

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大学物理

(第3版)

(下)

主 编 罗益民 余 燕
副主编 曾卫东 成 运
主 审 叶善专

北京邮电大学出版社

· 北京 ·

序

物理学是研究物质的组成、性质、运动和相互作用,并以此阐明物质运动规律的科学.它是自然科学中最重要的基础学科之一.物理学的基本概念、方法和知识已被应用到所有的自然科学领域,因此,大学物理是一门不可替代的基础课.

大学生培养从应试教育向素质教育的转变,对大学物理课程提出了新的要求:在传授物理知识的同时,应特别注重向学生传授有关物理学的研究方法和思维方式,以提高学生的科学素质.

物理学内容广泛,难度不一.作为一名工科大学生,学习大学物理的时间和精力有限,要想在较短的时间内掌握尽可能多的物理知识,选择一本好的教材尤为重要.

这套教材将传统编写思路发扬光大,兼顾了科学发现的历史顺序和科学本身的逻辑关系.教材由浅入深地讲述了物理学基本概念,形象地描绘了物理模型,适当地介绍了物理学在其他学科和新技术领域的应用,特别是用普通物理的语言讲述了近代物理的内容,使得整套教材的可接受性突出;教材淡化了复杂的数学运算,突出了物理概念的重要性;阅读材料的选择兼顾了物理知识的应用,也反映了物理学发展的前沿动态.全套教材的编写紧扣教学大纲,密切联系了工科专业大学物理教学的实际,富有创意和特色.教材选材合理,理论严谨,内容深入浅出,语言通俗易懂,很适合于初学者阅读.

中南大学是全国工科物理教学基地之一,参加本书编写的教师多年来一直从事大学物理教学工作,有着丰富的教学经验,为基地建设作出过很大的贡献,对大学物理课程教学有深刻的认识.该套教材也是编者们对基地建设经验的总结,凝聚了编者多年的心血,是一本难得的好书.

本人有感于他们对物理教材建设和工科专业大学物理教育所作的努力和贡献,特为之序.



钱列加 谨识
于上海交通大学

第3版前言

随着近年来教学改革的不深入,大学基础物理课程的重要性更加突出,很多文科类专业都开设了大学物理课程,这不仅体现了大学物理课程是学习相关专业知识的基础,更是培养学生树立科学世界观、增强分析和解决问题的能力、建立探索和创新意识的一门素质教育课程,而且还是现代信息化社会背景下应该掌握的基本知识.为适应“高等教育面向21世纪教学内容和课程体系改革计划”的需要,根据教育部颁布的《理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求》,编者结合自己多年的教学实践经验以及国家工科物理教学基地和国家精品课程建设的体会编写成了这套教材.至今,本书已改版了三次,力求精益求精,与时俱进.

本书融合了国内外众多优秀教材的优点,以现代教育理念和现代物理思想为指导,以基础教育和素质教育为双重目标构建教材的结构体系.整套教材既继承了传统教学内容的框架,又增加了反映现代科技发展方向的前沿内容,除介绍物理学基本内容外,还适当穿插了物理学发展历史及研究方法的介绍,内容由浅入深,重点、难点突出.既能满足大学物理教学的需要,又能为素质教育作出一定的贡献是编写本书的出发点;语言通俗易懂、读起来生动有趣是编者追求的目标.

教材第1版自2004年出版以来,受到了任课教师和学生的普遍好评,本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材.根据多年来各高校使用情况的反馈意见和教学改革的需要,编者对第2版教材进行了适当的修改,并作为第3版推出,具体修改内容如下:

1. 为了适应各使用学校在教学内容和教学课时变化的实际情况,对第2版的体系结构进行了调整,使之更加符合教学规律,框架更加紧凑,结构更加简单.尤其是狭义相对论部分,考虑到学生学习时应该遵循物理学发展历程的认识,把这部分内容结合广义相对论一起放到了第五篇近代物理基础中.

2. 随着当代社会科学技术的飞速发展,人们对高科技领域的关注越来越多,为了激发学生强烈的求知欲和好奇心,满足不同学校对近代物理知识的需求,教材对近代物理的介绍增加了大量的篇幅,以便让学生对整个近代物理知识框架有一个完整的了解.这是本书的一大特色.

