



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century

电 磁 学

(第三版)

贾起民 郑永令 陈暨耀 原著
陈暨耀 改编



高 等 教 育 出 版 社
Higher Education Press



面向21世纪课程教材



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电 磁 学

第三版

曹起民 郑永令 陈暨耀 原著
陈暨耀 改编



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是在第二版的基础上修订而成。第二版是面向 21 世纪课程教材和普通高等教育“九五”国家级重点教材。本次修订,注意保持了原书的特色,根据新的教学需求对部分内容做了适当调整及删减,使之能适用于较少课时的教学需求。全书共分 8 章,内容涉及静电学的基本规律、静电场与导体、恒定电流、恒定电流的磁场、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、交流电路等。

本书可作为高等学校本科电磁学课程的教材,也可供其他有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

电磁学/贾起民,郑永令,陈暨耀著;陈暨耀改编.—3
版.—北京:高等教育出版社,2010.5
ISBN 978-7-04-029192-6

I. ①电… II. ①贾…②郑…③陈… III. ①电磁
学—高等学校—教材 IV. ①O441

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 028794 号

策划编辑 高 建 责任编辑 忻 蓓 封面设计 赵 阳
版式设计 张 岚 责任校对 刘 莉 责任印制 尤 静

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京宏信印刷厂

开 本 787×960 1/16
印 张 24.25
字 数 450 000

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 1985 年 8 月第 1 版
2010 年 5 月第 3 版
印 次 2010 年 5 月第 1 次印刷
定 价 32.10 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 29192-00

第三版序

本书第二版自 2001 年出版以来,得到了读者的厚爱,几乎每年都重印,至今仍有不少学校把它作为物理专业电磁学课程的教科书或主要参考书。但随着时光飞跃,科学技术的进步,经济的发展,社会对人才的需求、学生对专业的选择更加多样化,从不同的角度去适应这些变化的教育改革,正在发展,本科学生心目中传统的“专业”的界线日趋模糊,高中毕业生对志愿的选择、社会对大学毕业生的需求,往往重视学校甚于重视专业。与此相适应的教学改革则是专业的培养目标更加多元化,专业性减弱,普适性、通用性加强,培养规格、教学基本要求则因地、因校而不尽相同。第二版教材内容比较齐全,问题的讨论比较深入,教学时数比较多,故已无法适应某些学时数比较少的电磁学课程的需要。为此,我们在原来《电磁学》的基础上改编出版了第三版,以满足较少学时的电磁学课程的教学需求。第三版减少教学时数、压缩篇幅的主要途径是精选内容,对选出的内容,仍保持原书的特点:既注重基本概念、基本规律阐述的严谨顺畅,给学生严格的训练,使学生打下比较扎实的基础,又注意引导学生思考、钻研和总结,培养学生的学习能力,使学生具有自学新知识的基础、能力、方法、习惯和勇气,从而能学习未学过的知识。

以第三版为教材的读者,如果对电磁学有比较浓厚的兴趣,仍可以第二版作为参考书,读者一定可以从中获得许多有益的启迪。

本版主要变化是:

1. 删除了第二版中大部分以“小字”编写的内容和原书第六章“运动电荷的电场和磁场”,其他内容则在不影响原书风格和特点的前提下做必要的和适当的压缩和精简,使第三版能适用于较少学时的电磁学课程的要求。

2. 精选了例题、思考题和习题,使之与较少学时的电磁学的要求相匹配。

3. 全书由真空中的电磁场、介质中的电磁场和交流电路三个板块组成。三个板块相对独立,即使后一板块或后两个板块不学,学生基本上也已掌握了电磁

学的最基本的知识和规律以及学习电磁学的基本方法,学生已具备进一步学习电磁场理论或电动力学等其他课程的基础。

4. 原书中凡介绍电磁学与物理学新进展、物理学与其他自然学科或新技术相关的知识不但都保留了,而且在某些方面还有所加强,如增加了介质表面在电磁波中所受的拉力,引入了可研究膜弹性的光拉伸的实例等。

由于投入时间有限,再加上作者认识上可能存在的各种局限,内容的精选可能有偏差或疏漏,欢迎读者批评指正。

作者
2009 年

第二版序(摘要)

第二版修订工作主要体现在如下几个方面:

