

第二届国家教委优秀教材一等奖

21 世纪高等院校教材

电 磁 学

(第二版)

徐 游 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是理工科大学和师范院校物理类专业本科生适用的电磁学教材,主要内容包括真空中固定电荷的电场、导体周围的静电场、静电能量、电介质、稳恒电流、真空中稳恒电流的磁场、电磁场中电荷的运动与运动电荷的电磁场、磁介质、电磁感应、韦克斯韦方程与电磁波、交流电。每章均有练习题,书后有习题答案。

图书在版编目(CIP)数据

电磁学/徐游编著.—2版.—北京:科学出版社,2004.5

21世纪高等院校教材

ISBN 7-03-012755-2

I. 电… II. 徐… III. 电磁学-高等学校-教材 IV. O441

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 004092 号

责任编辑:张邦固/责任校对:钟 洋

责任印制:安春生/封面设计:陈 敬

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>

印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

※

1987 年 1 月第 一 版 江苏科学技术出版社第一版

2004 年 5 月第 二 版 开本:B5(720×1000)

2005 年 4 月第二次印刷 印张:27 3/4

印数:3 001—5 500 字数:526 000

定价:38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

第二版 修订说明

本书初版定稿于 20 世纪 80 年代中期,出版后获同行好评,在第二届全国普通高校优秀教材评奖中,获国家教委优秀教材一等奖。近 20 年来,科学技术有很大发展,我国高等教育情况也变化很大,专业分工概念日趋淡化,逐渐走向通才教育。为了适应新情况,本书有修改充实的必要。这次主要在以下几方面作了修订:

1. 删去过难过繁与较为次要的内容,以适应电磁学教学时数减少的状况,并能适应更多学校的需要。

2. 进一步明确教学基本要求。将全书内容分为基本内容(用大字排印)、附录与阅读材料(用小字排印)三部分。把对低年级学生来说较为次要的内容和对某些问题的进一步深入讨论放在附录中;而把一些属于电磁学与其他学科(包括物理学其他部分)交叉,而主要属于其他学科,目前热门或极有前途的问题的简单介绍,以及电磁学的技术应用的内容放在阅读材料中。有些大字排印的节中,出现一段或几段小字。这些小字的内容,本应放在附录或阅读材料里,因内容较少,不便独立成节,所以只好夹在相应的基本内容里。为保持基本内容的独立性,不引用附录和阅读材料的内容。这样便于使用本书的老师和同学,根据需要与兴趣进行选择,并使本书富有弹性,有较宽适应面。

3. 力求反映与电磁学有较密切关系的近年自然科学与技术的重要新发展,使内容现代化。新版除了拓宽或加深某些概念的内涵,用新例子取代旧例子外,主要是采用同行们通常讲的“开窗口、加接口”的方法,对有关内容作浅近而简单的介绍。意在供读者浏览一下,获得初步印象。如读者有意获得更多知识,还必须找其他参考资料。

编写本书的主要指导思想,已写在第一版前言中。此次修订,保留了初版的主要特色。作者一贯认为,大学低年级基础课教学,应该重视综合、分析、探索、创新的精神和能力的培养和锻炼。虽然目前事实上只有研究生毕业才有机会从事基础研究工作,一般大学生机会较少。但是不能因此在大学阶段(包括低年级阶段)放弃这方面的努力。作者认为,无论从事何种工作,到工厂做技术工作,当中学教师等等,都应具备一定的综合、分析、探索、创新的精神与能力(这是科研能力的核心)。广义地说,这种精神与能力的培养,应从娃娃开始,并贯穿于整个教育过程。西方发达国家在这方面的做法值得我们借鉴。

本书在内容安排上,注意留出让学生独立思考,独立解决问题的空间。比如,对称性在整个物理学中有根本意义。本书在研究电磁场时,突出空间对称性的分析。然而在第一、二两章中只着重讨论球对称性,平面对称性仅作简单介绍,轴对称性的论述则有意略去,甚至不给出圆柱形电容器电容的公式(在习题课中也不安排轴对称例题)。直至第三章正文中才讨论轴对称问题。但是第一、二章习题中却有许多这方面的题目。这样安排的用意在于给同学们留下自己独立解决问题的余地。建议使用本书的老师也不必去补足这些内容。这样做与时下盛行的应试教育很不相同,希望同学们能适应这种转变,摒弃应试教育的影响。

本书尽可能多地给出物理量的数量级,适当介绍对复杂实际问题提出简化模型及作近似计算的方法。这方面要比传统普通物理教材做得多。书中不少例题,难度很小,却不嫌其繁地详细计算,其用意不在教学生如何解题,而在使学生熟悉重要的物理量的数量级。这样做使本书增加些篇幅,但这是必要的,我认为这不会导致教学时数的增加。

本书补充例题绝大多数选自 20 世纪 80 年代美国若干大学联合在我国招收物理学研究生的 Cuspea 考试试题和西方国家博士资格考试试题。综合性、灵活性、难度都比较大(但不涉及附录和阅读材料的内容),供学有余力的同学选学,或留作报考研究生时复习用。初学时一般宜略去。

习题数量较大,供选择用。同学们不必全部都做,以免影响思考、钻研和阅读参考书的时间。涉及附录或阅读材料内容的题目前有 * 号。

扣除附录、阅读材料、补充例题,全书篇幅约为 41 万字或略少些。大体上与 55~70 学时(周学时 3~4)的电磁学课程匹配。本书基本内容部分的电磁场方程限于积分形式,不要求学生先学过矢量分析,也不要求高等数学中矢量分析部分与本课程在同一学期学习。为方便电子技术等专业学生使用,本书电路部分尽量采用电路课程教科书通常使用的术语。如将交流电一章删去不影响其他部分的学习。

对大学教学而言,通常所讲的教材,本宜作为主要参考书看待。教师们可按需要与兴趣增删调整,不要拘泥于本书的安排。

本书改写工作得到南京大学物理系同事们和学校教务处的热心支持。作者还从兄弟院校同行编著的教科书中,从他们在教学、教材研讨会上的发言中,和他们与我交谈中吸取了许多宝贵经验。本校用过本书的同学也提了许多建议。作者对上述所有的人表示由衷感谢,并希望继续得到赐教。

徐 游

2003 年 12 月于南京大学

第一版 前 言

本书是作者于 1981 年根据教育部颁发的综合大学物理专业普通物理学(电磁学)教学大纲(四年制)及作者长期讲授本课程的经验编写的.在编写中注意吸收国内外先进经验.出版之前又根据近几年试用情况作了修改.

作为教材,其内容和写法,应当根据教学目的确定.教学的目的,不仅是传授知识,更重要的是要培养学生进行创造性科研工作的能力,同时要注意培养学生既严谨踏实又思想活跃的学风.写一本能较好体现上述思想的电磁学教材,是作者的愿望.为此作者作了一些探索,特别是注意了以下各点:

(1) 在阐述物理学基本规律与基本概念时,对前人研究的原始想法,某项发明、发现是在什么背景下,受到什么启发,经由什么途径,以怎样的科学态度而获得成功,作了适当介绍.并注意阐明各个概念、规律的适用范围.在保持理论系统性的同时,适当介绍近代物理知识、物理学前沿状况和有待解决的问题.增加这些内容可以启迪智慧,丰富科学想像力,帮助学生向前人学习探索自然规律的本领,诱发创造性与革新精神,并可增加学生的学习兴趣.

(2) 适当介绍对复杂的实际问题提出简化物理模型及作近似计算的方法,尽可能多地给出各物理量的数量级,以利于培养学生解决实际问题的能力.

(3) 注意物理学各部分知识之间的联系,对于贯穿物理学各个部分的基本概念,如能量观点、守恒定律、叠加原理、参照系等均特别加以强调,以利学生对物质运动建立起完整、系统、明晰的物理图像.

本书力求做到突出重点,深入浅出,便于自学.为了适应不同学校不同专业的需要,在内容上作了弹性安排,增删两便.例如,若删去用活体字排印部分的内容,不会影响其余内容的系统性.因此本书可用作综合大学、师范院校物理类专业及工科相近专业的教材或教学参考书.对于近代物理和理论物理课较少的物理专科学学生,本书可能有助于他们获得一些有关的现代物理知识.书中配有较多的例题与习题,特别注意配置一些着重训练灵活运用基本原理与解题技巧的例题.还吸收部分近年国内外研究生入学试题中较好的题目.习题数量较多,同学们不必全部演算.一些综合性较强或较难的例题作为补充例题放在各章之末,初学时可以略去.

南京大学物理系于 1959 年开始对教学工作作了较大改革,新编了普通物理学和理论物理学教材.中国科学院学部委员、南京大学教授冯端先生当时为本校物

理、天文和大气物理等专业编写了电磁学讲义.作者当时在他指导下参加本课程教学工作.1962年起,冯端先生因其他科研、教学工作繁忙,由作者单独使用该教材,继续进行教学改革探索试验.20多年来,根据国内外科学技术的发展和教学改革的需要,结合自己在教学实践中的体会,经过多次改写,最后成为现在这个样子.书中仍保留了原讲义的某些长处.在改写过程中,继续得到冯端先生的鼓励和支持.对此作者深为铭感.我校基础物理教研室和理论物理教研室有关同志曾对本书提出许多有益建议,在此谨致谢忱.

