普通高等教育“九五”国家级重点教材

清华大学教材

大学物理学

第四册

波动与光学

第二版

张三慧 主编

清华大学出版社

http://www.tup.tsinghua.edu.cn

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书是清华大学教材《大学物理学》的第四册，讲述振动与波的一般基本规律和波动光学的基本原理，包括光的干涉、衍射和偏振。除了基本内容外，还专题介绍了全息照相、光学信息处理、液晶等今日物理趣闻和著名物理学家托马斯·杨和菲涅耳的传略。基本内容简明扼要，附加内容通俗易懂。

本书可作为高等院校的大学物理教材，也可以作为中学物理教师教学或其他读者自学的参考书。

书　名：大学物理学(第四册)波动与光学
作　者：张三慧　主编
出版者：清华大学出版社(北京清华大学学研大厦，邮编 100084)
http://www.tup.tsinghua.edu.cn
印刷者：清华大学印刷厂
发行者：新华书店总店北京发行所
开　本：850×1168 1/32　**印张**：8.625　**字数**：223 千字
版　次：2000 年 1 月第 2 版　2001 年 4 月第 7 次印刷
书　号：ISBN 7-302-03783-3/O·224
印　数：88001～108000
定　价：10.00 元

目　录

今日物理趣闻C 液晶

波动与光学概述

光(这里主要指可见光)是人类以及各种生物生活不可或缺的最普通的要素,但对它的规律和本性的认识却经历了漫长的过程。最早也是最容易观察到的规律是光的直线传播。在机械观的基础上,人们认为光是一些微粒组成的,光线就是这些“光微粒”的运动路径。牛顿被尊为是光的微粒说的创始人和坚持者,但并没有确凿的证据。实际上牛顿已觉察到许多光现象可能需要用波动来解释,牛顿环就是一例。不过他当时未能作出这种解释。他的同代人惠更斯倒是明确地提出了光是一种波动,但是并没有建立起系统的有说服力的理论。直到进入19世纪,才由托马斯·杨和菲涅耳从实验和理论上建立起一套比较完整的光的波动理论,使人们正确地认识到光就是一种波动,而光的沿直线前进只是光的传播过程的特殊情形。托马斯·杨和菲涅耳对光波的理解还持有机械论的观点,即光是在一种介质中传播的波。关于传播光的介质是什么的问题,虽然对光波的传播规律的描述甚至实验观测并无直接的影响,但终究是波动理论的一个“要害”问题。19世纪中叶光的电磁理论的建立使人们对光波的认识更深入了一步,但关于“介质”的问题还是矛盾重重,有待解决。最终解决这个问题的是19世纪末叶迈克耳孙的实验以及随后爱因斯坦建立的相对论理论。他们的结论是电磁波(包括光波)是一种可独立存在的物质,它的传播不需要任何介质。

本书关于光的波动规律的讲解,基本上还是近200年前托马斯·杨和菲涅耳的理论,当然有许多应用实例是现代化的。正确的基本理论是不会过时的,而且它们的应用将随时代的前进而不断

扩大和翻新。现代的许多高新技术中的精密测量与控制就应用了光的干涉和衍射的原理。激光的发明(这也是40年前的事情了!)更使"古老的"光学焕发了青春。本书第3～5章就讲解波动光学的基本规律,包括干涉、衍射和偏振。在适当的地方都插入了若干这些规律的现代应用。所述规律大都是"唯象的",没有用电磁理论麦克斯韦方程说明它们的根源。

人类对自然界的认识是无止境的,在对光的认识上也是这样。就波动光学本身来说,一些特殊领域的规律也还在不断地深入探索,"光孤子"就是一例。光除了具有波动性外,20世纪初叶(也是近100年前的事情了),又确定无疑地从实验上证实了光具有粒子性。这种粒子称做"光量子",简称"光子"。随后就建立了一套光的量子理论。关于这方面的基本知识,将在本《大学物理学》第五册《量子物理》中介绍。

本书第1,2章在牛顿力学的基础上介绍了机械振动与机械波的规律。这些虽然属于机械运动的范畴,但其中的许多概念和规律,例如关于振动与波的运动学描述和叠加等概念对电磁波(包括光波),甚至物质波,都是具有普遍意义的。读者应注意把这两章学好,以便更容易而深刻地理解后面的波动光学的内容。