3. 根据使用该书的兄弟院校的反馈,重点对一些表述不够严谨,讲述不够清楚或者不恰当的地方进行了改进.同时考虑到当前中学物理课程改革的情况和高校教学情况的变化,教材借鉴了国内外教材改革的成果,博采众长,使之更具人性化、更符合教师讲授,便于学生自学和阅读.

4. 对本书中的习题进行了改进,并增加了大量习题,主要是填空题和选择题。新的题型满足当下教学实际的需要,更加适合学生通过练习掌握物理知识。

5. 对原书中所有的插图进行了重新绘制,大部分采用实物体现,更加直观,贴近生活。而且,在篇和章的开头增加了科学插图,这些插图经过了仔细挑选,与后面讲述的内容密切相关。整体上,本书第3版更加美观实用、赏心悦目,更能吸引学生的学习兴趣,也从生活的角度加深学生对物理知识的理解和运用。

6. 对书的版式进行了精心设计,使整个版面看起来一目了然,层次分明,分类清晰,便于教学。同时,全书采用双色印刷,不但突出重点,而且美观大方。

全书分上、下两册。上册内容有质点运动学、质点动力学、刚体的转动、静电场、静电场中的导体和电介质、稳恒磁场、电磁感应和电磁场;下册内容包括振动、波动、光学、气体动理论、热力学基础、狭义相对论、量子力学基础、原子核物理和粒子物理简介。此外,为开阔学生的视野,书中选编了若干篇阅读材料,内容涉及物理学研究前沿、物理学最新研究成果及物理学应用等方面的知识。考虑到非物理专业的实际情况,全书着重于物理学基本概念、基本知识及思维方式介绍,尽量避免一些繁琐的数学运算,力求使用通俗化的语言。

本书由罗益民、余燕任主编,曾卫东、成运任副主编。参与编写和讨论的有罗益民、余燕、蔡建国、廖红、唐英、周一平、胡义嘎、雷杰、吴烨、曾卫东、成运、郑文礼、杨瑞、曹丰慧、湛雄文、张鑫、王松伟、姚青荣、成丽春、马双武、范军怀、唐咸荣、韩霞、苏文刚、赵梅、苏国强等。全书最后由罗益民、余燕负责统稿和定稿。东南大学叶善专教授认真审查了全书,提出了宝贵的指导性意见;上海交通大学钱列加教授审查了本书并为本书作序;中南大学的郑小娟老师制作了本书的电子教案并提供了全部习题答案;北京邮电大学出版社为本书的出版、发行和推广做了大量的工作。在此一并致谢。

由于编者水平有限,加之时间仓促,疏漏和不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者

2014年11月

第 2 版前言

为适应“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的需要,根据教育部颁布的《非物理类理工科大学物理课程教学基本要求》,编者结合自己多年的教学实践经验以及国家工科物理教学基地和国家精品课程建设的体会编写成了这套教材。

本书融合了国内外众多优秀教材的优点,以现代教育理念和现代物理思想为指导,以基础教育和素质教育为双重目标来构建了教材的结构体系。整套教材既继承了传统教学内容的框架,又增加了反映现代科技发展方向的前沿内容,除介绍物理学基本内容外,还适当穿插了物理学发展历史及研究方法的介绍,内容由浅入深,重点、难点突出。既能满足大学物理教学的需要,又能为素质教育作出一定的贡献是编写本书的出发点;语言通俗易懂、读来生动有趣是编者追求的目标。

全套教材分为《大学物理》(上、下册)和《大学物理学习指导》,共三册并配有电子教案。

本书由中南大学和武汉理工大学的老师们共同编写,中南大学是全国工科物理教学基地之一,其大学物理课程是国家精品课程。参加本书编写工作的教师多年来一直从事大学物理教学工作,对基地建设和国家精品课程建设作出了很大的贡献,对工科物理教学积累了丰富的经验并有许多独到的见解,这些经验和体会已被融入教材之中。

教材第 1 版自 2004 年出版以来,受到了任课教师和学生的普遍好评,本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。现将第 1 版加以修改后作为第 2 版推出,主要将第 1 版的部分章节作了调整,使之更符合大多数学校的教学安排。

