经全国中小学教材审定委员会 2005 年初审通过

普通高中课程标准实验教科书

物理

WULI

选修 3-4



教育科学出版社
·北 京·

微信公众号：电子课本大全

目录



第一章 机械振动

1. 简谐运动……2
2. 单摆……6
3. 简谐运动的图像和公式……9
4. 阻尼振动　受迫振动……13
5. 学生实验：用单摆测定重力加速度…16
本章小结……19
习题……19



第二章 机械波

1. 机械波的形成和传播……22
2. 波速与波长、频率的关系……25
3. 波的图像……28
4. 惠更斯原理　波的反射与折射……32
5. 波的干涉、衍射……36
6. 多普勒效应……40
本章小结……43
习题……44



第三章 电磁振荡 电磁波

1. 电磁振荡……46
2. 电磁场和电磁波……48
3. 电磁波谱　电磁波的应用……52
4. 无线电波的发射、传播和接收……55
本章小结……59
习题……60



第四章 光的折射

1. 光的折射定律……62
2. 学生实验：测定玻璃的折射率……67
3. 光的全反射……70
本章小结……75
习题……76



第五章 光的波动性

1. 光的干涉……78
2. 学生实验：用双缝干涉测量光的波长…82
3. 光的衍射与偏振……86
4. 激光……89
本章小结……93
习题……94



第六章 相对论

1. 牛顿力学中运动的相对性……96
2. 狭义相对论的两个基本假设……98
3. 时间、长度的相对性……100
4. 相对论的速度变换公式　质能关系
……106
5. 广义相对论点滴（选学）……108
本章小结……113
习题……114

附录 中英文索引……115

微信公众号：电子课本大全

第一章

机械振动

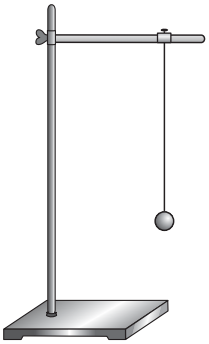
- 简谐运动
- 单摆
- 简谐运动的图像和公式
- 阻尼振动　受迫振动
- 学生实验：用单摆测定重力加速度

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

研究振动，将使我们更清晰地认识世界.

微信公众号：电子课本大全

1 简谐运动



（a）细绳拴着的小球做运动



（b）弹簧系着的滑块在气垫导轨上运动



（c）树梢在微风中摇摆

图 1-1-1

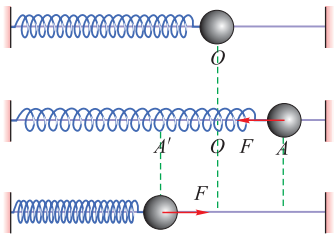


图 1-1-2 弹簧振子

机械振动

观察思考

如图 1-1-1 所示，让悬挂的小球、气垫上的滑块动起来，它们和树梢的运动情况有什么共同之处？

不难看出，小球、滑块和树梢一样，都在某个位置附近往复运动．物体（或物体的某一部分）在某一位置两侧所做的往复运动，叫做**机械振动**，通常简称为**振动**（vibration），这个位置称为**平衡位置**（equilibrium position）．

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

简谐运动

观察思考

我们知道，物体的运动情况是由其受力决定的，而研究实际问题又往往是从简单问题开始的．分析图 1-1-1 的三个图，哪一个振动物体受力最简单？你还能对其做进一步简化吗？

显然，我们可以建立如图 1-1-2 的理想化模型：在光滑的水平杆上套着一个小球，弹簧一端固定，另一端连接在小球上，小球可以在杆上滑动．小球和水平杆之间的摩擦忽略不计，弹簧的质量比小球的质量小得多，也可忽略不计．这样的系统称为弹簧振子，其中的小球常称为**振子**（oscillator）．下面我们研究振子在 O 点附近的往复运动．

微信公众号：电子课本大全

活动

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

1．弹簧最大伸长的长度OA和最大压缩的长度OA'有什么关系？

2．振子从A经O到A'和振子从A'经O到A所用的时间有什么关系？

3．振子在往复运动过程中的受力有什么特点？

如图 1-1-3 所示，以平衡位置O为原点，建立Ox轴，向右为x轴的正方向．振子在任何时刻相对于O点的位移可用x表示，x值的大小表示振子相对于O点的距离，也是弹簧的伸长（或压缩）量；x值的正负表示振子在O点的右侧还是左侧，那么根据胡克定律，振子所受的弹力的大小和方向可用$F = -kx$来表示．

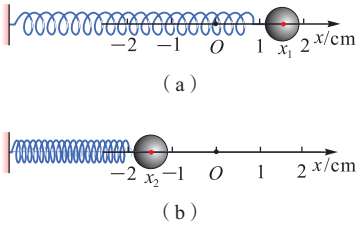


图 1-1-3　振子的位移

我们已经分析过，在振子的振动过程中，只有弹簧的弹力改变振子的运动状态．在图 1-1-2 中，当振子运动到O点右侧时，弹簧伸长，给振子一个向左的弹力；当振子运动到O点左侧时，弹簧压缩，给振子一个向右的弹力．总之，当小球偏离平衡位置时，都会受到一个指向平衡位置的力，这种力叫做**回复力**（restoring force）．

根据$F = -kx$，弹簧振子所受的力F正比于振子偏离平衡位置的距离x，力的方向跟振子的位移方向相反，总指向平衡位置，在它的作用下，振子在平衡位置附近做往复运动．

如果物体所受的力与它偏离平衡位置的位移大小成正比，并且总指向平衡位置，则物体所做的运动叫做**简谐运动**（simple harmonic motion）．弹簧振子的振动是简谐运动．做简谐运动的振子称为谐振子．简谐运动是最简单、最基本的振动．一切复杂的振动都可看成是若干简谐运动的叠加．


图 1-1-4　音叉叉股的振动可以看做简谐运动

振幅、周期和频率

我们用位移、速度、加速度等物理量来描述匀变速直

微信公众号：电子课本大全

线运动的特征；用角速度、周期、转速等物理量来描述匀速圆周运动的特征. 那么我们用哪些物理量来描述简谐运动的特征呢?

在图1-1-2中，振子在光滑水平杆上的 A 点和 A' 点之间往复运动，$OA = OA'$，OA（OA'）是振动物体离开平衡位置的最大距离，叫做振动的**振幅**（amplitude）. 振幅是表示振动强弱的物理量.

如果振子由 A 点经 O 点运动到 A' 点，又由 A' 点经 O 点回到 A 点，我们就说振子完成了一次全振动. 振子每完成一次全振动所用的时间是相同的，这个时间叫做振动的**周期**（period）. 单位时间内完成的全振动的次数，叫做振动的**频率**（frequency）.

振子完成一次全振动发生的位移是多少? 经过的路程是多少?

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

简谐运动的能量

观察思考

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

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

微信公众号：电子课本大全

$$
\begin{aligned}
E &= E_{\mathrm{p}} + E_{\mathrm{k}} \\
&= E_{\mathrm{pm}} \\
&= E_{\mathrm{km}} \\
&= \frac{1}{2} m v_{\mathrm{m}}^2
\end{aligned}
$$

讨论交流

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

以平衡位置O点为原点，水平向右为x轴的正方向，填写表 1-1-1.

表 1-1-1

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

实际上任何物体的振动都不可避免能量的损失，所以简谐运动是一个理想化模型.

练习与评价

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

2. 一个弹簧振子，第一次在弹簧被压缩 x 后开始振动，第二次在弹簧被压缩 $2x$ 后开始振动，求两次振动的振幅之比.

微信公众号：电子课本大全

3. 对图 1-1-2 中弹簧振子的简谐运动，下列说法中正确的是（　　）

A. 振子在振动过程中，速率相同时，弹簧的长度一定相同

B. 振子从左端点向平衡位置运动的过程中，弹簧弹力始终做负功

C. 振子在振动过程中的回复力由弹簧的弹力提供

D. 振子在振动过程中，系统的机械能守恒

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

2 单　摆

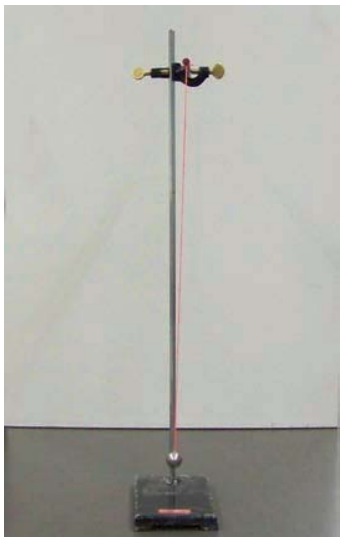


图 1-2-1　悬线下小球的摆动

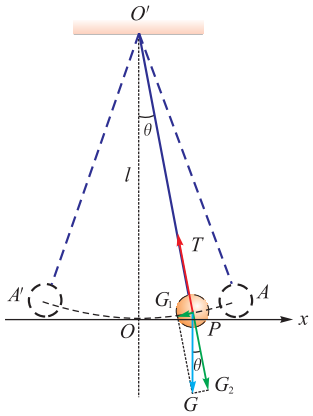


图 1-2-2　单摆的振动

单摆的简谐运动

活动

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

1. 单摆振动过程中，摆球在任意点 P 受几个力作用？分别是什么力？

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

为了研究摆球的运动，我们来分析摆球在 P 点所受的力．摆球所受重力 G 可分解为沿圆弧切线方向上的分量 G_1 和沿摆线方向的分量 G_2；摆球所受悬线的拉力 T 在圆弧切线方向上没有分力，如图 1-2-2 所示．

重力沿圆弧切线方向的分力

$$G_1 = mg\sin\theta$$

正是这个力提供了使摆球振动的回复力．选取平衡位置为坐标原点，水平线为 x 轴，当偏角 θ 很小时（$\theta < 5°$）弧线

微信公众号：电子课本大全

与 x 轴近似重合，$\sin\theta \approx x/l$，所以单摆的回复力为

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

其中 l 为摆长（即 OO' 的长度），x 为摆球偏离平衡位置的位移，负号表示回复力 F 与位移 x 的方向相反．由于 m、g、l 对某一个单摆都有确定的数值，mg/l 可以用一个常数 k 表示，上式可以写成

$$F = -kx$$

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

讨论交流

1.单摆也是理想化模型，其理想化条件是什么？

2.有人说单摆的运动就是简谐运动，这句话对吗？为什么？

单摆做简谐运动的周期

实验探究

单摆的周期和摆长的关系

1．测量单摆周期

（1）想一想单摆的周期可能与哪些因素有关．

（2）如何测出单摆的周期？

把单摆从平衡位置拉开一个很小的角度释放，使之做简谐运动．以摆球通过平衡位置时开始计时，用停表记下摆球通过平衡位置 n 次所用的时间 t，因为单摆完成一个周期的振动，经过平衡位置两次，所以有 $t = \frac{n}{2}T$，$T = \frac{2t}{n}$．

2．探究单摆周期 T 与摆长 l 的关系

（1）用米尺量出悬线长度 l'，用游标卡尺量出摆球的直径 d，则摆长 $l = l' + \frac{d}{2}$．

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



惠更斯
（Christiaan Huygens，1629—1695）

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

微信公众号：电子课本大全

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

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

分析 T^2 – l 图像，你得到的周期和摆长的关系是什么？

惠更斯研究了单摆的振动，发现在偏角很小的情况下，单摆做简谐运动的周期 T 跟摆长 l 的二次方根成正比，跟重力加速度 g 的二次方根成反比，跟振幅、摆球的质量无关，并且确定了单摆做简谐运动时的周期公式

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

练习与评价

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

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

发展空间



课外阅览

不同摆角下单摆实际周期 T 与理论计算周期 T_0 的比较

根据理论可以计算出不同摆角的单摆振动周期 T_0. 从表 1-2-1 可以看出，当摆角小于 5° 时，单摆的实际周期 T 与理论计算周期 T_0 比较相差不超过万分之五. 在这种情况下，它与简谐运动规律符合得相当好.

表 1-2-1

θ	5°	10°	15°	20°	30°	45°	60°
T/T_0	1.000 5	1.001 9	1.004 3	1.007 7	1.017 4	1.036 9	1.071 9

微信公众号：电子课本大全

3 简谐运动的图像和公式

简谐运动的图像

图1-3-1所示的装置是一个悬挂在固定支架上盛沙的漏斗．用细线悬挂的漏斗可看做是单摆，漏斗相当于摆球．让它在一个固定的竖直平面做小角度摆动，这个摆动是简谐运动．在漏斗的下方水平放置一张中央画有直线OO'的薄板，静止时漏斗位于OO'正上方．

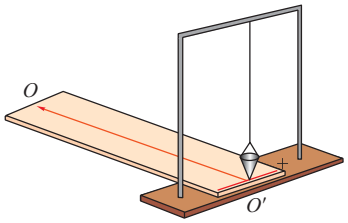


图1-3-1　演示简谐运动图像的装置

观察思考

如图 1-3-2 所示，使漏斗在一个固定的竖直平面内摆动，沿垂直于该平面的OO'方向匀速拉动薄板，观察从摆动漏斗中流出的细沙在板上形成的曲线，并思考以下问题．

1．落在薄板上的细沙的位置和各时刻摆球（漏斗）的位置有什么关系？

2．细沙在薄板上形成什么形状的曲线？

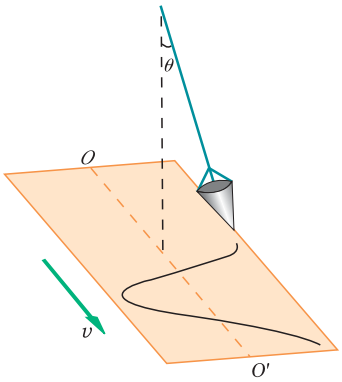


图 1-3-2　单摆的运动图像

匀速拉动薄板，因为每一时刻都有细沙从漏斗中漏出，所以落在薄板上的细沙就记录下各个时刻摆球（漏斗）的位置．以OO'表示时间轴，以垂直于OO'的坐标x表示摆球相对于平衡位置的位移，薄板上细沙形成的曲线就是单摆做简谐运动时，位移x随时间t变化的图像，称为简谐运动的图像（或称振动图像）．可以看出，简谐运动图像是一条正弦（或余弦）曲线．严格的理论和实验也都证明所有简谐运动的运动图像都是正弦（或余弦）曲线．

图1-3-3是用特殊的照相机拍摄的一个由竖直弹簧吊着的弹簧振子振动的照片．这种照相机能使底片在相等的时间间隔内水平移动相等的间距并多次曝光．因此，照片能显示出振子的位移随时间变化的图像．由照片可看出振子做简谐运动的图像是一条正弦（或余弦）曲线．

由简谐运动图像，可找出物体振动的周期和振幅．



图 1-3-3　弹簧振子的运动图像

微信公众号：电子课本大全

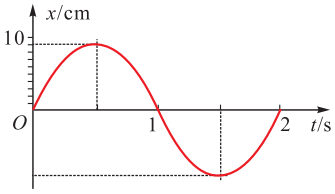


图 1-3-4　简谐运动的图像

讨论交流

图 1-3-4 为简谐运动图像，你能从图像中找出振动的周期和振幅吗？

简谐运动的表达式

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

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

其中

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

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

综合可得

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

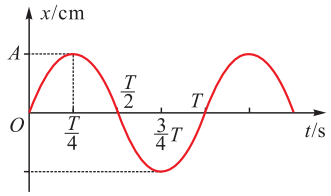
式中 A 表示振动的振幅，T 和 f 分别表示了物体振动的周期和频率．物体在不同的初始位置开始振动，φ 值不同．

例如，图 1-3-5（a）所示的运动图像表示了物体（如振子或摆球）从平衡位置开始振动，其离开平衡位置的位移 x 和时间 t 的函数关系为

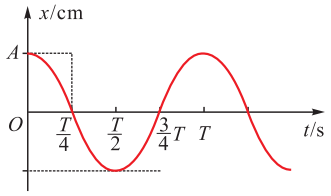
$$x = A\sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) = A\sin(2\pi ft)$$

又如，图 1-3-5（b）所示的运动图像表示了物体（如振子或摆球）从正向最大位移处开始运动，其离开平衡位置的位移 x 和时间 t 的函数关系为

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



（a）从平衡位置开始的简谐运动



（b）从正向最大位移处开始的简谐运动

图 1-3-5　运动图像

简谐运动的相位、相位差

在式 $x = A\sin(2\pi ft + \varphi)$ 中，“$2\pi ft + \varphi$”这个量叫做简谐运动的**相位**（phase）．$t = 0$ 时的相位 φ 叫做初相位，简称初相．

微信公众号：电子课本大全

观察思考

1. 将两个摆长相同的单摆向同一方向拉开相同的角度，然后同时释放. 观察两个单摆所做的简谐运动.

2. 将两个摆长相同的单摆向同一方向拉开相同的角度，先释放其中的一个，当它摆到平衡位置时，再释放另一个. 观察两个单摆所做的简谐运动；观察同一时刻两个单摆所处的位置.

3. 将两个摆长相同的单摆，向相反方向拉开相同的角度，然后同时释放（图1-3-6）. 观察两个单摆所做的简谐运动.

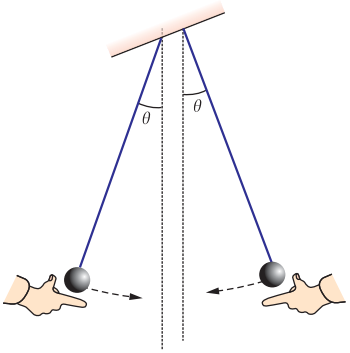


图 1-3-6

两个摆长相同的单摆，周期相同，把它们朝同一方向拉开相同的角度，然后同时放开，将看到它们同时到达同侧的最大位移处，也同时经过平衡位置，它们总是“步调一致”地运动，两个单摆在任一时刻都处于相同的状态. 这样，在二者的x的表达式中，相位一定相同，我们说它们的振动同相.

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

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

练习与评价

1. 质点做简谐运动的图像如图 1-3-7 所示，则下述说法中正确的是（　　）

A. 4 s 时速度为 0，加速度为正向最大

B. 10 s 时振子的位移为 −5 cm

C. 前 10 s 内振子通过的路程为 50 cm

D. 5 s 时振子的速度方向为 $-x$ 方向

2. 一质点做简谐运动的图像如图 1-3-8 所示，分析在 0.2 s 到 0.3 s 这段时间内质点的运动情况（包括向哪个方向运动，速率、加速度如何变化等）.

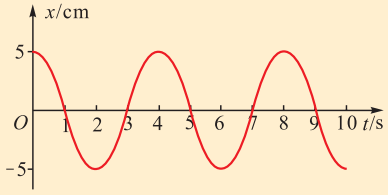


图 1-3-7

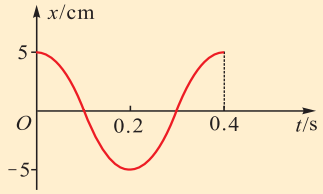


图 1-3-8

微信公众号：电子课本大全

3. 一质点做简谐运动的图像如图 1-3-9 所示，则下列结论中，正确的是（　　）

A . 质点速度最大而加速度为零的时刻分别是 0.1 s、0.3 s

B. 质点速度为零而加速度为负方向最大值的时刻分别是 0 s、0.4 s

C. 质点所受的回复力方向由正变负的时刻是 0.3 s

D. 振动系统势能最大而加速度为正方向最大值的时刻是 0.3 s

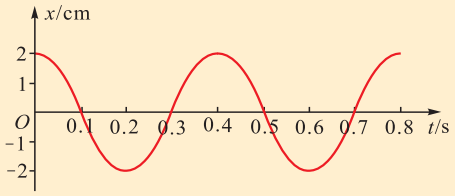


图 1-3-9

4. 卡车在水平道路上行驶，货物随车厢做上下方向的简谐运动而不脱离车厢底板. 设向上为正方向，其振动图像如图 1-3-10 所示. 从图像中找出货物对底板的压力小于货物重力的时间段.

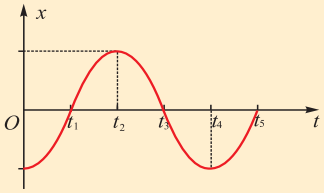


图 1-3-10

发展空间

走向社会

记录振动的方法在实际生活中有很多应用，如医院里的心电图仪，监测地震的地震仪等. 查找资料了解记录振动的方法在实际中的应用.

课外阅览

匀速圆周运动与简谐运动

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

如图 1-3-11 所示，质点 m 从 p 点开始，以角速度 ω 绕圆心 O 做半径为 A 的匀速圆周运动，建立直角坐标系 xOy，Op 连线与 y 轴夹角为 φ. 因为质点 m 经过 t 时间后其与圆心的连线 Om 和 y 轴的夹角等于 $\omega t+\varphi$，所以，质点 m 在 x 轴上的投影 m' 离开平衡位置的位移 x 就等于 $A\sin(\omega t+\varphi)$. 即

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

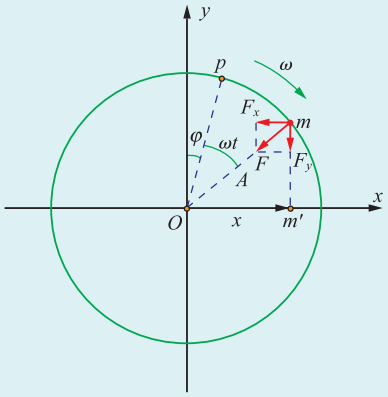


图 1-3-11

而质点 m 做匀速圆周运动所受的向心力

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

在 x 轴方向上的分力是

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

其中负号表示方向沿 x 轴负方向.

综合可得：质点 m 在 x 轴所受的分力为

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

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

微信公众号：电子课本大全

4 阻尼振动　受迫振动

阻尼振动

活动

如图 1-4-1 所示，在鼓皮上放几颗米粒，猛敲一下鼓，观察米粒在鼓皮上的运动.

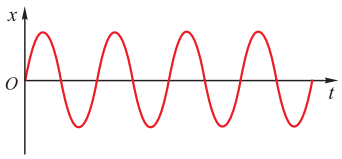


图 1-4-1　鼓皮的振动逐渐变弱

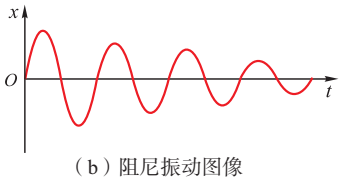
猛敲一下鼓皮，开始鼓声很大，随后迅速变弱. 在鼓皮上放一些米粒，开始时它跳动的幅度很大，随着鼓声变弱，米粒跳动的幅度变小. 由此可知，鼓皮振动的振幅变小了. 这是振动的鼓皮受到阻力的缘故. 弹簧振子和单摆在振动过程中振幅总会不断减小，这是因为它们不可避免地要受到摩擦力等阻力的作用. 系统在振动过程中受到阻力的作用，振动逐渐消逝，振动能量逐步转变为其他能量，这种振动叫做**阻尼振动**（damped vibration）.

系统不受外力作用，也不受任何阻力，只在自身回复力作用下的振动，称为**自由振动**（free vibration），又叫做无阻尼振动. 自由振动的频率，叫做系统的**固有频率**（natural frequency）. 固有频率由系统本身的特征决定.

图1-4-2（a）（b）分别是自由振动和阻尼振动的振动图像.



（a）自由振动图像



（b）阻尼振动图像

图 1-4-2

受迫振动

一般情况下的振动因为受到阻力，最终都要停下来，那么怎样才能使振动持续下去呢？

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

如果用周期性的外力作用于振动系统，补偿系统的能量损耗，使系统持续等幅地振动下去，这种周期性的外力

微信公众号：电子课本大全

叫做**驱动力**（driving force），系统在驱动力作用下的振动叫做**受迫振动**（forced vibration）. 收音机喇叭纸盆的振动、钟表的摆动、洗衣机工作时机壳的振动等都是受迫振动.



图 1-4-3　受迫振动

观察思考

利用图 1-4-3 所示的装置，向下拉动钩码，然后放手，观察钩码振动的周期.

钩码静止，匀速地转动把手，观察钩码振动周期和手转动把手的周期.

手以较小的速度转动把手，钩码振动周期变小了吗?

由观察到的现象分析受迫振动的周期与驱动力周期的关系.

匀速地转动把手时，把手给弹簧振子以驱动力，使振子做受迫振动. 把手转动的周期就是驱动力的周期. 用不同的转速匀速地转动把手，可以看到，振动稳定后受迫振动的周期总等于驱动力的周期.

实验表明，物体做受迫振动时，振动稳定后的频率，跟物体的固有频率没有关系.

共振

观察思考

如图 1-4-4 所示，在一根张紧的绳子上挂几个摆，其中 *A*、*B*、*C* 的摆长相等. 以 *A* 摆为驱动摆，让 *A* 摆振动，观察其余各摆做受迫振动的振幅. 思考以下问题：

你认为驱动力频率与固有频率满足什么关系，才能使受迫振动的振幅最大?

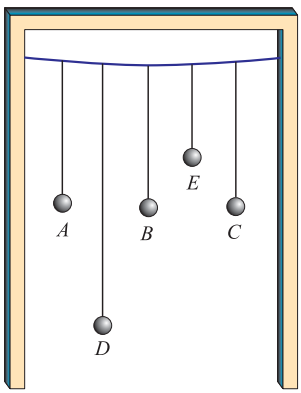


图 1-4-4　研究摆的共振

图 1-4-4 中所挂各摆的固有频率取决于摆长. 当 *A* 摆振动的时候，通过张紧的绳子给其他各摆施加驱动力，这个驱动力的频率等于 *A* 摆的频率，其余各摆在驱动力的作用下做受迫振动. 在实验中可以看出：固有频率跟驱动力频率不同的各摆振幅较小；固有频率跟驱动力频率相等的 *B* 摆和 *C* 摆，振幅最大；固有频率跟驱动力频率相差最大的 *D* 摆，振幅最小.

微信公众号：电子课本大全

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

图1-4-5表示受迫振动的振幅 A 与驱动力频率 f 的关系. 可以看出：当驱动力的频率 f 等于振动物体的固有频率 f_0 时，振幅最大；驱动力的频率 f 跟固有频率 f_0 相差越大，振幅越小.

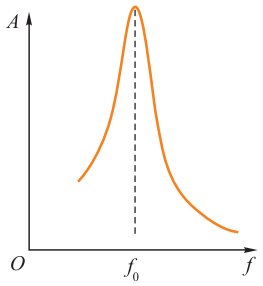


图 1-4-5　受迫振动的振幅 A 与驱动力频率 f 的关系图像，图中 f_0 为振动物体的固有频率

共振的应用和防止

共振现象很普遍，有时人们应用共振，有时人们避免共振. 把一些不同长度的钢片安装在同一支架上，可以制成测量机器转速的转速计. 用这种转速计与开动着的机器紧密接触，机器的振动引起转速计的轻微振动，这时固有频率与机器运转频率一致的那个钢片就会发生共振，有显著的振幅，从刻度上读出这个钢片的固有频率,就可以知道机器的转速.

在某些情况下，共振可能造成危害. 军队或火车过桥时，整齐的步伐或车轮对铁轨接头处有节奏的撞击会对桥梁产生周期性的驱动力，如果驱动力的频率接近桥梁的固有频率，就可能使桥梁的振幅显著增大，致使桥梁断裂. 因此，部队过桥要用便步，以免产生周期性驱动力；火车过桥要慢开，使驱动力的频率远小于桥梁的固有频率.

1831 年，一队骑兵通过英国曼彻斯特附近的布劳顿吊桥时，由于马蹄运动节奏一致，其频率与桥的固有频率相同，使桥发生共振而断裂.

轮船航行时，如果所受波浪的冲击力的频率接近轮船左右摇晃的固有频率，可能会使轮船倾覆. 这时可以改变轮船的航向与速度，使波浪冲击力的频率远离轮船摇晃的固有频率.

发射载人宇宙飞船时，要考虑共振可能给宇航员造成的伤害.因为人的内脏和身躯的固有频率一般在几赫兹范围内，而大型火箭发射时要产生较强的超低频振动，这种振动形成的驱动力也容易使人体器官发生共振，造成人体器官的损伤.

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

微信公众号：电子课本大全

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

练习与评价

1. 如果把人作为一个有弹性的整体来看，在水平方向的固有频率约为 3~6 Hz，竖直方向的固有频率约为 4~8 Hz，拖拉机驾驶员，风镐、风铲、铆钉机等机械的操作员在工作时将做_____振动，这时操作员的振动频率跟振动源的频率_____. 为保障操作员的安全与健康，有关部门作出规定：用手操作的各类振动机械的频率必须大于 20 Hz，这是为了防止发生_____造成对人体健康的危害.

2. 实际的振动系统做阻尼振动时，它的（　　）.

A. 位移越来越小

B. 振幅越来越小

C. 动能越来越小

D. 机械能越来越小

5 学生实验：用单摆测定重力加速度

我们知道地球上不同位置的重力加速度 g 是不同的，用什么方法可测出一个地方的重力加速度呢?

实验原理

讨论交流

1. 根据单摆的周期公式 $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$，可得 $g=\frac{4\pi^2 l}{T^2}$. 为了要得到 g 值，应测量哪几个量?

