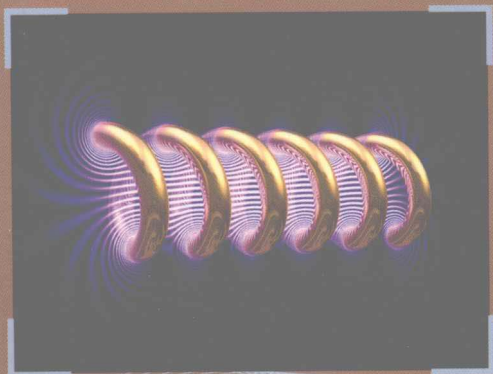


国家级特色专业教材系列



电磁学

● 主 编 肖 利



科学出版社

国家级特色专业教材系列

电 磁 学

主 编 肖 利

副主编 郑友进 高伟吉 隋英锐

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是教育部第二类特色专业建设点项目的成果,是为适应基础教育课程改革、培养适应现代社会和未来发展的高素质师资人才而编写的.本书教育理念先进,突出师范特色,借鉴了国内外教材改革的成果,博采众长,使内容编排更加人性化、简明化,便于教师讲授和学生自学.

全书共七章,分别为静电场、静电场中的导体、静电场中的电介质、稳恒电流、稳恒磁场、磁场中的磁介质、变化的电磁场.每章均附有思考题和习题(带*者为具有一定难度的习题,供学有余力的同学选做),书后配有习题答案.书中楷体部分为阅读材料,介绍了一些现代物理发展及其应用的前沿课题.

本书可作为高等师范院校本科物理类专业电磁学课程的教材,也可供其他专业师生参考,或作为中学物理教师提高业务水平的参考资料.

图书在版编目(CIP)数据

电磁学/肖利主编. —北京:科学出版社,2011

国家级特色专业教材系列

ISBN 978-7-03-029669-6

I. ①电… II. ①肖… 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(2011)第 016777 号

责任编辑:昌 盛/责任校对:刘亚琦

责任印制:张克忠/封面设计:耕者设计工作室

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

*

2011 年 2 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2011 年 2 月第一次印刷 印张:19

印数:1—3 000

字数:380 000

定价:33.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

我国新一轮基础教育课程改革已经在全国全面展开,新课程标准在课程目标上更注重提高全体学生的科学素养,在教学实施上更注重 STS 教育的渗透. 新课改对教师素质提出了更高的要求. 作为培养未来教师的高等师范院校,如何调整课程结构和知识结构,培养适应现代社会和未来发展的高素质师资人才,是摆在高等师范教育工作者面前的首要任务. 在这种背景下,我们编写了这本《电磁学》教材.

电磁学是高等师范院校物理教育专业的重要基础课程,内容成熟、系统严密,与中学物理教学关系极为密切,与现代科学技术、社会生活有着紧密的联系. 在本书编写过程中,编者结合多年来的教学实践经验和教育理念,注意到当前中学物理课程教改的动向和高等师范教学情况的变化,借鉴国内外教材改革的成果,博采众长,力求使本书更加人性化、简明化,便于教师讲授,并有利于学生自学和阅读.

1. STS(科学-技术-社会)教育被公认为是“一个对当今学生进行科学教育最合适的方法”,它在提高学生科学素养、树立科学价值观、培养社会责任感和决策能力等方面具有卓越的教育功能. 因此,本书在编写中贯彻了 STS 教育思想,突出电磁学知识与科学技术相结合,与生活实际相结合,与自然现象和自然环境相结合,注意学科间的交叉和人文精神的渗透,以此引发学生的兴趣,培养出适应中等教育和 STS 教育的师范生.

2. 对学生而言,学会物理学思想和物理学方法比获取物理学知识本身更为重要. 因此,在本书的编写过程中,编者结合教材内容适当引用史料,发掘物理学家在发现物理现象和建立物理规律过程中的科学思想和科学方法,使学生得到物理学思想方法的启迪,提高师范院校学生的科学素养.

3. 以往教材的读者对象大多是重点理科高校,很少有适合师范类高校特点的教材. 结合当前中学物理教材内容和物理教育专业特点,本书对教材的知识结构和内容进行了改革. ①将传统的电磁感应和电磁波内容合并为变化的电磁场. 由于师范院校电动力学、电工学与电子技术单独设课,所以删除了匀速运动电荷的电磁场和交流电等内容. ②本着降低难度、增加宽度的原则,吸收了优秀大学物理教材中的做法,减少复杂的理论推导过程,着眼于物理内涵的拓宽和当代进展的展示.