本书由罗益民、余燕主编,蔡建国编写第 1、2、3 章;雷杰编写第 4 章;罗益民编写第 5、6、7 章;廖红编写第 8、9 章;周一平编写第 10、11 章;唐英编写第 12 章;吴焯编写第 13、14 章。全套书最后由罗益民、余燕负责统稿和定稿。东南大学叶善专教授认真审查了全书,提出了宝贵的指导性意见;复旦大学钱列加教授审查了本书并为本书作序;中南大学的郑小娟老师制作了本书的电子教案并提供了全部习题答案;北京邮电大学出版社为本书的出版、发行和推广做了大量的工作。在此一并致谢。

由于编者水平有限,加之时间仓促,疏漏和不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者

2008 年 4 月

目 录

第三篇 振动和波动 波动光学

第 8 章 振动 2

§ 8.1 简谐振动	3
8.1.1 简谐振动的方程、速度和加速度	3
8.1.2 描述简谐振动的特征量	4
8.1.3 旋转矢量法	7
8.1.4 简谐振动的实例	11
8.1.5 简谐振动的能量	13

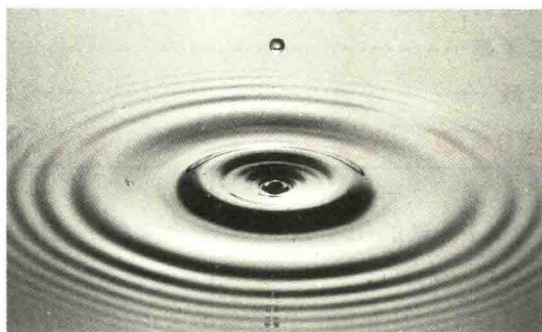


§ 8.2 简谐振动的合成	14
8.2.1 两个同方向同频率简谐振动的合成	14
8.2.2 两个同方向不同频率的简谐振动的合成	16
8.2.3 相互垂直的简谐振动的合成	17
§ 8.3 阻尼振动 受迫振动 共振	19
8.3.1 阻尼振动	19
8.3.2 受迫振动 共振	20

* § 8.4 振动的分解	22
* § 8.5 非线性振动简介	22
本章提要	24
阅读材料(八) 原子钟	25
思考题	31
习题	31

第 9 章 波动 34

§ 9.1 机械波的产生和传播	35
9.1.1 机械波的形成	35
9.1.2 描述波动的物理量	36



§ 9.2 平面简谐波的波函数	39
§ 9.3 波的能量	44
9.3.1 波的能量和能量密度	44
9.3.2 波的能流和能流密度	45
9.3.3 球面波 波的吸收	46
* 9.3.4 声波	47
§ 9.4 波的衍射 干涉	50
9.4.1 惠更斯原理 波的衍射	50

9.4.2 波的叠加原理 波的干涉	51	10.2.1 杨氏双缝干涉	89
§ 9.5 驻波	54	10.2.2 菲涅耳双面镜 劳埃德镜	91
9.5.1 驻波的形成	54	§ 10.3 分振幅干涉	93
9.5.2 驻波的波动方程	56	10.3.1 薄膜干涉	93
9.5.3 半波损失	58	10.3.2 薄膜的等厚干涉	95
* 9.5.4 弦线振动的简正模式	59	10.3.3 薄膜的等倾干涉	98
§ 9.6 多普勒效应	60	10.3.4 迈克耳孙干涉仪	100
§ 9.7 电磁波	63	10.3.5 相干长度	101
* 9.7.1 电磁波的波动方程	63	§ 10.4 光的衍射	102
9.7.2 电磁波的辐射	65	10.4.1 光的衍射现象及其分类	102
9.7.3 平面电磁波的传播	68	10.4.2 惠更斯-菲涅耳原理	103
9.7.4 电磁波谱	69	10.4.3 单缝衍射	103
9.7.5 电磁波的能量和动量	70	10.4.4 圆孔夫琅禾费衍射	107
9.7.6 电磁波的动量	71	10.4.5 光学仪器的分辨能力	107
* § 9.8 非线性波简介	72	§ 10.5 光栅	109
本章提要	73	10.5.1 光栅衍射现象	110
阅读材料(九) 超声、次声和噪声	75	10.5.2 光栅衍射规律	110
思考题	82	10.5.3 光栅光谱	113
习题	83	§ 10.6 X射线衍射	114
第10章 光学	86	§ 10.7 光的偏振	115
§ 10.1 光的相干性	87	10.7.1 自然光 偏振光	115
10.1.1 光源	87	10.7.2 偏振片的起偏与检偏	116
10.1.2 光的相干性	87	10.7.3 马吕斯定律	117
10.1.3 光程 光程差	88	10.7.4 反射和折射光的偏振	118
		10.7.5 晶体的双折射	119
§ 10.2 分波面干涉	89	§ 10.8 偏振光的干涉 人为双折射 旋光现象	120
		10.8.1 偏振光的干涉	120
		10.8.2 人为双折射	122
		10.8.3 旋光现象	122
		* § 10.9 现代光学简介	123

