥皂水泡沫的干涉条纹。怎样才能观察到明显的干涉条纹？

2. 比较光的干涉图样与机械波的干涉图样, 用“波峰(波谷)与波峰(波谷)加强”、“波峰(波谷)与波谷(波峰)削弱”的观点来考察它们的干涉图样.

http 我们的网站

用干涉法检测光学平面的平整度.



练习

1. 两列光波产生干涉的条件是: _____.
2. 关于双缝干涉条纹, 下列说法正确的是 ().
 - A. 用同一单色光做双缝干涉实验, 能观察到明暗相间的单色条纹
 - B. 用同一单色光经双缝干涉后的明条纹距两缝的距离之差为该色光波长的整数倍
 - C. 用同一单色光经双缝干涉后的明条纹距两缝的距离之差一定为该色光波长的奇数倍
 - D. 用同一单色光经双缝干涉后的暗条纹距两缝的距离之差一定是该色光半波长的奇数倍
3. 在双缝干涉实验中, 下列说法正确的是 ().
 - A. 入射光的波长越长, 干涉条纹间距越大
 - B. 入射光的波长越长, 干涉条纹间距越小
 - C. 把入射光由绿光变成紫光, 干涉条纹间距变小
 - D. 把入射光由绿光变成红光, 干涉条纹间距变小
4. 一束白光通过双缝后在屏上观察到干涉条纹, 除中央的白色条纹外, 两侧还有彩色条纹, 其原因是 ().
 - A. 各色光的波长不同, 因而各色光分别产生的干涉条纹间距不同
 - B. 各色光的速度不同, 造成条纹的间距不同
 - C. 各色光的强度不同
 - D. 各色光通过双缝的距离不同
5. 在太阳光的照射下, 水面油膜上会出现彩色条纹, 这是两列相干光波发生干涉的结果, 这两列相干光波是太阳光分别经_____而形成的.

第五节 用双缝干涉实验测定光的波长

光的波长是光的重要参数之一. 但光的波长很短 (400~770 nm), 通常很难测, 也很难测准. 在上一节双缝干涉实验中, 我们得出相邻明纹 (或暗纹) 之间的距离 $\Delta x = \frac{L}{d}\lambda$, 这就为测定光的波长提供了一种很好的方法.

如图 4-5-1 所示是双缝干涉仪, 现在我们用双缝干涉仪 (整个实验装置包括: 光具座、光源、滤光片、单缝、双缝、遮光筒、毛玻璃屏、测量头, 另外还有学生电源、导线、刻度尺) 来测定单色光的波长.

【方法指导】

光源发生的光通常为复色光, 通过滤光片变成单色光, 通过单缝是为了得到一束线状的单色光, 再通过双缝就得到了两列振动情况完全相同的线状相干光源. 遮光筒的作用是防止外界光的干扰, 有利于在屏上观察到清晰的明暗相间的干涉图样.

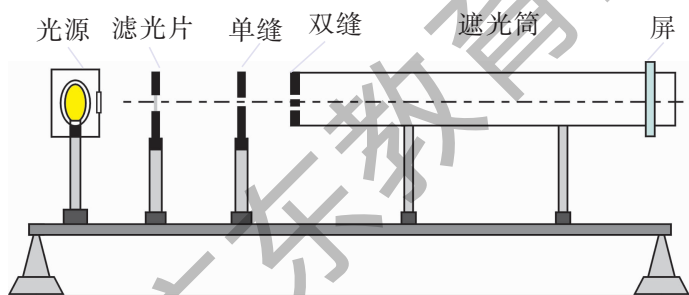


图 4-5-1

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

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

改变双缝到屏的距离 L , 再测出几组对应的相邻的两条明 (或暗) 纹间的距离 Δx .

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

换用不同颜色的滤光片，观察干涉图样有什么不同，并求出不同单色光相应的波长。

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

【精确测量】

如图 4-5-2 所示的测量头是为了精确测量相邻条纹的间距 Δx 。

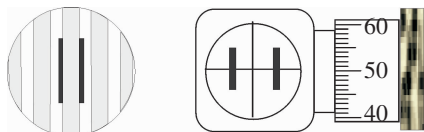


图 4-5-2

测量头紧贴屏安装，由分划板、目镜、手轮等构成。转动手轮，分划板会左右移动。测量时，应使分划板的中心刻度对齐条纹的中心（如图所示），记下此时手轮上的读数 x_1 （其读数方法与螺旋测微器相同），转动手轮，使分划板向一侧移动，当分划板中心刻线对齐另一相邻的明条纹中心时，记下手轮上的刻度线 x_2 ，两次读数之差就是相邻两条明条纹间的距离。即 $\Delta x = |x_1 - x_2|$ 。

Δx 很小，直接测量时相对误差较大。通常测出 n 条明条纹间的距离 a ，再推算相邻两条明（暗）条纹间的距离 $\Delta x = \frac{a}{(n-1)}$ 。最后由 $\lambda = \frac{da}{(n-1)L}$ 算出单色光的波长。

讨论与交流

如何用双缝干涉仪同时观察到不同单色光的干涉条纹，以比较不同色光干涉条纹的宽窄？

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

资料活页

镜头镀膜漫谈

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

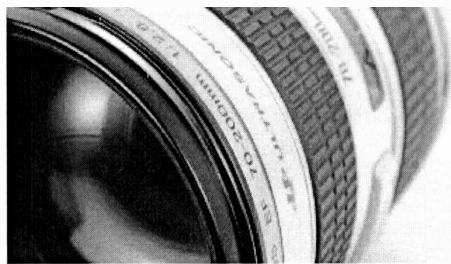


图 4-5-3 摄像镜头

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

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

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

多层镀膜的镜头，其镜头的透光率极高，镜片表面的直接反光很弱，只有从镜片的侧面观察才可以看到彩色的反光，这种反光多为深红（大幅增透蓝光）、深蓝（大幅增透红光）、深黄（大幅增透蓝绿光）和深绿色，其中深绿色的镀膜可以同时增加光谱两端的蓝光和红光的透过率，只有光谱中部的黄绿色光才被反射回来。多层镀膜的镜头，其各个镜片不可能都镀上同一种增透膜，否则这个镜头就会发生偏色。

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

练习

1. 如图 4-5-4 所示是阿光同学用“双缝干涉法”做测定某单色光的波长的实验示意图。

测得单缝到双缝的距离为 80 mm ，双缝间距为 $200\text{ }\mu\text{m}$ ，双缝到墙壁的距离为 60 cm ，墙壁上的干涉图样及尺寸如图 (b) 所示，则该单色光的波长是多少？

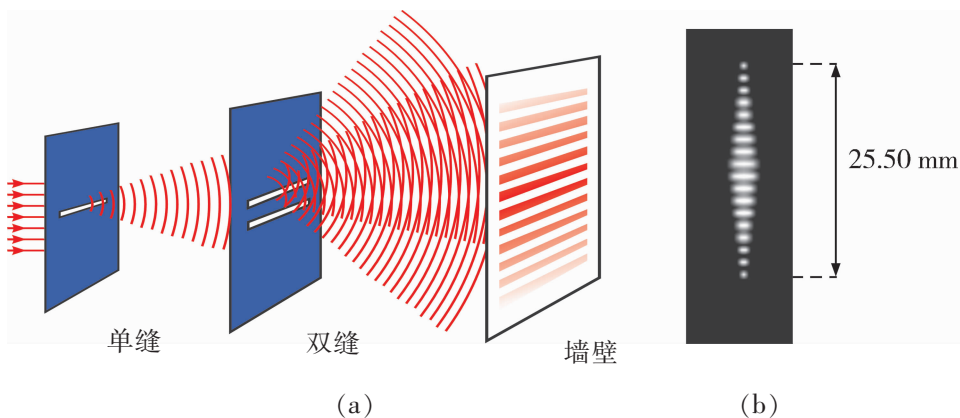


图 4-5-4 杨氏双缝干涉实验

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

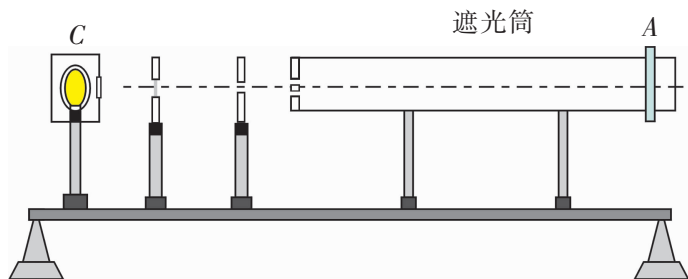


图 4-5-5

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

(2) 本实验的步骤有:

① 取下遮光筒左侧的元件, 调节光源高度, 使光束能直接沿遮光筒轴线把屏照亮;

② 按合理顺序在光具座上放置各光学元件, 并使各元件的中心位于遮光筒的轴线上;

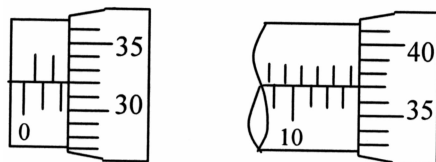
③ 用米尺测量双缝到屏的距离;

④ 用测量头 (其读数方法同螺旋测微器) 测量数条明纹间的距离.

在操作步骤②时还应注意_____和_____.

为增加屏上相邻明纹 (暗纹) 间的距离, 可采取_____或_____的方法.

(3) 将测量头的分划板中心刻线与某条明纹中心对齐, 将该明纹定为第 1 条明纹, 此时手轮上的示数如图 4-5-6 (a) 所示. 然后同方向转动测量头, 使分划板中心刻线与第 6 条明纹中心对齐, 记下此时图 4-5-6 (b) 中手轮上的示数_____ mm, 求得相邻明纹的间距 Δx 为_____ mm.