本书最后附有参考书目,编者在编写本书的过程中从这些参考书中得到许多启发和帮助,并从中精选了一些思考题和习题,在此对这些参考书的作者表示深深的感谢。

由于编者的水平有限,书中难免有不妥或疏漏,恳切希望广大教师 and 同学在使用过程中多提宝贵意见,使我们的教材不断完善.

编 者
2010 年 10 月

目 录

前言

第 1 章 静电场	1
1.1 电荷	1
1.1.1 摩擦起电	1
1.1.2 物体的电结构	1
1.1.3 电荷守恒性	2
1.1.4 电荷的量子性	2
1.1.5 电荷不变性	3
1.1.6 导体、绝缘体和半导体	3
1.2 库仑定律	4
1.2.1 库仑定律的表述	4
1.2.2 叠加原理	5
1.3 电场和电场强度	6
1.3.1 电场	6
1.3.2 电场强度	6
1.3.3 电场强度的计算	8
1.4 高斯定理及应用	14
1.4.1 电场线	14
1.4.2 电通量	16
1.4.3 高斯定理	17
1.4.4 高斯定理的应用	20
1.5 电势	23
1.5.1 电场力所做的功	23
1.5.2 静电场的环路定理	24
1.5.3 电势能	25
1.5.4 电势差和电势	25
1.5.5 电势的计算	26
1.5.6 等势面	29

1.5.7 电场强度与电势梯度 的关系	30
1.6 静电能	32
1.6.1 电荷与电场的相互作用能	32
1.6.2 点电荷系的相互作用能	33
1.6.3 静电场中的电偶极子	34
1.6.4 带电体的静电能	36
思考题	38
习题	41
第 2 章 静电场中的导体	48
2.1 导体的静电平衡性质	48
2.1.1 导体的静电平衡条件	48
2.1.2 静电平衡时导体上的 电荷分布	49
2.2 静电屏蔽	51
2.3 有导体存在时静电场的分析 与计算	52
2.4 静电场的唯一性定理	57
2.4.1 唯一性定理	57
2.4.2 几个引理	57
2.4.3 唯一性定理的证明	58
2.4.4 从唯一性定理看静电屏蔽	58
2.5 静电应用	59
2.5.1 静电除尘器	59
2.5.2 静电喷涂	60
2.5.3 静电复印	60
2.6 电容和电容器	61
2.6.1 孤立导体的电容	61

2.6.2 电容器及其电容	62	4.1.3 电流线	116
2.6.3 几种常见电容器的电容	62	4.1.4 电流的连续性方程	116
2.6.4 电容器的连接	64	4.1.5 稳恒电流与稳恒电场	116
2.7 电容传感器	66	4.2 欧姆定律和电阻	117
2.7.1 面积变化型电容传感器	66	4.2.1 欧姆定律	117
2.7.2 极距变化型电容传感器	67	4.2.2 电阻率	118
2.7.3 变介电常数型电容传感器	68	4.2.3 电阻应变片	119
2.8 静电场的能量	68	4.2.4 欧姆定律的微分形式	121
2.8.1 带电导体的静电能	68	4.3 电功率和焦耳定律	121
2.8.2 电场的能量	69	4.3.1 电功率	121
2.8.3 静电场对导体的作用力	70	4.3.2 焦耳定律	122
思考题	72	4.3.3 焦耳定律的微分形式	122
习题	75	4.4 金属导电的经典微观解释	122
第3章 静电场中的电介质	83	4.5 电源和电动势	124
3.1 电介质对电场的影响	83	4.5.1 电源的作用	124
3.2 电介质的极化	84	4.5.2 非静电场的强度	125
3.3 极化强度和极化电荷	86	4.5.3 电动势	126
3.3.1 极化强度的定义	86	4.5.4 全电路欧姆定律和一段含源 电路的欧姆定律	126
3.3.2 极化强度与电场强度的关系	87	4.5.5 稳恒电场在稳恒电路的 作用	127
3.3.3 极化电荷与极化强度的关系	87	4.6 两种常见的电源	129
3.4 有电介质时的静电场方程	94	4.6.1 化学电源	129
3.4.1 电位移矢量 D 与有介质时的 高斯定理	94	4.6.2 温差电源	131
3.4.2 有介质时的静电场环路定理	96	4.7 电路定理	133
3.4.3 静电场的边界条件	96	4.7.1 基尔霍夫定律	133
3.5 有介质时的静电能	102	4.7.2 叠加原理	135
3.5.1 电介质中静电能的定义	102	4.7.3 电压源与电流源	137
3.5.2 电介质中电场能	103	4.7.4 戴维宁定理	138
思考题	107	4.7.5 诺尔顿定理	139
习题	108	思考题	140
第4章 稳恒电流	114	习题	142
4.1 电流和电流密度	114	第5章 稳恒磁场	149
4.1.1 电流	114	5.1 磁的基本现象	149
4.1.2 电流密度	115		

