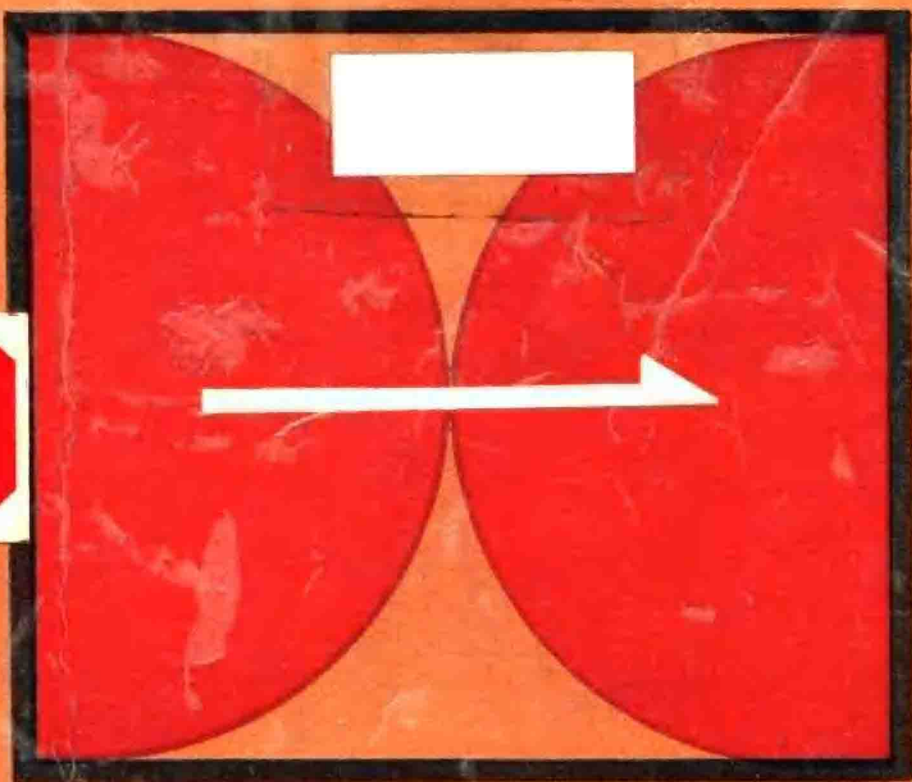
高等学校教材

物理学

（下册） ·第三版·

东南大学等七所工科院校 编 马文蔚 柯景凤 改编



高等教育出版社

高等学校教材

物理学

下册

（第三版）

东南大学等七所工科院校　编

马文蔚　柯景凤　改编

高等教育出版社

（京）112号

内 容 提 要

本书是在东南大学(原南京工学院)等七所工科院校编，马文蔚、柯景凤改编《物理学》(第二版)的基础上修订的。修订时参照了国家教委于1987年颁布的《高等工业学校大学物理课程教学基本要求》。本书下册修改时注意保持第二版精选内容、注意教法、份量适中、适应面宽等特点，对机械振动、机械波等章节在文字上作了较大修改，使表述更加精练；对于机械波的产生和传播、反射与折射等内容，注意了与中学物理之间的衔接；调整了一些章节的次序，如把波粒二象性和德布罗意波移到波函数之前；改写了部分内容，如同时性的相对性、相对论性动量、粒子数反转等；以小字形式增加了多光束干涉、超导电性等选学内容；适当增加一些联系实际的问题等。全书采用国际单位制，物理名词以全国自然科学名词审定委员会公布的物理学名词为准进行了校核，书末有汉英物理学名词索引。

本书仍分三册，上册为力学、气体动理论和热力学基础，中册为电磁学，下册为波动过程和近代物理基础。本书可供讲课时数为130学时左右的一般工科专业大学物理教材，也可供理科非物理专业的普通物理教材。

责任编辑：奚静平

高等学校教材

物 理 学

下 册

(第三版)