(a)

(b)

图 4-5-6

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

第六节 光的衍射和偏振

除了光的干涉以外，光的衍射和偏振也是光波的特征之一。

光的衍射

光的衍射现象随处存在，它比干涉现象更为普遍。但在通常情况下，由于光的衍射效应十分微弱，人们难以观察到。那么，产生明显衍射现象的条件是什么？

观察与思考

1. 圆孔衍射：如图 4-6-1 (a)、(b)、(c) 所示，让一单色点光源发出的光照射一个不同尺寸的圆孔，在圆孔的后面放置一光屏。从大到小地调节圆孔的大小，在光屏上观察到的现象是：_____。

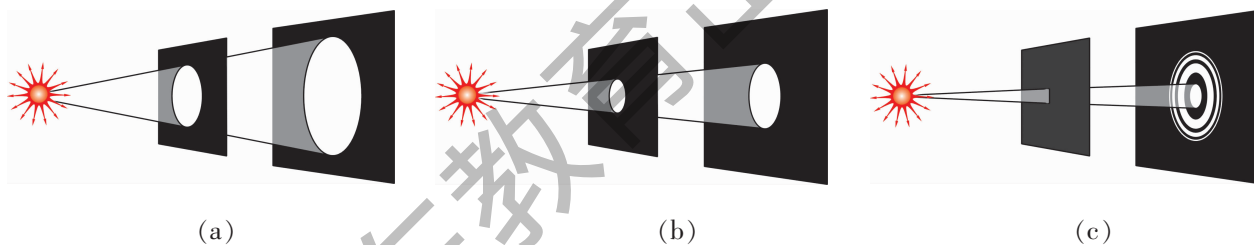


图 4-6-1 光的小圆孔衍射

2. 狭缝衍射：如图 4-6-2 所示，让单色平行线光源发出的光照射一狭缝可调的挡板 AB，在狭缝后面放置一光屏。从大到小地调节狭缝的大小，在光屏上观察到的现象是：_____。

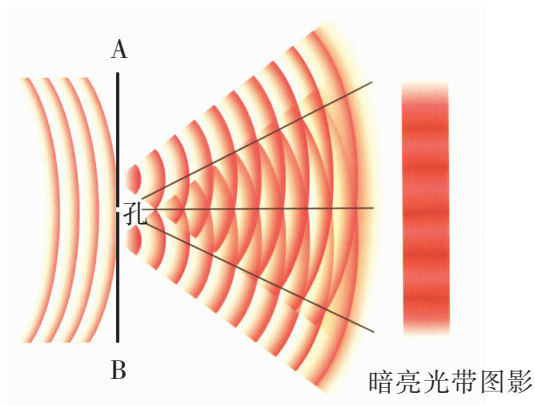


图 4-6-2 光的狭缝衍射

3. 将光源换上白光, 重复 1、2 的实验, 在光屏上观察到的现象是: _____

4. 综上所述, 光产生明显衍射现象的条件是: _____

5. 白光的衍射和单色光的衍射有什么区别? _____

如果障碍物或小孔、狭缝的尺寸和波长接近, 则绝大部分光将绕过障碍物(即产生“衍射”)继续前进. 在这里, 衍射是一束光的行为, 而干涉是两束光的行为, 这是衍射和干涉的不同之处.

从惠更斯原理来看, 波的衍射实际上是由一列波分成很多子波相互干涉的结果.

讨论与交流

光的衍射与光的直线传播有无矛盾?

光的偏振

光是电磁波, 因此它是横波. 那么, 能用实验观察光的横波性质吗? 由于光是可以看得见的电磁波, 因此这一点不难实现.

观察与思考

如图 4-6-3 (a)、(b)、(c) 所示.

1. 让太阳光或灯光通过偏振片, 旋转偏振片, 是否可以观察到光? 如果可以, 则光的振动方向可能如何? _____

偏振片是一种由特殊的材料制成的元件, 它有一个特殊的方向, 叫做透振方向. 当光的电场振动方向与透振方向平行时, 光完全能通过狭缝; 当光的电场振动方向与透振方向垂直时, 光完全不能通过; 当处于两者之间时, 则光只能通过一部分.

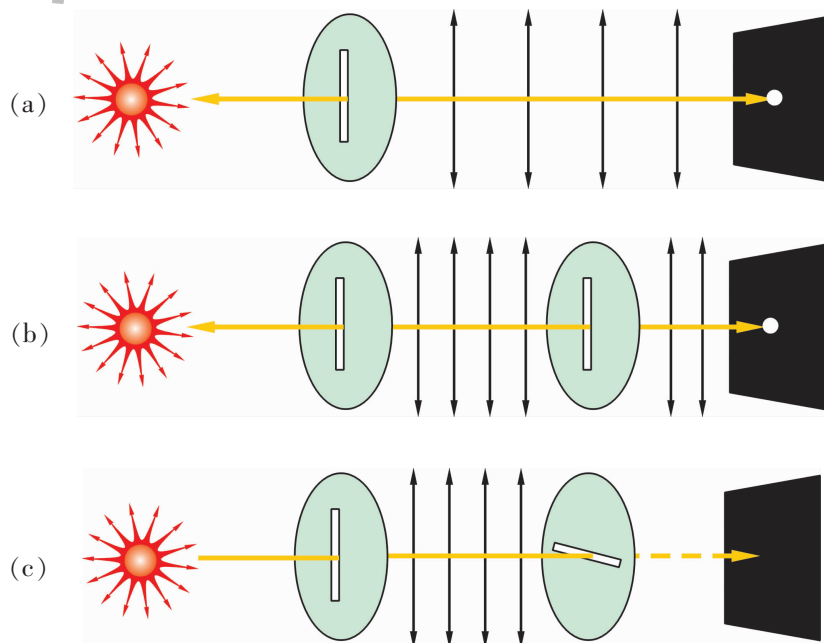


图 4-6-3 偏振光的检测

2. 在偏振片的后面再放置第二块偏振片, 保持第一块偏振片位置不动, 旋转第二块偏振片, 从第二块偏振片后观察到的现象是: _____

从如图 4-6-3 所示的实验可知, 当第二块和第一块偏振片的透振方向一致时, 观察到的光最强, 这说明从第二块偏振片出来的光的振动方向是第一块偏振片的透振方向. 这种具有特定振动方向的光叫做**偏振光**.

专业术语

偏振光

polarized light

讨论与交流

如果光是纵波, 以上实验中的现象又会如何?

很显然, 只有横波才具有偏振性. 因此, 此实验是观察光的偏振性的很好实例.

另一方面, 无论第一块偏振片的透振方向如何, 总是能观察得到同样强度的光线, 这说明太阳光和灯光没有特定的振动方向, 即它们包含沿一切方向振动的光, 而且在各个方向上的光波强度都相等, 这种光叫做自然光. 自然光经过偏振片后变成沿偏振片透振方向的偏振光. 在如图 4-6-3 所示的实验中, 第一块偏振片叫做起偏器, 第二块偏振片叫做检偏器.

实践与拓展

1. 找出能简易地观察到光的衍射现象的几种方法.
2. 查找资料, 了解生活中偏振现象的例子.

资料活页

泊松亮斑

关于光的衍射理论的建立, 在历史上曾经有一段有趣的故事.

物理学家菲涅耳按光的波动学说对光的衍射理论提出了严密的数学处理方法. 当时, 另一位主张光的微粒学说的法国科学家泊松从菲涅耳的数学方法推导出了一个“奇怪”的结论: 光经过不透明的圆盘衍射后, 在圆盘后面的轴线上的一定距离处, 会出现一个亮点. 泊松认为这是十分荒谬的, 并宣称他驳倒了光的波动学说. 菲涅耳接受了这一挑战, 立即用实验证实了这一理论预言. 泊松的结论反而支持了光的波动学说. 后来, 人们称这一亮点为“泊松亮斑”.

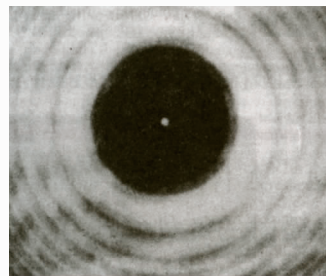


图 4-6-4 泊松亮斑



练习

- 下面对衍射现象的定性分析，正确的是（ ）。
 - 光的衍射是光在传播过程中绕过障碍物发生弯曲传播的现象
 - 衍射的花纹图样是光波相互叠加的结果
 - 光的衍射现象的本质是光的干涉
 - 光的衍射现象完全否定了光的直线传播结论
- 下列哪些现象是由于光的衍射产生的？（ ）。
 - 著名的泊松亮斑
 - 阳光下茂密树阴中地面上的圆形亮斑
 - 光照到细金属丝上后在其后面屏上的阴影中间出现亮线
 - 阳光经凸透镜后形成的亮斑
- 用点光源发出的光照射一个障碍物，在屏上形成的阴影的边缘部分模糊不清，产生的原因是（ ）。
 - 光的反射
 - 光的折射
 - 光的干涉
 - 光的衍射

广东教育出版社

第七节 激光

激光器的发明是 20 世纪中的重大科技成就. 激光的高亮度、单色性、相干性, 使它自 1960 年问世以来, 在短短几十年间就得到了迅速的发展. 现在, 激光技术已在工农业生产、医疗卫生、通信、军事、文化艺术、能源等许多方面获得了重要应用. 那么, 激光有什么特点? 又有哪些具体的应用呢?

专业术语

激光
laser

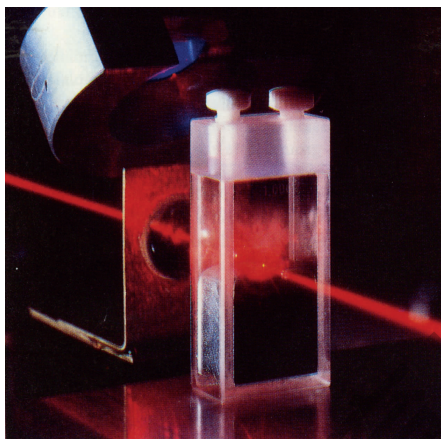


图 4-7-1 激光

激光的特性

什么是激光?

光是从物质的原子中发射出来的, 原子获得能量后处于不稳定状态, 它会以光子的形式把能量发射出去. 但是, 普通的光源, 如白炽灯, 灯丝中每个原子在什么时刻发光, 朝哪个方向发光, 都是不确定的, 发光的频率也不一样, 相位差不恒定, 这样的光不可能产生干涉, 因此照射的区域光强平均, 不会出现明暗相间的现象. 激光是一种人工产生的相干光. 这是它的第一个特点.

另一方面, 通过人工调制可以使得光的发射同时进行, 在瞬间集中能量发射在很小的区域内, 可以有很大的能量和摧毁力. 这就是激光武器的威力所在, 也是战争中叫做“死光”的原因. 所以激光具有亮度高的特点.

激光的第三个特点是它的平行度好. 即激光的光束高度平行, 这样激光的能量就不容易发散, 激光在传播很远的距离后仍能保持一定的强度.