10.9.1 全息技术	123
10.9.2 非线性光学简介	125
10.9.3 光纤技术	127
本章提要	130
阅读材料(十) 红外线与紫外线	131
思考题	136
习题	138

第四篇 热物理学

第 11 章 气体动理论 142

§ 11.1 平衡态 温度 理想气体状态方程	143
11.1.1 平衡态	143
11.1.2 温度	144
11.1.3 理想气体状态方程	144
11.1.4 统计规律的基本概念	145



§ 11.2 理想气体的压强	146
11.2.1 理想气体的微观模型 平衡状态气体的统计假设	147
11.2.2 理想气体压强公式及其统计意义	147
§ 11.3 温度的微观本质	149
11.3.1 温度的微观解释	149
11.3.2 方均根速率	150
§ 11.4 能量均分定理 理想气体的内能	151

11.4.1 分子的自由度	151
11.4.2 能量均分定理	152
11.4.3 理想气体的内能	153
§ 11.5 麦克斯韦速率分布	153
11.5.1 麦克斯韦速率分布律	154
11.5.2 三个统计速率	155
§ 11.6 玻耳兹曼分布	159
§ 11.7 气体分子的平均碰撞频率和平均自由程	161

* § 11.8 范德瓦尔斯方程	163
------------------------	-----

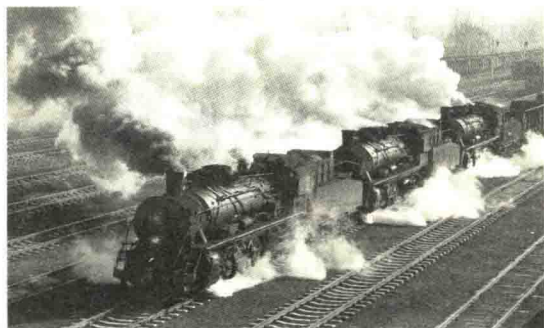
* § 11.9 气体内的输运过程	165
-------------------------	-----

11.9.1 内摩擦现象(黏滞现象)	165
11.9.2 热传导现象	166
11.9.3 扩散现象	167

本章提要	167
阅读材料(十一) 真空	169
思考题	171
习题	171

第 12 章 热力学基础 173

§ 12.1 准静态过程	174
12.1.1 准静态过程	174
12.1.2 内能、功和热量	174
12.1.3 准静态过程的功和热量	175



14.1.1	黑体辐射	257	14.7.4	力学量测量结果概率,平均值	291
14.1.2	普朗克量子假设和普朗克公式	259	14.7.5	算符的对易和不确定关系	292
					