由于水平有限,难免有错误和欠妥之处,竭诚欢迎批评指正.

徐 游

1985年4月于南京大学

目 录

第一章 真空中固定电荷的电场	1
§ 1.1 电荷	1
§ 1.2 库仑定律和叠加原理	2
1. 库仑定律 2. 电量的单位 3. 叠加原理 4. 对库仑定律的进一步讨论	
§ 1.3 物质的电结构	7
1. 电荷的量子化 2. 原子结构 3. 导体、绝缘体和半导体 4. 电荷守恒定律 5. 使物质结合的力	
§ 1.4 电场 电场强度	13
1. 电场 2. 电场强度 3. 点电荷的场强 4. 电场强度叠加原理	
§ 1.5 连续分布的电荷所激发的电场	19
§ 1.6 静电场的势	26
1. 静电力所做的功与路径无关 2. 电势能和电势 3. 电势的计算 4. 场强与电势的微分关系	
§ 1.7 电场线和等势面	34
§ 1.8 高斯定理	36
1. 电通量 2. 高斯定理 3. 电场线的性质	
§ 1.9 高斯定理应用举例	42
1. 均匀带电球的电场 2. “无限大”均匀带电平面的电场	
§ 1.10 电偶极子激发的电场	46
§ 1.11 [附录]密立根油滴实验与分数电荷	50
§ 1.12 小结和补充例题	52
1. 小结 2. 补充例题	
第二章 导体周围的静电场 静电能量	59
§ 2.1 静电场中导体的基本性质	59
1. 静电平衡条件 2. 静电感应过程 3. 电荷只分布在导体表面 4. 法拉第圆桶实验 5. 库仑平方反比律的精确验证	
§ 2.2 导体表面的电场与电荷分布 尖端效应	63
1. 导体表面附近的电场强度 2. 尖端效应 3. 场致发射显微镜	
§ 2.3 静电屏蔽 范德格拉夫起电机	66

1. 静电屏蔽 2. 范德格拉夫静电高压起电机	
§ 2.4 导体周围电场的计算	67
1. 方法 2. 解的惟一性定理	
§ 2.5 孤立导体的电容	72
§ 2.6 电容器的电容	73
§ 2.7 电容器的组合	76
§ 2.8 真空中静止电荷系的能量	79
§ 2.9 真空静电场的能量	82
1. 能量定域于电场 2. 点电荷的固有能量 3. 原子核的静电能量	
§ 2.10 导体表面所受的力	86
§ 2.11 外电场中电偶极子的电势能和所受的力和力矩	87
§ 2.12 [阅读材料]静电学的技术应用	89
1. 静电除尘器 2. 静电复印机	
§ 2.13 小结和补充例题	91
1. 小结 2. 补充例题	
第三章 电介质	101
§ 3.1 电介质的极化	101
1. 无极分子电介质 2. 有极分子电介质	
§ 3.2 极化强度和极化电荷密度	104
1. 极化强度 2. 极化电荷 3. 极化电荷面密度	
§ 3.3 微观场与介质宏观场方程式的推导 电感应强度	108
1. 微观场与宏观场 2. 介质宏观场方程式的推导 3. 极化率和介电常数	
4. 关于极化电荷分布的进一步讨论	
§ 3.4 有电介质存在时静电场的计算	113
§ 3.5 有电介质存在时的电场能与作用力	117
1. 电介质内的电场能 2. 利用功能原理计算带电体系所受的力	
§ 3.6 [附录]介质分界面上的边界条件	120
§ 3.7 [阅读材料]物质介电性质补充知识	122
1. 非线性介质 2. 铁电 压电 电致伸缩 3. 各向异性介质	
§ 3.8 [附录]静电场方程式的微分形式和解的惟一性定理的证明	124
1. 静电场方程式的微分形式 2. 解的惟一性定理的证明	
§ 3.9 [附录]数值计算方法	127
§ 3.10 小结和补充例题	131
1. 小结 2. 补充例题	
第四章 稳恒电流	138
§ 4.1 电流与电流密度	138

1. 电流 2. 电流密度 3. 电流线	
§ 4.2 电流的连续性方程 稳恒电流	142
1. 电流的连续性方程 2. 稳恒电流 3. 基尔霍夫第一定律 4. 稳恒电流电场	
§ 4.3 电阻 欧姆定律	145
1. 欧姆定律 2. 非线性元件 3. 电阻率 4. 欧姆定律的微分形式	
§ 4.4 电流的功和功率	149
§ 4.5 金属导电的经典微观理论	151
1. 金属导电的载流子是自由电子 2. 电子气的热运动 3. 欧姆定律的解释	
§ 4.6 稳恒电流电场的若干性质	155
§ 4.7 电源 电动势	158
1. 电源的作用 2. 外加力场强度 3. 电动势 4. 电源的端电压	
5. 能量关系	
§ 4.8 基尔霍夫定律	166
1. 有关电路的几个概念 2. 基尔霍夫定律	
§ 4.9 复杂电路的计算	170
1. 支路电流法 2. 回路电流法	
§ 4.10 电容器的充放电过程	174
§ 4.11 [附录]网络定理	176
1. 叠加定理 2. 电压源 等效电压源定理 3. 电流源 等效电流源定理	
§ 4.12 [附录]温差电现象	179
1. 珀耳帖电动势 2. 汤姆孙电动势 3. 温差电动势	
§ 4.13 [阅读材料]半导体简介	182
1. 半导体导电性 2. pn 结和晶体三极管 3. 集成电路	
§ 4.14 [阅读材料]若干生物电现象简介	185
1. 心电图原理 2. 神经系统中的电流 3. 安全用电	
§ 4.15 小结和补充例题	188
1. 小结 2. 补充例题	
第五章 真空中稳恒电流的磁场	197
§ 5.1 磁相互作用	197
§ 5.2 磁场 磁感应强度 毕-萨-拉定律	200
1. 电流间相互作用力的基本性质 2. 磁感应强度 3. 毕-萨-拉定律	
§ 5.3 [附录]安培定律	205
§ 5.4 应用毕-萨-拉定律计算简单电路的磁场	206
1. 圆电流轴线上各点的磁感应强度 2. 载流直螺线管轴线上各点的磁感应强度 3. 载流直导线的磁场	
§ 5.5 稳恒电流磁场的基本方程式	210

1. 磁通量 2. 磁场的“高斯定理” 3. 安培环路定理 4. 安培环路定理的应用	
§ 5.6 作为磁偶极子的闭合电流	217
§ 5.7 平行电流间的相互作用力 电流单位“安培”的定义	220
1. 平行电流间的相互作用力 2. 电流单位“安培”的定义	
§ 5.8 磁场对载流线圈的作用	222
§ 5.9 [附录]安培环路定理的证明	227
§ 5.10 小结	229
第六章 电磁场中电荷的运动与运动电荷的电磁场	236
§ 6.1 洛伦兹力	236
1. 洛伦兹力 2. 带电粒子在均匀磁场中的运动	
§ 6.2 带电粒子在电磁场中运动的例子	241
1. 汤姆孙实验和电子的发现 2. 质谱仪 3. 回旋加速器	
§ 6.3 霍尔效应	246
§ 6.4 [附录]等离子体	248
§ 6.5 [附录]运动电荷的场	250
§ 6.6 [附录]相对论效应	252
§ 6.7 小结和补充例题	255
1. 小结 2. 补充例题	
第七章 磁介质	260
§ 7.1 介质的磁化	260
1. 介质的磁化现象 2. 电子的轨道磁矩与自旋磁矩 3. 核磁矩	
4. 抗磁性 5. 顺磁性 6. 爱因斯坦和德-哈斯等实验	
§ 7.2 磁化强度与磁化电流密度	269
1. 磁化强度 2. 磁化电流密度 3. 磁化电流面密度	
§ 7.3 磁感应强度与磁场强度 介质磁场的基本方程式	274
1. 微观场与宏观场 2. 介质磁场的基本方程式 3. B 与 H 的意义	
§ 7.4 介质的磁化规律	278
1. 顺磁和抗磁介质 2. 铁磁介质 3. 铁磁性的起源 4. 有磁介质芯的螺线管的磁场的计算	
§ 7.5 永久磁铁的磁场	286
§ 7.6 磁路	288
1. 有磁介质特别是铁磁质存在时磁感应线的形状 2. 磁路计算 3. 铁芯开有气隙的螺绕环	
§ 7.7 [附录]等效磁荷方法	293
1. 建立在磁荷基础上的静磁学 2. 等效磁荷方法 3. 退磁场	

