21世纪高等院校教材

大学物理

（第二版）

下册

主　编 王纪龙

副主编 周希坚 李秀燕

编　委 王钢柱 杨毅彪

郝玉英 周　伟

科学出版社

www.sciencep.com

21世纪高等院校教材

大学物理

（第二版）

下册

主　编　王纪龙

副主编　周希坚　李秀燕

编　委　王钢柱　杨毅彪

郝玉英　周　伟

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是根据“高等工业学校大学物理课程教学基本要求”的精神，按照21世纪人才培养模式的需要和课程体系、教学内容改革的要求，在广泛吸取了近年来出版的国内外一些较为优秀的同类教材的成功经验后编写而成的. 全书分上、下两册. 上册包括力学(含相对论)、电磁学；下册包括振动和波动学、量子物理基础、热物理学.

本书可作为高等工业学校各专业和其他类院校非物理类专业本、专科学生的大学物理教材，也可用作成人教育的大学物理教材和教学参考书.

图书在版编目(CIP)数据

大学物理(上、下册)/王纪龙主编. —2版. —北京：科学出版社，2003
(21世纪高等院校教材)
ISBN 7-03-011054-4

Ⅰ. 大… Ⅱ. 王… Ⅲ. 物理学-高等学校-教材 Ⅳ. O4

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第105952号

责任编辑：巴建芬/责任校对：朱光光
责任印制：安春生/封面设计：槐寿明

科学出版社 出版
北京东黄城根北街16号
邮政编码：100717
http://www.sciencep.com
新蕾印刷厂 印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销
*
2002年2月第 一 版 开本：720×1000 1/16
2003年1月第 二 版 印张：24 1/2
2004年2月第三次印刷 字数：468 000
印数：15 501—18 500

定价：57.00元(含上、下册)

(如有印装质量问题，我社负责调换〈杨中〉)

前　言

大学物理是高等院校理工科(非物理类)专业一门重要的必修基础课,除为大学生终身学习打下必要的、系统的物理理论基础外,课程本身还体现了对大学生进行科学思维、科学方法和创新能力的培养.在对大学生进行综合素质培养中,大学物理对学生科学素养的提高有着重要的、其他学科无法替代的作用.

选择好的教材是提高教学质量的关键,所以编写一套满足21世纪人才培养需要的、好教、好学、好用的大学物理教材显得尤为重要.一套好的教材需要不断地完善,要经过广泛的教学实践的检验,在使用中发现问题或不足,不断地进行修正.为此,我们在开展物理系列课程改革研究时,把大学物理教材的研究作为重要课题之一,对已由科学出版社出版的《大学物理》(王纪龙主编,2002年2月)进行了全面修改,并推出《大学物理》第二版.

本次修订的原则:教学内容的取舍要满足21世纪人才培养的需要;结构体系的变化要有利于教与学,要深入浅出,不有意深化、难化教学内容,力戒大学物理理论物理化;基本概念和基本规律的阐述力求准确、严谨,力戒语言模棱两可,含糊不清;保留原书优势,进一步强调对大学生创新思维和创新能力的培养.

本次在全面修订的基础上重点修订了电磁学部分的内容;重写了几乎全部的物理专题;新增了中外物理学家简介特别编写了中国和华裔著名物理学家简介;附录增加了百年物理学诺贝尔奖简况.本次修订还大篇幅调整了各章后的习题,选题力求围绕各章基本内容,每学时教学内容配以4~5个习题供选择,同类题实行精选,难度梯度适当.

参加本书编写与修订的有:王纪龙,周希坚,李秀燕,王钢柱,郝玉英,杨毅彪,周伟.其中第一、二、三章由郝玉英编写;第五、六、七章由李秀燕编写;第八、九、十章及中外物理学家简介和百年诺贝尔奖简况由杨毅彪编写;第十一、十二、十五章由王钢柱编写;第十六、十九、二十章由周伟编写.王纪龙负责第四章、第十三章的编写和下册的统稿工作,周希坚负责第十四、十七、十八章的编写和上册的统稿工作.

本书虽经全面的修订,但难免仍存在一些不足,恳请使用本书的同行和读者批评指正.

