

IANCIXUE

DianCiXue

电磁学

徐游 编著

江苏科学技术出版社

电 磁 学

徐 游 编 著

江苏科学技术出版社

内 容 简 介

本书是作者在南京大学讲授普通物理学电磁学部分所用的教材。
在编写过程中参考了统一教学大纲及国内外有关教材与教学参考书。

本书内容较新颖、丰富，除系统地阐述电磁现象的基本规律和基本概念外，并适当介绍有关的现代物理知识，以引导读者开阔视野活跃思想。书中配有较多例题与习题。全书分真空中固定电荷的电场、导体周围的静电场与静电能量、电介质、静电学补充材料、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磁场、磁介质、电磁感应、交流电、麦克斯韦方程组与电磁波等十一章。

本书可作为综合性大学和师范院校物理类专业普通物理学电磁学部分教材或教学参考书，也可供对电磁学要求较高的工科专业使用。

电 磁 学

徐 游

出版：江苏科学技术出版社

发行：江苏省新华书店

印刷：宜兴第二印刷厂

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 28 字数 685,000

1987 年 7 月第 1 版 1989 年 8 月第 2 次印刷

印数 4,031—9,030 册

ISBN 7—5345—0434—1

O·43

定价：6.10 元

责任编辑 沃国强

特约编辑 原野

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,丰富科学想象力,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、明晰的物理图象。

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,继续进行教学改革的探索试验。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

一九八五年四月于南京大学

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. 电荷量的单位 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	6
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	10
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.....	15
§ 1.6 静电场的势.....	21
1. 静电力所作的功与路径无关 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 电力线和等势面	29
§ 1.8 高斯定理	31
1. 电通量 2. 高斯定理 *3. 泊桑方程和拉普拉斯方程 4. 电力线的性质	
§ 1.9 高斯定理应用举例	37
1. 均匀带电球的电场 2. “无限大”均匀带电平面的电场 *3. 静电系统平衡稳定性的讨论	
§ 1.10 电偶极子激发的电场	41
1. 电偶极子激发的电场 *2. 任意电荷分布的偶极子近似	
§ 1.11 密立根油滴实验与分数电荷	46
§ 1.12 小结和补充例题	48
1. 小结 2. 补充例题	
第二章 导体周围的静电场 静电能量	56
§ 2.1 静电场中导体的基本性质	56
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	59
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	62
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	63
1. 方法 2. 解的唯一性定理	
§ 2.5 孤立导体的电容	68
§ 2.6 电容器的电容	69
§ 2.7 电容器的组合	72
§ 2.8 真空中静止电荷系的能量	76
§ 2.9 离子晶体的静电能	78
§ 2.10 真空静电场的能量	79
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	

§ 2.11	导体表面所受的力	83
§ 2.12	利用功能原理计算带电体系的受力问题	85
§ 2.13	外电场中电偶极子所受的力和力矩	87
§ 2.14	小结和补充例题	88
	1. 小结 2. 补充例题	
第三章	电介质	98
§ 3.1	电介质的极化	98
	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	100
	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	103
	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	
§ 3.4	介质分界面上的边界条件	107
§ 3.5	有电介质存在时静电场的计算	109
	1. 用自洽方法求解 2. 利用高斯定理计算 3. 其它例题	
§ 3.6	介质中电感应强度 D 与自由电荷的场强 E_0 间的关系	117
§ 3.7	有电介质存在时的电场能与作用力	120
	1. 电介质内的电场能 2. 有电介质存在时带电体系所受的力	
§ 3.8	气体的极化	123
	1. 无极分子气体的极化 2. 有极分子气体的极化	
§ 3.9	液态介质的极化	126
	1. 作用于分子偶极子的有效场 2. 克劳修斯-莫索提公式 3. 介电常数与电场变化频率的关系	
§ 3.10	固态介质的极化	129
	1. 极化率张量 2. 压电 电致伸缩 铁电	
§ 3.11	小结	132
第四章	静电学补充材料	137
§ 4.1	高斯单位制	137
§ 4.2	解的唯一性定理	140
§ 4.3	电像法	142
§ 4.4	数值计算方法	144
	1. 差分法 2. 变分法	
§ 4.5	一个复杂问题的简化模型	149
§ 4.6	静电模拟	150
第五章	稳恒电流	154
§ 5.1	电流与电流密度	154
	1. 电流 2. 电流密度 3. 电流线	
§ 5.2	电流的连续性方程 稳恒电流	157
	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	
§ 5.3	电阻 欧姆定律	160
	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	
§ 5.4	电流的功和功率	164
§ 5.5	金属导电的经典微观理论	165
	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. 焦耳定律的解释	
§ 5.6	稳恒电流电场的若干性质	170