§ 7.8	[附录]边界条件	298
§ 7.9	小结和补充例题	299
	1. 小结 2. 补充例题	
第八章	电磁感应	304
§ 8.1	楞次定律和法拉第电磁感应定律	304
	1. 电磁感应现象 2. 楞次定律 3. 法拉第电磁感应定律	
§ 8.2	电磁感应中的非库仑力	308
	1. 磁场不随时间变化,导体运动的情况 2. 导体静止,磁场随时间变化的情况 3. 一般情况 4. 电磁感应中的能量转换关系 5. 电子感应加速器	
§ 8.3	自感应	318
§ 8.4	含有自感的电路接通与开断时的瞬时电流	321
	1. 接通时的瞬时电流 2. 开断时的瞬时电流	
§ 8.5	互感应	323
§ 8.6	磁场的能量	326
	1. 自感磁能 2. 磁场能量密度 3. 互感磁能	
§ 8.7	磁滞损耗 涡电流 趋肤效应	330
	1. 磁滞损耗 2. 涡电流 3. 趋肤效应	
§ 8.8	位移电流	332
§ 8.9	[附录]似稳电流	337
	1. 基尔霍夫第一定律 2. 似稳电流中电压的概念 3. 基尔霍夫第二定律 4. 似稳条件	
§ 8.10	[阅读材料]超导体简介	343
	1. 超导体基本性质 2. 迈斯纳效应 3. BCS 理论 4. 第二类超导体 5. 约瑟夫森效应 6. 磁悬浮列车	
§ 8.11	小结和补充例题	349
	1. 小结 2. 补充例题	
第九章	麦克斯韦方程组与电磁波	358
§ 9.1	电磁场规律的总结	358
§ 9.2	电磁波	360
§ 9.3	光的电磁理论和电磁波谱	366
	1. 光的电磁理论 2. 赫兹实验 3. 电磁场的动量、光压和光子 4. 电磁波谱	
第十章	交流电	374
§ 10.1	频率 相位 初相位	374
§ 10.2	R 、 L 、 C 单元电路 有效值 平均值	376
	1. R 电路 有效值 平均值 2. L 电路 3. C 电路	

§ 10.3	R 、 L 、 C 串联电路	381
§ 10.4	矢量图法在交流电路上的应用 并联电路	384
	1. 余弦函数的求和 2. 矢量图法在交流电路上的应用 3. 并联电路	
§ 10.5	复数在交流电路中的应用	388
	1. 用实变数的复指数函数代替余弦函数 2. 用复数方法求微分方程的特解	
	3. 复数方法在交流电路中的应用	
§ 10.6	基尔霍夫定律的复数形式	394
§ 10.7	交流电路中的电功率	399
§ 10.8	[附录] 串联谐振	401
	1. 串联谐振 2. 品质因数	
§ 10.9	[附录] 三相电路	405
§ 10.10	[附录] 变压器	407
	1. 变压器 2. 理想变压器	
§ 10.11	小结和补充例题	409
	1. 小结 2. 补充例题	
附录	高斯单位制	415
习题答案		423

第一章 真空中固定电荷的电场

§ 1.1 电 荷

对电磁学的研究可以追溯到我国春秋战国时代,当时人们已经知道琥珀摩擦后能吸引轻微物体,天然磁石能够吸铁.河北省的磁县就是因附近盛产天然磁石而得名的.在国外,公元前 600 年,希腊的塞利斯曾记载了琥珀摩擦后能吸引草屑.而对磁现象的认识始于对小亚细亚麦格纳细亚(Magnesia)地方的天然磁石的研究.早年常将电力与磁力视作同一性质,直至公元 1600 年,吉伯始将两者分开.吉伯认为琥珀吸引轻微物体不受地球磁场之影响,其效应不可与磁铁吸引铁屑相混同.当时把经摩擦能够吸引轻微物体之琥珀说成带有“电”或说带“电荷”.

为了研究电荷间的相互作用,可以用丝绢摩擦玻璃棒,并用长丝线把玻璃棒悬挂起来(如图 1.1).如果把丝绢摩擦过的第二根玻璃棒移近第一根,这两根玻璃棒将相互排斥;如果将毛皮摩擦过的硬橡皮棒移近第一根玻璃棒,硬橡皮棒将吸引玻璃棒;而毛皮摩擦过的两根橡皮棒则相互排斥.由此可见,玻璃棒上的电荷与硬橡皮棒上的电荷是不同的.通常把用丝绢摩擦过的玻璃棒所带的电叫做正电,把用毛皮摩擦过的硬橡皮棒所带的电叫做负电.由上述实验还可知道,同号电荷相互排斥,异号电荷相互吸引.电荷间的这种相互作用力叫做库仑力,或者叫做静电力.

上述电效应,不限于琥珀、玻璃棒、丝绢等物体.在适当条件下,任何物体与其他物体摩擦后,都将多少带些电.用带正电的玻璃棒或者带负电的硬橡皮棒与未知电荷进行比较,就能够判明未知电荷不是正的就是负的.电只有两种.

至今,物理学家对摩擦起电现象的机理仍未能完全理解.例如,如上所述用丝绸摩擦玻璃棒,将使玻璃棒带正电而丝绸带负电.但是如果用绝对清洁的丝绸或其他纺织品摩擦玻璃棒,则玻璃棒带负电而丝绸等纺织品带正电.这说明摩擦所产生的效果似乎主要决定于纺织品上面所沾的污物而不是纺织品与玻璃本身.甚至空气的存在也有影响.例如,在真空中用丝绸摩擦铂棒,将使铂棒带负电;而在空气中摩擦,则铂棒带正电.

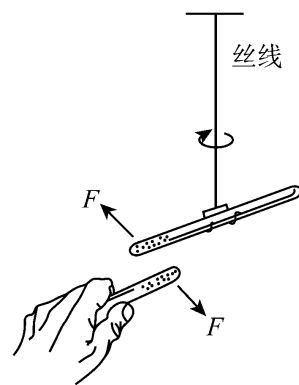


图 1.1 两根带正电的玻璃棒彼此排斥

如果把带电体 A 移近一个由 B 、 C 两部分合拢组成的与外界绝缘的导体(图 1.2),则发现靠近 A 的 B 端带与 A 异号的电荷,而 C 端则带与 A 同号的电荷.这种现象叫做**静电感应**.移走 A , B 、 C 两端即刻恢复不带电状态.如果先将 B 、 C 分开,然后再移开 A ,则发现 B 、 C 两部分带异号电.把 B 、 C 重新合拢,则 B 、 C 又立即恢复不带电的状态.由此可知,利用静电感应使物体带电,正负电荷同时出现,而且这两种电荷的量值一定相等.当它们重新相遇时能够互相中和,从而物体不再带电.实验表明,摩擦起电过程中出现的正负电荷数量也一定相等.现在我们知道,当一种电荷出现时,必有相等量值的异号电荷同时出现;一种电荷消失时,也必有相等量值的异号电荷同时消失.在一个孤立系统内,无论发生什么样的变化,系统内**电量的代数和保持不变**.这个由实验总结出来的定律称为**电荷守恒定律**,是物理学基本定律之一.

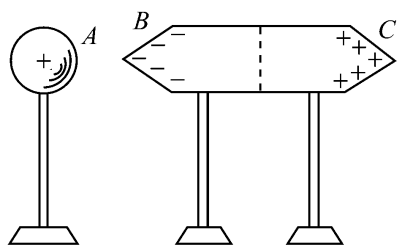


图 1.2 静电感应

电荷究竟是什么?有人说,电荷就是电子质子这些粒子.这是不对的.电子、质子带有电荷,但它们并非“电荷”.和物体的惯性质量、引力质量一样,电荷也是物体的一种属性.这种属性使得一个物体可以施力于其他带电物体,也可以感受其他带电体对它的作用力.就像为表示引力作用的强度起见而对每个物体指定一个引力质量一样,我们为了表示物体电力的强度规定了电量,电量即电荷的量或称电荷的大小.电子

质子等带有电荷,同时又有质量.此外它们还有别的性质,例如当两个质子靠得很近时相互之间有很强的核力相作用.

库仑力与万有引力都遵守平方反比定律.但是两者有很多不同的地方.“万有引力”如其名称所显示,只能是引力,库仑力既有引力也有斥力.我们很快就会知道库仑力要比万有引力强得多.由于同种电荷间有很强的斥力,宇宙是个正、负电荷均匀混合的混合体,这一点就不足为奇了.

最后,我们指出两点.(1) 我们所称的负电荷本来也可以称为正电荷,反之亦然.现在使用的命名法是富兰克林提出来的,一直沿用至今.(2) 历史常常是螺旋式向前发展的.前面提到,直至公元 1600 年吉伯才将电力与磁力分开.此后,电现象与磁现象两者一直被认为是独立的互不相干的,虽然它们在许多方面很相似.直到 1820 年,奥斯忒的著名实验才又把电和磁联系起来.

§ 1.2 库仑定律和叠加原理

静电学研究相对于观察者为静止的电荷间相互作用的规律.观察者则必须是**惯性参照系**.静电理论的基础是库仑定律、叠加原理及电荷守恒定律.

1. 库仑定律

对 § 1.1 中所述静电现象的定性研究,延续了很长时期.直到 18 世纪末叶,才开始对电荷间的相互作用作定量研究.当时良好绝缘体的利用以及力学仪器的发展,使得库仑有可能作出著名的扭秤实验.1785 年库仑发表了实验结果,这就是我们知道的库仑定律.

扭秤装置(如图 1.3 所示)类似图 1.1 中的悬棒,所不同的是图 1.1 中的电荷被限制在 a 和 b 两个小球上.

