



世纪普通高等教育基础课规划教材



UNIVERSITY PHYSICS

# 大学物理学

严导淦 王晓鸥 万 伟 编  
唐光裕 主审

下 册



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪普通高等教育基础课规划教材

# 大学物理学

下 册

严导淦 王晓鸥 万 伟 编  
唐光裕 主审



机械工业出版社

本教材参照教育部现行《理工科大学物理课程教学基本要求》编撰,内容大致涵盖该基本要求中的 A 类核心内容和择要遴选有关的 B 类扩展内容,分上、下两册,共 17 章。本书为下册,内容有机械振动、机械波、电磁波、光学、热学和量子物理基础等,并设置了联系当前工程学科需求的 4 个专题选讲内容。每章配有问题、例题和习题,习题附有答案。

本书在确保上述基本要求的前提下,在撰述上力求简明扼要,在内容的深度、广度上以“浅一点、宽一点、新一点、活一点、用一点”为圭臬,冀图在凸现代理工科大学物理的特色上作些探索。

为了增强学生的学习兴趣,培养学生正确的思维能力,本书在各章的每节内容中穿插了一些相关的问题,其题型有些是结合生活、生产实践的应用题,有些是利用图形作出的提问,以避免模棱两可之弊,使读者在阅读正文之后解答上述问题,巩固和深化所学内容。此外,书中穿插的例题和列于每章的习题,布题周详,题量适中,以基本计算题为主,深度和广度与正文形成良好的匹配。

与本书同步出版的还有《大学物理学教·学指导》,并配有课堂教学电子教案。

本书为普通高等学校理工科大学物理课程教材(100~110 学时),也可兼做函授、成人教育、网络教育、高等教育自学考试教材或参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

大学物理学. 下册/严导淦,王晓鸥,万伟编. —北京:机械工业出版社,2009.5

21 世纪普通高等教育基础课规划教材

ISBN 978-7-111-26755-3

I. 大… II. ①严…②王…③万… III. 物理学-高等学校-教材 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 049835 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:李永联 责任编辑:陈中心

版式设计:霍永明 责任校对:张晓蓉

封面设计:张凯 责任印制:杨曦

北京蓝海印刷有限公司印刷

2009 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·18.5 印张·359 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-26755-3

定价:21.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379723

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

当前,我国正处于从工业经济向知识经济挺进的关键阶段,面临着改革和创新的严峻挑战,催动着高等教育向素质型教育转轨。

数年前,承蒙机械工业出版社高等教育分社李永联先生不弃,遵嘱编撰一本适合当前工科专业教学需求的本科大学物理课程教材。编者不才,恐难以报命,惟勉力是从而已。

本书力求以较小的篇幅涵盖教育部现行《理工科大学物理课程教学基本要求》(以下简称《基本要求》)的A类核心内容;并结合工科专业需要和当前物理学的前沿课题,设置“专题选读”栏目,择要简介一些B类扩展性的机动内容,期求在学时数允可或读者学有余力的情况下,选读其中某些内容,以开拓读者的科学视野。另外,借鉴国外有些同类教材的做派,在每章开头,借方寸之地,结合该章内容,提供一些“自测题”或“科技小品”,期以引发读者学习本章内容的兴趣。这仅仅是一种探索性的尝试,也许东施效颦,事与愿违,只能今后不断改进,以臻完善。

全书各板块内容的布设,参照当前有些教材,迥异于以往一以贯之的传统体系,这样,可能有利于物理课程在教学安排和内容讲授上的灵活处理。

教育学上有关智力测验资料表明,由于学生在修读物理课程时的年龄段约在18~20岁,尚处于智力的高峰期。为了充分发挥这一优势,本书在各章的每节内容中穿插了相关的一些问题,其题型有些是巩固本节内容的概念性复习题,有些是结合生活、生产实践的应用题,有的用图形提问,以避免模棱两可之弊,使读者在阅读正文之后解答上述问题,以巩固和深化所学内容;若能据以系统地写成一份笔记,将是一份温课迎考的复习资料。其次,关于穿插在正文中的例题和列于每章之末的习题,布题周详,题量适中,以基本计算题为主,深、广度大致能与正文相匹配,并适度配置一些用高等数学解算的题目。采取以上教学措施,旨在贯彻大学生主动学习的教育学理念。