激光的应用

如今，我们在生活中随处可见激光的“踪影”。

由于激光是相干光，它能像无线电波那样进行调制，用来传递信息。进入千家万户的光纤通信就是激光和光导纤维相结合的产物，激光的全息照相更是一个典型的激光相干性应用的例子。

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

平行度好的激光可以会聚到很小的一点上。现在广泛使用的DVD、CD唱片、计算机光盘就是利用激光记录信息的。由于激光的点可以很小，光盘上记录的信息的密度很高，即光盘上的信息量很大。

激光高亮度和可以会聚到很小的特点也被应用在工业、医学和美容等方面。例如，工业上的激光切割、激光焊接、激光制冷，医学上切割肿瘤的“光刀”、用于矫正视力的准分子激光技术，美容上的“点痣”、“祛斑”，军事上的激光武器等。

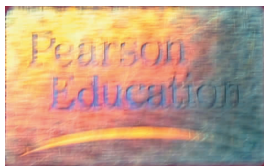


图 4-7-2 激光防伪标志

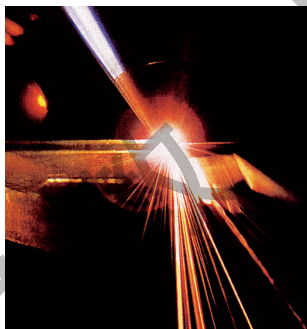


图 4-7-3 激光切割



图 4-7-4 激光准分子技术

激光的应用还有很多。

利用激光测量大气中水蒸气的饱和程度，这种方法可以准确预告降雨量，从而预报洪涝灾害，以便采取应对措施。

目前，治疗牙神经发炎、坏死的常用方法是用专用牙钻在牙齿上开洞，清除内部的神经，再用专用药物填充。这种疗法易使病人感到疼痛、紧张，而且会损害牙齿的牢固程度。而水激光治疗法的原理是使用波长为 2940 nm 的钪激光来处理病牙。这一波长的激光容易被水吸收，而牙齿内部的病变神经组织含有大量的水，因而激光的大部分能量被病变组织吸收，使它们蒸发。由于水激光不会对靶组织产生热效应，所以口腔组织就不会产生疼痛感。因此，牙科上应用水激光时，大多数操作不需要麻醉，且无痛、舒适，让我们轻松告别治疗牙病的疼痛、肿胀、流血的历史。

随着科学技术的发展，激光的应用会越来越多。

全息照相

全息照相与普通照相不同，从它的照片可以看到三维的图像，而普通的照片看到的图像是平面二维的。全息照相为什么能拍摄三维的照片呢？

用于普通照相的感光胶片只能记录物体上各个点发出的光的强度（振幅），而实际上物体不同点发出的光束不但振幅不同，位相也不同，振幅与位相的不同反映出物体不同点的明暗与远近。普通照相由于只记录了光波的振幅，因此不能反映物体不同点的远近的差别，而只能反映各个部分的明暗情况，所以把立体的物体变成了平面的图像。如果能够把物体各点发出的光波的振幅与位相同时记录下来（叫做全息记录）并使之再现（叫做全息再现），则当这些光波被人眼接收时，眼中的图像将和直接观看物体一样是三维的。这种能同时记录振幅与位相的照相叫做全息照相。

全息照相利用了激光的相干性、激光的平行度好以及激光的大强度的特点。



图 4-7-5 全息再现

用激光观察全息照片

观察与思考

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

通过以上的观察可知，视角不同，底片的远近不一样，到达眼睛的物光不一样，因而会看到全息相片的不同侧面。

http 我们的网站

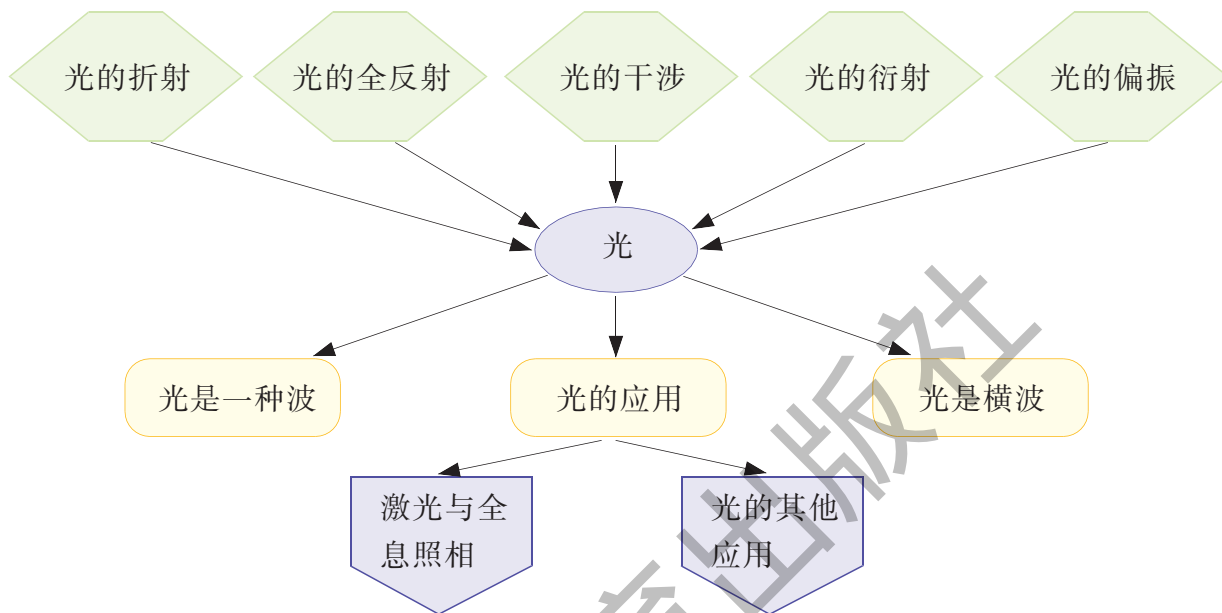
飞秒激光。

练习

1. 激光的“平行度”是指波的传播方向平行，那么，激光的波前是什么形状？
2. 全息再现中的像与海市蜃楼中的像有什么异同？

本章小结

一、知识结构



二、回顾与评价

光波与机械波的比较：

光波与其他电磁波的比较：

我能解释的其他光现象是：

我对科学研究新方法的体会是：

回顾与评价

我对设计实验方案的体会是：

我还有的疑问：

我还想说：

我还想做：

习 题 四

1. 一束平行光从空气中斜射入水中，当入射角逐渐增大时，折射角（ ）。

- A. 仍保持不变
- B. 将逐渐减小
- C. 将逐渐增大，但总小于入射角
- D. 将逐渐增大，并有可能大于入射角

2. 有一个底面直径和高都是 d 的空圆筒，人眼在 A 处恰好能看到底圆跟侧壁的交点 B ，如图 4-1 所示。现将某种液体注满圆筒，人眼在 A 处沿原方向看去，能看到底圆的中心 C ，则这种液体的折射率为_____。

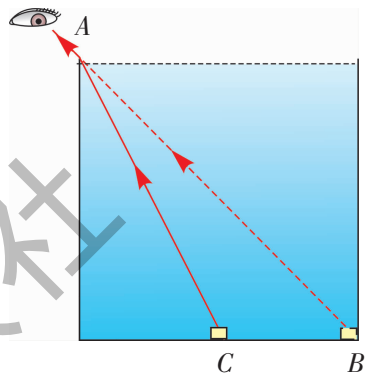


图 4-1

3. 一个游泳池的池底是水平面，池水深 1.2 m。有一直杆竖立池底，浸入水中的部分是杆全长的一半，当太阳光以与水平方向成 37° 角射在水面上时，测得杆在池底的影长为 2.5 m，求水的折射率。

4. 有人在河面上游泳，看见河底有一物体与他的眼睛在同一竖直线上，当他再前进 4 m 时，物体忽然不见了，已知水的折射率为 $\frac{4}{3}$ ，则河深_____m。

5. 下列现象中，属于光的干涉现象的是（ ）。

- A. 肥皂泡上的彩色条纹
- B. 雨后天边出现彩虹
- C. 早晨东方的天边出现红色朝霞
- D. 荷叶上的水珠在阳光下晶莹透亮

6. 在一次观察光衍射的实验中，观察到如图 4-2 所示的清晰的明暗相间的图样，那么障碍物（黑线为暗纹）应是（ ）。

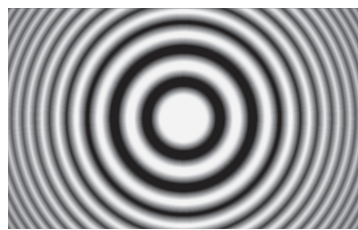


图 4-2

- A. 很小的不透明圆板
- B. 很大的中间有大圆孔的不透明圆板
- C. 很大的不透明圆板
- D. 很大的中间有小圆孔的不透明圆板

7. 激光是今后战争中的有效武器，有关它的使用，下面说法中正确的是（ ）。

- A. 空中攻击海中隐藏的潜艇时，应瞄准所看到的目标
- B. 海底的潜艇用激光炮攻击空中飞行的飞机时，瞄准目标的上方
- C. 地面上的激光炮，瞄准空中的飞机就能击中目标
- D. 在地面上用激光炮攻击飞行的飞机时，应瞄准目标的正前方

8. 频率为 7.5×10^{14} Hz 的红光，射入折射率为 1.5 的玻璃中，波长缩短了_____，频率增加了_____Hz，传播速度变为_____m/s。

9. 在双缝干涉实验中，用频率 $f = 5 \times 10^{14}$ Hz 的单色光照射双缝，若在屏上点 P 到双缝

之差为 $0.9 \mu\text{m}$, 则点 P 将出现_____条纹. 若将整个装置放入 $n=2$ 的介质中进行上述实验, 则点 P 将出现_____条纹.

10. 用平行的单色光垂直照射不透明的小圆板, 在圆板后面的屏上发现圆形阴影的中心处有一个亮斑, 这是光的_____现象.

