面向21世纪课程教材

Textbook Series for 21st Century

物理学

下册 第四版

东南大学等七所工科院校 编

马文蔚 解希顺 谈漱梅 柯景凤 改编

高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS

(京)112 号

图书在版编目(CIP)数据

物理学　下册/东南大学等七所工科院校编；马文蔚等改编. －北京：高等教育出版社，1999
面向 21 世纪课程教材
ISBN 7－04－007465－6

Ⅰ. 物… Ⅱ. ①东… ②马… Ⅲ. 物理学－高等学校－教材 Ⅳ. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 37190 号

物理学　下册　第四版
东南大学等七所工科院校　编
马文蔚　解希顺　谈漱梅　柯景凤　改编

出版发行　高等教育出版社
社　　址　北京市东城区沙滩后街 55 号　　邮政编码　100009
电　　话　010－64054588　　传　　真　010－64014048
网　　址　http://www.hep.edu.cn

经　　销　新华书店北京发行所
排　　版　高等教育出版社照排中心
印　　刷　北京外文印刷厂
纸张供应　山东高唐纸业集团总公司

开　　本　787×960　1/16　　版　　次　1978 年 6 月第 1 版
　　　　　　　　　　　　　　　　　　　1999 年 11 月第 4 版
印　　张　23.25　　印　　次　1999 年 11 月第 1 次印刷
字　　数　430 000　　定　　价　22.10 元

内 容 简 介

本书是教育部"高等教育面向21世纪教学内容和课程体系改革计划"的研究成果，是面向21世纪课程教材、普通高等教育"九五"国家级重点教材和教育部高等学校工科物理课程教学指导委员会"九五"规划教材.本书是在原第三版的基础上修订而成的，在修订过程中注意保持了原书体系结构合理、深广度适当、注意教法、分量适中、适应面宽等特点，同时吸取了近年来国内外出版的物理教材的优点，以现代的观点来处理经典物理的体系结构及其内容选取，精选并加强近代物理部分的内容，适当介绍当代物理的成就以及对工程技术的深远影响。全书共分三册，上册包括力学和热物理学；中册包括电磁学；下册包括波动过程、近代物理学和物理学与新技术等内容.

本书可作为高等学校工科各专业的教科书，也可供文理科有关专业选用和社会读者阅读.

波动过程和近代物理的量和单位

量		单位		换算关系
名称	符号	名称	符号	
周　期	T	秒	s	
频　率	$f(\nu)$	赫兹	Hz	
角频率	ω	弧度每秒	$rad\cdot s^{-1}$	$\omega=2\pi\nu$
波　长	λ	米	m	
角波数	k	每米	m^{-1}	$k=\frac{2\pi}{\lambda}$
光　速	c	米每秒	$m\cdot s^{-1}$	
振动位移	x, y	米	m	
振动速度	v	米每秒	$m\cdot s^{-1}$	
声　强	I	瓦特每平方米	$W\cdot m^{-2}$	
辐射强度	I	瓦特每平方米	$W\cdot m^{-2}$	
辐射能密度	$w(u)$	焦耳每立方米	$J\cdot m^{-3}$	
原子序数	Z			N、A、Z 无量纲，
中子数	N			$A=N+Z$
核子数	A			
电子静质量	m_e	千克	kg	
质子静质量	m_p	千克	kg	
中子静质量	m_n	千克	kg	
元电荷	e	库仑	C	
普朗克常量	h	焦耳秒	$J\cdot s$	
玻尔半径	r_1	米	m	
里德伯常量	R	每米	m^{-1}	
轨道角动量量子数	l			$l=0,1,2,\cdots,(n-1)$
自旋角动量磁量子数	m_s			$m_s=\pm\frac{1}{2}$
主量子数	n			$n=1,2,\cdots$
轨道角动量磁量子数	m_l			$m_l=0,\pm1,\pm2,\cdots,\pm l$
波函数	ψ			

目　　录

第十四章　机械振动

振动是物质的一种很普遍的运动形式．所谓机械振动，是指物体在一定位置附近所作的周期性往复运动．例如心脏的跳动、钟摆的摆动、活塞的往复运动、固体中原子的振动等，都是机械振动．除机械振动外，自然界中还存在着各种各样的振动．广义地说，凡描述物质运动状态的物理量，在某一数值附近作周期性的变化，都叫做振动．例如，交流电路中的电流在某一电流值附近作周期性的变化；光波、无线电波传播时，空间某点的电场强度和磁场强度随时间作周期性的变化等．这些振动虽然在本质上和机械振动不同，但对它们的描述却有着许多共同之处，所以，机械振动的基本规律也是研究其他振动以及波动、波动光学、无线电技术等的基础，在生产技术中有着广泛的应用．

