

21 世纪高等学校教材

大学物理学

(下册)

上海交通大学物理教研室 编

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书是上海交通大学物理教研室教师根据 2004 年教育部新颁发的“非物理类理工学科学大学物理课程教学基本要求”，结合多年的教学实践而编写的教材。全书分为两册，上册包括：力学、狭义相对论、机械振动、机械波和热物理学；下册包括：电磁学、波动光学和量子物理学。

本书为非物理专业的大学物理教材，在保持基础扎实、内容简练的基础上，体现了视点高、创意新和内容现代化的特色。本书可作为高等院校工科各专业的大学物理教科书，也可作为综合大学和师范院校非物理专业的教材或参考书。

21 世纪高等学校教材

编审委员会

顾 问： 韩正之

执行主任： 百 文

副 主 任： 胡敬群 高 景 靳全勤 张华隆

蒋凤瑛 冯 颖 普杰信 程全洲

潘群娜 杨裕根 徐祖茂 曹天守

宓一鸣 姜献峰 李 敏 李湘梅

闫洪亮 陈树平 包奇金宝 刘克成

白丽媛 戴 兵 张占山 张红梅

前 言

根据 2004 年教育部新颁发的“非物理类理工学科大学物理课程教学基本要求”，为了适应物理学和科学技术的发展，结合多年的教学实践，我们编写了这套大学物理教材。在编写过程中，我们借鉴了部分国内外新版优秀教材，力求贯彻理论体系少而精、理论联系实际的原则，做到在加强理论基础的叙述、加强对学生分析与解决实际问题能力培养的同时，增加对近代和现代物理学知识、观点的介绍。在教材编写过程中，我们注重把培养学生具有科学的思维能力、辩证分析的能力和科学的研究方法作为目标。同时，我们还注重加强工科大学生的科学素养的培养，拓宽学生的科学视野。

本书采用国际单位制。书中物理量的名称和表示符号尽量采用国家现行标准。

本书分为上下两册，上册包括：力学、狭义相对论、机械振动、机械波、平衡态理论和热力学基础。下册包括：电磁学、波动光学和量子物理学。

目录中带 * 的内容可以作为选讲内容，也适合学生自学。

本书由高景主编。参加编写工作的有：李铜忠（第 1、2、3、4、5、6 章和第 24 章），孙迺疆（第 7、8 章），董占海（第 9、10 章和第 21、22、23 章），袁晓忠（第 11、12、13、14、15、16、17 章），高景（第 18、19、20 章）。张炽伟老师编写了全书各章的思考题和习题。

由于编者水平有限，编写时间较仓促，书中错误之处在所难免。我们衷心希望广大读者提出宝贵意见。

上海交通大学物理教研室

目 录

第 11 章 静电场	1
11.1 电荷	1
11.2 库仑定律	3
11.2.1 电力	3
11.2.2 点电荷	3
11.2.3 库仑定律	4
11.2.4 电力叠加原理	4
11.3 电场强度	5
11.3.1 电场	5
11.3.2 电场强度	5
11.3.3 电场强度的计算	6
11.4 高斯定理	13
11.4.1 电场线	13
11.4.2 电通量	14
11.4.3 高斯定理	15
11.5 高斯定理的应用	17
11.6 环流定理 电势	19
11.6.1 环流定理	20
11.6.2 环流定理的物理意义	20
11.6.3 电势差和电势	21
11.7 电势的计算	22
11.7.1 点电荷电场中的电势	22
11.7.2 点电荷系电场中的电势	22
11.7.3 连续分布电荷电场中的电势	22
11.8 电势与电场强度的关系	25
11.8.1 等势面	25
11.8.2 等势面的性质	26
11.8.3 电势梯度	26