微信公众号：电子课本大全

2. 怎样才能正确地测出摆长？
3. 怎样才能较准确地测定单摆的周期？

实验过程

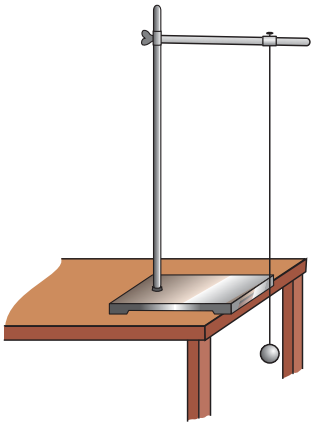


图 1-5-1

1. 让细线的一端穿过摆球的小孔，然后打一个比小孔大的线结．线的另一端用铁夹固定在铁架台上（图 1-5-1），把铁架台放在实验桌边，使铁夹伸到桌面以外，让摆球自由下垂．

2. 用米尺量出悬线长度 l'，用游标卡尺测量出摆球的直径 d，摆长 $l=l'+\frac{d}{2}$．

3. 把单摆从平衡位置拉开一个很小的角度（不超过 5°）后释放．为了使摆球只在一个竖直平面内摆动，释放摆球时不要发生旋转，使单摆做简谐运动．从摆球通过平衡位置时开始计时，数出之后摆球通过平衡位置的次数 n，用停表记下所用的时间 t，则单摆振动的周期 $T=\frac{2t}{n}$．要使摆球在竖直平面内摆动，选用的悬线应细、质量小，且不易伸长．

4. 根据单摆的周期公式，计算出重力加速度．

5. 变更摆长，重做几次实验，计算出每次实验得到的重力加速度值．

6. 把测得的数据和计算结果填入表 1-5-1 中，求出几次实验得到的重力加速度的平均值，即可看做本地区的重力加速度．

实验器材

长约 1 m 的细线
有小孔的摆球两个
带铁夹的铁架台
停表
游标卡尺
米尺

表 1-5-1

实验次数	l'	d	$l'+\frac{d}{2}$	n	t	$\frac{2t}{n}$	g	$\bar{g}$
1								
2								
3								

微信公众号：电子课本大全

$$g_1=\frac{4\pi^2 l_1}{T_1^2},\ g_2=\frac{4\pi^2 l_2}{T_2^2},\ g_3=\frac{4\pi^2 l_3}{T_3^2}$$

$$\bar{g}=\frac{g_1+g_2+g_3}{3}=_____$$

7. 可以多做几次实验，由几组 l、T 值作出 T^2–l 图像，利用图像的斜率，算出重力加速度 g.

练习与评价

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

A. 测量悬线长度作为摆长，没有加上摆球的直径

B. 选用摆球的质量偏大

C. 把在时间 t 内的 n 次全振动误记为 n+1 次

D. 把在时间 t 内的 n 次全振动误记为 n–1 次

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

3. 如图 1-5-2 所示，单摆摆长为 l，在悬点 O 正下方 A 点钉一个钉子，其中 $AO=\frac{3}{4}l$，则此摆振动的周期为多大?

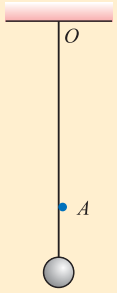


图 1-5-2

微信公众号：电子课本大全

本章小结

1．**机械振动与简谐运动**　物体在平衡位置附近所做的往复运动，叫做机械振动，通常简称为振动．物体在大小与偏离平衡位置的位移大小成正比、方向总指向平衡位置的回复力 $F=-kx$ 的作用下产生的振动，叫做简谐运动．

2．**振幅、周期和频率**　振动物体离开平衡位置的最大距离，叫做振动的振幅．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，单位为 s．单位时间内完成的全振动的次数，叫做振动的频率，用 f 表示，单位为 s^{-1}，称为赫兹（Hz）．周期和频率互成倒数关系 $T=\dfrac{1}{f}$ ．

3．**单摆周期公式**　在偏角很小的情况下，单摆的振动可以看做简谐运动，其周期是 $T=2\pi\sqrt{\dfrac{l}{g}}$．周期跟振幅和摆球的质量无关．

4．**简谐运动的能量**　如不考虑摩擦和空气阻力，弹簧振子和单摆在振动过程中的总机械能守恒．

5．**简谐运动的图像和公式**　简谐运动的振动图像是正弦（或余弦）曲线．从图像中可知振动的周期和振幅．振动中位移和时间的关系是 $x=A\sin(2\pi ft+\varphi)$，其中 A 代表振幅，“$2\pi ft+\varphi$”叫做简谐运动的相位，$t=0$ 时的相位 φ 叫做初相．

6．**自由振动、受迫振动和共振**　系统不受任何外力作用，也不受任何阻力，只在自身回复力作用下的振动叫做自由振动，自由振动的频率叫做系统的固有频率；由于阻力作用而逐渐消逝的振动叫做阻尼振动；物体在外界驱动力作用下的振动叫做受迫振动，稳定时受迫振动的频率等于驱动力的频率．

驱动力的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．

习　题

1．一个弹簧振子做简谐运动，振子在振动过程中某一时刻可能出现的情况是（　　）．

A．位移与速度均为正值，加速度为负值

B．位移为负值，而速度和加速度均为正值

C．位移与加速度均为正值，而速度为负值

D．位移、速度、加速度均为负值

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

A．位移减小时，加速度增大，速度增大

B．位移方向总跟加速度方向相反，跟速度方向相同

C．物体运动方向指向平衡位置时，速度方向跟位移方向相反，背向平衡位置时速度方向跟位移方向相同

D．物体向平衡位置运动时，做加速运动，背离平衡位置运动时，做减速运动

微信公众号：电子课本大全

3．关于简谐运动的各物理量，下述说法正确的是（　　）.

A．振幅就是最大的位移　　B．周期和频率的乘积为一常量

C．振幅越大，周期越大　　D．振幅越小，频率越大

4．做简谐运动的物体，当物体的位移为负值时，下面说法中正确的是（　　）.

A．速度一定为正值，加速度一定为负值

B．速度一定为负值，加速度一定为正值

C．速度不一定为正值，加速度一定为负值

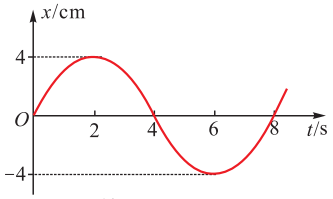
D．速度不一定为负值，加速度一定为正值

5．一弹簧振子在振动过程中，振子经 A、B 两点的速度相同，若它从 A 到 B 历时 0.2 s，从 B 再回到 A 的最短时间为 0.4 s，则该振子的振动频率为（　　）.

A．1 Hz　　B．1.25 Hz　　C．2 Hz　　D．2.5 Hz

6．一弹簧振子分别拉离平衡位置 5 cm 和 1 cm 处放手，使它做简谐运动，则前后两次振幅之比为_____，周期之比为_____，回复力的最大值之比为_____，最大加速度之比为_____.

7．如图是某质点简谐运动的图像，则振动的振幅是___cm，0～4 s内质点通过的路程是___cm，t = 6 s时质点的位移是___cm.



（第 7 题图）

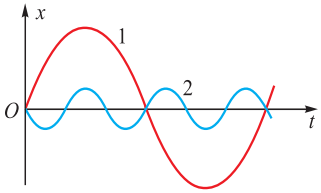
8．一单摆的周期 T_0 = 2 s，则在下述情况下它的周期 T 将如何改变？

（1）摆长变为原来的 1/4，T =___ s；

（2）摆球质量减半，T =___s；

（3）振幅减半，T =___ s.

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



（第 9 题图）

A．1/3　　B．1/9　　C．3/1　　D．9/1

10．两个单摆摆长之比为 1∶2，摆球质量之比为 4∶5，最大摆角之比是 3∶2，它们在同一地点做简谐运动，振动频率之比为____.

11．关于弹簧振子做简谐运动时的能量，下列说法正确的是（　　）.

A．等于越过平衡位置时振子的动能

B．等于到达最大位移时弹簧的弹性势能

C．等于任意时刻振子动能与弹簧弹性势能之和

D．位移越大振动能量也越大

12．下列说法中不正确的是（　　）.

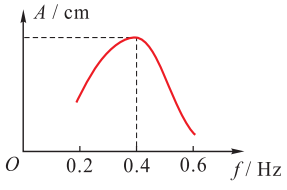
A．受到阻力作用的振动一定是阻尼振动

B．阻尼振动的振幅逐渐减小，机械能逐渐减小

C．受迫振动的振幅越来越大

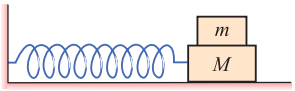
D．受迫振动稳定后的频率与振动系统的固有频率无关

13．如图所示为一单摆的共振曲线，图中横轴表示周期性驱动力的频率，纵轴表示单摆的振幅，求此单摆的摆长．（g = 9.8 m/s²）



（第 13 题图）

14．在如图所示的系统中，弹簧的劲度系数 k = 39.2 N/m，与弹簧相连的物块 M 质量为 0.2 kg，置于其上的物块 m 质量为 0.1 kg，两物块之间的最大静摩擦力 f_m = 0.196 N．M 与水平支持面之间是光滑的．若要使两物块一起（两物块之间无相对滑动）做简谐运动，则可能达到的最大振幅有多大？



（第 14 题图）

微信公众号：电子课本大全

第二章 机械波

- 机械波的形成和传播
- 波速与波长、频率的关系
- 波的图像
- 惠更斯原理　波的反射与折射
- 波的干涉、衍射
- 多普勒效应

海边，冲浪者们正期盼着巨浪的到来. 海浪汹涌而至，他们驾驭着海浪，踏上浪峰、滑入浪谷，尽情地享受着惊险、刺激带来的欢乐.

在这一章，我们来研究类似海浪的运动的规律.



微信公众号：电子课本大全

1 机械波的形成和传播

机械波的形成和传播

向平静的水面扔一块石头，水面上会荡起圈圈涟漪，以石头落水处为中心，起伏的波纹向四周延展，形成水波（图 2-1-1）；拨动琴弦，弦的振动在周围的介质中形成声波；固定较长细绳的一端，用手握住另一端做连续上下振动，你会看到在绳上形成一列波．水波、声波、绳波都是机械波．

机械波是怎么形成和传播的呢？

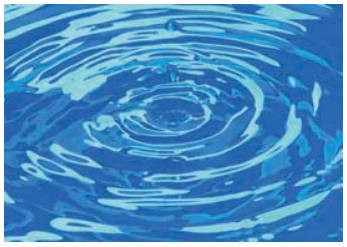
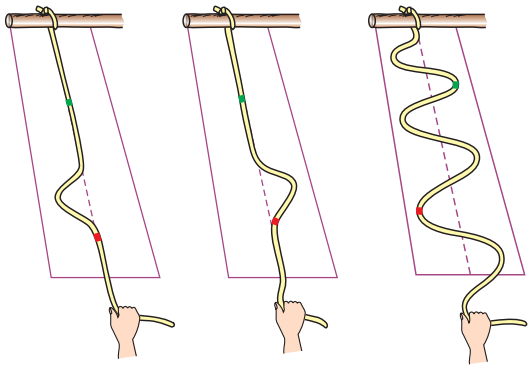


图 2-1-1　水波

活动



（a）　（b）　（c）

图 2-1-2　绳波

如图 2-1-2 所示，准备一根长约 10 m 的软绳并放置在水平面上，将绳上的两点涂上不同颜色的标记．固定一端，用手握住绳的另一端，拉直软绳．

1．如果手不做左右振动，绳子处于什么状态？

2．手向左抖动一次和向右抖动一次，你看到了什么现象？

3．手连续左右抖动，你看到了什么现象？画出在某一时刻软绳形状的草图．

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

5．手以不同频率和不同幅度连续左右抖动，绳子的形状有什么区别？

观察中我们可以发现，当手猛然间向左抖动一次时，一个向左凸起的形状沿绳向另一端传去；当手猛然间向右抖动一次时，一个向右凹下的形状沿绳向另一端传去；当手左右连续抖动时，凸凹相间的形状沿绳向另一端传去．绳一端的振动为什么会沿绳向另一端传去呢？

可以用图 2-1-3 来说明绳波的形成过程，绳上的各小段可以看做质点，在图中分别用 1、2、3…表示．由于绳的各

微信公众号：电子课本大全

部分之间都有相互作用的弹力联系着，所以当手抖动绳的一端，紧靠这一端的质点1向上运动时，它就会带动质点2向上运动，质点2又带动质点3，依次传递下去．当手向下拉动质点1回到原来位置时，它也要带动质点2回来，此后质点3、质点4也将被依次带动回到各自原来的位置．每一个质点都在重复绳一端的振动，后一个质点的运动状态总是滞后于前一个质点的运动状态．结果手抖动引起的振动就不限于绳的这一端，而是沿绳向另一端传去，振动状态在绳上的传播就形成了波．

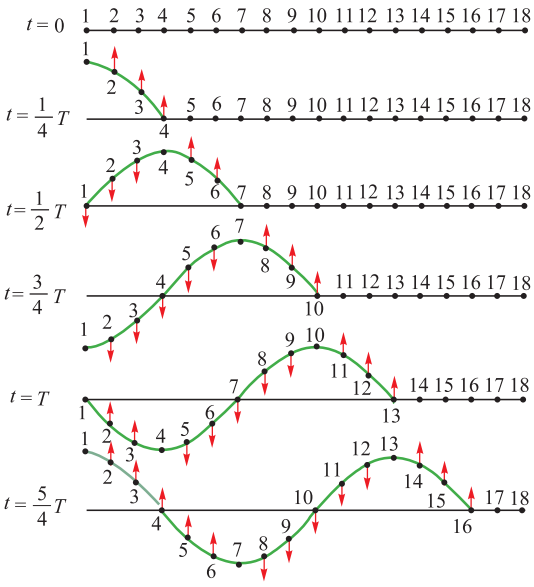


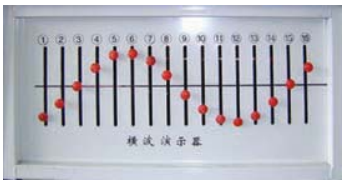
图 2-1-3　绳波的形成

一切机械波都是振动状态在某些物体中的传播．对绳一端的抖动依次引起了绳中各段的振动，振动在绳中的传播形成了绳波；对水面一处的扰动由近及远引起了水面各部分的振动，此振动在水中的传播形成了水波；击鼓时，对鼓皮的扰动引起了周围空气的振动，此振动在空气中的传播形成了声波．绳、水、空气等能够传播振动的物质，叫做**介质**（medium）．机械振动在介质中的传播称为**机械波**（mechanical wave）．振动状态传播的方向就是波的传播方向．引起初始振动的装置通常叫做波源．

从绳波中可以看到，软绳上有标记的两质点只是在各自的平衡位置附近上下振动，并没有随波的传播而向前移动．因此机械波是机械振动这一运动形式（包括波源的振动信息）的传播，介质本身并没有沿着波的方向发生迁移．当振动在绳中传播时，各质点由于上下运动而具有动能；同时由于形变，又具有弹性势能，这样随着振动的传播，波源的能量就被传递出去．所以机械波的传播也是机械能的传播．波是传递能量的一种方式．

横波与纵波

按介质中质点的振动方向和波的传播方向的关系不同，常将波分为横波和纵波．


（a）横波演示器


（b）纵波演示器

图 2-1-4

观察思考

1．观察横波演示器所演示的横波的发生情况［图 2-1-4（a）］．记下你的观察结果．

微信公众号：电子课本大全

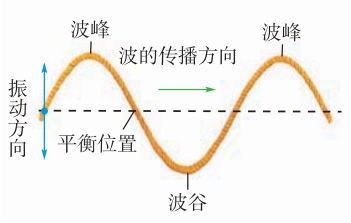


图 2-1-5　横波

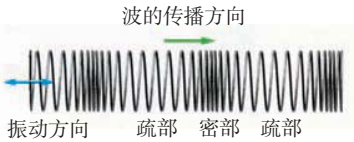


图 2-1-6　纵波

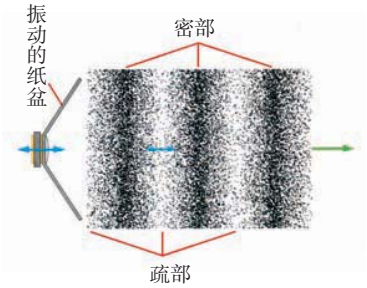


图 2-1-7　在空气中传播的声波

2. 观察纵波演示器所演示的纵波的发生情况［图 2-1-4（b）］. 记下你的观察结果.

若介质中质点的振动方向和波的传播方向垂直，这种波称为**横波**（transverse wave）. 例如在绳上传播的波就是横波（图 2-1-5）.

从横波演示实验中可知横波是一个凹凸相间的波，凸起来的最高处叫波峰，凹下去的最低处叫波谷. 当波源的振动通过介质传播出去后，就形成了一个具有波峰和波谷的完整的波形. 由于相邻质点不断地连续上、下振动，波峰和波谷的形状将不断向前推进.

若介质中质点的振动方向和波的传播方向平行，这种波称为**纵波**（longitudinal wave）. 例如推拉弹簧的一端，就可在弹簧上形成纵波（图2-1-6）. 在空气中传播的声波也是纵波（图 2-1-7）.

从纵波演示实验中可知纵波是介质密集和稀疏相间的波. 介质中质点分布密集的部分叫做密部，质点分布稀疏的部分叫做疏部. 这种质点分布的疏密状态随着时间而沿波的前进方向传播出去.

不管横波还是纵波，如果传播的振动是简谐运动，这种波就叫做**简谐波**（simple harmonic wave）.

练习与评价

1. 关于振动和波的关系，正确说法是（　　）.
A. 物体做机械振动，一定会产生机械波
B. 介质中有机械波传播，其中质点一定在做机械振动
C. 如果波源停止振动，在介质中传播的波动也立即停止
D. 介质中每一个质点开始振动的方向一定和波源开始振动的方向相同
2. 关于机械波的概念，下列说法正确的是（　　）.
A. 质点振动的方向总是垂直于波传播的方向
B. 横波和纵波可同时存在于介质中
C. 机械波传播能量，也传递振动信息
D. 横波中质点不随波迁移，纵波中质点随波迁移
3. 为什么机械波传播过程中，介质中各质点的频率与波源振动的频率相同?
4. 什么叫做波峰和波谷?

微信公众号：电子课本大全

发展空间

请一组同学站成一行，周期性地按顺序逐个相继下蹲和站起，模拟波的形成与传播．另一组同学仔细观察并思考：

1．同学们的下蹲和站起的运动整体上形成了什么？

2．在“波”的传播过程中每个同学所站的位置发生移动了吗？

2 波速与波长、频率的关系

波长

如图 2-1-3 所示，波源（质点 1）完成一次全振动（一个周期）后，振动就从质点 1 传到了质点 13，此后这两个质点的振动状态将保持一致，或者说，它们的振动是“同相”的，在这两个质点之间形成了一个“完整的波”．随着波源的继续振动，一个个这样“完整的波”不断产生，并向前传播．

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

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

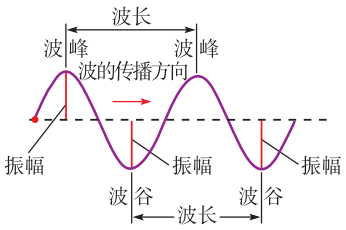


图 2-2-1　横波的波长

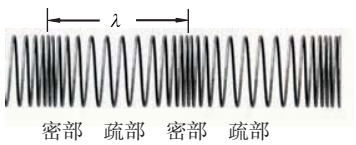


图 2-2-2　纵波的波长

观察思考

在图 2-1-3 中，与振动质点 2、6 相邻的做同相振动的质点分别是_____．

微信公众号：电子课本大全

振幅

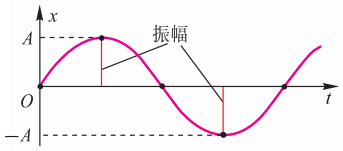


图2-2-3　波动中某一质点的振动图像

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

机械波是机械振动的传播，振动的振幅越大，振动的能量就越大，波所传播的能量也就越大. 因此，波的振幅大小是波所传播能量的直接量度.

频率

波在传播过程中，介质中质点振动的频率都相同，这个频率被称为波的**频率**. 波的频率也等于在单位时间内通过某点的“完整的波”的数目.

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

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

讨论交流

想一想，在第 1 节的“活动”中：

1. 怎样才能增大绳波的频率?
2. 当波的频率增大或减小后，波长怎样变化?

波速

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

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

根据周期和频率的关系，上式可写为

$$v=\lambda f$$

机械波在介质中的传播速度由介质的性质决定. 在同一均匀介质中，波的传播速度不变，波长与频率成反比；在

微信公众号：电子课本大全

不同的介质中，波的传播速度不同．当波从一种介质进入另一种介质时，波的频率保持不变，波长发生改变．

想一想，对同一个声音，我们隔着墙听和直接听，音调会有区别吗？为什么？

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

A．P 在波谷，Q 在波峰

B．P 在波峰，Q 在波谷

C．P、Q 都在波谷

D．P、Q 都在平衡位置

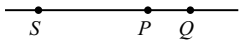


图 2-2-4　波的传播路径

【解析】由于波动周期 $T=\dfrac{1}{f}=0.01$ s，所以可算得波从 S 传到 P 所需时间为

$t_P=\dfrac{SP}{v}=\dfrac{4.2}{80}\text{ s}=0.0525\text{ s}=5\dfrac{1}{4}T$，即波从 S 传到 P 有 $5\dfrac{1}{4}$ 个完整的波．因为此时 S 在平衡位置且向上运动，故 P 在波谷处．

相差 $\frac{1}{4}$ 个完整的波的质点，振动的相位差是怎样的？参考图2-1-3的绳波，你可能就明白了．

同理可算得波从 S 传到 Q 所需时间为

$t_Q=\dfrac{SQ}{v}=\dfrac{5.4}{80}\text{ s}=0.0675\text{ s}=6\dfrac{3}{4}T$，即波从 S 传到 Q 有 $6\dfrac{3}{4}$ 个完整的波．因为此时 S 在平衡位置且向上运动，故 Q 在波峰处．

故答案 A 正确．

练习与评价

1．在波动中，每个质点的振动周期（或频率）都是_____的，等于_____的振动周期（或频率）；波的频率反映了在单位时间内通过介质中任意点的_____的个数．

2．在波动中，两个相邻的、在振动过程中对平衡位置的位移总是相等的质点间的距离叫做_____，用符号_____表示．

3．机械波的波速是由介质本身的_____决定的，不同介质中的波速_____．

4．平静的湖面上传播着一列水面波（横波），在波的传播方向上有两个小木块，它们相距 10 m，且随波上下运动．测得两小木块每分钟均上下 20 次，当甲木块在波峰时，乙木块恰在波谷，且两木块间有两个波峰．则此水面波的波长为_____m，波速为_____m/s，频率为_____Hz．（用分数表示）

微信公众号：电子课本大全

3 波的图像

横波的图像



图 2-3-1　绳波的传播

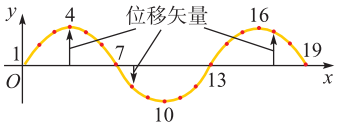


图 2-3-2　波的图像

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

波形图是正弦曲线的波，又称为正弦波．

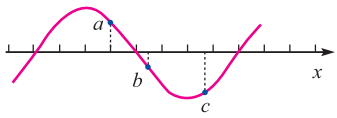


图 2-3-3

活动

设波沿 x 轴正方向以速度 v 传播，$t=0$ 时刻其波形如图 2-3-3 所示，请画出 $t=5T/6$ 时刻的波形图，并判断在此时刻 a、b、c 几个质点的振动方向．

观察思考

在图 2-3-4 中，已知波的图像中各质点的振动方向，试判定波朝什么方向传播．

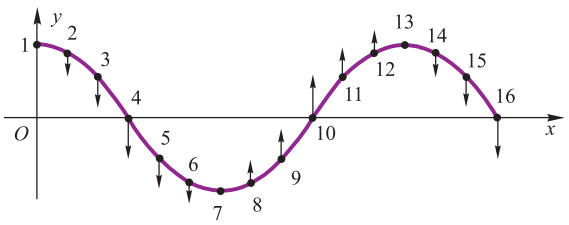


图 2-3-4　横波的图像

微信公众号：电子课本大全

【例题】一列简谐横波在某一时刻波的图像如图 2-3-5 所示.

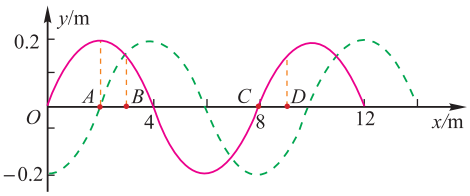


图 2-3-5

（1）这列波的振幅和波长是多少?

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

（3）若波速为 240 m/s，求波的频率.

（4）画出再经过 $\frac{T}{4}$ 时的波的图像.

【解析】（1）由图像可知振幅为 0.2 m，波长为 8 m.

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

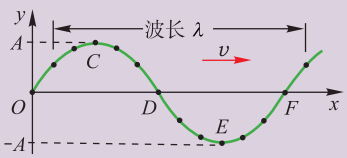
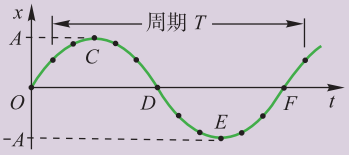
（3）由 $v=\lambda f$ 得 $f=\frac{v}{\lambda}=\frac{240}{8}\text{Hz}=30\text{ Hz}$.

（4）由于波向右传播，把此时刻波的图像沿 x 轴向右平移 $\frac{\lambda}{4}$，即为经过 $\frac{T}{4}$ 时波的图像.

● 波的图像与振动图像的比较

波的图像和振动图像各自表达的意义不同，通过前面的学习，我们可以用表 2-3-1 来比较它们的异同.

表 2-3-1　波的图像与振动图像比较

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

微信公众号：电子课本大全

练习与评价

1. 在波的传播方向上，距离波源不同处的各个质点在同一时刻对平衡位置的位移，可以用波的图像来表示. 在如图 2-3-2 所示的 xOy 坐标系中，x 坐标表示各个质点的_____位置，y 坐标表示某一时刻各个质点_____ . 质点距离平衡位置的位移最大值 A 称为波的_____，其大小是波的_____ 的直接量度.

2. 一列横波沿 x 轴传播，在某时刻的波的图像如图 2-3-6 所示，根据此时质点 F 的运动方向，判断此横波的传播方向.

3. 图 2-3-7 为一列横波在某一时刻的波的图像，波沿 x 轴正方向传播，则：

（1）在此时刻，A 点振动的方向是____ ，C 点的振动方向是____ ；

（2）再经过 $T/2$，质点 A 通过的路程是____ cm，质点 C 的位移是____ cm；

（3）此横波的波长为_____ cm.

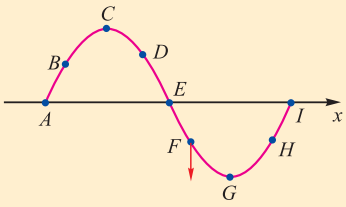


图 2-3-6

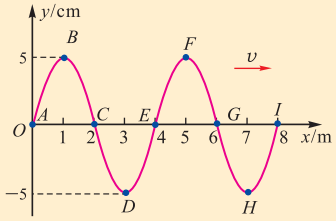


图 2-3-7

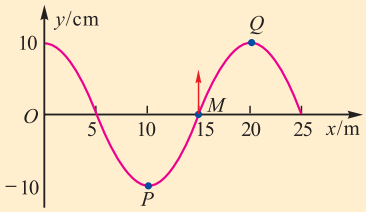


图 2-3-8

4. 一位演员抖动长绸的一端，长绸随之舞动，形成了一列简谐波. 已知波的振动周期为 0.4 s，$t=0$ 时刻的波形图如图 2-3-8 所示，图中 M 处的质点此时正经过平衡位置沿 y 轴正方向运动，画出 $t=0.5$ s 时的波形图.

5. 如图 2-3-9 所示，一列横波以 10 m/s 的速率沿水平方向传播.