§ 14.2	光的量子性	262	§ 14.8	氢原子的量子理论	294
14.2.1	光电效应	262	14.8.1	氢原子的薛定谔方程	294
14.2.2	康普顿效应	266	14.8.2	\hat{L}_z 及 \hat{L}^2 的本征值及本征函数	295
§ 14.3	玻尔的氢原子理论	268	14.8.3	径向波函数的求解	297
14.3.1	氢原子光谱	268	14.8.4	三个量子数	298
14.3.2	玻尔氢原子理论	269	14.8.5	氢原子的波函数	299
14.3.3	玻尔氢原子理论	269	14.8.6	电子云	301
§ 14.4	实物粒子的波粒二象性	272	§ 14.9	多电子原子中的电子分布	303
14.4.1	德布罗意波	272	14.9.1	电子自旋,自旋量子数	303
14.4.2	德布罗意波的实验证明	273	14.9.2	多电子原子中的电子分布	304
14.4.3	德布罗意波的应用	274	§ 14.10	激光原理	308
14.4.4	德布罗意波的统计解释	275	14.10.1	激光的特性	308
§ 14.5	不确定关系	275	14.10.2	原子的激发、辐射与吸收	309
§ 14.6	薛定谔方程	279	14.10.3	粒子数反转分布	310
14.6.1	波函数 概率密度	279	14.10.4	光学谐振腔	312
14.6.2	薛定谔方程	281	14.10.5	激光器	313
14.6.3	一维无限深方势阱	283	* § 14.11	半导体	314
14.6.4	一维方势垒 隧道效应	284	14.11.1	固体的能带	314
14.6.5	一维线性谐振子 * 宇称	286	14.11.2	导体、绝缘体及半导体的能带结构	315
§ 14.7	算符与平均值	287	14.11.3	本征半导体和杂质半导体	315
14.7.1	算符的本征值和本征函数	287	14.11.4	pn 结	317
14.7.2	力学量的算符表示	288	14.11.5	光生伏特效应	317
14.7.3	态叠加原理	290	§ 14.12	超导	318
			14.12.1	超导的基本现象和性质	318
			14.12.2	两类超导体	319
			14.12.3	超导现象的微观机理	320
			14.12.4	超导的应用前景	321
			本章提要	322	
			阅读材料(十四) 扫描隧穿显微镜	324	
			思考题	328	

习题 329

第 15 章 原子核物理和粒子物理简介 332

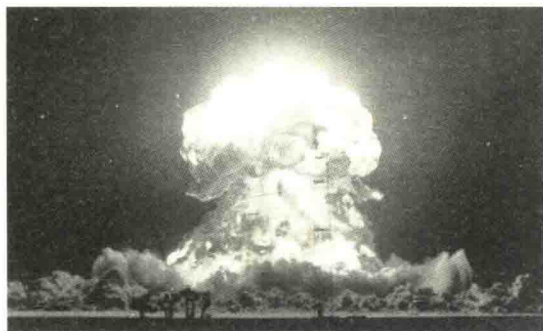
§ 15.1 原子核的基本性质 333

15.1.1 原子核的组成 333

15.1.2 原子核的大小 333

15.1.3 核力 334

15.1.4 核的自旋与磁矩 334



§ 15.2 原子核的结合能 裂变和聚变 335

15.2.1 原子核的结合能 335

* 15.2.2 重核的裂变 337

* 15.2.3 轻核的聚变 337

§ 15.3 原子核的放射性衰变 338

15.3.1 放射性衰变 339

15.3.2 放射性衰变规律 340

* 15.3.3 放射性强度 341

* § 15.4 粒子物理简介 342

15.4.1 粒子的基本特征 342

15.4.2 粒子的相互作用及其统一模型 ... 342

15.4.3 粒子的分类 343

15.4.4 夸克模型 345

本章提要 346

阅读材料(十五) 磁共振成像技术 347

思考题 350

习题 351

习题答案 352

第三篇

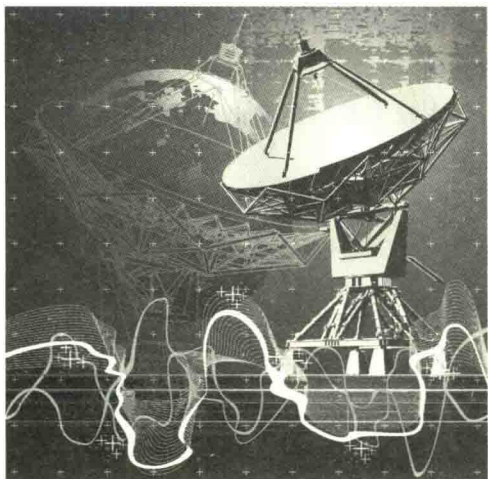
振动和波动 波动光学

活塞的往复运动伴随着机器的轰鸣,心脏的跳动伴随着血液的循环,投石于静水之中,一石会激起千层浪,颤动的琴弦会发出悦耳动听的音乐.自然界中,振动和波现象无处不在.亘古至今,人们通过光来观察和认识周围的世界,通过声来传递信息和交流感情,光和声都是波,物理学中通常称为光波和声波.近代电磁波技术的发展和运用,彻底更新了传统的信息传递和交流模式,不仅将人类居住的地球缩小成了一个“村”,而且使得太阳系、银河系,甚至整个宇宙也不再遥不可及.

