

SPT 21世纪高等院校教材

电 磁 学

及其计算机辅助教学(CAI)

主编 陈义成

科学出版社

内 容 简 介

本书系统地阐述了电磁现象的基本概念和基本规律,内容较为丰富.选材既照顾到一般读者,又照顾到有较高要求的读者.按照课程内容现代化的要求,增加了与电磁学密切相关的物理前沿领域和近代应用方面的知识,进一步明确了基本要求与提高之间的界线.全书共分8章,内容涉及静电学的基本规律、静电场与导体和电介质、稳恒电流及其磁场、随时间变化的电磁场和麦克斯韦方程、物质中的电场、物质中的磁场、电磁场的能量、交流电路等.

本书可作为高等学校本科物理类专业电磁学课程的教材,也可供其他有关专业师生参考.鉴于有随书的配套光盘,本书还可作为重点高中奥林匹克竞赛的培训教材.

图书在版编目(CIP)数据

电磁学及其计算机辅助教学(CAI)/陈义成主编. —北京:科学出版社, 2002.7

(21世纪高等院校教材)

ISBN 7-03-010143-X

I. 电… II. 陈… III. 电磁学-计算机辅助教学-师范大学-教材

IV. O44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 008927 号

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7月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2002年7月第一次印刷 印张: 28 1/2

印数: 1—5 000 字数: 539 000

定价: 42.00 元(附配套光盘)

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

序

《电磁学》成书的基础是作者对物理专业本科生讲授电磁学课程所编写的讲义。

作为现在物理专业的学生,将来毕业之后,不管他们是从事科学研究还是从事教学,应该能代表 21 世纪的水准;另外,由于社会主义市场经济的建立,行业之间、企业之间的竞争日趋激烈,而各种竞争最后将集中到高新技术的开发和应用的竞争上,集中到掌握高新技术的人才的培养和拥有上.作为高新技术主要发源地的物理学科,在培养人才方面应该为这种竞争作好理论基础的准备,编写出基础深厚、口径宽阔的教材。

学科间的交叉和渗透将是 21 世纪科学和技术发展的一个重要特征.物理学科的基础性和前瞻性决定了物理学科与其他自然科学和工程技术的开发创新有着密切关系,物理专业的学生能否和怎样才能进入相关领域并发挥积极作用是值得考虑的一个问题.一个国家的基础研究状况将最终影响和决定高新技术研究和发展的水平,培养少而精的基础研究人才是不容忽视的问题.面向 21 世纪本科教学的定位并根据定位来设置课程和改革课程体系和教学内容仍是急待研究和认真对待的课题。

自从提出基础课教学内容现代化问题以来,教学研究和教材编写进入了一个新的时期.20 世纪初产生的相对论和量子力学是近代物理的两大基石,也是近代高新技术发展的源泉.但 20 世纪前形成的所谓经典物理,不论从理论还是应用的角度看仍是十分重要的基础.由于基础物理现代化并不是简单地以近代物理替代经典物理,加之物理学的分支学科的发展越来越多,越来越细,越来越深入,物理基础课现代化的困难显得更大.在内容现代化方面我们做了一些尝试.电磁学是最重要的而且仍是近代最有用的经典物理学内容,它已形成了严格的、易于初学者接受的体系.但是电磁学仍面临一个内容现代化和如何为现代化服务的问题.除了对某些概念的内涵有所拓宽外,主要是采用“开窗口”的方法增加了一些与电磁学密切相关的新内容,有理论方面的也有应用方面的.很多与电磁学密切有关的现代化的内容,由于涉及的知识比较多,我们只是点到为止,并不奢望读者能对所涉及的内容有一个比较严格而完整的了解,而仅仅是让读者知道物理学及其他自然科学的近代发展与经典物理的联系;知道近代技术与电磁学的关系,从而提高学生对学习