东南大学等七所工科院校 编

马文蔚 柯景凤 改编

*

高等教育出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

文字六〇三厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 12 字数 290 000

1978年6月第1版 1993年5月第3版 1993年5月第1次印刷

印数 0 001—67 885

ISBN7-04-004161-8/O·1204

定价 4.55 元

波动过程和近代物理的物理量名称符号和单位

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	$\omega=2\pi\nu$
波　长	λ	米	m	
波　数	k	每米	m^{-1}	$k=\frac{1}{\lambda}$
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	瓦每平方米	$W\cdot m^{-2}$	
辐射强度	I	瓦每平方米	$W\cdot m^{-2}$	
辐射能密度	$w(u)$	焦每立方米	$J\cdot m^{-3}$	
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	
基元电荷	e	库仑	C	
普朗克常量	h	焦耳秒	$J\cdot s$	
玻尔半径	r_0	米	m	
里德伯常量	R	每米	m^{-1}	
角量子数	l			$l=0,1,2,\cdots,(n-1)$
自旋磁量子数	m_s			$m_s=\pm\frac{1}{2}$
主量子数	n			$n=1,2,\cdots$
磁量子数	m_l			$m_l=0,\pm1,\pm2,\cdots,\pm l$
波函数	ψ			

目　录

第十五章　机械振动……1
15-1　谐振动……1
15-2　谐振动中的振幅　周期　频率和相位……4
15-3　旋转矢量……10
15-4　单摆和复摆……13
15-5　谐振动的能量……16
15-6　谐振动的合成……19
15-7　阻尼振动　受迫振动　共振……32
问题……41
习题……44
第十六章　机械波……51
16-1　机械波的几个概念……51
16-2　简谐波的波动方程　波的能量……57
16-3　惠更斯原理　波的衍射……67
16-4　波的干涉……72
16-5　驻波……77
*16-6　声波　超声波……83
*16-7　多普勒效应……92
问题……97
习题……98
第十七章　电磁振荡和电磁波……103
17-1　电磁振荡……103
17-2　电磁波……108
问题……120
习题……121
第十八章　波动光学……123
18-1　相干光源……124

18-2 杨氏双缝实验 双镜 洛埃镜……133
18-3 光程 薄膜干涉……135
18-4 劈尖 牛顿环……142
18-5 迈克耳孙干涉仪……151
18-6 光的衍射……154
18-7 单缝衍射……157
18-8 圆孔衍射 光学仪器的分辨率……165
18-9 衍射光栅……168
18-10 X射线的衍射……176
18-11 自然光 偏振光……179
18-12 反射光和折射光的偏振……182
18-13 马吕斯定律……185
*18-14 旋光现象……186
18-15 双折射 偏振棱镜……187
*18-16 偏振光的干涉……193
问题……197
习题……201
第十九章 狭义相对论……206
19-1 伽利略变换式 牛顿的绝对时空观……206
19-2 迈克耳孙-莫雷实验……209
19-3 狭义相对论的基本原理……213
19-4 狭义相对论的时空观……219
*19-5 光的多普勒效应……227
19-6 相对论性动量和能量……229
问题……242
习题……243
第二十章 量子物理……246
20-1 黑体辐射 普朗克量子假设……247
20-2 光电效应……261
20-3 康普顿效应……270
20-4 氢原子光谱的规律性……276
20-5 氢原子的玻尔理论……280

20-6　弗兰克-赫兹实验……288
20-7　德布罗意波……291
20-8　不确定关系……300
20-9　量子力学简介……303
*20-10　量子力学处理氢原子问题的简略介绍……314
*20-11　多电子原子中的电子分布……322
*20-12　激光……327
*20-13　半导体……337
*20-14　超导电性……348
问题……354
习题……357
下册习题答案……360
索引……366

第十五章　机 械 振 动

振动是一种很普遍的物质运动形式．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式各样的振动．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是研究其他形式的振动以及波动、波动光学、无线电技术等的基础，在生产技术中也有着广泛的应用．

本章主要研究谐振动，并简要介绍阻尼振动、受迫振动和共振现象等．

15-1　谐 振 动

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

如图 15-1 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15-1a）．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