5.1.1 磁铁	149	第6章 磁场中的磁介质	196
5.1.2 电流的磁效应	149	6.1 磁介质对磁场的影响	196
5.1.3 磁体对电流的作用	150	6.2 磁介质的磁化	197
5.1.4 磁体对运动电子的作用 ...	150	6.2.1 原子的磁矩	197
5.1.5 平行电流间的相互作用 ...	150	6.2.2 顺磁质的磁化	199
5.1.6 载流螺线管与磁体相互 作用	150	6.2.3 抗磁质的磁化	199
5.2 安培定律	151	6.3 磁化强度与磁化电流	200
5.3 磁场与磁感应强度	154	6.3.1 磁化强度的定义	200
5.3.1 磁场	154	6.3.2 磁化强度与磁感应强度的 关系	201
5.3.2 磁感应强度	154	6.3.3 磁化电流	201
5.3.3 磁感应线	156	6.3.4 磁化电流与磁化强度的 关系	202
5.4 毕奥-萨伐尔定律	157	6.3.5 磁化电流面密度与磁化 强度的关系	203
5.4.1 毕奥-萨伐尔定律	157	6.3.6 磁化电流体密度与磁化 强度的关系	204
5.4.2 毕奥-萨伐尔定律的应用	157	6.4 有磁介质时的稳恒磁场 方程	207
5.4.3 运动电荷的磁场	163	6.4.1 有介质时的高斯定理	207
5.5 磁场的高斯定理	164	6.4.2 磁场强度 H 与有介质时的 安培环路定理	207
5.5.1 磁通量	164	6.4.3 稳恒磁场的边界条件	208
5.5.2 高斯定理	164	6.5 铁磁质	212
5.6 安培环路定理	166	6.5.1 磁滞回线	212
5.6.1 安培环路定理	166	6.5.2 磁畴	214
5.6.2 安培环路定理的应用	168	6.5.3 磁路定理	215
5.7 磁场对载流线圈的作用 ...	173	6.6 超导体	217
5.7.1 磁场对载流直导线的作用 ...	173	6.6.1 超导体的基本性质	217
5.7.2 磁场对载流线圈的作用 ...	173	6.6.2 迈斯纳效应	218
5.7.3 磁场对磁偶极子的作用 ...	175	6.6.3 BCS 理论	219
5.7.4 磁场对磁体作用—— 磁悬浮	176	6.6.4 第二类超导体	220
5.8 磁场对运动电荷的作用 ...	177	6.6.5 约瑟夫森效应	220
5.8.1 带电粒子在磁场中的运动 ...	177	思考题	221
5.8.2 带电粒子在电场和磁场中运动 举例	180		
5.8.3 洛伦兹力与安培力	186		
思考题	188		
习题	190		

习题	223	7.4.2 互感磁能	252
第7章 变化的电磁场	228	7.4.3 磁场的能量	253
7.1 电磁感应定律	228	7.5 位移电流	254
7.1.1 电磁感应现象	228	7.5.1 位移电流	255
7.1.2 电磁感应定律	230	7.5.2 全电流安培环路定理	257
7.1.3 楞次定律	231	7.6 麦克斯韦方程组与电磁波 ...	260
7.2 动生电动势和感生电动势 ...	233	7.6.1 麦克斯韦方程组	260
7.2.1 动生电动势	233	7.6.2 自由空间的平面电磁波 ...	261
7.2.2 电磁感应中的能量转换 关系	235	7.6.3 电磁波的能量	263
7.2.3 感生电动势和感生电场 ...	235	7.6.4 电磁波的动量	264
7.2.4 电磁感应的应用	239	7.6.5 电磁波的产生与辐射	265
7.3 自感和互感	242	7.6.6 电磁波谱	270
7.3.1 自感	242	思考题	273
7.3.2 互感	245	习题	275
7.4 磁场的能量	252	习题答案	285
7.4.1 自感磁能	252	参考书目	296

第 1 章 静 电 场

相对于观察者静止的电荷产生的电场称为**静电场**. 本章主要讨论真空中静止电荷之间的相互作用, 从库仑定律出发, 引入关于静电场的基本概念和性质, 从而导出反映静电场基本特性的高斯定理和环路定理, 并运用这些概念和规律分析静电场的一些典型问题. 本章的内容是学习以后各章的基础.