王纪龙

2002年12月于太原

本书中涉及的物理量和单位

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	量 纲	备 注
长 度	l, s	米	m	L	
面 积	S	平方米	m^2	L^2	
体 积	V	立方米	m^3	L^3	1L(升)=$10^{-3}m^3$
时 间	t, τ	秒	s	T	
位 移	s, Δr	米	m	L	
速 度	v, u	米每秒	$m\cdot s^{-1}$	LT^{-1}	
加 速 度	a	米每二次方秒	$m\cdot s^{-2}$	LT^{-2}	
角 位 移	θ	弧度	rad	1	
角 速 度	ω	弧度每秒	$rad\cdot s^{-1}$	T^{-1}	
角加速度	β	弧度每二次方秒	$rad\cdot s^{-2}$	T^{-2}	
质 量	m	千克	kg	M	
力	F	牛顿	N	LMT^{-2}	$1N=1kg\cdot m\cdot s^{-2}$
重 力	G	牛顿	N	LMT^{-2}	
功	A	焦耳	J	L^2MT^{-2}	$1J=1N\cdot m$
能 量	$E(W)$	焦耳	J	L^2MT^{-2}	
动 能	E_k	焦耳	J	L^2MT^{-2}	
势 能	E_p	焦耳	J	L^2MT^{-2}	
功 率	P	瓦特	W	L^2MT^{-3}	$1W=1J\cdot s^{-1}$
摩擦系数	μ	–	–	–	
动 量	p	千克米每秒	$kg\cdot m\cdot s^{-1}$	LMT^{-1}	
冲 量	I	牛顿秒	$N\cdot s$	LMT^{-1}	
力 矩	M	牛顿米	$N\cdot m$	L^2MT^{-2}	
转动惯量	J	千克二次方米	$kg\cdot m^2$	L^2M	
角动量(动量矩)	L	千克二次方米每秒	$kg\cdot m^2\cdot s^{-1}$	L^2MT^{-1}	
电 流	I	安培	A	I	
电 荷 量	Q, q	库仑	C	TI	
电荷线密度	λ	库仑每米	$C\cdot m^{-1}$	$L^{-1}TI$	
电荷由密度	σ	库仑每平方米	$C\cdot m^{-2}$	$L^{-2}TI$	
电荷体密度	ρ	库仑每立方米	$C\cdot m^{-3}$	$L^{-3}TI$	

续表

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	量　纲	备　注
电场强度	E	伏特每米	$V\cdot m^{-1}$或$N\cdot C^{-1}$	$LMT^{-3}I^{-1}$	$1V\cdot m^{-1}=1N\cdot C^{-1}$
电场强度通量	Ψ_E	伏特米	$V\cdot m$	$L^3MT^{-3}I^{-1}$	
电　势	V	伏特	V	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	
电势差、电压	U	伏特	V	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	
电容率	ε	法拉每米	$F\cdot m^{-1}$	$L^{-3}M^{-1}T^4I^2$	
真空电容率	ε_0	法拉每米	$F\cdot m^{-1}$	$L^{-3}M^{-1}T^4I^2$	
相对电容率	ε_r	–	–	–	
电偶极矩	p_e	库仑米	$C\cdot m$	LTI	
电极化强度	P	库仑每平方米	$C\cdot m^{-2}$	$L^{-2}TI$	
电极化率	χ_e	–	–	–	
电位移	D	库仑每平方米	$C\cdot m^{-2}$	$L^{-2}TI$	
电位移通量	Ψ_D	库仑	C	TI	
电　容	C	法拉	F	$L^{-2}M^{-1}T^4I^2$	$1F=1C\cdot V^{-1}$
电流密度	j	安培每平方米	$A\cdot m^{-2}$	$L^{-2}I$	
电动势	$\mathscr{E}$	伏特	V	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	
电　阻	R	欧姆	Ω	$L^2T^{-3}I^{-2}$	$1\Omega=1V\cdot A^{-1}$
电阻率	ρ	欧姆米	$\Omega\cdot m$	$L^3MT^{-3}I^{-2}$	
电导率	γ	西门子每米	$S\cdot m^{-1}$	$L^{-3}M^{-1}T^3I^2$	$1S=1A\cdot V^{-1}$
磁感应强度	B	特斯拉	T	$MT^{-2}I^{-1}$	$1T=1Wb\cdot m^{-2}$
磁导率	μ	亨利每米	$H\cdot m^{-1}$	$LMT^{-2}I^{-2}$	
真空磁导率	μ_0	亨利每米	$H\cdot m^{-1}$	$LMT^{-2}I^{-2}$	
相对磁导率	μ_r	–	–	–	
磁通量	Φ_m	韦伯	Wb	$L^2MT^{-2}I^{-1}$	$1Wb=1V\cdot s$
磁化强度	M	安培每米	$A\cdot m^{-1}$	$L^{-1}I$	
磁化率	χ_m	–	–	–	
磁场强度	H	安培每米	$A\cdot m^{-1}$	$L^{-1}I$	
磁　矩	p_m	安培平方米	$A\cdot m^2$	L^2I	
自　感	L	亨利	H	$L^2MT^{-2}I^{-2}$	$1H=1Wb\cdot A^{-1}$
互　感	M	亨利	H	$L^2MT^{-2}I^{-2}$	
电场能量	W_e	焦耳	J	ML^2T^{-2}	
磁场能量	W_m	焦耳	J	ML^2T^{-2}	
电磁能密度	w	焦耳每立方米	$J\cdot m^{-3}$	$ML^{-1}T^{-2}$	