习题 11	29
思考题 11	31

第 12 章 导体电学

34

12.1 静电场中的导体	34
12.1.1 导体的微观结构	34
12.1.2 导体的静电平衡	34
12.1.3 静电平衡下导体上的电荷分布	35
12.1.4 静电屏蔽	37
12.1.5 尖端放电及其应用	37
12.2 电容和电容器	40
12.2.1 孤立导体的电容	40
12.2.2 电容器的电容	41
12.2.3 几种常见的电容器	41
12.2.4 电容器的连接	43
12.3 传导电流	44
12.3.1 电流强度和电流密度	44
12.3.2 欧姆定律的微分形式	45
12.3.3 焦耳定律的微分形式	46
12.4 电动势 稳恒电场	47
12.4.1 电动势	47
12.4.2 稳恒电场	48
12.4.3 电路上两点间的电势差	49
习题 12	50
思考题 12	51

第 13 章 电介质

52

13.1 电介质的极化	52
13.1.1 现象	52
13.1.2 电介质极化的微观模型	52
13.2 极化强度和极化电荷	54
13.2.1 电极化强度	54
13.2.2 极化电荷	55
13.3 介质中的静电场	56

13.3.1	介质中的场强	56
13.3.2	介质中静电场的规律	57
13.3.3	介质电极化率	57
13.4	电位移矢量	58
13.4.1	闭合曲面内的极化电荷	58
13.4.2	电位移矢量	58
13.4.3	电位移矢量的应用	59
13.5	静电场能	60
13.5.1	带电体系的静电能	60
13.5.2	点电荷之间的相互作用能	61
13.5.3	电容器储存的静电能	61
13.5.4	静电场能 电场能量密度	62
习题 13	65
思考题 13	66

第 14 章 稳恒磁场

14.1	磁场的描述	67
14.1.1	基本磁现象	67
14.1.2	磁感应强度及洛伦兹力公式	67
14.2	毕奥-萨伐尔定律	69
14.2.1	毕奥-萨伐尔定律	69
14.2.2	毕奥-萨伐尔定律的应用	70
14.3	磁高斯定理 安培环路定理	75
14.3.1	磁通量	75
14.3.2	磁高斯定理	76
14.3.3	安培环路定理	76
14.3.4	安培环路定理的应用	78
14.4	磁场对载流导线的作用	82
14.4.1	安培力公式	82
14.4.2	载流线圈在磁场中受到的力矩	83
14.4.3	磁力的功	85
14.5	带电粒子的运动	88
14.5.1	运动带电粒子的磁场	88
14.5.2	带电粒子在匀强磁场中的运动	89

14.5.3 霍耳效应	90
习题 14	92
思考题 14	95

第 15 章 磁介质

15.1 顺磁性和抗磁性	97
15.1.1 电子的磁矩	97
15.1.2 磁场中的核外电子	98
15.1.3 抗磁性和顺磁性	98
15.2 磁化强度和磁化电流	100
15.2.1 磁化强度	100
15.2.2 磁化电流	100
15.3 介质中的磁场 磁场强度	102
15.3.1 介质中磁场的高斯定理	103
15.3.2 磁场强度 介质中磁场的安培环路定理	103
15.3.3 各向同性的磁介质	104
15.4 铁磁性	105
15.4.1 铁磁质的磁滞回线	106
15.4.2 铁磁质的理论解释	106
15.4.3 磁材料的应用	107
习题 15	108
思考题 15	109

第 16 章 变化的电磁场

16.1 电磁感应定律	110
16.1.1 电磁感应现象	110
16.1.2 法拉第定律	111
16.2 动生电动势	113
16.2.1 动生电动势的产生	113
16.2.2 洛伦兹力做功问题	115
16.2.3 动生电动势的计算	115
16.3 感生电动势	117
16.3.1 感生电动势和感应电场	117
16.3.2 感应电场的性质	119