1.1 电 荷

1.1.1 摩擦起电

人们对电荷的认识最早是从摩擦起电现象和自然界的雷电现象开始的. 实验指出, 硬橡胶棒与毛皮摩擦后或玻璃棒与丝绸摩擦后对轻微物体都有吸引作用. 当物体具有了这种性质, 就说该物体带了电或有了**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产品质量, 甚至引起爆炸事故.

大量实验表明, 自然界中的电荷只有两种: 被毛皮摩擦过的硬橡胶棒所带的电荷称为**负电荷**, 被丝绸摩擦过的玻璃棒所带的电荷称为**正电荷**. 同种电荷互相排斥, 异种电荷互相吸引. 物体所带电荷的多少称为**电荷量**, 简称**电量**, 用 Q 或 q 表示. 电量的国际单位是库仑, 记做 C.

1.1.2 物体的电结构

摩擦起电的根本原因与物体的电结构有关. 现代物理学指出, 任何物体都是由分子、原子构成, 原子又由原子核和核外电子构成. 在原子核内有质子和中子. 质子带正电, 中子不带电, 电子带负电. 在通常状态下, 核内质子数与核外电子数相等, 质子与电子的电量等量异性, 因此对外不显示电性. 但是, 不同物体发生相互摩擦时, 会使一个物体上的电子转移到另一个物体, 从而失去电子的物体就带正电, 得到电子的物体就带负电. 由此可见, 物体带电的本质是其电荷的迁移和重新分配. 除了摩擦起电外, 还可以有“接触”或“感应”等起电方法, 其起电本质都相同. 在日常生活中, 穿脱化纤、羊毛等衣服时很容易产生的静电就是一种摩擦带电.

1.1.3 电荷守恒性

从宏观现象看,两不带电物体相互摩擦使其分别带电,所带电荷等量异性;静电感应使不带电导体的两端出现等量异性感应电荷;带电体与不带电体接触使之带电,两物体电荷总量等于原带电体的电荷.

在微观现象中,变化前后的电荷代数和相等.例如,一个高能光子与一个重原子核作用时,该光子可以转化为一个正电子和一个负电子(这叫电子对的“产生”);而一个正电子和一个负电子在一定条件下相遇,又会同时消失而产生两个或三个光子(这叫电子对的“湮灭”).由于光子不带电,正、负电子又各带有等量异号电荷,所以,反应物的总电荷等于生成物的总电荷.

如上所述,大量实验表明,在一个孤立系统中,无论发生了怎样的物理过程,电荷都不会创生,也不会消失,只能从一个物体转移到另一个物体上,或从物体的一部分转移到另一部分,即在任何过程中,电荷的代数和是守恒的.这就是电荷守恒定律.由此定律可推得,单位时间内流入-流出系统边界的净电荷量等于系统内电荷的变化率.

1.1.4 电荷的量子性

1909年,美国物理学家密立根(R. Millikan, 1868~1953)通过油滴实验发现,电荷量总是以一个基本单元的整数倍出现.这个电荷量的基本单元就是电子所带电荷量的绝对值,用 e 表示

$$e = 1.6021892 \times 10^{-19} \text{C}$$

物体由于失去电子而带正电,或是得到额外电子而带负电,但物体带的电荷量必然是电子电荷量 e 的整数倍,即 $q = ne (n = 1, 2, \dots)$. 物体所带电荷量的这种不连续性称为**电荷的量子性**. 因为 e 如此之小,以致电荷的量子性在研究宏观现象的绝大多数实验中未能表现出来. 因此常把带电体当做电荷连续分布的带电体来处理,并认为电荷的变化是连续的.

