



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

国家工科物理教学基地 国家级精品课程使用教材

Nucleus
新核心

理工基础教材

大学物理

(下册)

上海交通大学物理教研室 组编

胡盘新 主审



上海交通大学出版社

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划

国家工科物理教学基地 国家级精品课程

Nucleus
新核心

理工基础教材

大学物理

(下册)

上海交通大学物理教研室 组编

胡盘新 主审



上海交通大学出版社

内容提要

本书由上海交通大学物理教研室教师根据多年教学经验和实践编写而成。本书分为上、下两册,适合 120 学时使用。下册包括 10 章:真空中的静电场、静电场与物质的相互作用、真空中的磁场、磁场与物质的相互作用、电磁感应、电磁场与电磁波、光学、量子力学基础、固体量子理论简介、原子核物理和粒子物理简介等。每章后面均配有适量的习题和思考题,书后附参考答案。

本书为非物理专业的大学物理教程,可作为高等院校工科各专业的大学物理教科书,也可作为综合性大学和师范院校非物理专业的教材或参考书。

读者联系邮箱:science@press.sjtu.edu.cn

图书在版编目(CIP)数据

大学物理. 下册 / 上海交通大学物理教研室组编.

—上海:上海交通大学出版社, 2014

新核心理工基础教材

ISBN 978-7-313-09741-5

I. ①大… II. ①上… III. ①物理学—高等学校—教材 IV. ①04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 239068 号

大学物理(下册)

组 编:上海交通大学物理教研室

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:韩建民

印 制:常熟市文化印刷有限公司

开 本:787 mm×960 mm 1/16

字 数:414 千字

版 次:2014 年 1 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-09741-5/O

定 价:40.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:22.25

印 次:2014 年 1 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:0512-52219025

常用基本物理常量

(2002 年国际推荐值)

物 理 量	符号	数 值	一般计算取用值	单 位
真空中光速	c	$2.997\,924\,58\times10^8$	3.00×10^8	m/s
真空磁导率	μ_0	$4\pi\times10^{-7}$	$4\pi\times10^{-7}$	N/A ²
真空介电常数	ϵ_0	$8.854\,187\,817\times10^{-12}$	8.85×10^{-12}	C ² /(N·m ²)
万有引力常量	G	$6.672\,42(10)\times10^{-11}$	6.67×10^{-11}	N/(m ² ·kg ²)
普朗克常数	h	$6.626\,069\,3(11)\times10^{-34}$	6.63×10^{-34}	J·s
元电荷	e	$1.602\,176\,53(14)\times10^{-19}$	1.60×10^{-19}	C
里德伯常数	R_∞	10 973 731.568 525(73)	10 973 731	m ⁻¹
电子质量	m_e	$9.109\,382\,6(16)\times10^{-31}$	9.11×10^{-31}	kg
康普顿波长	λ_C	$2.426\,310\,238(16)\times10^{-12}$	2.43×10^{-12}	m
质子质量	m_p	$1.672\,621\,71(29)\times10^{-27}$	1.67×10^{-27}	kg
中子质量	m_n	$1.674\,927\,28(29)\times10^{-27}$	1.67×10^{-27}	kg
阿伏伽德罗常数	N_A	$6.022\,141\,5(10)\times10^{23}$	6.02×10^{23}	mol ⁻¹
普适气体恒量	R	8.314 472(15)	8.31	J/(mol·K)
玻耳兹曼常数	k_B	$1.380\,650\,5(24)\times10^{-23}$	1.38×10^{-23}	J/K
斯特藩-玻耳兹曼常数	σ	$5.670\,400(40)\times10^{-8}$	5.67×10^{-8}	W/(m ² ·K ⁴)
维恩位移定律常数	b	$2.897\,768\,5(51)\times10^{-3}$	2.90×10^{-3}	m·K
玻尔半径	a_0	$0.529\,177\,210\,8(18)\times10^{-10}$	0.529×10^{-10}	m