本章主要研究简谐运动，并简要介绍阻尼振动、受迫振动和共振现象等．

14－1　简谐运动

振动的形式是多种多样的，情况大多比较复杂．简谐运动是最简单、最基本的振动．下面以弹簧振子为例，研究简谐运动的运动规律．

如图 14－1 所示，把轻弹簧（质量可以忽略不计）的左端固定，右端连一质量为 m 的物体，放置在光滑的水平面上．物体所受的阻力略去不计．当物体在位置 O 时，弹簧具有自然长度[图 14－1(a)]，此时物体在水平方向所受的合外力为零，位置 O 叫做平衡位置．取平衡位置 O 为坐标原点，水平向右为 Ox 轴的正方向．现将物体向右移到位置 B[图 14－1(b)]．此时，由于弹簧被拉长而使物体受到一个指向平衡位置的弹性力．撤去外力后，物体将会在弹性力的作用下向左运动，当抵达平衡位置时，物体所受的弹性力减小到零，但物体的惯性会使它继续向左运动，致使弹簧被压缩，因弹簧被压缩而出现的弹性力将阻碍物体的运动，使物体的运动速度减小，到达点 C 时，速度减小到零[图 14－1(c)]，此时物体又将在弹性力的作用下，从 C 点返回，向右运动．这样，在弹性力作用下，物体将在平衡位置附近作往复运动，这一包含弹簧和物体的振动系统就叫做弹簧振子．

由胡克定律可知，物体所受到的弹性力 F，与物体相对于平衡位置的位移 x 成正比，弹性力的方向与位移的方向相反，始终指向平衡位置，故此力常称为回复力．于是有

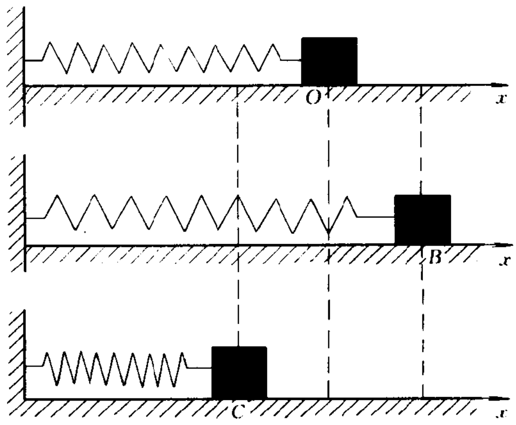

图 14-1 弹簧振子的振动

$$F = -kx$$

式中比例常数 k 为弹簧的劲度系数,它由弹簧本身的性质(材料、形状、大小等)所决定,负号表示力与位移的方向相反.根据牛顿第二定律,物体的加速度为

$$a = \frac{F}{m} = -\frac{k}{m}x \tag{14-1}$$

对于一个给定的弹簧振子,k 与 m 都是常量,而且都是正值,它们的比值可用另一个常量 ω 的二次方表示,即

$$\frac{k}{m} = \omega^2 \tag{14-2}$$

这样式(14-1)可写成

$$a = -\omega^2 x \tag{14-3}$$

上式说明,弹簧振子的加速度 a 与位移的大小 x 成正比,而方向相反.人们把具有这种特征的振动叫做简谐运动.

由于 $a = \frac{d^2x}{dt^2}$,式(14-3)可写成

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 x \tag{14-4}$$

这就是简谐运动的运动微分方程,其解为

$$x = A\cos(\omega t + \varphi) \tag{14-5}$$

它是简谐运动的运动方程①,简称简谐运动方程.式中 A 和 φ 是积分常量,它们

① 简谐运动的运动方程也称简谐振动方程.

的物理意义将在第 14－2 节中讨论. 由上式可知,当物体作简谐运动时,其位移是时间的余弦函数①. 这也就是为什么把运动方程具有式(14－3)～(14－5)形式的振动叫做简谐运动的原因.

将式(14－5)对时间求一阶、二阶导数,可分别得到简谐运动物体的速度 v 和加速度 a 为

$$v=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=-\omega A\sin(\omega t+\varphi) \tag{14-6}$$

$$a=\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}=-\omega^2A\cos(\omega t+\varphi) \tag{14-7}$$

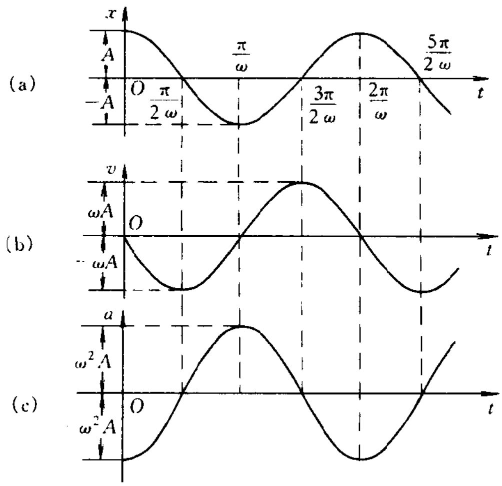

图 14－2　简谐运动图解($\varphi=0$)

由式(14－5)、(14－6)、(14－7),可作出如图 14－2 所示的 $x-t$、$v-t$ 和 $a-t$图. 由图可以看出,物体作简谐运动时,它的位移、速度和加速度都是周期性变化的.