本书在确保《基本要求》的前提下,在内容深、广度上以“浅一点、宽一点、新一点、活一点、用一点”为圭臬,冀图在凸现现代工科大学物理的特色上作些探索。例如,删去了诸如玻耳兹曼分布、电极化强度矢量 $\mathbf{P}_j$ 、磁化强度矢量 $\mathbf{M}_j$ 等内容,简化了有电介质时高斯定理、有磁介质时安培环路定理和刚体定轴转动定律的推导,既节省课时,又易教易懂;在“专题选读”中介绍了宇宙学、基本粒子,能源与环境保护以及研究工程问题所需要的量纲分析等内容;又如在问题、例题和习题中也渗

透了一些与生活 and 生产实践有关的题材。旨在导引读者能初步学会从力、热、声、光、电等物理视角去洞察现实世界中形形色色的生活和工程实践现象,并用相应的物理和专业知识及有关理论去辩解,甚至有所创新。常言道:“授人以鱼,仅供一饭之需”;“惟有教人以渔,则终身受用无穷”。后者正是编者们所企求的。

本书在文字叙述上力求简明通达,用字遣句和列式计算力求规范。诸如在示力图中将重力误标为  $mg$ ,将运动表达式和波动表达式误称为运动方程和波动方程,将压强  $p$  误作矢量,列式计算时对数与量不加区分等等,甚至在有些同类教材中亦时有误植,这些习惯性而不经意地形成的时弊,本书皆尽可能加以厘正。

为了使本书易教易学,我们对重点内容作了重墨缕述,但力求要言不烦;对非重点内容而估计到学生阅读时会有困惑之处,仍不轻易回避,不惜篇幅,尽可能加以缕析,或许对读者有所裨益。

至于与本书套配的《大学物理学教·学指导》和《大学物理课程电子教案》将与教材同步出版。

本书的编写分工为:严导淦编写第 0 章~第 8 章和两个专题,王晓鸥编写第 9 章~第 14 章和三个专题,万伟编写第 15 章~第 17 章和三个专题。

本书由唐光裕教授主审,唐教授对书稿提出了许多修改意见,深受启迪。

在本书编写过程中,编者还参阅和引用了国内外许多同类教材的有关资料,获益匪浅,受赐良多,藉达葵忱,是所至感。

由于编者识浅才庸,力不从心,憾难如愿,对书中多有错漏和不当之处,幸望读者绮注,不吝赐正,曷胜感盼。

编 者

# 目 录

## 前言

<b>第 9 章 机械振动</b> .....	1
<b>9.1 简谐运动</b> .....	2
9.1.1 简谐运动的基本特征 .....	2
9.1.2 简谐运动的表达式 .....	3
9.1.3 简谐运动曲线 .....	3
<b>9.2 描述简谐运动的基本物理量</b> .....	4
9.2.1 周期 频率 .....	4
9.2.2 相位 初相 .....	5
9.2.3 相位差 .....	6
9.2.4 振幅、初相与初始条件的关系 .....	7
<b>9.3 简谐运动的旋转矢量图示法</b> .....	11
<b>9.4 简谐运动的能量</b> .....	13
<b>9.5 同方向简谐运动的合成 拍</b> .....	14
9.5.1 两个同方向、同频率简谐运动的合成 .....	15
9.5.2 两个同方向、不同频率简谐运动的合成 拍 .....	17
<b>9.6 两个相互垂直的简谐运动的合成 李萨如图形</b> .....	20
9.6.1 两个相互垂直、同频率的简谐运动的合成 .....	20
9.6.2 两个相互垂直、不同频率的简谐运动的合成 李萨如图形 .....	22
<b>9.7 阻尼振动</b> .....	22
<b>9.8 受迫振动 共振</b> .....	24
习题 9 .....	26
<b>第 10 章 机械波</b> .....	30
<b>10.1 机械波的产生 横波与纵波</b> .....	30
10.1.1 机械波的产生 .....	30
10.1.2 横波与纵波 .....	31
<b>10.2 波动过程的几何描述和基本物理量</b> .....	33
10.2.1 波线和波面 .....	33
10.2.2 波形曲线 .....	34
10.2.3 波的特征量 .....	34
<b>10.3 平面简谐波</b> .....	36
10.3.1 平面简谐波的波函数 .....	36
10.3.2 波函数的物理意义 .....	37