目　　录

前　言

本书中涉及的物理量和单位

第三篇　振动和波动

第十一章　机械振动和电磁振荡 …… **3**

§11-1　简谐振动 …… 3

§11-2　阻尼振动 …… 17

§11-3　受迫振动　共振 …… 19

*§11-4　电磁振荡 …… 22

§11-5　同方向的简谐振动的合成 …… 27

§11-6　相互垂直的简谐振动的合成 …… 30

习题 …… 33

第十二章　机械波和电磁波 …… **37**

§12-1　机械波的产生和传播 …… 37

§12-2　平面简谐波的波动方程 …… 43

*§12-3　波动方程的动力学推导 …… 49

§12-4　波的能量　波的强度 …… 51

*§12-5　声波 …… 55

*§12-6　电磁波 …… 59

§12-7　惠更斯原理　波的衍射　反射和折射 …… 73

§12-8　波的叠加原理　波的干涉　驻波 …… 76

*§12-9　多普勒效应 …… 86

习题 …… 91

中外物理学家简介(十一) …… 95

第十三章　光的干涉 …… **96**

§13-1　人类对于光本性的认识 …… 96

§13-2　光源　光的相干性 …… 98

§13-3　光程　光程差 …… 100

§13-4　杨氏双缝实验 …… 103

§13-5　薄膜干涉 …… 113

§13-6　劈尖的干涉　牛顿环 …… 118

§13-7　迈克耳孙干涉仪 …… 127

习题 …… 129

中外物理学家简介(十二) …… 133

专题选读 I 激光和光纤 …… 134

第十四章 光的衍射 …… 139

§14-1 光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理 …… 139

§14-2 单缝和圆孔的夫琅禾费衍射 …… 142

§14-3 衍射光栅 …… 151

§14-4 X射线的衍射 布拉格方程 …… 160

习题 …… 162

中外物理学家简介(十三) …… 165

专题选读 J 全息照相 …… 166

第十五章 光的偏振 …… 169

§15-1 自然光和线偏振光 …… 169

§15-2 偏振片的起偏和检偏 马吕斯定律 …… 171

§15-3 反射和折射时光的偏振 …… 174

§15-4 光的双折射现象 …… 176

*§15-5 偏振光的干涉 人为双折射 波晶片 …… 182

*§15-6 旋光现象 …… 186

习题 …… 187

专题选读 K 液晶 …… 190

第四篇 量子物理基础

第十六章 从经典物理到量子物理 …… 197

§16-1 黑体辐射 普朗克的能量子假说 …… 197

§16-2 光电效应 爱因斯坦的光量子论 …… 203

§16-3 原子结构和原子光谱 玻尔的量子论 …… 213

习题 …… 219

中外物理学家简介(十四) …… 221

第十七章 量子力学基础 …… 222

§17-1 实物粒子的波粒二象性 德布罗意波 …… 222

§17-2 波函数及其物理意义 …… 224

§17-3 不确定性原理 …… 227

§17-4 薛定谔方程 …… 229

§17-5 定态问题 …… 232

§17-6 氢原子 …… 240

§17-7 多电子原子和元素周期表 …… 249

习题 …… 252

中外物理学家简介(十五) …… 255

* 第十八章　原子核和基本粒子简介 …… 258
§18-1　核的组成和基本性质 …… 258