14－2　简谐运动中的振幅　周期　频率和相位

现在我们来讨论式(14－5)中描述简谐运动特征的物理量 A、ω、$(\omega t+\varphi)$

---

① 因为 $\cos(\omega t+\varphi)=\sin(\omega t+\varphi+\pi/2)$,若令 $\varphi'=\varphi+\pi/2$,则式(14－5)可写成

$$x=A\sin(\omega t+\varphi')$$

所以也可以说,物体作简谐运动时,位移是时间的正弦函数. 余弦和正弦函数都是简谐函数,但为统一起见,本书采用余弦函数.

及其相关概念:振幅、周期(频率、角频率)和相位(初相位),其中相位的概念尤为重要.

一 振幅

在简谐运动方程 $x=A\cos(\omega t+\varphi)$ 中,因 $\cos(\omega t+\varphi)$ 的值在 $+1$ 和 -1 之间,所以物体的位移亦在 $+A$ 和 $-A$ 之间,我们把简谐运动物体离开平衡位置最大位移的绝对值 A,称做振幅.

二 周期

物体作一次完全振动所经历的时间叫做振动的周期,用 T 表示,周期的单位为 s. 例如在图 14-1 中,物体自位置 B 经 O 到达 C,然后再回到 B,所经历的时间就是一个周期. 所以物体在任意时刻 t 的位移和速度,应与物体在时刻 $t+T$ 的位移和速度完全相同,于是有

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

由于余弦函数的周期性,物体作一次完全振动后应有 $\omega T=2\pi$. 于是,可得

$$T=\frac{2\pi}{\omega} \tag{14-8}$$

对于弹簧振子,$\omega=\sqrt{\frac{k}{m}}$,所以弹簧振子的周期为

$$T=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \tag{14-9}$$

单位时间内物体所作的完全振动的次数叫做频率,用 ν 表示,它的单位名称是赫兹,符号是 Hz. 显然,频率与周期的关系为

$$\nu=\frac{1}{T}=\frac{\omega}{2\pi} \tag{14-10}$$

由此还可知

$$\omega=2\pi\nu \tag{14-11}$$

即 ω 等于物体在单位时间内所作的完全振动次数的 2π 倍,叫做角频率(又称圆频率),单位是 $\mathrm{rad\cdot s^{-1}}$(弧度每秒). 至于弹簧振子的频率,不难得知为

$$\nu=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \tag{14-12}$$

由于弹簧振子的角频率 $\omega=\sqrt{\frac{k}{m}}$ 是由弹簧振子的质量 m 和劲度系数 k 所决定的,所以周期和频率只和振动系统本身的物理性质有关. 这种只由振动系统本身的固有属性所决定的周期和频率,叫做振动的固有周期和固有频率.

三 相位

力学中,物体在某一时刻的运动状态,可用位矢和速度来描述,下面可以看

到，对振幅和角频率都已给定的简谐运动，它的运动状态可用“相位”这一物理量来决定．由式(14－5)和式(14－6)可看出，当振幅 A 和角频率 ω 一定时，振动物体在任一时刻相对平衡位置的位移和速度都决定于物理量$(\omega t+\varphi)$．也就是说，$(\omega t+\varphi)$既决定了振动物体在任意时刻相对平衡位置的位移，也决定了它在该时刻的速度．量值$(\omega t+\varphi)$叫做振动的相位，它是决定简谐运动物体运动状态的物理量．例如图 14－1 中的弹簧振子，当相位$(\omega t_1+\varphi)=\frac{\pi}{2}$时，$x=0$，$v=-\omega A$，即在 t_1 时刻物体在平衡位置，并以速率 ωA 向左运动；而当相位$(\omega t_2+\varphi)=\frac{3}{2}\pi$时，$x=0$，$v=\omega A$，即在 t_2 时刻物体也在平衡位置，但以速率 ωA 向右运动．可见，在 t_1 和 t_2 两时刻，由于振动的相位不同，物体的运动状态也不相同．此外，当振动物体的相位经历了 2π 的变化，亦即相位由$(\omega t+\varphi)$变为$[\omega(t+T)+\varphi]$，振动经历了一个周期时，物体恢复到原来的运动状态．由此可见，用相位描述物体的运动状态，还能充分体现出简谐运动的周期性．