基础知识重要性的认识,让读者知道“天外还有天”,激发学习的积极性和兴趣,引起读者的求知欲就算达到目的了,而不能牵强附会地将现代化的内容硬塞进教材。如果把这些后续课程中要详细讨论的内容生硬地搬进来,会使读者感到基础不够,难度太大,弄不好会产生学习上的畏惧情绪,这将会弄巧成拙。学生在校期间能学的东西总是十分有限的,基础课的任务是使学生具有自学新知识的基础、能力、方法、习惯和勇气,从而能自学未学过的新知识。

本教材在结构体系上采用对称的两条主线由浅入深地叙述基本概念、基本规律和基本方法,以优美对称的体系结构讨论电磁学的基本概念和基本规律,一些不能或不使用实验演示的基本概念、思想方法、理论结论可用电子课件演示,这将会使得所讨论的问题形象、生动、简练,丰富了想像力,增加了感染力。一些对称性问题的结论采用科研中常用的对称性操作来证明,而不是刻板的计算,进行科研素质的培养。我们还制作了全套的配套电子教案,该教案按照课堂教学的格式制作,采用教学内容一层层地展现出来的风格,对教和学都很有利。

本书在保留传统电磁学的基本内容和体系的前提下,致力于对基本概念和基本规律的阐述,注意使论述方式尽量适合低年级学生的特点,以便学生在理解基本概念和基本规律的前提下掌握电磁学各部分内容的内在联系,逐步培养学生分析问题和解决问题的能力。同时,在阐述过程中,力图引导学生学会使用数学。在普通物理学中,数学主要用于概括和表述物理内容,不仅如此,科学技术发展到今天,即使是普通物理,以数学为工具的逻辑思维应该占有一定份量;与一些物理内容需要在不同阶段适当重复一样,一些数学工具也需要一定的重复才能熟练掌握。因此,本书在数学上既采用了积分形式,又采用了微分形式,同时还涉及到了一些矢量分析的内容。

本书有少量内容初看起来可能略深一点,但由于我们采用的是普通物理学的处理方法,尽量做到通俗易懂。这些内容对学有余力的学生将是有帮助的,对后继课的学习也会有好处。为了突出基本内容,分清主次,本书正文用大小两种字号排印,有的章节和全用小字排印的章节,或加*号。加*号或用小字排印的内容都具有一定的独立性,略去这些内容,并不影响基本内容的教学,但学习这部分内容,或可扩大基本内容的应用范围,使读者加深对基本内容的理解,或可使读者得到关于某些问题的补充知识,这样就使全书具有一定的层次,以满足不同专业、不同程度的读者的需要。因此,不同的院校,由于课时和侧重面不同,书中某些内容可少讲或不讲,这样做并不影响体系的系统性。

随着教学改革的深入,教学内容的现代化使得一门课程的内容逐渐增多,而课时却愈改愈少,这是一个严重的矛盾。我以为,解决这个矛盾的有效方法就是教学手段的现代化——结合电子课件,使用电子教案上课。这可大大增加课堂信息量,

还可用节省下来的时间进行课堂讨论,活跃课堂气氛,加深对所学知识的理解和记忆;课件则更能直观、形象、简捷地表现物理内容和思想方法,增强感染力.制作电子教案和课件,费工费时.作者配合本书制作了成套的电子教案和课件,可能深度和广度还不够,课件的程序代码也不一定是最恰当的,我们只想起一个抛砖引玉的作用,作为教师上课的帮手和学生预习和复习的拐杖.

电子光盘的内容分为两大部分:一部分是配合本教材的电子课件,可单独使用;另一部分是配合本教材的电子教案,电子课件融合于其中,这种电子教案便于学生自学,而后可以更多地课堂上展开讨论,这对于培养学生的自学能力和独立思考能力,启发学生的思维将大有裨益,这是在“教学生会学”上所作的一点尝试,每一单元只有在正确地回答了几个问题之后才能进入下一单元,这就是设关卡,防止冒进.