如果小球 a 和 b 都带电,则作用在小球 a 上的电力将使悬丝扭转.为了使两个带电小球保持在实验时所需要的特定距离,可将悬头扭转过一角度 θ ,以抵消悬丝的扭转效应.测量角度 θ 的大小就可以确定作用在带电小球 a 上的力^①.

实验结果指出:

$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

式中 F 是作用于 a 和 b 这两个带电小球上的相互作用力的量值, r 是 a 和 b 间的距离.这两个力沿着两电荷的连线而指向相反的方向.应该注意,即使这两个电荷的大小不同,作用于每个电荷的力的大小也是相等的.

库仑还利用扭秤研究电荷间的相互作用力怎样随着电荷的相对量值而改变.当时,人们还没有其他方法可以用来检验或测量电荷,只能根据电荷间的静电力来检验.而静电力与电荷大小间的关系正是库仑所要解决的问题.因此,他遇到了困难.库仑用巧妙的方法解决了这个困难.设两个完全相同的金属球,一个带电,一个不带电.如果让这两个球相接触,则原来的电荷必然均等地分配于这两个球上.这一点可以用扭秤来验证.让图 1.3 中的 b 球电荷保持不变,令 a 球与另一完全相同的金属球 c 相碰,然后测量 a 与 b 及 c 与 b 间的相互作用力.可以得知当距离 r 相同时,力也相同.这就证明了 a 球与 c 球带有相同的电量.库仑用这样的方法改变图 1.3 中 a 、 b 两球上电荷的相对量值,从而得到

$$F \propto \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad (1.1)$$

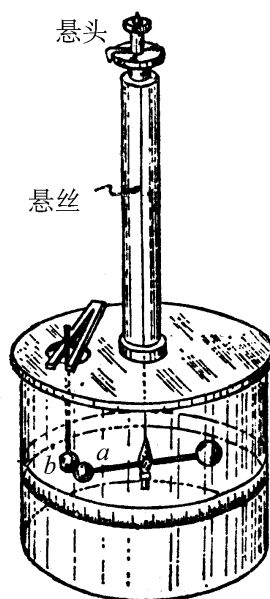


图 1.3 库仑扭秤

① 两带电小球之间的万有引力通常比电荷间的相互作用力小得多,可以忽略不计.

式中 Q_1 和 Q_2 是球 a 和 b 上电荷的相对量值. 方程(1.1)叫做库仑定律. 这定律只有在带电物体的线度远小于它们之间的距离时才成立. 通常把这样的带电体叫做点电荷. 因此我们说库仑定律只对点电荷适用. 实际的带电体总是有一定大小的, 它能否作为点电荷处理, 要从具体情况来考虑. 点电荷的概念是相对的, 它与力学中质点的概念颇为相似.

2. 电量的单位

电量有多种单位.

库仑定律(1.1)式中力和距离的单位已经确定, 只有电量单位尚未确定. 与确定力的单位牛顿或达因的方法相较, 容易想到, 若令式(1.1)中的比例系数为无量纲的数 1, 即可确定电量的单位及量纲. 最初, 电量的单位确是这样确定的. 由此方法确定的电磁学单位制叫做高斯单位制, 它在实用上有许多不便之处. 目前大多数国家包括我国都已采用另一种单位制——MKSA 单位制.

MKSA 单位制中, 基本量有 4 个, 除长度、质量、时间外再加电流. 它们的单位分别为米(m)、千克(kg)、秒(s)和安培(A). 关于米、千克、秒的规定, 在力学中已经讲过. 至于安培, 它是根据电流间的相互作用力来确定的, 故留待 §5.7 叙述. 电磁学中其他各物理量的单位都可以从这四个单位导出. 在 MKSA 单位制中, 电量的单位是库仑(其符号为 C). 因为电流等于单位时间内通过导线横截面的电量, 故库仑的定义是: 如果导线中载有 1A 的稳恒电流, 则在 1s 内通过导线横截面的电量为 1C. 即

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

在 MKSA 制中, 公式(1.1)中出现的电量、距离、力的单位都已确定. 比例系数的数值不能任意给定而要通过实验确定. 在 MKSA 单位制中, 把描述真空中两个点电荷间的静电作用力的库仑定律中的比例系数写成 $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ 的形式:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad (1.2)$$

实验测出 ϵ_0 的值是

$$\epsilon_0 = 8.854\,187\,82 \times 10^{-12} \text{C}^2 / \text{N} \cdot \text{m}^2$$

对于本书所有习题, 采用下列数值就足够准确了:

$$\epsilon_0 = 8.9 \times 10^{-12} \text{C}^2 / \text{N} \cdot \text{m}^2$$

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9.0 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$$

由于 MKSA 单位制中有长度(L)、质量(M)、时间(T)和电流(I)四个基本量,

所以任何物理量 A 的量纲式具有如下形式:

$$[A] = L^p M^q T^r I^u$$

指数 p, q, r, u 称为量纲. 电量 Q 和 ϵ_0 的量纲式分别为

$$[Q] = TI$$

$$[\epsilon_0] = \frac{[Q_1][Q_2]}{[F][r^2]} = L^{-3} M^{-1} T^4 I^2$$

请注意, 在 MKSA 制中, 库仑定律中的比例系数是有量纲的量. 电磁学量的量纲不如力学量的量纲那样显而易见.

鉴于库仑定律的重要性, 现在我们把它的内容及数学表达式完整地叙述于下: 处于真空中的两个静止点电荷 Q_1 和 Q_2 间的相互作用力的大小和 Q_1 及 Q_2 的乘积成正比, 和它们之间的距离的平方成反比; 作用力的方向沿着它们的连线, 同号电荷相斥, 异号电荷相吸.

令 F_{12} 表示 Q_1 对 Q_2 的作用力, r_{12} 表示从 Q_1 指向 Q_2 的矢径, F_{21} 表示 Q_2 对 Q_1 的作用力, r_{21} 表示从 Q_2 指向 Q_1 的矢径 (参见图 1.4), 则库仑定律可表示成

$$\boxed{F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r_{12}^2} r_{12}} \quad (1.3a)$$

$$F_{21} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r_{12}^2} r_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r_{21}^2} r_{21} \quad (1.3b)$$

【例 1】 氢原子中电子和质子的距离约为 $5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$, 此二粒子间的电力和万有引力各为多大?

【解】 由库仑定律, 可求得两粒子间的电力

$$\begin{aligned} F_e &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \\ &= \frac{(9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{(5.3 \times 10^{-11} \text{ m})^2} \\ &= 8.1 \times 10^{-8} \text{ N} \end{aligned}$$

而万有引力为

$$\begin{aligned} F_g &= G \frac{m_1 m_2}{r^2} \\ &= \frac{(6.7 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2)(9.1 \times 10^{-31} \text{ kg})(1.7 \times 10^{-27} \text{ kg})}{(5.3 \times 10^{-11} \text{ m})^2} \\ &= 3.7 \times 10^{-47} \text{ N} \end{aligned}$$

电力远比万有引力大, 前者约为后者的 10^{39} 倍.

【例 2】 设铁原子核中的二个质子相距 $4.0 \times 10^{-15} \text{ m}$, 问此二质子间有多大的库仑斥力?

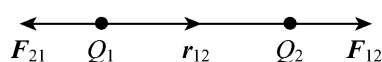


图 1.4 两个电荷间的作用力
(Q_1, Q_2 同号)

【解】 由库仑定律得

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \\ &= \frac{(9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{(4.0 \times 10^{-15} \text{ m})^2} \\ &= 14 \text{ N} \end{aligned}$$

质子间一定还有其他比电力更强的引力,否则原子核中的质子将会飞散.

3. 叠加原理

由式(1.1)可以看出,如果保持电荷 Q_1 不变, Q_2 增加几倍, Q_1 和 Q_2 间的力也增加几倍.这一事实说明,库仑定律包含了电荷在其效果上是可加的这个意思.如果没有这种可加性,那么当 Q_2 加倍时,力就并不恰好加倍,可能只增为原值的比如说 1.5 倍,也可能为原值的 4 倍.

这个事实很重要,我们再详细叙述于下.如有各带电 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 的三个小物体, Q_1 与 Q_2 相距 10cm 而与 Q_3 相距甚远时,我们可以测量出施加在 Q_1 上的

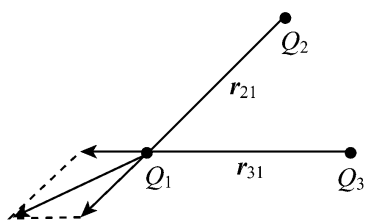


图 1.5 Q_2 、 Q_3 对 Q_1 的作用力

力.然后,把 Q_2 拿到远处,并把 Q_3 放到原先 Q_2 的位置,再测施加在 Q_1 上的力.最后,把 Q_2 、 Q_3 紧挨着放在一起,并将此联合体置于距 Q_1 10cm 处.由测量发现,此时对 Q_1 的作用力,等于方才两次测得之力的和.这个结果是库仑定律中已经隐含着的.进一步的实验表明,这三个电荷无论放在什么位置,对其中任何一个,例如对于 Q_1 的作用力,可以用下式表出(图 1.5):

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_2 Q_1}{r_{21}^3} \mathbf{r}_{21} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_3 Q_1}{r_{31}^3} \mathbf{r}_{31} \quad (1.4)$$

这些事实说明,静电力是两体力,即两个电荷间的作用力不因第三个电荷的存在而改变.如果存在两个以上电荷,则其中任一电荷所受力为其他电荷分别对它的作用力的矢量和,这个事实叫做**叠加原理**(叫做线性叠加原理更好一些).叠加原理是由实验事实推论得到的.绝对不可认为叠加原理是理所当然的.可能有一些涉及到极小距离或极强作用力的现象,在那里,叠加原理不再成立.我们应当养成这样的习惯,不把需要实验证明的事情认为是“理所当然”的.