某时刻的波形如图中的实线所示，经时间 Δt 后的波形如图中的虚线所示. 已知 $2T>\Delta t>T$（T 为这列波的周期）. 由此可知 Δt 可能是（　　）

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

6. 如图 2-3-10 所示，实线是一列简谐波在 $t_1=0$ 时的波的图像，虚线是 $t_2=0.2$ s 时的波的图像，则这列波可能的传播速度是多少？

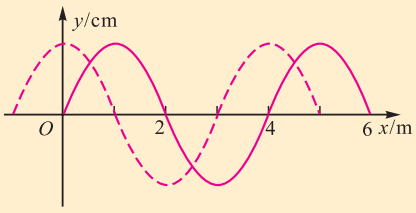


图 2-3-9

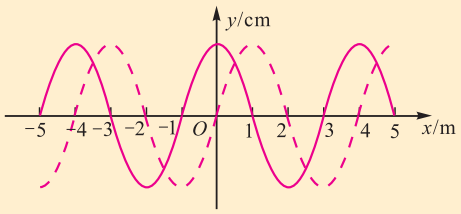


图 2-3-10

微信公众号：电子课本大全

发展空间

课外阅览

水　波

水波很容易被认为是一种横波，实际上并非如此．在平衡情况下，水的表面是水平的．水面发生扰动时，使水面恢复水平的回复力由两个力提供，一个是重力，竖直向下；另一个是表面张力，沿着水面作用．一般情况下，表面张力既有水平分力，也有竖直分力，它们的大小、方向都在变化，这就使得水波中的每个质点的运动都是由纵向运动和横向运动合成的．

如果水深远小于波长，这种波叫做浅水波，它的传播速度与水深的平方根成正比而与波长无关．如果水深远大于波长，就得到深水波，它的传播速度只与波长的平方根成正比．

在深水波传播时，水中的质点不断地做匀速圆周运动，它的周期跟波的周期相同，它的运动方向，在圆周顶部跟波的传播方向一致，在圆周底部跟波的传播方向相反．图2-3-11是水面上的波形图．箭头表示各个质点做圆周运动的方向．这种波形曲线，谷长峰短，叫余摆曲线．

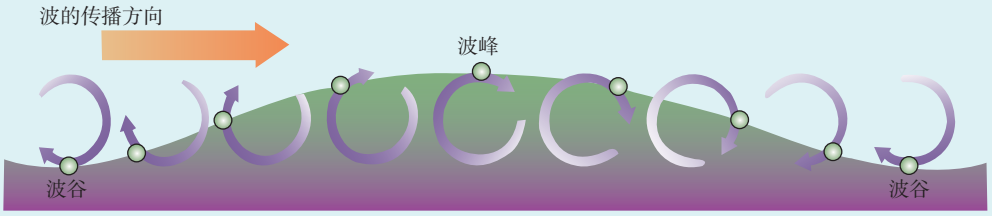


图 2-3-11

在水面，波的振幅A等于各个质点做圆周运动的半径．在水面下方，振幅按指数递减．在水深等于半波长处，振幅减至水面上的$\frac{1}{23}$；在水深等于1个波长处，振幅是水面上的$\frac{1}{535}$．所以，尽管水面上波涛汹涌，在水下是相当平静的．

对于浅水波，水中质点的竖直运动随水深的增加而线性地减小，在水底变为零．

在水波中，对水面提供的回复力，在波长很短（小于1.73 cm）的时候，表面张力的作用是主要的，这种波叫表面张力波．但对于波长更长的波，表面张力的作用可以忽略，波动主要是重力作用的结果，这种波叫重力波．

对于浅水波，底部摩擦问题也是不可忽略的．在波峰处，水向前行进比较容易，在波谷处，水向后行进会与底部发生摩擦，结果是水中质点在波峰处向前运动的距离比在波谷处向后运动的距离要远，因而产生水的净移动．这就是海滨的浪总是带着水一块走的原因．

微信公众号：电子课本大全

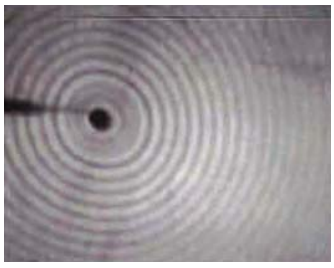
4 惠更斯原理　波的反射与折射

惠更斯原理

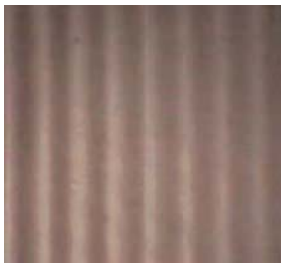
观察思考

在水波槽实验中，把一个金属丝固定在振动片上，当振动片振动时，金属丝周期性地触动水面，可观察到水波形成圆形的波纹从波源向周围传播，如图 2-4-1（a）所示；再用长方形直条作为波源拍击水面，产生如图 2-4-1（b）所示的直线波纹的水波，图中的圆和直线表示了波的波峰（或波谷）. 在水波前进的方向放上两块挡板，使挡板中间的缝宽与水波的波长相当，如图 2-4-1（c）所示. 请仔细观察，在挡板的后面将会发生什么现象？

怎样估算水波的波长？



（a）圆形波纹



（b）直线波纹



（c）缝宽与水波波长相当

图 2-4-1　水波

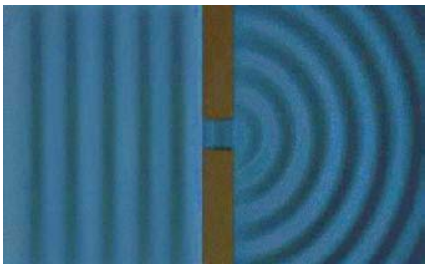


图 2-4-2　水波穿过狭缝

从波源发出的波经过同一传播时间而达到的各点所组成的面，叫做波面，最前面的波面叫做波前. 波面是平面的波称为平面波；波面是圆（球）形的波称为圆（球）形波.

从波源沿着波的传播方向画出的带箭头的线称为波线，它表示波动的传播方向. 平面波的波线是垂直于波面的平行线，圆形波的波线是沿着以波源为中心的半径方向向外的射线.

从实验中可以看到：在直线波纹的水波传播过程中，到达一个宽度与波长相差不多的狭缝时，水波穿过了狭缝，狭缝后面的波纹呈圆形，以缝为圆心沿半径方向向周边传去，好像狭缝就是波源一样，如图 2-4-2 所示.

荷兰物理学家惠更斯研究波的现象时，于 1690 年提出：**波在传播过程中所到达的每一点都可看做新的波源，从这些点发出球面形状的子波，其后任一时刻这些子波波前的包络面就是新的波前**. 这就是**惠更斯原理**（Huygens principle）.

根据这一原理，我们可以用几何作图的方法，由已知的某一时刻波前确定下一时刻波前，从而确定波的传播方

微信公众号：电子课本大全

向，所以惠更斯原理又叫做惠更斯作图法.

在图2-4-3中，应用惠更斯原理，用作图法描绘了平面波、球形波的传播情况. 在图中波的传播速度为 v，t 时刻的波前用紫线表示，以波前上的每一点为球心，以 $v\Delta t$ 为半径，作出的小球面表示子波，这些子波的包络面，即为 $t+\Delta t$ 时刻的波前，图中用蓝线表示.

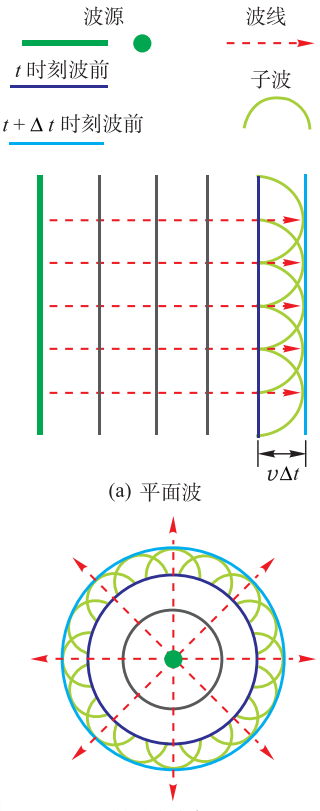


图2-4-3　子波的包络面为 $t+\Delta t$ 时刻的波前

波的反射

波在传播的过程中，遇到两种介质的分界面时返回到原介质继续传播的现象叫做波的**反射**（reflection）.

如图2-4-4所示，在介质中有一列平面波，其波速为 v_1，在 t_1 时刻波前 AE 与分界面相遇于 A 点，t_2 时刻波前上的 B 点与分界面相遇于 C 点. 应用惠更斯作图法，可由已知的入射波的波前，求出反射波的波前，从而求出反射线（即反射波线），并得到波的反射定律.

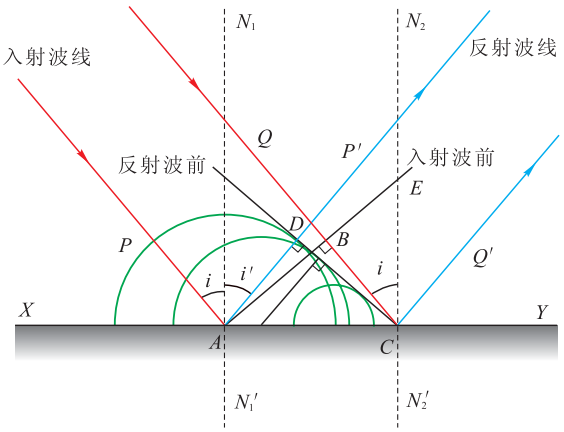


图 2-4-4　波的反射作图法

其步骤如下：

（1）标明通过两种介质分界面 XY 上 A、C 两点的法线 N_1N_1'、N_2N_2'，画出入射波的波前 AB 和垂直于它的入射波线 PA、QC.

（2）画出子波波前.

从 A 到 C 中间各点的子波在 t_2 时刻的波前的半径将依次减小，在 C 点为零，在图中用绿线表示.

（3）画出各子波波前的包络面，即反射波的波前.

作在 t_2 时刻各子波波前的切面 CD，CD 就是子波的包

小资料

一些几何图形的公切面，被称为这些图形的**包络面**.

微信公众号：电子课本大全

络面，即为反射波的波前.

（4）作出反射线，即垂直于反射波波面的直线.

入射点 A 与切点 D 相连，AD 即为反射线，与法线的夹角 i' 为反射角.

通过对以上步骤的分析，我们可以得到波的反射遵循的规律，即反射定律.

因为在同一种介质中波速相等，所以入射波速与反射波速相同，以 v_1 表示. 图中 AD 等于 A 点发出的子波在 t_2 时刻的半径.

$$AD = v_1(t_2 - t_1)$$

BC 为入射波在 $t_2 - t_1$ 时间内传播的距离.

$$BC = v_1(t_2 - t_1)$$

所以 $$AD = BC$$

在 Rt △ ADC 和 Rt △ ABC 中，

因为 $$AD = BC$$

所以 $\triangle ABC \cong \triangle ADC$，$\angle DAC = \angle BCA$

因为 $i' + \angle DAC = i + \angle BCA = 90°$

得 $$i' = i$$

由此得出波的反射定律：当波传播到两种介质的交界处发生反射时，入射线、法线、反射线在同一平面内，入射线与反射线分别位于法线两侧，而且反射角等于入射角；反射波的波长、频率和波速都与入射波相同.

波的折射

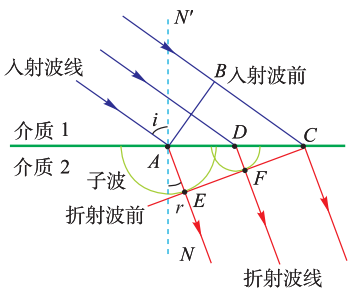


图 2-4-5　波的折射作图法

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

波发生折射的原因是在不同介质中波的速度不同.

惠更斯作图法也可以描绘波的折射（图2-4-5），由已知的入射波波前求出折射波波前，并由此得出波的折射定律：波在介质中发生折射时，入射线、法线、折射线（即折射波线）在同一平面内，入射线与折射线分别位于法线两侧，入射角的正弦值与折射角的正弦值之比等于波在第一种介质中的传播速度跟波在第二种介质中的传播速度之比. 对给定的两种介质，该比值为常数.

微信公众号：电子课本大全

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

从上式中，可以知道：当 $v_1>v_2$ 时，$i>r$，即折射线偏向法线；当 $v_1<v_2$ 时，$i<r$，即折射线偏离法线；当垂直界面入射（$i=0$）时，$r=0$，波的传播方向不变，是折射中的特殊情况.

在折射中，波的频率保持不变，波速和波长都会发生变化，根据 $\lambda=\frac{v}{f}$，当波进入新的介质后，若波速增大，则波长变大；若波速减小，则波长减小.

练习与评价

1. 应用惠更斯作图法描绘出平面波的传播.

2. 一列波从一种介质进入另一种介质时（　　）.

A. 只有频率发生变化　　B. 只有波长发生变化

C. 频率和波长都发生变化　　D. 波长和传播速度都发生变化

3. 一列波以 60° 的入射角入射到两种介质的交界面上，反射波刚好跟折射波垂直，若入射波的波长为 0.6 m，那么折射波的波长为_____m，反射波的波长为_____m.

4. 如果旅游者走过一个山谷，他大声高呼以后经过0.5 s听到右边山坡反射回来的声音，经过 1.5 s 听到左边山坡反射回来的声音，则这个山谷的宽度大约是多少米？

发展空间

试用惠更斯原理得出波的折射定律.



课外阅览

人民大会堂的声学构造

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

在建造人民大会堂时，为了兼顾音乐和我国汉语特点，设计人员对其中的设施做了一些恰当的处理：在屋顶和墙内装置矿渣棉，天花板钻了几百万个孔，使它变为钻孔吸音板；在二层和三层楼上的7 000个皮座椅底下，装有穿孔吸声结构，当座椅无人时，椅底反过来可以代替人对声的吸收作用. 这样将交混回响时间控制在合适范围，可以使满场时和仅用一楼开会（3 000 人）时，都有较高的语言清晰度.

微信公众号：电子课本大全

5 波的干涉、衍射

波的叠加原理

两列波相遇会不会像两个球相遇那样，改变了它们原来的运动状态呢？

有几列波在同一介质中传播，当它们相遇后会发生什么情况呢？

观察思考

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

它们相遇后的传播状态怎样？形状是否改变？



图 2-5-1　两列水波相遇

实验现象告诉我们：由水滴激起的两列水波相遇后相互穿过，仍然保持各自的运动状态继续传播，彼此之间好像未曾相遇，如图 2-5-1 所示.

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

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

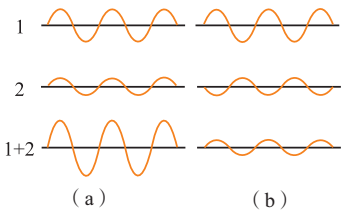


图 2-5-2　波的叠加

根据波的叠加原理，叠加区域的质点的位移可能增大，也可能减小. 如图 2-5-2（a）所示，如果介质中某些质点处于两列波波峰与波峰、波谷与波谷相遇处，则振动加强，合振幅将增大；如图 2-5-2（b）所示，如果质点处于波峰与波谷相遇处，则振动减弱，合振幅减小，此时如果两列波的振幅相同，质点振动的振幅就等于零.

微信公众号：电子课本大全

波的干涉现象

观察思考

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

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

在以上的实验中可以看到：两列频率相同的水波的波纹都呈正圆形，并向外传播. 这两列波重叠时就会出现如图 2-5-3 所示的图样：在振动着的水面上，出现一条条从两个波源中间展开来的水面相对平静的区域和振动较强的区域. 这两种区域的分布固定而且相互隔开.

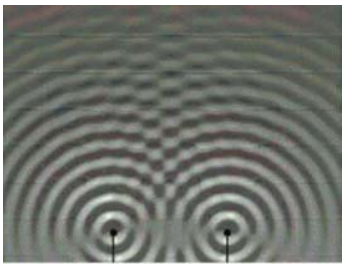


图 2-5-3　水波的干涉

频率相同的两列波叠加，使介质中某些区域的质点振动始终加强，另一些区域的质点振动始终减弱，并且这两种区域互相间隔、位置保持不变. 这种稳定的叠加现象（图样）叫做波的**干涉**（interference）.

为什么会产生干涉现象呢?

这是因为如果在某一时刻，两列波的波峰在水面上某点相遇，经过半个周期，在此点必定是波谷和波谷相遇. 这两列波在该点引起的振动是同相的. 在这一点振动的振幅等于两列波的振幅之和，质点的振动最剧烈，图 2-5-4 中所示各红点就是这样.

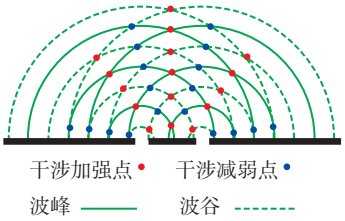


图 2-5-4　波的干涉

如果某一时刻，在水面上的某一点为这列波的波峰和另一列波的波谷相遇，经过半个周期，这列波的波谷和另一列波的波峰必定在此点相遇，即这两列波在该点引起的振动反相. 在这一点振动的振幅等于两列波的振幅之差，质点振动最微弱，图 2-5-4 所示的各蓝点就是这样.

把相应的振动最剧烈的质点连起来，构成振动加强区；把相应的振动不大或静止的质点连起来，构成振动减弱区. 图 2-5-5 是水波干涉形成的图样，从图中可以看到振动加强区和振动减弱区是相互隔开的.

是否任意两列波的叠加都能产生干涉现象呢? 在上面实验中如果使两个振子以不同频率振动，产生两列波，在它们相遇的区域就不能观察到这种现象发生. 这说明两列

微信公众号：电子课本大全

波相遇时要产生干涉现象，需要满足一定的条件：产生干涉的一个必要条件是两列波的频率必须相同.

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

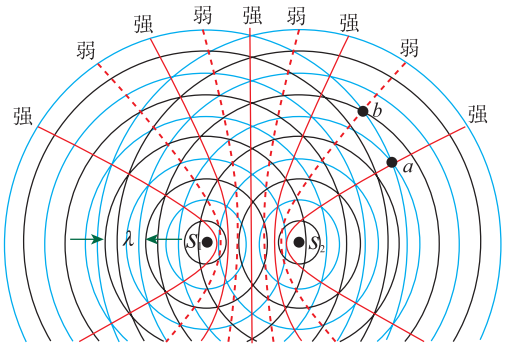


图 2-5-5　干涉图样

波的衍射现象

在海边，当海浪遇到不大的岩石时，海浪波动的传播并不会被岩石完全挡住，在岩石的背后仍继续传播. 在前面的实验中，我们也已经知道，在水波前进的方向上放一有缝的挡板时，波仍然可能绕到挡板的后面继续传播. 岩石或挡板的阻碍并不像原来想像的那么大.



图 2-5-6　海浪

波能够绕到障碍物的后面传播的现象，叫做波的**衍射**（diffraction）.

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

观察思考

在水槽中，把两块挡板放在水波前进的方向上，挡板之间留一条缝.

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

（1）当缝很宽时，是否能清楚地观察到波出现在挡板的后面？

（2）逐渐减小缝的宽度，当缝变得越来越窄时，将会看到什么现象？

微信公众号：电子课本大全

结论：_____

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

（1）当波长比缝宽小很多时，能否看到明显的衍射现象？

（2）逐渐增大波长，将会看到什么现象？

结论：_____

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

一切波都可发生衍射现象. 一般情况下，波长较长的波容易产生显著的衍射现象. 波通过衍射把能量传播到了障碍物的后面.

讨论交流

在实际生活中我们是否遇到过波的衍射现象？

我们在房间里能听到外面的喧闹声，也可以接收到收音机和电视的信号，怎么解释？

如图2-5-7所示，要在大山后面的房舍内听广播（信号波长为1～100 m）和看电视（信号波长为1～3 m），哪个效果更好？

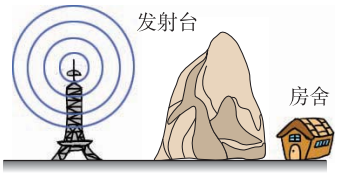


图2-5-7　波的衍射

练习与评价

1. 在两列波重叠的区域里，任何一个质点振动的总位移，都等于两列波分别引起的位移的_____，这就是波的叠加原理.

2. 关于两列波的干涉现象，下列说法正确的是（　　）

A. 任意两列波都能产生干涉现象

B. 发生干涉现象的两列波，它们的频率一定相同

C. 在振动减弱的区域，各质点都处于波谷

D. 在振动加强的区域，有时质点的位移等于零

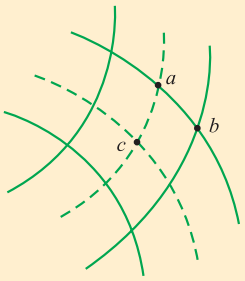


图2-5-8

3. 图2-5-8是两列波叠加时某一时刻的图样，其中实线表示波峰所在处位置，虚线表示波谷所在处位置. 在图中a、b、c各点的振动情况如何？

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

微信公众号：电子课本大全

发展空间

实验室

声波的干涉

把正在振动的双股音叉放入平静的水面，能否看到水波的干涉现象？

声波能产生干涉现象吗？

在学校的操场上，如果有相距 1 m 的两个扬声器发出 1 kHz 的声音，在操场上沿平行于两个扬声器的连线方向走一走，如图 2-5-9 所示，会发现什么现象？怎样解释？

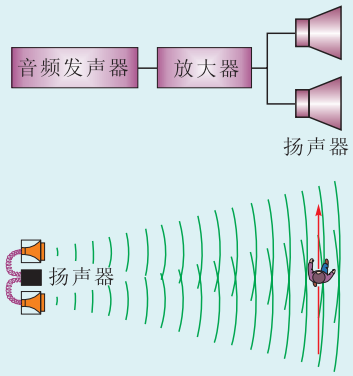


图 2-5-9　体验声波的干涉

6 多普勒效应

多普勒效应

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

多普勒效应的成因是什么呢？

下面分三种情况进行分析.

1．波源 S 与观测者 A 相对于介质都静止时，观测者单位时间内接收到的完整波的数目与单位时间内波源发出的相同，所以，观测者接收到的频率和波源的振动频率相同（图 2-6-1）.

2．波源相对于介质静止不动，观测者相对波源运动.

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

微信公众号：电子课本大全

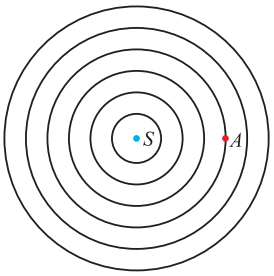


图 2-6-1　波源 S 和观测者 A 都不动，设波源频率为 20 Hz，则波源每秒发出 20 个完整波，观测者每秒接收到 20 个完整波

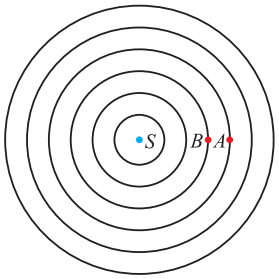


图 2-6-2　波源 S 不动，观测者运动，观测者在 1 s 内由位置 A 移至位置 B，A、B 相距一个波长. 波源每秒发出 20 个完整波，但观测者每秒接收到 21 个完整波

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

观察思考

水面上波源移动引起的多普勒效应

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

如图2-6-3所示，当波源在水面上移动时形成了不同圆心的圆形波．在波源前进的方向上，波纹压缩，波长变短，因此运动波源前方的观测者（波源接近观测者）测得的水波频率变大；在波源后方，波纹拉疏，波长变长，在波源后方的观测者（波源远离观测者）测得的水波频率变小．

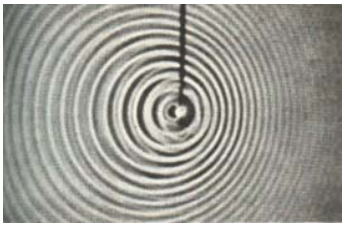
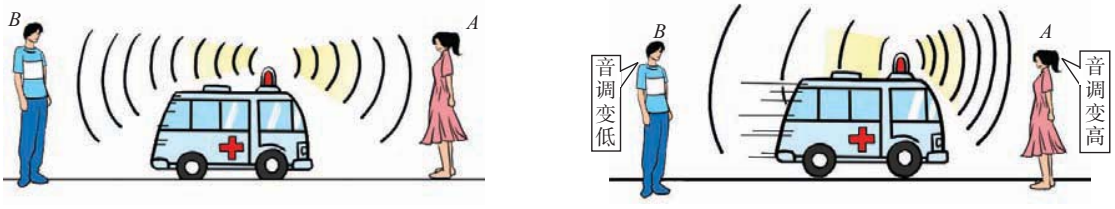


图 2-6-3　波源向右移动引起的多普勒效应

由上面分析可以看到，当观测者与波源两者相互接近时，接收到的频率将大于波源的频率；当二者远离时，接收到的频率将小于波源的频率．



（a）　　（b）

图 2-6-4　当救护车向你驶来时，听到警笛音调变高；当救护车离你而去时，警笛音调变低

多普勒效应的应用

机械波、电磁波都会产生多普勒效应．根据频率的变化，我们可以测出波源相对于介质的速度．医疗上，利用超声波

微信公众号：电子课本大全

的多普勒效应，可以测量心脏血流速度，为诊断提供重要依据. 其原理是：超声波发生器产生的超声波辐射到体内，被流动的血液反射，回波产生频率的变化，根据频率变化量可得出血液流速信息；再给血流信号加上色彩，显示在屏幕上，即可实时观察心脏血流状态，这就是现在所说的彩色超声波检测仪，简称彩超（以区别于B超）. 目前彩超和核磁共振、CT一样，是医院里先进的检测设备. 多普勒效应在测定人造卫星位置的变化、测定流体的流速、检查车速等方面也有广泛的应用. 在天文学上，由地球上接收到遥远天体发出的光波的频率可以判断遥远的天体相对于地球的运动速度.

练习与评价

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

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

发展空间

课外阅览

根据计算可以知道当波源和观测者有相对运动时观测者测得的频率.

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

交通警察可以向运动中的汽车发射一个频率已知的超声波，超声波被运动的汽车反射回来时，根据接收到的频率发生的变化，可以测出汽车的运动速度. 请你说出其中的道理.（图 2-6-5）



图 2-6-5　应用多普勒效应的监速器

实验室

模拟波源静止，观测者相对波源运动时产生的多普勒效应. 如图 2-6-6 所示，一张白纸上画有正弦图形，波峰涂上红色，另一张硬纸中间开有狭缝，把硬纸放在白纸上. 白纸向左

微信公众号：电子课本大全

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

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

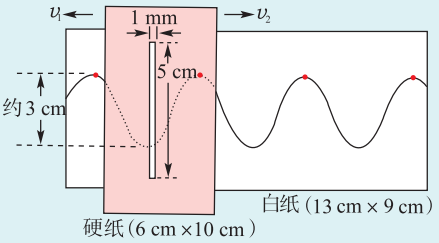


图 2-6-6

走向社会

查找资料了解多普勒效应的实际应用.

本章小结

1. **机械波**　机械振动在介质中传播称为机械波. 机械波产生需要条件，一是波源，二是介质. 机械波分为横波和纵波.

2. **波的图像**　在波动中，一系列质点在同一时刻相对于平衡位置的位移图像，称为波的图像.

知道波的传播方向，可以判断各质点在某时刻的振动（速度）方向；反之，知道各质点在同一时刻的振动方向，也可判断出波的传播方向.

3. **波速与波长和频率的关系**　沿波的传播方向，两个相邻的同相振动的质点间的距离叫波长，它和波的频率及波速的关系是 $v=\lambda f=\dfrac{\lambda}{T}$.

4. **惠更斯原理**　波传播时，波面上的各点都可以看做是子波源，从子波源发出的子波所形成的包络面，就是新的波前.

应用惠更斯作图法可以解释波的反射和折射现象，并能导出波的反射定律和折射定律.

5. **波的叠加原理**　当几列波相遇时，质点的总位移等于各列波单独存在时所产生的振动位移的矢量和. 这叫做波的叠加原理.

6. **波的干涉与衍射**　频率相同的两列波叠加，使介质中某些区域的质点振动始终加强，另一些区域的质点振动始终减弱，并且这两种区域互相间隔，位置保持不变. 这种稳定的叠加现象叫做波的干涉. 产生干涉现象的必要条件之一是两列波的频率相同.

当障碍物的尺寸大小与波长相差不多或比波长更小时，波能绕到障碍物的后面传播的现象，叫做波的衍射.

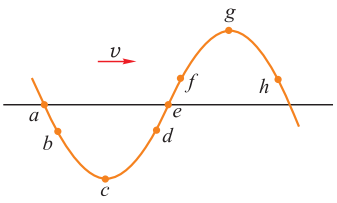
7. **多普勒效应**　由于波源与观测者有相对运动，使观测者接收到的频率与波源频率不同的现象，称为多普勒效应.

波源与观测者相互接近，观测者接收到的频率增大；波源与观测者相互远离，观测者接收到的频率减小.

微信公众号：电子课本大全

习　题

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



（第 1 题图）

2. 以下关于波的认识，正确的是（　　）.

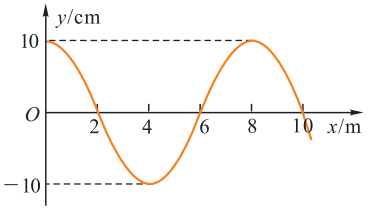
A. 潜艇利用声呐探测周围物体的分布情况，用的是波的反射原理

B. 发生多普勒效应时，波源的频率发生了变化

C. 机械波在介质中的传播速度是由介质本身的性质决定的

D. 波在传播过程中绕过障碍物向前传播的现象，是波的折射现象

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



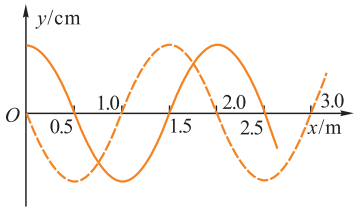
（第 3 题图）

（1）指出这列波中质点振动的振幅是多少.

（2）画出再经过 0.125 s 时的波形图.

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

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

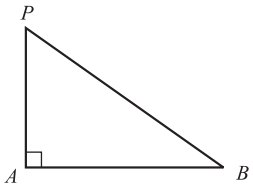


（第5题图）

（1）若 t 小于 T，则此列波的波速为多大?

（2）若 t 大于 T，则此列波的波速为多大?

*6. 如图所示，在同一介质中，有两个振幅相等、频率均为 $f = 10$ Hz 的相干波源 A 和 B，波速 $v = 10$ m/s，$AB = 20$ m，$AP = 15$ m，且 AB 垂直于 AP. 若 A 点为波峰时，B 点恰为波谷，试分析 A、B 发出的两列波在 P 点叠加的结果.



（第6题图）

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

微信公众号：电子课本大全

第三章

电磁振荡　电磁波

- 电磁振荡
- 电磁场和电磁波
- 电磁波谱　电磁波的应用
- 无线电波的发射、传播和接收

无线电广播、无线电通信、电视等信息传递过程和人造卫星、导弹、宇宙飞船等的遥控，都要利用电磁波．现代社会的各个部门，几乎都离不开电磁波．如果说电是现代文明的标志，那么电磁波就是现代文明的重要基础．



微信公众号：电子课本大全

1 电磁振荡

机械波是由机械振动产生的，那么电磁波是由什么产生的呢？

振荡电流的产生　电磁振荡

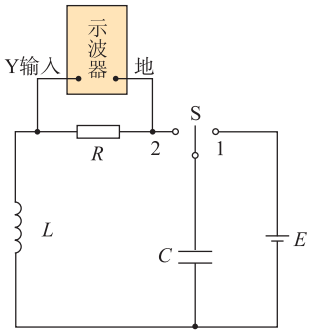


图 3-1-1　振荡电路

观察思考

把自感线圈 L、电容器 C、示波器、电池组 E、小电阻 R 和单刀双掷开关 S 按照图 3-1-1 连接成电路，先把开关 S 扳到 1，让电容器充电，稍后再扳到 2，让电容器通过线圈放电．在示波器的屏上你观察到的小电阻 R 两端的电压随时间变化的图像是什么曲线？由此可推测电路中电流随时间变化的图像是什么曲线？与以前学过的哪些物理量随时间变化的图像相同？

在图3-1-1中充电电容器通过线圈放电时，电流随时间变化的曲线是正弦（或余弦）曲线，表明电流随时间变化的规律与家庭电路所用的交流电相同，只是电流变化的频率要高得多．

大小和方向都随时间做周期性迅速变化的电流称为**振荡电流**（oscillatory current），能够产生振荡电流的电路叫做**振荡电路**（oscillatory circuit）．

由线圈L和电容器C组成的电路是最简单的振荡电路，称为***LC* 振荡电路**．

LC 振荡电路中的振荡电流是怎样产生的呢？

刚把开关扳到线圈一边的瞬间［图3-1-2（a）］，也就是已经充电的电容器要开始放电的前一瞬间，电路中没有电流，线圈中没有磁场，电容器两极板上的电荷量最多，两极板间的电场最强，电路里的能量全部以电场能的形式储存在电容器中．

电容器开始放电后，线圈中有了放电电流，由于电感线圈对交变电流的阻碍作用，放电电流不能立刻达到最大

微信公众号：电子课本大全

值，而是由零逐渐增大，线圈产生的磁场逐渐增强，与此同时，电容器里的电场逐渐减弱，电场能逐渐转化为磁场能. 放电完毕时，电场能全部转化为磁场能[图3-1-2(b)].