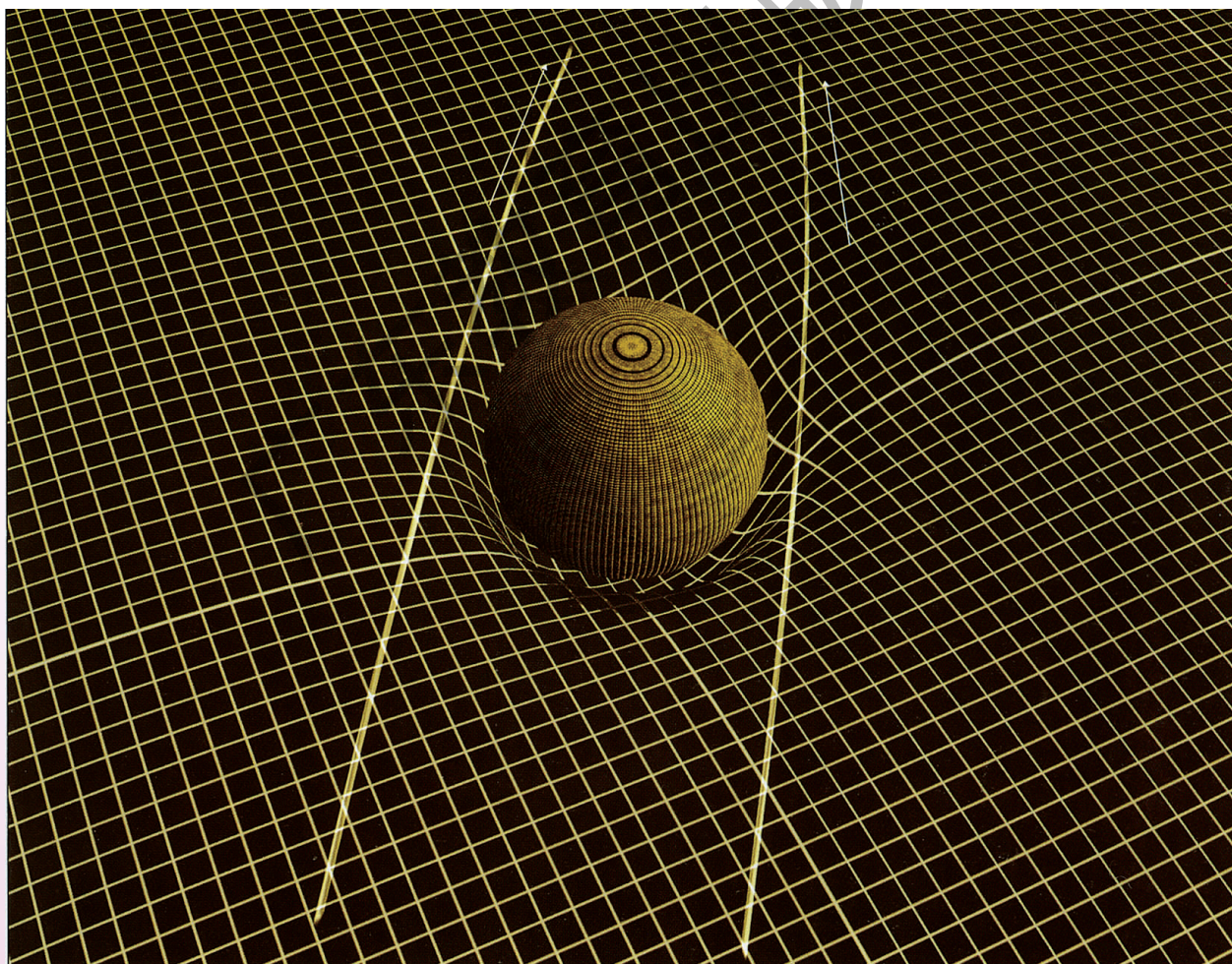
11. 频率为 $6 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 的单色光从 S_1 和 S_2 投射到屏上, 并且 S_1 与 S_2 振动方向相同. 若屏上的点 P 到 S_1 与点 P 到 S_2 的路程差为 $3 \times 10^{-6} \text{ m}$, 那么点 P 是明条纹还是暗条纹? 设 O 为到 S_1 和 S_2 路程相等的点, 则 PO 间有几条暗纹、几条明纹?

广东教育出版社

第五章

相对论

19 世纪中叶，随着电磁学的研究不断取得进展，许多新的电磁现象使人们耳目一新，有些科学家想将这些电磁规律“统一”在力学（指经典力学）的规律中，设计了许多“模型”和理论，最后都因过于繁琐和牵强，得不出真正的结果。另一批科学家则从电磁现象本身的规律出发，大胆地提出一些与力学不尽相同的新概念和新理论，如法拉第关于力线和场的概念，麦克斯韦关于电磁波和光的电磁理论，这些概念和理论向牛顿力学提出新的挑战。从 19 世纪中叶到 20 世纪初，科学家为了“统一”力学与电磁学、光学的规律，对光（电磁波）能在真空中以固定的速度传播，真空中是否存在“以太”这样一种“介质”，进行了许多实验和理论的探究。正是这个挑战和争论，产生了爱因斯坦的相对论。



第一节 狭义相对论的基本原理

狭义相对论的诞生

按照牛顿力学的观点，力是接触力（如拉力、压力等），如果力能超越一个空间进行作用，就要靠充满空间的介质来传递这种“作用”，只有这些介质运动或发生弹性形变，才能使力的传递成为可能。并且，机械波的传递也是由于介质的运动或弹性形变，使波携带的信息或能量能从一点传递到邻近的一点。但是，当人们研究电磁现象时，却发现真空中也能传递力和电磁波。那么，真空中有没有与传递机械波的介质相类似的东西呢？

直到 20 世纪初，人们都在讨论，真空中是否有一种叫“以太”或者“光以太”的东西存在。支持者们认为“以太”是传播电磁作用的介质，电和磁是靠“以太”这种介质传递的。同时，他们假设“以太”有一些奇怪的性质：“以太”没有重量，既看不见也摸不着，但它的“弹性”（如果比做机械波靠介质的弹性来传递的话）却非常好，否则它就不能以这么快的速度传递光或电磁波。

那么，当物体在“以太”中运动时，“以太”是否参与了运动？如果参与了运动，光波（电磁波）在运动的“以太”中将如何传播呢？当时的人们普遍假设“以太”是不参与物体运动的，也就是说“以太”是一个绝对静止的参考系。

如果把地球作为一个参考系，光相对于“以太”的速度为 c (3×10^8 m/s)，如果地球以速度 v 相对于“以太”运动，在地球上的人观测到光的速度应该是 c 与 v 的合成，当光与地球运动的方向一致时，测得的速度应是 $c-v$ ；而方向相反时，测出的速度应是 $c+v$ 。这就是说，如果“以太”理论成立，在地球上测不同方向的光，得到的光速是不相同的。可是，1887 年迈克耳逊和莫雷用干涉仪在两个山头之间所做的多次实验证明，光的传播速度与参考系（地球）运动的方向和大小无关。这一实验是对“以太”学说的致命打击，但怎样在理论上去说明这一事实呢？

爱因斯坦在大学时就开始注意“以太”的争论及迈克耳逊和莫雷的实验。他深信麦克斯韦电磁理论和光速不变的事实。可是这和我们平常以固定不动的参考系的速度加减法有矛盾，为什么会有矛盾？怎样才能解决这个问题？爱因斯坦对这个问题想了整整 7 年，经常与朋友讨论。终于有一天，他清楚了这问题的关键所在，不同速度的地方（即参考系）的时间是不一样的，

时间会因相对速度而改变.

他是怎样想到这个答案的呢? 爱因斯坦喜欢在脑子里琢磨思考, 做“思想实验”. 一天, 他在专利局下班后, 乘汽车回家, 当车离开车站时, 他看到站上的时钟是下午 6 时, 他想: 如果汽车以光速前进, 在汽车上看到站上的钟会成为什么样的呢? 当汽车以光速离开, 6 时以后的光线已经赶不上他了, 他看到站上的钟会停在 6 时, 但他的手表及汽车内的钟仍是照常走 (超过 6 时), 也就是说在汽车上的爱因斯坦看站上的钟和汽车上的钟的时间是不同的, 因为汽车与站有相对速度. 这个奇异而大胆的想法是一个重大的突破, 很好地“处理”了经典力学与电磁理论之间的矛盾, 经典力学中认为时间是绝对的, 具有不同速度的惯性参考系的时间是相同的. 但这个概念是错误的, 或者说只是在运动物体速度远小于光速的问题中是近似正确的. 当物体运动速度并非远小于光速时, 我们对时间、长度、质量等概念都要重新考虑, 并且我们必须与经典力学中的“时间与空间是绝对的, 彼此无关”的这一概念彻底决裂. 下面我们来看看相对论中的最基本原理和几个重要的结论.

爱因斯坦指出, 相对论并不是凭空想出来的, 它的创立完全是出于这样一种愿望: 要使理论尽可能适合所观察到的现象, 即理论必须以实验事实为依据, 要经得起实验的检验.

狭义相对论的基本原理

1905 年, 爱因斯坦提出狭义相对论的两个基本假设:

第一个假设: 在不同的惯性参考系中, 一切物理规律都是相同的. 即自然界不存在特殊的惯性参考系, 对于一切物理现象的描述来说, 所有惯性参考系都是等效的. 这一假设称为爱因斯坦相对性原理.

第二个假设: 真空中的光速在不同的惯性参考系中都是相同的, 与光源的运动和观察者的运动无关. 这一假设称为“光速不变原理”.

“同时”的相对性

何谓两地的事件同时发生? 爱因斯坦根据光速不变原理提出一个判断“两个事件是否同时发生”的准则: 假设相距为 d 的 A 、 B 两地发射光信号 (这是两个事件), 在 A 、 B 的连线中点 C 设一信号接收站, 如果 C 点同时接收到来自 A 、 B 的光信号, 就可以判定分别从 A 、 B 发出光信号这两个事件是同时发生的, 因为 $t_A = t_B = \frac{d}{2c}$. 当然也可以由 C 点向 A 、 B 两地发射光信号, A 、 B 两地收到信号 (两个事件) 可以判定为是同时的.

现在我们研究一个问题: 两个事件, 如果在某个惯性参考系里观测是同时发生, 是否在其他惯性参考系中观测也是同时发生?

如图 5-1-1 所示, 设想一列高速 (接近光速) 运行的列车沿平直轨道即将进站, 当在站台上观测列车车厢的首尾两点 A' 、 B' 与站台上的两盏灯 A 、 B 的位置刚好重合时, 站台上的 A 灯和 B 灯都立即发出闪光. 现在 A 、 B 灯连线中点 C 放一时钟记录两闪光到达 C 点的时刻, 如果时钟记录显示是同一时刻, 就说明以地面为参考系, A 灯闪光和 B 灯闪光这两个事件是同时发生的. 因为地面是个惯性参考系, 如果 A 、 B 灯同时发光, 两束光传播的速度相同, 距离相同, 当然同时到达中点 C .

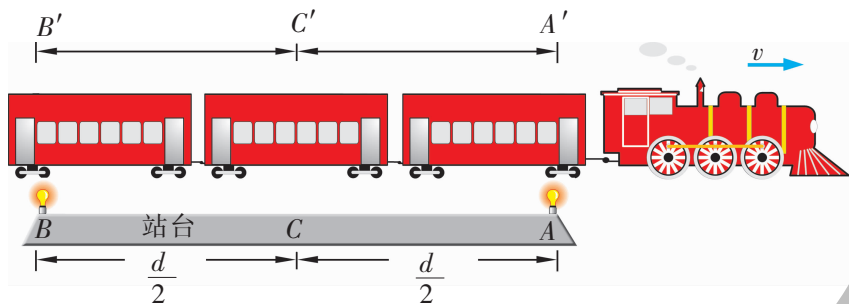


图 5-1-1 同时的相对性

如果将上述时钟放在列车上 A' 、 B' 的连线中点 C' , 它是否仍然记录到 A 、 B 闪光同时到达呢?