在本教材的编写工作中得到了科学出版社、华中师范大学主管校领导、科研处、教务处、物理系的领导以及师长和同事们多方面的支持和鼓励.在此,我们向关心、支持、鼓励本书编写、出版的各个部门以及他们的领导和有关人员表示衷心的感谢.

作者由衷地感谢我们的老师,武汉理工大学理学院王继春教授,他仔细审阅了书稿的全文,并与作者进行了讨论,提出了许多宝贵的意见和建议,使我们能对书稿作进一步的修改、补充和完善.王建中、谢晓梅两同志以及我的两名研究生黄文涛、吴含荣参加了本书的有关部分编写工作,编选了全部习题,演算和核对了习题答案;襄樊学院物理系的张增常教授也参加了部分工作,在此一并表示衷心感谢.

作者时间仓促、水平有限,书中的谬误和疏漏也肯定不少,恳请广大读者批评指正.

本书最后附有参考书目.这些书都是各有自己特色的好书,作者在教学和编写本书的过程中曾从这些参考书中得到许多启发和帮助,在此也对这些参考书的作者表示感谢.

我们还要感谢 1997 级“物理本科课程教学论硕士连读试验班”的陈建军、陈劲光、全威等同学,他们开发制作了部分电子课件.

对于我们的电子教案,作者并不奢望教师一字不改地使用它.事实上,不同的学校不同的教师都有着自己独特的教学方式和方法,但可将此教案作为参考,或者以它为基础在教学过程中随时加进一些自己的东西,而作者本人也是根据课堂的实际情况即兴地加进一些内容,以期日渐完善.

2002 年元旦于武昌桂子山

目 录

第一章 真空中的静电场	1
§ 1-1 电荷守恒定律	1
一、物质的电结构	1
二、电荷守恒定律	3
三、导体、半导体和绝缘体	3
§ 1-2 库仑定律	5
一、库仑定律	5
二、叠加原理	6
三、电荷密度	6
§ 1-3 电场强度	7
一、电场 电场强度	7
二、几种带电系统的电场强度	8
§ 1-4 高斯定理	11
一、电通量	11
二、高斯定理	12
三、高斯定理与库仑定律的关系	16
四、高斯定理应用举例	17
五、电场线	20
§ 1-5 环路定理	22
§ 1-6 电势	25
一、电势差和电势	25
二、电势的一般表达式	26
三、等势面 电势梯度	28
四、应用举例	30
§ 1-7 电场对电荷系统的作用	34
§ 1-8 静电应用	37
一、静电分离	37

二、静电透镜	40
三、静电计	43
§ 1-9 电荷体系的静电能	43
一、点电荷间的相互作用能	44
二、电荷体系在外电场中的静电能	46
三、连续电荷分布的静电能	47
思考题	51
习题	52
第二章 物质中的静电场	58
§ 2-1 静电场中的导体	58
一、导体的静电平衡条件	58
二、处在静电平衡条件下导体的性质	59
三、导体在静电场中性质的应用	61
四、高斯定理和库仑定律的精确验证	67
§ 2-2 电容和电容器	68
一、孤立导体的电容	68
二、电容器及其电容	69
三、电容器的联接	71
§ 2-3 电介质的极化	73
一、电介质的极化	73
二、极化的微观机制	73
§ 2-4 极化强度矢量和极化电荷	75
一、极化强度	75
二、极化电荷	75
三、退极化场	77
四、 $\mathbf{P}$ 与电场 $\mathbf{E}$ 的关系	79
五、电介质在电容器中的作用	81
六、压电效应及其逆效应	82
§ 2-5 电介质中静电场的基本定理	83
一、电介质中的高斯定理	83
二、电介质中的环路定理	86
§ 2-6 电场的能量和能量密度	86
§ 2-7 利用静电能求静电力	88
思考题	94