当 $t=0$ 时，相位$(\omega t+\varphi)=\varphi$，故 φ 叫做初相位，简称初相．它是决定初始时刻(即开始计时的起点)振动物体运动状态的物理量．例如，若 $\varphi=0$，则在 $t=0$ 时，由式(14－5)和式(14－6)可分别得出 $x_0=A$ 及 $v_0=0$，这表示我们所选的计时起点，是物体位于正最大位移处，且速率为零的这一时刻．

四 常数 A 和 φ 的确定

如前所述，简谐运动方程 $x=A\cos(\omega t+\varphi)$中的角频率 ω 是由振动系统本身的性质所决定的．那么，现在来说明在角频率已经确定的条件下，如果知道了 $t=0$ 时物体相对平衡位置的位移 x_0 和速度 v_0，就可确定出振动的振幅 A 和初相 φ．由式(14－5)和(14－6)可得

$$x_0=A\cos\varphi$$

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

而由此两式可得 A、φ 的解为

$$A=\sqrt{x_0^2+\frac{v_0^2}{\omega^2}} \tag{14-13}$$

$$\mathrm{tg}\,\varphi=\frac{-v_0}{\omega x_0} \tag{14-14}$$

其中 φ 所在象限可由 x_0 及 v_0 的正负号确定．

物体在 $t=0$ 时的位移 x_0 和速度 v_0 叫做初始条件．上述结果说明，对一定的弹簧振子(即 ω 为已知量)，它的振幅 A 和初相 φ 是由初始条件决定的．

总之，对于给定的振动系统，周期(或频率)由振动系统本身的性质决定，而

振幅和初相则由初始条件决定.

14－3 旋转矢量

本节介绍简谐运动的旋转矢量表示法.如图 14－3 所示,自 Ox 轴的原点 O

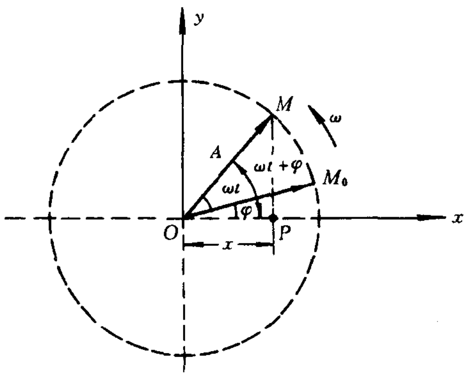

图 14－3 旋转矢量图

作一矢量 $\boldsymbol{A}$,使它的模等于振动的振幅 A,并使矢量 $\boldsymbol{A}$ 在 Oxy 平面内绕点 O 作逆时针方向的匀角速转动,其角速度与振动的角频率 ω 相等,这个矢量就叫做**旋转矢量**.设在 $t=0$ 时,矢量 $\boldsymbol{A}$ 的矢端在位置 M_0,它与 Ox 轴的夹角为 φ;在 t 时刻,矢量 $\boldsymbol{A}$ 的矢端在位置 M.在这过程中,矢量 $\boldsymbol{A}$ 沿逆时针方向转过了角度 ωt,它与 Ox 轴间的夹角为 $\omega t+\varphi$.由图可见,矢量 $\boldsymbol{A}$ 在 Ox 轴上的投影为 $x=A\cos(\omega t+\varphi)$①.与式(14－5)比较,它恰是沿 Ox 轴作简谐运动的物体在 t 时刻相对于原点 O 的位移.因此,旋转矢量 $\boldsymbol{A}$ 的矢端 M 在 Ox 轴上的投影点 P 的运动,可表示物体在 Ox 轴上的简谐运动.矢量 $\boldsymbol{A}$ 以角速度 ω 旋转一周,相当于物体在 x 轴上作一次完全振动.

在旋转矢量图上,不仅可以确定作简谐运动的物体的位移 x,而且也能确定它的速度 v 和加速度 a.由于作匀速圆周运动的物体的速率是 $v_{\mathrm{m}}=\omega A$,在 t 时刻,它在 Ox 轴上的投影是 $v=v_{\mathrm{m}}\cos\left(\omega t+\varphi+\dfrac{\pi}{2}\right)=-\omega A\sin(\omega t+\varphi)$,这正是式(14－6)给出的物体作简谐运动的速度公式.作匀速圆周运动的物体的向心加速度是 $a_{\mathrm{n}}=\omega^2 A$,在 t 时刻,它在 Ox 轴上的投影是 $a=a_{\mathrm{n}}\cos(\omega t+\varphi+\pi)=-\omega^2 A\cos(\omega t+\varphi)$,这正是

① 矢量 $\boldsymbol{A}$ 既可以在 Ox 轴上投影 $x=A\cos(\omega t+\varphi)$,也可以在 Oy 轴上投影 $y=A\sin(\omega t+\varphi)$,本书采用在 Ox 轴上的投影.