由于列车向右行驶, 而光速不变, 放在车上 C' 的时钟将先接收到来自 A 灯的闪光, 后接收到来自 B 灯的闪光, 即该时钟将记录

到 A 灯闪光在前, B 灯闪光在后, 这说明以列车为参考系, A 灯闪光和 B 灯闪光这两个事件不是同时发生的.

也就是说, 事件的同时性因参考系的选择而异, 这就是“同时的相对性”.

例: 地面上 A 、 B 两个事件同时发生. 如图 5-1-2 所示, 对于坐在火箭中沿两个事件发生地点 A 、 B 连线飞行的人来说, 哪个事件先发生?



图 5-1-2

解: B 事件先发生.

分析: 以地面为参考系, A 、 B 两个事件同时发生, 即如在 A 、 B 连线中点 C 放一时钟, 将同时接收到来自 A 、 B 的信号. 设想该时钟以与火箭相同的速度飞行, 则先接收到来自 B 的信号, 后接收到来自 A 的信号, 即以火箭 (或火箭上的人) 为参考系, B 事件先发生.

练习

1. 以我们的生活经验常识或经典物理学的知识来判断, 两个事件在某一惯性参考系里观测是同时的, 是否在其他参考系里观测也是同时的?

2. 为什么我们在日常生活中没有觉察到这种“同时”的相对性?

第二节 时空相对性

狭义相对论还告诉我们一些令人惊奇的结论：运动的时钟变慢，运动的尺子在运动的方向上缩短。这到底是为什么？这些结论是如何从狭义相对论的两个基本假设得出的呢？

时间间隔的相对性

经典物理学认为，两个事件在不同的惯性参考系中观测，它们之间的时间间隔总是相同的。但是，从狭义相对论的两个基本假设出发，我们会发现，两个事件之间的时间间隔在不同参考系内观测是不同的。

例如，一列匀速直线前进的火车，车厢地板上 A 处有一盏灯，在灯的正上方车厢顶 B 处有一面镜子， AB 的高为 h 。现在我们要完成一个光学实验：打开灯的开关，光信号从 A 到 B ，再由镜面反射回到 A 处。车厢里站着一个人观测者小明，站台上站着一个人观测者小芳，如图 5-2-1 所示。

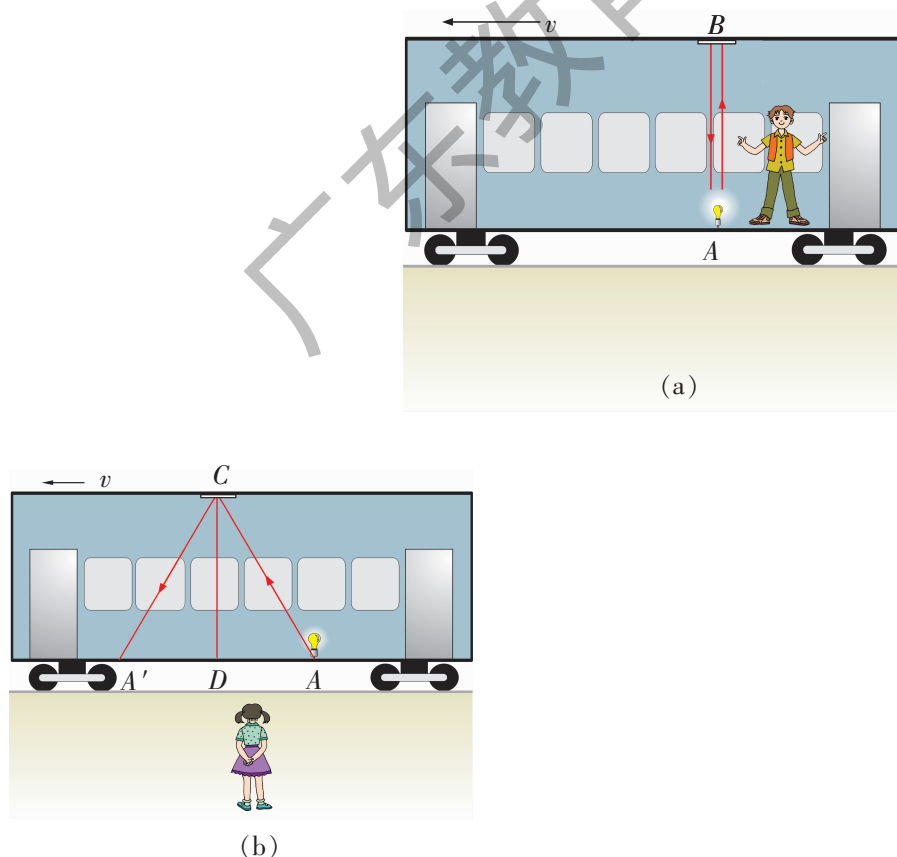


图 5-2-1 光学示意图

在车厢里的小明观测到，光信号走过的距离是 $2h$ [如图 5-2-1 (a)]，因此往返时间 $\Delta t' = \frac{2h}{c}$ 。

而在站台上的小芳观测到，光信号走过的距离应为路径 ACA' [图 5-2-1 (b)]，光信号在从灯传递到镜子的过程中，火车向前移动了一段距离，镜子已跟随车厢移动到 C ，灯也从 A 移动到 D 。光信号再从镜子反射到灯的过程中，灯已从 D 移动到 A' 。设火车的速度为 v ，小芳所测得的光信号往返时间为 Δt 。根据光速不变原理， $ACA' = c\Delta t$ ，应用勾股定理可得

$$\left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2 = \left(\frac{c\Delta t}{2}\right)^2 - h^2$$

这里用到了相对论的第二个假设，即对地面参考系来说，光速也是 c 。

以上两式消去 h 可得

$$\Delta t' = \Delta t \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad (5.2.1)$$

因为 $\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} < 1$ ，所以总有 $\Delta t > \Delta t'$ 。

这是一个令人吃惊的结论：地面上的人（小芳）和车厢里的人（小明）对光信号往返的时间测量的结果不一样，地面上的人测得的时间（ Δt ）要比车厢里的人测得的时间（ $\Delta t'$ ）长些。

更严格的推导表明，上式具有普遍意义。它表明在地面上观测，火车上的时间进程变慢了，车上的一切物理过程、化学过程和生命过程都变慢了：时钟走得慢了，人的心脏跳动、呼吸、消化、思维活动和一切生理过程都变慢了……这就是时间间隔的相对性，也称为“时间膨胀”或“钟慢效应”。



讨论与交流

火车上的人自己会有时间变慢的感觉吗？

空间距离的相对性

我们继续“火车实验”。现在要完成一项任务：测量一个火车站站台的长度。我们没有尺，但有一个钟，假想有一个火车头即将匀速通过站台，已知它的速度为 v ，如图 5-2-2 所示。



图 5-2-2 火车站站台测量

我们可以这样测量：站台的两端分别是 A 和 B 。记录火车头进站到达 A 时的时刻 t_1 ，然后再记录当火车头出站到达 B 的时刻 t_2 ，则火车头通过整个站台所用的时间 $\Delta t = t_2 - t_1$ ，根据 $s = v\Delta t$ ，就可以算出站台 AB 的长度。

假定有两个观测者：小明坐在火车头里，小芳站在站台上，他们每人各有一个钟，各自用自己的钟来测量站台 AB 的长度。我们知道，由于时间的相对性，小明测得的时间 $\Delta t'$ 比小芳测得的时间 Δt 要短，所以小明测出的站台的长度 $l' = v\Delta t'$ 比小芳测量的长度 $l = v\Delta t$ 要短。

通过严格的数学推导可以得到， l' 和 l 有如下关系

$$l' = l\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad (5.2.2)$$

由于 $\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} < 1$ ，所以总有 $l' < l$ 。

(5.2.2) 式具有普遍意义，它表明当物体相对于观察者运动时，在运动的方向上，观察者认为它的长度要缩短，严格的数学推导表明垂直于运动方向的长度则不会发生变化。这就是空间距离的相对性，也称为“长度收缩”或“尺缩效应”。

我们可以想象这样一幅图景：对于高速运行的火车，地面上的人将观测到，沿着火车运动的方向，火车的长度缩短了、车窗变窄了……但车厢和车窗的高度都没有变化。当火车速度非常接近光速时，相对于地面参考系来说，火车和它里面的一切物体沿运动方向将缩短得像薄纸片那样。反过来也是如此，即火车上的人也观测到地面上的一切物体都沿火车运动的方向变薄了。

相对论的时空观

经典物理学认为时间和空间是脱离物质而存在的，是绝对的，时间和空间之间也是没有联系的。举例来说，经典物理学把“空间”设想成物质运动的场所，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。时间与此相似，它均匀连续地流过，与物质的运动无关。

相对论则认为有物质才有时间和空间，时间和空间与物质的运动状态有关，因而时间与空间并不是相互独立的，这在钟慢效应和尺缩效应中已经具体地体现出来。

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时间和空间的性质。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时间和空间的认识。科学的发展和人们对于自然界的认识就是这样一步一步地前进的。

 资料活页

时空相对性的实验验证

如果用我们的“常识”来衡量钟慢效应和尺缩效应，一定会觉得这是令人难以相信的怪事。这些效应究竟是不是真实的呢？

由于宏观物体的速度远小于光速，我们日常生活中几乎感觉不到这种相对性，但在高能物理的领域里，时空的相对性得到了大量实验的验证。

最早的证据跟宇宙线的观测有关（1941年）。宇宙线是来自太阳和宇宙深处的高能粒子流，它和高层大气作用，又产生多种粒子，叫做次级宇宙线，我们把它们统称为宇宙线。次级宇宙线中有一种粒子叫做 μ 子，是一种不稳定的粒子，在与它相对静止的参考系中来看，它的寿命很短，平均经过 2×10^{-6} s就衰变为电子和中微子。它在地面参考系中的速度约为 $0.99c$ ，所以在它的寿命之内，运动的距离只有约590m。 μ 子生成的高度在离地面100km以上，这样说来 μ 子不可能到达地面，但地面上实际观测到许多 μ 子，这只能用相对论来解释。

 练习

1. 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”上花了多少时间？
2. 一架静止时长 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一半呢？

第三节 质能方程与相对论速度合成定理

相对论带来了时空观的变革，时空与物质的运动紧密联系，这使得质量、能量、速度合成等概念在相对论中都不同于经典物理学。

相对论质量



图 5-3-1 不同参照系的质量

如图 5-3-1 所示，一个站在地上时质量为 60 kg 的人，当他登上运动的火车，他的质量还是 60 kg 吗？也许你会毫不犹豫地回答：“还是 60 kg。”经典力学中质量守恒几乎是不言而喻的，但相对论告诉人们，质量实际上是随着速度的变化而变化的。根据动量守恒定律以及时空的新概念，可以推导出相对论中质量和速度的关系

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad (5.3.1)$$

式中 m_0 是物体静止时的质量（也称为静质量）， m 是物体以速度 v 运动时的质量。这个关系式称为相对论质速关系，它表明物体的质量会随速度的增大而增大。

为什么我们在日常生活中感觉不到质量的这种变化呢？根据 (5.3.1) 式，一个静止时质量为 1 g 的物体，如果以 30 km/s 的速度（等于地球绕太阳公转的速度）运动，它的质量也只不

过变为 1.000 000 005 g. 因此, 我们完全可以认为低速运动中, 物体的质量是一个与运动速度无关的恒量. 但在高速运动中, 情况就不相同了. 在现代粒子加速器里, 如果把粒子加速到光速的 0.9998 倍, 则粒子质量就会增大为静止时质量的 50 倍.