习题	95
第三章 稳恒电流	102
§ 3-1 稳恒条件	102
一、电流强度和电流密度	102
二、电流连续性方程	103
三、稳恒条件	104
§ 3-2 欧姆定律	105
一、欧姆定律	105
二、焦耳定律	110
三、金属导电的经典微观解释	112
§ 3-3 电源及电动势	117
一、非静电力 电动势	117
二、常见的几种电源	118
三、路端电压与电动势 全电路欧姆定律	121
§ 3-4 直流电路	122
一、电路中任意两点之间的电势差	123
二、基尔霍夫定律	124
三、电路定理	127
思考题	130
习题	131
第四章 真空中的静磁场	137
§ 4-1 基本磁现象	137
一、磁的基本现象	137
二、磁感应强度	138
三、安培公式	140
§ 4-2 稳恒电流的磁场	141
一、毕奥-萨伐尔定律	141
二、运动电荷的电场和磁场	142
三、电流系统的磁矩	149
四、安培定律	150
§ 4-3 磁场的高斯定理和安培环路定理	151
一、磁场的高斯定理	151
二、安培环路定理	152
三、安培环路定理的应用	154

§ 4-4 磁场的矢势 A-B 效应	157
一、磁场矢势的引入	157
二、A-B 效应及其实验验证	159
思考题	160
习题	161
第五章 物质中的静磁场	167
§ 5-1 顺磁性和抗磁性	167
一、顺磁性物质和抗磁性物质	167
二、原子中的电流 电子的磁矩	167
三、顺磁性和抗磁性的起源	169
四、原子核的磁矩 核磁共振成像	171
§ 5-2 磁化强度和磁化电流	172
一、安培假说	172
二、磁化强度	174
三、磁化电流	174
四、磁介质中的静磁场规律	177
五、磁介质的磁化规律	179
§ 5-3 磁场的能量和磁能密度	179
§ 5-4 铁磁性	180
一、磁化曲线	180
二、磁滞回线	183
三、铁磁性起因简介	185
四、磁路定理	186
五、(静)磁屏蔽	189
* § 5-5 永磁体的磁场 假想磁荷	189
一、磁荷法的理论基础	189
二、磁荷法和电流法的等效性	192
三、磁荷法的应用	192
§ 5-6 磁场对运动带电粒子的作用	195
一、运动特征	195
二、应用举例	198
§ 5-7 磁场对电流的作用	204
一、磁场对各种电流系统的作用	204
二、应用举例	206

三、宏观效应	209
§ 5-8 生物磁学简介	214
一、生物磁场的产生	214
二、生物磁效应	215
思考题	216
习题	217
第六章 随时间变化的电磁场	224
§ 6-1 电磁感应定律	224
一、电磁感应现象的发现	224
二、法拉第电磁感应定律	225
三、感应电动势的计算	227
§ 6-2 动生电动势和感生电动势	229
一、时变磁场的高斯定理	229
二、动生电动势	230
三、感生电动势	232
四、电磁感应与相对性原理	235
§ 6-3 互感和自感	236
一、互感现象和互感系数	236
二、自感现象和自感系数	238
三、两线圈的串联和并联	240
§ 6-4 似稳电路和暂态过程	244
一、似稳条件	244
二、似稳电路方程	245
三、暂态过程	249
§ 6-5 载流线圈系统的磁能	253
一、一个载流线圈的磁能	253
二、多个载流线圈系统的磁能	254
三、载流线圈在外磁场中的磁能	257
§ 6-6 由磁能求磁力	258
§ 6-7 电磁感应的应用	261
一、发电机原理	261
二、电子感应加速器	262
三、涡流的效应	267
四、电磁流量计	269