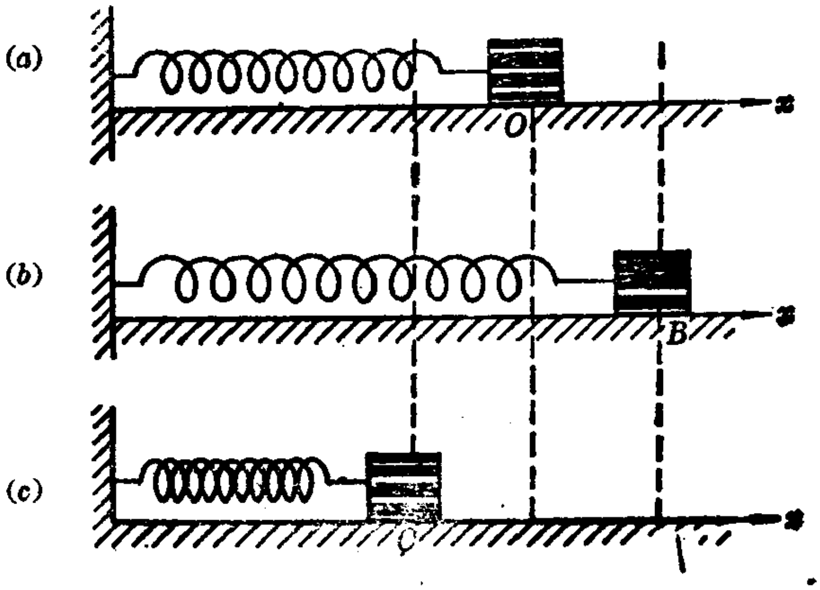


图 15-1 弹簧振子的振动

体略为向右移到位置 B(图 15-1b). 此时，由于弹簧被伸长而出现指向平衡位置的弹性力. 在弹性力的作用下，物体向左运动. 当通过平衡位置时，物体所受的弹性力减小到零，由于物体的惯性，使其继续向左运动，致使弹簧被压缩. 因弹簧被压缩而出现的弹性力将阻止物体向左运动，使物体的运动速度减小，到达点 C 时，速度减小到零(图 15-1c). 物体到达点 C 后又将在弹性力的作用下，向右运动. 这样，物体就将在平衡位置附近作往复运动. 这一振动系统叫做**弹簧振子**.

由胡克定律可知，物体所受的弹性力 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，总是指向平衡位置. 有

$$f=-kx$$

式中比例常数 k 为弹簧的劲度系数①，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

① 劲度系数 (*coefficient of stiffness*) 曾用名倔强系数. 1988 年全国自然科学名词审定委员会公布的物理学名词为劲度系数.

顿第二定律，物体的加速度为

$$a=\frac{f}{m}=-\frac{k}{m}x \tag{15-1}$$

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 的平方表示，即

$$\frac{k}{m}=\omega^2 \tag{15-2}$$

式(15-1)可写成

$$a=-\omega^2 x \tag{15-3}$$

上式说明，弹簧振子的加速度 a 与位移 x 成正比，而方向相反．凡具有这种特征的振动叫做简谐振动，亦称谐振动．

由于 $a=\frac{d^2x}{dt^2}$，式(15-3)可写成

$$\frac{d^2x}{dt^2}=-\omega^2 x \tag{15-4}$$

上式是谐振动的微分方程，其解为

$$x=A\cos(\omega t+\varphi) \tag{15-5}$$

式中 A 和 φ 是积分常量，它们的物理意义将在节 15-2 中讨论．由上式可知，当物体作谐振动时，其位移是时间的余弦函数．所以也把具有这种形式的运动方程的振动叫做谐振动①．

式(15-5)对时间分别求一阶、二阶导数，可分别得谐振动物体的速度 v 和加速度 a 为

$$v=\frac{dx}{dt}=-\omega A\sin(\omega t+\varphi) \tag{15-6}$$

$$a=\frac{d^2x}{dt^2}=-\omega^2 A\cos(\omega t+\varphi) \tag{15-7}$$

---

① 因为 $\cos(\omega t+\omega)=\sin(\omega t+\varphi+\pi/2)$，若令 $\varphi'=\varphi+\pi/2$，则式(15-6)可写成