第1章 振　　动

物体在一定位置附近所作的来回往复的运动叫机械振动，它是物体的一种运动形式。从日常生活到生产技术以及自然界中到处都存在着振动。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，就是晶体中的原子也都在不停地振动着。

广义地说，任何一个物理量随时间的周期性变化都可以叫做振动。例如，电路中的电流、电压，电磁场中的电场强度和磁场强度也都可能随时间作周期性变化。这种变化也可以称为振动——电磁振动或电磁振荡。这种振动虽然和机械振动有本质的不同，但它们随时间变化的情况以及许多其它性质在形式上都遵从相同的规律。因此研究机械振动的规律有助于了解其它种振动的规律，本章着重研究机械振动的规律。

振动有简单和复杂之别。最简单的是简谐运动，它也是最基本的振动，因为一切复杂的振动都可以认为是由许多简谐运动合成的。本章先介绍简谐运动及其数学表达式和无阻尼情况下的动力学方程，然后介绍阻尼振动和受迫振动，最后说明振动合成的规律。

1.1 简谐运动的描述

物体运动时，如果离开平衡位置的位移（或角位移）按余弦函数（或正弦函数）的规律随时间变化，这种运动就叫**简谐运动**。

简谐运动可以用一个弹簧振子来演示。一个轻质弹簧的一端

固定，另一端固结一个可以自由运动的物体，就构成一个**弹簧振子**。图1.1就画了一个在水平光滑面上安置的一个弹簧振子。在弹簧处于自然长度时，物体处于平衡位置。此位置以O表示，并取作坐标原点。如果拉动物体然后释放，则物体将在O点两侧作往复运动。在这种运动中，物体**对于平衡位置的位移**（以下将简称位移）x **将按余弦的规律随时间** t **变化**，因此，物体的这种振动就是**简谐运动**。它的数学表达式是

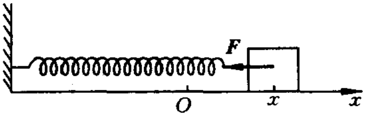

图1.1 弹簧振子的简谐运动

$$x = A\cos(\omega t + \varphi) \tag{1.1}$$

将物体视为质点，(1.1)式中的A表示质点可能离开原点的最大距离，它给出了质点运动的范围。这个量叫做振动的**振幅**。

(1.1)式中的ω叫**角频率**，φ叫**初相**。它们的意义说明如下。

(1.1)式的余弦函数表明质点的位置变化具有时间上的周期性。以T表示**周期**，即振动往复一次所经历的时间，则应有

$$\begin{aligned} x &= A\cos(\omega t + \varphi) = A\cos[\omega(t+T) + \varphi] \\ &= A\cos[\omega t + \varphi + \omega T] \end{aligned}$$

由于余弦函数的周期是2π，所以有

$$\omega T = 2\pi$$

因此

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \tag{1.2}$$

以ν表示振动的**频率**，即单位时间内振动往复的次数，则它显然和周期T有倒数的关系，即

$$\nu = \frac{1}{T} \tag{1.3}$$

将(1.2)式的T值代入，则有

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi} \tag{1.4}$$

由于 ω 和 ν 成正比，所以把它叫做振动的角频率。ω，T 或 ν 都表示简谐运动的周期性。

在国际单位制中，T 的单位是 s，ν 的单位是 Hz（或 s^{-1}），ω 的单位是 rad/s（或 s^{-1}）。

在 A 和 ω 已知的条件下，(1.1)式中的 φ（是一个角度）就给出，或者说，决定于质点在时刻 $t=0$（时间原点）时的位置。一个简谐运动的物理特征在于其振幅和周期。对于一个振幅和周期已定的简谐运动，用数学公式表示时，由于选作原点的时刻不同，φ 值就不同。例如，选物体到达正向极大位移的时刻为时间原点，则(1.1)式中的 $\varphi=0$；如果选物体到达负向极大位移的时刻为时间原点，则(1.1)式中的 $\varphi=\pi$。由于 φ 是由对时间原点的选择所决定的，所以把它叫做振动的初相。

对于一个简谐运动，如果 A，ω 和 φ 都知道了，就可以写出它的完整的表达式，也就是全部掌握该简谐运动的特征了。因此，这三个量叫做描述简谐运动的**三个特征量**。