五、感应圈原理	270
六、电感式传感器	271
§ 6-8 超导电性和超导磁体	271
一、零电阻现象	271
二、迈斯纳效应和磁通量子化	273
三、超导磁体的特点	276
思考题	277
习题	279
第七章 麦克斯韦电磁理论	288
§ 7-1 位移电流	288
§ 7-2 麦克斯韦方程组	293
§ 7-3 平面电磁波	295
一、电磁波的产生机制	295
二、平面电磁波的性质	296
三、电磁波的实验验证	299
§ 7-4 电磁场的能量、动量和角动量	302
一、电磁场的能量 能流密度	302
二、电磁场的动量与角动量 光压	305
思考题	309
习题	310
第八章 交流电路	313
§ 8-1 基本概念和描述方法	313
一、基本概念	313
二、描述方法	313
§ 8-2 交流电路的复数解法	319
一、交流电路的基本方程	319
二、交流电路方程的复数形式	320
三、交流电路元件的复阻抗	322
§ 8-3 交流电路分析举例	324
一、串联谐振电路	324
二、并联谐振电路	327
三、变压器电路	330
四、应用举例	332
五、交流电桥	334

§ 8-4 交流电的功率	337
一、瞬时功率	337
二、平均功率	338
三、视在功率和功率因素	338
§ 8-5 三相交流电	340
一、三相交流电的产生	340
二、三相电路中负载的联接	342
思考题	343
习题	344
习题答案	348
附录	362
A 矢量分析中的常用公式	362
一、矢量代数运算公式	362
二、在三种坐标系下的矢量分析常用公式	363
三、矢量积分的两个公式	365
B Visual Basic(简称 VB)程序代码	365
一、任意两个点电荷的等势面和电场线分布	365
二、静电复印	372
三、几种电流系统的磁场线	381
四、速度选择器	392
五、质谱仪	397
六、磁聚焦	398
七、磁约束	400
八、感生电动势	404
九、动生电动势	421
十、平面电磁波	423
十一、简谐函数的相位差	427
十二、简谐量的矢量描述(矢量描述,相位关系,矢量合成)	431
参考书目	440

第一章 真空中的静电场

相对于观测者静止的、数量及其分布不随时间变化的电荷(electric charge)称为静止电荷,在它周围空间中的电场称为**静电场**(electrostatic field).本章研究真空中静电场的性质及其基本规律.需要指出:在这里所说的真空并非是一无所有的空间,这里所说的真空是指除了静电场以及静止电荷以外,不存在其他(由原子或分子组成的)物质的空间,这是经典电磁理论范围内真空的概念.以后会认识到,静电场也是一种物质.

§ 1-1 电荷守恒定律

一、物质的电结构

1. 什么是电荷

远在公元前 585 年,希腊哲学家**泰勒斯**(Thales,约公元前 624 ~ 546)就记载了用木块摩擦过的琥珀能吸引碎草等轻微物体的现象.**电**(electricity)这个词来源于希腊文,原来的意思是琥珀.**电荷**(charge)是物质的一种基本属性.两种不同物体,例如光滑的玻璃与丝绸相互摩擦后,有吸引轻小物体的性质,这时称被摩擦过的物体具有了电荷,或者说,物体带了“电”.历史上,美国科学家**富兰克林**(B. Franklin, 1706 ~ 1790),把用丝绸摩擦过的光滑玻璃棒所带的电荷称为正电荷^①;而把毛皮摩擦过的硬橡胶棒所带电荷称为负电荷^②.

实验发现:自然界中,电荷只有两种,不是正电荷,就是负电荷.同性电荷相斥、异性电荷相吸.而且同性电荷放在一起,数量上相加,异性电荷放在一起,数量相减.例如三个单位正电荷与两个单位负电荷放在一起变成一个单位正电荷,这种作和称为代数和.

① 请注意,当玻璃表面较粗糙时(摩擦因数 $\mu > 0.18$)或湿度较高时,用丝绸摩擦过的玻璃不是带正电,而是带负电.

② 事实上,电荷的正、负是相对的,究竟选哪种电荷为正,哪种电荷为负,本来是任意规定的,不过上述命名方法一直沿用至今.