§18-2　核力与原子核结构 …… 261
§18-3　原子核衰变 …… 263
§18-4　基本粒子简介 …… 267
习题 …… 273
中外物理学家简介(十六) …… 275
专题选读 L　穆斯堡尔效应 …… 276
专题选读 M　核磁共振 …… 279

第五篇　热物理学

第十九章　气体动理论 …… 285
§19-1　热力学平衡的基本概念 …… 285
§19-2　压强和温度的微观解释 …… 288
§19-3　能量按自由度均分定理 …… 293
§19-4　麦克斯韦速率分布律 …… 298
* §19-5　玻尔兹曼分布律与量子统计简介 …… 302
* §19-6　真实气体的范德瓦尔斯方程 …… 306
§19-7　气体分子的平均自由程 …… 307
§19-8　输运过程 …… 310
习题 …… 314
中外物理学家简介(十七) …… 318
专题选读 N　激光冷却与捕陷原子 …… 319
第二十章　热力学基础 …… 324
§20-1　热力学第一定律 …… 324
§20-2　热容量 …… 327
§20-3　第一定律对于气体热力学过程的应用 …… 331
§20-4　循环过程　卡诺循环 …… 342
§20-5　热力学第二定律 …… 349
* §20-6　卡诺定理 …… 352
* §20-7　熵与熵增加原理 …… 355
§20-8　热力学第二定律的微观意义 …… 359
习题 …… 363
中外物理学家简介(十八) …… 367
专题选读 O　非线性科学(二) …… 368
1901～2000 百年诺贝尔物理学奖获得者简况 …… 374
参考文献 …… 382

第三篇　振动和波动

振动是自然界中最常见的运动形式之一．物体在平衡位置附近作具有时间周期性的往复运动，称为机械振动．例如，钟摆的运动，气缸中活塞的运动，一切发声体的运动，机器开动时各部分的微小颤动等都是机械振动．振动现象是非常普遍的，并不局限于机械振动．分子的热运动、振荡电路中电流的变化、电磁场的变化、晶体中原子的运动等虽属于不同的运动形式，各自遵循不同的运动规律，但是就其中的振动过程来讲，它们都具有共同的物理特征．故广义地讲，任何一个物理量(如位置矢量、电流、电压、电量、电场强度、磁感应强度等)在某个定值附近反复变化，都可称为该物理量在振动．

在不同的振动中，最基本最简单的振动是简谐振动．一切复杂的振动都可以分解为若干个简谐振动．也就是说，可以把复杂的振动看成是几个简谐振动的合成．甚至从更广泛的意义上讲，任何复杂的非周期性运动，也属于振动的研究范畴，因为非周期性运动可以分解为频率连续分布的无限多个简谐振动的叠加，所以振动是声学、地震学、建筑力学、机械原理、造船学所必需的基础知识，也是光学、电学、交流电工学、无线电技术及原子物理学等不可缺少的基础．

波是振动在空间的传播．所以说，振动和波动关系十分密切，振动是产生波动的根源，而波是振动的传播．声波、水波、电磁波、光波等都是波，各种各样信息的传播几乎都要借助于波，如果没有波，我们将处于黑暗和寂静之中，没有波的世界是不可想像的．尽管波的种类繁多，通常我们可以把它分成两大类：机械振动在弹性媒质中的传播称为机械波；电磁振动在空间的传播称为电磁波．机械波和电磁波是本质上完全不同的两类波，产生的条件和方法不同，与物质相互作用的规律也不一样，但是，它们又有许多波的共同的特征．例如，它们在波动过程中都伴

随着能量的传播，它们都能产生反射和折射现象，它们都会出现干涉和衍射现象. 不仅如此，机械波和电磁波还遵守一些共同的传播规律，能够用同样的数学方法进行研究和描述.