电容器放电完毕，由于线圈的自感作用，电流并不立即消失，仍保持原来的方向继续流动，电容器被反向充电. 在这个过程中，线圈的磁场逐渐减弱，电容器里的电场逐渐增强，磁场能逐渐转化为电场能. 充电完毕时，磁场能又全部转化为电场能 [图 3-1-2 (c)].

此后电容器再放电，再充电 [图 3-1-2 (d)(e)]，这样不断地充电和放电，电路中就出现了周期性变化的振荡电流. 电场和磁场周期性的相互转变的过程也就是电场能和磁场能周期性相互转化的过程，这与机械振动 (如弹簧振子和单摆的振动) 中势能和动能的相互转化相似，我们把这种现象叫做**电磁振荡** (electromagnetic oscillation).

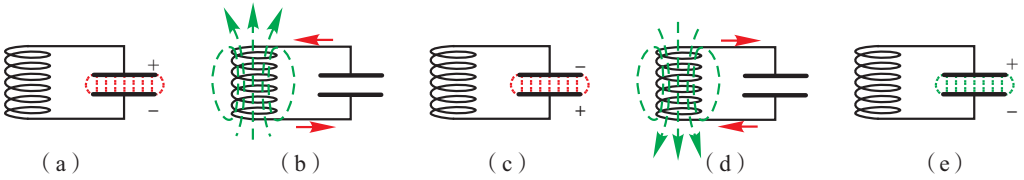
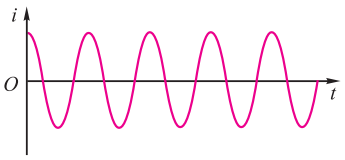


图 3-1-2　电磁振荡

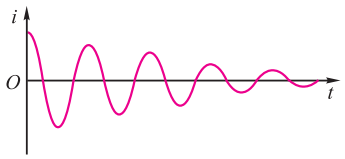
无阻尼振荡和阻尼振荡

在电磁振荡中，如果没有能量损失，振荡将永远持续下去，振荡电流的振幅应该永远保持不变. 这种振荡叫做**无阻尼振荡** (undamped oscillation). 无阻尼振荡电流随时间变化的图像如图 3-1-3 (a) 所示.

由于电路中有电阻，电路中的能量有一部分要转化成内能，还有一部分能量以电磁波的形式辐射到周围空间去了. 这样，振荡电路中的能量逐渐损耗，振荡电流的振幅逐渐减小，直到停止振荡. 这种振荡叫做**阻尼振荡**(damped oscillation). 阻尼振荡电流随时间变化的图像如图 3-1-3 (b) 所示.



(a) 无阻尼振荡



(b) 阻尼振荡

图 3-1-3　无阻尼振荡和阻尼振荡

电磁振荡的周期与频率

与机械振动类似，电磁振荡完成一次周期性变化需要的时间叫做**周期**. 1 s内完成周期性变化的次数叫做**频率**.

振荡电路里发生无阻尼振荡时的周期和频率叫做振荡

微信公众号：电子课本大全

电路的**固有周期**（natural period）和**固有频率**，简称振荡电路的周期和频率.

理论和实验表明，LC 振荡电路的周期 T 和频率 f 跟电感线圈的电感 L 和电容器的电容 C 的关系是

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

式中的 T、L、C、f 的单位分别为秒（s）、亨利（H）、法拉（F）和赫兹（Hz）.

由上述公式可知，可以改变电容器的电容 C 或线圈的电感 L 来改变振荡电路的频率.

练习与评价

1. LC 振荡电路中线圈的电感为 2 μH，要产生 7.5 MHz 的振荡电流，应选用多大电容的电容器？

2. 某 LC 振荡电路的电感是 4 μH，电容是 64 pF，求该振荡电路的固有频率.

3. 如图 3-1-4 所示，可变电容器的最大电容是 300 pF，要获得最低频率是 500 kHz 的振荡电流，线圈的电感应当多大？如果可变电容器动片完全旋出时电容变为 30 pF，这时可产生多大频率的振荡电流？

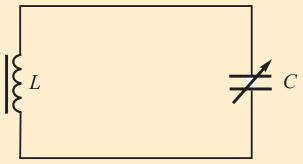


图 3-1-4

2 电磁场和电磁波


麦克斯韦
（James Clerk Maxwell，1831 — 1879）

麦克斯韦电磁理论的两个基本假设

19 世纪以前，人们认为电和磁是互不相关的. 电流的磁效应发现后，人们认识到电流（运动的电荷）与磁场之间的关系，但仍然认为电场和磁场之间是互不影响的. 电磁感应定律的发现改变了这一观念，它揭示了磁通量的变化率与感应电动势之间的关系.

微信公众号：电子课本大全

讨论交流

在通有振荡电流的线圈L中，放一个小闭合导线回路l，如图3-2-1所示．l回路中会出现电流吗？若出现电流，那么是什么力推动电荷做定向运动形成电流的？

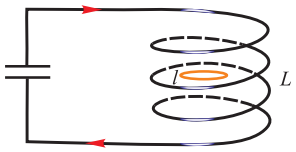


图3-2-1　l回路中电流的出现

19世纪60年代，英国物理学家麦克斯韦在法拉第等人研究成果的基础上，进行总结，并加以发展，提出了系统的电磁理论．这个电磁理论有以下两个基本假设．

1．变化的磁场能够在周围空间产生电场

由法拉第电磁感应定律可知，若在变化的磁场中放一个闭合电路，闭合电路里将产生感应电流．要产生电流必须要有使电荷做定向运动的电场存在，在这个闭合电路里，没有其他电源，因此麦克斯韦认为，这个电场是由于磁场的变化而产生的．麦克斯韦指出，闭合回路的存在只是提供了观测电场存在的手段，不管闭合回路存在与否，只要有磁场在变化，它的周围就产生电场，如图3-2-2所示．

根据理论研究，麦克斯韦进一步指出，磁场随时间变化快，产生的电场强；磁场随时间的变化不均匀时，产生变化的电场；稳定的磁场周围不产生电场．这意味着电场可由两种方式产生：由电荷产生或由变化的磁场产生．

2．变化的电场能够在周围空间产生磁场

麦克斯韦研究了电现象和磁现象的区别与联系，认为既然变化的磁场可以在周围空间产生电场，那么变化的电场也可以在周围空间产生磁场．麦克斯韦认为，在LC振荡电路中当电容器充放电时，不但导线中的电流要产生磁场，而且在电容器间，由于两极板电荷的变化使电场发生变化，变化的电场也要产生磁场，如图3-2-3所示．若电场随时间变化快，则产生的磁场强；若电场随时间的变化不均匀，则会产生变化的磁场．稳定的电场周围不产生磁场．

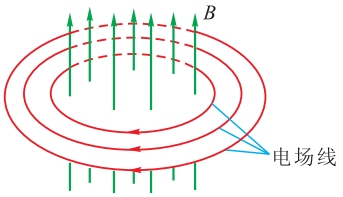


图3-2-2　变化的磁场能够产生电场（B增大时的情形）

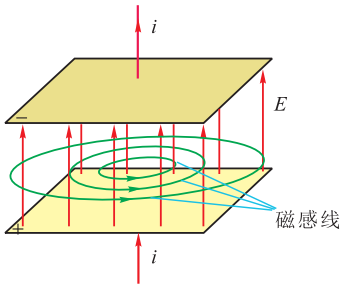


图3-2-3　变化的电场能够产生磁场（E增大时的情形）

微信公众号：电子课本大全

电磁场

麦克斯韦根据上述两个基本假设，进一步指出：如果在空间某区域有不均匀变化的电场，那么这个变化的电场就在它周围空间引起变化的磁场；这个变化的磁场又在它周围空间引起变化的电场……于是，变化的电场和变化的磁场交替产生，形成不可分割的统一体，称为**电磁场**（electromagnetic field）.

电磁波

上述由变化的电场和磁场交替产生而形成的电磁场是由近及远传播的，这种变化的电磁场在空间的传播称为**电磁波**（electromagnetic wave）.

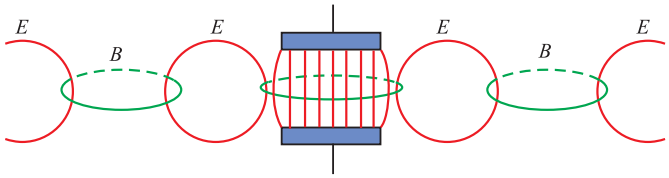


图 3-2-4　电磁波产生示意图



图 3-2-5　抖动带有电荷的梳子

讨论交流

小玲用塑料梳子梳理头发，梳子带上了电荷. 当她来回抖动梳子时，电荷随之运动. 根据麦克斯韦的电磁理论，你认为空间有变化的电场和磁场吗？梳子在向外发射电磁波吗？

小玲来回抖动带有电荷的梳子，在空间就会形成变化的电磁场，从而产生电磁波. 一切来回运动的电荷，或者更普遍地说，做变速运动的电荷都会在空间产生电磁波.

麦克斯韦在1865年从理论上预见了电磁波的存在，并计算出其传播速度等于光速，由此麦克斯韦认为光是电磁波的一种形态. 1888年德国物理学家赫兹第一次用实验证实了电磁波的存在.

赫兹所做的电磁波发射与接收实验如图3-2-6所示，感应圈所产生的高电压会在两个靠近的铜球间激起火花. 这火花表明电磁波的产生. 一束束电磁波向外传播，可以由检波器接收，表现为检波器的两铜球间也产生了电压，从而也有火花产生.



赫兹（Heinrich Rudolf Hertz，1857—1894）

微信公众号：电子课本大全

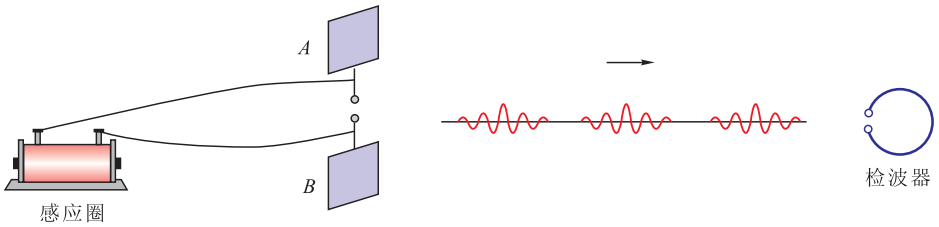


图 3-2-6　赫兹实验

赫兹还运用自己精湛的实验技术测定了电磁波的波长和频率，得到了电磁波的传播速度，证实了这个速度等于光速. 赫兹还用实验证明，电磁波跟所有波动现象一样，能产生反射、折射、干涉、衍射等现象，从而证实了麦克斯韦的电磁场理论，为后人利用电磁波传递信息开辟了道路.

电磁波的波长λ、波速 v 和周期 T、频率f的关系与机械波一样，由下式表示

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

电磁波在真空中也能传播，这是它与机械波的不同之处. 电磁波在真空中的传播速度 $v = c \approx 3\times10^8$ m/s.

麦克斯韦理论在物理发展史上的意义

麦克斯韦总结了法拉第等电磁学研究先驱者们的工作，在两个基本假设的基础上，建立了电磁场方程，预言了电磁波的存在，把电磁学发展成为完整的、优美的理论体系，统一了人们对电磁和光现象的认识，为电和磁的利用开辟了理论前景. 麦克斯韦电磁理论是继牛顿建立经典力学体系之后的又一次对自然现象认识的伟大综合. 它为深入研究物质的电磁结构及客观性质提供了理论基础. 同时，正是这个理论为现代电力工业、现代电子工业、无线电技术、通信等奠定了基础，使得电和磁的应用进入到现代社会生活的各个方面.

爱因斯坦对这个理论赞叹不已，作出了高度评价：这是个从超距作用过渡到以场作为基本变量，以至成为一场革命的理论. 从麦克斯韦开始，人们认识到场是物质存在的一种基本形式，它是客观实在，而不仅是人为的数学概念，从而大大扩展了对自然界的认识和整个自然科学的视野.

麦克斯韦理论中的一个重要结论是光在真空中的速率是一个常量，与参考系无关. 爱因斯坦就是根据这一结论提出了光速不变原理，而于1905年建立了狭义相对论的. 狭义相对论与量子理论一起开创了现代物理学的新纪元.

微信公众号：电子课本大全

练习与评价

1. 麦克斯韦电磁场理论的两个基本假设是什么？

2. 我国第一颗人造地球卫星采用20.009 MHz和19.995 MHz的频率发射电磁波信号，求这两种频率的电磁波的波长.（光速取 $2.997\,9\times10^{8}$ m/s）

3 电磁波谱　电磁波的应用

电磁波的波长和频率有一个很宽的范围. 其中一部分称为“无线电波”，主要用于通信、广播和电视等方面，这部分电磁波的波长较长，频率较低. 还有一部分电磁波能够作用于我们的眼睛并引起视觉，因而叫做可见光，可见光波长范围约为 400 ~ 700 nm；在可见光之外还存在着看不见的红外线、紫外线. 此外，还有一部分波长极短，频率极高的电磁波，如 X 射线、γ 射线等. 我们按波长（或频率）的顺序把所有电磁波排列起来，称之为**电磁波谱**（electromagnetic wave spectrum）（见图3-3-4）. 不同波长的电磁波的性质可以有很大差异，用途也各不相同.

$1\ \text{nm} = 10^{-9}\ \text{m}$

无线电波

无线电波波长从几毫米到几十千米，它对我们的生活十分重要，现将其波段划分及主要用途列在表 3-3-1 中.

表 3-3-1　各个波段的无线电波及其用途

波段		波长	频率	主要用途
长波		30 000 ~ 3 000 m	10 ~ 100 kHz	超远程无线电通信和导航
中波		3 000 ~ 200 m	100 ~ 1 500 kHz	无线电广播和电报通信
中短波		200 ~ 50 m	1 500 ~ 6 000 kHz	
短波		50 ~ 10 m	6 ~ 30 MHz	
微波	米波	10 ~ 1 m	30 ~ 300 MHz	无线电广播、电视、导航
	分米波	10 ~ 1 dm	300 ~ 3 000 MHz	电视、雷达、导航
	厘米波	10 ~ 1 cm	3 ~ 30 GHz	
	毫米波	10 ~ 1 mm	30 ~ 300 GHz	

表中 kHz 代表千赫，MHz 代表兆（10^{6}）赫，GHz 代表吉（10^{9}）赫.

微信公众号：电子课本大全

红外线

波长位于微波和可见光之间的电磁波称为红外线．红外线的波长范围在760～10^6 nm. 红外线不能直接引起视觉，但能给人以“热”的感觉．

红外线的频率与固体物质分子的固有频率很接近，容易引起固体物质分子共振，使红外线电磁场的能量转变成物质的内能．因此可利用红外线加热和烘干物体，进行某些医疗、保健等工作．

遥控器发出的红外线脉冲信号，可以用来遥控电视机（如图 3-3-1）、录像机和空调机等．

一切动物、墙壁、地面、车辆、飞机等都在不停地发射红外线，物体温度越高，其辐射出的红外线越强．利用电子仪器对接收到的信号进行处理，就可以探知被测物体的特征，这种技术叫做红外线遥感．

红外线是在1800年被发现的．当时英国的物理学家赫歇耳（William Herschel,1738—1822）利用温度计在日光光谱红端以外观察到增温现象，确定其存在一种新的射线．



图 3-3-1　用遥控器选择电视节目

紫外线

紫外线是一种波长比最短波长的可见光（紫光）还短的电磁波．一切高温物体都能够发射紫外线，如太阳、弧光灯发出的光中就包含紫外线．紫外线的波长范围为60～400 nm，与红外线一样，紫外线不能直接引起视觉．

紫外线能杀死多种细菌，常用于医院和食品消毒．被紫外线照射的某些物质会发出荧光．日光灯和诱杀害虫的黑光灯都是用紫外线来激发荧光的．紫外线的这种荧光作用还可用来做防伪标志．紫外线有助于人体合成维生素D，但过量的紫外线照射会使皮肤粗糙，甚至诱发皮肤癌．

1801 年，里特发现在日光光谱紫端的外面一段，能够使含有氯化银的照相底片感光，因而首次发现了紫外线的存在．

X 射线

X射线是一种波长比紫外线还短的电磁波．它的穿透能力很强，能使包在黑纸里的照相底片感光．在工业上可用于检查工件内部是否有砂眼、裂纹等缺陷；在医学上可用来透视人体，检查体内的病变和骨骼情况．图 3-3-2 是伦琴为他的夫人拍下的照片，这也是世界上第一张X射线照片．

X 射线又叫伦琴射线，是德国物理学家伦琴（Wilhelm Konrad Rotgen，1845—1923）在 1895 年发现的．



图 3-3-2　1895 年 12 月 22 日，伦琴在实验室为他的夫人拍下的第一张 X 射线照片

微信公众号：电子课本大全

γ射线

比X射线波长更短的电磁波，那就是γ射线，它来自宇宙射线或某些放射元素衰变的过程. γ射线的波长范围为10^{-7}～10^{-2} nm. γ射线的穿透能力比X射线更强，因此，工业上常用它来进行探伤；医学上，则利用其强穿透能力来杀死病态细胞，治疗某些疾病，例如癌症等，因而有γ刀之称.

γ射线对人体正常细胞有很强的破坏作用. 因此，在γ射线可能出现的地方，必须提出警告，严加防护.



图 3-3-3 辐射警告标志

无线电波、红外线、可见光、紫外线、X射线、γ射线等合起来，构成了范围非常广阔的电磁波谱，如图3-3-4所示. 其中最长波长是最短波长的10^{21}倍以上，各个波段都有重叠，不能严格区分.

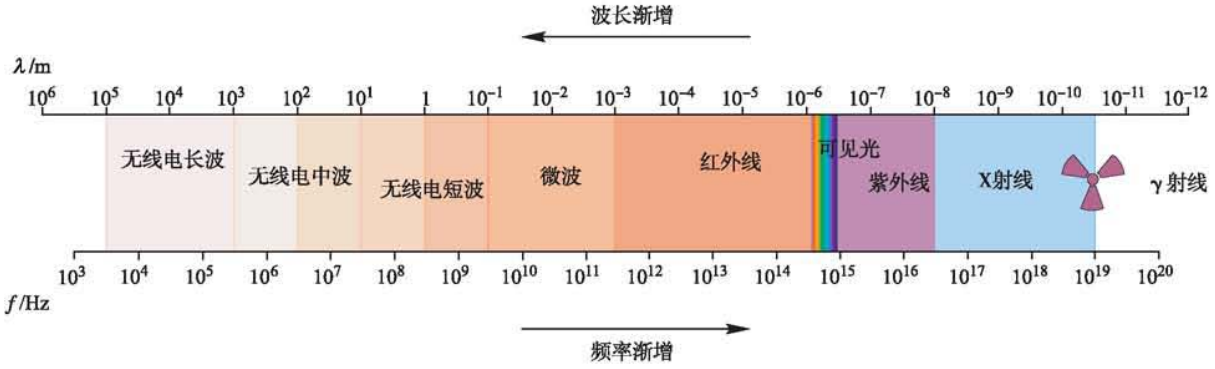


图 3-3-4 电磁波谱

练习与评价

1. 根据电磁波谱，指出波长为4 687 m、6.2×10^{-7} m和2×10^{-6} m的电磁波分别为哪种类型的电磁波.

2. 中央人民广播电台利用的一种无线电波的频率是720 kHz，而一种宇宙射线的频率是3×10^{22} Hz. 这些电磁波的波长各是多少？

发展空间

课外阅览

电磁辐射污染

电磁辐射有许多应用，但是，我们也不能忽视电磁辐射的负面效应，那就是电磁辐射污染（有人称之为“第五大公害”）. 其主要表现为以下两个方面.

微信公众号：电子课本大全

1. 电磁干扰. 电磁辐射场强过大，可能干扰飞机的起降与飞行，干扰心脏起搏器的工作、精密仪器的使用等. 在某些特定场合，产生较强电磁辐射的电器（例如手机）必须停用.

2. 电磁辐射对人体的伤害. 过强或过长时间的紫外辐射、微波辐射、X射线或γ射线的作用，会对人体（眼睛、皮肤、血液、神经系统、生殖系统等）造成危害. 在存在强电磁辐射的场合，必须注意防护，例如设置防护墙，穿戴预防电磁辐射的衣帽、眼镜及其他用品等.

走向社会

查找资料，写一篇关于红外线或微波在生活、生产技术中应用的文章.

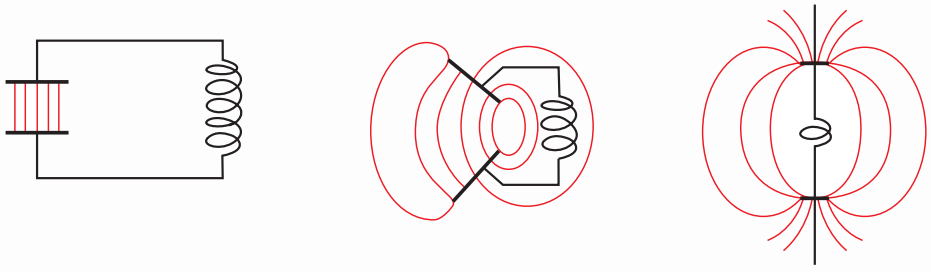
4 无线电波的发射、传播和接收

无线电波的发射

利用电磁波传递信息时，首先要把电磁波向远方发射出去，通常都用振荡电路发射无线电波. 当振荡电路中发生电磁振荡时，周围空间就会产生变化的电场和磁场，并以电磁波的形式向远方传播. 但在像图3-4-1（a）所示的*LC*振荡电路中发生电磁振荡时，它所产生的电场主要集中在电容器两极板之间，磁场主要集中在电感线圈里，周围空间的电磁场很弱，不能有效地将电磁波发射出去.

怎样才能有效地发射无线电波呢?

第一，振荡电路产生的电场和磁场必须分布到广大的开放空间中，才能有效地把电磁场的能量传播出去.



（a）　（b）　（c）

图 3-4-1　由闭合电路变成开放电路

微信公众号：电子课本大全

对于图 3-4-1（a）中的振荡电路，逐步增大电容器极板间的距离，减小极板的面积，同时减小自感线圈的匝数，经图 3-4-1（b）改造成图 3-4-1（c）. 可以看出，原来集中在电容器中的电场和集中在电感线圈中的磁场扩散到空间中去了. 这种使电场和磁场扩展到外部空间的振荡电路叫做开放电路.

在这种开放电路上的振荡电流就会产生变化的电磁场并且有效地以波的形式传播出去.

第二，要有足够高的振荡频率. 研究表明，频率越高，振荡电路向外发射电磁波的本领越大. 由振荡频率公式 $f=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 可知，采取措施使 L、C 的值减小，使频率升高，将有利于电磁波的发射.

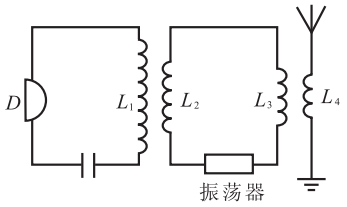


图 3-4-2　无线电广播调幅装置

发射电磁波是为了利用它来传递某种信号，这种信号是加在高频等幅电磁波上发射出去的，这种用来“运载”信号的高频等幅波，通常叫做**载波**（carrier wave）[图 3-4-3（a）]. 把传递的信号“加”到载波上的过程叫做**调制**（modulation），常用的调制方法有调幅和调频两种. 使高频振荡的振幅随信号而变的叫做**调幅**（amplitude modulation）[图 3-4-3（c）]，使高频振荡的频率随信号而变的叫做**调频**（frequency modulation）[图 3-4-3（d）]，图 3-4-2 是无线电广播中进行调幅广播的示意图. 图中的 D 是麦克风，它把声波变成相应的音频电流[图 3-4-3（b）]，这个电流通过线圈 L_1 使线圈 L_2 产生感应电流，振荡器产生的高频振荡电流的振幅就会随音频电流的波形而改变[图 3-4-3（c）]. 调幅后的电流流过 L_3 使 L_4 产生感应电流，则载有音频信号的电磁波就从开放电路中发射出去了.

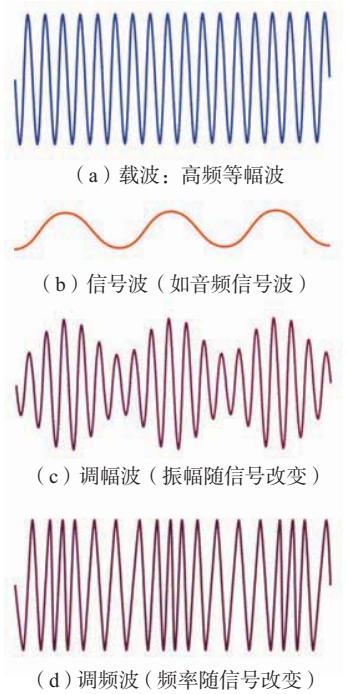


图 3-4-3　调幅与调频

无线电波的传播

发射出去的电磁波，因波长不同，而传播方式也不同，无线电波有三种主要传播方式.

1. 地波：沿地球表面空间传播的无线电波叫做地波.

由于地面上有高低不平的山坡和房屋等障碍物的阻挡，所以只有能绕过这些障碍物的无线电波，才能被各处接收到. 根据波的衍射条件可知，当波长大于或与障碍物的尺寸相当时，波可以绕过障碍物继续传播. 长波、中波和中短波可用地波传播，但短波和微波则不宜用地波传播.

微信公众号：电子课本大全

由于地面的吸收，地波在传播过程中有能量损失，因此地波不能传得很远，一般只在几百千米范围内.

2. 天波：依靠电离层的反射来传播的无线电波叫做天波.

地球被厚厚的大气层包围着，在距地表50 千米到几百千米范围内的大气中，一部分气体分子由于受到太阳光的照射而发生电离，成为带正电的离子和自由电子，这层大气叫做电离层.

实验证明，对于波长短于 10 m 的微波，将穿过电离层而进入太空；对于波长超过 3 000 m 的长波，电离层基本上把它吸收掉. 波长在这二者之间的电磁波，波长越短，电离层对它吸收得越少而反射得越多. 可见，短波最适宜以天波的形式传播，可以传播到几千千米外的地方.

3. 直线传播：微波又叫超短波，它既不能以地波的形式传播，又不能依靠电离层的反射以天波的形式传播. 微波的传播形式跟光一样，是沿直线传播的. 这种沿直线传播的电磁波叫做**空间波**或**视波**.

地球表面是球形的，微波沿直线传播时能够传播的距离不大，一般只有几十千米. 在进行远距离通信时，要设立中继站. 由某地发射出去的微波，被中继站接收，并加以放大，再传向下一站，把信号传到远方. 直线传播方式受大气的干扰小，能量损耗少，所以接收到的信号较强而且比较稳定. 电视、雷达采用的都是微波.

另外还可以用同步通信卫星传送微波. 同步通信卫星静止在赤道处地面上空约 36 000 km 高的地方，用它来做中继站，可以使无线电信号跨越大陆和海洋，只要有 3 颗卫星，广播就可以传遍除两极等少部分地区外的世界各地.