光(主要指可见光)是人类乃至各种生物观察和感受外部世界的主要媒介,但对它的本性的认识却经历了漫长的过程.最早、也最容易观察到的性质是光的直线传播,这和粒子的运动路径类似,因而,人们自然认为光是由一些微粒组成的,这就是光的粒子学说.牛顿被认为是粒子学说的代表人物,和牛顿同时代的惠更斯有不同的观点,他认为光是一种波动,但惠更斯没能建立起系统的、有说服力的理论.直到进入19世纪,才由托马斯·杨和菲涅耳等人在光的干涉和衍射等实验事实的基础上,建立了光的波动理论,使人们有理由相信光是一种波动,而光的直线传播现象只不过是光在传播过程中的一种极限情形.其后马吕斯等人对光的偏振现象进行了研究,进一步确定光是横波.光波和声波虽然都是波,但两者显然是有区别的,因为声波不能在真空中传播,表明声波是机械波,需要实物为传播媒介;但光波可在真空中传播,说明光波的传播不需要实物,因而光波不是机械波.1865年,麦克斯韦预言了电磁波的存在,1888年,赫兹实验证实了电磁波理论,由于光的传播速度与电磁波的传播速度相同,因而人们逐渐认识到,光实际上是某一波长(频率)范围内的电磁波.

19世纪末20世纪初,光电效应、康普顿效应等一系列新的实验事实的出现,是光的波动学说所无法解释的.这导致人们对光的本性的认识进一步深化,光不仅具有波动性,而且具有粒子性,也即具有波粒二象性.关于光的波粒二象性,本书将在第五篇中详细介绍.

本篇主要内容有:简谐振动的描述,简谐振动的合成,机械波的产生和传播,平面简谐波波函数,波的干涉和衍射,多普勒效应,光的干涉(分波面干涉、分振幅干涉),光的衍射(单缝衍射、圆孔衍射、光栅衍射、X射线衍射),以及光的偏振.





第 8 章

振 动

物 体在其平衡位置附近作来回往复的运动,称为**机械振动**(mechanical oscillation). 振动是常见的自然现象,如钟摆的振动、乐器的弦振动以及因风力、地震及机器设备等原因引起的振动等. 除了机械振动外,还有电磁振动,如交流电路中电流或电压的振动(又称振荡),无线电波中电场和磁场的振荡等.

一般说来,任何一个物理量随时间作周期性变化,都可称为振动. 振动现象多种多样,但遵从的基本规律却是相同的. 在振动中,最简单最基本的振动是简谐振动(又称自由振动),其他任何复杂的振动都可以分解为若干简谐振动的叠加. 而波是振动在空间的传播,所以振动学是波动学的基础.

本章主要讨论简谐振动和振动的合成,并简要介绍阻尼振动、受迫振动和共振现象以及非线性振动.

§ 8.1 简谐振动

一个作往复运动的物体, 如果在其平衡位置附近的位移按余弦函数(或正弦函数)的规律随时间变化, 这种运动称为**简谐振动**(simple harmonic motion), 简谐振动是振动中最简单最基本的振动形式, 任何一个复杂的振动都可以看成是若干个简谐振动的叠加.

8.1.1 简谐振动的方程、速度和加速度

我们以弹簧振子为例来研究简谐振动的运动规律. 如图 8-1 所示, 将一根轻弹簧一端固定, 另一端系一质量为 m 的物体组成系统, 一旦受到扰动, 物体将在弹性力作用下往复运动. 为了简化问题, 假设物体所受的阻力可忽略不计, 并可将物体作质点处理, 这样构成的质点-弹簧系统称之为**弹簧振子**(spring oscillator)或**谐振子**. 显然, 这是一个理想模型, 它在研究振动问题中具有普遍的代表性. 设弹簧长度为原长时, 物体处于平衡状态, 此时物体所在位置为系统平衡位置, 而此时物体质心所在位置为坐标原点 O ; 当物体离开平衡位置位移 x 时, 受到弹簧的弹性力 F 作用, 根据胡克定律, 有

$$F = -kx \quad (8-1)$$

其中 k 为弹簧的**劲度系数**(coefficient of stiffness), 它由弹簧本身的性质(材料、形状、长短等)所决定, 负号表示力的方向与位移方向相反, 即始终指向平衡位置, 这种有使物体回到平衡位置的趋势的力称为**回复力**(restoring force). 由牛顿第二定律, 有

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

将上式两边除以 m , 由于 k 和 m 都是正常量, 可令 $\omega^2 = k/m$, 则得

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

即

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega^2 x = 0 \quad (8-2)$$

(8-2)式就是物体的振动方程, 它说明作简谐振动的物体, 其**加速度和位移成正比而方向相反**, 它描述了物体作简谐振动的普遍规律.