由位置函数(1.1)式，可求得任意时刻质点的速度和加速度的表示式分别如下：

$$v=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=-\omega A\sin(\omega t+\varphi)$$

$$=\omega A\cos\left(\omega t+\varphi+\frac{\pi}{2}\right) \tag{1.5}$$

$$a=\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}=-\omega^2A\cos(\omega t+\varphi)$$

$$=\omega^2A\cos(\omega t+\varphi+\pi) \tag{1.6}$$

比较(1.1)式和(1.6)式可得

$$a=\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}=-\omega^2x \tag{1.7}$$

这一关系式说明，**简谐运动的加速度和位移成正比而反向。**

(1.1)，(1.5)，(1.6)式的函数关系可用图 1.2 所示的曲线表示，其中表示 x-t 关系的一条曲线叫做振动曲线。

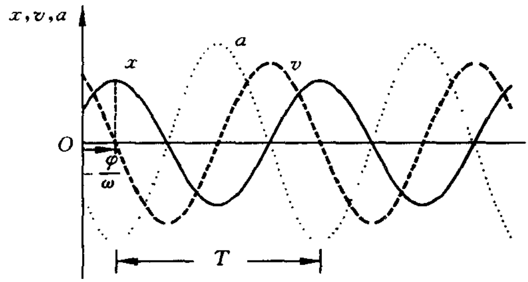

图 1.2 简谐运动的 x,v,a 随时间变化的关系曲线

1.2 旋转矢量与振动的相

简谐运动和匀速圆周运动有一个很简单的关系。如图 1.3 所示，设一质点沿圆心在 O 点而半径为 A 的圆周作匀速运动，其角速度为 ω。以圆心 O 为原点。设质点的径矢经过与 x 轴夹角为 φ 的位置时开始计时，则在任意时刻 t，此径矢与 x 轴的夹角为 $(\omega t+\varphi)$，而质点在 x 轴上的投影的坐标为

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

这正与(1.1)式所表示的简谐运动定义公式相同。由此可知，作匀速圆周运动的质点在某一直径(取作 x 轴)上的投影的运动就是简谐运动。圆周运动的角速度(或周期)就等于振动的角频率(或周期)，圆周的半径就等于振动的振幅。初始时刻作圆周运动的质点的径矢与 x 轴的夹角就是振动的初相。

不但可以借助于匀速圆周运动来表示简谐运动的位置变化，也可以从它求出简谐运动的速度和加速度。由于作匀速圆周运动的质点的速率是 $v_{m}=\omega A$，在时刻 t 它在 x 轴上的投影是 $v=-v_{m}\sin(\omega t+\varphi)=-\omega A\sin(\omega t+\varphi)$。这正是(1.5)式给出的简谐运动的速度公式。作匀速圆周运动的质点的向心加速度是 $a_{n}=\omega^{2}A$。

在时刻 t 它在 x 轴上的投影是 $a=-a_n\cos(\omega t+\varphi)=-\omega^2 A\cos(\omega t+\varphi)$，这正是(1.6)式给出的简谐运动的加速度公式。

正是由于匀速圆周运动与简谐运动的上述关系，所以常常借助于匀速圆周运动来研究简谐运动，那个对应的圆周叫**参考圆**。

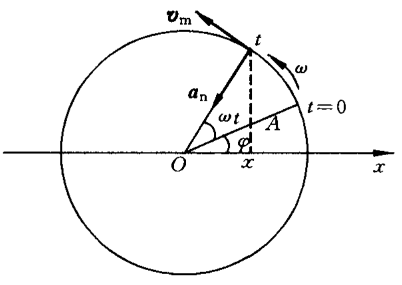

图 1.3　匀速圆周运动与简谐运动

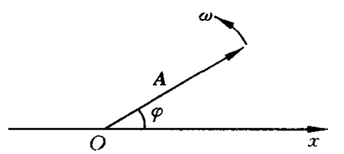

图 1.4　相量图

如果画一个图表示出作匀速圆周运动的质点的初始径矢的位置，并标以 ω(图 1.4)，则相应的简谐运动的三个特征量都表示出来了，因此可以用这样一个图表示一个确定的简谐运动。简谐运动的这种表示法叫做**相量图法**，长度等于振幅的旋转矢量就叫**振幅矢量**。