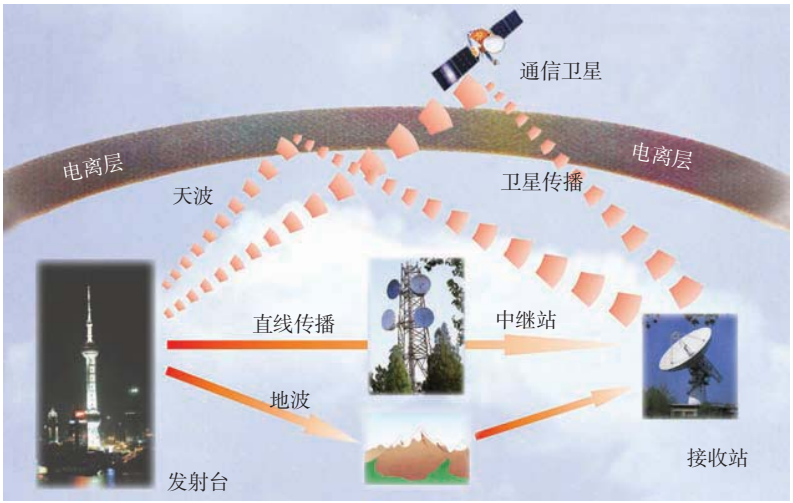


图 3-4-4　无线电波传播的多种方式

微信公众号：电子课本大全

无线电波的接收

由无线电发射机发射出来的电磁波，在空间传播中遇到导体时，就会在导体里感应出振荡电流．这种感应电流的能量是从电磁波里得来的，它的频率和激起它的电磁波的频率相同，它的振幅和电磁波的强弱（即传来的能量）有关．无线电技术中用来接收电磁波的导体叫做接收天线，它在电磁波的影响下产生了感应电流．

空间中，存在着由无数的无线电台发送的各种频率的电磁波．从中选出所需要的无线电波叫做“选台”．选台的目的就是使我们需要的电磁波在接收电路中激起的感应电流最强，而使我们不需要的电磁波激起的感应电流很弱，不产生明显影响．

当振荡电路的固有频率跟传播来的电磁波的频率相等时，电路里激起的感应电流就最强．这种现象叫做**电磁谐振**，也称为电谐振．使接收电路产生电谐振的过程叫做**调谐**（tuning），能够调谐的接收电路叫做**调谐电路**．我们可以在图 3-4-5 所示的调谐电路中通过改变电容来改变电路的固有频率，使它跟某一个电台发射的频率相同，那么这个频率的电磁波在接收电路里激起的感应电流最强，这样我们就选出了这个电台，并获得电台所发射电磁波中携带的信号．

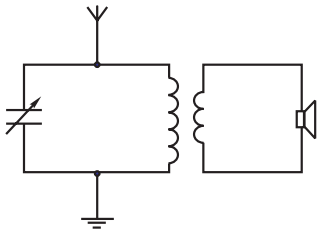


图 3-4-5　调谐电路与无线电接收

练习与评价

1. 发射电磁波的条件是什么？
2. 无线电波的传播有哪些方式？
3. 什么是电磁谐振现象？
4. 有一 LC 振荡电路，当电容调节为 $C_1 = 200$ pF 时，能产生频率为 $f_1 = 500$ kHz 的振荡电流，要获得频率为 $f_2 = 1.0$ MHz 的振荡电流，则可变电容器应调至多大？（设电感 L 保持不变）

发展空间

走向社会

请同学们到图书馆或上网查找资料，了解：

1. 移动通信的基本原理；
2. GPS 全球卫星定位系统的工作原理；
3. 常见的无线电波的应用，如电视、雷达的原理．

微信公众号：电子课本大全

本章小结

1. **电磁振荡**　大小和方向都随时间做周期性变化的高频电流称为振荡电流．能够产生振荡电流的电路叫做振荡电路．LC 振荡电路的固有周期和固有频率分别为

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

2. **麦克斯韦电磁场理论**　随时间均匀变化的电场产生稳定的磁场，不均匀变化的电场产生变化的磁场；随时间均匀变化的磁场产生稳定的电场，不均匀变化的磁场产生变化的电场．变化的电场和变化的磁场形成统一的电磁场．

3. **电磁波**　变化的电磁场由近及远地传播形成电磁波．电磁波的波速 v 、波长 λ 和频率 f 三者之间的关系为 $v = \lambda f$.

4. **电磁波谱**　无线电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线、γ 射线排列起来构成电磁波谱．各种电磁波在真空中传播的速度都是一样的，为 $c = 3 \times 10^8$ m/s.

5. **无线电波的发射、传播和接收**　振荡电路发射电磁波的条件是：要有足够高的振荡频率；电路是开放式的．无线电波有三种主要传播方式：地波、天波和直线传播．当振荡电路的固有频率跟传播来的电磁波的频率相等时，电路里激起的感应电流最强，这种现象叫做电磁谐振．无线电选台就利用了这种现象．

微信公众号：电子课本大全

习　题

1. 什么叫电磁振荡？

2. 写出 *LC* 振荡电路的频率公式.

3. 按照麦克斯韦的电磁理论，电场和磁场有什么关系？

4. 按照波长从长到短的顺序，列出电磁波谱的六个主要波段.

5. 从地球向月球发射电磁波，经过多长时间才能在地球上接收到反射回来的电磁波？（地球到月球的距离为 3.84×10^5 km）

微信公众号：电子课本大全

第四章 光的折射

- 光的折射定律
- 学生实验：测定玻璃的折射率
- 光的全反射

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



微信公众号：电子课本大全

1 光的折射定律

光的反射和折射现象

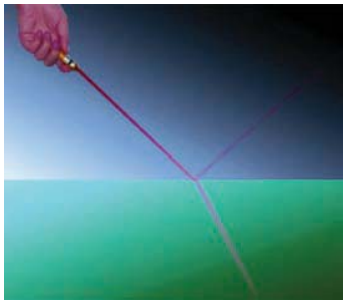


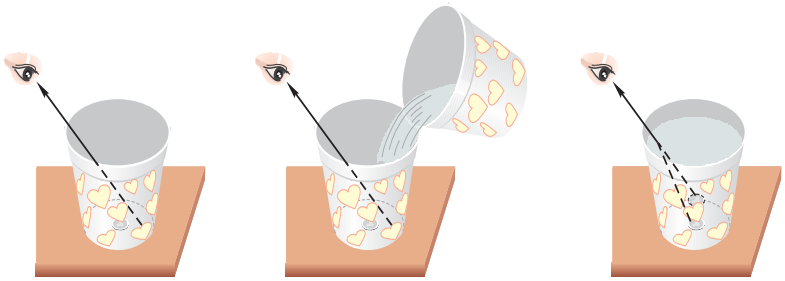
图 4-1-1　光的反射与折射

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

光的折射定律

观察思考

在不透明的杯子里放一个硬币，在如图 4-1-2（a）所示位置进行观察，将看不到硬币. 若向杯子里倒水，仍在原来位置进行观察，你就有可能看到硬币［图 4-1-2（c）］. 反复做一做，看是否会出现这样的现象，并想一想其中的道理. 这个现象背后隐藏着什么规律？



（a）　（b）　（c）

图 4-1-2　观察折射现象

实验探究

实验器材

薄平木板、厚毛玻璃板、激光笔、水彩笔.

实验过程

1. 如图 4-1-3 所示，将一毛玻璃板与薄平木板紧贴固定.
2. 在毛玻璃板与木板的分界线 AB 上取中点 O 为入射

微信公众号：电子课本大全

点，用蓝色水彩笔画出与 AB 垂直的法线 NN'，并标出入射点 O.

3. 用激光笔贴着木板表面对着 O 点发出光束，用红色彩笔沿光束画出带箭头的入射光线，标出入射角 i，再沿光在玻璃板中的传播路线用红色彩笔画出带箭头的直线表示折射光线，并标出折射角 r.

4. 改变入射角几次，每次重复实验步骤 3.

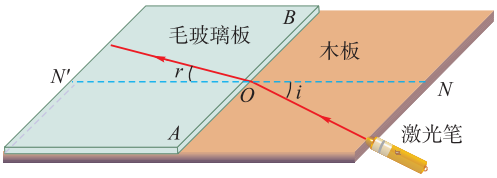


图 4-1-3　实验过程

注意！勿将激光束射入眼中.

数据记录与处理

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

为什么要计算 $\frac{\sin i}{\sin r}$ 的值呢？从前面我们利用惠更斯原理推导出来的波的折射规律中你得到什么启示？

表 4-1-1

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

实验结论

通过分析表中数据可以得出结论：

在误差允许的范围内，入射角 i 的正弦值跟折射角 r 的正弦值之比为一常数，用 n 来表示这个常数，就有

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

拓展

1. 若激光笔沿毛玻璃中的折射光线逆向发出光束，你将观察到什么现象？再分别沿另外几条折射光线逆向发出光束，你能发现什么规律？你认为光路是否可逆？

2. 将毛玻璃换成透明硬塑料块，重复上述实验，看看是否也遵循同样的折射规律？

由实验可以得出光的**折射定律**（refraction law）：入射光线、折射光线和法线在同一平面内，入射光线与折射光线分居法线两侧，入射角的正弦值与折射角的正弦值之比为一常数.

微信公众号：电子课本大全

介质的折射率

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

在物理学中，把光从真空射入某种介质发生折射时，入射角i的正弦值与折射角r的正弦值的比值，叫做这种介质的**折射率**（refractive index）．上面的n即代表折射率，有

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

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

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

光在不同介质中的速度是不同的，这正是光发生折射的原因．

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

表 4-1-2　几种介质的折射率

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

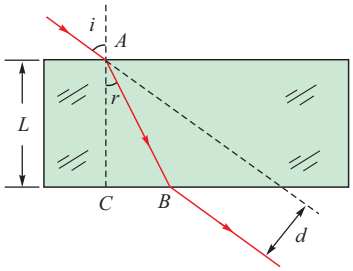


图 4-1-4

【例题】如图4-1-4所示，一块两对面平行的玻璃砖的厚度为L，现测得该玻璃砖的折射率为1.73，若光从上表面射入的入射角i为60°时，求：

（1）从下表面射出玻璃砖的光线相对于入射光线的侧移d.

（2）光在玻璃中传播的时间t.

微信公众号：电子课本大全

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

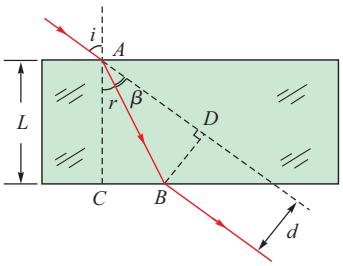


图 4-1-5

【解】设光从空气进入玻璃时的折射角为r，则

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

把$i=60°$和$n=1.73$代入可得

$$r=30°$$

从而

$$\beta=i-r=30°$$

在Rt△ABC中，$AB=\dfrac{AC}{\cos r}=\dfrac{L}{\cos r}=\dfrac{2\sqrt{3}}{3}L$

在Rt△ABD中，光线的侧移距离为

$$d=AB\sin\beta=\frac{\sqrt{3}}{3}L$$

光在玻璃中传播的速度

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

光在玻璃中传播的时间

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

练习与评价

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

2. 光从空气射入某介质中时，入射角$i=45°$，折射角$r=30°$. 求光在这一介质中的传播速度.

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

4. 光从折射率为1.5的玻璃射入空气. 如果折射角$r=75°$，则入射角是多大？如果入射角是$i=75°$，则折射角又如何？

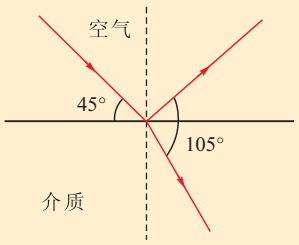


图 4-1-6

微信公众号：电子课本大全

发展空间

思考题

1. 你如果用激光斜射水中的鱼，是对准你看到的鱼照射呢？还是对准鱼的下方？或是对准鱼的上方？

2. 地球的大气层可以看做是越靠近地面折射率越大的介质. 当太阳发出的光射向地球时，就会产生如图 4-1-7 所示的现象，请你解释此现象产生的原因.

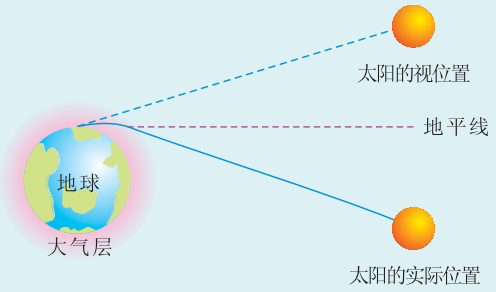


图 4-1-7

课外阅览

绝对折射率与相对折射率

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

如图 4-1-8 所示，光从介质 1 射入介质 2 时，不论入射角 i 大小怎样，入射角 i 的正弦值跟折射角 r 的正弦值的比值都是一个常数，这个常数叫做介质 2 对于介质 1 的相对折射率，用 n_{21} 表示，即

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

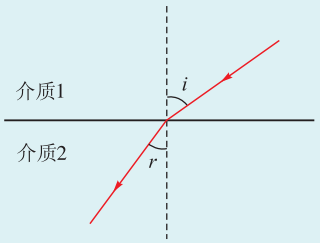


图 4-1-8

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

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

如果 $n_1<n_2$，光在介质 1 中的传播速度就大于光在介质 2 中的传播速度.

光线由空气射入某种介质时有

$$n_{空气}\sin i=n_{介质}\sin r$$

因为 $n_{空气}\approx 1$，所以有

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

这就是说，光从空气射入某种介质时的相对折射率近似等于该介质的绝对折射率.

微信公众号：电子课本大全

2 学生实验：测定玻璃的折射率

讨论交流

1. 我们已经知道当光以一定的入射角射入一块两对面平行的玻璃砖后，出射光线的方向会发生平移. 你能画出示意图吗?

给你以下器材：两对面平行的玻璃砖一块，大头针四枚，白纸一张，直尺一把或三角板一个，量角器一个. 请你设计一个实验方案，根据这个方案，画出光以一定入射角穿过玻璃砖时的传播路径.

2. 为了测出玻璃的折射率，想一想在实验中应该测出哪些物理量.

实验操作

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

2. 把长方形玻璃砖放在白纸上，使它的一个长边与 EE' 对齐. 用直尺或三角板轻靠在玻璃砖的另一长边，按住直尺或三角板不动，将玻璃砖取下，画出直线 FF' 代表玻璃砖的另一边.

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

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

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

6. 用量角器量出入射角 i 和折射角 r，从三角函数表中查出它们的正弦值.

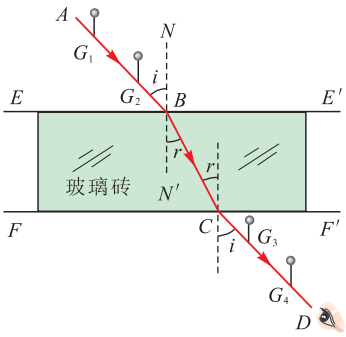


图 4-2-1　测定玻璃的折射率

微信公众号：电子课本大全

7. 通过上面的步骤分别测出入射角为 15°、30°、45°、60°、75° 时的折射角，并查出它们相应的正弦值.

表格设计与实验数据处理

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

讨论交流

1. 采取哪些措施可以使测量更精确?

2. 如果没有量角器而只有直尺(或三角板)，你能否求出入射角、折射角的正弦值，并进一步求出玻璃的折射率?

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

练习与评价

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

A. 他做实验时，光线是由空气射入玻璃的

B. 他做实验时，光线是由玻璃射入空气的

C. 玻璃的折射率为 0.67

D. 玻璃的折射率为 1/0.67

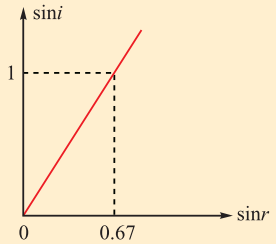


图 4-2-2

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

A. 甲的偏小　B. 乙的偏小　C. 甲的偏大　D. 乙的偏大

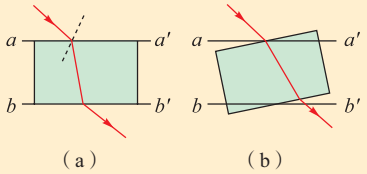
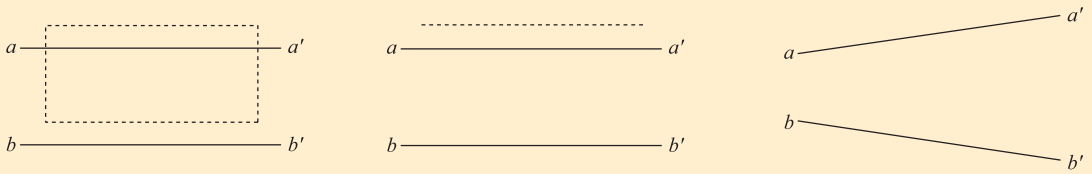


图 4-2-3

微信公众号：电子课本大全

3. ǎ “　定玻璃的折射率”的†　验中，请ㄐ考以下三个问题：



（a）　　（b）　　（c）

图 4-2-4

（1）如图 4-2-4（a）所示，若ǎ画好玻璃砖　面两条直线 aa' 和 bb' ᴰ，不ㄱ误将玻璃砖向上平移至图中虚线位置，而ɵ他操作均正确，则　得的折射率将_____（选″H“偏大”“偏小”或“不变”）.

（2）如图 4-2-4（b）所示，若ǎ画玻璃砖　面 aa' 时，误将　面向上画至图中的虚线位置，而ɵ他操作均正确，则　得的折射率将_____（选″H“偏大”“偏小”或“不变”）.

（3）如图 4-2-4（c）所示，若玻璃砖的两　面不平行，则　得的折射率将_____（选″H“偏大”“偏小”或“不变”）.

发展空间

实验室

参照上面的方法，利用一块直角三角形玻璃砖或一块半圆形玻璃砖　定玻璃的折射率.

课外阅览

ў的色散现象

用一束ώ阳ў或一束日ў灯的灯ў去照射横ˊ面为三角形的玻璃砖，看能否观察到图 4-2-5 所示的现象.



图 4-2-5

白ў没有特定的颜色，如ώ阳、日ў灯等发出的ў. 大量（ˌ括上面的†　验）的†　验说明：白ў↑　际上ض由各种单色ў组成的ὐ色ў. 我们把ὐ色ў ǎ通过透明介　以ᴰ分解成单色ў的现象∩做**色散**（dispersion）.

↑　验表明：同一种介　对不同颜色的ў的折射率ض不相同的. 表 4-1-2ض↑　验　得的不同介　对某一波长的黄ў的折射率，表 4-2-1ض↑　验　得的冕玻璃对各种色ў的折射率.

表 4-2-1　冕牌玻璃对各种色ў的折射率

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

我们　道，各种色ў ǎ　空中的速度都等于 c，由公˜ $n=c/v$ 可　，各种色ў ǎ同一均ω介中的传播速度 v ض不相同的. 介　对紫ў的折射率最大，表示紫ў ǎ介　中的传播速度最小.

微信公众号：电子课本大全

3 光的全反射

全反射现象

对于两种介质来说，我们把光在其中传播速度较小的介质，即折射率较大的介质叫做**光密介质**（optically denser medium）；而把光在其中传播速度较大的介质，即折射率较小的介质叫做**光疏介质**（optically thinner medium）. 光疏介质和光密介质是相对的，例如：水（n_1=1.33）、空气（n_2= 1.00）和玻璃（n_3= 1.50）三种物质相比较，水对空气来说是光密介质，而对玻璃来说是光疏介质.

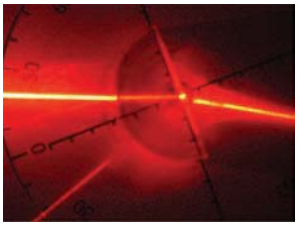
从前面的实验中我们已看到，光由光密介质（玻璃）射入光疏介质（空气）时，折射角大于入射角. 由此可以预料，当入射角增大到一定程度时，折射角就会增大到 90°. 如果入射角再增大，会出现什么情况呢?

观察思考

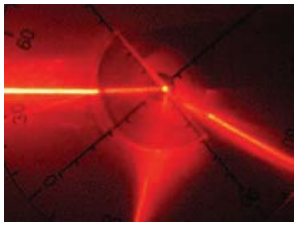
用一束激光沿透明半圆柱形玻璃砖的半径射到直平面上，光经过这个平面由玻璃进入空气中，发生折射. 现在观察当入射角逐渐增大时所发生的现象.

（1）当激光沿半径垂直入射到直平面时，此时入射角为 0°，折射角亦为 0°，光线沿直线射出.

（2）当入射角增大一些时，会有微弱的反射光线和较强的折射光线；同时可观察出反射角等于入射角，折射角大于入射角，如图 4-3-1 所示.

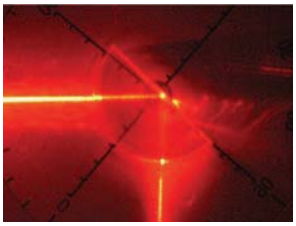


（a）入射角较小时

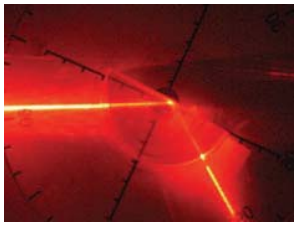


（b）入射角较大时

图 4-3-1



（a）折射角等于 90°



（b）折射光线完全消失

图 4-3-2

微信公众号：电子课本大全

（3）随着入射角逐渐增大，反射光线就越来越强，而折射光线越来越弱，当入射角增大到某一角度，使折射角达到 90° 时，折射光线消失，只剩下反射光线；若继续增大入射角，仍然只有反射光线．如图 4-3-2 所示．

光从光密介质射到光疏介质的界面时，全部被反射回原介质的现象叫做**全反射**（total reflection）．

全反射条件

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

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

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

所以

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

由此可求得临界角 C．

几种常见介质的临界角如表 4-3-1 所示．

表 4-3-1　几种介质的临界角

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

【例题】在水面下 1 m 处有一点光源 Q，求这个点光源的光能从多大面积的水面上射出来．（水的折射率为 1.33）

【分析】只有当光射向水面的入射角小于临界角时，光才能透过水面射出来．因此只要求出光由水射向空气而发生全反射时的临界角 C，就可以求出水面透光的半径，进而求出面积．

【解】如图 4-3-3 所示，O 为光源正上方水面上一点，P 为光按临界角入射到水面上的一点，以 $R=OP$ 为半径的圆形面积即为在水面透光的面积．

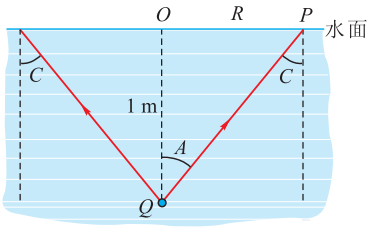


图 4-3-3

在 Rt △ PQO 中

$$R=QO\tan A$$

因 $QO=1$ m，$\sin A=\sin C=\frac{1}{n}=\frac{1}{1.33}$，所以

微信公众号：电子课本大全

$$\tan A = \frac{\sin A}{\sqrt{1-\sin^2 A}} = 1.14$$

所以，$R = 1\,\text{m} \times 1.14 = 1.14\,\text{m}$.

圆面的面积

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

全反射的应用——光导纤维

光导纤维简称光纤，它是现代通信和网络技术中重要的材料，光纤通信就利用了光在光纤中的全反射特性．为了解光导纤维的作用，我们先来观察以下现象．

观察思考

1. 把一段有机玻璃棒制成弧形，用硬纸板做成一个暗盒置于手电筒前端，暗盒一端钻一个孔，使孔恰能插入弯曲有机玻璃棒，如图 4-3-4 所示．注意有机玻璃的两个端面要尽量平整光滑．

2. 在暗处打开手电筒，观察在弯曲的有机玻璃棒的下端面有无光线射出．

想一想，手电筒发出的光，是怎样通过弯曲的有机玻璃传到下端的？你能解释这个现象吗？

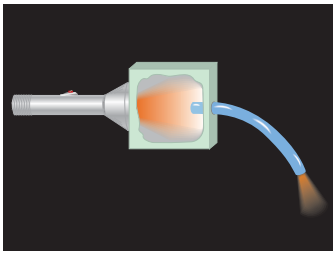


图 4-3-4　光顺着弯曲的有机玻璃棒传播

由于有机玻璃的折射率大于空气的折射率，当光从有机玻璃棒的一端射入时，可以沿着有机玻璃棒的表面发生多次全反射，从另一端射出（见图 4-3-5 与图 4-3-6）．这就是光纤的工作原理．

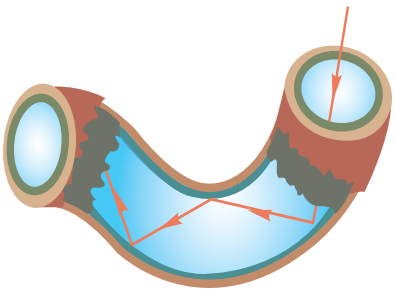


图 4-3-5　光纤工作原理图

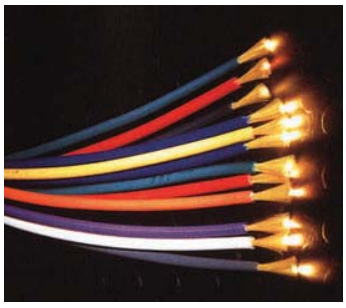


图 4-3-6　光纤的端点是亮晶晶的

在实际应用中的光纤是一根极细的玻璃丝，直径约几微米到 100 μm 不等，由两种折射率不同的玻璃制成，分内外两层，内层玻璃的折射率比外层玻璃的折射率大．当光

微信公众号：电子课本大全

从一端进入光纤时，将会在两层玻璃的界面上发生全反射．通过一系列的全反射，光就能沿着弯弯曲曲的光纤，从一端传到另一端去．实用上常把数十根、成百根光纤做成光缆（图4-3-7），并使每一根光纤在两端的位置一一对应，就能用它来传递文字图像和视频等多种信息．医学上用光纤制成内窥镜（图4-3-8），用来检查人体内脏的病变．

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

光纤通信的优点是容量大、衰减小、抗干扰能力强、传输速率高．一根比头发丝还细的光纤就可以传输几万路电话或者是几千路电视．

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

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

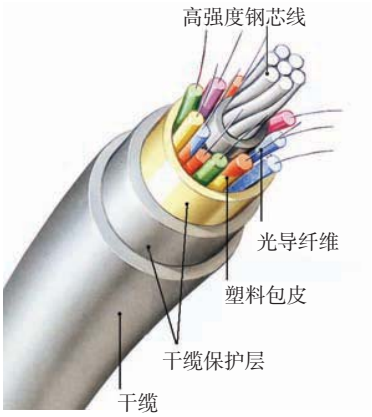


图4-3-7　光缆的结构

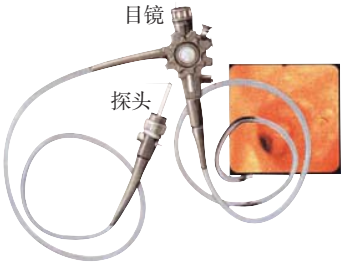


图4-3-8　内窥镜

练习与评价

1．根据表4-1-2中水晶的折射率，求光从水晶进入空气时的临界角．

2．如图4-3-9所示，S为一点光源，分别画出图中各条光线的折射光线和反射光线．

3．水中和玻璃中的气泡，看起来特别明亮，是因为一部分射到其界面上的光发生了全反射．根据图4-3-10所示的入射光线，完成该光线射到界面上后的光路图．

4．一束红色激光从空气射到厚度均匀的平行玻璃砖表面上，如图4-3-11所示，请判断光在AB表面能否发生全反射？光在CD表面能否发生全反射？为什么？

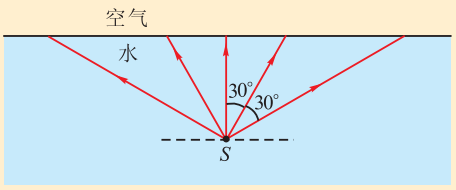


图4-3-9

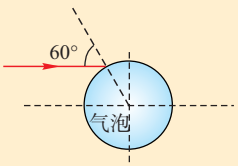


图4-3-10

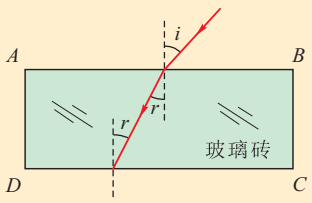


图4-3-11

微信公众号：电子课本大全

发展空间

实验室

1. 如图 4-3-12 所示，在一个较浅的杯盖中倒满水，将一粒沙子放在杯盖底部的中　，剪一个半径约为杯盖高度1.5倍的不透明圆纸板，使它浮在沙子正上方的水面上，让纸板圆心与沙子正对．虽然纸板并没有把水面全部盖上，但是我们从任何角度观察都看不到沙子．为什么会发生这种现象呢？

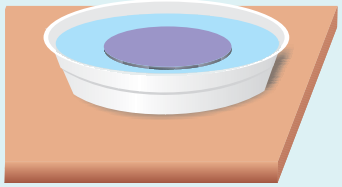


图 4-3-12

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

2. 找一根透明塑料管，观察光沿水柱传播的情况．

3. 全反射棱镜．

我们把横截面是等腰直角三角形的玻璃砖叫做全反射棱镜．如图 4-3-13 所示的等腰直角三角形 ABC 表示了全反射棱镜的横截面，AB 和 CB 表示棱镜上两个互相垂直的侧面．画出如图 4-3-13 中那样的光线在 AC 面上和 AB 面上垂直射入棱镜后的光路图．通过图 4-3-14 所示的实验验证你的光路图是否正确．

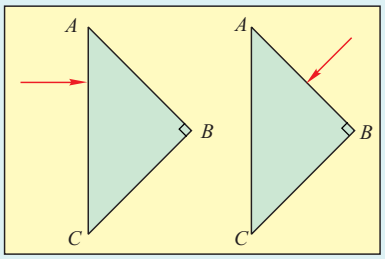
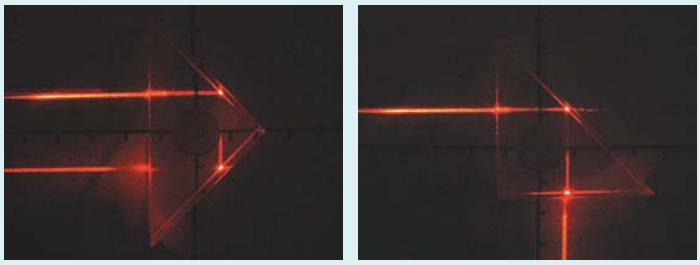


图 4-3-13



（a）　　（b）

图 4-3-14

4. 用灯光来照射自行车尾灯，观察发生的现象并作出理论分析（图 4-3-15）．有条件的同学，可以观察尾灯的内部结构，并分析它的工作原理．

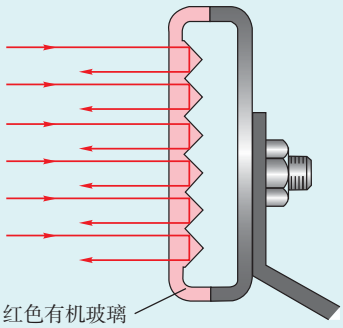


图4-3-15　自行车尾灯对光的反射

课外阅览

海市蜃楼

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

1. 海面上的蜃景．

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

当远处楼阁发出的光线射向空中时，由于经折射率不同的水平空气层的折射，光线越来越偏离法线，最后进入折射率更小的较高空气层时，就可能发生全反射，使楼阁发出的光线向下偏折，光线反射回地面．人们逆着射入眼睛光线的方向看去，就会看到远方的悬在空中的景物，如图 4-3-16（a）（b）所示．

微信公众号：电子课本大全

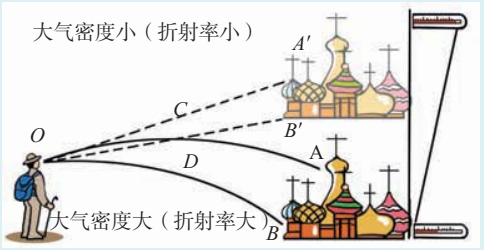
2. 沙漠上的蜃景.