4. 对库仑定律的进一步讨论

对于库仑定律,在某些距离范围,它的实验验证已经接近完备.库仑定律在定量上不是以扭秤实验为基础的,扭秤测量的误差很难低于百分之几.库仑定律可以由一个中空带电导体球内不存在电的影响这一实验事实间接导出.关于这个实验

的描述将在 § 2.1 中给出. 1971 年威廉斯等人的实验结果表明, 库仑定律中的指数与 2 的偏差不超过 $(2.7 \pm 3.1) \times 10^{-16}$, 因此通常假定这个指数恰是 2.

但是, 值得指出的是, 所有上述实验, 电荷间的距离都在厘米到米的范围内. 因此有必要追问, 其他范围内库仑定律是否成立? 让我们先考虑原子范围内的事情. 在原子范围内, 电子的力学行为遵守量子力学规律, 但是决定电子行为的力主要是静电力. 1947 年兰姆等人对氢原子能级的相对位置作了非常仔细的测量, 所得结果表明, 氢原子内电子与核间的静电力遵守库仑定律, 指数与 2 的偏差的数量级为十亿分之一. 这就是说当距离为 10^{-8} cm 时, 库仑定律仍然很好地成立. 核物理测量表明, 当距离为 10^{-13} cm 时, 库仑定律仍然近似成立. 实验还表明直至距离为 10^{-12} cm 时, 库仑定律的系数 $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ 与“通常”距离下的值的差异不超过百万分之十五.

用高能粒子散射实验, 可以研究距离小至 10^{-14} cm 时两个电荷间的相互作用力. 实验表明, 当距离小至 10^{-14} cm 时库仑定律不再成立. 这时, 力比预计的小 10 倍. 当然, 仍然存在两种可能, 一是库仑定律确实不成立, 一是质子和电子不是点电荷, 这个问题有待进一步研究.

还有, 对非常大的距离, 比如由地理上的距离到天文上的距离这个范围, 尚未对库仑定律做过实验验证. 从直接观测知道, 无线电短波与可见光以同样的速度在真空中传播, 其实验精度至小可达百万分之一. 因此由电磁场量子理论可以证明, 至少在几千米范围内, 库仑定律是足够准确的.

总之, 我们有一切理由相信, 库仑定律在由 10^{-13} cm 至若干千米的范围都是可靠的.

§ 1.3 物质的电结构

1. 电荷的量子化

在富兰克林时代, 电荷被设想成连续的流体. 可是, 物质的原子理论表明, 流体本身, 如空气和水, 并不是连续的. 实验证明, 电荷也是不连续的, 它由不可分割的基本单元所组成. 这种电荷的基本单元称为基本电荷 e . 它是一个电子所带电量的绝对值. 一切物体所带电荷的数量都是基本电荷的整数倍.

当一种物理性质, 像电荷那样以分离的“颗粒”形式存在, 而不以连续方式存在, 我们就说这种性质是量子化的. 在近代物理学中, 量子化是基本的概念.

关于基本电荷的存在, 最早是由爱尔兰物理学家斯通内于 1891 年根据法拉第所发现的电解定律提出的. 当电流通过电解质的水溶液时, 在电极上就有物质析出. 法拉第总结实验结果得到下列定律: “等量的电荷通过不同的电解液, 在电极上

析出的物质的质量和物质的化学当量成正比”.化学当量是指物质的原子量和原子价之比.对于单价的物质,化学当量即等于原子量.因此要析出 1mol 的单价元素,例如,1g 氢,35.5g 氯,107.9g 银,需要等量的电荷通过电解液.实验测定这电荷的量值等于

$$F = 96\,484.56\text{C}$$

F 称为法拉第常数.1mol 中的原子数等于阿伏伽德罗常数 $N = 6.022\,045 \times 10^{23}$, 因此电解实验的结果可以这样来理解:在电解过程中,形成电流的是正负离子的运动,而这些正负离子所带电荷是基本电荷的整数倍数,此整数倍数即为离子的价数. N 个单价离子的总电量等于 1 个法拉第常数,所以基本电荷 e 等于

$$e = \frac{F}{N} \approx 1.60 \times 10^{-19} \text{C}$$

目前公认的值

$$e = 1.602\,189\,2 \times 10^{-19} \text{C}$$

基本电荷的存在已为汤姆孙实验、密立根油滴实验等许多实验所证实.

电荷的一个特点是元电荷 e 总是与某一固定质量相联系,形成所谓的基本粒子,一些基本粒子的基本数据如表 1.1 所示.

表 1.1 若干基本粒子的数据

质 点	符 号	静止质量 (以 m_e 为单位)	电 荷 (以 e 为单位)	自 旋 (以 $h/2\pi$ 为单位)
电 子	e^-	1	-1	1/2
质 子	p	1836.2	+1	1/2
中 子	n	1838.7	0	1/2
μ 子	μ^-	206.8	-1	1/2
π 介 子	$\pi^\pm$	273.2	± 1	0
	π^0	264.2	0	0
中 微 子	ν	0	0	1/2

表中 m_e 为电子的静止质量,

$$m_e = 9.109\,534 \times 10^{-31} \text{kg}$$

质子和电子所带电量的数值完全相等这一点,很容易用灵敏的实验来检验.把大量氢气压进一个与周围高度电绝缘的容器内,然后,在防止任何普通离子逸出的情况下让氢气从该容器逸出.若质子的电荷与电子的电荷相差十亿分之一,那么由两个质子与两个电子组成的每个氢分子所带的电荷为 $2 \times 10^{-9} e$.因此,氢的大量

逸出将改变容器的电荷与电势,并达到可测出的程度.事实上,这个实验是能够测出小至每个原子 $10^{-20} e$ 的剩余电荷的.然而并未观察到任何变化.由此可以得出结论:电子与质子电荷相等的精度达到 10^{20} 分之一.

各种带电基本粒子在其他性质,如质量、寿命等方面相差甚大,而它们的电量相等却达到惊人的程度.显然,电荷量子化是自然界一个具有深刻意义的基本规律,直到目前为止还没有人能以更基本的概念来解释这个事实.

最近有人提出存在具有 $\frac{1}{3} e$ 和 $\frac{2}{3} e$ 电荷的基本粒子(夸克)的理论推测,但是迄今为止仍未找到自由夸克.

2. 原子结构

1911 年卢瑟福用 α 粒子轰击原子,实验结果使他提出了原子的核模型.随后,玻耳和索末菲又提出电子绕原子核转动的模型.自此以后,通过一系列的实验和理论工作,人们解决了原子构造问题.每个元素的原子有一个带正电的中心部分,称为原子核.原子核由质子和不带电的中子组成.核中的质子数 Z 称为原子序数.在正常状态,核外的电子数也等于 Z ,整个原子由于正负电荷相互抵消而呈中性.游离状态的原子(称为离子).核外电子数与 Z 不相等,和 Z 的差数为离子的价数.

从表 1.1 可以看出,原子的质量几乎全部集中于原子核中.原子的直径约为 10^{-8} cm ,而原子核的直径则约为 10^{-12} cm ,对于较重的原子,核的质量虽比核外电子质量大至数十万倍,但它所占空间较单个电子占据之空间大得有限.由此不难想像原子核内物质密集之程度.但是注意不要认为原子核是“不能进入”的,电子有一定的进入原子核内的概率.

假定氢原子中电子与质子间的作用力遵守库仑定律,然后考虑了量子力学和相对论理论,则理论计算得到的氢原子轨道能量的数值可达 9 位有效数字,这时理论值仍与实验值相符.这是近代理论与库仑定律的伟大胜利.目前,库仑定律的最强有力的实验证明来自于氢原子结构的计算.

3. 导体、绝缘体和半导体

从导电的程度看,一般的物体可粗分为两类:导体和绝缘体.如果令一个导体同时和电势不相等的两个带电导体接触,就可以观察到有一定量的电荷流过导体,直到平衡重新建立为止.如果绝缘体处在同样的情况下,就几乎不能观察到电荷的流动.但导体与绝缘体的差别不是绝对的,仅是程度上的差别.它们之间的差异可以用物体引入以后,通过电荷重新分布到重新建立平衡状态所需的时间来估计.对一般金属,所需时间非常短,约为 10^{-9} 至 10^{-10} s ,而对通常的绝缘体如玻璃、石英、瓷等物质则需要非常长的时间,达几天甚至几个月.