§ 5.7	广延导体的电阻	171
§ 5.8	电源 电动势	175
	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	
§ 5.9	基尔霍夫定律	182
	1. 有关电路的几个概念 2. 基尔霍夫定律	
§ 5.10	复杂电路的计算	186
	1. 支路电流法 2. 回路电流法	
§ 5.11	电流表 电压表 直流单电桥	188
	1. 分流电路 用微安表改装电流表 2. 分压电路 用微安表改装电压表 3. 电压表内阻对测量结果的影响 4. 直流单电桥(惠斯登电桥)	
§ 5.12	电容器的充放电过程	191
§ 5.13	网络定理	193
	1. 叠加定理 *2. 等效电压源定理 *3. 电流源 等效电流源定理	
* § 5.14	温差电现象与脱出功	196
	1. 珀耳帖电动势 2. 汤姆孙电动势 3. 温差电动势 4. 脱出功与外接触电势差	
* § 5.15	气体放电	199
§ 5.16	小结和补充例题	201
	1. 小结 2. 补充例题	
第六章	真空中稳恒电流的磁场	209
§ 6.1	磁相互作用	209
§ 6.2	磁场 磁感应强度 毕-萨-拉定律	211
	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	
§ 6.3	安培定律	215
	1. 安培定律 *2. 关于安培定律的讨论	
§ 6.4	应用毕-萨-拉定律计算简单电路的磁场	217
§ 6.5	稳恒电流磁场的基本方程式	220
	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	
§ 6.6	作为磁偶极子的闭合电流	228
§ 6.7	平行电流间的相互作用力 电流单位“安培”的定义	230
	1. 平行电流间的相互作用力 2. 电流单位“安培”的定义	
§ 6.8	磁场对载流线圈的作用	233
	1. 均匀磁场中的矩形线圈 2. 电动机与磁电式电表原理 3. 不均匀磁场中的线圈	
§ 6.9	小结	239
§ 6.10	[附录]安培环路定理的证明	241
第七章	电磁场中电荷的运动与运动电荷的电磁场	249
§ 7.1	洛伦兹力	249
	1. 洛伦兹力 2. 带电粒子在均匀磁场中的运动	
§ 7.2	带电粒子在电磁场中运动的例子	253
	1. 电子荷质比的测量 2. 质谱仪 3. 回旋加速器	
§ 7.3	霍耳效应	259
* § 7.4	等离子体振荡	261
§ 7.5	运动电荷的场	263
* § 7.6	相对论效应	265
* § 7.7	小结和补充例题	267
	1. 小结 2. 补充例题	