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

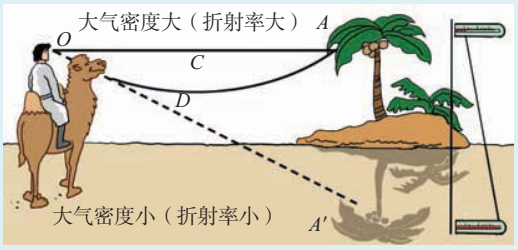
如果沙漠远方有一颗大树，树顶部射向地面的光线，穿过不同折射率的空气层，不断向远离法线的方向偏折，入射角逐渐变大，最后进入折射率更小的较低空气层时，也可能发生全反射，使光线向上弯曲，当人们逆着反射光线看去，就会看到远处物体的倒景，如图 4-3-16（c）所示.



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



（b）



（c）

图 4-3-16　海市蜃楼

本章小结

1. **光的折射定律**　入射光线与折射光线和法线在同一平面内，入射光线与折射光线分居法线两侧，入射角的正弦值与折射角的正弦值之比为一常数.

2. **折射率**　当光线由真空（或空气）射入某种介质时，入射角正弦值与折射角正弦值之比称为该介质的折射率，以 n 表示，即 $n=\dfrac{\sin i}{\sin r}$. 折射率 n 是反映介质光学性质的物理量，n 越大，介质对光线的偏折作用越厉害. 某一介质中的折射率 n 与该介质中的光速 v 的关系是 $n=\dfrac{c}{v}$.

3. **光疏介质与光密介质**　对于两种介质来说，光在其中传播速度相对大的介质叫做光疏介质，光在其中传播速度相对小的介质叫做光密介质. 也可以说折射率相对小的介质叫做光疏介质，折射率相对大的介质叫做光密介质.

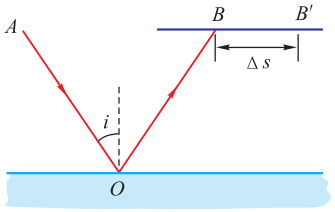
4. **临界角**　光由光密介质射入光疏介质，当入射角增大到某一角度，使折射角为 90° 时，折射光线开始消失，这时的入射角称为临界角，用 C 表示. 光由某种介质射向真空（或空气）时的临界角和该介质的折射率的关系是 $\sin C=\dfrac{1}{n}$.

5. **全反射**　光由光密介质射向光疏介质，例如光由某种介质射向真空（或空气），当入射角等于或大于临界角 C 时，折射光线完全消失，这种现象叫做全反射.

微信公众号：电子课本大全

习　题

1．如图所示，用激光控制液面高度仪器的原理是：一束激光 AO 以固定的入射角 i 照射到液面上，反射光 OB 射到水平放置的光屏上，屏上用光电管将光信号转变成电信号，电信号输入控制系统就可以控制液面的高度．如果发现光屏上的光点在屏上由 B 点向右移动了 Δs 的距离到 B' 点，则可判定（　　）．



（第 1 题图）

A．液面上升，上升的距离为 $\frac{\Delta s}{2}\tan i$

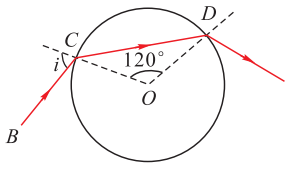
B．液面下降，下降的距离为 $\frac{\Delta s}{2}\tan i$

C．液面上升，上升的距离为 $\frac{\Delta s}{2}\cot i$

D．液面下降，下降的距离为 $\frac{\Delta s}{2}\cot i$

2．一束光线跟水平面成 45° 角，从空气中斜射到水面时，发生了反射和折射，则反射光线和折射光线的夹角是大于 90° 还是小于 90°？

3．如图所示，真空中有一个半径为 R，质量均匀分布的玻璃球，一细激光束在真空中沿直线 BC 传播，并于玻璃球表面的 C 点经折射进入玻璃球，在玻璃球表面的 D 点又折射进入真空中．已知 $\angle COD = 120°$，玻璃球对该激光的折射率为 1.5，求：

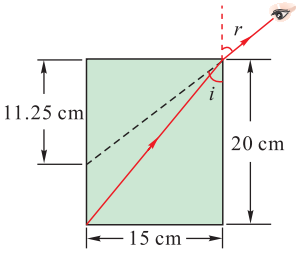


（第 3 题图）

（1）此激光束在玻璃中的穿越速度．

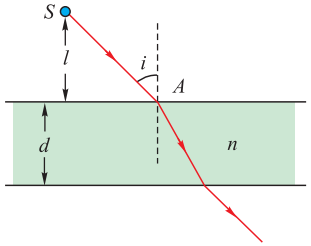
（2）入射角 i 的正弦值．

4．一个圆柱形水桶，高 20 cm，直径 15 cm，没装水时，从桶外某处可以看到桶口下 11.25 cm 处，如图所示．如果桶内装满水，观察位置不变，则刚好能看到桶底边缘处．求水的折射率．



（第 4 题图）

5．在折射率为 n、厚度为 d 的玻璃平板上方的空气中有一点光源 S，从 S 发出的光线 SA 以入射角 i 入射到玻璃板上表面，经过玻璃板后从下表面射出，如图所示．若沿此光线传播的光从光源到玻璃板上表面的传播时间与在玻璃板中的传播时间相等，求点光源 S 到玻璃上表面的垂直距离 l．



（第 5 题图）

6．太空中有时会发生恒星爆炸，产生所谓的超新星．恒星爆炸时会突然变得比以前亮得多．它们离我们很远，所发出的光要经过许多年才能到达地球，因此我们看到的恒星爆炸的光实际上是在很多年以前发出的．从那个时候起，光一直在向地球传播着．我们看到的恒星爆炸的光是白光，而不是在不同时间到达的各种色光，根据这一事实，你可以推断出什么结论？

微信公众号：电子课本大全

第五章

光的波动性

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

光到底是什么？人类已探索了2 000多年. 现在就让我们来研究光的干涉和衍射现象，迈出认识光本质的第一步.



微信公众号：电子课本大全

对光本性的认识，人类经历了十分漫长的过程．牛顿认为光是一种粒子流，与牛顿同时代的惠更斯则认为光是波，他开创了光的波动论. 19世纪初，人们发现了光的干涉和衍射现象，托马斯·杨用实验方法证实了光的波动性；直到麦克斯韦建立了电磁理论，才提供 了光是电磁场中横波的令人信服的理论依据.

1 光的干涉



托马斯·杨
（Thomas Young，1773 — 1829）

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

1801 年，英国物理学家托马斯·杨在实验室里成功地观察到了光的干涉.

双缝干涉

观察思考

如图 5-1-1 所示，用一束平行的红色激光束照射有两条狭缝（也称双缝）S_1 和 S_2 的挡板（S_1 和 S_2 相距约 0.1 mm），观察挡板后面与挡板平行的屏幕上所出现的条纹．这些条纹的图案有什么特点？

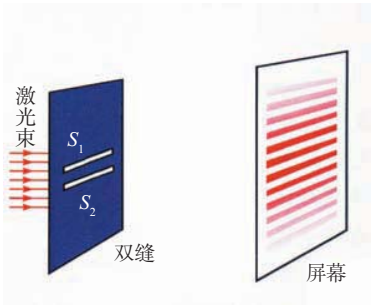


图 5-1-1　双缝干涉实验

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

如图 5-1-2 所示，由 S_1 和 S_2 发出的两列特定光波在狭缝后面的空间中叠加，当两列波在某一点同时出现波峰或波谷，则在此点两列光波必定同相，叠加结果是光波得到

微信公众号：电子课本大全

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

在图 5-1-2 中的 O 点，与狭缝 S_1 和 S_2 的距离相等，从 S_1 和 S_2 到 O 点，两列光波经过的路程也相等，因此在 O 点总是波峰与波峰叠加，波谷与波谷叠加，故在 O 点出现的是明条纹．如果在 O 点的上方取一点 P_1，P_1 与两个狭缝距离就不相等了，用 Δs_1 表示两狭缝到 P_1 的路程差．如果路程差正好是半个波长，则两列光波到达 P_1 点的时间差正好是半个周期，那么当一列波的波峰到达 P_1 时，另一列波正好在这里出现波谷，两列波叠加结果是互相减弱，于是 P_1 点就会出现暗条纹．同理，在 P_1 点上方，还可以找到 P_2、P_3……各点，使两狭缝到达这些点的路程差 Δs_2、Δs_3……分别为 $\frac{3}{2}\lambda$、$\frac{5}{2}\lambda$……那么，在 P_2、P_3……各点也会出现暗条纹．若屏上某些点到两狭缝的路程差等于波长的整数倍，如 0、λ、2λ、3λ……则两列光波到达这些点的时间正好相差周期的整数倍，那么在这些点一列波的波峰总是与另一列波的波峰相遇，一列波的波谷也总是与另一列波的波谷相遇，故在这些地方总出现亮条纹．

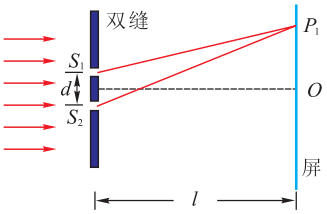


图 5-1-2　双缝干涉

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

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

光的干涉现象充分表明光是一种波．

观察思考

1．改变光屏到双缝的距离 l，观察干涉条纹的间距有何变化．

2．改变双缝的间距 d，观察干涉条纹的间距有何变化．

3．分别用红光和紫光照射双缝，观察它们的干涉条纹的间距有什么不同．

想一想，双缝干涉条纹的间距可能与哪些因素有关？

微信公众号：电子课本大全

薄膜干涉

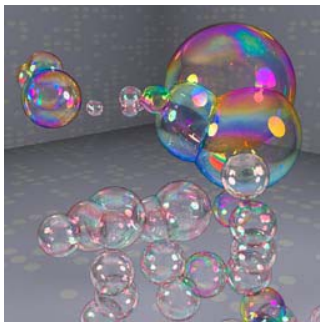


图 5-1-3　肥皂泡

活动

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

单色光平行入射到肥皂泡液薄膜上，由液膜前后两个表面反射回来的两列光是相干光，它们相互叠加产生干涉，肥皂泡上就出现了明暗相间的条纹或区域．

用不同波长的单色光照射肥皂泡，条纹的间距不同．如果用白光照射肥皂泡，由于各色光干涉后的条纹间距不同，液膜上就会出现彩色条纹（图 5-1-3）．

光的干涉现象在技术中有重要应用．例如，在磨制各种镜面或其他精密的光学平面时，可以用干涉法检查平面的平整程度．如图 5-1-4（a）所示，在被测平面上放一个透明的样板，在样板的一端垫一个薄片，使样板的标准平面和被测平面之间形成一个楔形空气薄层．用单色光从上面照射，空气层的上下两个表面反射的两列光波发生干涉．空气层厚度相同的地方，两列波的路程差相同，两列波叠加时相互加强或削弱的情况也相同．所以，如果被测表面是平的，干涉条纹就是一组平行的直线［图 5-1-4（b）］；如果干涉条纹发生弯曲，就表明被测表面不平［图5-1-4（c）］．这种测量的精度可达10^{-5} cm．

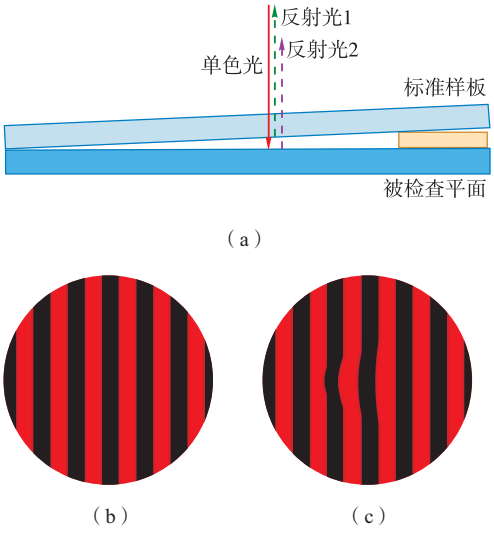


图 5-1-4　用干涉法检查平面的平整度

练习与评价

1．在双缝干涉实验中，两列光波的频率有何关系？

2．双缝干涉实验中出现亮条纹的条件是什么？出现暗条纹的条件是什么？

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

4．图 5-1-4 中所示是用干涉法检查某块厚玻璃板的上表面是否平的装置，所用单色光是用普通光源透过滤光片产生的，检查中所观察到的干涉条纹是由哪两个表面反射的光线叠加而成的？

5．马路积水上的油膜呈现彩色图样，这是光的什么现象？

微信公众号：电子课本大全

6. 在双缝干涉实验中，以白光为光源，在屏幕上观察到了彩色干涉条纹. 若在双缝中的一缝前放一红色滤光片（只能透过红光），另一缝前放一绿色滤光片（只能透过绿光），这时可以观察到的现象是（　　）.

A. 只有红色和绿色的双缝干涉条纹，其他颜色的双缝干涉条纹消失

B. 红色和绿色的双缝干涉条纹消失，其他颜色的双缝干涉条纹依然存在

C. 任何颜色的双缝干涉条纹都不存在，但屏上仍有光亮

D. 屏上无任何光亮

发展空间

课外阅览

增透膜与反射膜

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



图 5-1-5　照相机镜头是一个增透膜

如照相机镜头表面涂一层厚约99.7 nm的氟化镁薄膜时，感光作用最好的绿光就能几乎全部透过镜头，而反射出来的很少，大大改善了相机的性能. 由于绿光的大量透射，光谱边缘部分的红光和紫光的反射并没有显著削弱，所以眼睛看到的镜头呈蓝紫色.

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

镜面建筑也会带来光污染，使街面上出现杂炫光，容易造成交通事故.

微信公众号：电子课本大全

2 学生实验：用双缝干涉测量光的波长

实验原理

由上节实验可知，在双缝后的光屏上可以看到明暗相间的干涉条纹，相邻两条亮条纹（或暗条纹）中线的距离称为条纹间距，间距的大小与光屏到双缝的距离 l、双缝的间距 d 以及入射光的波长 λ 有关．定量研究可得（见本节“发展空间”），当 $l \gg d$ 时，相临两条亮条纹（或暗条纹）的间距为

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

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

讨论交流

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

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

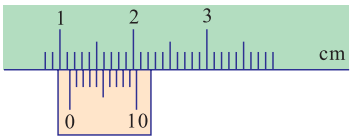


图 5-2-1　游标尺

微信公众号：电子课本大全

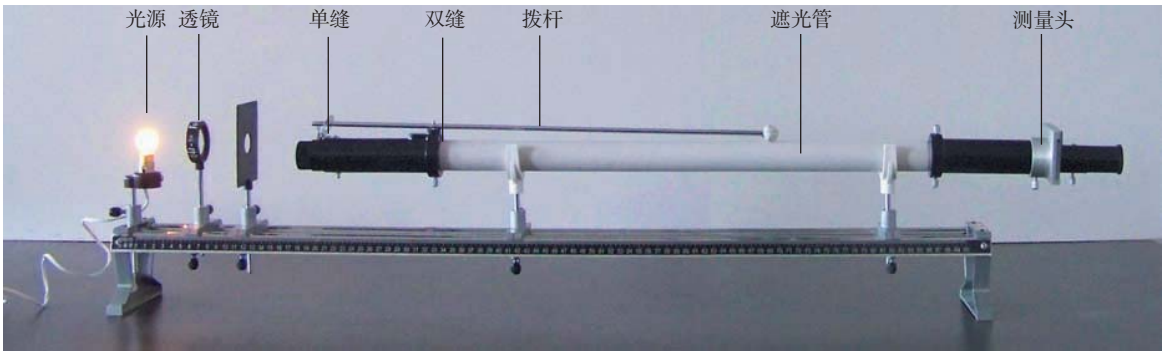


图 5-2-2　双缝干涉实验仪

实验操作

1. 把遮光管架在支架环上，其轴线与光具座的导轨基本平行.

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

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

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

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

6. 先移动测量头上的手轮，把分划线对准最左边的一条干涉亮条纹或者暗条纹，并记下它在游标尺上的读数x_1，然后转动手轮，把分划线移向右边，并对准第 n 条（一般 n 可取7左右）干涉亮条纹或暗条纹，这时游标尺的读数为x_n，如图5-2-3所示. 则相邻两条亮条纹或暗条纹之间的距离为

实验器材

双缝干涉实验仪一台，结构如图 5-2-2 所示.

双缝干涉实验仪主要部件有遮光管、照明系统、双缝、观察筒及测量头.

遮光管是安装其他部件的基准，并能挡住杂光干扰，犹如暗室.

照明系统是指光源灯泡、透镜、遮光板、光源单缝及滤光片.

观察筒由筒体、毛玻璃屏及目镜组成. 毛玻璃屏用于接收干涉图样. 通过透镜的放大作用，干涉图样看得更清晰.

测量头包括游标尺、分划板、滑块座、滑块、目镜、手轮等. 游标尺的主尺固定在滑座上，游标、分划板、目镜固定在滑块上. 转动手轮，推动滑块在滑块座里移动，并带动游标、分划板一起移动，通过目镜可看到分划板上的刻线与干涉条纹的相对位移、干涉条纹的间距由游标尺上读数算得.

观察筒与测量头可互换使用，但不能同时使用.

微信公众号：电子课本大全

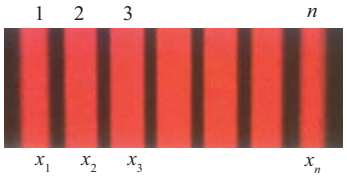


图 5-2-3 干涉条纹

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

待测的光波波长为

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

式中 d 为双缝中心距离，其数值刻在双缝座上，一块为 0.250 mm，另一块为 0.200 mm．l 为双缝至光屏（即分划板）之间的距离，当遮光管未接长管时，l = 600 mm；当遮光管接上长管后，l = 700 mm．

7．改变双缝中心距离 d，重复上面的步骤，再测一次．

数据记录与分析

请自己设计表格，把测量数据记录在表中，算出波长并对结果进行分析．

讨论交流

1．调整双缝宽度，观察干涉图样的变化．为什么会有这种变化？

2．为什么不直接测量Δx，而要测量n条条纹的间距？

练习与评价

1．在用双缝干涉测量光的波长的实验中，光源与屏之间应依次放置（　　）．

A．单缝、滤光片、双缝　　B．滤光片、单缝、双缝

C．滤光片、双缝、单缝　　D．双缝、单缝、滤光片

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

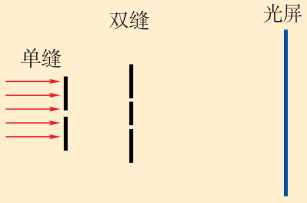


图 5-2-4

A．屏上所有亮线都是从双缝出来的两列光波的波峰与波峰叠加形成的，而所有暗线是波谷与波谷叠加形成的

B．若将光屏向右或向左平移一小段距离，屏上仍有清晰的干涉条纹

C．若将双缝间距 d 减小，光屏上两相邻明条纹间距变小

微信公众号：电子课本大全

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

3. 在“用双缝干涉测量光的波长”的实验中，测量头如图5-2-5所示，调节分划板的位置，使分划板中心刻线对齐某亮条纹的中心，此时螺旋测微器的读数为_____mm. 转动手轮，使分划线向一侧移动，到另一条亮条纹的中心位置，由螺旋测微器再读出一读数. 若实验测得4条亮条纹中心间的距离$\Delta x=0.960$ mm，已知双缝间距$d=1.5$mm，双缝到屏的距离$l=1.00$m，则对应的光波波长为$\lambda=$_____nm.

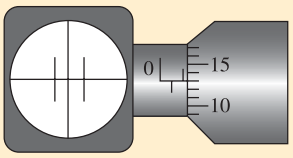


图 5-2-5

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

发展空间

课外阅览

双缝干涉明、暗条纹的位置公式的推导

如图5-2-6所示，设双缝S_1和S_2的距离为d，到屏的距离为L，且$L\gg d$，O到S_1、S_2的距离相等. 从S_1、S_2射出的光波到达O点的路程相等，所以两列波到O点时路程差为零，总是互相加强，在O点就出现亮条纹. 现在我们来研究与O点距离为x的P点的情况. P到S_1、S_2的距离分别为r_1、r_2，从S_1、S_2发出的光波到达P点的路程差是$\Delta r=r_2-r_1$，从图可知

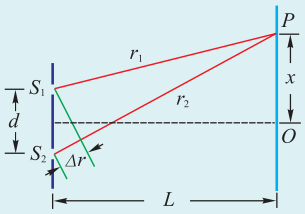


图 5-2-6

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

两式相减，可得

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

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

如果路程差Δr等于波长λ的整数倍，两列波到达P点时同相，因而互相加强，在P点就出现亮条纹；如果路程差Δr等于半波长$\dfrac{\lambda}{2}$的奇数倍，两列波到达P点时反相，因而互相削弱，在P点就出现暗条纹，即

当$\Delta r=\pm k\lambda$，或在屏上满足$x=\pm k\dfrac{L}{d}\lambda$，$k=1$，2……的地方出现亮条纹. 当$k=1$，2……时，分别为中　亮纹两边的第1条，第2条……亮条纹.

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

微信公众号：电子课本大全

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

3 光的衍射与偏振

光的衍射

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

著名的数学家泊松根据物理学家菲涅耳提出的波动理论推算出在光照射不透明的小圆板时，由于衍射，在圆板阴影的中心应该出现一个亮斑，他认为这是非常荒谬的，以此企图驳倒菲涅耳的波动理论．菲涅耳与阿拉果（同为法国物理学家）接受了泊松的挑战，反复实验，发现圆板中心确有一个亮斑，如图5-3-1．反过来，“泊松亮斑”实验却成了波动理论极其精彩的实证．

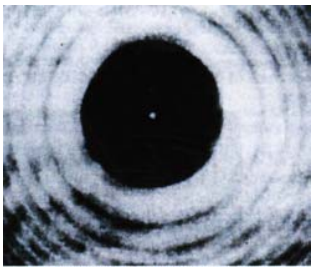


图 5-3-1　泊松亮斑

观察思考

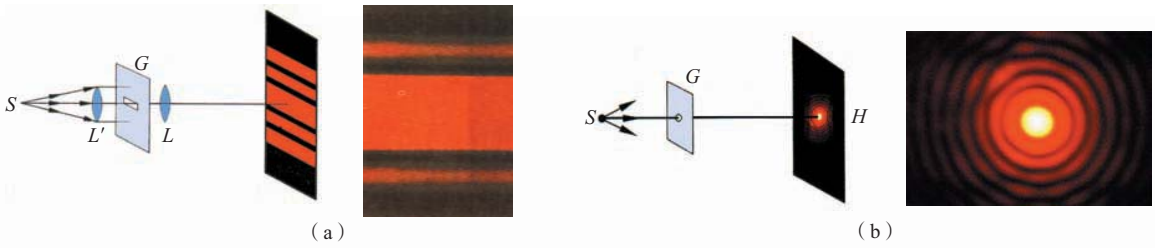
在不透明的屏上装有一个宽度可以调节的单缝（或圆孔）．在单缝（或圆孔）后适当距离处放一个光屏，用激光照射单缝（或圆孔），观察当单缝（或圆孔）由较宽（大）逐渐变窄（小）时，屏上所呈现的现象．用白光直接照射单缝（或圆孔），你在屏上又会看到什么现象？

当单缝（或圆孔）较宽（大）时，光沿着直线方向通过单缝（或圆孔），在光屏上可以看到一条跟单缝（或圆孔）宽度（大小）相当的亮线（或亮斑）；把单缝（或圆孔）调窄（小）些，可以看到屏上亮线（或亮斑）也随之减小．

当单缝（或圆孔）调到很窄（小）时，光通过单缝（或圆孔）后就明显地偏离了直线传播方向，到达屏上以后，不再是一条很窄的亮线（或一个很小的亮斑），而是照到了相当宽（大）的地方，并且出现了明暗相间的条纹；再调小单缝（或圆孔），条纹也随之变得清晰、细小，如图5-3-2所示．

以上现象说明光通过很小的狭缝（或圆孔）时，明显地偏离了直线传播方向．在屏上出现的不是在一般情

微信公众号：电子课本大全



（a）　（b）

图 5-3-2　光的衍射现象

况下狭缝或圆孔的像，而是散开到相当大的范围．按照直线传播的要求应该属于阴影的区域也会出现亮条纹或亮斑；反之，应该属于亮区的地方也会出现暗条纹或暗斑．这种现象，叫做光的**衍射**．衍射时产生的明暗条纹或光环，叫做衍射图像．各种不同形状的障碍物都能使光发生衍射，使得影像的轮廓模糊不清，甚至出现明暗相间的衍射条纹．光的衍射现象进一步证明了光具有波动性．

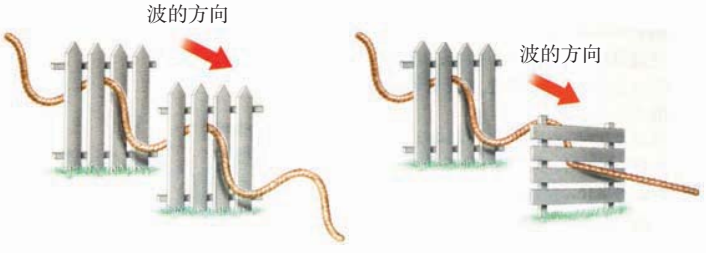
光的衍射图像具有一定的特征.单色光的单缝衍射图像的特点是中央有一条较宽较亮的条纹，两边是对称而明暗相间的条纹，亮条纹的强度向两边很快减弱．白光通过单缝产生的衍射图像中央是一条白条纹,两边是很快减弱的彩色条纹.

活动

用两支铅笔并排放在一起，中间留一条狭缝，通过这一条狭缝去看与狭缝平行的线光源，你看到了什么现象？对此现象进行解释.

光的偏振

用手握住绳的一端，另一端固定．手做垂直于绳方向的抖动,在绳上就形成了横波.如果在绳波传播的路程中放带有狭缝的栅栏（图5-3-3），我们看到：当狭缝的方向与绳的振动方向相同时，绳上横波可以传过去；狭缝的方向与绳的振动方向垂直时，绳上横波就不能通过了,这种现象叫做偏振.光是否也有偏振现象呢?



（a）竖条栅栏允许上下振动的波通过　（b）沿竖直方向振动的波不能通过一个横条栅栏

图 5-3-3　偏振

微信公众号：电子课本大全

偏振片用特定的材料制成，它有一个特殊的方向叫做透光方向，只有光振动方向与透光方向平行的光波才能通过偏振片.

观察思考

取一块人造偏振片. 通过它去观察一只发光的灯，我们看到它是透明的. 以入射光线为轴转动偏振片，透过的光并没有发生变化. 如图 5-3-4（a）所示.

再取一块同样的偏振片，把它放在前一块偏振片的后面，让它们互相平行. 固定前一块偏振片，以入射光为轴转动后一块偏振片，如图5-3-4(b)所示. 你看到了什么现象？在这里发生了什么变化？这两块偏振片算不算透光的物体？

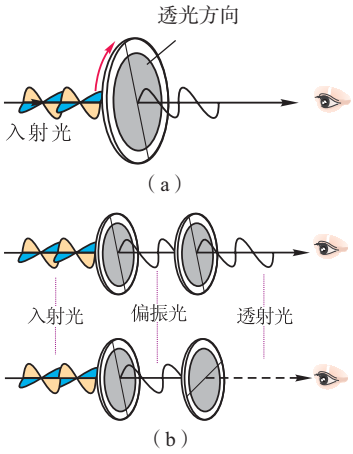


图 5-3-4　光的偏振

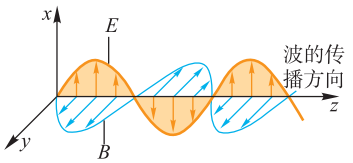


图 5-3-5　沿 z 方向传播的光波

我们看到，当只有一块偏振片时，无论怎样转动偏振片都能看到光通过. 若有两块偏振片时，改变它们的相对指向到一定程度时就看不到光通过了.

在这里发生的现象可以用光的**偏振**(polarization)来解释. 从理论上可以证明电磁波是横波，电磁波在自由空间传播的过程中，变化电场 E 和变化磁场 B 的方向与传播方向垂直. 图 5-3-5 表示了一列沿 z 方向传播的光波，光是电磁波，E 的方向就是光振动的方向，在图中 E 沿 $\pm x$ 方向. 如果光振动的方向限在一个平面，这种光叫线偏振光. 通常光源发出的光(包括太阳光)是由大量的、振动方向不同而互不相干的线偏振光组成的，称为自然光.

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

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

光的偏振现象进一步证实光是横波.

练习与评价

1. 什么是光的衍射现象？在什么情况下发生的衍射现象比较显著？
2. 在用单色平行光照射单缝观察衍射现象的实验中，衍射现象的显著程度与哪些因素有关？
3. 透过一块偏振片去看平静湖面反射的光，当转动偏振片时，会看出明暗的变化. 这是否说明由湖面反射的光发生了偏振现象？
4. 举出你在生活中看到的光的衍射现象.