1963 年, 迈尔实验以万分之四的精确度, 证明速度达到 $0.987c \sim 0.990c$ 的电子质量服从相对论质速关系, 从而使 (5.3.1) 式得到了严格的验证.

质能方程

相对论另一个重要结论就是著名的爱因斯坦质能方程:

$$E=mc^2 \quad (5.3.2)$$

质能方程表达了物体的质量和它所具有的能量关系: 一定的质量总是和一定的能量相对应. 静止物体的能量为 $E_0=m_0c^2$, 这种能量叫做物体的静质能. 每个有静质量的物体都具有静质能. 对于一个以速率 v 运动的物体, 其总能量为动能与静质能之和:

$$E=E_k+E_0$$

光速 $c=3 \times 10^8$ m/s, 按质能方程计算, 1 kg 的物体包含的静质能为 9×10^{16} J. 而 1 kg 汽油的燃烧值为 4.6×10^7 J, 这只是其静质能的二十亿分之一 (5×10^{-10}). 可见, 物质所包含的化学能只占静质能的极小一部分, 而核能约占它总静质能的 8.5×10^{-4} . $E=mc^2$ 这个方程式于 1945 年 7 月 16 日被在新墨西哥州阿拉莫戈多沙漠上空爆炸的原子弹所证实 (图 5-3-2). 这样一个简短的公式为开创原子能时代提供了理论基础.



图 5-3-2 原子弹爆炸

相对论的速度合成定理

物体的机械运动速度能超过真空中的光速吗? 也许有人认为, 既然现代加速器已经能把一些微观粒子加速到接近光速,

如果继续加速，经过一段时间后，它的速度不就超过光速了吗？

但是我们知道，质量是物体惯性大小的量度。由 (5.3.1) 式可知，随着速度的增大，质量也增大，当物体的速度趋近光速 c 时，质量 m 趋向无限大，惯性也就趋向无限大，要使速度再增加，就极为困难了。这时，一个有限的力不管作用多长的时间，速度实际上是停止增加了。事实也如此，用现代高能加速器对电子加速，可以使每个电子的能量增加到 200 亿电子伏特，根据 (5.3.1) 式和 (5.3.2) 式，可以算出这样的电子的速度是光速 c 的 0.999 999 999 6 倍，但还是小于 c 。再加速也只能使小数点后的 9 的数目增多，使电子速度越来越接近光速，但总不能达到或超过光速。

用动力学的方法，不能使物体达到或超过光速了，用运动学的方法，能不能做到这一点呢？例如，设有两艘飞船 A 、 B 都在地球上空飞行， A 相对于地球以 $1.8 \times 10^5 \text{ km/s}$ （即 $0.6c$ ）的速度飞行， B 则以同样大小的速度向相反方向飞行。可能你会认为，这时 A 相对于 B 的速度应等于 $3.6 \times 10^5 \text{ km/s}$ ，岂不是大于光速了吗？

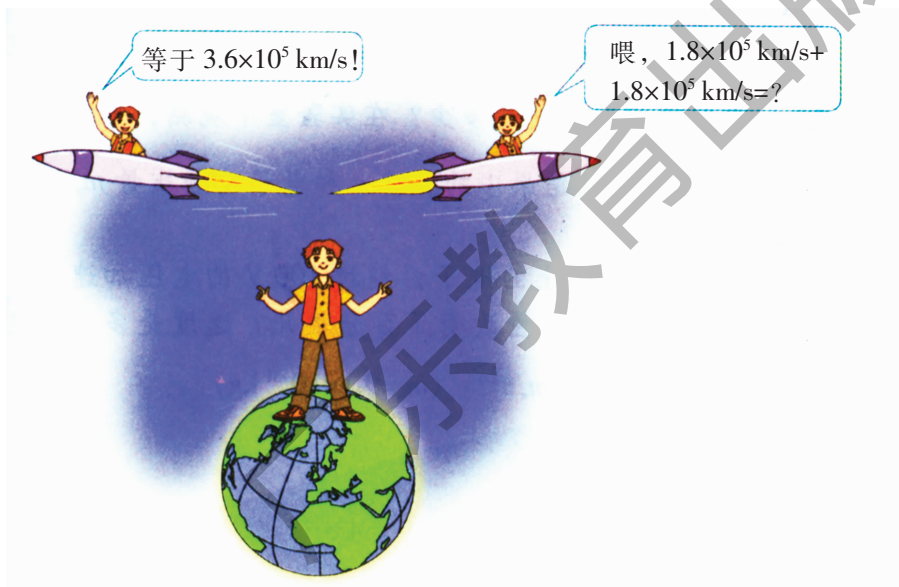


图 5-3-3 以地球为参照系，在相反方向以 $0.6c$ 飞行的两物体

相对论的回答是否定的。上述的回答实际上是运用了经典的速度合成原理。而相对论认为，在这样高速运动的情况下，经典速度合成原理已经不适用了。

相对论认为，如果一列沿平直轨道高速运行的火车对地面的速度为 v ，车上的人以速度 u' 沿着火车前进的方向相对火车运动，那么这个人相对地面的速度 u 为

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u'v}{c^2}} \quad (5.3.3)$$

这就是相对论的速度合成公式。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. 这两个速度的方向垂直或成其他角度时, (5.3.3) 式不适用, 这种情况我们暂不进行讨论.

从 (5.3.3) 式可以看出, 如果 u' 和 v 都接近真空中的光速, 它们的合速度 u 也不会超过光速, 这意味着光速是速度的极限, 任何物体的机械运动既不能达到更不能超过光速.

此外, 当 $u'=c$ 时, 不论 v 有多大, 总有 $u=c$, 这表明, 从不同参考系中观察, 光速都是相同的, 这与相对论的第二个假设光速不变原理相一致.

对于速度远小于光速的情形, $v \ll c$, $u' \ll c$, 这时 $\frac{u'v}{c^2}$ 可忽略不计, 相对论的速度合成公式可近似变为

$$u = u' + v'$$

这就是经典速度合成公式. 这个结果又一次让我们看到, 牛顿力学是相对论力学在 $v \ll c$ 时的近似. 可见, 相对论并没有推翻牛顿力学, 也不能说牛顿力学已经过时了, 相对论是使牛顿力学的使用范围变得清楚了.

练习

1. 两个电子相对运动, 每个电子相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? (计算结果中的光速 c 和电子的静质量 m_e 不必代入数据)

2. 一个原来静止的电子, 经过 100 V 的电压加速后, 它的动能是多少? 它的质量改变了百分之几? 速度是多少? 这时不能使用公式 $E_k = \frac{1}{2}m_e v^2$? ($m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$)

第四节 广义相对论

在狭义相对论中，所有的惯性参考系都是等效的。那么，加速运动参考系（非惯性参考系）是否也是等效的呢？1907年，爱因斯坦从狭义相对论的匀速直线运动的相对性转向研究更为复杂的加速运动的相对性，开始了关于引力场理论的“思想实验”。

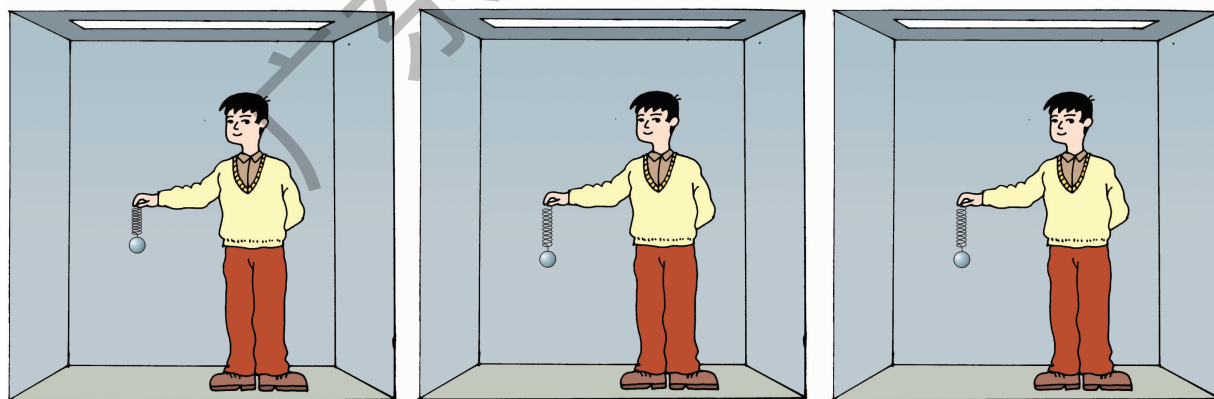
爱因斯坦说：“我对狭义相对论感到不满足，因为它限制在彼此匀速直线运动的参照系，不能用于一般运动的参照系。我极力想去掉这个限制，希望能系统地阐述一般情况下的问题。”

广义相对论基本原理

牛顿的万有引力定律是研究天体运动的理论基础。从这个定律看，引力是物体间的一种瞬时超距作用：两个物体无论相距多远，它们的引力都可以不花任何时间立刻传递过去。这和狭义相对论中“任何相互作用的传播速度都不能超过真空中的光速”的观点相矛盾，说明了经典的引力理论与相对论的时空观念是不相容的。此外，狭义相对论是适用惯性参考系的理论，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。广义相对论正是源于爱因斯坦对这两个难题的思考。

1915年，爱因斯坦提出了广义相对论的两个基本假设：

第一个假设是等效原理。具体表述为：在物理学上，（在无限小的体积中均匀的）引力场等效于一个做匀加速运动的参考系。



(a) 电梯静止

(b) 电梯加速上升

(c) 电梯静止，引力场增加

图 5-4-1 封闭电梯内的悬挂弹簧实验

我们来进行一个思想实验：设想你站在一个封闭的电梯里，请你来判断电梯是处于静止状态还是加速上升。你可能采用如图 5-4-1 所示的方法：看电梯里一挂重物的弹簧长度的变化。如图 5-4-1 (a)，电梯静止时，弹簧长度为 L_1 ，如果电梯匀加速上

升, 弹簧长度进一步伸长为 L_2 , $L_2 > L_1$, 如图 5-4-1 (b), 由此可判断电梯在匀加速上升. 但如果电梯仍静止不动, 在电梯下面增加一个新的引力场, 或者说引力场的强度增加了, 重物就会更重, 也会把弹簧拉得更长, 如果引力场的增强恰好将弹簧也拉长至 L_2 , 如图 5-4-1 (c), 这时还能用上述方法判断电梯是静止的还是匀加速运动吗? 显然不能, 因为弹簧的变长既可能是电梯加速上升而引起的, 也可能是引力场增强而引起的, 这两种情况是等效的. 即引力场等效于无引力场中的加速运动.