16.3.3	涡电流和趋肤效应	120
16.3.4	感生电动势的计算	121
16.4	自感和互感	125
16.4.1	自感	125
16.4.2	互感	126
16.5	电容和电感电路中的暂态过程	129
16.5.1	LR 电路	129
16.5.2	RC 电路	131
16.6	磁场能量	132
16.6.1	自感磁能	132
16.6.2	互感磁能	133
16.7	位移电流	135
16.7.1	位移电流假设	135
16.7.2	全电流定律	137
16.7.3	位移电流性质	138
16.8	麦克斯韦电磁场方程组	140
	习题 16	141
	思考题 16	143
第 17 章 电磁波		145
17.1	电磁波波动方程	145
17.2	电磁波的性质	146
17.2.1	性质	146
17.2.2	坡因廷矢量	148
17.2.3	辐射压强	149
* 17.3	振荡电偶极子的辐射	149
17.3.1	电磁波的产生	149
17.3.2	赫兹实验	151
	习题 17	152
	思考题 17	153
第 18 章 光的干涉		154
18.1	光的相干性	154
18.1.1	光的电磁理论	154

18.1.2	光源的发光机制与特点	156
18.1.3	光的相干性	157
18.2	双缝干涉	159
18.2.1	杨氏双缝实验	159
18.2.2	应用分波阵面方法的其他实验	160
18.3	薄膜干涉	162
18.3.1	薄膜干涉的复杂性	162
18.3.2	等倾干涉条纹	163
18.3.3	等厚干涉条纹	165
18.3.4	增透膜和增反膜	167
18.3.5	迈克尔逊干涉仪	168
	习题 18	170
	思考题 18	170
第 19 章 光的衍射		173
19.1	光的衍射现象	173
19.1.1	惠更斯-菲涅耳原理	174
19.1.2	单缝夫琅禾费衍射	174
19.2	圆孔衍射和光学仪器的分辨本领	177
19.3	光栅衍射	179
19.3.1	衍射光栅	179
19.3.2	光栅方程	180
19.3.3	光栅光谱和分辨本领	181
* 19.4	X射线的衍射	183
	习题 19	185
	思考题 19	186
第 20 章 光的偏振		187
20.1	光的偏振现象	187
20.1.1	偏振光和自然光	187
20.1.2	偏振片 马吕斯定律	189
20.2	反射和折射时的偏振现象	191
20.3	晶体的双折射现象	192
20.4	偏振光的获得与检验	194

习题 20	195
思考题 20	195

第 21 章 量子光学基础

21.1 引言	197
21.2 普朗克的能量子假说	197
21.2.1 热辐射现象	197
21.2.2 黑体辐射的基本规律	199
21.2.3 普朗克的能量子假说	201
21.3 爱因斯坦的光量子假设	202
21.3.1 光电效应	202
21.3.2 爱因斯坦的光量子假设	203
21.3.3 康普顿效应	205
21.4 氢原子光谱 玻尔理论	209
21.4.1 氢原子光谱实验规律	209
21.4.2 经典原子模型的困难	211
21.4.3 玻尔理论	211
21.5 激光器的工作原理	214
21.5.1 自发辐射、受激辐射和受激吸收	214
21.5.2 粒子数反转和光放大	216
21.5.3 激光器的工作原理	216
习题 21	219
思考题 21	220

第 22 章 量子力学基础

22.1 实物粒子的波动性	221
22.1.1 光的波粒二象性	221
22.1.2 德布罗意物质波假设	221
22.1.3 物质波的实验验证	223
22.2 波函数及统计解释	224
22.2.1 波函数	224
22.2.2 波函数的统计解释	224
22.2.3 微观粒子的波粒二象性	225
22.3 不确定性关系	226

22.3.1	位置和动量不确定关系	226
22.3.2	能量和时间不确定关系	228
22.4	薛定谔方程	229
22.4.1	薛定谔方程的建立	229
22.4.2	定态薛定谔方程	231
22.5	力学量算符的本征值问题	232
22.5.1	力学量的算符表示	232
22.5.2	算符的本征值问题	233
22.6	薛定谔方程的应用	233
22.6.1	一维无限深势阱中的粒子	234
22.6.2	一维谐振子(抛物线势阱)	238
22.6.3	一维散射问题	240
22.7	氢原子量子理论	242
22.7.1	角动量算符的本征值问题	243
22.7.2	氢原子的能量和电子几率密度	245
22.8	电子的自旋 泡利不相容原理	246
22.8.1	电子的自旋	246
22.8.2	泡利不相容原理	248
	习题 22	249
	思考题 22	250