由微分方程理论知, (8-2)式的通解具有如下几种表述形式:

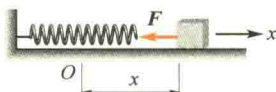


图 8-1 弹簧振子

$$x = A \cos(\omega t + \varphi) \text{ 或 } x = A \sin(\omega t + \varphi')$$

也可用指数形式表述为

$$x = A_1 e^{i\omega t} + A_2 e^{-i\omega t}$$

需要指出的是,上述 x 的几种表述方式仅仅是形式上不同,本质上是一样的. 如令 $\varphi' = \varphi + \frac{\pi}{2}$, 则正弦函数就可变为余弦函数, 而无论正弦函数或余弦函数均可用指数形式表示. 按照惯例, 本文统一采用余弦函数作为方程(8-2)式的解, 即

$$x = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (8-3)$$

其中 A, φ 为由初始条件决定的积分常量. 其物理意义将在下面讨论.

(8-3)式表明:当物体作简谐振动时,其位移是时间的余弦函数,这是简谐振动的运动学特征,通常将其作为判定一个系统是否作简谐振动的运动学判据.

从动力学角度分析,如果物体离开平衡位置后,受到一个方向总是指向平衡位置的回复力作用,则物体将作机械振动. 如果回复力的大小始终与位移成正比(称为线性回复力),那么该物体将作简谐振动. 这是简谐振动的动力学特征,因而(8-1)式可作为简谐振动的动力学判据.

将(8-3)式对时间求导数,得物体的速度表达式为

$$v = -A\omega \sin(\omega t + \varphi) \quad (8-4)$$

当 $t=0$ 时, $x = x_0, v = v_0$, 代入(8-3)式和(8-4)式,得

$$x_0 = A \cos \varphi, \quad v_0 = -A\omega \sin \varphi$$

由此解得

$$\begin{cases} A = \sqrt{x_0^2 + \frac{v_0^2}{\omega^2}} \\ \varphi = \arctan\left(-\frac{v_0}{\omega x_0}\right) \end{cases} \quad (8-5)$$

可见 A 和 φ 由初始位移和初始速度决定.

将(8-4)式对时间求导数,得物体的加速度为

$$a = -\omega^2 A \cos(\omega t + \varphi) \quad (8-6)$$

比较(8-3)式和(8-6)式可得

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

这正是(8-2)式,这也验证了余弦函数确是方程(8-2)式的解.

8.1.2 描述简谐振动的特征量

一、振幅 A

由(8-3)式可知,物体的最大位移不能超过 A , 物体偏离平衡

位置的最大位移的绝对值叫作振幅(amplitude). 振幅是描述物体振动强弱的物理量,它不仅给出了物体的运动范围,还决定了物体振动的最大速度、最大加速度和振动能量. 由(8-5)式知振幅 A 是由初始条件决定的.

二、周期 T 、频率 ν 和角频率 ω

作简谐振动的物体,其振动状态发生周而复始的一次变化称为一次全振动,完成一次全振动所需的时间称为振动的周期(period),用 T 表示. 因为

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

所以

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (8-7)$$

周期 T 的倒数 $\nu = 1/T$ 代表物体在单位时间内发生全振动的次数,称为振动的频率(frequency). 因为

$$\omega = 2\pi\nu \quad (8-8)$$

故称 ω 为振动的角频率(angular frequency),也称圆频率.

T 、 ν 和 ω 完全由简谐振动物体自身的性质决定,即由振动物体的质量和回复力系数决定,与运动的初始条件无关. 对于弹簧振子,有

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

因此, T 、 ν 和 ω 分别称为简谐振动物体的固有周期、固有频率和固有角频率. 在国际单位制中, ν 的单位是 Hz(赫兹), ω 的单位是 $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ (弧度·秒⁻¹). T 、 ν 和 ω 都反映了简谐振动的周期性.