10.3.3 平面波的波动方程 .....	42
<b>10.4 波的能量 能流密度 .....</b>	<b>42</b>
10.4.1 波的能量 .....	42
10.4.2 能流密度 .....	44
<b>10.5 波的衍射、反射和折射 .....</b>	<b>45</b>
10.5.1 惠更斯原理 .....	45
10.5.2 波的衍射 .....	46
10.5.3 波的反射和折射 .....	47
<b>10.6 波的干涉 .....</b>	<b>49</b>
10.6.1 波的叠加原理 .....	49
10.6.2 波的干涉 相干条件 相干波 .....	49
10.6.3 相干波的干涉加强与减弱 .....	49
<b>10.7 驻波 .....</b>	<b>52</b>
10.7.1 驻波的概念 .....	52
10.7.2 驻波的能量 .....	54
10.7.3 半波损失 .....	55
<b>* 10.8 声波 超声波 次声波 .....</b>	<b>56</b>
10.8.1 声波 .....	56
10.8.2 超声波 .....	57
10.8.3 次声波 .....	58
<b>10.9 多普勒效应 .....</b>	<b>58</b>
习题 10 .....	61
<b>第 11 章 电磁振荡 电磁波 .....</b>	<b>64</b>
11.1 电磁振荡 .....	64
11.2 电磁波 .....	68
11.2.1 电磁波的概念 .....	68
11.2.2 电磁波的产生与传播 .....	68
11.2.3 电磁波的性质 .....	71
11.2.4 电磁波的能量 .....	71
11.2.5 电磁波谱 .....	73
习题 11 .....	74
<b>第 12 章 几何光学 .....</b>	<b>76</b>
12.1 几何光学的基本定律 .....	77
12.1.1 直线传播定律 .....	77
12.1.2 反射定律 .....	78
12.1.3 折射定律 .....	78
12.1.4 全反射 .....	79
12.2 光程 费马原理 .....	80

12.2.1	光程 .....	80
12.2.2	费马原理 .....	81
<b>12.3</b>	<b>光在单球面上的傍轴成像 .....</b>	<b>82</b>
12.3.1	基本概念和符号法则 .....	82
12.3.2	球面反射成像 .....	83
12.3.3	球面镜成像的作图法 .....	84
12.3.4	球面折射成像 .....	86
<b>12.4</b>	<b>薄透镜成像 .....</b>	<b>88</b>
12.4.1	透镜 .....	88
12.4.2	薄透镜成像公式 .....	89
12.4.3	薄透镜的焦距 .....	90
12.4.4	薄透镜成像的作图法 .....	91
<b>12.5</b>	<b>光学仪器简介 .....</b>	<b>92</b>
12.5.1	眼睛 .....	92
12.5.2	放大镜 .....	93
12.5.3	显微镜 .....	94
12.5.4	望远镜 .....	95
12.5.5	照相机 .....	96
	习题 12 .....	96
<b>第 13 章</b>	<b>波动光学 .....</b>	<b>98</b>
<b>13.1</b>	<b>光的干涉 .....</b>	<b>98</b>
13.1.1	光的电磁理论 .....	98
13.1.2	光的干涉 .....	99
13.1.3	相干光的获得 .....	100
13.1.4	双缝干涉 .....	101
13.1.5	薄膜干涉 .....	107
13.1.6	迈克耳逊干涉仪 .....	115
<b>13.2</b>	<b>光的衍射 .....</b>	<b>116</b>
13.2.1	光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理 .....	116
13.2.2	单缝衍射 .....	117
13.2.3	圆孔衍射 .....	121
13.2.4	衍射光栅 .....	122
13.2.5	光学仪器的分辨本领 .....	127
13.2.6	X 射线在晶体中的衍射 .....	128
<b>13.3</b>	<b>光的偏振 .....</b>	<b>129</b>
13.3.1	自然光和偏振光 .....	129
13.3.2	偏振片的起偏和检偏 马吕斯定律 .....	132
13.3.3	反射和折射起偏 布儒斯特定律 .....	135