第 23 章 固体的量子理论 251

23.1	晶体	251
23.2	固体的能带结构	252
23.2.1	能带	252
23.2.2	能带的宽度	254
23.2.3	满带、导带和价带	254
23.2.4	导体、半导体和绝缘体	255
23.3	半导体的电子论	256
23.3.1	近满带和空穴	256
23.3.2	n 型半导体和 p 型半导体	257
23.3.3	p-n 结	258
* 23.4	超导现象	260
23.4.1	零电阻	260

23.4.2	完全抗磁性	261
23.4.3	临界磁场与临界电流	262
23.4.4	两类超导体	262
23.4.5	BCS 理论	263
习题 23		264
思考题 23		265

第 24 章 原子核物理和粒子物理简介 266

24.1	原子核的基本性质	266
24.1.1	原子核的组成	266
24.1.2	原子核的模型	268
24.1.3	核力和介子	269
* 24.2	原子核的量子性质	270
24.2.1	原子核的自旋	270
24.2.2	原子核的磁矩	271
24.2.3	核磁共振	272
24.3	原子核的放射性衰变	273
24.3.1	放射性衰变规律	273
24.3.2	α 衰变	274
24.3.3	β 衰变	275
24.3.4	γ 衰变	276
24.4	核裂变和核聚变	276
24.4.1	原子核的结合能	276
24.4.2	重核的裂变	278
24.4.3	轻核的聚变	280
* 24.5	粒子物理简介	281
24.5.1	粒子及其分类	282
24.5.2	强子的夸克模型	283
24.5.3	基本粒子的相互作用	286
24.5.4	粒子的对称性和守恒定律	287

参考答案		290
------	--	-----

第 11 章 静电场

电量不变的静止电荷产生的场称为静电场,通过本章的学习,要掌握好静电场的有关性质,会用库仑定律及高斯定理计算不同带电系统所产生的静电场。这一章的一条主线是场,爱因斯坦说过:“我们有两种存在,实物和场,场是物理学中出现的新概念,是自牛顿时代以来最重要的发现。用来描述物理现象的最重要的不是带电体,也不是粒子,而是在带电体之间空间的场,这需要用很大的科学想象力才能理解。”场的种类很多:有标量场,如温度场和密度场;有矢量场,如速度场。而更为重要的是所谓的引力场、电磁场、核力场等等,它们是客观实体,有质量、能量和角动量,是物质——一种具有特殊形态的物质。

11.1 电荷

电荷是物质的一种属性。很早人们就发现,用毛皮摩擦过的琥珀能够吸引羽毛、小纸片、头发等轻微物体,如图11-1所示。这时,我们就说琥珀和毛皮这两样物体都已处于带电状态,它们分别带有电。处于带电状态的物体,称为带电体或电荷。使物体带电称为起电,用摩擦的方法使物体带电称为摩擦起电。

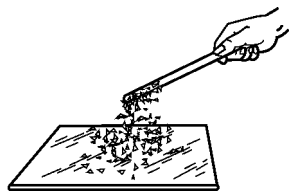


图 11-1

通过对电荷的各种相互作用和效应的研究,人们现在认识到电荷的基本特性有以下几方面:

1. 电荷的正负性

通过大量实验的研究和对物质结构的认识,人们逐步认识到电荷只有两种,即正电荷和负电荷。现在已经知道,宏观物体都是由分子、原子组成的,任何化学元素的原子,从微观上看都含有一个带有正电的原子核和若干带有负电的电子。在正常状态下,原子里电子所带的负电和原子核所带的正电相等,原子内的净电荷为零。不同原子束缚其外围电子的能力是不同的,对电子束缚弱的原子易失去电子而变成正离子,对电子束缚强的原子易得到电子而变成负离子,上述这种现象称为电离。