光是一定波段的电磁波，光的波动性已在其干涉、衍射及偏振现象中得到了充分的证明. 这些现象已在现代科学技术中有着广泛的应用. 因此波动学是一门实用性很强的学科，在工程技术和近代科学研究中有着广泛的应用. 例如，产品机械加工，质量的检验，长度的精密测量，材料内部受力情况的探测，物质结构的研究，以及无线电通信，激光通信，全息摄影和遥感遥测技术等等，它们都是以波动学为理论依据的. 波不仅广泛存在于我们周围的宏观世界，近代物理的研究证明，微观粒子也同样具有波动性，所以波普遍存在于自然界，是物质的一种重要的、基本的运动形式.

本篇将在第十一章对简谐振动和电磁振荡作比较详细的讨论；在第十二章对机械波和电磁波的基本规律作比较细致的阐述，有关声波的一些知识将在后续的讲座知识中作一介绍；对光的干涉、衍射和偏振将在第十三、十四、十五章中作较全面的论述.

第十一章　机械振动和电磁振荡

§11-1　简 谐 振 动

自然界中大量的振动是周期性的，其中，最简单的周期性振动是简谐振动．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，这种运动称为简谐振动，简称谐振动．在忽略阻力的情况下，弹簧振子的小幅度振动、单摆的小角度振动以及 LC 电磁振荡电路都是简谐振动．下面以弹簧振子为例讨论简谐振动的特征及其有关规律．

一、简谐振动的特征

质量为 m 的物体系于一端固定的轻弹簧（弹簧的质量相对于物体来说可以忽略不计）的自由端，这样的弹簧和物体系统就称为弹簧振子．

如将弹簧振子水平放置，当弹簧为原长时，物体所受的合力为零，处于平衡状态，此时物体所处的位置就是平衡位置，如果把物体略加移动后释放，这时弹簧被拉长或被压缩，便有指向平衡位置的弹性力作用在物体上，迫使物体返回平衡位置．这样，在弹性力的作用下，物体就在其平衡位置附近作往复运动，如图 11-1 所示．

若取物体的平衡位置为坐标原点，物体的运动轨道为 x 轴，向右为正方向，在小幅振动情况下，按照胡克定律，物体所受的弹性力 f 与弹簧的伸长（即物体相对于平衡位置的位移 x）成正比，即

$$f = -kx$$

式中 k 是弹簧的劲度系数，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

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{f}{m} = -\frac{k}{m}x$$

对于一个给定的弹簧振子，$m>0$，$k>0$，

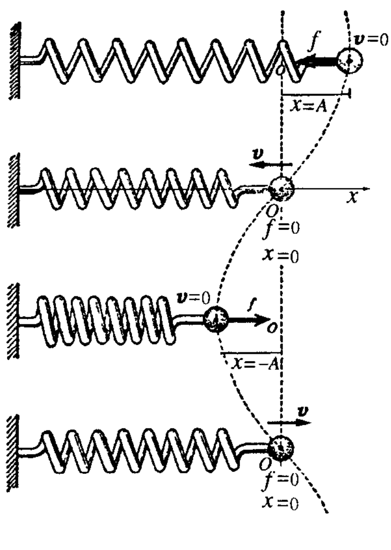

图 11-1　弹簧振子的振动

且 m 与 k 均为常量,故可设

$$\frac{k}{m}=\omega^2 \tag{11.1}$$

代入上式得

$$\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}=-\omega^2 x \tag{11.2}$$

或

$$\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}+\omega^2 x=0$$

这一微分方程的解为

$$x=A\cos(\omega t+\varphi_0) \tag{11.3}$$

或

$$x=A\sin(\omega t+\varphi'_0)$$

式中 $\varphi'_0=\varphi_0+\pi/2$,显然 A 和 φ_0(或 φ'_0)为积分常数,它们的物理意义和确定方法将在后面讨论. 由上可见,物体相对平衡位置的位移按余弦(或正弦)函数关系随时间变化,所作的正是简谐振动. 为了方便起见,本书均采用余弦函数关系随时间变化的表达式[即式(11.3)]为简谐振动的运动方程.