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

所以也可以说，物体作谐振动时，位移是时间的正弦函数．为确定起见，本书采用余弦函数．

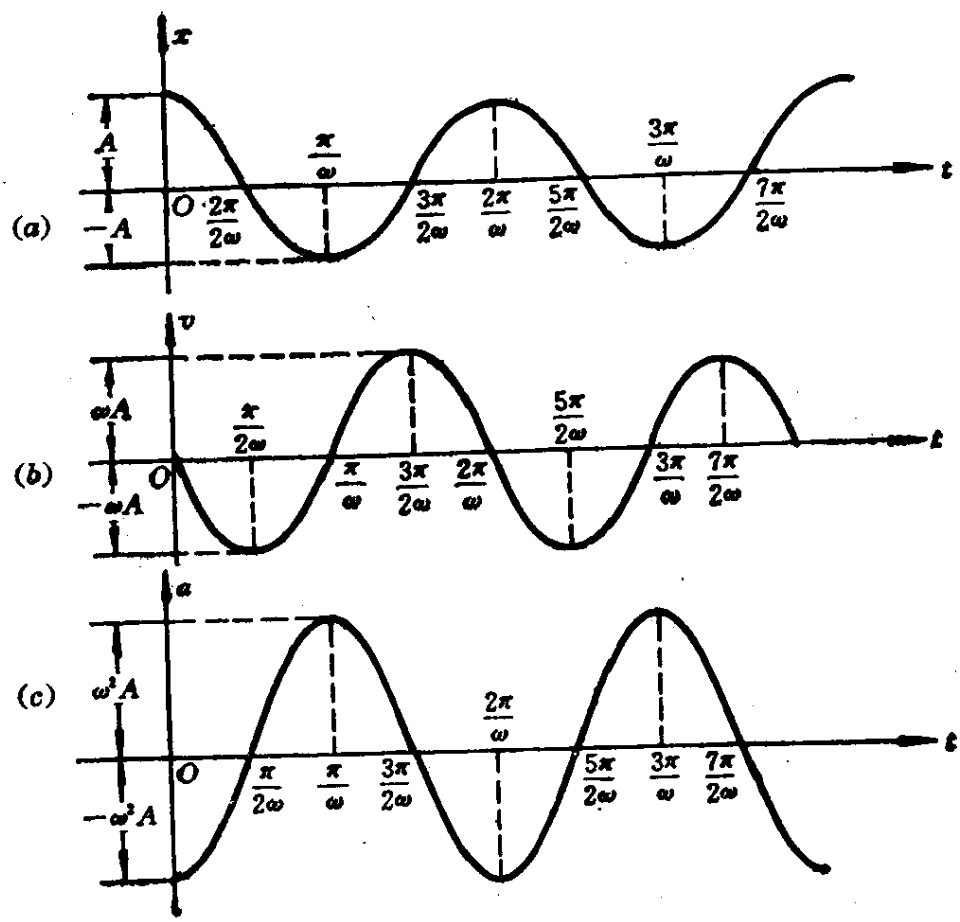


图 15-2　谐振动图解($\varphi=0$)

(a) x-t 图　(b) v-t 图　(c) a-t 图

由式(15-5)、(15-6)、(15-7)，可作出如图 15-2 所示的 x-t、v-t 和 a-t 图. 从图可以看出，物体作谐振动时，它的位移、速度和加速度都是周期性变化的.

15-2　谐振动中的振幅　周期　频率和相位

振幅、周期、频率和相位等都是描述谐振动的物理量. 下面说明这些量的物理意义.

一　振幅

在谐振动方程 $x=A\cos(\omega t+\varphi)$ 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，我们把作**谐振**

动的物体离开平衡位置的最大位移的绝对值 A，叫做振幅.

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，周期的单位为秒. 在图 15-1 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 的坐标和速度，应与物体在时刻 $t+T$ 的坐标和速度完全相同，由于

$$\begin{aligned} x &= A\cos\left[\omega\left(t+\frac{2\pi}{\omega}\right)+\varphi\right] \\ &= A\cos(2\pi+\omega t+\varphi) \\ &= A\cos(\omega t+\varphi) \end{aligned}$$

可见

$$T=\frac{2\pi}{\omega} \tag{15-8}$$

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

$$T=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \tag{15-9}$$

频率和角频率：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，符号是赫(Hz). 显然，频率与周期的关系为

$$\nu=\frac{1}{T}=\frac{\omega}{2\pi} \tag{15-10}$$

或

$$\omega=2\pi\nu \tag{15-11}$$

所以 ω 表示物体在 2π 秒时间内所作的完全振动的次数，叫做角频率(又称圆频率)，单位是弧度·秒$^{-1}$(rad·s^{-1}). 弹簧振子的频率为

$$\nu=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \tag{15-12}$$

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性质有关.这种由振动系统本身的性质所决定的周期和频率叫做固有周期和固有频率.

三　相位和初相

力学中，物体在某一时刻的运动状态，可用坐标和速度来描述. 但对角频率和振幅都已给定的谐振动，它的运动状态可用“相位”这一物理量来表示. 由式(15-5)和式(15-6)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，它是决定谐振动物体运动状态的物理量. 例如图 15-1中的弹簧振子，当相位 $(\omega t_1+\varphi)=\frac{\pi}{2}$ 时，$x=0$，$v=-\omega A$，这时物体在平衡位置，并以速率 ωA 向左运动；而当相位 $(\omega t_2+\varphi)=\frac{3}{2}\pi$ 时，$x=0$，$v=\omega A$，这时物体也在平衡位置，但以速率 ωA 向右运动. 可见，在 t_1 和 t_2 两时刻，谐振动的相位是不同的，它们的运动状态也不相同.