导体可分为第一类导体和第二类导体.金属是第一类导体.各种金属原子都容易失去一个或几个电子.当孤立原子结合起来形成金属固体时,原子的外层电子就不再属于个别原子;而是在固体的整个体积中自由运动.这些电子通常叫做自由电子.而失去一个或数个电子的原子则成为正离子,这些正离子排列成坚固的规则晶格(晶体格子).当有电力作用于金属时,自由电子定向流动而形成电流.构成晶格的正离子在一般情况,只在平衡位置附近作振动,不能参与导电.当金属与绝缘体相互摩擦或两种金属相互摩擦时,由于自由电子的转移,金属可以带正电或负电.金属导体感应带电也是由于在外界电力作用下,自由电子由导体的一部分转移到另一部分造成的.当把图 1.2 中带正电的物体 A 移近金属导体 B 时,金属中的自由电子因受到正电荷的吸引力而向靠近 A 的 B 端移动,结果使 B 端因电子过多而带负电, C 端则因电子过少而带正电.熔融的盐、酸、碱和盐的水溶液都是第二类导体,又称为电解质.它们没有自由电子,却有可以自由运动的正负离子.在外界电力作用下,这些离子能够作定向运动.

绝缘体的分子或原子内的电子,包括外层电子,受核吸引力的约束极强,一般不能脱离它所从属的原子.因此,在通常的电力下,绝缘体基本上不能导电.绝缘体受摩擦后所带电荷只局限于受摩擦的局部.绝缘体也有为数极少的自由电子,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,但是当紫外线、 X 射线或其他辐射照着气体时,气体电离成为电子、正负离子和中性分子的混合体从而成为导体.至于绝缘体表面受潮或粘附有其他化学物品而呈现不同程度的导电性,更是生产实践中常见的现象.

还有一种物质叫做半导体.它的导电能力介于导体和绝缘体之间,锗和硅是常用的半导体.非常纯的半导体其导电性能接近于绝缘体.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.

1cm^3 体积铜中自由电子数的量级为 10^{23} 个,通常摩擦使玻璃棒上带电的量级为 10^{-6}C ,而 1C 负电荷相当于 6.3×10^{18} 个电子所带电荷的总量.由此可见在静电现象中, C 是非常大的单位,而摩擦起电则仅能使物体失去或获得与其自身所包含的电子数相比相对很少数量的电子.

4. 电荷守恒定律

有了物质结构的初步知识后, § 1.1 中讲过的摩擦起电、感应起电等宏观电磁现象中的电荷守恒定律就成为很易理解的了.在不带电的物体内,每一小体积中

(这里所谓小是就宏观尺度而言,从微观尺度来看应当充分大,使其中包括许多原子)质子数和电子数相等,因而呈电中性.物体带电现象就是由于这种平衡的破坏.例如一部分电子转移到另一物体上后,失去电子的物体就带有正电,电子加多的物体则带有负电.显然,在这种场合,电荷的代数和应该守恒.因此在通常的宏观电学现象中,电荷守恒定律可以理解为在变化过程中基本粒子(电子、质子)的数目保持不变,而只是组合的方式或者位置发生改变.

但是现代物理学发现了大量有关基本粒子互相转化的事实.一对正负电子可以互毁而放出电磁辐射,这一过程称为电子成对互毁.这过程是

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

在 β 衰变过程中有

$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}$$

$$p \rightarrow n + e^{+} + \nu$$

(其中 $\bar{\nu}$ 为中微子 ν 的反粒子).可以注意到在所有这些过程中,反应物的总电荷都等于生成物的总电荷(参阅表 1.1).总之,在迄今为止人们所知道的一切微观现象中,电荷守恒定律都是成立的.这表明电荷守恒定律还存在有更深刻的根源.

我们知道,随着速度的增加,物体的质量也要增加.一个物体当其速度为 v 时质量为

$$m = m_0 / \sqrt{1 - \beta^2} \quad \left[\beta = \frac{v}{c} \right]$$

其中 m_0 为该物体的静止质量, c 为光速.人们自然要问,当带电体的速度增加时,其电量是否变化呢? 回答是否定的.有明确的实验证明电子、质子及一切带电体的电量不因运动而改变.前面我们已经叙述了精密论证氢分子电中性的实验.由这个实验可以推论得电子和质子所带的电荷在数量上相等的程度高于 10^{20} 分之一.用氦原子做同样实验,结果表明氦原子也以几乎相同的精度被证明是电中性的.氦原子中有两个质子和两个电子.但它们的运动状况与在氢分子中很不相同.特别是其中的两个质子,不是像在氢分子中那样相距 $0.7\text{\AA}$ 缓慢地转动着,而是紧密地结合在原子核中,以 $\text{MeV}(=10^6 \text{ eV})$ 数量级的动能运动着.因此,如果带电体的电量随其速度而变,那么氢分子与氦原子不可能都是电中性的.这个实验及其他一些实验使人们相信,电子、质子及其他一切带电体的电量都不因带电体的运动而改变.从两个互相做相对运动的惯性坐标系观测同一带电体,该带电体的质量是不同的,但电量是相同的.电量是一个相对论性不变量.至此,我们看到电荷守恒定律以及电荷量子化现象包含了多么深刻的内容.

5. 使物质结合的力

由 § 1.2 例 1 我们看到使电子与原子核结合成原子的力是电力. 我们现在要问使原子结合成分子, 分子结合成液体、固体物质的是什么力. 首先考虑一个简单的分子例如氢分子, 它是由相距 $r=0.745 \times 10^{-10} \text{ m}$ 的两个氢原子组成的, 每个氢原子的质量是 $m=1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$. 两个原子间的万有引力势能为

$$E_p = -G \frac{mm'}{r} = -2.22 \times 10^{-54} \text{ J}$$

但是实验所得氢分子的分解能是 $7.18 \times 10^{-19} \text{ J}$ 比万有引力能量要大 10^{35} 倍. 所以结论是万有引力不可能是氢分子形成的原因. 如果想到电子与质子间的电力为万有引力的 10^{39} 倍, 似乎电力又太大, 也不能解释实验事实. 但氢原子中正负电荷一样多, 只是由于正负电荷中心不重合, 两个氢原子间才有电力相互作用. 这样我们就可以猜想到使氢原子结合成分子的力起源于电力.

对于液体, 以水为例来讨论. 蒸发 1 mol 水 (18 g 或 6.02×10^{23} 个分子) 所需要的能量是 $4.06 \times 10^3 \text{ J}$, 相当于每个分子的分散能约为 $7 \times 10^{-21} \text{ J}$. 水中各个分子的平均间隔是 $3 \times 10^{-10} \text{ m}$, 而一个分子的质量是 $3 \times 10^{-26} \text{ kg}$, 相当于 $2 \times 10^{-52} \text{ J}$ 的万有引力势能, 所以又太小 (小了约 10^{31} 倍) 不足以解释液态水的存在.

生物体内分子量在 $10^4 \sim 10^{12}$ 间的多聚合物称为生物大分子, 例如蛋白质、核酸和多糖等. 其中核酸是生物体贮存和传递遗传信息的载体, 与个体的代谢、生长、发育、适应、免疫和病理过程密切相关. 核酸分为核糖核酸 (RNA) 和脱氧核糖核酸 (DNA) 两大类, 都是由称为核苷酸的组分组成的聚合物. 一个核苷酸含有一个糖基、一个碱基和一个磷酸. DNA 中的碱基有四种: 胞嘧啶 (C)、胸嘧啶 (T)、腺嘌呤 (A) 和鸟嘌呤 (G). 1955 年遗传学家华生 (J. Watson) 和物理学家克利 (F. Crick) 提出 DNA 的双螺旋型结构, 即 DNA 是由两条相互平行的多核苷酸链构成的; 两条链的走向相反, 平行地绕同一轴以右手螺旋方向旋转. 一条链中的碱基与另一链中的碱基结合. 这种结合有严格的规则: 一条链中的腺嘌呤 (A) 与另一链中的胸嘧啶 (T) 连成对 (A-T 对), 鸟嘌呤 (G) 则与胞嘧啶 (C) 连成对 (G-C 对). 这些对都是借静电力结合的, 例如, 两个氢原子与一个氧原子通过共用氢原子的价电子结合成水. 水分子中的氢原子由于一个价电子被共价, 其带正电的核在一定程度上“暴露”在外面, 从而对另一个水分子中的氧有静电吸引力, 使水出现冰的结构; 这种引力作用称为氢键. DNA 的两条链的 A-T 和 G-C 对的形成就是依靠这种氢键. 在某种酶的作用下, DNA 中碱基 A-T、G-C 之间的静电作用会解脱, 从而变成两条独立的链, 每条链上 A、T、G 和 C 的电荷暴露在外. 由于细胞质中有大量的活性游离的核苷酸, 当它们靠近已解开的单链时, 因静电力而被结合. 这时静电力起了选择作用, 使得新形成的 DNA 双链中 A-T、G-C 的排列顺序与原来的完全相同, 这就是 DNA 的自我复制能力. 现在大家都听说过的“基因”就是这种链上一节有功能的区段, 其平均“长度”约含有 1200 个碱基对. 这一区段的 DNA 不但有起始信号和终止信号, 而且具有自体复制、决定性状和发生突变等基本特性. 对 DNA 和基因的研究有极其重要的意义, 是一个极有挑战性的邻域; 而在其中, 物理学家有可能发挥重要的作用.