1. 删去某些过深过难的内容。有关电磁场方程的数学形式只限于积分形式。删去一些深入讨论的问题,有些问题是作者多年教学研究和教学经验的总结,但对学生未必都需要。

2. 进一步明确教学基本要求。

3. 在内容现代化方面做了一些尝试。

此次修订中,我们仍保留了初版的主要特色,既注重基本概念、基本规律阐述的严谨顺畅,给学生严格的训练,使学生打下比较扎实的基础,又注意引导学生思考、钻研和总结,培养学生的学习能力。

在修订过程中,我们特邀请陈暨耀、应书谦两位年纪比较轻的教授和副教授参加工作,因为我们都属退下讲台的人了,今后怎样教学,是青年人的事,我们毋需干预太多。他们参加工作将有助于他们了解历史,但他们完全可以在新的起点上向前迈进。

作者由衷地感谢我们的老师,复旦大学物理系郑广垣教授,他仔细审阅了修订稿的全文,并与作者进行了讨论,提出了许多宝贵的意见和建议。我们还要感谢审稿会上复旦大学的倪光炯教授、郑广垣教授、华东师范大学的宓子宏教授和上海交通大学的胡盘新教授提出的许多富有启发性的意见和建议,使我们能对书稿做进一步的修改和补充。

由于作者的水平有限,有些观点也不一定正确,书中恐有不少谬误和疏漏之处,望广大读者斧正。

贾起民 郑永令
1999年6月于复旦大学

第一版序(摘要)

本书是在 1982 年使用的讲义的基础上结合多年的教学经验和近年来教学改革实践修改而成的。与作者 60 年代和 70 年代编写的讲义相比,内容上又有更多的补充和提高。

王祖彝、陈暨耀两同志参加了本书的修改工作,编选了全部习题,演算和核对了习题答案,蔡怀新教授审阅了全部书稿,提出了许多宝贵的意见;一并表示衷心感谢。

我们还要感谢自 1960 年以来在复旦大学物理系学习过电磁学的已经毕业或尚未毕业的学生,他们对本课程的讲义提出过许多宝贵的意见,本书中较深入地进行讨论的有些问题以及一些思考题就是受到他们的启发而编写出来的。

本书若有错误和不妥之处,恳切希望广大教师和读者给以批评和指正。

贾起民 郑永令
1985 年 1 月于复旦大学

目 录

第一章 静电学的基本规律	1
§ 1.1 物质的电结构 电荷守恒定律	1
1. 电荷 摩擦起电 2. 电子 质子 夸克 3. 电荷守恒定律 4. 导体和绝缘体	
§ 1.2 库仑定律	4
1. 点电荷的概念 库仑定律 2. 电荷量的单位 3. 真空的概念及其演变 4. 几点说明 5. 叠加原理	
§ 1.3 电场和电场强度	7
1. 电场 2. 电场强度 3. 点电荷与点电荷系的场强 4. 任意形状带电体的电场 5. 电场线——描写电场的辅助工具 6. 例题	
§ 1.4 电势	18
1. 静电场的环路定理 2. 电势差和电势 3. 带电体的电势 4. 等势面 电势梯度 5. 几点说明 6. 电偶层的电势 心电图原理 7. 例题	
§ 1.5 高斯定理	28
1. 电场强度通量 2. 电场对任意封闭曲面的电场强度通量 3. 高斯定理 4. 几点说明 5. 例题——用高斯定理计算场强	
§ 1.6 静电场的基本方程式	36
§ 1.7 静电能	37
1. 点电荷系的相互作用能 2. 电偶极子在外场中的静电能 电场对电偶极子的作用 3. 电荷连续分布的带电体的能量 4. 几点说明 5. 例题	
思考题	45
习题	49
第二章 静电场与导体	54
§ 2.1 静电场中的导体	54