第八章 磁介质	274
§ 8.1 介质的磁化	274
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. 逆磁性 5. 顺磁性	
6. 爱因斯坦和德-哈斯等实验	
§ 8.2 磁化强度与磁化电流密度	281
1. 磁化强度 2. 磁化电流密度 3. 磁化电流面密度	
§ 8.3 磁感应强度与磁场强度 介质磁场的基本方程式	286
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	
§ 8.4 介质的磁化规律	290
1. 顺磁和逆磁介质 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	
§ 8.5 永久磁铁的磁场	296
* § 8.6 等效磁荷方法	298
1. 建立在磁荷基础上的静磁学 2. 等效磁荷方法 3. 退磁场	
* § 8.7 边界条件	304
§ 8.8 有磁介质特别是铁磁质存在时磁感应线的形状与静磁屏蔽	306
§ 8.9 磁路定律	307
1. 磁路定律 2. 铁芯开有气隙的螺绕环	
* § 8.10 磁场强度 H 与自由电流激发的场 B_0 间的关系	310
§ 8.11 小结和补充例题	311
1. 小结 2. 补充例题	
第九章 电磁感应	320
§ 9.1 楞次定律和法拉第电磁感应定律	320
1. 电磁感应现象 2. 楞次定律 3. 法拉第电磁感应定律	
§ 9.2 电磁感应中的非库仑力	323
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	
§ 9.3 发电机和电子感应加速器	331
1. 发电机 *2. 电子感应加速器 *3. 用探测线圈测量磁场	
§ 9.4 自感应	334
§ 9.5 含有自感的电路接通与开断时的瞬时电流	337
1. 接通时的瞬时电流 2. 开断时的瞬时电流	
§ 9.6 互感应	339
§ 9.7 磁场的能量	341
§ 9.8 磁场中的功能原理	344
1. 磁场中的功能原理 2. 互感磁能 *3. 进一步的讨论	
§ 9.9 磁滞损耗 涡电流 趋肤效应	349
1. 磁滞损耗 2. 涡电流 3. 趋肤效应	
§ 9.10 位移电流	351
§ 9.11 似稳电流	356
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	
§ 9.12 电容器的振荡放电	362
1. 无阻尼自由振荡 2. 阻尼自由振荡 3. 受迫振荡	
§ 9.13 小结和补充例题	365
1. 小结 2. 补充例题	
第十章 交流电	374

§ 10.1	频率 位相 初位相	374
§ 10.2	R 电路 有效值 平均值	375
§ 10.3	L 电路	376
§ 10.4	C 电路	378
§ 10.5	R, L, C 串联电路	380
§ 10.6	余弦函数的求和	382
§ 10.7	矢量图法在交流电路上的应用 并联电路	383
	1. 矢量图法在交流电路上的应用 2. 并联电路	
§ 10.8	复数在交流电路中的应用	386
	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	
§ 10.9	基尔霍夫定律的复数形式	391
§ 10.10	交流电路中的电功率	397
	1. 平均功率与功率因数 *2. 无功功率和损耗角	
§ 10.11	串联谐振	399
	1. 串联谐振 2. 品质因数	
* § 10.12	并联谐振	402
* § 10.13	三相电路	404
§ 10.14	变压器	406
	1. 变压器 2. 理想变压器	
§ 10.15	小结和补充例题	409
	1. 小结 2. 补充例题	
第十一章	麦克斯韦方程组与电磁波	414
§ 11.1	电磁场规律的总结	414
§ 11.2	电磁波	415
§ 11.3	光的电磁理论和电磁波谱	421
	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，任何物体与其它物体摩擦后，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。

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

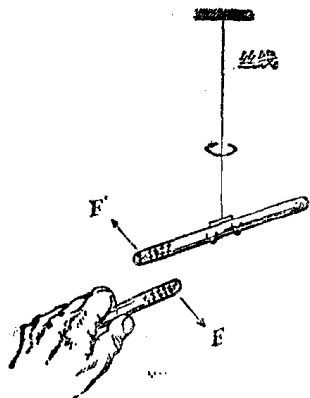


图 1.1 两根带正电的玻璃棒彼此排斥

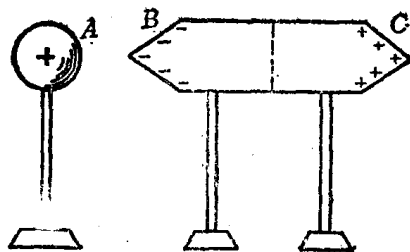


图 1.2 静电感应

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，系统内电荷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。