目前大家都公认使原子结合成分子,分子结合成宏观物质的力是电磁力,而且主要是静电性的力.因此掌握静电规律对于深入了解物质的物理、化学乃至生物学现象来说是必不可少的.

由 § 1.2 例 2 我们知道质子与质子,质子与中子间必然存在远大于电磁相互作用的力,这种力称为核力.使质子、中子结合成原子核的力是核力.核力的性质至今仍不十分清楚,我们只知道个大概.核力是短程的.短程的意思是只当相互作用的质点十分靠近,间隔约为 10^{-15} m 或更小的时候核力才显示出来;距离较大时,核力可以忽略不计.因此在原子结合成分子等过程中核力不起多大作用.此外,核力似乎与粒子所带的电荷无关,且可能不完全是有心力的,即两个粒子间作用力的方向并不沿着其连线方向.当然,这里所作的是极其粗略的介绍.

现在人们已经知道,自然界存在的基本相互作用除了万有引力、电磁力和强相互作用(核力即属于强相互作用)之外,尚有“弱相互作用”.

人们熟知的其他力,例如弹性力、摩擦力、黏性力等等都不是基本的力,这些力的根源都是电磁相互作用.

§ 1.4 电场 电场强度

1. 电场

库仑定律说明了电荷间相互作用力的大小和方向,但并没有说明电荷通过怎样的机制施力于另一电荷.我们现在就来讨论这个问题.力的概念起源于劳动.人要拉车,必须用手和车接触,或者用绳绑在车上,再用手拉绳.如果碰不到车又不通过其他物体作媒介,人是不可能施力于车的.因此,人最初认识到的力都存在于直接接触的物体间,这种力的作用叫做接触作用.后来人们陆续认识到自然界存在电力、磁力与万有引力.这些力有一个共同的特点,即两个物体在真空中也能互相作用,其间似乎没有任何媒介.围绕这个问题,历史上曾有过长期的争论.

17 世纪的笛卡儿,是一个对科学思想有重大影响的哲学家.他最先将以太引进科学.他认为,空间不可能是空无所有的,而是充满称为以太的媒介物质.以太虽然不能为人的感官所感觉,但却能传递力的作用,如磁力和月球对潮汐的作用力.后来,胡克、惠更斯等人更认为光波就是在以太中传播的机械振动.18 世纪时,由于法国笛卡儿主义者拒绝引力的平方反比定律,而使牛顿的追随者起来反对笛卡儿哲学体系包括他的以太论.随着引力和电荷之间作用力的平方反比定律的成功,以及探寻以太未获实际结果,使超距作用观点得以流行.按照这种观点,带电体间的力(以及万有引力、磁极间的作用力)是直接而且即时的相互作用.

19 世纪,以太论获得复兴和发展.先从光学开始,随后在电磁学中也获得了地位.先是法拉第根据自己对电磁现象的研究提出了“电场”的观点.他认为宇宙空间到处充满以太,处于其中的带电体会使它周围的以太伸张或压缩,产生张力或压力.两个带电体就是通过这种伸张或压缩了的以太互相施力于对方的.法拉第及其后继者想像的电场就是电荷周围形变了以太.

后来麦克斯韦发展了法拉第学说,提出完整的**普遍**电磁场理论.麦克斯韦电磁场理论预言电磁场在真空中以有限的速度(光速 c)传播.这一预言后来得到实验证实.这使电磁场理论为人们所公认.现在举一个例子(理想实验)说明电磁场理论与超距作用理论的差异.空间有 Q_1 与 Q_2 两个固定电荷,设想 Q_1 于时刻 t_1 因为某种原因突然移动一个小距离而于 t_2 时刻到达 B 点,然后又静止下来(图 1.6).

如果 A 、 B 两点离 Q_2 甚远, $\frac{R_1}{c}$ 和 $\frac{R_2}{c}$ 均大于 $t_2 - t_1$,那么, t_2 时刻 Q_2 所受的力究竟多大呢? 根据超距作用理论,作用是即时的, Q_2 所受的力应为 $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{R_2^2}$. 电场

理论却说,力是通过电场传递的, Q_1 移动引起的扰动需要经过大约 $\frac{R_1}{c}$ [或 $\frac{R_2}{c}$] 时

间才能传达 Q_2 . 既然 $\frac{R_1}{c}$ 及 $\frac{R_2}{c}$ 均大于 $t_2 - t_1$, t_2 时刻 Q_2 附近的电场仍为 t_1 时刻的

Q_1 (处于 A 点)所激发的,所以此时 Q_2 所受的力仍为 $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{R_1^2}$. 实验证明

$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{R_1^2}$ 这个答案是对的.所以电场理论取得了胜利.

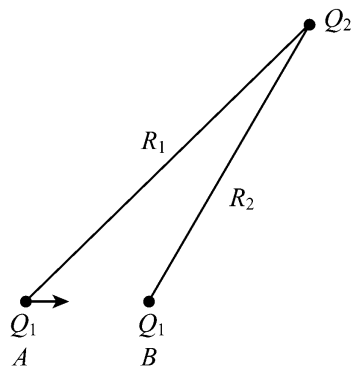


图 1.6 Q_1 和 Q_2 间的力

麦克斯韦理论中的电磁场是形变了以太.前世纪末到本世纪初不少人曾致力于寻找以太,结果否定了以太的存在.这个结果导致近代电磁理论与相对论的诞生.根据近代电磁理论,电荷在其周围要激发电磁场.电磁场本身就是一种特殊的物质.电磁场会施力于其他电荷.具体地讲,如果空间存在两个电荷,电荷 1 在其周围空间激发一个电磁场,电荷 2 也在其周围激发一个电磁场,电荷 2 所受的力是 1 的场施与的,电荷 1 所受的力则是 2 的场施与的.简而言之,**电荷是通过电磁场发生相互作用的**.本章研究的静电场则是普遍电磁场的一个特例,它是相对于观察者为静止的电荷激发的场.如

§ 1.2 开头所指出的,观察者必须是惯性参照系.

近代技术成就完全肯定了场的理论的正确.例如,雷达就是根据电磁场在雷达

与飞机间来回一趟所需的时间来测定飞机的位置的.在超距作用理论看来,像雷达这类装置完全是不可想像的.

顺便指出,人们还把这种场的概念推广于万有引力,认为两个质点是通过它们激发的引力场互相作用的.不过人们对于引力场的了解远不如电磁场清楚.最后,提一下如下史实,或许有所启示.其实牛顿本人对万有引力是一种超距作用这种观点是有怀疑的.在他的论文中明确表达了这一疑惑,并把这一问题留给读者去考虑.

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,可以利用试验电荷 q_0 .试验电荷是一个足够微小的点电荷.试验电荷所带的电量及所占据的空间必须很小.这样才能保证当将它引入电场后,在实验精确度的范围内,不会对原有的电荷分布有任何影响,因而对原有电场不会有任何影响,并且测得的是空间某一确定点的量值.

把试验电荷 q_0 放在电场中不同地点时,发现 q_0 所受到的力的大小和方向是逐点不同的.但在电场中一给定点处, q_0 所受的力的大小和方向却是完全一定的.如果在电场中某给定点处改变试验电荷 q_0 的量值,就将发现 q_0 所受的力的方向仍然不变,但力的大小要改变(如果 q_0 的正负改变,力将反向).当 q_0 取各种不同量值时,所受的力 f 的量值与相应的 q_0 的比值 f/q_0 却具有确定的量值.由此可见,此 f/q_0 的大小和方向只与试验电荷 q_0 所在点的电场性质有关,而与试验电荷 q_0 的大小及正负无关.因此,我们就把 f/q_0 作为描述静电场中给定点的客观性质的一个物理量,称为**电场强度**或简称为**场强**.电场强度是矢量,用符号 E 表示,即

$$E = \frac{f}{q_0} \quad (1.5)$$

在上式中,如果取 $q_0 = +1$,即得 $E = f$,由此可见,电场中某点的电场强度在量值和方向上等于单位正电荷在该点处所受的力.由式(1.5)还可看出,负电荷所受的力的方向与负电荷所在处的电场强度的方向相反.

电场施力于处于其中的电荷.若点电荷 Q 处于场强为 E 处,由式(1.5)知电场作用于该点电荷的力为

$$F = QE \quad (1.5')$$

应该注意,这里的 E 不包括点电荷 Q 所激发的场.

在 MKSA 制中,力的单位是 N,电量的单位是 C,所以,电场强度的单位是 N/C.电场强度的单位通常写成 V/m(见 § 1.6).这两种表示法是等同的.

3. 点电荷的场强

现在计算点电荷所激发的场强. 设在真空中有一点电荷 Q , 在离该电荷 r 远的 P 点的场强可计算如下: 设想在 P 点处放一试验电荷 q_0 , 按库仑定律, q_0 所受的力将是:

$$f = \frac{q_0 Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \frac{\mathbf{r}}{r}$$

式中 $\mathbf{r}$ 是从点电荷 Q 到 P 点的矢径. 根据电场强度的定义, P 点的场强是

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{f}}{q_0} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \frac{\mathbf{r}}{r} \quad (1.6)$$

如果 Q 为正电荷, $\mathbf{E}$ 的方向与 $\mathbf{r}$ 的方向一致, 是背向 Q 的; 如果 Q 为负电荷, $\mathbf{E}$ 的方向与 $\mathbf{r}$ 的方向相反, 是指向 Q 的, 如图 1.7 所示.