1. 导体的特征 功函数 2. 导体的静电平衡条件 3. 导体上的电荷分布	
4. 导体表面的场强 5. 静电屏蔽 6. 例题	
§ 2.2 静电场的唯一性定理	64
1. 问题的提出 2. 静电场的唯一性定理	
§ 2.3 尖端效应	66
1. 尖端放电 电晕 2. 静电复印 3. 范德格拉夫起电机 4. 从场离子显微镜(FIM)到扫描隧穿显微镜(STM)	
§ 2.4 电容和电容器	72
1. 孤立导体的电容 2. 电容器及其电容 3. 几种形状的电容器的电容	
4. 电容器的串联与并联 5. 几点说明 6. 例题	
§ 2.5 静电场的能量	77
1. 带电导体的静电能 2. 电场的能量 3. 几点说明 4. 静电场对导体的作用力 5. 例题	
思考题	82
习题	83
第三章 恒定电流	88
§ 3.1 恒定电流的闭合性	88
1. 电流的形成 2. 电流和电流密度 3. 电流的连续性方程 恒定电流的闭合性	
§ 3.2 欧姆定律	92
1. 欧姆定律的微分形式 2. 一段电路欧姆定律 电阻 3. 电阻率与温度的关系 超导电性 4. 电流的功率 焦耳定律 5. 例题	
§ 3.3 固体导电机理简介	97
1. 金属导电性的经典微观解释 2. 费米电子气 导电和导热的量子理论	
§ 3.4 电动势和全电路欧姆定律	101
1. 非静电起源的电力 2. 电动势 全电路欧姆定律 3. 恒定电场在恒定电路中的作用 4. 接触电势差 温差电动势 5. 化学电源 6. 例题	
§ 3.5 电路定理	110
1. 一段含源电路的欧姆定律 2. 基尔霍夫方程及其应用 3. 例题	
思考题	115
习题	116
第四章 恒定电流的磁场	122
§ 4.1 基本磁现象 安培定律	122
1. 磁现象 2. 电流间的相互作用力 安培定律 3. 几点说明 4. 例题	
§ 4.2 电流的磁场 磁感强度	127

1. 磁场及其描写 2. 毕奥-萨伐尔定律 3. 几点说明 4. 平面载流回路 在磁场中受到的力和力矩 5. 例题	
§ 4.3 恒定电流磁场的基本方程式	136
1. 磁场的高斯定理 寻找磁单极 2. 磁场的环流 安培环路定理 3. 恒 定电流的磁场的基本方程式 4. 例题	
§ 4.4 带电粒子在电场和磁场中的运动	144
1. 洛伦兹力 2. 带电粒子在匀强磁场中的运动 3. 回旋加速器的基本原 理 4. 汤姆孙实验 5. 质谱仪 6. 霍耳效应 7. 洛伦兹力与安培力 8. 例题	
§ 4.5 磁场的矢势 A-B 效应	152
1. 磁场矢势的引入 2. A-B 效应及其实验验证	
思考题	154
习题	157
第五章 随时间变化的电磁场 麦克斯韦方程	162
§ 5.1 电磁感应现象与电磁感应定律	162
1. 基本的电磁感应现象 2. 感应电动势及其大小和方向 3. 法拉第电磁 感应定律 4. 关于法拉第 5. 例题	
§ 5.2 电磁感应现象的物理实质	170
1. 动生电动势 2. 感生电场及其性质 3. 涡电流与电磁阻尼 4. 几点说 明 5. 例题	
§ 5.3 互感与自感	182
1. 互感现象与互感系数 2. 自感现象与自感系数 3. 例题	
§ 5.4 LR 电路中的暂态过程 磁场的能量	187
1. 似稳电流 可变电流的电路方程 2. LR 电路中的暂态过程 3. 可变电 流电路中的能量转换 自感能 4. 两个载流回路的磁能 互感能 5. 真空中磁场的能量 磁能密度 6. 例题	
§ 5.5 位移电流及其物理实质	195
1. 回顾与总结 位移电流 2. 位移电流的物理实质 3. 几点说明 4. 例题	
§ 5.6 真空中的麦克斯韦方程组 电磁波	202
1. 麦克斯韦方程的积分形式 2. 真空中的平面电磁波 3. 关于麦克斯韦 4. 例题	
§ 5.7 电磁场的能量与动量	212
1. 电磁场的能量 能流密度 2. 电磁场的动量	
§ 5.8 电磁波的产生 辐射	215
1. 辐射电磁波的条件 2. 加速运动电荷的辐射 3. 辐射场的能流 4. 振 动偶极子的辐射 5. 例题	