微信公众号：电子课本大全

发展空间

物理在线

上网查找有关光的偏振的资料，学习有关光的偏振及其应用的知识.

课外阅览

立体电影的摄影和放映

人眼对于周围的物体之所以会产生立体的感觉，是由于“双目效应”. 原来，当我们注视一个物体的时候，这个物体发出的光在左右眼的网膜上面分别形成两个像，它们的形态略有差异，左眼看到物体的左侧面较多，右眼看到右侧面较多，左右眼的视像产生的视觉信息通过视神经分别传递到脑的视觉中心（“视丘”），使我们能判断物体的远近，产生了立体图像的感觉. 立体电影是用两个镜头如人眼那样从两个不同方向，同时拍摄下景物的像，制成电影胶片. 立体放映机也是双镜头的，但在镜头上分别安装偏振片. 放映机射出的光，通过偏振片后，就成了偏振光，左右镜头上的偏振片透振方向互相垂直，因而产生了两束偏振方向互相垂直的偏振光，这两束光投射到银幕上，再反射到观众处，偏振方向不变. 看立体电影的观众则应戴上特制的偏振光眼镜，这样，银幕上的“左视”画面就只能由观众的左眼看到；同理银幕的“右视”画面就只能由右眼看到. 这个过程和眼睛直接观看物件的效果一样，因此银幕上的画面就有立体感（图 5-3-6）.

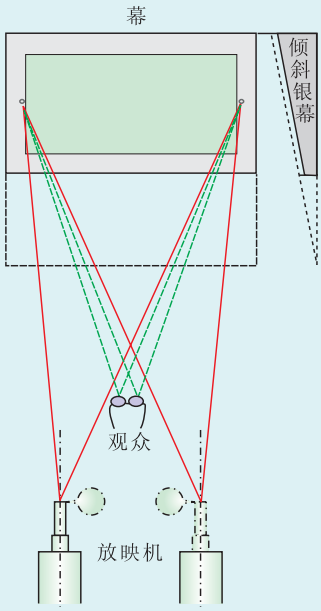


图 5-3-6　立体电影原理

4 激　光

● 激光的特性



图 5-4-1　射向太空的激光束

1958 年，科学家在实验室里激发出了一种自然界中没有的光，那就是**激光**（laser）. 激光与普通光相比，有一系列特殊的性质.

1. 强度大.

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

微信公众号：电子课本大全

以产生 10^8 K 的高温.

2. 方向性好.

光束方向性的好坏，是由光束的发散角的大小来量度的. 普通光源是向四面八方发射的. 好的探照灯由于附加了抛物形反射镜而改善了方向，发散角也只可减小到 0.1 rad；而激光光束的发散角在 10^{-3} rad 数量级（图 5-4-1）.

例如，氦氖激光器的发散角仅为 0.5×10^{-3} rad. 一束由它发射的激光射到 3.8×10^5 km 外的月球上，光照面的直径充其量只有 2 km 左右.

3. 单色性好.

激光出现以前，在普通光源中，氪 86（^{86}Kr）灯发出的波长为605.7 nm的光谱线的单色性最好，在低温条件下，其光谱宽度 $\Delta\lambda = 0.000\ 47$ nm. 同时，在普通光源中，一般都是由几条分立的谱线或复杂成分所组成，因此，为了获得单色性总是伴随着亮度的牺牲. 激光出现以后，面貌焕然一新. 例如，单模稳频氦氖激光器所输出的波长为632.8 nm的激光，作为一种高亮度的单色光源，其谱线宽度可窄达 $\Delta\lambda < 10^{-8}$ nm，这比普通光源中单色性最好的氪灯的单色性提高了四五个数量级.

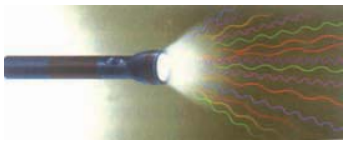


图 5-4-2　手电筒发出的光是不相干光

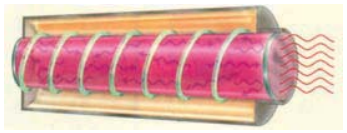


图 5-4-3　激光器发出相干光

4. 相干性好.

光是从物质的原子中发射出来的. 原子获得能量后处于不稳定状态，它以光子的形式把能量发射出去（我们将在《物理　选修 3-5》学习到）. 普通光源比如白炽灯，灯丝中每个原子在什么时候发光，朝哪个方向发光，是不确定的，发光频率也不一样，这样的光不能产生干涉. 而一束激光中所有光子的频率是相同的，振动情况也完全相同，所以激光是最好的相干光. 有了激光我们就能较好地进行光的干涉和衍射现象的研究.

5. 覆盖波段宽而且可调谐.

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

激光的应用

激光由于具备以上这些特点，在军事、工业、农业、科技、医学、环境保护、公安以及社会生活各个方面都有着极

微信公众号：电子课本大全

其广泛的应用．现选择几个方面简介如下．

1．激光加工．

由于激光具有能量高度集中的特点，聚焦后可以在焦斑上达到很高的能量密度，因此可用来对材料或工件进行打孔、焊接、切割、划片、热处理、雕刻等．其优点是：可对高熔点、高硬度和脆性材料加工；热变形、热影响区小；可避免杂质污染；可加工复杂图形，等等．



图 5-4-4　这是汽车生产线上的机器人在对汽车车身进行激光焊接

2．激光全息照相．

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

用全息照相摄下的全息照片在防伪上起很大作用．例如在信用卡上贴上小的全息照片，使信用卡难以仿制．

3．激光检测．

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

4．激光通信．

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

5．激光医学．

利用激光能量的高度集中以及激光对人体组织的各种效应，已制成“激光刀”，并广泛运用于眼科、整形外科、耳鼻喉科等．比之常规手术方式，使用激光刀时病人出血量少、手术时间短、恢复快．激光治疗癌症也是令人感兴趣的一个课题．利用某些癌组织对不同波长激光的选择吸收，可杀死或破坏癌组织．

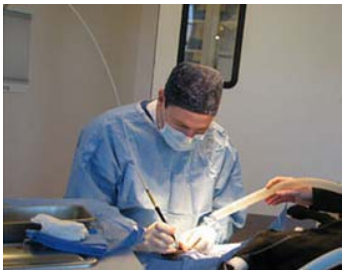


图 5-4-5　用激光做手术

6．激光照排．

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

微信公众号：电子课本大全

7. 光盘.

光盘是一种新型的信息载体，它能储存的信息量很大. 一张容量为650MB的光盘，就可存入1000本书（以每本30万汉字计）.

往光盘中存储信息，术语上叫做“写入”；从光盘中提取信息则称为“读出”. 写入信息时，先要将声音、文字、图像等信息通过转换装置，变成一束束激光信号，用这些经过调制的光信号去照射光盘上的感光材料，感光材料在激光的作用下，在光盘上形成一圈圈人眼无法观察到的由微小凹坑组成的纹迹，叫做“光道”. 如果要从光盘上读出信息，则是写入信息的逆过程——用直径很小的激光束去照射光道，由于凹坑在光道上的分布不同，入射光束会根据凹坑形状形成强弱不同的反射光，将这些光信号通过转换装置，就可以还原成声音、图像以及文字数据等信息.

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

练习与评价

1. 关于激光，下列说法中正确的是（　　）.

A. 激光是由自然界中某种物质直接发光产生的

B. 激光在真空中传播的速度大于 3×10^8m/s

C. 激光反射也遵循反射定律

D. 激光通过小孔时也能产生衍射现象

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

A. 单色性　　B. 方向性　　C. 高能量　　D. 偏振性

3. 激光的特点是什么？请举2～3个实例来说明激光的用途.

发展空间

物理在线

1. 上网查找有关全息照相的资料，展望全息照相的应用前景.

2. 上网查询，了解什么是激光防伪标志.

微信公众号：电子课本大全

课外阅览

全息照相简介

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

全息照相基本原理见图5-4-6．从激光源（如氦氖激光器）发出的光束被透镜扩展后，使一部分光束P_1在反光镜上反射后，射落在底片上，另一部分光束P_2将实物B照亮，并让B的漫射光束也射在同一底片上；由于激光具有严格的单色性和良好的传播性能，因此两束单色相干光在底片上产生出一套记录实物形状的干涉条纹的潜像．经显影处理后获得一种布满不规则干涉斑纹的“全息相片”，它和原物毫不相似，但却包含着实物形象的信息在内．

“重显”过程：将光源、反光镜放置在摄影时的位置上，将全息相片放在底片的位置上．这时如果隔着相片看去可以看到和实物同状的虚像，移动眼部位置进行观察，会看到不同角度的立体视觉印象，就像观察立体物件一样．重显的原理是因为全息相片起着“衍射光栅”的功用；能够证明，从相片各点上射到眼中的各条衍射光的强度，恰巧和摄影时从实物上各点直接射入眼中的光的强度一样．

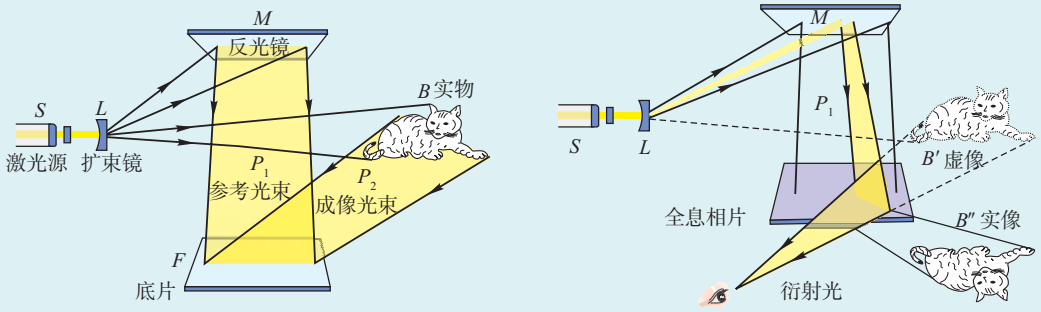


图5-4-6

本章小结

1. **光的干涉**　两束光相遇时，出现明暗相间的区域，且位置保持不变，这种现象称为光的干涉．

2. **双缝干涉**

（1）双缝干涉的条件是：两束光的频率相同、相位差恒定．

（2）出现明条纹的条件是：两波源到研究点的路程差等于波长的整倍数；出现暗条纹的条件是：两波源到研究点的路程差是半波长的奇数倍．

（3）通过实验，用来测定光波波长的公式为：$\lambda = \dfrac{d\,\Delta x}{l}$．

微信公众号：电子课本大全

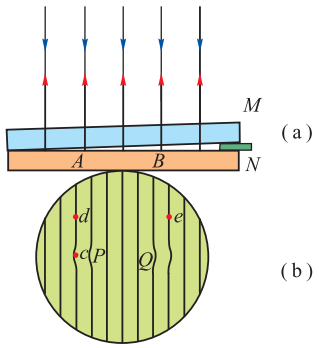
3. **光的衍射** 光波在传播过程中绕到障碍物后面的现象称为光的衍射现象.
光的衍射条件是：障碍物或孔的尺寸跟光波的波长相差不多.
4. **光的波动性** 光是一种电磁波，因而也是横波；光的偏振现象表明光是横波.
5. **激光** 激光的主要特点：强度大、方向性好、单色性好、相干性好、可调谐.

习 题

1. 关于双缝干涉实验，以下说法中正确的是（ ）.
A. 若把入射光由黄光变为波长比黄光短的紫光，则相邻两条亮条纹的距离变窄
B. 若把双缝中的一条缝遮住，屏上出现一条亮线
C. 若使屏远离双缝，干涉条纹间距离变宽
D. 若将入射光改为白光，屏上将出现彩色条纹

2. 薄膜干涉条纹产生的原因是（ ）.
A. 薄膜内的反射光和折射光相互叠加
B. 同一束光经薄膜前后两表面反射回来的光相互叠加
C. 入射到薄膜的光和从薄膜反射回来的光相互叠加
D. 亮条纹是波峰与波峰叠加而成，暗条纹是波谷与波谷叠加而成

3. 利用薄膜干涉可检查工件表面的平整度. 如图（a）所示，现使透明标准板 M 和待检工件 N 间形成一楔形空气薄层，并用单色光照射，可观察到如图（b）所示的干涉条纹，条纹的弯曲处 P 和 Q 对应于 A 和 B 处. 下列判断中正确的是（ ）.



（第 3 题图）

A. N 的上表面 A 处向上凸起
B. N 的上表面 B 处向上凸起
C. 条纹的 c、d 点对应处的空气薄层厚度相同
D. 条纹的 d、e 点对应处的空气薄层厚度相同

4. 在观察光的衍射现象的实验中，通过紧靠眼睛的狭缝，观看远处的日光灯管或线状白炽灯丝（灯管或灯丝都要平行于狭缝），可以看到什么样的条纹？

5. 举实例说明光具有波动性和光是一种横波.

6. 下列说法中错误的是（ ）.
A. 可利用激光进行长距离精确测量
B. 可利用激光进行通信
C. 可利用激光进行室内照明
D. 可利用激光加工坚硬材料

微信公众号：电子课本大全

第九章

相对论

- 牛顿力学中运动的相对性
- 狭义相对论的两个基本假设
- 时间、长度的相对性
- 相对论的速度变换公式　质能关系
- 广义相对论点滴（选学）

相对论的产生是由于实际的需要，是由于旧理论中无法摆脱的非常严重而深刻的矛盾. 新理论的好处在于它解决这些困难时，很一致，很简单，只应用了很少几个令人信服的假定.

——爱因斯坦



微信公众号：电子课本大全

1905年，爱因斯坦创立了相对论．相对论和量子论一道引发了20世纪物理学的革命．一百年后的2005年，联合国决定将该年定为“国际物理年”，旨在纪念爱因斯坦并向全社会宣传物理学．本章将对狭义相对论的基础知识进行介绍．

1 牛顿力学中运动的相对性

伽利略相对性原理

在不同的惯性参考系中研究同一物体的运动时，所遵循的规律是一样的，对此伽利略有一段很精彩的描述：“在以任何速度前进，只要运动是匀速的，同时也不这样那样摆动的大船舱内，观察各种力学现象，如人的跳跃，抛出的物体，水滴的下落，烟的上升，鱼的游动，甚至蝴蝶和苍蝇的飞行状况，你会发现一切都会和船静止不动时一样．”这一描述用经典的牛顿力学的语言来说，就是：在做匀速直线运动的惯性参考系（例如上面伽利略所说的大船和地面）中，力学现象都以同样的规律进行．换句话说，在任何惯性参考系中，力学的规律都是一样的，都可以用牛顿定律来描述．这一结论称为伽利略**相对性原理**（relativity principle）．

这里提到的惯性参考系，简称惯性系．在这种参考系中，受到的合外力为零的物体做匀速直线运动．地面参考系在日常的生产和生活中可当作惯性系，相对于它做匀速直线运动的参考系，如“伽利略大船”，也是惯性系．

经典时空观

力学运动（或称机械运动）都是物体的空间位置随时间而改变的过程，因此，时间和空间的概念，就成了科学中最基本的概念．对于时间和空间，一般人都有一些从日常生活得到的粗浅概念．例如，时间反映物质运动过程的长短、久暂，常用年、月、日、时、分、秒等作为量度单位；空间

微信公众号：电子课本大全

代表物体的尺寸、大小，物体之间的距离等，常用光年、千米、米、毫米、微米、纳米等作为量度单位．历史上，在很长时间内，人们根据自己的感觉，形成了这样的认识，不论观测者和被观测的客观事物处于什么样的运动状态，对时间和空间的量度结果总是一样的，或者说，不论在哪一个惯性系中来观测，测量结果是不变的、绝对的，1 m就是1 m，1 s就是1 s，决不会发生变化．牛顿在建立经典力学体系时，对时间、空间概念作出了如下的总结性表述："绝对的、真正的和数学的时间自己在流逝着，并且由于它的本性在均匀地、与任何外界事物无关地流逝着"；"绝对空间，就其本性而言，与外界任何事物无关，而永远是相同的和不动的"．而且，时间和空间是相互独立、互不相关的．对时间和空间的这种朴素的认识称为绝对时空观或经典时空观．这种时空观在牛顿以后的200多年中一直处于统治地位．

伽利略速度变换

由绝对时空观可导出一个简单的速度变换关系．在一节相对地面以速率 u 开行的车厢内，小丽相对于车厢以速率 v' 向前急跑时（图6-1-1），她对地面的速率就是

$$v = u + v'$$

如果她向后跑时，相对于地面的速率就是

$$v = u - v'$$

v 和 v' 不一样．速率从一个参考系变换到另一个参考系的这样的关系式称为伽利略速度变换公式．

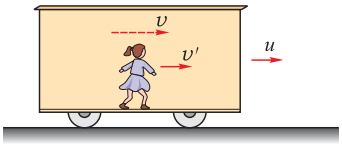


图6-1-1　小丽相对地面的速率为 $v = u + v'$

练习与评价

1．在匀速开行的车厢内和在地面上，你用同样的力跳出的距离相同吗？为什么？

2．一架歼击机以相对于地面的速率 $u = 500$ m/s 飞行时，向正前方发射的炮弹相对于歼击机的速率是1 500 m/s，试问炮弹相对于地面的速率是多少？如果向后发射呢？

微信公众号：电子课本大全

2 狭义相对论的两个基本假设

牛顿力学建立后，关于电磁现象和光现象的研究也不断获得了巨大的发展．19世纪60年代，麦克斯韦建立了将电磁现象和光现象统一起来的电磁场理论．人们很自然地会问，牛顿力学是满足伽利略相对性原理和伽利略速度变换公式的，那么电磁学理论是不是也满足这些关系呢？当时不少事实表明，电磁学理论与伽利略相对性原理和速度变换公式存在矛盾．例如按照麦克斯韦理论，真空中的光速c应当是一个电磁学常量，在不同惯性系中应当有相同的值；但是，按照伽利略速度变换公式，不同惯性系中的真空光速应当有不同的值．很明显，这两个理论在这个问题上不可能同时都正确．爱因斯坦对此进行了深入研究．提出了狭义相对论的两个基本原理．



爱因斯坦
（Albert Einstein，1879—1955）

爱因斯坦是20世纪最伟大的物理学家，是人类历史中最具有创造力的人物之一．他创立了相对论，对量子物理和统计物理也有极其重大的贡献．

爱因斯坦相对性原理

爱因斯坦提出：对不同的惯性系，物理规律（包括力学的和电磁的）都是一样的．它是狭义相对论的第一个基本假设．后来的研究表明，作为牛顿力学基础的伽利略速度变换公式等结论需要进行修改，才能够适用于牛顿力学以外的广大领域．

光速不变原理

爱因斯坦根据他对麦克斯韦理论的研究提出了光速不变原理：光在真空中运动的速度在任何惯性系中测得的数值都是相同的．

这是爱因斯坦狭义相对论的第二个假设．例如，在运行的车厢内，你用手电筒向各方向照射（图6-2-1），所发射的光的速率对车厢和对地面都是一样的．由于光速很快，这样的手电筒实验在很长时期内实际上是做不成的．但在19世纪末确实做成了可以判断光速与惯性参考系无关的精确

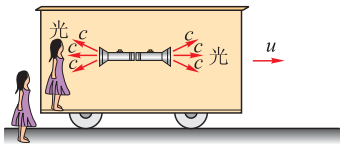


图6-2-1　在车厢内和地面上观测，光速是一样的

微信公众号：电子课本大全

实验．爱因斯坦在上述两个基本假设的基础上，于1905年创立了狭义相对论，从根本上对经典时空观进行了改革，把物理学推进到了一个新阶段．20世纪人们进一步对光速进行了十分精确的测定，证明了光的传播速率不遵守伽利略速度变换公式．光速不变，即“光速与惯性系无关”的这一事实使光在真空中的速率

$$c = 299\ 792\ 458\ \text{m/s}$$

成为一个最基本的物理常量．今天，它已被用来定义长度的基本单位：1 m 是光在真空中 $\dfrac{1}{299\ 792\ 458}$ s 内传播的距离．

练习与评价

1．你在匀速行驶的车厢内与朋友通过手机进行对话，和在地面上这样做相比较，二者有区别吗？为什么？

2．在以 $0.5c$ 匀速飞行的飞船中激光炮向前和向后各发射一束强激光，它们对飞船和对地面的速率各是多少？

发展空间



课外阅读

假　设

在相当数量的客观事实的基础上，通过概括、分析，作出普遍性的结论，或者提出更广泛的理论，但是没有对这些结论或者理论本身作出严密、令人信服的直接证明，这时，这种结论或者理论就是一种假设．要是在新的实践中发现哪怕只有一个事实与这个假设不符合，这个假设就必须被　正ش至被根本推翻．

爱因斯坦的两个基本假设100余年来经受住了大量新的实践的考验，至今没有出现任何一个反面事例．因而人们确信，狭义相对论反映了客观真理，代表了目前自然科学的最高智慧水平．但另一方面，人们至今也没有能够正面证明这两条是普遍正确、没有例外的，因此，它们仍然还是假设．

关于相对论的实验基础

有些人认为相对论是根据个别实验结果提出的，并且总是把发现曾被认为是传播光的介质“以太”不存在的迈克耳孙－莫雷实验作为“实验基础”．这是不符合历史事实的，尽管该

微信公众号：电子课本大全

实验在较早的1887年得出了重要的实验结果，但爱因斯坦始终没有表明他是在该实验的基础上提出相对论的.

这里涉及对“物理学是一门以实验为基础的科学”的理解. 它的意思是成功的物理理论都要符合实验事实，终究“实践是检验真理的唯一标准”. 但这并不意味着一个正确的理论的出现都是直接根据某一两个实验提出的. 个别的实验能够确定某个事实或某些客观现象，却一般不能由此建立完整的理论，特别是理论体系. 像相对论这样的理论必须在总结大量实验事实的基础上才有可能建立.

特别应当指出：由理论自身的要求所提出的“假设”在物理学的发展，特别是近代物理的发展上也起着十分重要ښ至是关键的作用，常常走在实验的前面. 麦克斯韦的变化的电场和磁场结合成统一的电磁场以及光是电磁波的理论就是他根据电磁理论的要求提出，20年后才被赫兹用实验直接证实，更为现今每日每时的无线电通信所证实. 激光在实验上的实现（1960年）远在爱因斯坦提出相关理论（1917年）之后，如今该理论被激光在科学研究和技术的广泛领域的成功应用所证实. 相对论的最初提出是在爱因斯坦1905年发表的《论动体的电动力学》的论文中，根据对电磁理论应当符合相对性原理的要求提出的，今天已被大量的实验所证实，当然也和迈克耳孙–莫雷实验的结果相吻合. 对于相对论中先导出质量随速度变化的理论关系而后实验才对其予以证实的历史事实，爱因斯坦曾写道：“这里我们又一次看到科学的创造性工作的特色.”即先由理论工作者创造性地总结已知的实验事实，分析它们的内在联系以及还存在的某些方面的矛盾、困难，最后提出某种解决问题的可能方案，或者说是作出某种“预言”，最后由实验来进行检验，肯定它、否定它或者修改它.

对理论和实验的关系，切不可片面地理解，一方面，任何正确的理论最终都必须能经受住实验的验证；另一方面，忽视理论的指导、推动作用对物理学的发展也是非常不利的.

3 时间、长度的相对性

同时的相对性

理想实验不一定真正摆出仪器实际去做，它是依据已知的可靠的科学规律进行合理的推理，来看某种现象会不会发生，某种思想会不会产生矛盾. 在现代物理学的发展中，理想实验也起了很大的作用.

据爱因斯坦回忆，他从16岁起就思考时间概念了，经过10年，他首先得出了“同时是相对的”这样的结论.

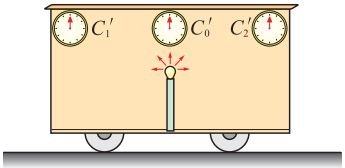
所谓“同时是相对的”，是指相隔一定距离发生的两件事，在一个参考系中观测是同时发生的，在相对于此参考系运动的另一个参考系中观测就可能不是同时，而是一先一后发生的. 在经典力学中由于时间的测量与参考系无关，即时间测量是绝对的，各参考系中都一样，两个事件的发生是同时还是不同时，也就与参考系无关了，即同时是绝对的.

同时为什么是相对的？请考虑下面的理想实验.

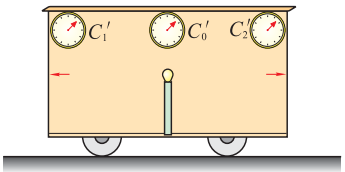
微信公众号：电子课本大全

讨论交流

假设一列火车在平直的轨道上以速度u匀速、高速开过站台，在车厢的正中放有一个闪光灯．现在使该灯发一次闪光向周围传播．闪光照到车厢的前壁和后壁，是两个事件．小丽在车上观测，小明在站台上观测，他们认为这两个事件是同时发生的吗？即闪光是同时到达前后壁的吗？



（a）光发出

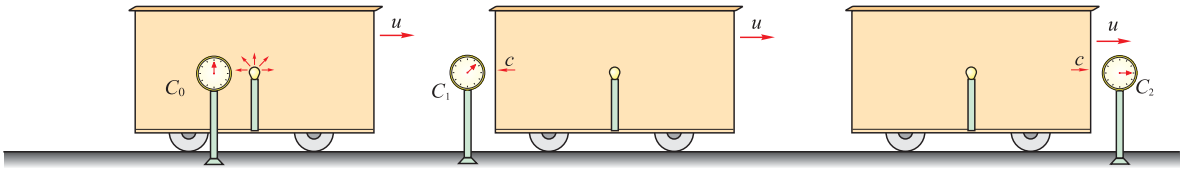


（b）光同时到达前后壁

图 6-3-1　在车厢内观测

小丽用车厢内同步的（即对准了的）钟C_0'、C_1'和C_2'测量，由于车厢是惯性系，光的速率向前和向后一样，而且经过的距离相同，所得的结果一定是光到达前壁和到达后壁这两个事件同时发生（图 6-3-1）．

小明以站台为参考系，用安装在站台上的同步钟C_0、C_1和C_2测量，结果又如何呢？由于地面是惯性系，闪光向前后传播的速率是相同的，都等于在车厢中的速率，但是向前的光从发出到到达车厢前壁的时间内，前壁已向前走了一段距离，而向后的光从发出到到达后壁的时间内，后壁已迎着光线走了一段距离，向前的光传播的距离要大于向后的光传播的距离，所以光先到达后壁而后到达前壁．在站台上观测这同样的两件事，不是同时发生的（图 6-3-2）．



（a）光发出　　（b）光到达后壁　　（c）光到达前壁

图 6-3-2　在站台上观测

在一个参考系中同时发生的两件事，在另一参考系中不同时发生，这就是同时的相对性．在车厢运动的速度远小于光速时，光从车厢中央传播到前后壁的短暂时间内，车厢前进不了多大距离，因此站台上的观测者不会观测到闪光到达前、后壁的时间差．车厢相对站台的速率越大，站台上观测光到达车厢前后壁这两件事相隔的时间就越长．这表明，同样两件事的时间间隔有赖于两个参考系的相对速率．就是说，时间的量度是相对的．这和人们早先从直观经验中建立的绝对时空观是不一致的．

同时的相对性是理解狭义相对论的关键．下面介绍的一些相对论运动学效应，其本质就是同时的相对性．

微信公众号：电子课本大全

运动时钟的变慢

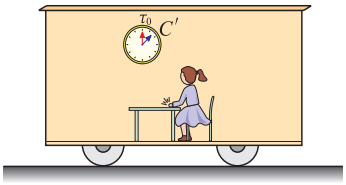
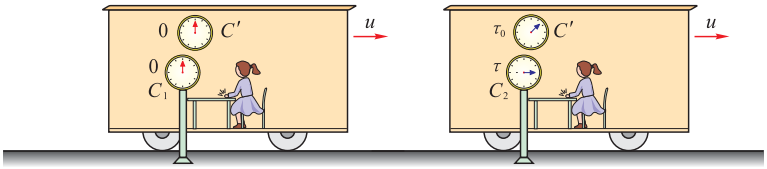


图 6-3-3　在车厢内观测

设在以速率u相对于站台进行的车厢中，小丽坐在一张小桌旁，车厢壁挂有一只钟C'．现在小丽拍了两下桌子．这两次拍桌子，或者用相对论的用语叫做两个事件之间的时间间隔，可由钟C'给出数值，记作τ_0，称为这两次拍桌子之间的**固有时**（proper time）（图 6-3-3）．在站台上观测，则需要用安装在站台上的两只同步的钟．这是因为从站台参考系来看，小丽是在不同地点各拍一下桌子的（图 6-3-4）．这两个钟给出的小丽两次拍桌子之间的时间间隔记作τ．由狭义相对论可以导出 狭义相对论的时间变换公式

$$\tau=\frac{\tau_0}{\sqrt{1-\dfrac{u^2}{c^2}}}\geqslant\tau_0$$



（a）拍第一下　　（b）拍第二下

图 6-3-4　在站台上观测

这一公式表示：同样的两件事，在它们发生于同一地点的参考系内所经历的时间最短；在其他参考系内观测，这段时间要长些．这一现象称为时间的相对性，也称为“动钟变慢”．这是由于对同样的两件事，在站台上观测，车厢内那只相对于站台运动的钟给出的时间数值较小，在站台上的人看来，它比站台上的钟走得慢了．

1971 年，海沸尔（J.C.Hafele）和凯汀（R.E.Keating）把四只铯原子钟放在高速飞机上，飞机绕地球飞行一周后，再回到原处，然后把这些钟的读数和静止在地面上的铯原子钟的读数相比较，扣除其他效应，发现实验结果在误差范围内与动钟变慢的计算结果相符合．

注意，时间延缓效应并不是钟由于相对运动而发生了物理结构上的变化．它完全是由相对运动的不同观测者对时间进行量度时引起的一种观测效应，这种效应也是相对的．如果你在站台上跺两下脚，你身旁的那一只相对于你是静止的钟给出的这两下之间的时间间隔就是固有时，而小丽在运动的车厢中（她需用两只同步的钟）测得的那两次跺脚之间的时间要长些．在小丽看来，你的钟是运动的，

微信公众号：电子课本大全

你的钟变慢了. “你看我的钟变慢，我看你的钟变慢”，真是有趣，比一些神话故事更加引人入胜.