13.3.4	光的双折射现象	137
13.3.5	椭圆偏振光和圆偏振光 波片	139
13.3.6	偏振光的干涉	140
13.3.7	人为双折射	141
习题 13		142
<b>第 14 章</b>	<b>热力学基础</b>	<b>145</b>
14.1	热力学基本概念	146
14.1.1	问题的提出	146
14.1.2	热力学系统	146
14.1.3	系统的平衡状态 物态参量 热力学第零定律	147
14.1.4	准静态过程	148
14.2	气体的物态方程	149
14.2.1	理想气体的物态方程	149
* 14.2.2	真实气体的物态方程	151
14.3	热力学第一定律	152
14.3.1	系统的内能 功与热的等效性	152
14.3.2	热力学第一定律	153
14.3.3	功和热量的计算	154
14.4	热力学第一定律对理想气体热力学过程的应用	157
14.4.1	等体过程	157
14.4.2	等压过程	158
14.4.3	等温过程	160
14.4.4	绝热过程	161
* 14.4.5	多方过程	166
14.5	循环与热机	166
14.5.1	循环过程	166
14.5.2	热机效率	167
14.5.3	卡诺循环	170
14.6	热力学第二定律 卡诺定理	173
14.6.1	热力学过程的方向性	173
14.6.2	热力学第二定律	174
14.6.3	卡诺定理	175
14.7	熵	176
14.7.1	熵的概念	177
14.7.2	熵增加原理	179
* 14.7.3	能量的退化	180
习题 14		181
<b>第 15 章</b>	<b>气体动理论</b>	<b>185</b>

15.1 气体动理论的基本观点 .....	185
15.2 气体分子的热运动及其统计规律性 .....	188
15.2.1 气体分子热运动的景象 .....	188
15.2.2 大量分子热运动服从统计规律性 .....	189
15.3 气体分子的速率分布 .....	191
15.3.1 速率分布曲线 .....	191
15.3.2 麦克斯韦速率分布律 .....	192
15.3.3 分子速率的统计平均值 .....	193
15.4 气体分子平均碰撞频率和平均自由程 .....	195
15.5 理想气体的压强公式和温度的统计意义 .....	197
15.5.1 理想气体的微观模型 .....	197
15.5.2 理想气体的压强公式 .....	198
15.5.3 理想气体的温度公式 .....	200
15.6 能量按自由度均分原理 理想气体的内能 .....	202
15.6.1 自由度 .....	202
15.6.2 能量按自由度均分原理 .....	204
15.6.3 理想气体的内能 .....	204
15.6.4 理想气体摩尔热容理论值的计算 .....	205
15.7 气体内的输运现象 .....	206
15.7.1 内摩擦现象 .....	207
15.7.2 热传导现象 .....	207
15.7.3 扩散现象 .....	208
15.8 热力学第二定律的统计诠释 .....	209
15.8.1 热力学过程不可逆性的统计意义 .....	210
15.8.2 玻耳兹曼熵公式 .....	212
* 15.9 熵与环境保护 .....	213
习题 15 .....	214
<b>第 16 章 早期量子论 .....</b>	<b>216</b>
16.1 热辐射 普朗克量子假说 .....	216
16.1.1 热辐射及其定量描述 .....	216
16.1.2 绝对黑体辐射定律 普朗克公式 .....	217
16.2 光电效应 .....	220
16.2.1 光电效应的实验规律 .....	220
16.2.2 经典理论对解释光电效应的困难 .....	221
16.2.3 爱因斯坦的光子假设 .....	222
16.2.4 光电效应的应用 .....	223
16.3 康普顿效应 电磁辐射的波粒二象性 .....	224
16.3.1 康普顿效应 .....	224

16.3.2 电磁辐射的波粒二象性 .....	226
<b>16.4 氢原子光谱 玻尔的氢原子理论 .....</b>	<b>227</b>
16.4.1 氢原子光谱的规律性 .....	227
16.4.2 玻尔的氢原子理论 .....	228
习题 16 .....	232
<b>第 17 章 量子力学简介 .....</b>	<b>234</b>
<b>17.1 德布罗意假设 海森伯的不确定关系 .....</b>	<b>234</b>
17.1.1 德布罗意假设 实物粒子的二象性 .....	234
17.1.2 海森伯的不确定关系 .....	236
<b>17.2 波函数及其统计解释 .....</b>	<b>238</b>
17.2.1 自由粒子的波函数 .....	238
17.2.2 波函数的统计解释 .....	239
<b>17.3 薛定谔方程 .....</b>	<b>240</b>
<b>17.4 定态薛定谔方程的应用 .....</b>	<b>242</b>
17.4.1 一维无限深方形形势阱 .....	242
17.4.2 势垒贯穿 .....	244
17.4.3 一维简谐振子 .....	246
<b>17.5 氢原子 电子的自旋 .....</b>	<b>248</b>
17.5.1 氢原子 .....	248
17.5.2 电子的自旋 自旋磁量子数 .....	250
<b>17.6 多电子原子 原子中的电子壳层模型 元素周期表的结构 .....</b>	<b>252</b>
17.6.1 多电子原子 .....	252
17.6.2 原子中的电子壳层模型 元素周期表的结构 .....	253
习题 17 .....	256
<b>专题选讲 .....</b>	<b>257</b>
V 激光 .....	257
VI 固体能带结构 半导体 .....	262
VII 粒子物理学简介 .....	268
VIII 现代宇宙学 .....	273
<b>附录 .....</b>	<b>281</b>
附录 A 一些物理常量 .....	281
附录 B 数学公式 .....	282
<b>参考文献 .....</b>	<b>285</b>