§ 5.9 几种辐射介绍	221
1. 韧致辐射 2. 回旋辐射 3. 同步辐射及其应用	
思考题	224
习题	225
第六章 物质中的电场	234
§ 6.1 电介质的极化	234
1. 电介质的极化 相对介电常数 2. 原子或分子系统的电偶极矩 3. 电 介质极化的微观模型	
§ 6.2 极化强度和极化电荷	239
1. 极化强度 2. 极化电荷 3. 极化电荷的面密度和体密度 4. 几点说明 5. 例题	
§ 6.3 介质中的静电场	247
1. 宏观电场与微观电场 2. 极化强度与电场强度的关系 3. 例题	
§ 6.4 铁电体、压电体和驻极体	252
§ 6.5 介质中的高斯定理	254
1. 电位移 介质中的高斯定理 2. 介质中电场的基本方程式 3. 电场的 边界条件 4. 几点说明 5. 例题	
§ 6.6 电介质中的静电能	266
1. 电介质中静电能的定义 2. 电介质中电场能的表示式 3. 例题	
思考题	272
习题	273
第七章 物质中的磁场	278
§ 7.1 顺磁性和抗磁性	278
1. 顺磁性物质和抗磁性物质 2. 原子中的电流 电子的磁矩 3. 顺磁性 和抗磁性的起源 4. 原子核的磁矩 核磁共振成像	
§ 7.2 磁化强度和磁化电流	285
1. 磁化强度 2. 磁化电流 3. 磁化电流的面密度与体密度 4. 例题	
§ 7.3 介质中的磁场	291
1. 磁介质中的磁感强度 2. 磁化强度与磁感强度的关系 3. 例题	
§ 7.4 磁场强度 介质中磁场的基本方程式	294
1. 磁场强度 介质中磁场的安培环路定理 2. 介质中磁场的基本方程式 3. 磁场的边界条件 4. 几点说明 5. 介质中磁场的能量密度 6. 例题	
§ 7.5 铁磁性	303
1. 磁化曲线 2. 磁滞回线 3. 铁磁性起因简介 4. 例题	
§ 7.6 超导体简介	308

1. 超导体的临界温度和临界磁场 2. 高温氧化物超导	
§ 7.7 介质中电磁场的方程组	312
1. 介质中的麦克斯韦方程组 2. 边界条件 3. 无限大均匀介质中的平面电磁波 4. 光的折射率 5. 介质中电磁场的能量密度与能流密度 6. 例题	
思考题	317
习题	318
第八章 交流电路	322
§ 8.1 简谐交流电的产生和表示方法	322
1. 简谐交流电的产生 2. 简谐交流电的三个参量 3. 简谐交流电的有效值 4. 简谐交流电的振幅矢量表示法 5. 例题	
§ 8.2 交流电路中的元件	327
1. 交流电路中的纯电阻 2. 交流电路中的纯电感 3. 交流电路中的纯电容	
§ 8.3 RLC 串联电路	335
1. 似稳条件和集中参量 2. RLC 串联电路的电路方程及其解 3. RLC 串联电路的振幅矢量算法 4. 例题	
§ 8.4 并联电路的计算	343
§ 8.5 交流电路的功率	344
1. 交流电路的功率 2. 有功功率和无功功率 3. 提高电路功率因数的意义和方法	
§ 8.6 谐振电路和品质因数	347
1. RLC 串联电路的谐振和谐振条件 2. RLC 串联电路谐振时电路上的电压分配 品质因数 3. RLC 串联谐振电路中的能量转换 Q 值的普遍含义 4. 谐振曲线 通频带	
§ 8.7 三相交流电	352
1. 三相交流电的产生 2. 三相电路中负载的连接	
思考题	355
习题	356
习题答案	360

第一章

静电学的基本规律

静电学研究的对象是相对观察者静止的电荷及其周围的电场.在这一章中,我们只讨论处在真空中的静止电荷及其电场.我们将从最基本的静电现象出发,讨论静电场的描写方法和基本规律,进而建立静电场的基本方程式.本章的内容是学习以后各章的基础.

§ 1.1 物质的电结构 电荷守恒定律

1. 电荷 摩擦起电

早在古希腊时代,雕刻玉石的匠人就发现,用毛皮摩擦过的琥珀能吸引羽毛、头发、干草等轻小物体.在我国东汉成书的《论衡》中,也有“顿牟掇芥”的记载.以后相继发现许多材料如玻璃、水晶、硬橡胶、硫黄和火漆等经摩擦后都有吸引轻小物体的能力.当物体具有了这种性质,就说该物体处于带电状态或携带电荷.带有电荷的物体称为带电体.经过摩擦使物体带电的过程称为摩擦起电.摩擦起电现象十分普遍,特别在塑料制造、化纤纺织、溶剂生产等过程中广泛存在.在这些过程中,摩擦起电常常会影响生产,甚至引起爆炸事故.