2. 最小电量

带电体所带电荷数量的多少称为**电量**(electric quantity). 宇宙中究竟哪种带电粒子带的电量最少呢? 物质结构理论证明: 任何一种化学元素原子都是由带正电的原子核和若干个在原子核周围运动的、带负电的**电子**(electron)所组成. 原子核体积比原子小很多, 原子半径的数量级为 10^{-10} m, 而原子核半径的数量级为 10^{-15} m, 原子核内含有不带电的**中子**(neutron)和带正电的**质子**(proton), 中子质量近似与质子相等, 但电子质量约为质子质量的 $1/1836$, 在一个原子中, 原子核内质子数与核外电子数目相等. 根据近代精密实验推断: 一个质子的电量与一个电子电量的绝对值是相等的(如果存在差值, 那么该差值也小于 $10^{-20}e$, 其中 e 为一个电子电量的数值). 一个电子带的电量是很微小的, 实际测量值为 $1.6021892 \times 10^{-19}$ C, 科学家密立根(A. Millikan, 1868 ~ 1953)演示的油滴实验证明: 任何带电粒子或带电物体所带的电量都是电子电量的 N 倍(其中 N 为正整数或负整数). 随着科学的发展, 近 20 多年来, 人们在探讨 N 能否为分数. 当 N 为分数时, Ne 称为分数电荷. 为了寻找分数电荷, 国内外许多学者都在积极研究^①. 我国学者在 1966 年就提出了层子模型(国外把层子称为夸克), 认为层子是带电量为 $\pm e/3$ 或 $\pm 2e/3$ 的微观粒子, 它带的电量数值比电子电量更小. 各国科学家采用多种手段研究, 有的从加速器, 有的从宇宙线, 也有的从月球物质中寻找分数电荷, 美国(麻省理工学院的弗里德曼和肯德尔以及斯坦福大学的泰勒)三位教授, 早在 1967 年就利用直线加速器进行了实验探索, 用接近光速的亚原子粒子轰击一个靶, 猛烈的碰撞产生了更小的粒子, 第一次发现了夸克的踪迹, 证明了盖尔曼关于基本粒子结构的夸克模型. 上述实验结果, 经过 23 年后才得到了承认, 因而获得 1990 年度的诺贝尔物理奖^②. 分数电荷的发现, 意味着夸克所带电量是电量的最小单位, 直至目前还未发现电量少于夸克所带电量的带电粒子. 上述讨论说明, 电量是不连续的, 这称为**电荷量子化**(charge quantization)效应. 为什么电荷具有这种特性呢? 在科学上现在还是个谜. 但要指出: 电量不连续性是从微观角度提出来的, 在宏观带电体上, 电荷量子化效应难于直接觉察. 例如在 220V、15W 的白炽灯泡内, 每秒钟约有 4×10^{17} 个电子通过灯丝横截面. 这好比人喝水时, 难于感觉出水是由一个个分子组成的一样. 因此在研究宏观带电现象时, 仍然可把电量看成是连续变化的.

原子序数为 Z 的原子, 若原子核内质子数目与核外电子数目都是 Z 时, 则在离原子的距离比原子本身线度大很多的地方, 原子中正、负电荷在该处所显示的电

① “寻找磁单极和分数电荷(上、下)”, S. B. Felch, 《大学物理》, 1987 年第 1 期和第 2 期.

② 何君臣: “夸克——基本粒子的更基本的单位”, 《科技日报》, 1990 年 12 月 14 日, 5~6.

效应相互抵消,而呈现**电中性**(electric neutrality);如果物体中任何一部分所包含的电子数与质子数都是相等的,则整个物体对外界呈电中性,即是说,这时物体不带电;若在原来未带电的物体上,把一些电子从一个物体上转移到另一个未带电的物体上,则前者缺少电子而带正电,后者因有多余电子而带负电.不过这两个物体的正、负电荷代数和仍为零.相反,若两个带等量异号电荷的**导体**(conductor)互相接触,则带负电导体上的多余电子将立刻移动到带正电的导体上去,从而使两个导体对外界都呈现电中性.在这个过程中,正、负电荷的代数和始终不变(即总是为零).