在第一篇力学中我们已经明确,描述一个物体的运动状态,经常用位移、速度及加速度等物理量来表示. 为此,根据速度和加速度的定义,我们可以得到物体作简谐振动时的速度和加速度

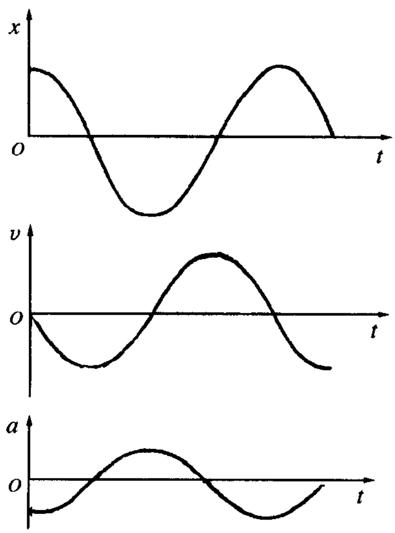

图 11-2　简谐振动的 x-t 图线、v-t 图线与 a-t 图线

$$v=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=-\omega A\sin(\omega t+\varphi_0)$$

$$=-v_{\mathrm{m}}\sin(\omega t+\varphi_0) \tag{11.4}$$

$$\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}=-\omega^2A\cos(\omega t+\varphi_0)$$

$$=-a_{\mathrm{m}}\cos(\omega t+\varphi_0) \tag{11.5}$$

式中 $v_{\mathrm{m}}=\omega A$ 和 $a_{\mathrm{m}}=\omega^2A$ 称为速度幅值和加速度幅值. 由此可见,物体作简谐振动时,其位移、速度及加速度都是随时间作周期性变化的,图 11-2 给出了简谐振动的位移、速度和加速度与时间的关系. 我们把物体作简谐振动时位移、速度及加速度随时间周期性变化的特点推而广之,任何一个物理量,不管是位移、速度、加速度,还是电流、电压与

电量等其他物理量,只要它们的变化符合余弦规律(或正弦规律),那么这个物理量就在作简谐振动.

通过弹簧振子的振动可知,如果物体受到的力的大小总是与物体对其平衡位置的位移成正比、而方向相反,那么,该物体的运动就是简谐振动,这是物体作简谐振动的动力学特征,这种性质的力称线性回复力. 从式(11.2)还可以看出,作简谐振动的物体的加速度的大小总是与其位移的大小成正比、而方向相反,这一结论通常称为简谐运动的运动学特征. 式(11.3)常称作简谐振动表达式. 无论是运动学特征、动力学特征,还是简谐振动的表达式[即式(11.3)],都可以作为一个系统是否作简谐振动的判定根据.

二、简谐振动的振幅、周期、频率和相位

1. 振幅

在简谐振动表达式中,因余弦(或正弦)函数的绝对值不大于1,所以物体的振动范围只能处于$+A$与$-A$之间,通常把简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.

2. 周期和频率

振动量完全重复一次所需要的时间,叫做振动的周期,常用T表示. 由于每隔一个周期,振动状态就完全重复一次,所以

$$x = A\cos[\omega(t+T)+\varphi_0] = A\cos(\omega t+\varphi_0)$$

显然,满足上述方程的T的最小值应为$\omega T=2\pi$,故有

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \tag{11.6}$$

单位时间内(即1 s内)物体所作的完全振动的次数称做振动频率,用ν表示,ν的单位为赫兹(Hz),显然频率与周期的关系是

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \qquad \text{或} \qquad \omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T} \tag{11.7}$$

所以ω表示物体在2π秒的时间内所作的完全振动次数,称为振动的角频率,也称圆频率,它的单位是弧度·秒$^{-1}$($\mathrm{rad\cdot s^{-1}}$).

对于弹簧振子来讲,$m\omega^2=k$,即$\omega=\sqrt{k/m}$,所以弹簧振子的周期和频率为

$$T=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}, \qquad \nu=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$

对于一个质量m和劲度系数k都确定的谐振系统来说,其ω、T与ν都是由谐振系统的结构特性来决定的,因此我们称之为谐振系统的固有周期和固有频率.