常量 φ 是 $t=0$ 时的相位，叫做初相位，简称初相. 它是决定起始时刻(又叫计时起点)振动物体运动状态的物理量. 例如，若 $\varphi=0$，则在 $t=0$ 时，由式(15-5)和式(15-6)可分别得出 $x_0=A$ 及 $v_0=0$，这表示在计时起点，物体位于距离平衡位置的正最大位移处，速率为零.

四 常数A和φ的确定

如上所述，谐振动方程 $x=A\cos(\omega t+\varphi)$ 中的角频率ω是由振动系统本身的性质所决定的．在角频率已经确定的条件下，如果知道在 $t=0$ 时的物体相对平衡位置的位移 x_0 和速度 v_0，就可确定谐振动的振幅A和初相φ．由式(15-5)和(15-6)可得

$$x_0=A\cos\varphi$$

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

由上两式可得 A、φ 的唯一解为

$$A=\sqrt{x_0^2+\frac{v_0^2}{\omega^2}} \tag{15-13}$$

$$\varphi=\operatorname{arc\,tg}\frac{-v_0}{\omega x_0} \tag{15-14}$$

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．由于谐振动的振幅不随时间而变化，故谐振动是等幅振动．

总之，对于给定的谐振动系统，周期(或频率)由振动系统本身的性质决定，振幅和初相则由初始条件决定．

例1 如图 15-1 所示，一轻弹簧的劲度系数 $k=0.72\ \mathrm{N\cdot m^{-1}}$，今将质量$m$为 20 g 的物体，从平衡位置沿桌面向右拉长到 $x_0=0.04$ m 处释放，试求：(1) 谐振动方程；(2) 物体从初位置运动到第一次经过$\frac{A}{2}$处时的速度．

解 (1) 要确定物体的谐振动方程，需要确定角频率 ω、振幅 A 和初相φ 三个物理量．

角频率 $$\omega=\sqrt{\frac{k}{m}}=\sqrt{\frac{0.72}{0.02}}=6.0\ \mathrm{s^{-1}}$$

振幅和初相由初始条件 x_0 及 v_0 决定，已知 $x_0=0.04$ m，$v_0=0$，由式(15-

13)和式(15-14)得

振幅 $$A=\sqrt{x_0^2+\frac{v_0^2}{\omega_0^2}}=x_0=0.04\ \mathrm{m}$$

初相 $$\varphi=\operatorname{arctg}\frac{-v_0}{\omega x_0}\qquad (据题意,x_0 为正,v_0=0)$$

故 $$\varphi=0$$

将 ω、A 和 φ 代入谐振动方程 $x=A\cos(\omega t+\varphi)$ 中,可得

$$x=0.04\cos(6.0t)\ \mathrm{m}$$

(2) 欲求 $x=\frac{A}{2}$处的速度,需先求出物体从初位置运动到第一次抵达$\frac{A}{2}$处的相位. 由 $x=A\cos(\omega t+\varphi)=A\cos\omega t$,得

$$\omega t=\arccos\frac{x}{A}=\arccos\frac{\frac{A}{2}}{A}=\arccos\frac{1}{2}=\frac{\pi}{3}\left(或\frac{5}{3}\pi\right)$$

按题意,物体由初位置 $x=+A$ 第一次运动到 $x=+\frac{A}{2}$处的相位

$$\omega t=\frac{\pi}{3}$$

将 A、ω 和 ωt 的值代入速度公式,可得

$$v=-A\omega\sin\omega t=-0.04\times 6.0\left(\sin\frac{\pi}{3}\right)=-0.208\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$$

负号表示速度的方向沿 x 轴负方向.

例 2 同上题,把物体从平衡位置右拉到 $x=0.05\ \mathrm{m}$ 处释放,求:(1) 谐振动方程;(2) 如在 $x=0.05\ \mathrm{m}$ 处给物体一个向右的初速度 $v_0=0.30\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$,求其振动方程.