2. 电荷的量子性

电荷的大小称为电量,它的单位是库仑,用 C 表示。需要强调的是,库仑是一个导出单位,而基本单位是电流强度单位——安培,用 A 表示。它们的关系是 $1\text{C}=1\text{A}\cdot\text{s}$,即 1C 等于 1A 的电流强度在 1s 内流过某截面的电量。

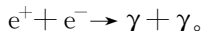
1897 年,汤姆逊(J. J. Thomson)发现了电子。电子是目前实验观测到的带有最小负电荷的粒子,其电量的近代测量值为 $e=1.602\,177\,33\times 10^{-19}\text{C}$ 。

任意带电体的电量都是电子电量 e 的整数倍,而 e 则是电量的一个基本单元。当带电体的电量发生变化时,它只能按 e 的整数倍改变,不能作连续的任意改变。这种电量只能一份一份地取分立的、不连续数值的性质,称为电荷的量子性, e 称为电荷的量子。

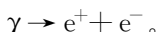
随着人们对物质结构不断深入的认识,发现基本粒子不基本,它们由更小的粒子夸克和反夸克组成,并预计夸克和反夸克的电量应取 $\pm 1/3e$ 或 $\pm 2/3e$ 。现在一些粒子物理实验已间接证明了夸克的存在,只是由于夸克禁闭而未能检测到单个自由的夸克。随着科学技术的发展和人类对物质微观结构认识的提高, e 是电量最小单元这句话可能要被修正,但电荷的量子性是不可动摇的。

3. 电荷的守恒性

大量实验证明,在一个孤立系统中,系统所具有的正、负电荷电量的代数和保持不变,这一性质称为电荷守恒定律。电荷守恒定律与能量守恒定律、角动量守恒定律一样,是自然界中的基本定律。根据电荷守恒定律,电荷不能被创造或消灭,只能被迁移或中和。摩擦起电过程实际上是电荷从一个物体转移到另一个物体的过程,虽然两物体的电中性状态都被打破,各显电性,但一方带正电,另一方就带负电,两物体构成一个系统仍呈电中性。在微观粒子的反应过程中,反应前后的元电荷总数是守恒的,例如有下面这个方程:



表明负电子和正电子在相遇时将湮灭,即转变为中性的光子 γ 。反过来,一个光子与一个重原子核作用时,如光子能量足够大,就可转化为一个正电子和一个负电子,用如下方程表示



在这些反应过程中,正、负电荷总是成对出现或成对消失,并不改变系统中正、负电荷电量的代数和,因而电荷守恒定律仍然有效。

4. 电荷的运动不变性

大量实验表明,电荷的电量与其运动状态无关,具有相对论不变性。例如加速器将电子或质子加速时,随着粒子速度的变化,它们的质量会有明显变化,但电子或质子的电量没有任何变化的痕迹。这也说明电荷是一个非常基本的物理量,需要人们对其进行更深入、更基本的研究。

11.2 库仑定律

11.2.1 电力

带电体间会有相互作用力存在,这种力称为电力,它是电荷的一种对外表现形式,人们对电现象的认识,就是从研究这种相互作用开始的。电力和磁力统称为电磁力,目前已经知道电磁相互作用具有以下一些特征:

(1) 电力远比万有引力强。就质子与电子的相互作用来说,其静电力比万有引力要强 10^{39} 倍。大家都知道这样一个演示实验,即摩擦过的笔或尺,由于带电可将细小物体如头发或纸屑吸起来。头发或纸屑受到整个地球给它的万有引力的作用,但都抵不过一把尺或一支笔上少量电荷对头发或纸屑的静电吸引力,这充分说明电力强于万有引力。