三、相位

频率或周期描述振动的快慢,振幅描述振动的范围. 此外还有一个重要的物理量($\omega t + \varphi$),称为相位(phase)或位相. 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. 同理,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”这一物理量来描述. 由(8-3)式和(8-4)式可看出,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相位($\omega t + \varphi$). 例如,图 8-1 中的弹簧振子,当相位($\omega t_1 + \varphi$) = $\pi/2$ 时, $x=0$, $v=-\omega A$,即在 t_1 时刻物体处于平衡位置,并以最大速率 ωA 向左运动;而当相位($\omega t_2 + \varphi$) = $3\pi/2$ 时, $x=0$, $v=\omega A$,即在 t_2 时刻物体也处于平衡位置,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,能充分体现出简谐运动的周期性,因而相位的取值范围规定为 $0 \sim 2\pi$ 或 $-\pi \sim \pi$.

当 $t=0$ 时,相位 $(\omega t + \varphi) = \varphi$,故 φ 叫作初相位,简称初相.由(8-5)式可见,和振幅 A 一样, φ 也由初始条件决定.

例 8-1

一轻弹簧,原长 l_0 ,上端固定,下端悬挂一质量 $m = 2 \times 10^{-2} \text{ kg}$ 的重物后伸长了 $\Delta l = 9.8 \text{ cm}$, Δl 称为静止形变.若手托重物使弹簧缩回原长,然后放手,则物体上下振动.(1)求证该系统的振动是简谐振动,并写出振动表达式(取开始振动时为计时零点);(2)若取物体经平衡位置向下运动时刻开始计时,写出简谐振动的运动学方程,并计算振动频率.

解 (1) 如图 8-2 所示,设弹簧劲度系数为 k ,重物质量为 m ,物体未开始振动时处于 O 位置,此时物体所受重力和弹力平衡,可见 O 位置为其平衡位置.取平衡位置为坐标原点,向下为 x 轴正方向,则有

$$mg = k\Delta l$$

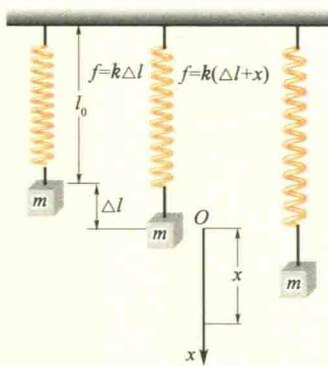


图 8-2 例 8-1 图

当物体运动至某一位置 x 时,弹簧的总伸长量为 $\Delta l + x$,故物体位移为 x 时所受的合外力为

$$F = mg - k(\Delta l + x) = -kx$$

根据牛顿第二定律,有

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = mg - k\Delta l - kx = -kx$$

于是

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0$$

若令

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

则上式可改写为

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

此为简谐振动的微分方程,故可判断物体的振动是简谐振动,其振动的角频率为

$$\begin{aligned} \omega &= \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{g}{\Delta l}} = \sqrt{\frac{9.8}{0.098}} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \\ &= 10 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

按题意给出的初始条件: $t=0$ 时, $x_0 = -\Delta l$, $v_0 = 0$,可求出振幅为

$$A = \sqrt{x_0^2 + \frac{v_0^2}{\omega^2}} = 0.098 \text{ m}$$

$$\varphi = \arctan\left(-\frac{v_0}{\omega x_0}\right) = 0, \pi$$

利用 $x_0 = A \cos \varphi < 0$,故取 $\varphi = \pi$,所以物体振动的运动学方程为

$$x = 9.8 \times 10^{-2} \cos(10t + \pi) (\text{m})$$

(2) 按题意 $t=0$ 时, $x_0 = 0$, $v_0 > 0$,可求得

$$\varphi = \arctan\left(-\frac{v_0}{\omega x_0}\right) = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}$$

根据 $t=0$ 时, $v_0 > 0$ 条件,故取 $\varphi = \frac{3\pi}{2}$,或 $\varphi =$

$-\frac{\pi}{2}$,因此,物体振动方程为

$$x = 9.8 \times 10^{-2} \cos\left(10t + \frac{3\pi}{2}\right) (\text{m})$$