解 (1) 弹簧振子的角频率仍为

$$\omega=\sqrt{\frac{k}{m}}=\sqrt{\frac{0.72}{0.02}}=6.0\ \mathrm{s^{-1}}$$

由 $x_0=0.05\ \mathrm{m}$, $v_0=0$,有

振幅 $$A=\sqrt{x_0^2+\frac{v_0^2}{\omega^2}}=x_0=0.05\ \mathrm{m}$$

初相 $$\varphi=\operatorname{arctg}\left(\frac{-v_0}{\omega x_0}\right)=0,即\ \varphi=0$$

故谐振动方程 $x=A\cos(\omega t+\varphi)=0.05\cos(6.0t)\ \mathrm{m}$

(2) 因 $x_0=0.05\ \mathrm{m}, v_0=0.30\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$，故振幅和初相分别为

$$A=\sqrt{x_0^2+\frac{v_0^2}{\omega^2}}=\sqrt{0.05^2+\frac{0.30^2}{6^2}}=0.0707\ \mathrm{m}$$

$$\varphi=\mathrm{arctg}\left(\frac{-v_0}{\omega x_0}\right)=\mathrm{arctg}\left(\frac{-0.30}{6.0\times0.05}\right)=\mathrm{arctg}\,(-1)$$

$$=-\frac{1}{4}\pi$$

则谐振动方程为

$$x=0.0707\cos\left(6.0t-\frac{\pi}{4}\right)\mathrm{m}$$

例 3 一质量为 0.01 kg 的物体作谐振动，其振幅为 0.08 m，周期为 4s，起始时刻物体在 $x=0.04$ m 处，向 Ox 轴负方向运动(图 15-3)．试求

(1) $t=1.0$ s 时，物体所处的位置和所受的力；

(2) 由起始位置运动到 $x=-0.04$ m 处所需要的最短时间．

图 15-3

解 由谐振动方程

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

按题意，$A=0.08$ m．因为 $T=4$ s，由式(15-8)有

$$\omega=\frac{2\pi}{T}=\frac{2\pi}{4}=\frac{\pi}{2}$$

以 $t=0$ 时，$x=0.04$ m，代入谐振动方程得

$$0.04=0.08\cos\varphi$$

所以
$$\varphi=\pm\frac{\pi}{3}$$

已知此时的速度为负值，故取

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

得

$$x=0.08\cos\left(\frac{\pi}{2}t+\frac{\pi}{3}\right)\mathrm{m}$$

(1) 当 $t=1.0$ s 时物体的位置

$$x=0.08\cos\left(\frac{\pi}{2}\times1.0+\frac{\pi}{3}\right)$$
$$=-0.069\ \mathrm{m}$$

负号说明物体在平衡位置O的左方. 受力为

$$f=-kx=-m\omega^2x$$
$$=-0.01\times\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\times(-0.069)$$
$$=1.70\times10^{-3}\ \mathrm{N}$$

力的方向沿 Ox 轴的正方向,指向平衡位置.

(2) 设物体由起始位置运动到 $x=-0.04$ m 处所需的最短时间为 t. 把 $x=-0.04$ m 代入振动方程,得

$$-0.04=0.08\cos\left(\frac{\pi}{2}t+\frac{\pi}{3}\right)$$

所以

$$t=\frac{2}{\pi}\left[\arccos\left(-\frac{1}{2}\right)-\frac{\pi}{3}\right]$$
$$=\frac{2}{\pi}\left[\frac{2}{3}\pi-\frac{\pi}{3}\right]=\frac{2}{3}=0.667\ \mathrm{s}$$

15-3 旋转矢量

本节介绍谐振动的旋转矢量表示法. 如图 15-4 所示, 自 Ox 轴的原点O作一矢量 A,使它的模等于谐振动的振幅 A,并使矢量

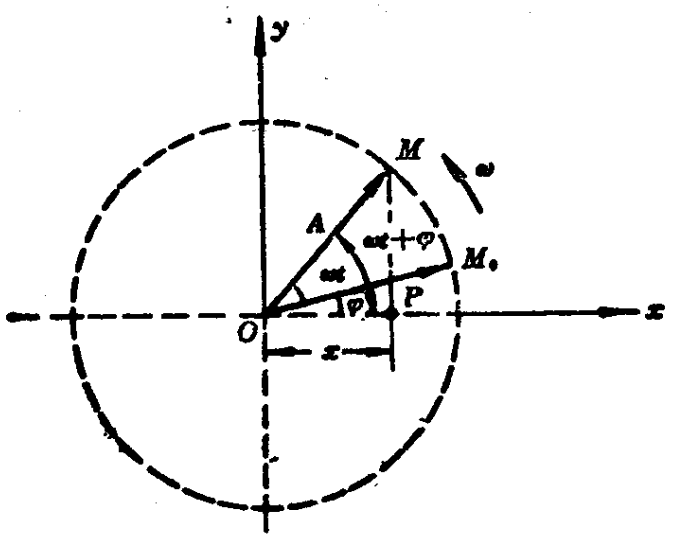


图 15-4 旋转矢量示意图