由于现在的火车速度远小于光速，火车开过站台的实验是不可能测出时间延缓效应的，而现代关于高速粒子的实验却能准确地判定，时间延缓效应确实存在，而且满足时间变换公式表示的关系.

从时间变换公式还可以看出，一般物体的速率 u 要远远小于真空光速 c，这时 $\frac{u^2}{c^2} \ll 1$，τ 和 τ_0 的差别很小，不仅是人的感觉器官，就是绝大多数测量时间的仪器也难以分辨. 这正是人们能够接受经典时空观，而对时间、空间的相对性感到不可理解的主要原因.

假设火箭、飞船等达到可以与光速相比拟的速度，这时时间延缓的效应就会变得明显了. 大家用时间变换公式计算一下，当火箭速度 $u = 0.97c$ 时，火箭中 1 s，地球上就是 4 s；当 $u = 0.999\,8c$，这大概是目前高能粒子加速器中微观粒子所能达到的最高速度，火箭中1s，地球上已过了 50 s.《西游记》中“天上一日，人间一年”的神话，还真有可能实现哩!

【例题】π^+介子是一种不稳定的粒子，产生后很快就转化成别的粒子了，它的平均寿命是 2.6×10^{-8} s. 当它以 $0.99c$ 的速率在实验室中运动时，平均来说它“一生”中能跑多远?

【解】π^+介子的平均寿命是指在它静止的参考系内，自然是在同一地点，它从产生到转化所经历的时间，这是固有时 τ_0. 在实验室内观测运动的 π^+ 介子，它的寿命 τ，由时间变换公式决定，要比 τ_0 长些. 于是，在实验室内，它一生中平均跑过的距离应为

$$s = v\tau = \frac{v\tau_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{0.99\times3\times10^8\times2.6\times10^{-8}}{\sqrt{1-0.99^2}}\ \text{m} \approx 53\ \text{m}$$

长度的相对性

我们借助长度的测量来讨论相对论空间概念. 仍旧考虑那节以极高速度 u 开过站台的车厢. 现在要测量车厢上一个窗户的水平长度. 在车厢内测量，用一根长尺沿窗户的水平棱放置，记下这棱的两端的位置读数 x_1 和 x_2，然后相减，求出 $l_0 = x_2 - x_1$ 即得. 我们称其为静长. 注意，由于窗户相对于车厢是静止的，这一结果跟何时记下 x_1 和 x_2 以

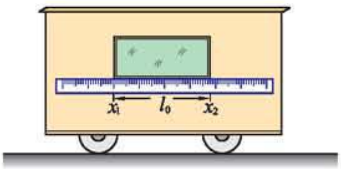


图 6-3-5 在车厢内测量

微信公众号：电子课本大全

及先记谁后记谁没有关系（图 6-3-5）.

讨论交流

设想一下小明在站台上仍拿一根长尺，想测量同一窗户的水平长度，他该怎么测呢？

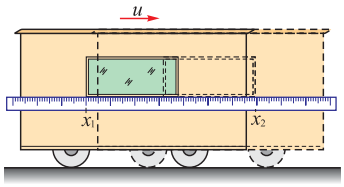


图6-3-6　在车站上先记下x_1，过一会儿再记下x_2

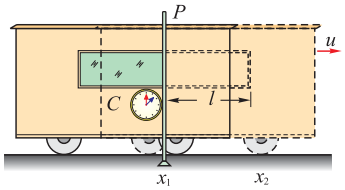


图 6-3-7　在站台上观测，虚线表示车厢后来的位置

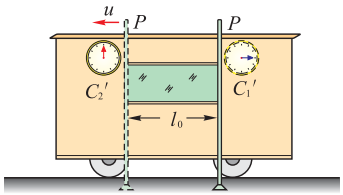


图 6-3-8　在车厢内观测，虚线表示立柱后来的位置

一根长尺平行于窗户的水平棱边放置，记下它的两端的位置读数x_1和x_2. 这时，在什么时刻记下x_1和x_2就具有关键的作用了. 由于从站台上看来窗户在运动，如果观测者先记下棱后端的x_1，过一会儿再记下其前端位置x_2，两者的差x_2-x_1显然不再是窗户的水平长度（图6-3-6）. 先记下x_2再记下x_1也不行. 只有同时记下棱两端的位置，这样得到的x_2-x_1才能作为运动的窗户的长度. 这说明，对一个运动的物体，要测定它沿运动方向上的长度，是和同时的概念紧密联系的.

既然长度的测量和同时性有关，而同时性是相对的，所以长度的测量也一定是相对的. 我们可以进行如下推导.

仍以上面的车厢为例. 以l_0表示在车厢参考系内测得的窗户的水平长度，称为**固有长度**（proper length），亦即静长. 在站台上立一柱P. 以τ_0表示站台上观察到窗户的前后端依次通过P柱的时间间隔，由于车厢的速率为u，则在站台上测得的窗户的长度，也就是窗户前后端相隔的距离，应为$l=u\tau_0$（图6-3-7）. 现在，我们换一个角度，从车厢内向外看，这时站台是向后运动的. 以τ表示立柱依次通过窗户前后端的时间间隔. 由于在车厢参考系内窗户的宽度为固有长度l_0，而立柱的速率为u，所以有$l_0=u\tau$（图6-3-8）. 注意，τ和τ_0是不相同的. 由于窗户前后端分别与立柱相遇这两个事件在站台参考系内是在同一地点发生的，所以根据“运动时钟的变慢”一节中的讨论，τ_0是这两个事件之间的固有时. 利用时间变换公式可以得到

$$l=u\tau_0=u\tau\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}} \quad 或 \quad l=l_0\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}$$

这就是狭义相对论的长度变换公式. 它说明，一根棒（上例中是窗户的水平棱）在运动时的长度总要比它静止时的长度小（$\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}<1$）. 这一现象称为相对论长度收缩或洛伦

微信公众号：电子课本大全

兹收缩，也常通俗地称为“动棒缩短”.

长度收缩也完全是由于相对运动而引起的观测效应，并不是棒的本身发生了什么物理上实质的变化. 这种效应也是相对的，即对站台上房屋的一个窗户的水平棱进行观测时，在运动的车厢内向外观测到的长度要比在站台上测得的短些. 虽然看起来结果变了，但是对于任何一个在惯性系中观测的人来说，结果都是运动的水平棱缩短了.

由时间变换公式和长度变换公式还可以看出，如果 $u = c$，即以光速运动时，l 将等于 0，即运动棒收缩到没有空间尺寸了；τ_0 也将等于 0，即运动的钟停住不走了. 而如果 u 大于 c，则根号 $\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}$ 中的值将变为负值，时间 τ 和长度 l 将没有意义. 可见，光在真空中的速率 c 是自然界物体运动速率的极限.

相对论告诉我们，除了静质量（见下节）$m_0 = 0$ 的物质，例如光子，其速度为光速外，其他一切静质量不等于零的物质，它们的速度只能接近光速，却不可能达到，更不可能超过 c.

相对论时空观

相对论的时间变换公式和长度变换公式说明，同一段时间或长度在不同的惯性系内测得的结果是不一样的. 这就是说，时间和空间的量度是与物体的运动有关的，是相对的. 运动棒的长度的测量建立在必须同时进行观测的基础上，说明时间和空间的量度又是相互紧密联系的. 这种对时间和空间的量度的相对性和相互联系的认识是相对论时空观的主要支点. 它是对牛顿力学的经典时空观的革命性的变革，已成为现代物理学，特别是高速运动物理学的重要支柱.

另外，也要看到，经典时空观是相对论时空观的特殊表现. 在低速范围内（注意，这里指速率远比光速为低，实际上即使像航天火箭的速度，达到了 10 km/s，比之光速 3×10^5 km/s 仍然是很小的，仍可视为低速），根据相对论时空观所得到的结论就和经典时空观几乎没有差别了. 在广泛的技术领域，建立在经典时空观的基础上的牛顿定律仍然成立. 探索太空的宇宙航行能够实现就是明证.

微信公众号：电子课本大全

练习与评价

1. 如果两个参考系的相对速率非常小，在一个参考系同时发生的两件事在另一个参考系中基本上也是同时发生的. 这就回到了牛顿的绝对时间概念，是这样吗?

2. 在地面参考系中，观测到在上海和北京同时有两个婴儿诞生. 试问，如果在沿北京→上海方向高速飞行的飞船上观测，他们是同时诞生的吗? 如果不是，哪个先诞生?

3. 在行进的车厢中测得的站台上两根柱子之间的距离比在站台上测得的是较大，较小，还是相等?

4. 一艘固有长度为 40 m 的飞船以 0.8c 的速率水平飞行跨越宽 1 200 m 的长江，江岸上的人观测到飞船的长度是多少? 飞船上的航天员观测到长江的宽度是多少?

5. 用时间变换公式和长度变换公式怎么说明低速情况下的相对论时空观近似地转变为经典时空观?

6. 在地面上空以 8 km/s 飞行的人造卫星，从地面上测量，按相对论计算，其长度比其固有长度缩短的比例是多少?

7. 有些人不相信“光速不变”、“时间延缓”、“长度缩短”，理由是：“我看不出来”，“我觉得不应该这样”. 你觉得这种看法有道理吗? 为什么?

4 相对论的速度变换公式 质能关系

相对论的速度变换

前面已讲过，根据经典时空观，速度的变换遵守伽利略速度变换公式 $v = u \pm v'$. 根据时空相对性，狭义相对论给出：在以速率u相对于参考系S运动的参考系S'中，一物体沿与u相同的方向以速率 v' 运动时，在参考系S中，它的速率为

$$v = \frac{u + v'}{1 + \frac{uv'}{c^2}}$$

例如，在地面上空以$u = 0.9c$飞行的飞船，向前发射一导弹，导弹对飞船的速率为 $v' = 0.5c$.

这时，按照伽利略速度变换公式，$v = u + v'$，导弹对地面的速度 $v = 0.9c + 0.5c = 1.4c$，超过了真空中的光

微信公众号：电子课本大全

速！这说明这时伽利略速度变换公式不再适用．但是按照相对论的时空观，我们把有关数值代入上述相对论速度变换公式，可知导弹对地面的速度实际上应是

$$v=\frac{0.9c+0.5c}{1+\frac{(0.9c)\times(0.5c)}{c^2}}\approx 0.966c$$

即仍然没有达到 c．

相对论质量和能量

狭义相对论的另一个重要结论是物体的质量 m 与它所包含的能量 E 存在确定的关系，二者的关系就是爱因斯坦的著名的质能关系式

$$E=mc^2$$

其中 c 是光在真空中的速率．此式中 E 和 m 只差一个常量因子 c^2．在经典物理中，质量和能量是分别独立量度的，有两个独立的守恒定律．在狭义相对论中，质量和能量这两个最基本的物理量密切相关，不是独立的，相应地这两个守恒定律也就不再相互独立了．

应该指明的是，上述质能关系式中的质量 m 是经过狭义相对论“改造”过的质量，它不是一个不变的量．它和物体的运动速率 v 有以下的关系：

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

此式中 m_0 是 $v=0$ 时物体的质量，称为静质量．它是不变的量．因为经典力学研究的是宏观物体在低速运动时的规律，所以经典力学中的物体质量和静质量的差别很小，一般不再加以区分．与静质量对应的能量称为静能量，为

$$E_0=m_0c^2$$

这一和静止物体的质量相联系的能量概念在经典力学中是没有的．还应当说明，这里所说的“能量”是指与所研究的对象相联系的全部能量，而不仅是某一种或几种能量形式，如机械能、内能、电磁能、核能等．

爱因斯坦当初写下他的质能关系式时并没有什么实验

微信公众号：电子课本大全

证据．但他确信此式的正确性，并指出可以用能量变化很大的物体，如具有放射性的镭盐来证明这一结论．后来的事实正如他所预言的那样，不但在放射现象中，而且在各种核和粒子的反应中都证实了这一结论．人类利用核能的时代可以说是从这一公式的发现开启的．

练习与评价

1．北京正负电子对　机（本章首页图片是它的直线加速器）中的电子以非常大的速率运动，按速率 $v = 0.999\,999c$ 计算里面电子的质量是它静止时的质量的多少倍？

2．应用 $E_0 = m_0c^2$ 计算一粒质量为 1 g 的小豆子的静能量相当于多少吨优质煤完全燃烧所放出的能量，已知 1 kg 优质煤完全燃烧放出的能量是 2.9×10^7 J.

5 广义相对论点滴(选学)

爱因斯坦有一个基本思想：自然界遵循的规律是统一的．根据这一思想，自 1905 年发表狭义相对论后，经过 10 年的刻苦研究，他在 1916 年又建立了广义相对论．

● 广义相对性原理和等效原理

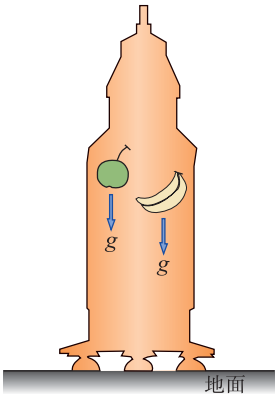
第一个原理称为**广义相对性原理**（principle of general relativity）．这一原理是把狭义相对论的相对性原理从惯性参考系推广到非惯性参考系，爱因斯坦认为在任何参考系中物理规律都是一样的．

第二个原理称为**等效原理**（equivalence principle）．它是在研究质量的基础上提出来的．牛顿力学中的质量是物体惯性的量度，也就是说在一定外力作用下，物体的加速度越小，质量越大；物体的加速度越大质量越小，按这样的定义测量的质量称为惯性质量．牛顿又发现了万有引力，当然也可以根据万有引力的大小来衡量质量的大小，这样测得的质量称为引力质量．物理学家所做的一系列精确度很

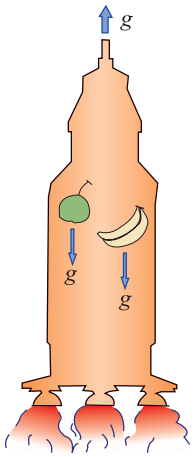
微信公众号：电子课本大全

高的实验表明惯性质量和引力质量是相等的．爱因斯坦认为，同一物体的这两种质量相等不应该是偶然的巧合，而应有深刻的内在联系.他深入分析了自由降落的电梯里发生的现象，提出了等效原理．这一原理可表述为：一个不受引力作用的加速度系统跟一个受引力作用的惯性系统是等效的．

如图6-5-1（a）中，从静止在地面上的飞船内会观测到所有物体都以同一个加速度g下落；在图6-5-1（b）中的远离各星体的（引力基本不存在）太空里，有一艘密闭的飞船相对于某惯性系以加速度g向“上”飞行，在这一飞船内的观测者，也会看到所有物体以同一加速度g“下落”，比较上面（a）（b）两种情况，两个系统中发生的力学过程完全相同．两艘飞船内的观测者无法辨别自己所在的飞船究竟是在太空中运动的加速参考系，还是静止在地面上的惯性系，因此可以把一个不受引力作用的加速系统看做是受到引力作用的惯性系统，也可以把一个受引力作用的惯性系统看做是一个不受引力作用的加速系统．



（a）飞船停在地面上



（b）飞船以加速度g上升

图6-5-1　等效原理

支持广义相对论的几个观测结果

上面这两个原理就是广义相对论的两个基本假设．这两个假设已为大量的实验所支持（还未曾发现有与此相悖的实验结果）．例如：

1．光在引力场中传播时，将会发生偏折，而不再是直线传播．在光线经过质量巨大的天体，如太阳时，这种偏折可以由天文观测来测定．日全食时是观测的最好时机．这时，可以看到在太阳周围天区的恒星因为光线偏折而似乎改变了位置（图6-5-2）．

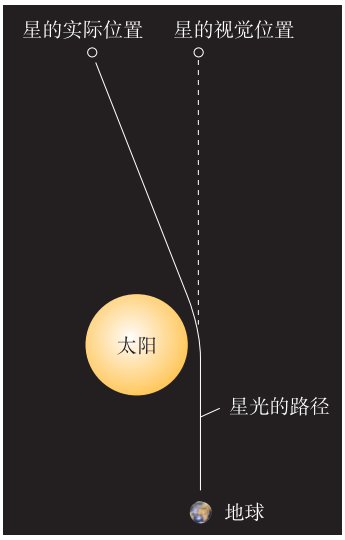


图6-5-2　光线的引力偏折

实验和观测是理论的最好检验．广义相对论建立之后不久，1919年5月29日发生日全食．英国皇家天文学会派出两个考察队分别到西非普林西比岛和巴西索布腊尔进行观测，观测结果完全证实了爱因斯坦的预言，在当时曾引起轰动，媒体的报道使爱因斯坦成为家喻户晓的新闻人物．

2．引力作用使光波发生频移，在引力势能低处发出的光波在引力势能高处接收到时光波频率变低，发生“红移”；相反，从引力势能高处向引力势能低处发射光波，接收到的频率变高，发生“蓝移”．这曾被地面上精密的实验证实．

3．在引力场中时间也会延缓，引力越强（例如在太阳周围的空间），时钟就走得越慢．例如从地球向金星发射雷

微信公众号：电子课本大全

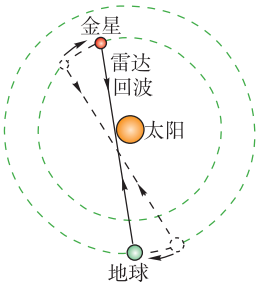


图 6-5-3　雷达回波延迟

达信号，这个信号又从金星表面上反射回地球（图 6-5-3）. 如果雷达信号来回路程经过太阳表面附近，所经过的时间要比不经过太阳附近的情况要变长一些.

4. 水星绕太阳运动的轨道与根据牛顿万有引力定律计算所得的不一致，这是一个在天文学史上长达百年的困惑. 人们曾经怀疑可能在水星轨道内有一颗小行星，由于它的存在造成水星轨道的异常，然而始终未找到. 爱因斯坦用新建立的引力场方程取代了经典的万有引力定律，计算结果和实际观测符合得很好（参看图6-5-4），解决了天文学上的百年疑难.

当引力微弱时，例如在地球、月球周围这样的空间里，由引力场方程得到的结果就和前面学过的万有引力定律大体一致.

5. 当两个天体相互绕转时，会向外界辐射出引力波. 这一点也已被越来越精密的实际观测间接证明.

100 多年前人们发现并掌握了电磁波，使得社会发生了又一次技术革命，人类的生活发生了极其巨大的变化. 那么，如果引力波确实存在，它在未来会给我们带来什么呢？让我们拭目以待吧！

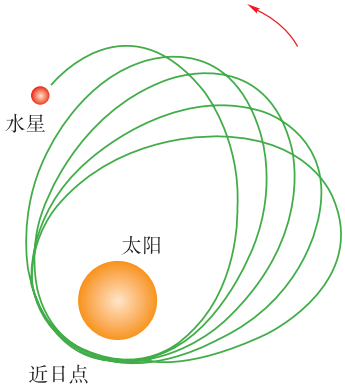


图 6-5-4　水星运动轨道

广义相对论指出了时间和空间的量度与物体间的引力有关，因而与它们的质量有关. 实际上，广义相对论认为物体因具有质量而使其周围的时间和空间发生了“弯曲”，虽然这种弯曲是我们人体器官感觉不到的，但可以通过各种方法间接地加以确定，而引力正是这种“时空弯曲”的表现. 时空弯曲的程度越高，对应的万有引力也就越强（图 6-5-5）. 这种“弯曲”的程度是与各处物质的密度分布有关系的. 为了描述这种“弯曲”，必须应用一种不同于我们现在在数学课中学习的欧几里得几何学，而要运用一种新的几何学，因此，广义相对论也可以看做是一种关于引力的几何理论.

在这种几何学中，一个三角形的内角之和不等于 180°，圆周长不等于 $2\pi r$，等等.

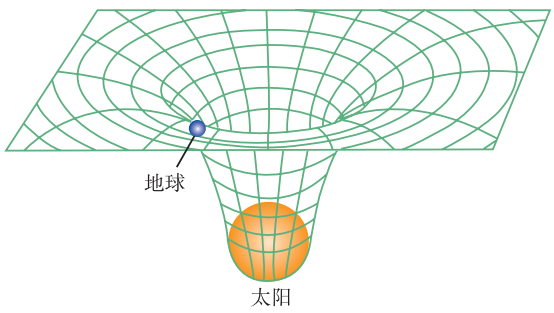


图 6-5-5　时空“弯曲”

微信公众号：电子课本大全

在广义相对论中，时空观念比狭义相对论更推进了一步．时间、空间不仅显示出它们不是绝对的，而是相对的，它们组成了一个密切联系、不可分割的整体，并且它们不能脱离整个物质世界而单独存在．爱因斯坦晚年曾说过，要是物质不存在了，时间、空间也就不会再存在．时间和空间的各种性质和规律都与物质的质量、能量、运动状态等紧密相关．但是根据经典的时空观，从本章开头引用的牛顿的话可以清楚地看出，时间和空间的性质“与外界任何事物无关”．

人类对客观世界的认识是不断扩展和深化的，不论多么伟大的人物都只能跑好这场超级马拉松接力中的一棒，经典时空观和相对论时空观就是其中的两棒．现在这根接力棒就要传递到今天的青少年手中了．同学们，也许你们还不能充分理解上面所介绍的全部内容，但一定会立下志愿，接好下一棒，为祖国争光，为推动科学和社会的进步而努力．

● 宇宙的演化

在日常生活中，除重力外，与物体质量相关的引力没有任何明显的效果．在微观领域，引力更是完全可以忽略．但是在宇宙范围内，由于星体的质量巨大，时空弯曲就十分明显，而必须用广义相对论加以研究．实际的观测和理论研究（结合关于微观粒子的理论）已产生了一些惊人的成果，其中之一是宇宙演化的膨胀理论，即宇宙大爆炸理论．



伽莫夫
（G.Gamov，1904—1968）

20世纪20年代，天文观测已发现远处的许多星系正在离开我们向远处退行，而且越远的星系退行的速率越大．这一结果使得天文学家推论出宇宙是在膨胀着的．20世纪40年代末，物理学家伽莫夫把宇宙膨胀与粒子反应理论结合起来，提出宇宙大爆炸假说．后来，许多科学家通过理论分析及计算把这一思想具体化，描绘了大爆炸以后宇宙发展的概况．这一发展的梗概如下：

宇宙起始于一次大爆炸，那时它的温度极高，密度极大，时间从此开始，空间从此扩大．

10^{-43} s时，宇宙的密度是10^{93} kg/m^3．温度是10^{32} K．宇宙是混沌一团．

微信公众号：电子课本大全

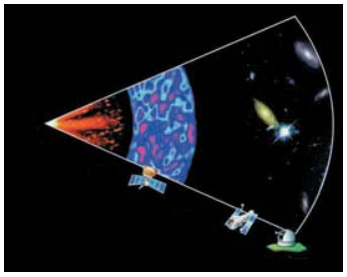


图 6-5-6 “宇宙大爆炸”

10^{-35} s时，宇宙发生一次暴涨，直径在10^{-32} s内膨胀了10^{50}倍，温度降到10^{27} K. 宇宙中出现了各种各样的粒子，包括光子，它们不断通过相互作用而相互转化.

10^{-6} s时，温度降到10^{13} K，出现了电子、正电子.

1 min时，温度为10^{9} K，质子和中子结合成氦核.

约100万年时，温度降到3 000 K，开始出现各种原子. 存留的光子不再和粒子相互转化而在宇宙中到处游逛，使宇宙成为透明的.

约10亿年时，开始形成恒星和星系.

约100亿年时，出现我们的银河系、太阳和行星.

约120亿年时，地球上出现了生命.

约137亿年时出现了人类，百万年后出现了现代文明. 宇宙温度降到了约3 K.

至今宇宙的年龄估计为137亿年. 膨胀速率按最大速率光速计，现今宇宙的“直径”约为137亿光年，即约为1.3×10^{23} km.

上述理论已经得到了一些实际观测的证实. 除了远处星体的退行外，最有说服力的证据是宇宙背景辐射的发现. 宇宙背景辐射就是在大爆炸后约100万年时存留到今天的热辐射. 1964年科学家果然发现了这种存在于太空中的辐射. 1989年发射的专用卫星更精确地测得了这种辐射. 测得宇宙背景辐射温度为2.735 K，与理论符合得相当完美.

宇宙会永远膨胀下去吗？这个问题现在还没有一个肯定的答案. 由于宇宙间天体、星际物质等的引力作用，可能会使得这种膨胀减缓，甚至到一定时期重新收缩. 除了发光的星系外，目前还很不清楚的“暗物质”、“暗能量”以及未知的物质间的相互作用，都可能影响宇宙的膨胀. 天文学家们已发现，至少在现阶段，宇宙总体上还是在加速膨胀. 是什么力量推动了膨胀的加速？这种加速是暂时的还是长久的？宇宙究竟有什么样的发展“前途”？眼前对这些问题的回答都还是“不知道”. 大爆炸理论能够解释很多客观事实，代表人类当前在相对论、量子力学和粒子物理基础上对宇宙的认识水平，是一种相对真理. 但也必须认识到，它还没有完全成熟，今后无论在理论方面还是实验、观测方面都还有无数的工作需要我们大家去做. 作为一种理论模型，大爆炸理论也必然会不断受到检验、修正和补充，也不能排除需要作重大修改的可能性.

微信公众号：电子课本大全

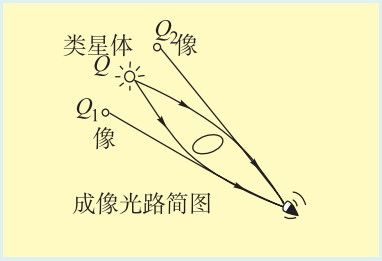
发展空间

思考题

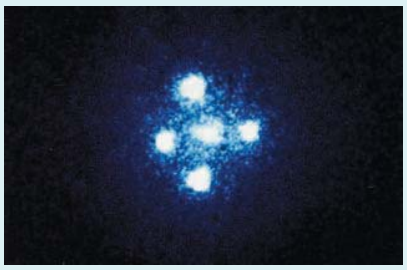
1. 站在山上的人看到一列火车开过一座大桥，车头车尾刚好同时到达桥的两端，在车上的乘客看来，车头车尾是否同时到达桥的两端？如果不是，是车头先到达桥的一端吗？

2. 在地面向上看，两艘飞船正以速率 $0.6c$ 沿相反方向飞行，一个飞船中的航天员测得另一飞船对它的速率多大？

3. 很远的星体隔着巨大质量的星系也能向地球发射光线而在地球上显示出它的像，星系好像是个“透镜”. 试用广义相对论解释星系的这种“引力透镜”作用（图 6-5-7）.



（a）被大质量星系隔开的远星与地球



（b）远星的照片

图 6-5-7　引力透镜

走向社会

1. 阅读有关相对论的科普读物，在同学中举办小型讨论会.

2. 观看有关宇宙起源的科教片，了解宇宙的演化与发展.

本章小结

1．经典力学运动的相对性

（1）伽利略相对性原理：对不同的惯性系，力学（实际上只是对经典力学）规律都是一样的.

（2）伽利略速度变换公式

$$v = u \pm v'$$

2．狭义相对论的基本假设

（1）爱因斯坦相对性原理：对不同的惯性系，物理规律都是一样的.

（2）光速不变原理：在不同的惯性系中，光在真空中传播的速率都是一样的.

3．时间、长度的相对性

（1）同时是相对的：在一个惯性系中测得不同地点但同时发生的两个事件，在任一其他惯性系中测量，二者一定不是同时发生的.

微信公众号：电子课本大全

（2）时间的相对性：$\tau = \dfrac{\tau_0}{\sqrt{1-\dfrac{u^2}{c^2}}}$.

（3）长度的相对性：$l = l_0\sqrt{1-\dfrac{u^2}{c^2}}$.

4．狭义相对论速度变换公式 $v = \dfrac{u+v'}{1+\dfrac{uv'}{c^2}}$.

5．狭义相对论质量和能量 $m = \dfrac{m_0}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}$，$E = mc^2$.

其中 m_0 是静质量，E 是物体的能量．物体静止时，$E_0 = m_0c^2$，E_0 是物体的静止能量．

6．广义相对论点滴

广义相对性原理：对所有参考系，不管是惯性系或加速参考系，物理规律都是一样的．

等效原理：一个均匀的引力场与一个做匀加速运动的参考系等价．

时空的特性受质量的影响．由于其质量，物体的周围时空发生弯曲，引力是时空弯曲的表现．

7．宇宙大爆炸

我们所在的宇宙是从一个“宇宙蛋”发生爆炸而演化得来的．这一学说得到了广泛的观测支持．至今宇宙的年龄约 137 亿年．

习　题

1．在地球上观测到一次月食的时间是 3 h 35 min 41 s．在月球上测量，这次月食经过了多长时间？月球绕地球运行的速率按 870 m/s 计．

2．一个不稳定的粒子在实验室中从产生到转化以 0.95c 的速率飞过了 7.5 cm 的距离．求此粒子的寿命．

3．在地面上测得一水平飞行的导弹长 4.8 m，速率为 900 m/s．求此导弹在箱中放着时的长度．

4．一飞船以 0.95c 的速率飞过地球上空时，在地球上测得它的长度是 18 m．求此飞船的固有长度．

5．在太空中远离星体的地方，一太空船以 5.2 m/s^2 的加速度运动．在船舱内测得一个质量为 3.5 kg 的铅球受到多大“重力”？

微信公众号：电子课本大全