带电体之间存在相互作用,这种作用表现为相互吸引或相互排斥(图 1.1-1).实验表明,电荷有两类,同类电荷相互排斥,异类电荷相互吸引.由于只存在两类电荷,我们可以称一类电荷为正电荷,另一类电荷为负电荷.历史上,富兰克林(B. Franklin)最早对电荷的正负做了规定:玻璃与丝绸摩擦后,玻璃所带的电荷为正电荷,凡与它有吸引的电荷为负电荷.直到现在,我们仍沿用富兰

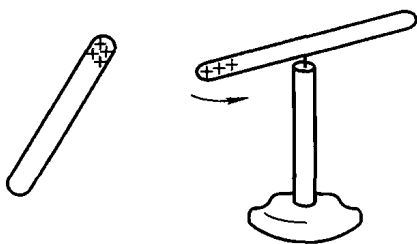


图 1.1-1 两根带同类电荷的棒相互排斥

克林的规定.存在两类电荷及同类电荷相斥、异类电荷相吸是电荷的基本属性,但规定哪种电荷为正,哪种电荷为负,完全是任意的,具有一定的历史偶然性.富兰克林的命名法基于正电荷容易从一物体流到另一物体的错误猜测,事实上,容易流动的电荷是电子所带的负电荷.摩擦起电是一个非常复杂的过程.两物体摩

擦后带何种符号的电荷是由许多因素决定的,如表面的杂质层、物体的温度、物体表面的光洁程度等。

2. 电子 质子 夸克

电磁现象的基本规律和电磁学的基本理论是在 18 至 19 世纪期间通过实验发现并总结出来的。当时,人们对物质的微观结构了解甚少,所以在宏观电磁理论的表述中,常常不涉及物质的微观结构。但在今天,如果我们能结合物质电结构的初步知识来学习电磁学,对深入理解电磁学的基本规律是有帮助的。

从物理和化学的观点来看,物质由原子、分子构成,而原子是由电子、质子和中子构成的。质子和中子是原子核的组成部分,统称核子。电子在核外运动,质量很小,约为 10^{-30} kg,大小很难严格确定。迄今为止的实验和理论都未发现电子具有内部结构,故都把电子作为点粒子。电子所带电荷的绝对值 e 是电荷的最小单元,称为元电荷。至今尚未发现电荷量比一个元电荷更小的稳定的带电体。但近年来,关于分数电荷的研究已引起广泛的兴趣。所谓分数电荷就是指比元电荷更小的电荷。粒子物理学的研究表明,核子等重粒子是由电荷量为 $(-1/3)e$ 或 $(2/3)e$ 的称为夸克的粒子组成的。但实验上尚未发现独立存在的带分数电荷的粒子。电荷具有最小单元的性质称为电荷的量子化,它是电荷的又一基本属性。质子和中子的质量几乎相等,约为电子质量的 1 840 倍(10^{-27} kg)。质子带正电,电荷量与电子的相等(相等的精确程度达到 10^{20} 分之一),中子不带电^①。质子可以稳定的独立存在,中子则不能,它将衰变(半衰期 13 min)为一个质子、一个电子和一个中微子。电子和质子的质量和电荷量的数值如表 1.1-1 所示。

表 1.1-1 电子、质子的电荷量和质量

	电荷量/C	质量/kg
电子	$-(1.602\ 189\ 2 \pm 0.000\ 046) \times 10^{-19}$	$(9.109\ 534 \pm 0.000\ 047) \times 10^{-31}$
质子	$(1.602\ 189\ 2 \pm 0.000\ 046) \times 10^{-19}$	$(1.672\ 648\ 5 \pm 0.000\ 086) \times 10^{-27}$

为什么电子和质子的电荷量值相等的精度如此之高?为什么所有电子都能保持这样精确的固定的电荷量值?是何种力量保持电子成为一个整体?这些问题至今令人迷惑不解。如果电子有内部结构的话,那么内部各部分之间应有静电斥力,电子结构的稳定性似乎表明其内部应存在某种比静电力更强的吸引力。所有这一切都是当今物理学尚未搞清楚的问题。

不同数目的质子和中子结合成各种不同的原子核。自然界中最重的原子核

^① 中子作为一个整体不带电,但其内部却存在电荷分布。

是铀-238 的核(^{238}U),它含有 238 个核子,质量约为 $4 \times 10^{-25} \text{ kg}$. 所有原子核的密度差不多都相等,而它们的直径大致正比于核子数的立方根. 原子核的直径为 $3 \times 10^{-15} \sim 2 \times 10^{-14} \text{ m}$. 铀原子核的半径约为 10^{-14} m ,密度约为 10^{17} kg/m^3 .