利用 T 和 ν，谐振动表达式可写成

$$x = A\cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right) \quad 或 \quad x = A\cos(2\pi\nu t + \varphi_0)$$

3. 相位和初相

由式(11.3)、(11.4)和(11.5)可知，在角频率 ω 和振幅 A 确定的情况下，振动物体在任一时刻 t 的运动状态(指位移、速度与加速度)都由 $(\omega t + \varphi_0)$ 决定. $(\omega t + \varphi_0)$ 是决定简谐振动物体运动状态的物理量，称为振动的相位. 显然 φ_0 是 $t=0$ 时的相位，称为初相位，简称初相.

在振动和波动的研究中，相位是一个十分重要的概念. 质点在振动的一个周期内所经历的状态没有一个是完全相同的，对应的相位来看，相当于相位从 0 到 2π 的变化. 在图 11-3 中，我们给出的是简谐振动的位移时间曲线，这里 x 表示振动质点相对于平衡位置的位移. 当一组 A、ω 和 φ_0 的量值已给定时，根据式(11.3)就可画出相应的位移时间曲线. 从图中可以看出，$t=0$ 时的位移 $x_0 = A\cos\varphi_0$ 是由初相位 φ_0 决定的，其中振幅 A 是最大位移的绝对值. 曲线上的 a、b 两个时刻对应的位移一样，但运动状态却不一样. 在 a 时刻谐振动质点的速度方向沿 x 轴反向，朝负的最大位移处运动，而 b 时刻振动质点的速度方向沿 x 轴正向，是振动质点由负的最大位移处返回，往平衡位置的运动. 如果要寻找和 a 时刻完全相同的状态，那只有在另一个周期中才能找到，如图中的 c 点即是. 振动质点在 a 时刻与 c 时刻的位移、速度(甚至加速度)是完全相同的，也就是说振动状态完全一样，从对应的相位来说，c 时刻的相位恰好比 a 时刻增加了 2π. 也可以看出，周期 T 是相位改变 2π 对应的两个状态完全一样的时刻之间的时间间隔. 由此可见，凡是振动状态完全相同的两个时刻，它们对应的相位差必然是 2π 或 2π 的整数倍. 所以，相位是确定振动质点在 t 时刻运动状态(一般指位移和速度)的重要物理量.

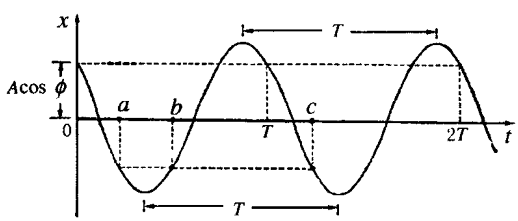

图 11-3 简谐振动的位移时间曲线

相位概念的重要性还在于比较两个谐振动之间在“步调”上的差异. 设有两个同频率的谐振动，它们的表达式分别是

$$x_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_{10}), \qquad x_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_{20})$$

它们的相位差为

$$\Delta\varphi = (\omega t + \varphi_{20}) - (\omega t + \varphi_{10}) = \varphi_{20} - \varphi_{10}$$

即它们在任意时刻的相位差恒等于其初相位差．当 $\Delta\varphi = 0, 2\pi, \cdots, 2k\pi$（$k$ 为正整数）时，这时两振动物体将同时到达各自同方向的位移的最大值，同时通过平衡位置且向同方向运动，它们的步调完全一致，我们称它们“同相”；当 $\Delta\varphi = \pi, \cdots, (2k+1)\pi$（$k$ 为正整数）时，两个谐振动物体，一个到达正方向最大位移处，而另一个却恰到负方向最大位移处，它们同时到达平衡位置但运动方向相反，即两个振动的步调完全相反，我们称这样的两个振动为“反相”．

当 $\Delta\varphi$ 为其他值时，如果 $\varphi_{20} - \varphi_{10} > 0$，我们称第二个简谐振动超前第一个振动 $\Delta\varphi$，或者说第一个振动落后于第二个振动 $\Delta\varphi$．