**[自测题]** 在研究一个实际系统的机械振动问题时,可从动力学角度抓住形成振动的最本质的因素,即惯性和弹性,便可将实际的振动系统抽象简化成一个理想模型——弹簧振子.

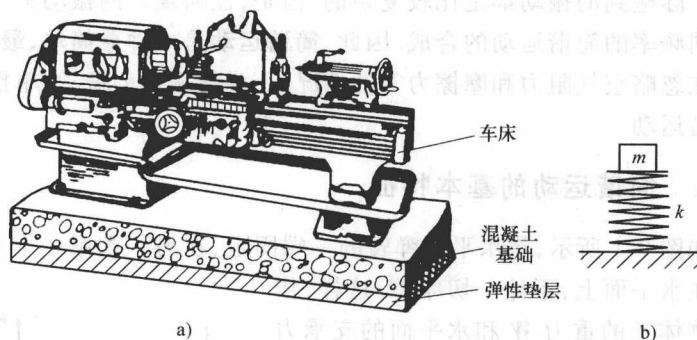


图 9-0

例如,在精密机床下面,一般都筑有混凝土基础,并在混凝土基础下铺设弹性垫层(见图9-0a).为了研究这一系统的振动情况,不妨将它作如下的简化:由于机床和混凝土基础的质量比弹性垫层的质量大得多,而振动时它们的形变又比弹性垫层小得多,因此,可以将弹性垫层简化为一根轻弹簧,而将机床和混凝土基础简化为压在弹簧上面的一个物体(可视为质点),这样便抽象成了如图9-0b所示的弹簧振子.读者试证明:它沿竖直方向振动时,与沿水平方向振动的弹簧振子(见图9-1)的振动规律完全相同,都是简谐运动(见例题9-1).

## 第9章 机械振动

物体在一定位置附近作来回往复的运动,称为机械振动.机械振动在生产 and 生活中屡见不鲜.例如,微风中树枝的摇曳,地震、钟摆的来回摆动,内燃机气缸内活塞的往复运动,一切发声物体(声源)内部的运动以及人的心脏跳动等,都是机械振动.通过仪器检测还可发现,耸立的高层建筑如电视塔等也都在振动着.

除了机械振动以外,自然界中还存在着各种各样的振动.广义地说,凡是描述物质运动状态的物理量在某一量值附近往复运动,都可叫做振动.例如,在交流电路中,电流和电压的量值随时间作周期性的变化;在电磁波通过的空间内,任意一点的电场强度与磁场强度的周期性变化;固体晶格上原子的振动……这些振动在本质上虽然和机械振动不同,但是在数学描述方法上却有很多相似之处.

## 9.1 简谐运动

实际碰到的振动都是比较复杂的.但是,任何复杂的振动都可以看做几个或多个不同频率的简谐运动的合成.因此,简谐运动是一种最简单、最基本的振动.

在忽略空气阻力和摩擦力等的情况下,弹簧振子的振动、单摆的微小摆动等都是简谐运动.