原子核和电子组成原子. 原子核带正电,电荷量取决于核内的质子数. 原子核外的电子数与核内的质子数相等. 整个原子的净电荷为零. 原子的质量几乎全部集中在原子核中,如氢原子核占氢原子质量的 99.95%,铀原子核占铀原子质量的 99.98%. 在第一级近似下,可以认为原子的质量就是它的原子核的质量. 原子的大小要比原子核大出好几个数量级. 原子半径的典型值的数量级为 10^{-10} m .

分子由原子组成. 由少数几个原子组成的分子,如 H_2O , CO_2 , Na_2SO_4 , C_6H_6 等,直径约为十分之几 nm. 它们的大小和质量与单个原子相比相差不大. 但也有些分子很大、很复杂. 至今知道的最大的分子是蛋白质分子和脱氧核糖核酸(DNA)分子, DNA 分子的质量达 10^9 u (原子质量单位).

3. 电荷守恒定律

任何物体,不论固体、液体还是气体,内部都存在正、负电荷. 在通常情况下,物体内部正负电荷数量相等,电效应相互抵消,不呈现带电状态. 如果由于某种原因,物体失去一定量的电子,它就呈现带正电状态;若物体获得一定量过剩的电子,它便呈现带负电状态. 物体的带电过程实质上就是使物体失去一定数量的电子或获得一定数量的电子的过程.

大量实验事实表明,电荷还有一个属性是守恒性,即在任何时刻,存在于孤立系统内部的正电荷与负电荷的代数和恒定不变,这一结论称为电荷守恒定律. 电荷守恒定律是一切宏观过程和一切微观过程都必须遵循的基本规律,它在所有的惯性系中都成立,而且在不同的惯性系内的观察者对电荷进行测量所得到的量值都相同. 换句话说,电荷是一个相对论性不变量.

4. 导体和绝缘体

金属原子的原子核对离核最远的电子(价电子)的作用力较小,当受到某种影响时,价电子很容易脱离原子核的束缚而成为自由电子,失去电子的原子核成为带正电的离子. 当大量金属原子组成金属时,由于原子间的相互影响,几乎所有的价电子都变成自由电子,它们在金属内部自由运动,但不会跑到金属外面,这种情况与密封于容器中的气体分子很相似,故通常把金属中的自由电子称为电子气. 酸、碱、盐溶于水时,将电离成可在溶液中自由运动的正离子和负离子. 所以不论金属内部还是酸、碱、盐的溶液中都存在大量的自由电荷,当自由电荷受力作用时,很容易从一处向另一处迁移,因而它们有很好的导电性,故金属以

及酸、碱、盐溶液称为导体. 金属内部发生电荷迁移时, 并不发生可觉察到的质量迁移, 而酸、碱、盐溶液中发生电荷迁移时, 将伴随质量的迁移. 我们把前者称为第一类导体, 后者称为第二类导体.

许多非金属, 其内部原子核对核外电子的作用力比较大, 电子被正离子牢固地束缚着, 不能自由运动(但是, 电子在原子或分子内部极小范围内, 仍可运动), 故非金属几乎没有导电本领, 称为绝缘体.

导体和绝缘体之间并无严格的界线, 在一定条件下, 绝缘体可以转化为导体. 例如, 绝缘体在强电力作用下将被击穿, 使束缚电子变成自由电子, 绝缘体就变成导体.

还有些物质如锗、硅和某些化合物等, 其导电性能介于导体和绝缘体之间, 称为半导体. 半导体的导电性会因其中杂质含量和外界条件的改变(如温度、光照等)而发生显著变化.