本书中物理量的名称、符号和单位

量的名称	符号	单位名称	单位符号
电荷量	Q, q	库仑	C
电场强度	E	伏特每米	V/m 或 N/C
电荷体密度	ρ	库仑每立方米	C/m ³
电荷面密度	σ	库仑每平方米	C/m ²
电荷线密度	λ	库仑每米	C/m
电通量	Φ_e	伏特米	V·m
电势	V	伏特	V
电势差、电压	U	伏特	V
电偶极矩	p, p_e	库仑米	C·m
电极化强度	P	库仑每平方米	C/m ²
电位移矢量	D	库仑每平方米	C/m ²
电容	C	法拉	F
电流	I	安培	A
电流密度	j	安培每平方米	A/m ²
电动势	$\mathcal{E}$	伏特	V
电阻	R	欧姆	Ω
磁感应强度	B	特斯拉	T
磁通量	Φ_m	韦伯	Wb
磁化强度	M	安培每米	A/m
磁场强度	H	安培每米	A/m
自感	L	亨利	H
互感	M	亨利	H
电场能量	W_e	焦耳	J
磁场能量	W_m	焦耳	J
电磁能密度	w	焦耳每立方米	J/m ³
折射率	n	—	—
光程	L	米	m
辐出度	M	瓦特每平方米	W/m ²
单色辐出度	M_λ	瓦特每立方米	W/m ³
波函数	Ψ	—	—

前 言

根据 2010 年教育部颁发的“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,力求贯彻理论体系的少而精、理论联系实际的原则,在做到加强理论基础的叙述、加强对 学生分析与实际问题能力培养的同时,增加对近现代物理知识和观点的介绍。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。

全书采用国际单位制,书中物理量的名称和表示符号尽量采用国家现行标准。

全书分为上、下两册。上册包括 9 章:力和运动、时空理论、功与能量、动量与角动量、刚体力学基础、机械振动、机械波、平衡态与热力学基础等。下册包括 10 章:真空中的静电场、静电场与物质的相互作用、真空中的磁场、磁场与物质的相互作用、电磁感应、电磁场与电磁波、光学、量子力学基础、固体量子理论简介、原子核物理和粒子物理简介等。本书另配有一套完整的电子教案,与主教材内容对应。电子教案提供 PowerPoint 格式的文件,在此基础上,可以进行二次开发并形成教师具有个人特色的电子教案。

本书内容全部讲授大约需要 120 学时,教师可以根据学时要求选讲其中部分内容。

本书由高景主编,参加编写工作的有:袁晓忠(第 1~5 章),高景(第 6,7,16 章),董占海(第 8,9,17,18 章),李铜忠(第 10~15 章和第 19 章)。

由于编者水平有限,编写时间较仓促,书中存在的错误之处,衷心希望广大读者提出宝贵意见。

编 者

2013 年 8 月

目 录

10 真空中的静电场	1
10.1 电学基本概念	1
10.1.1 电荷	1
10.1.2 电荷守恒	2
10.1.3 电荷量子化	2
10.1.4 点电荷模型	3
10.1.5 库仑定律	3
10.1.6 电力叠加原理	4
10.2 电场与电场强度	5
10.2.1 电场	5
10.2.2 电场强度	5
10.2.3 电场强度的计算	6
10.3 高斯定理	11
10.3.1 电场线	11
10.3.2 电通量	12
10.3.3 高斯定理	13
10.4 环流定理 电势	17
10.4.1 电场力做功	17
10.4.2 电势能和电势	18
10.4.3 电势叠加原理	20
10.5 电势与电场强度的微分关系	22
10.5.1 等势面	22
10.5.2 电势与电场强度的微分关系	23
习题 10	26
思考题 10	30

11 静电场与物质的相互作用	33
11.1 静电场中的导体	33
11.1.1 导体的静电平衡	34
11.1.2 导体电荷分布	34
11.2 静电场中的电介质	39
11.2.1 电介质与电场的相互作用	40
11.2.2 极化强度和极化电荷	42
11.2.3 介质中静电场的基本规律	44
11.2.4 介质交界面两侧电场的关系	48
11.3 电容和电容器	50
11.3.1 孤立导体的电容	50
11.3.2 电容器的电容	51
11.3.3 电容器的连接	53
11.4 静电场的能量	54
11.4.1 带电体系的静电能	54
11.4.2 点电荷系的静电能量	54
11.4.3 带电电容器的静电能	57
11.4.4 静电场的能量	58
习题 11	60
思考题 11	63
12 真空中的磁场	66
12.1 电流与电源	66
12.1.1 电流、稳恒电场与电源	66
12.1.2 电流强度和电流密度	68
12.2 磁场的磁感应强度	70
12.3 毕奥-萨伐尔定律	71
12.4 磁场的基本规律	75
12.4.1 磁感应强度线与磁通量	75
12.4.2 磁场的高斯定理	76