### 9.1.1 简谐运动的基本特征

如图 9-1 所示,将水平轻弹簧的一端固定,在另一端系一个质量为  $m$  的物体,放置在水平面上,不计一切摩擦.这样,作用在物体上的重力  $W$  和水平面的支承力  $F_N$  相互平衡,它们对物体运动的影响可不考虑.设物体在位置  $O$  时,弹簧为原长(即自然长度),弹簧作用于物体上的力等于零,位置  $O$  为平衡位置.假如将物体向右移动一微小距离到达  $B$  点,于是弹簧被伸长,便出现方向向左(指向平衡位置)的弹性力  $F$ ,这个力作用在物体上,驱使物体作返回平衡位置  $O$  的运动.当物体回到平衡位置  $O$  时,弹簧的作用力虽变为零,但因为物体在返回  $O$  点的过程中是被加速的,它在到达平衡位置时已具有一定的速度,由于惯性,物体并不停止运动,而是继续向左移动.在物体通过平衡位置向左运动时,弹簧逐渐被压缩,出现作用于物体上的方向向右的弹性力  $F$ ,即  $F$  仍指向平衡位置,这时力  $F$  的作用是力图阻止物体向左运动,因此,物体的运动是减速的,其速度越来越小,在抵达位置  $C$  时,速度减小到零,但此时弹簧作用在物体上的力,其大小达到最大值.于是,物体在弹性力的作用下回头向右运动,移向平衡位置  $O$ ;在向右运动的过程中,可仿照上述向左运动的过程进行讨论,情况是相类似的.这样,在弹簧的弹性力(它是恒指向平衡位置的回弹力)和物体的惯性支配下,物体就在平衡位置左右重复地运动,从而形成振动.

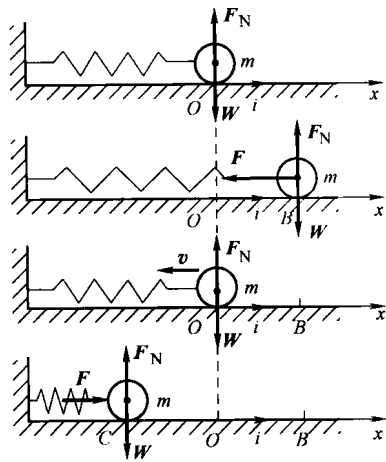


图 9-1 弹簧振子的运动

我们把上述由轻弹簧与物体(视为质点)组成的振动系统,称为弹簧振子.

现在,我们来研究弹簧振子在忽略摩擦力的理想情况下的运动规律.取平衡位置  $O$  为  $Ox$  轴的原点,  $Ox$  轴正方向向右,用单位矢量  $i$  标示(图 9-1).在弹簧的弹

性限度内,物体沿  $Ox$  轴所受的弹簧弹性力  $F$  与弹簧的伸长量(或压缩量)——物体相对于平衡位置的位移  $x$ ,满足如下的关系,即

$$F = -kxi \quad (9-1)$$

式中, $k$  是弹簧的劲度系数,负号表示力与物体位移的方向相反. 根据牛顿第二定律,物体运动方程沿  $Ox$  轴的分量式为  $F_x = ma_x$ , 这里,  $F_x = F = -kx$ ,  $a_x = \frac{d^2x}{dt^2}$ , 代入上式后,得物体的加速度为

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{k}{m}x \quad (9-2)$$

式中, $k$  和  $m$  都是正的恒量,当然,其比值  $k/m$  也是一个正的恒量,可表示为另一恒量  $\omega^2$  的平方,即  $\omega^2 = k/m$ , 则上式可写作  $\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2x$ . 可见,弹簧振子的加速度  $d^2x/dt^2$  与位置坐标  $x$  成正比,但正负号相反. 于是,进一步又可将式(9-2)写成

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2x = 0 \quad (9-3)$$

式(9-3)是一个二阶线性常微分方程. 它的求解方法可参考高等数学教材.

总之,凡是运动规律满足上述微分方程的振动,都称为简谐运动. 作简谐运动的振动系统,有时亦称为简谐振子.

值得指出,实际的振动系统通常是很复杂的. 像弹簧振子等这种简谐振子只是研究振动问题的一个理想模型. 在机械振动中,如果我们对一个实际的振动系统,从动力学角度抓住形成振动的本质因素——惯性和弹性,便可将实际的振动系统抽象、简化成弹簧振子.

### 9.1.2 简谐运动的表达式

求简谐运动的微分方程式(9-3)的解,可得简谐运动的运动函数(即振动表达式)为

$$x = A\cos(\omega t + \varphi) \quad (9-4)$$

式中, $A$  和  $\varphi$  是积分恒量.

式(9-4)表明,物体作简谐运动时,位移是时间的余弦函数. 因为余弦函数的绝对值不能大于1,所以,式(9-4)中的位移  $x$  的绝对值不能大于  $A$ . 这说明, $A$  是物体离开平衡位置的最大位移值,称为振幅. 显然, $A$  恒为正值. 式(9-4)中的  $\omega$  称为角频率(或叫圆频率), $\varphi$  称为初相. 它们的物理意义将在9.2节中再作详述.