§ 1.2 库仑定律

1. 点电荷的概念 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、电荷的种类以及电荷量的多少等许多因素有关. 库仑(C. A. Coulomb)首先全面研究了两个点电荷间相互作用力的规律. 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.

对于两个点电荷, 它们之间的距离具有完全确定的意义, 而两带电体的形状、电荷在带电体上的分布情况已无关紧要. 点电荷的概念与力学中质点的概念相似, 它是从实际带电体中抽象出来的理想模型, 只具有相对意义, 本身不一定是非常小的带电体. 库仑于 1785 年通过对实验(著名的扭秤实验)结果的分析, 总结了两个静止点电荷间相互作用力的规律, 这就是我们熟知的库仑定律, 其主要内容是(1)同号电荷相互排斥, 异号电荷相互吸引;(2)作用力沿两点电荷的连线;(3)力的大小正比于每个点电荷电荷量的多少;(4)力的大小反比于两点电荷之间距离的平方. 用数学可表示为

$$\boldsymbol{F}_{12} \propto \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \boldsymbol{e}_r \quad (1.2-1)$$

$\boldsymbol{F}_{12}$ 代表点电荷 1 作用于点电荷 2 上的力, q_1 和 q_2 分别为该两点电荷的电荷量, r_{12} 是点电荷 q_1 到 q_2 的矢径 $\boldsymbol{r}_{12}$ 的大小, $\boldsymbol{r}_{12}$ 的方向由 q_1 指向 q_2 , 如图 1.2-1 所示, $\boldsymbol{e}_r$ 为该方向的单位矢量, 即

$$\mathbf{e}_r = \frac{\mathbf{r}_{12}}{r_{12}} \quad (1.2-2)$$

把(1.2-1)式写成等式,就得到库仑定律的数学表示式

$$\mathbf{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \mathbf{e}_r \quad (1.2-3)$$

比例系数 k 的值取决于式中各量的单位. 对同号电荷, $\mathbf{F}_{12}$ 与 $\mathbf{e}_r$ 同方向, 作用力为排斥力; 对异号电荷, $\mathbf{F}_{12}$ 与 $\mathbf{e}_r$ 反方向, 作用力为吸引力. 点电荷 2 对点电荷 1 的作用力 $\mathbf{F}_{21}$ 与 $\mathbf{F}_{12}$ 的大小相等, 方向相反, 满足牛顿第三定律.

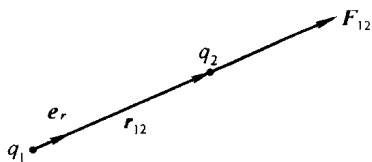


图 1.2-1 同号电荷 q_1 对 q_2 的作用力 $\mathbf{F}_{12}$ 沿 q_1 与 q_2 的连线, 并由 q_1 指向 q_2

2. 电荷量的单位

库仑定律(1.2-3)式中的比例系数 k 的数值、量纲与单位制的选择有关. 在 SI 中, 力的单位是 N(牛顿), 电荷量的单位是 C(库仑). 电荷量的单位 C 是导出单位,

$$1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot \text{s}$$

其中 A 是 SI 中电流的单位, 称为安培, s 为时间的单位, 称为秒. 既然库仑定律(1.2-3)式中各量的单位都已规定, 比例系数 k 的值只能由测量来确定. 设两个点电荷的电荷量 $q_1 = q_2 = 1 \text{ C}$, 在真空中相距 $r_{12} = 1 \text{ m}$, 当用 N 为单位去量度它们的作用力时, 所得的数值就等于(1.2-3)式中的 k , 这样确定的 k 的值为

$$k = 8.987\,551\,787 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2 \approx 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$$

为了后面的方便, 我们用另一常数 ϵ_0 表示 k , 规定

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (1.2-4)$$

由此得 $\epsilon_0 = 8.854\,187\,82 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$, 近似可取

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2) \quad (1.2-5)$$

ϵ_0 称为真空介电常数. 这样, 在 SI 中, 库仑定律的表示式为

$$\mathbf{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \mathbf{e}_r \quad (1.2-6)$$

3. 真空的概念及其演变

库仑定律(1.2-6)式给出了处在真空中的两点电荷之间的作用力, 通常称为真空中的库仑定律. 在物理学中, 真空的概念是在不断演变的, 真空变得越来越复杂. 真空并非什么都没有, 恰恰相反, 真空有许多复杂的性质, 有丰富的内容.