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。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荷量，电荷量即电荷的量或称电荷的大小。如果历史上把质量叫做质荷量，这种相似性也许要明显得多。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。

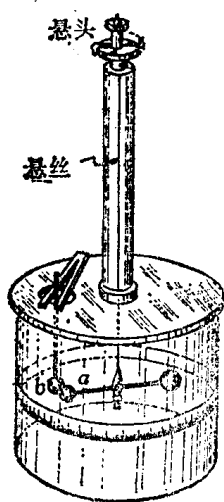


图 1.3 库仑扭秤

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 Φ 。

实验结果指出：

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。

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

F 随 r 而变化

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。作用力与反作用力

随 r 而变化

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, 人们还没有其它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。而静电力与电荷量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 球带有相同的电荷量。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

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

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. 电荷量的单位

电荷量有多种单位。

库仑定律 (1.1) 式中力和距离的单位已经确定, 只有电荷量单位尚未确定。与确定力的单位牛顿或达因的方法相比较, 容易想到, 若令式 (1.1) 中的比例系数为无量纲的数 1, 即可确定电荷量的单位及量纲。最初, 电荷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。目前大多数国家都已采用另一种单位制——MKSA 单位制。本书以 MKSA 制为主, 同时也介绍高斯单位制。

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 § 6.7 叙述。电磁学中其它各物理量的单位都可以从这四个单位导出。在 MKSA 单位制中, 电荷量的单位是库仑(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荷量, 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荷量为 1C。即

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

在 MKSA 制中, 公式 (1.1) 中出现的电荷量、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。电荷量 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, 现在我们再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:

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

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

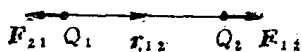


图 1.4 两个电荷间的作用力
(Q_1 、 Q_2 同号)

【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?

【解】由库仑定律得

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

质子间一定还有其它比电力更强的引力,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:

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

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它电荷分别对它的作用力的矢量和,这个事实叫做叠加原理。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。

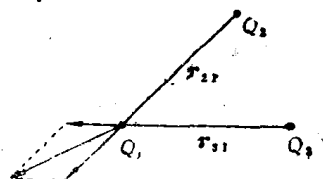


图 1.5 Q_2 、 Q_3 对 Q_1 的作用力

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,扭秤测量的准确程度很难超过百分之几。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 $(2.7 \pm 3.1) \times 10^{-10}$ ，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，其它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，至少在几公里范围内，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 至若干公里的范围都是可靠的。

§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荷量的绝对值。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，象电荷那样以分离的“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。实验测定这电荷量等于

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

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 个单价离子的总电荷量等于1个法拉第常数，所以基本电荷 e 等于

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

目前公认的值为

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

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 $\hbar/2\pi$ 为单位)
电 子	e^-	1	-1	$\frac{1}{2}$
质 子	p	1836.2	+1	$\frac{1}{2}$
中 子	n	1838.7	0	$\frac{1}{2}$
μ 子	μ^-	206.8	-1	$\frac{1}{2}$
π 介 子	$\pi^\pm$	273.2	± 1	0
	π^0	264.2	0	0
中 微 子	ν	0	0	$\frac{1}{2}$

表中 m_e 为电子的静止质量，

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

质子和电子所带电荷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，那么由二个质子与二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它性质，如质量、寿命等方面相差甚大，而它们的电荷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观念来解释这件事。

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几率。

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。当有电力作用于金属时，自由电子定向流动而形成电流。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。当两种绝缘体如玻璃和丝绸摩擦时，由于接触紧密而且温度升高，电子的动能增加，玻璃上的电子可以脱离束缚转移到丝绸上面，因而玻璃带正电，丝绸带负电。但是由于电子不能在绝缘体中任意移动，带电现象只限于受摩擦的局部。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 射线或其它辐射照着气体时，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它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。在半导体中掺入微量其它元素，常常可使其导电能力大为增加。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。

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