第二个假设是广义相对性原理. 爱因斯坦把狭义相对性原理从匀速和静止参考系推广到做加速运动的参考系, 认为所有的参考系都是平权的, 不论它们是惯性参考系还是非惯性参考系, 对于描述物理现象来说都是平等的.

广义相对论的主要结论

广义相对论很快得到了科学界的承认, 因为爱因斯坦由广义相对论提出的几个可观测预言都一一得到了实验验证.

1. 光线在引力场中偏转. 根据广义相对论, 物质的引力会使光线弯曲, 引力场越强, 弯曲越厉害. 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. 如图 5-4-2 所示, 由于太阳引力场的作用, 从一个远处的恒星发出的光经过太阳附近时, 会由于太阳的引力发生偏折, 这样, 在地球上看到这个星球时, 看到的位置与实际位置不符, 它似乎来自另外一个方向. 其倾斜的角度据爱因斯坦的计算, 应当是 $1.75''$.

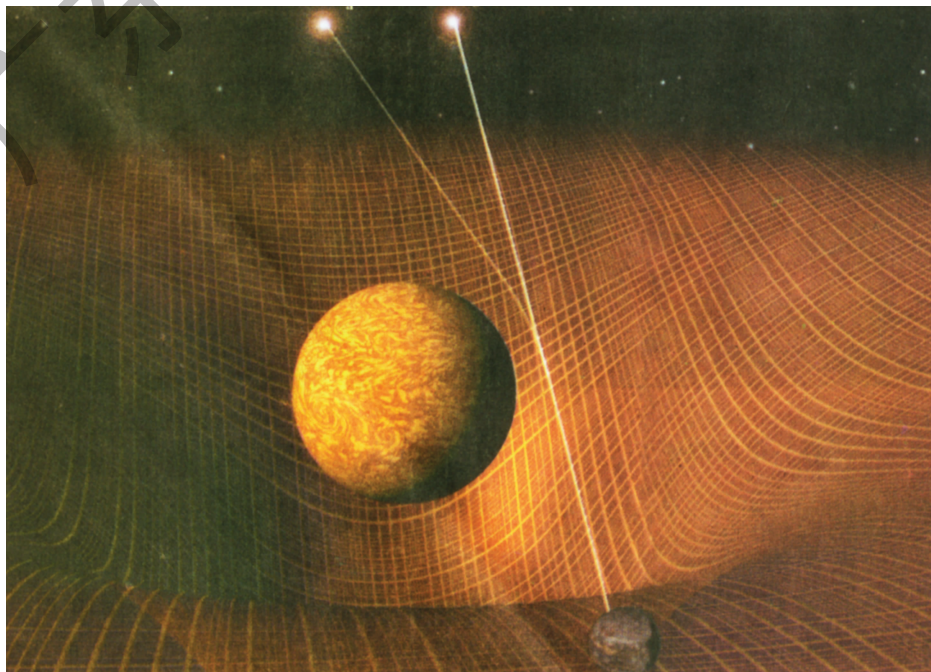


图 5-4-2 太阳附近的光线弯曲

但是，平常明亮的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，结果完全证实了爱因斯坦的预言。

2. 引力红移. 按照广义相对论，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，相应的光的波长变长、频率变小，光谱线会发生向红光一端移动的现象。光谱线的这种移动是在引力作用下发生的，所以叫“引力红移”，这一预言也已经在对白矮星（天狼星伴星）的观测中得到证实。

3. 水星近日点的进动. 天文观测显示，行星的轨道并不是严格闭合的，它们的近日点（或远日点）有进动（行星绕太阳一周后，椭圆轨道的长轴也随之有一点转动，叫做“进动”），这个效应以离太阳最近的水星最为显著，如图5-4-3。牛顿对此作出的解释与实际观测结果不相符，水星进动实际观测值是每世纪 $5600.73''$ ，与牛顿力学理论计算值相比多了 $43.11''$ 。虽然这个差别非常小，却成为天文学的一个难题，而广义相对论成功地预言了水星近日点的进动还应有每世纪 $43.03''$ 的附加值，这与实际观测十分接近，这不仅解决了这一难题，也被看作是广义相对论一大实验证据。

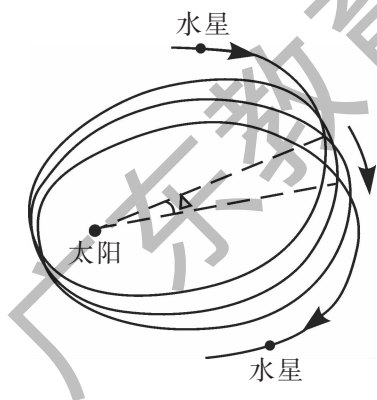


图 5-4-3 水星近日点的进动

狭义相对论和广义相对论建立以来，已经过去了很长时间，它经受住了实践和历史的考验，成为人们普遍承认的真理。广义相对论所揭示的物质与时空的关系，比起狭义相对论来说更为深刻，广义相对论对于研究天体和宇宙的结构和演化也有着重要的意义，是现代宇宙学理论的基础。

第五节 宇宙学简介

晴朗夜空，极目远望，天空中数不清的星星引起了数不清的疑问：宇宙有多大？这巨大的空间是无限的还是有限的？宇宙是一直在演化着的，还是总是保持这个样子？恒星、星系是怎样诞生的？……关于这些问题，从古至今，人们都在不断地探索和研究，形成了一部不断发展着的天文学史和宇宙学发展史。

人类对宇宙演化的认识

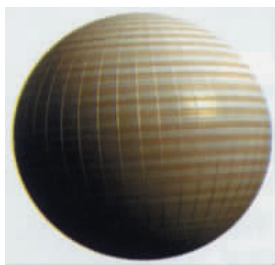


图 5-5-1 爱因斯坦的有限无界宇宙模型。由于空间是弯曲的，宇宙就像一个二维的球面，不分内部和外部，也没有边界、没有中心

17、18 世纪，人们根据观测和猜想来建立宇宙模型。1917 年，爱因斯坦利用广义相对论来考察宇宙学，使宇宙学的发展走上了新的路线，并且建立了现代宇宙学的第一个宇宙模型——由弯曲空间构成，没有边界、没有中心，宇宙中有物质，但在整体上是无运动的，所以这是一个有限的、静态的宇宙(图 5-5-1)。

英国科学家爱丁顿和苏联科学家费里德曼则提出了动态的宇宙模型，认为宇宙中的物质分布是均匀的，从各个方向看都是一样的，并且随时间的变化，宇宙在不断地膨胀。1929 年，美国天文学家哈勃通过观测发现一些星系在彼此退行和远离，这说明宇宙正在膨胀着，这为宇宙动态模型观点提供了有力的证据(图 5-5-2)。

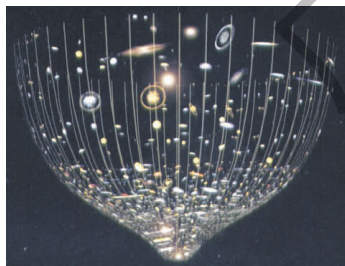


图 5-5-2 膨胀的宇宙示意图。对星系进行观测，表明宇宙正在膨胀，几乎任何一对星系之间的距离都在增大

比利时科学家勒梅特提出了宇宙起源说。勒梅特认为，最初的宇宙形成于“原始火球”，那时的“原始火球”只有几光年大小，和今天的宇宙大小比起来，那时的宇宙更像一个“鸡蛋”，所以被形象地称为“宇宙蛋”，其中充满一些物质和能量。“宇宙蛋”非常不稳定，稍有干扰它就炸开(之后的科学研究表明，“宇宙蛋”的爆发是一种物质的力量所引发)，爆炸的规模和激烈程度是难以想象的。爆炸后的碎片就逐渐形成了我们现在生存其中的或可以眼见的星系。

20 世纪 40 年代，美籍苏联科学家伽莫夫发展了勒梅特的理论，提出宇宙大爆炸学说，使人们对宇宙创生和演化的过程有了进一步的认识。

目前，科学家们已经计算出了宇宙的大小和年龄，分别是：

$$1.0 \times 10^{10} \text{ 年} < \text{年龄} < 2.5 \times 10^{10} \text{ 年}$$

$$1.0 \times 10^{26} \text{ m} < \text{半径} < 2.0 \times 10^{26} \text{ m}$$

一般说来，我们所居住的太阳系和银河系大约起源于宇宙开始后的 50 亿年，而地球则产生于 47 亿年前。

宇宙学的新进展

20 世纪后半期，一大批科学家继续在神秘的宇宙中探索，发现了许多更为新奇的现象：超新星的爆发、惊人的中子星、令人困惑的类星体、可怕的“黑洞”、有趣的“白洞”和“虫洞”、精确的脉冲星、神秘的时空隧道、不可捉摸的反物质、大量存在的暗物质……神奇而美妙的宇宙等待着人类与它的对话。图 5-5-3 至图 5-5-6 是拍摄宇宙中这些现象的部分照片。