(2) 电磁力是一种长磁力,存在于原子内部和宇宙天体之间,其伸展的范围很大。与此形成鲜明对比的是强相互作用和弱相互作用,它们都是短程力,仅限于在原子核大小的范围内,即 10^{-13} m。

(3) 电磁力有吸引和排斥两种形式,可以被屏蔽掉,这一点和万有引力不同。

(4) 通常,电力比磁力要强很多。当光与物质发生相互作用时,主要是其中的电场分量与物质发生相互作用,故光学中电场分量又称为光矢量。

11.2.2 点电荷

带电体与带电体之间会发生电力相互作用,此电力与电荷之正负,电量之多少,带电体之间相对距离,及它们的尺寸、形状等因素有关,非常复杂。为了简化问题,我们提出点电荷的概念。一个形状和大小可以不计的带电粒子或带电体称为点电荷。在实际研究中,如带电体之间的距离比它们本身的线度大得多时,就可把这些带电体看作点电荷了。点电荷是电学中的一个理想模型,类似于力学中的质点这一概念。

11.2.3 库仑定律

法国物理学家库仑(C. A. Coulomb)首先对电力作了定量的研究。1785年,库仑通过扭秤实验,总结出真空中两个静止的点电荷间相互作用的基本规律,即库仑定律,它可表述为:在真空中两个静止点电荷间的相互作用电力,其方向沿两点电荷的连线,同种电荷相斥,异种电荷相吸,其大小与两点电荷的电量 q_1 和 q_2 的乘积成正比,与它们之间距离的平方成反比。用数学公式可表示为

$$\boldsymbol{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \boldsymbol{e}_r, \quad (11-1)$$

式中 \boldsymbol{F} 表示 q_2 对 q_1 的作用力; r 是两点电荷间的相对位矢, r 表示两点电荷间的距离; \boldsymbol{e}_r 表示由 q_2 到 q_1 方向的单位矢量; k 为比例系数,如图11-2所示。

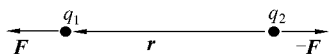


图 11-2

式(11-1)包含了库仑定律的所有内容,电力的大小与点电荷的电量乘积成正比,与它们之间距离的平方成反比。关于方向可以看到,当 q_1 与 q_2 同号时, \boldsymbol{F} 与 \boldsymbol{e}_r 同向, $-\boldsymbol{F}$ 与 \boldsymbol{e}_r 反向,满足同号相斥;当 q_1 与 q_2 异号时, \boldsymbol{F} 与 \boldsymbol{e}_r 反向, $-\boldsymbol{F}$ 与 \boldsymbol{e}_r 同向,满足异号相吸。

在 SI 制中,距离用 m 作单位,电量用 C 作单位,以实验为基础可定出

$$k = 8.9875 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2。$$

计算时,常取近似值 $k = 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$ 。为了以后的方便,我们引入一个新的常量 ϵ_0 来取代 k ,使 $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$,而

$$\epsilon_0 = 8.8541 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2)。 \quad (11-2)$$

式中 ϵ_0 称为真空介电常数(又称真空电容率)。由此可将库仑定律完整地表示成如下的常用形式,即

$$\boldsymbol{F} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \boldsymbol{e}_r。 \quad (11-3)$$

人们历来对库仑定律中两个点电荷之间的作用力与其距离平方反比的精确程度和适用范围很感兴趣。根据库仑当时的实验条件,发现力 $F \propto \frac{1}{r^{2+\delta}}$,其中 $\delta \leq 0.02$ 。到了1971年,威廉斯(E. R. Williams)等人的实验证明 $\delta \leq (2.7 \pm 3.1) \times 10^{-16}$ 。总之,越来越精确的实验证实,库仑的平方反比律是正确的。另一方面,在 $10^{-15} \sim 10^7 \text{ m}$ 的广大范围内库仑定律被证明是有效的。

11.2.4 电力叠加原理

当空间有多个点电荷存在的时候,实验表明,其中每个点电荷所受的总静电