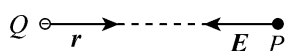
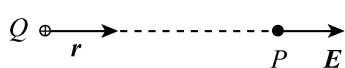


图 1.7 场强的方向

在上面的计算中, 场点 P 是任意的, 所以我们已经得出了点电荷 Q 激发的电场在空间的分布状况, (1) $\mathbf{E}$ 的方向处处沿以 Q 为中心向外的矢径 (当 Q 为正时) 或其反方向 (当 Q 为负时); (2) $\mathbf{E}$ 的大小只与距离 r 有关, 在以 Q 为中心的每个球面上场强的大小相等. 通常说这样的电场是球对称的. 式 (1.6) 还表明, E 与 r^2 成反比.

当 $r \rightarrow \infty$ 时, 场强 $E \rightarrow 0$.

4. 电场强度叠加原理

设有一系列点电荷 $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ 分布于真空中, $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ 到空间中某点 P 的矢径分别为 $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_n$. 如果在 P 点放一个试验电荷 q_0 , 则如前所述, q_0 所受作用力等于各电荷单独对 q_0 产生的作用力的叠加, 即

$$\mathbf{F} = \frac{q_0 Q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1^3} \mathbf{r}_1 + \frac{q_0 Q_2}{4\pi\epsilon_0 r_2^3} \mathbf{r}_2 + \dots + \frac{q_0 Q_n}{4\pi\epsilon_0 r_n^3} \mathbf{r}_n$$

因此, P 点的场强为

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1^3} \mathbf{r}_1 + \frac{Q_2}{4\pi\epsilon_0 r_2^3} \mathbf{r}_2 + \dots + \frac{Q_n}{4\pi\epsilon_0 r_n^3} \mathbf{r}_n$$

上式中右侧各项分别为 $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ 等电荷单独在 P 点所激发的电场强度 $\mathbf{E}_1,$

$\mathbf{E}_2, \dots, \mathbf{E}_n$ $\left[\mathbf{E}_1 = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1^3} \mathbf{r}_1, \text{余类推} \right]$. 因此, 我们可把上式写成

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

这个结果表示空间任意点的场强等于各个电荷单独激发的场强的矢量和,这个规律称为电场强度叠加原理.

通常把 E 叫做 E_1 、 E_2 、 $\cdots$ 的合场强,把 E_1 、 E_2 、 $\cdots$ 叫做 E 的分场强.

应该注意,在静电现象中,电场强度确为各点电荷所激发的场强的矢量和,这种场称为库仑场或静电场,库仑场的叠加原理是库仑力的叠加原理的必然结果.如果不限于静电现象,则随时间变化的磁场也可激发电场(称为非库仑场).这时,场强就不仅仅是各点电荷所激发的库仑场的矢量和了.但实验事实表明,普遍形式的电场强度叠加原理仍成立.

最后,作为例子,我们给出一些地点(或情况下)电场强度的量值(表 1.2).

表 1.2 电场强度的一些量值

地点(或情况)	量值(N/C)
铀原子核表面	3×10^{21}
氢原子中离核 $5.29 \times 10^{-11} \text{ m}$	5×10^{11}
空气击穿场强	3×10^6
摩擦起电塑料头梳附近	10^3
下层大气层中	10^2
家庭电路电线(铜线)中	10^{-2}

【例 1】 点电荷 $Q_1 = 12.0 \times 10^{-9} \text{ C}$, $-Q_2 = -12.0 \times 10^{-9} \text{ C}$, 两者相距 10.0 cm . 试计算 a 、 b 、 c 三点的电场强度. c 点与 Q_1 及 $-Q_2$ 的距离均为 10 cm , a 点在两点电荷联线上距 Q_1 6.00 cm 处, b 点在延长线上距 Q_1 4.00 cm 处, 如图 1.8 所示.

【解】 电场强度是矢量, 因此, 应先求出 $+Q_1$ 和 $-Q_2$ 两个电荷各自激发的电场在 a 、 b 、 c 三点的场强, 然后再求其矢量和.

在 a 点:

Q_1 所激发的场强方向向右, 它的大小是

$$\begin{aligned} & 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2 \times 12.0 \times 10^{-9} \text{ C} / (0.0600 \text{ m})^2 \\ &= 3.00 \times 10^4 \text{ N/C} \end{aligned}$$

$-Q_2$ 所激发的场强方向向右, 它的大小是

$$9.0 \times 10^9 \times 12.0 \times 10^{-9} / (0.0400)^2 = 6.75 \times 10^4 \text{ (N/C)}$$

所以, a 点的合场强为

$$E_a = (3.00 + 6.75) \times 10^4 = 9.75 \times 10^4 \text{ (N/C)}, \text{ 方向向右.}$$

在 b 点:

Q_1 所激发的场强方向向左, 大小为

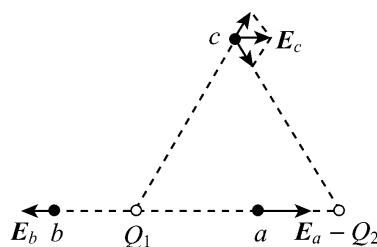


图 1.8

$$9.0 \times 10^9 \times 12.0 \times 10^{-9} / (0.0400)^2 = 6.75 \times 10^4 \text{ (N/C)}$$

$-Q_2$ 所激发的场强方向向右, 大小为

$$9.0 \times 10^9 \times 12.0 \times 10^{-9} / (0.140)^2 = 0.55 \times 10^4 \text{ (N/C)}$$

所以, b 点的合场强为

$$E_b = (6.75 - 0.55) \times 10^4 = 6.20 \times 10^4 \text{ (N/C)}, \text{方向向左.}$$

在 c 点:

两个点电荷所激发的场强的大小均为

$$9.0 \times 10^9 \times 12.0 \times 10^{-9} / (0.100)^2 = 1.08 \times 10^4 \text{ (N/C)}$$

场强的方向已在图中标明, 它们的合场强 E 可以求出为

$$E_c = 1.08 \times 10^4 \text{ N/C, 方向向右.}$$

【例 2】 电偶极子. 设有两个大小相等、符号相反的电荷 $+Q$ 和 $-Q$, 它们间的距离为 l . 如我们仅研究离这两个点电荷很远处的电场, 则通常称这样一对电荷的总体为电偶极子. 从负电荷到正电荷的矢径 l 称为电偶极子臂, 电荷 Q 与 l 的乘积 $Ql = p$ 称为电偶极矩, 简称电矩, 它是一个矢量, 指向是从负电荷到正电荷. 电矩通常用 p 表示.

【解】 首先计算电偶极子轴线延长线上 A 点的场强 E_A . 如图 1.9 所示, 令电偶极子轴线的中心 O 到 A 点的距离为 r , 且假设 $r \gg l$, 则 $+Q$ 和 $-Q$ 在 A 点所产生的场强大小分别为

$$E_+ = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{Q}{r - \frac{l}{2}} \right]^2, \quad E_- = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{Q}{r + \frac{l}{2}} \right]^2$$

两者方向相反, 所以 A 点的合场强 E_A 的大小为

$$\begin{aligned} E_A &= E_+ - E_- = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\left(\frac{Q}{r - \frac{l}{2}} \right)^2 - \left(\frac{Q}{r + \frac{l}{2}} \right)^2 \right] \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Qrl}{r^4 \left[1 - \frac{l}{2r} \right]^2 \left[1 + \frac{l}{2r} \right]^2} \end{aligned}$$

因为 $r \gg l$, 所以

$$E_A \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Ql}{r^3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2p}{r^3}$$

E_A 的指向和电矩 p 相同.

其次, 计算轴线中垂线上 B 点的场强 E_B . 如图所示, 令中垂线上给定点 B 到电偶极子中心 O 的距离为 r ($r \gg l$), 则 $+Q$ 和 $-Q$ 在 B 点产生的场强大小均为

$$E_+ = E_- = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2 + l^2/4}$$

它们的方向分别沿着每个电荷到 B 点的连线. 设连线与电偶极子的轴线之间的夹角为 α , 则 B 点的合场强 E_B 的大小为

$$E_B = E_+ \cos \alpha + E_- \cos \alpha$$

所以

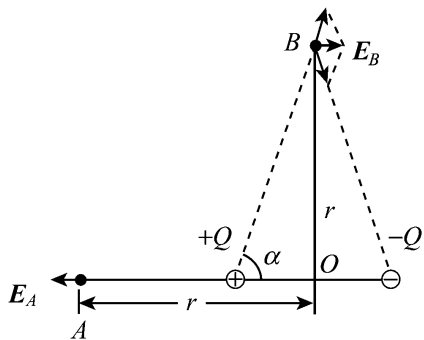


图 1.9 电偶极子轴线和中垂线上的场强