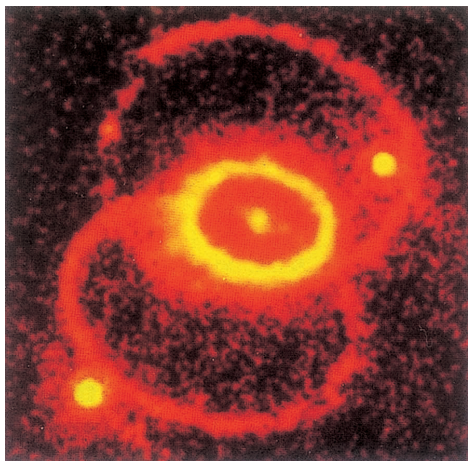


图 5-5-3 超新星 1987 年爆发的结果。中心的环是爆发吹散的膨胀的物质，而中央斑点是一个新的中子星



图 5-5-4 类星体 3C273——来自宇宙尽头的信息

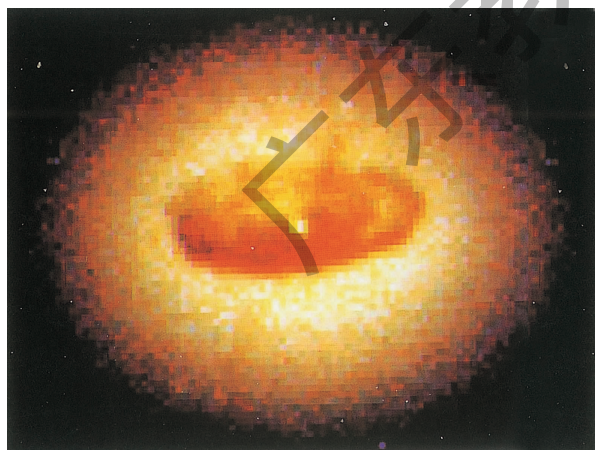


图 5-5-5 黑洞——这是哈勃空间望远镜在处女座中的称为 NGC4261 的一个星系的图像。它显示了向一个大质量黑洞旋入的尘埃和气体的圆盘。基于旋转气体的速度的计算暗示，中心物体具有 12 亿倍的太阳的质量，但它并不比我们的太阳系大很多

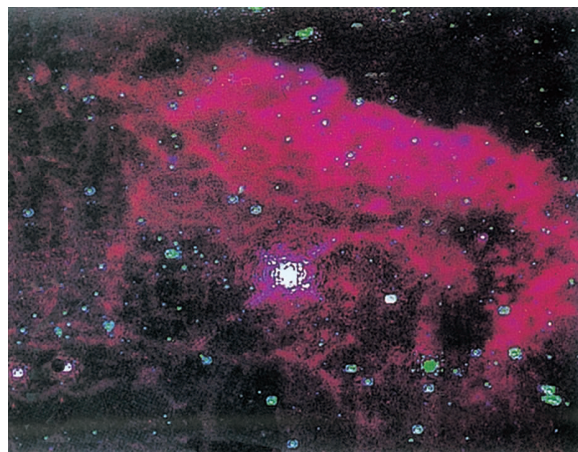


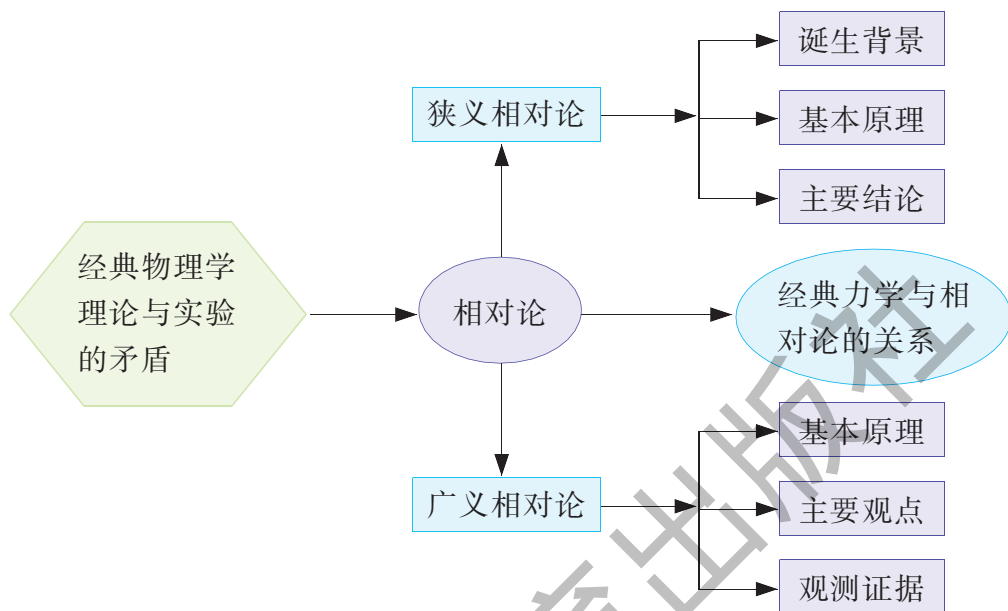
图 5-5-6 1997 年哈勃望远镜拍摄的宇宙照片，画面的中心亮点是银河系

实践与拓展

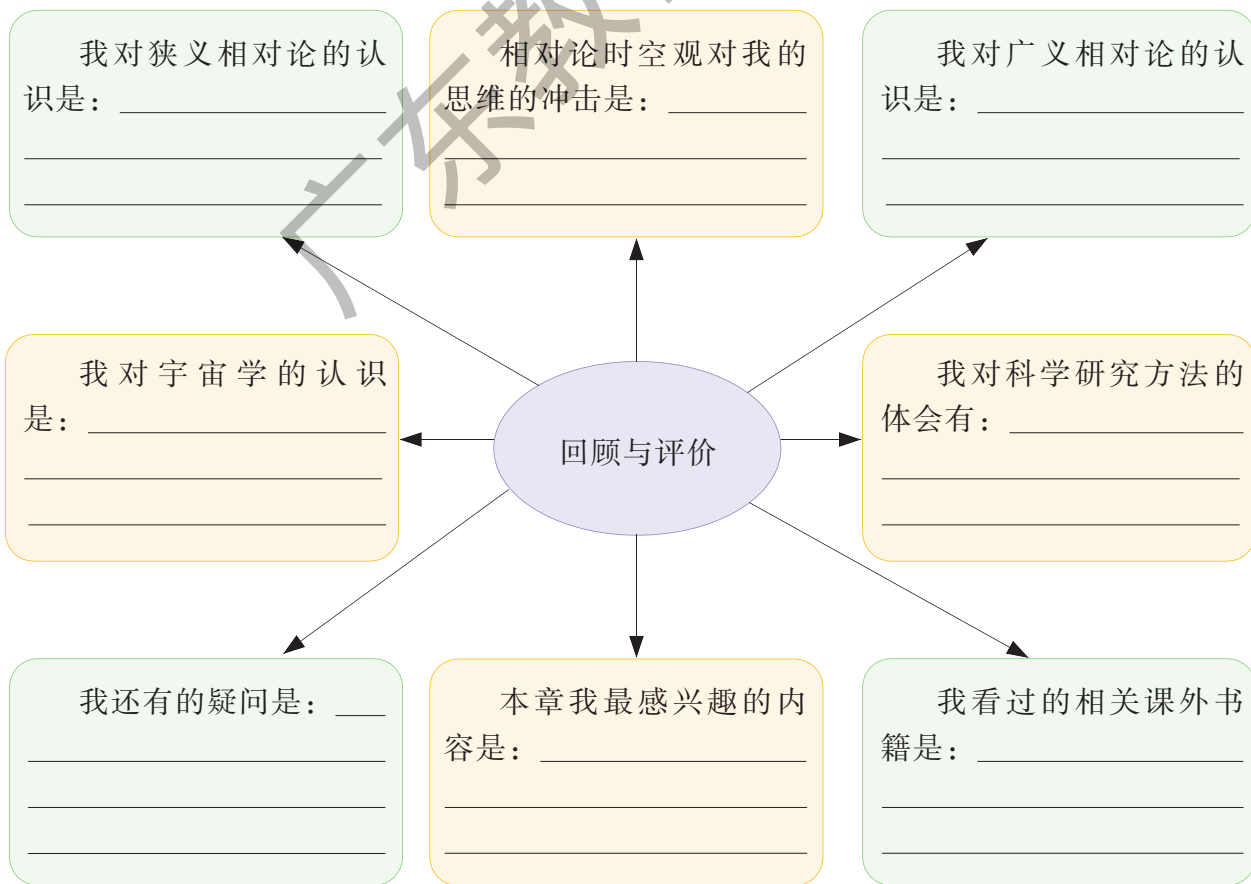
观看关于宇宙学的科普影片，关注宇宙学研究的进展。

本章小结

一、知识结构



二、回顾与评价



习 题 五

1. 什么是同时相对性？怎样根据狭义相对论的两个基本原理得出结论说明同时是相对的？

2. 时间间隔的相对性和空间距离的相对性各是指什么而言的？各举一个可以验证时间间隔相对性与空间距离相对性的实例。

3. 一固有长度 $L_0=90\text{ m}$ 的飞船，沿船长方向相对地球以 $v=0.80c$ 的速度在一观测站的上空飞过，该站测得的飞船长度及船身通过观测站的时间间隔各是多少？船上的宇航员测出的前述时间间隔又是多少？

4. 一个在实验室中以 $0.8c$ 的速度运动的粒子，飞行 3 m 后衰变，则观察到的同样的静止粒子衰变时间为多少？

5. 飞船以 $v=0.8c$ 的速度在中午飞经地球，飞船与地球的时钟都指示 12:00.

(1) 当飞船中时钟读数为 12:30，飞船飞经一个相对地球静止的行星宇航站，求宇航站时钟的读数。

(2) 在地球观察者看来，宇航站离地球有多远？

6. 相对于地球的速度为 v 的一飞船，要到离地球为 5 光年的星球上去。若飞船的宇航员测得该旅程为 3 光年，则 v 应为 ()。

A. $\frac{c}{2}$

B. $\frac{3c}{5}$

C. $\frac{9c}{10}$

D. $\frac{4c}{5}$

7. (1) 如果粒子的动能等于静质能的一半，求该粒子的速度。

(2) 如果该粒子的总能量是静质能的 k 倍，求该粒子的速度。

8. 静止质量为 m_0 的粒子以速度 v 运动，则其总能量为多少？当 $v=0.8c$ 时，其质量与静质量的比值为多少？

9. 把电子从 $0.9c$ 的速度增加到 $0.99c$ ，所需的能量是多少？这时电子的质量增加多少？ ($m_e=9.1\times 10^{-31}\text{ kg}$)

10. 了解了相对论的一些知识后，你对时间、空间与物质的关系有哪些新的认识？学过这一章后，你对人类认识世界的方法有哪些新的体会？

广东教育出版社



绿色印刷产品

批准文号：粤发改价格【2017】454号 举报电话：12358



定价：14.78元
(配光碟1张)