相位不但可用来比较简谐振动中同一物理量变化的步调，也可以比较不同物理量之间变化的步调．如果我们把速度和加速度的表达式(11.4)与(11.5)改写成

$$v = -v_{\mathrm{m}} \sin(\omega t + \varphi_0) = v_{\mathrm{m}} \cos\left(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$a = -a_{\mathrm{m}} \cos(\omega t + \varphi_0) = a_{\mathrm{m}} \cos(\omega t + \varphi_0 \pm \pi)$$

可以看出，速度的相位比位移的相位超前 $\pi/2$，加速度的相位比位移的相位超前（或落后）π，即二者恒反相．速度的相位比加速度落后 $\pi/2$（或超前 $3\pi/2$）．

4．振幅 A 和初相 φ_0 的确定

在谐振动的位移随时间变化的表达式(11.3)中，除变量 x 与 t 外，尚有三个特征量 A、ω 与 φ_0，前面已讲到 ω（或 ν 与 T）由系统的结构特征来决定，这里介绍振幅 A 与初相 φ_0 的确定．

如果在式(11.3)和(11.4)中，以 $t=0$ 代入，得

$$\begin{cases} x_0 = A\cos\varphi_0 \\ v_0 = -\omega A \sin\varphi_0 \end{cases} \tag{11.8}$$

由式(11.8)二等式可求得

$$\begin{cases} A = \sqrt{x_0^2 + \dfrac{v_0^2}{\omega^2}} \\ \varphi_0 = \arctan\left(-\dfrac{v_0}{\omega x_0}\right) \end{cases} \tag{11.9}$$

其中振动物体在 $t=0$ 时的位移 x_0 和初速度 v_0 称作振动的初始条件. 显然由谐振动的初始条件 x_0 与 v_0 可以确定振幅 A 和初相 φ_0. 在使用式(11.9)确定初相 φ_0 时,我们不妨采用式(11.8)

$$\begin{cases} x_0 = A\cos\varphi_0, & \cos\varphi_0 = \dfrac{x_0}{A} \\ v_0 = -\omega A\sin\varphi_0, & \sin\varphi_0 = -\dfrac{v_0}{\omega A} \end{cases} \tag{11.10}$$

联合确定 φ_0 的值. 即先由 $\cos\varphi_0 = x_0/A$ 可定出 φ_0 的两个可能值,再由 $\sin\varphi_0 = -v_0/\omega A$ 的正负号,在这两个可能值中确定 φ_0 的值.

图 11-4

例 11-1 如图 11-4,一弹簧振子放置在光滑水平面上. 已知弹簧的劲度系数 $k=1.60\ \mathrm{N\cdot m^{-1}}$,物体的质量 $m=0.40$ kg. 试就下面两种情况分别求出谐振动方程:

(1)将物体从平衡位置向右移到 $x=0.10$ m 处后静止释放;

(2)将物体从平衡位置向右移到 $x=0.10$ m 处后,并给物体以向左的速度 $0.20\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$.

解 (1) 弹簧振子的角频率为

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{1.60}{0.40}}\ \mathrm{s^{-1}} = 2\ \mathrm{s^{-1}}$$

根据初始条件,$t=0$ 时, $x_0=0.10$ m, $v_0=0$,故由式(11.9)和(11.10)得

$$A = \sqrt{x_0^2 + \frac{v_0^2}{\omega^2}} = x_0 = 0.10\ \mathrm{m}, \qquad \cos\varphi_0 = \frac{x_0}{A} = \frac{0.10}{0.10} = 1,\ 故\ \varphi_0 = 0$$

(2)依据初始条件 $t=0$ 时, $x_0=0.10$ m, $v_0=-0.20\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$,故由式(11.9)得振幅

$$A = \sqrt{x_0{}^2 + \frac{v_0^2}{\omega^2}} = \sqrt{(0.10)^2 + (\frac{-0.20}{2.0})^2}\ \mathrm{m} = 0.1\sqrt{2}\ \mathrm{m}$$

又由式(11.10)得

$$\cos\varphi_0 = \frac{x_0}{A} = \frac{0.1}{0.1\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

$$\varphi_0 = \frac{\pi}{4} \quad 或 \quad -\frac{\pi}{4}$$