目前已经比较确定的“基本”粒子有 200 余种. 如此众多的“基本”粒子并非同样基本,有些基本粒子内部还有复杂的结构. 弄清这些所谓基本粒子内部的结构,减少真正的基本粒子数,是物理学家进一步追求的目标. 于是便提出了有关基本粒子结构的各种模型,1964 年盖尔曼(M. Gell-Mann)和茨威格(G. Zweig)提出夸克模型: 夸克有 6 种,即上夸克、粲夸克、底夸克、下夸克、奇夸克和顶夸克,前三种夸克带 $2e/3$ 电量,而后三种夸克带 $-e/3$ 电量,一切强子(参与强力作用的粒子的总称,如质子、中子等)由夸克组成. 如质子由两个上夸克和一个下夸克组成,故质子的电量正好为 e . 中子由一个上夸克和两个下夸克组成,故中子不带电. 然而,至今单独存在的夸克尚未在实验中发现,因为夸克处在一种禁闭状态. 在理论上和实验上如何实现退禁闭状态是人们非常关心的一个课题.

1.1.5 电荷不变性

实验证明,一个电荷的电量与它的运动状态无关.例如,加速器将电子或质子加速时,随着粒子速度的变化,电量没有任何变化.再如氢分子和氦原子都有两个电子,它们在核外的运动状态差别不大,电子电量应该相等.但是氢分子的两个质子是作为两个原子核在保持相对距离约为 0.07nm 的情况下转动的;氦原子中的两个质子却紧密地束缚在一起运动.氦原子中的两个质子的能量比氢分子的两个质子的能量大到一百万倍的数量级,因而两者的运动状态有显著差别.如果电荷的电量与运动状态有关,氢分子中质子的电量就应该和氦原子中质子的电量不同,但两者的电子电量是相同的,因此两者就不可能都是电中性的.但是实验证实,氢分子和氦原子都精确地是电中性的.这就说明,质子的电量也是与其运动状态无关的.大量事实证明,电荷的电量是与其运动状态无关的.所以,在不同的参考系中观察,同一带电粒子的电量不变.电荷的这一性质称为**电荷的相对论不变性**.

1.1.6 导体、绝缘体和半导体

1720年,英国科学家格雷(Stephen Gray, 1670~1736)仔细研究了电沿某些物体传播的事实,并引入了导体的概念.具有良好的导电性能的物体称为**导体**.导体的特点是其内部有大量的自由电荷,这些电荷在电场的作用下能自由移动.导体导电性能的优劣用电导率 σ 来描述, σ 越大,导电性能越好.银、铜、铝等金属导体的电导率都在 10^8S/m 量级.常常把金属等以自由电子导电的物体称为**第一类导体**(电子迁移),把酸、碱、盐等电解液称为**第二类导体**(离子迁移),把电离气体称为**第三类导体**(电子和离子双重迁移).

几乎不能导电的物质(如橡胶、塑料、云母及空气等)称为**绝缘体**,绝缘体又称为电介质.由于绝缘体原子核对其外层电子束缚力很强,自由电子极少,故电阻率很大,在通常情况下显示出程度不同的微弱导电性.但在某些条件下,绝缘体的导电能力会发生显著变化.例如在强电力作用下,绝缘体会变成导体.这种现象称为绝缘体的击穿.又如干燥气体是很好的绝缘体,但是当气体受到紫外线、X射线或其他辐射时,气体会电离成为电子、正离子和中性分子的混合体,从而成为导体.

导电能力介于导体和绝缘体之间的物质(如硅、锗、硒等)称为**半导体**.非常纯的半导体导电性能接近绝缘体.在半导体中掺入微量其他元素,常常可使其导电能力大为增加,故其导电能力可由掺入杂质的种类与数量来控制.人们将微量的砷或硼等元素掺入锗和硅中就是为了这个目的.由半导体材料制成的晶体管和集成电路导致电子工业的革命.

1.2 库仑定律

1.2.1 库仑定律的表述

在发现电现象后的两千多年里,人们对电的认识一直停留在定性阶段.从18世纪中叶开始,许多科学家有目的地进行一些实验性的研究,以便找出静止电荷之间相互作用力的规律.但是,直接研究带电体的作用十分复杂,因为作用力不仅与物体所带电量有关,而且还与带电体的形状、大小以及周围介质有关.