在简谐运动定义公式(1.1)中的$(\omega t+\varphi)$叫做在时刻 t 振动的**相**(或相位)。在相量图中，它还有一个直观的几何意义，即在时刻 t 振幅矢量和 x 轴的夹角。无论从(1.1)式本身，或者借助于相量图(图 1.4)，都可以知道，对于一个确定的简谐运动来说，一定的相就对应于振动质点一定时刻的运动状态，即一定时刻的位置和速度。因此，在说明简谐运动时，常不分别地指出位置和速度，而直接用相表示质点的某一运动状态。例如，当用余弦函数表示简谐运动时，$\omega t+\varphi=0$，即相为零的状态，表示质点在正位移极大处而速度为零；$\omega t+\varphi=\pi/2$，即相为 $\pi/2$ 的状态，表示质点正越过原点并

以最大速率向 x 轴负向运动；$\omega t+\varphi=(3/2)\pi$ 的状态表示质点也正越过原点但是以最大速率向 x 轴正向运动；等等。因此，相是说明简谐运动时常用到的一个概念。

在初始时刻即 $t=0$ 时，相为 φ，因此，φ 叫做初相。

相的概念在比较两个同频率的简谐运动的步调时特别有用。设有下列两个简谐运动：

$$x_1 = A_1\cos(\omega t + \varphi_1)$$

$$x_2 = A_2\cos(\omega t + \varphi_2)$$

它们的**相差**为

$$\Delta\varphi = (\omega t + \varphi_2) - (\omega t + \varphi_1) = \varphi_2 - \varphi_1 \tag{1.8}$$

即它们在任意时刻的相差都等于其初相差而与时间无关。由这个相差的值就可以知道它们的步调是否相同。

如果 $\Delta\varphi=0$（或者 2π 的整数倍），两振动质点将同时到达各自的同方向的极端位置，并且同时越过原点而且向同方向运动，它们的步调相同。这种情况我们说二者**同相**。

如果 $\Delta\varphi=\pi$（或者 π 的奇数倍），两振动质点将同时到达各自的相反方向的极端位置，并且同时越过原点但向相反方向运动，它们的步调相反。这种情况我们说二者**反相**。

当 $\Delta\varphi$ 为其它值时，我们一般地说二者**不同相**。当 $\Delta\varphi=\varphi_2-\varphi_1>0$ 时，x_2 将先于 x_1 到达各自的同方向极大值，我们说 x_2 振动超前 x_1 振动 $\Delta\varphi$，或者说 x_1 振动落后于 x_2 振动 $\Delta\varphi$。当 $\Delta\varphi<0$ 时，我们说 x_1 振动超前 x_2 振动 $|\Delta\varphi|$。在这种说法中，由于相差的周期是 2π，所以我们把 $|\Delta\varphi|$ 的值限在 π 以内。例如，当 $\Delta\varphi=(3/2)\pi$ 时，我们常不说 x_2 振动超前 x_1 振动 $(3/2)\pi$，而改写成 $\Delta\varphi=(3/2)\pi-2\pi=-\pi/2$，且说 x_2 振动落后于 x_1 振动 $\pi/2$，或说 x_1 振动超前 x_2 振动 $\pi/2$。

相不但用来表示两个相同的作简谐运动的物理量的步调，而且可以用来表示不同的物理量变化的步调。例如在图 1.2 中加速

度 a 和位移 x 反相，速度 v 超前位移 $\pi/2$，而落后于加速度 $\pi/2$。

例 1.1 一质点沿 x 轴作简谐运动，振幅 $A=0.12\text{m}$，周期 $T=2\text{s}$，当 $t=0$ 时，质点对平衡位置的位移 $x_0=0.06\text{m}$，此时刻质点向 x 正向运动。求：

(1) 此简谐运动的表达式；

(2) $t=T/4$ 时，质点的位置、速度、加速度；

(3) 从初始时刻开始第一次通过平衡位置的时刻。

解 (1) 取平衡位置为坐标原点。设位移表达式为

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

其 $\omega=2\pi/T=\pi\text{s}^{-1}$，$A$ 也已知，只需求 φ。由初始条件 $t=0$ 时，$x_0=0.06\text{m}$ 可得