12.4.3 安培环路定理	77
12.5 磁场对电流的作用	83
12.5.1 安培力公式	83
12.5.2 载流线圈在磁场中受到的作用	85
12.5.3 安培力的功	87
12.6 带电粒子的运动	88
12.6.1 运动带电粒子的磁场	89
12.6.2 带电粒子在匀强磁场中的运动	89
12.6.3 霍尔效应	91
习题 12	93
思考题 12	98
13 磁场与物质的相互作用	101
13.1 抗磁性和顺磁性	102
13.1.1 原子中电子的磁矩	102
13.1.2 处于磁场中的核外电子	102
13.1.3 抗磁质和顺磁质	103
13.2 磁化强度和磁化电流	104
13.2.1 磁化强度矢量	104
13.2.2 磁化电流	105
13.3 介质中磁场的基本规律	106
13.3.1 介质中磁场的高斯定理	107
13.3.2 介质中磁场的安培环路定理	107
13.3.3 介质界面两侧磁场的关系	110
13.4 铁磁材料	110
13.4.1 铁磁材料的磁滞回线	110
13.4.2 铁磁现象的理论解释	112
13.4.3 铁磁材料的应用	113
习题 13	115
思考题 13	117

14 电磁感应	119
14.1 电磁感应定律	119
14.1.1 电磁感应现象	119
14.1.2 法拉第定律	121
14.2 动生电动势	123
14.3 感生电动势	129
14.3.1 感应电场与感生电动势	129
14.3.2 电子感应加速器	133
14.3.3 涡旋电场与涡电流	135
14.4 自感和互感	137
14.4.1 自感	137
14.4.2 互感	141
14.5 磁场能量	144
习题 14	148
思考题 14	153
15 电磁场与电磁波	156
15.1 麦克斯韦电磁理论	156
15.1.1 位移电流	156
15.1.2 麦克斯韦方程组	161
15.2 电磁波	162
15.2.1 电磁波波动方程	162
15.2.2 电磁波的性质	163
15.2.3 坡印廷矢量	164
15.2.4 电磁场的物质性	167
15.3 电磁波的产生	171
15.3.1 LC 振荡电路	171
15.3.2 电磁波的产生	172
15.3.3 赫兹实验	173
15.3.4 电磁波谱	174

习题 15	177
思考题 15	178
16 光学	180
16.1 光的传播与偏振	180
16.1.1 光源	180
16.1.2 与光的传播有关的一些基本概念	182
16.1.3 费马原理	183
16.1.4 偏振光与自然光	185
16.1.5 偏振片 马吕斯定律	187
16.1.6 反射和折射时的偏振现象	189
16.1.7 晶体的双折射现象	190
16.1.8 偏振光的获得与检验	192
16.2 光的干涉	194
16.2.1 光的相干性	194
16.2.2 杨氏双缝实验	195
16.2.3 薄膜干涉	199
16.2.4 迈克耳孙干涉仪	207
16.3 光的衍射	208
16.3.1 光的衍射现象	208
16.3.2 单缝衍射	209
16.3.3 双缝衍射	211
16.3.4 圆孔衍射光学仪器的分辨本领	212
16.3.5 光栅衍射	214
16.3.6 X 射线在晶体上的衍射	219
习题 16	220
思考题 16	225
17 量子力学基础	229
17.1 普朗克的能量子假说	229
17.1.1 热辐射现象	229

17.1.2	黑体辐射的基本规律	231
17.1.3	普朗克的能量子假说	234
17.2	爱因斯坦的光量子假设	235
17.2.1	光电效应	235
17.2.2	爱因斯坦的光量子假设	236
17.2.3	康普顿效应	239
17.3	氢原子光谱 玻尔理论	243
17.3.1	氢原子光谱实验规律	243
17.3.2	经典原子模型的困难	244
17.3.3	玻尔理论	245
17.4	物质波	248
17.4.1	德布罗意物质波假设	248
17.4.2	物质波的实验验证	250
17.4.3	波函数	251
17.5	不确定关系	253
17.5.1	位置和动量不确定关系	254
17.5.2	能量和时间的不确定关系	257
17.6	薛定谔方程	258
17.6.1	薛定谔方程的建立	258
17.6.2	定态薛定谔方程	260
17.7	一维定态问题	262
17.7.1	一维无限深势阱中的粒子	262
17.7.2	一维谐振子(抛物线势阱)	267
17.7.3	一维散射问题	270
17.8	氢原子量子理论	272
17.8.1	氢原子的能量	273
17.8.2	氢原子的角动量	273
17.8.3	塞曼效应	275
17.8.4	氢原子电子概率密度	275
17.8.5	电子的自旋	277
17.8.6	泡利不相容原理	279