二、电荷守恒定律

所谓**电荷守恒定律**(law of conservation of charge)是指:若把参与相互作用的几个物体视为一个体系,而整个体系与外界没有电荷交换,那么在任一时刻,不管系统中发生了什么变化,整个系统的电荷代数和始终保持不变.于是电荷守恒定律可表述为:一个孤立系统(与外界不发生电荷交换的系统)的电荷总量(代数和)是保持不变的.

电荷守恒律是物理学中普遍适用的基本规律,无论是宏观现象还是微观过程都成立.请注意:这里说的是正、负电荷代数和保持不变,而不是正电荷保持不变,或负电荷保持不变^{①②③}.

三、导体、半导体和绝缘体

物体按导电性能优劣可分为**导体**、**半导体**(semiconductor)以及**绝缘体**(insulator).具有大量(能够在外电场作用下自由移动的)带电粒子,因而善于传导电流的物体称为导体.导体分四类,其中金属是一类导体.在金属原子中,最外层电子受原子核作用很弱,容易脱离原子而成为共有电子在原子之间自由运动,这种电子称为**自由电子**(free electron).金属中单位体积内自由电子数目愈多,导电性能愈好.由于自由电子的质量远小于原子核质量,因而导体中自由电子的运动,既不会引起导体性质的化学变化,而且也不会引起导体质量的明显变化.

另一类导体是酸、碱、盐的水溶液(称为**电解质**,electrolyte).在这种溶液中,有些原子(或原子集团)失去电子成为正离子,有些原子(或原子集团)获得电子成为

① 例如高能光子,即 γ 射线,与原子核相碰撞时,会产生一对正负电子,反之,当一对正负电子互相靠近时,会融合而消失.在消失处产生 γ 射线,称为电子对的湮没,因为光子是不带电的,正负电子带等量异号电荷.可见在这个微观过程中,虽然发生了微观粒子的产生或消失现象,尽管正电荷数量或负电荷数量都发生了变化,但在变化过程前后,电荷的代数和没有变化.

② “电子对产生与湮灭”,李炳安等,《大学物理》,1991年第2期.

③ “正电子的发现”,林木欣等,《大学物理》,1987年第7期.

负离子.在溶液中存在大量能自由移动的正离子和负离子,由于这些带电离子能起导电作用,因此酸、碱、盐溶液属于导体.又由于各种离子的化学成分和质量都各不相同,因而离子移动时,在电解质中将伴随化学变化和质量迁移.

第三类导体是**等离子体**①(plasma).普通气体受高温或强辐射作用发生电离形成正离子、负离子以及电子.所谓等离子体就是这些离子、电子以及中性分子的混合体.由于混合体中,正、负电荷的空间分布几乎均匀,因而整个气体呈现电中性.科学家**朗缪尔**(Langmuir, 1881 ~ 1957)在 1929 年把这种气态物质称为等离子体,它广泛存在于自然界中,不但火焰、雷电、高压电子器件、核爆炸过程中产生等离子体,而且存在于地球以外的宇宙中.等离子体是物质存在的一种基本形式,它具有一系列重要特性,它的导电性有时甚至比金属还好.

第四类导体是**超导体**(superconductor),在一定的温度下呈零电阻状态的导体称为超导体,分为低温超导体和高温超导体.从 1986 年以来,世界各国科学家都普遍关注高温超导体的研究(目前临界转变温度已达 250K).