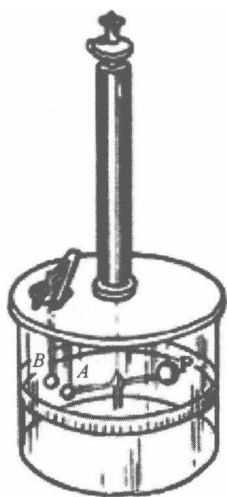


图 1.1 测量点电荷之间相互作用规律的库仑扭秤装置

1785 年法国科学家库仑注意到电荷之间的作用力与万有引力有许多类似之处,大胆地假设静止电荷之间相互作用力的规律与万有引力定律有类似的形式.为了证实这一假设,库仑首先提出了点电荷的理想模型,认为当带电体的大小和带电体之间的距离相比很小时,可以忽略其形状和大小,把它看作一个带电的几何点.又设计了一台精密的扭秤,如图 1.1 所示,对两个静止点电荷之间的相互作用进行实验,通过定量分析,库仑得到了两个点电荷在真空中的相互作用规律,称为库仑定律,表述如下:

真空中两个静止点电荷之间的相互作用力的大小与这两个点电荷所带的电量 q_1 和 q_2 的乘积成正比,与它们之间的距离 r 的平方成反比,作用力的方向沿两个点电荷的连线,同种电荷相斥,异种电荷相吸,即

$$\mathbf{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{e}_r \quad (1.1)$$

式中, $\mathbf{e}_r$ 表示一单位矢量,由施力者指向受力者方向,如图 1.2 所示, k 为比例常量,其值取决于式中物理量所选取的单位.电荷 q_1 和 q_2 的电荷量值可正可负,当 q_1 和 q_2 同号时, $\mathbf{F}$ 与 $\mathbf{e}_r$ 同向,表现为斥力;当 q_1 和 q_2 异号时, $\mathbf{F}$ 与 $\mathbf{e}_r$ 反向,表现为吸力.在国际单位制中, k 的量值为

$$k = 8.987551787 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \approx 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$$

为使以后导出的公式有理化,通常我们将 k 表示成

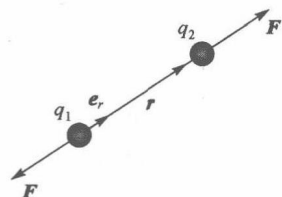


图 1.2 库仑定律

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

式中, ϵ_0 称为真空介电常量, 又称真空电容率, 其量值为

$$\epsilon_0 = 8.854187818 \times 10^{-12} \text{C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

这样, 真空中的库仑定律通常可表示成

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{e}_r \quad (1.2)$$

库仑定律是关于一种基本力的定律, 它的正确性不断经历着实验的考验. 设定定律分母中 r 的指数为 $2+\alpha$, 人们曾设计了各种实验来确定(一般是间接地) α 的上限. 1773 年卡文迪许的静电实验给出 $|\alpha| \leq 0.02$. 约百年后麦克斯韦的类似实验给出 $|\alpha| \leq 5 \times 10^{-5}$. 1971 年威廉斯等人改进该实验得出 $|\alpha| \leq (2.7 \pm 3.1) \times 10^{-16}$. 这些都是在实验室范围($10^{-3} \sim 10^{-1} \text{m}$)内得出的结果. 对于很小的范围, 卢瑟福的 α 粒子散射实验(1909)已经证实小到 10^{-15}m 的范围, 现代高能电子散射实验进一步证实小到 10^{-17}m 的范围, 库仑定律仍然精确地成立. 大范围的结果是通过人造地球卫星研究地球磁场得到的. 它给出库仑定律精确地适用于 10^7m 范围, 因此一般就认为在更大的范围内库仑定律仍然有效.

1.2.2 叠加原理

当空间存在两个以上的点电荷时, 任意两个点电荷间都存在相互作用. 实验指出: 两个点电荷间的作用力不因第三个电荷的存在而改变. 不管一个体系中存在多少个点电荷, 每一对点电荷之间的作用力都服从库仑定律, 而任一点电荷所受到的力等于所有其他点电荷单独作用于该点电荷的库仑力的矢量和, 这一结论称为叠加原理.

设有 n 个点电荷组成的体系, 第 j 个点电荷 q_j 作用于第 i 个点电荷 q_i 的库仑力为

$$\mathbf{F}_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_j q_i}{r_{ij}^2} \mathbf{e}_{r_{ij}}$$

式中, r_{ij} 为 q_j 到 q_i 的距离, $\mathbf{e}_{r_{ij}}$ 为从指向 q_i 方向的单位矢量. 根据叠加原理, q_i 受到的合力为

$$\mathbf{F} = \sum_j \mathbf{F}_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{q_j q_i}{r_{ij}^2} \mathbf{e}_{r_{ij}} \quad (1.3)$$

叠加原理是自然界客观事实的总结, 叠加原理与库仑定律相结合, 构成了整个静电学的基础, 原则上可以解决静电学的全部问题. 但不能理所当然认为, 叠加原理应在一切情况下都是成立的, 在某些非常小的范围内如原子或亚原子范围内, 叠加原理并不成立.