$$\cos\varphi = \frac{x_0}{A} = \frac{0.06}{0.12} = \frac{1}{2}$$

在 $-\pi$ 到 π 之间取值，得

$$\varphi = \pm\frac{\pi}{3}$$

这两个值中取哪个，要看初始速度条件。由于

$$v = -\omega A\sin(\omega t + \varphi)$$

所以

$$v_0 = -\omega A\sin\varphi$$

由于 $t=0$ 时质点向正 x 方向运动，所以 $v_0>0$，应取

$$\varphi = -\frac{\pi}{3}$$

于是此简谐运动的表达式为①

$$x = 0.12\cos\left(\pi t - \frac{\pi}{3}\right)$$

利用相量图求解是很直观方便的。根据初始条件就可画出如图 1.5 所示的振幅矢量的初始位置，从而得出 $\varphi=-\pi/3$。

(2) 此简谐运动的速度为

$$v = -\omega A\sin(\omega t + \varphi)$$

$$= -0.12\pi\sin\left(\pi t - \frac{\pi}{3}\right)$$

① 本书表达式中各量用数值表示时，除特别指明外，均用国际单位制单位。

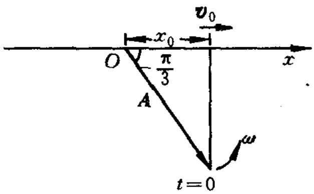

图 1.5　例 1.1(1)用图

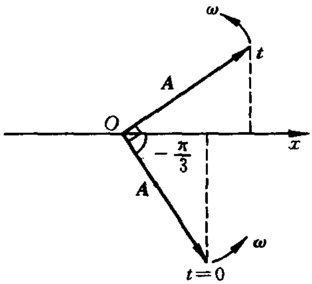

图 1.6　例 1.1(2)用图

加速度为

$$a=-\omega^2 A\cos(\omega t+\varphi)$$
$$=-0.12\pi^2\cos\left(\pi t-\frac{\pi}{3}\right)$$

将 $t=T/4=0.5\text{s}$ 代入上面两式以及位移表达式可分别得质点在 $t=0.5\text{s}$ 时的位置为

$$x=0.104\text{m}$$

速度为

$$v=-0.188\text{m/s}$$

加速度为

$$a=-1.03\text{m/s}^2$$

此时刻振幅矢量的位置如图 1.6 所示，上述各量正负值的意义是一目了然的。

(3) 通过平衡位置时，$x=0$，由位移表达式可得

$$0=0.12\cos\left(\omega t-\frac{\pi}{3}\right)$$

由此可得

$$\omega t-\frac{\pi}{3}=(2k-1)\frac{\pi}{2},\qquad k=1,2,\cdots$$

即
$$t=\frac{k\pi-\frac{\pi}{6}}{\omega}$$

由于是第一次通过，应取 $k=1$，又由于 $\omega=\pi s^{-1}$，所以

$$t=\frac{5}{6}=0.83\ (\mathrm{s})$$

由相量图(图 1.7)可知从起始时刻到第一次质点通过原点，振幅矢量转过的角度为

$$\varphi+\frac{\pi}{2}=\frac{\pi}{3}+\frac{\pi}{2}=\frac{5\pi}{6}$$

由于转动角速度是 ω，所以也可以得到

$$t=\frac{5\pi/6}{\omega}=0.83\ (\mathrm{s})$$

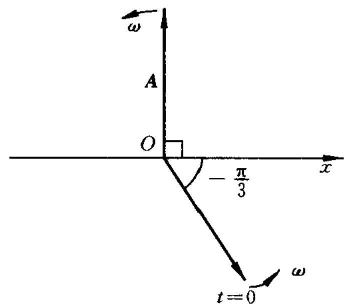

图 1.7 例 1.1(3)用图

1.3 简谐运动的动力学方程

作简谐运动的质点，它的加速度和对于平衡位置的位移有(1.7)式所示的关系：

$$a=\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}=-\omega^2x$$

根据牛顿第二定律，质量为 m 的质点沿 x 方向作简谐运动，沿此方向所受的合外力就应该是

$$F=m\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}=-m\omega^2x$$

由于对同一个简谐运动，m，ω 都是常量，所以可以说：**一个作简谐运动的质点所受的沿位移方向的合外力与它对于平衡位置的位移成正比而反向**。这样的力称为**恢复力**。

反过来，如果一个质点沿 x 方向运动，它受到的合外力与它对于平衡位置的位移成正比而反向，即

$$F=-kx \tag{1.9}$$

则由牛顿第二定律，可得

$$m\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}=-kx \tag{1.10}$$