电的非导体称为绝缘体,又称为**电介质**(dielectric).在绝缘体原子中,外层电子受原子核的束缚作用很强烈,在室温环境下,能自由移动的带电粒子几乎没有,因而不能导电.例如空气、云母、松香、橡胶、玻璃、丝绸、陶瓷、油类以及干燥木材都是良好的电介质.导电性能介于导体与绝缘体之间的物体称为半导体.半导体材料的原子结构比较特殊,其外层电子既不像导体那样容易脱离原子核的吸引,也不像绝缘体那样被原子核束缚很紧.不过纯净的半导体的导电性能与绝缘体类似,也很差.若在纯净半导体中掺入少量杂质,半导体的导电性能就大大增强,这时半导体中,起导电作用的带电粒子,除电子以外,还有带正电的**空穴**(hole),电子和空穴统称为**载流子**(carrier).掺入的杂质不同,半导体内电子数目和空穴数目不同.若选用的杂质为施主杂质(所谓施主杂质是指这种杂质能给纯净半导体提供许多电子),使半导体中发挥导电作用的电子数目远多于空穴数目,由于这种掺杂半导体②主要靠电子来导电,因而称为电子型半导体.又因为电子带负电,英文“负电”的第一个字母是 n,因此这种半导体又称为 n 型半导体;若选用的杂质为受主杂质(所谓受主杂质是指这种杂质能接受纯净半导体的许多电子),从而使掺杂半导体原子中,缺乏电子而出现空穴,使半导体内带正电的空穴数目远多于电子数目,这种半导体的导电作用主要靠空穴,因此称为空穴型半导体.又因为空穴带正电,而英文“正电”的第一个字母是 p,因此这种半导体又称为 p 型半导体.人们把 n 型半导体和 p 型半导体组合起来,便构成了各式各样的半导体器件.

① 参见:《等离子体物理原理》,郭书印等译.原子能出版社,1983 年.

② 纯净半导体中掺入少量杂质后,被称为掺杂半导体.

要指出的是:导体、半导体、绝缘体的分类不是绝对的.在某些特殊情况下,例如当电介质受到外界强烈作用时,电介质原子的外层电子可脱离原子核的吸引而成为自由电子,当这种能导电的粒子很多时,绝缘体的绝缘性能就遭到破坏,变成导体,这种现象称为绝缘体的击穿现象.此外,半导体的导电性能很容易受外界因素(例如温度、杂质、光照、压力、电场)的影响,当温度升高时,半导体的导电作用显著增强,而且它随温度而变化的规律正好与金属相反.

§ 1-2 库 仑 定 律

库仑定律(Coulomb law)是静电场的基本实验规律,利用此定律和静电场叠加原理可以推导出高斯定理和环路定理.

18世纪末,一些科学家开始对电现象进行定量研究,其中典型代表是法国科学家库仑(C. A. de Coulomb, 1736 ~ 1806),他首先从扭秤实验中总结出两个点电荷之间相互作用的规律,这就是库仑定律.此定律的研究奠定了电现象定量研究的基础.

一、库仑定律

带电体之间作用力的大小和方向与带电体的几何形状、电荷的种类以及电量的多少等许多因素有关.库仑首先全面研究了两个点电荷间相互作用的规律.点电荷是这样的带电体:它本身的几何线度比它与其他带电体之间的距离小得多,这样,在研究它与其他带电体的相互作用时,可以把它当作一个几何点处理.

实验发现:两个静止的点电荷 q_0 和 q_1 之间的作用力的大小与两点电荷电量的乘积成正比,与它们之间距离的平方成反比,作用力的方向沿着两点电荷间的连线,同号电荷相斥,异号电荷相吸.

按图 1-2-1,取坐标系 $Oxyz$, 则库仑定律的数学表达式是

$$\mathbf{F}_{10} = k \frac{q_1 q_0}{r_{10}^2} \mathbf{r}_{10} = - \mathbf{F}_{01} \quad (1-2-1)$$

其中, k 为比例常数,由实验测定并与所取的单位制有关. $\mathbf{F}_{10}$ 是 q_1 作用到 q_0 上的力.我们取国际单位制(SI),或称米·千克·秒·安培制(MKSA),即电量的单位用库仑(C),距离用米(m),力用牛顿(N).在真空中,我们将常数 k 写成为 $k = 1/4\pi\epsilon_0$,其中 ϵ_0 称为真空介电常数,由实验测定.若测得已知电量的两个点电荷在真空中的相互作用力,便可得 k 或 ϵ_0 的值.