1.3 电场和电场强度

1.3.1 电场

库仑定律只给出了两个点电荷之间相互作用的定量关系,并未指明这种作用是通过怎样的方式进行的.我们常说:力是物体与物体之间的相互作用.这种作用常被习惯地理解为是一种直接接触作用.例如,推车时,通过手和车的直接接触把力作用在车子上.但是电力、磁力和重力却可以发生在两个相隔一定距离的物体之间.那么,这些力究竟是如何传递的呢?围绕这个问题,历史上曾经有过争论:一种观点认为,这些力的作用不需要中间媒介,也不需要时间,就能实现远距离的相互作用,这种作用常称为超距作用.另一种观点认为,这些力是通过一种充满于空间的弹性介质——“以太”来传递的.

现代物理学证明,“超距作用”的观点是错误的,电力和磁力的传递需要时间,传递速度约为 $3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 1887 年迈克耳孙-莫雷实验证明,“以太”根本不存在.英国物理学家法拉第提出新的观点:认为在电荷周围存在着一种特殊形态的物质,称为**电场**.电荷与电荷之间的相互作用是通过电场来传递的,电场对处在场内的其他电荷有力作用.其作用可表示为

$$\text{电荷} \Leftrightarrow \text{电场} \Leftrightarrow \text{电荷}$$

电荷受到电场的作用力称为**电场力**.

现代物理学已经肯定了场的观点,并证明了电磁场的存在.电磁场与实物粒子一样具有质量、能量、动量等物质的基本属性.相对于观察者静止的电荷在周围空间激发的电场称为**静电场**,它是电磁场的一种特殊状态.本章介绍静电场的基本规律,下两章讨论有导体和电介质存在时的静电场.

1.3.2 电场强度

既然电场对电荷有力的作用,那么就可以根据电场对电荷的作用力来定量地研究电场.为此,我们需要在电场中引入一个试探电荷 q_0 , 试探电荷 q_0 应该满足两个条件:它的线度必须小到可以看做点电荷,以便确定电场中各点的电场性质;它所带的电荷量必须充分小,以免改变原有电荷的分布,从而影响原来的电场分布.今后为了方便起见,我们不妨假设试探电荷带正电.

如图 1.3 所示, Q 为场源电荷,在其周围空间相应地激发一个电场.现将一个试探电荷 q_0 放在此电场不同地点(简称场点).实验表明,在不同场点上, q_0 所受电场力的大小和方向不尽相同;若在任取的同一场点上,改变所放置的试探电荷 q_0 的电荷量大小,则 q_0 所受的电场力 F 的大小亦随之变化,然而,两者的比值 F/q_0 却与试探电荷量值无关,而仅取决于场源电荷的分布和场点的位置,因此,我们就从电场对电

荷施力的角度,把这个比值作为描述电场的物理量,称为**电场强度**,或简称**场强**,记做 E ,即

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (1.4)$$

在国际单位制中,电场强度 E 的单位是牛顿每库仑 ($\text{N} \cdot \text{C}^{-1}$),也可以表示为伏特每米 ($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$).

式(1.4)表明,静电场中某一点的电场强度 E 是一个矢量,其大小等于单位正电荷在该点所受电场力的大小,其方向与正电荷在该点的受力方向一致.客观上,由于每一个场点都是一个确定的电场强度矢量,而不同场点的电场强度矢量的大小和方向则不尽相同,因此,我们把这些矢量的集合叫做**矢量场**,也就是说,电场是**矢量场**.

由以上讨论不难推断,如果已知空间某点处的电场强度 E ,则电荷 q 在该点处受到的电场力为

$$F = qE \quad (1.5)$$

地面带着负电,大气中含有净的正电荷,所以大气中时刻存在电场.大气电场的方向指向地面,强度随时间、地点、天气状况和离地面的高度而变.按天气状况可分为晴天电场和扰动天气电场.