### 9.1.3 简谐运动曲线

将式(9-4)对时间求导,即得简谐运动的速度和加速度分别为

$$v = \frac{dx}{dt} = -\omega A \sin(\omega t + \varphi) \quad (9-5)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = -\omega^2 A \cos(\omega t + \varphi) \quad (9-6)$$

其中,速度的最大值 $v_{\max} = \omega A$ 称为**速度振幅**;加速度的最大值 $a_{\max} = \omega^2 A$ 称为**加速度振幅**.从上两式可见,速度 $v$ 和加速度 $a$ 都随时间而改变,即简谐运动是一种非匀变速运动.

综上所述,当物体作简谐运动时,它的位移、速度和加速度都是时间 $t$ 的余弦或正弦函数.由于正弦或余弦函数都是有界的周期函数,因此,三者都在相应的数值范围内随时间作周期性的变化.

以时间 $t$ 为横坐标,位移 $x$ 、速度 $v$ 及加速度 $a$ 为纵坐标,可以分别绘出 $x-t$ 曲线、 $v-t$ 曲线和 $a-t$ 曲线.这里,为便于比较,我们把它们画在一起,如图9-2所示(曲线是假定 $\varphi=0$ 而绘出的,并且为了方便起见,把 $\omega t$ 作为横坐标).

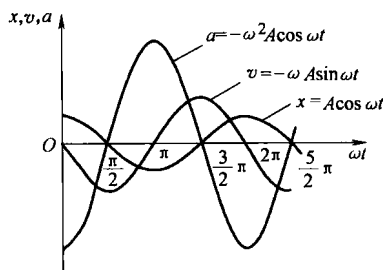


图9-2 简谐运动的 $x$ 、 $v$ 和 $a$ 与 $t$ 的关系曲线

从这三条曲线上可以看出,位移、速度和加速度都是在每隔一定的时间后,各自重复一次原来的数值,从而完成一次完全振动.既然如此,我们在研究简谐运动时,只需弄清楚一次完全振动(简称“全振动”)中的运动情况,也就掌握了简谐运动的全过程.

**问题 9-1** (1)弹簧振子作简谐振动时,它的运动有哪些特征?分别从受力情况和运动规律(位移、速度、加速度等)进行分析.

(2)一个质点在使它返回平衡位置的力的作用下,是否一定作简谐振动?拍皮球时,球的运动是不是简谐运动(设皮球与地面的碰撞是完全弹性的)?

(3)振幅 $A$ 能否是负值?当我们说 $x = -A$ 时,指的是什么意思?

**问题 9-2** 在下列运动中,哪个是简谐运动?

- (1)单摆的大角度摆动;
- (2)一个小球在半径很大的光滑下凹球面底部的小幅度摆动.

## 9.2 描述简谐运动的基本物理量

### 9.2.1 周期 频率

上面说过,由于余弦函数 $x = A \cos(\omega t + \varphi)$ 是周期性的,因此,作简谐运动的物

体在平衡位置附近的  $x = -A$  到  $x = +A$  范围内,它的运动是周期性的,围绕平衡位置每来回一次,物体就完成一次完全的振动。

振动物体完成一次全振动所需的时间称为周期,用  $T$  表示.说明物体在任意时刻  $t$  的运动状态(位置和速度)应与物体在时刻  $(t + T)$  的运动状态(位置和速度)完全相同.由式(9-4)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都是  $2\pi$ ,则物体作一次完全振动后应有  $\omega T = 2\pi$ ,于是可得振动周期

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (9-7)$$

周期的倒数叫做频率,用  $\nu$  表示,它表示单位时间内物体所作的完全振动的次数,我们以每秒振动一次作为频率的单位,称为赫兹,简称赫,符号是 Hz,即  $1\text{Hz} = 1\text{s}^{-1}$ .例如,在电动机运转时,其底座基础的振动频率为  $50\text{Hz}$ ,就是说,在  $1\text{s}$  内它振动  $50$  次.频率与周期的关系为

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (9-8)$$

由此还可知

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T} \quad (9-9)$$

即  $\omega$  表示  $2\pi\text{s}$  内完成振动的次数,称为角频率(或称为圆频率),其单位也是  $\text{s}^{-1}$ .