习题 17	280
思考题 17	283
18 固体量子理论简介	288
18.1 晶体	288
18.2 固体的能带结构	289
18.2.1 能带	289
18.2.2 能带的宽度	291
18.2.3 满带 导带和价带	291
18.2.4 导体 半导体和绝缘体	292
18.3 半导体的电子论	293
18.3.1 近满带和空穴	293
18.3.2 p 型半导体和 n 型半导体	294
18.3.3 p-n 结	295
18.4 超导电现象	297
18.4.1 零电阻	297
18.4.2 完全抗磁性	298
18.4.3 临界磁场与临界电流	298
18.4.4 两类超导体	299
18.4.5 BCS 理论	300
习题 18	301
思考题 18	301
19 原子核物理和粒子物理简介	303
19.1 原子核的基本性质	303
19.1.1 原子核的组成	303
19.1.2 原子核的模型	305
19.1.3 核力和介子	306
19.2 原子核的量子性质	307
19.2.1 原子核的自旋	307

19.2.2	原子核的磁矩	308
19.2.3	核磁共振	309
19.3	原子核的放射性衰变	310
19.3.1	放射性衰变规律	310
19.3.2	α 衰变	312
19.3.3	β 衰变	313
19.3.4	γ 衰变	313
19.4	核裂变和核聚变	314
19.4.1	原子核的结合能	314
19.4.2	重核的裂变	315
19.4.3	轻核的聚变	317
19.5	粒子物理简介	318
19.5.1	粒子及其分类	319
19.5.2	强子的夸克模型	320
19.5.3	基本粒子的相互作用	323
19.5.4	粒子的对称性和守恒定律	324
参考答案		327

10 真空中的静电场

电磁学是研究物质世界中电磁现象和规律的学科,是物理学的一个重要内容。电磁学主要研究电荷(电流或运动电荷)产生电场(磁场)的规律,电场(磁场)对电荷(电流或运动电荷)的作用,电磁场与物质之间的相互作用关系,以及电场和磁场间的相互关系等。

实验表明,相对于观测者静止的电荷(简称为静电荷)间只有电相互作用。静电荷间电相互作用是通过电场来实现电相互作用的传递。电荷可以在空间产生电场,其他电荷在该电荷所产生的电场中要受到电场的作用。这就是电荷间电相互作用的物理机制。静电荷产生的电场称为静电场。本章将讨论静电场的基本规律。

在讨论静电场的基本规律之前,我们首先讨论电学的一些基本概念。

10.1 电学基本概念

10.1.1 电荷

当物体之间有电相互作用时,我们说这些物体处于带电状态,称其为带电体,或说物体有了电荷。电荷是反映物质间发生电相互作用的一种属性,就像引力质量是反映物质间万有引力的属性一样,它与物质是不可分的。

很早以前人们就发现,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(见图 10-1),我们就说琥珀和毛皮这两样物体都已处于带电状态。这种用摩擦使物体带电的方法称为摩擦起电。

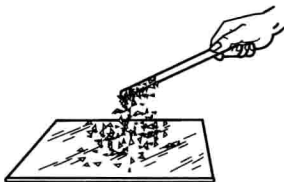


图 10-1

通过对带电体间相互作用规律的研究,人们发现电荷有两种:正电荷和负电荷。带同号电荷的物体间相互排斥,带异号电荷的物体间相互吸引。通过实验,根据物体间电相互作用强弱可以确定物体带电多少。表示物体带电多少的物理量称为电量,通常用 q 来表示。

国际单位制中,电量的单位为库仑,用 C 表示。需要说明的是,库仑是一个导出单位,而基本单位是电流强度的单位——安培(A),它们的关系是 $1 C =$

$1\text{ A}\cdot\text{s}$, 即 1 C 等于 1 A 的电流强度在 1 s 内流过某截面的电量。

10.1.2 电荷守恒

实验证明, 在一个和外界没有电荷交换的系统中, 正负电荷电量的代数和保持不变, 与系统内的任何物理过程以及系统运动与否无关。这一性质称为电荷守恒定律。在微观粒子的反应过程中, 反应前后的电量代数和是守恒的, 例如有下面这个方程:

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$$

表明电子和正电子在相遇时将湮灭, 转变为电中性的光子, 保持总电荷守恒。如果一个光子与一个重原子核作用时, 如光子能量足够大, 就可以产生正负电子对, 即一个正电子和一个负电子, 用如下方程表示:

$$\gamma \rightarrow e^+ + e^-$$

此过程中仍然保持电荷守恒。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。

物体处于电中性时, 我们认为物体带有等量的正负电荷。现代物理学认为, 宏观物体都是由分子、原子组成的。任何化学元素的原子, 从微观上看都是由带正电的原子核和若干带有负电的电子组成。原子内电子所带的负电荷和原子核所带的正电荷的代数和为零, 则原子是电中性的。因此, 由电中性原子结合成的分子是电中性的, 电中性分子构成的物质也是电中性的。

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带正电的离子, 对电子束缚强的原子易得到电子而变成带负电的离子。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, 都处于带电状态, 但是如果一个带正电, 另一个就一定带负电, 而两物体构成的系统的电荷代数和仍然为零。

10.1.3 电荷量子化

1907—1913 年, 美国物理学家密立根用在电场和重力场中运动的带电油滴进行实验, 发现微小油滴带电量的变化不连续。所有油滴所带的电量均是某一最小电荷值的整数倍, 该最小电荷值就是电子电荷。电荷的这一性质称为电荷量子化。电子电量的近代测量值为 $|e| = 1.602\,177\,33 \times 10^{-19}\text{ C}$ 。

现代物理实验表明, 质子所带电量 q_p 和电子电量的绝对值可看作严格相同, 因为相对误差小于 10^{-20} 。中子是电中性的, 则原子核所带的电量就完全由原子核所包含的质子数决定。因为原子包含相同数目的质子和电子, 则原子就是电中性的。

多少年来,人们一直试图从理论上解释电荷量子化这一基本事实。夸克理论认为,强子是由更小的夸克构成的。夸克带有分数电荷, $\pm\frac{1}{3}|e|$ 、 $\pm\frac{2}{3}|e|$ 。

如质子是由两个 u 夸克和一个 d 夸克组成。u 夸克带电 $+\frac{2}{3}|e|$, d 夸克带电 $-\frac{1}{3}|e|$, 因此, 质子带电 $+|e|$, 与电子带电量的绝对值相同。在这个意义上讲, 物质电荷量子化可以得到部分解释。但由于夸克的分数电荷是人为赋予的, 因此, 电荷量子化的问题并没有得到根本的解释。

对于宏观物体的带电量的描述问题, 电荷量子化并不重要。因为宏观物体所带电量远远大于电荷最小单位的值, 我们可以用连续可变的物理量来描述宏观物体的带电状态。

10.1.4 点电荷模型

点电荷是描述带电体的理想化模型。当带电体的大小和形状在所研究的问题中对结果没有影响或影响可以忽略时, 可以把带电体看作没有大小和形状的点状电荷, 简称为点电荷, 该点电荷的带电量和带电体相同。例如, 当带电体的线度远远小于带电体间的距离时, 带电体就可以看作点电荷。因此, 点电荷的概念实际上是相对的, 并没有绝对意义上的点电荷。

点电荷的物理模型在现代物理实验中得到强力的支持, 如质子的线度小于 10^{-15} m, 电子的线度小于 10^{-18} m。在原子中, 电子与原子核间的距离在 10^{-10} m 的量级, 原子核的线度在 10^{-15} m 量级, 因此可以把原子核和电子都看成点电荷。

10.1.5 库仑定律

带电体间会有电相互作用力, 称为电力。电力是一种长程力, 强度远大于物体间的万有引力。

法国物理学家库仑(C. A. Coulomb)对电荷间的电相互作用作了定量的研究。1785 年, 通过库仑扭秤实验, 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。可表述为: 在真空中两个静止点电荷间的电相互作用力的方向沿两个点电荷的连线, 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

$$\boldsymbol{f} = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \boldsymbol{e}_r \quad (10-1)$$