在晴天电场中,水平方向的电场可略去不计,大气电场指向地球表面.晴天电场随纬度而增大,称为**纬度效应**.就全球平均而言,电场强度在陆地上为 120V/m ,在海洋上为 130V/m .在工业区,由于空气中存在高浓度的气溶胶,电场强度会增至每米数百伏.晴天电场具有日和年两种周期性的变化.在海洋和两极地区,电场日变化和地方时无关,在世界时(格林威治平太阳时)19:00左右出现极大值,4:00左右出现极小值,呈现一峰一谷的简单波状,振幅约达平均值的20%.但对大多数陆地测站而言,电场日变化和地方时有密切关系,通常存在两个起伏,地方时4:00~6:00和12:00~16:00出现极小值,7:00~10:00和19:00~21:00出现极大值,振幅约达平均值的50%,这种变化与近地面层气溶胶粒子的日变化密切相关.电场的年变化,在海洋上不明显;而在南、北半球陆地测得:冬季出现极大值,夏季出现极小值.有人发现大气电场还有27天和11年周期的变化,这方面还有待进一步研究.

在地表和电离层两个良导电面之间形成的晴天电场,其值以地表为最大,随高度按指数律迅速减小,在10千米高处的电场强度约为地面值的3%.大气电场的减弱和大气电阻的减少有关.低空大气电阻比高空的大,因而产生同样的大气电流在低空就需要比高空更强的电场.

扰动天气电场同气象要素的变化有关.当存在激烈的天气现象(如雷暴、雪暴、

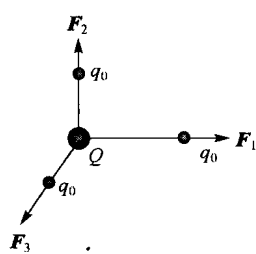


图 1.3 试探电荷在电场中不同位置受电场力的情况

尘暴)时,大气电场的数值和方向均有明显的不规则变化,高云对电场的影响不大,低云则有明显的影响,雷雨云下面的大气电场,甚至可达 -10^4 V/m . 在层状云和积状云中,电场的大小和方向变化很大,通常出现的场强约为每米数百伏,雷雨云中还要大2~3个量级. 由于大气电场的变化和天气有关,世界上有些观象台,长年积累资料,以寻求大气电场等要素变化的规律及其与天气和气候过程之间的相互关系.

1.3.3 电场强度的计算

1. 点电荷电场中的电场强度

设场源是电量为 q 的点电荷,为了研究它的场,设想把一个试探电荷 q_0 放在距离 q 为 r 的 P 点处,根据库仑定律,场源电荷 q 作用于试探电荷 q_0 的力为

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2} \mathbf{e}_r$$

其中 $\mathbf{e}_r$ 是从 q 指向 q_0 的单位矢量. P 点的电场强度为

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \mathbf{e}_r \quad (1.6)$$

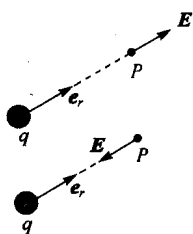


图 1.4 电场强度的方向

式(1.6)表明,在电荷的电场空间,任意一点 P 的电场强度大小与场源电荷至场点的距离 r 二次方成反比,与场源电荷的电荷量 q 成正比. 电场强度的方向,取决于场源电荷的符号. 若 $q > 0$,则 $\mathbf{E}$ 与 $\mathbf{e}_r$ 同向;若 $q < 0$,则 $\mathbf{E}$ 与 $\mathbf{e}_r$ 反向,如图1.4所示. 从式(1.6)还可以看出,点电荷的电场具有球对称性分布,在以场源电荷为球心的球面上,电场强度大小处处相等.

2. 点电荷系电场中的电场强度

设场源电荷是由若干个点电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 组成的一个系统,每个点电荷周围都有各自激发出的电场. 把试探电荷 q_0 放在场点 P 处根据力的叠加原理,作用在 q_0 上的电场力的合力 $\mathbf{F}$ 应该等于各个点电荷分别作用于 q_0 上的电场力 $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \dots, \mathbf{F}_n$ 的矢量和,即

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \dots + \mathbf{F}_n \quad (1.7)$$

把上式的两边分别除以 q_0 , 由电场强度定义式,可得 P 点的合电场强度为

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \dots + \mathbf{E}_n = \sum_i \mathbf{E}_i \quad (1.8)$$

即点电荷系在空间某点激发的电场强度,等于各个点电荷单独存在时在该点激发电场强度的矢量和,这一结论称为电场强度的叠加原理. 将点电荷的场强公式(1.6)代入式(1.8)可得 P 点的场强为

$$\mathbf{E} = \sum_i \mathbf{E}_i = \sum_i \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i^2} \mathbf{e}_{ri} \quad (1.9)$$