周期、频率和角频率这三个物理量之间有确定的相互关系.这组物理量都是用来描述振动快慢的.对弹簧振子而言, $\omega^2 = k/m$ ,而  $k$  和  $m$  是表述弹簧振子自身性质的物理量,故而周期、频率和角频率皆取决于简谐振动系统的固有性质,因而我们把它们分别称为固有周期和固有频率,并可分别求出如下:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (9-10)$$

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (9-11)$$

简谐振子皆是以其本身的固有频率或固有周期作简谐运动的。

### 9.2.2 相位 初相

物体作简谐运动时,它的运动状态可用位置和速度来描述.在任意时刻,位移和速度分别为

$$\begin{aligned} x &= A\cos(\omega t + \varphi) \\ v &= -\omega A\sin(\omega t + \varphi) \end{aligned}$$

因此,对于给定的振动系统,当振幅  $A$  和角频率  $\omega$  一定时,振动物体在任意时



刻的运动状态(即振动物体的位移  $x$  和速度  $v$ ) 取决于  $(\omega t + \varphi)$ ,  $(\omega t + \varphi)$  称为振动在时刻  $t$  的相位. 在一次全振动的过程中, 即在一个周期内, 振动系统的运动状态是完全不同的, 这就反映在相位的不同上, 因而相位是表征简谐振动系统振动状态的物理量. 如图 9-1 所示的弹簧振子, 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, 并以速度的最大值  $\omega A$  向左运动; 但当相位  $(\omega t_2 + \varphi) = \frac{3\pi}{2}$  时,  $x = 0, v = \omega A$ , 即在  $t_2$  时刻物体仍在平衡位置, 但以速度的最大值  $\omega A$  向右运动. 可见, 在  $t_1$  和  $t_2$  时刻, 由于振动相位的不同, 物体的运动状态也不相同.

用相位描述运动状态的好处在于它突出了周期性, 相位每改变  $2\pi$ , 系统就回到原来的运动状态, 而在  $0 \sim 2\pi$  之间, 不同的相位对应不同的运动状态. 相位可以描述时间上的周期性(即时间每增加一个周期, 相位改变  $2\pi$ ), 在下一章(波动)中我们将看到, 相位还可以描述空间上的周期性, 当平面波在介质中传播时, 波线上每相隔一个波长的两质元振动的相位相同, 这就是空间周期性. 所以在一切周期现象中, 相位这个概念扮演了重要的角色.

若令  $t = 0$ , 则  $\omega t + \varphi = \varphi$ , 称  $\varphi$  为初相位, 简称初相. 因此, 初相就是开始计时时刻的相位, 它表征振动系统在计时零点时的运动状态. 根据问题的需要, 我们可以任意选取计时零点, 当然, 计时零点选得不同, 初相也就不同. 例如, 图 9-1 所示的弹簧振子, 选物体到达正向最大位移的时刻为计时零点, 此时  $t = 0$ , 则式(9-4)中的  $\varphi = 0$ ; 若选物体到达负向最大位移的时刻为计时零点, 则式(9-4)中的  $\varphi = \pi$ .

### 9.2.3 相位差

相位还可用来描述频率相同的两个振动系统的振动步调. 设有两个质点沿同一直线以相同的频率、不同的振幅和初相作简谐运动, 其振动表达式分别为

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

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

则这两个振动的相位差为

$$\varphi_{12} = (\omega t + \varphi_1) - (\omega t + \varphi_2) = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (9-12)$$

相位差是不随时间  $t$  改变的恒量. 即它们在任意时刻的相位差都等于其初相差. 由这个相位差的值就可以知道它们振动的步调是否相同. 如图 9-3 所示, 当  $\varphi_{12} = 0$  (或者  $2\pi$  的整数倍) 时, 我们说这两个振动的相位相同, 即同相(见图 9-3a). 它们振动的步调完全一致, 因而同时通过平衡点, 同时到达最大位置处. 当  $\varphi_{12} = \pi$  (或者  $\pi$  的奇数倍) 时, 两个振动的位相相反, 即反相(见图 9-3b). 它们的振动步调完全不一致, 例如, 一个到达左边最大位移时, 另一个在右边最大位移处. 当  $\varphi_{12}$  为其他值时, 两个振动的步调不相一致, 一个超前, 另一个落后(见图 9-3c). 当