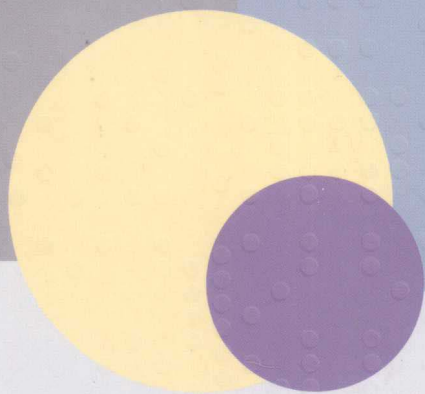




全国教育科学“十一五”规划课题研究成果



大学物理学 下册

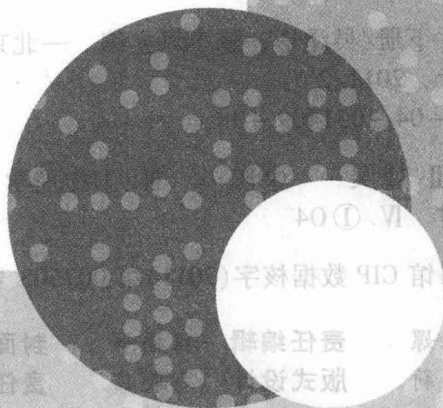
吴泽华 陈小凤



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS



全国教育科学“十一五”规划课题研究成果



大学物理学 下册

DAXUE WULIXUE



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

内容简介

本书是全国教育科学“十一五”规划课题“我国高校应用型人才培养模式研究”物理类子项目的一项研究成果,是参照教育部制定的《理工科类大学物理课程教学基本要求(2008年版)》编写而成的。本书立足大众化教育,内容简明,注重物理思想和物理图像,淡化数学推导,简化理论论证过程,是一套适合应用型院校学时较少的大学物理课程的教材,可供各类高等学校有关专业使用。

本书分为上、下两册。上册包括力学、振动与波动、热学;下册包括电磁学、光学、狭义相对论、量子物理等。与本书配套出版的还有电子教案及辅助教材《大学物理学习题分析与解答》。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学. 下册/吴泽华, 陈小凤主编. —北京:
高等教育出版社, 2011.2
ISBN 978-7-04-031409-0

I. ①大… II. ①吴… ②陈… III. ①物理学 -
高等学校 - 教材 IV. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 007503 号

策划编辑 郭亚嫒 责任编辑 程福平 封面设计 张楠
责任绘图 尹莉 版式设计 马敬茹 责任校对 杨健艺
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

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>

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京铭成印刷有限公司

网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

开 本 787×960 1/16
印 张 17.25
字 数 320 000

版 次 2011年2月第1版
印 次 2011年2月第1次印刷
定 价 23.80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 31409-00

目 录

第 6 章 静电学	1
6-1 电荷	1
6-2 库仑定律	3
6-3 电场 电场强度	5
6-3-1 电场	5
6-3-2 电场强度	6
6-3-3 电场强度的计算	7
6-4 高斯定理及其应用 电场线 电场强度通量	13
6-4-1 电场线	13
6-4-2 电场强度通量	14
6-4-3 高斯定理	16
6-4-4 高斯定理的应用	18
6-5 静电场力的功 电势	21
6-5-1 静电场力的功 静电场的环路定理	21
6-5-2 电势	23
6-5-3 电势的计算	24
6-6 电场强度与电势的关系	26
6-6-1 等势面	27
6-6-2 电场强度与电势的微分关系	27
6-7 静电场中的导体	29
6-7-1 导体的静电平衡	29
6-7-2 静电平衡时导体上的电荷分布	30
6-7-3 静电屏蔽	32
6-8 电容 电容器	34
6-8-1 孤立导体的电容	35
6-8-2 电容器的电容	35
6-8-3 电容器电容的计算	36
6-8-4 电容器的串联和并联	37
6-9 静电场中的电介质	38

6-9-1	电介质对电场的影响	39
6-9-2	电介质的极化	40
6-9-3	有电介质时的高斯定理	41
6-9-4	压电效应 电致伸缩	44
6-10	静电场的能量	44
6-10-1	点电荷系统的静电能	44
6-10-2	电容器的能量	46
6-10-3	电场的能量	46
	思考题与习题	48
第7章	恒定磁场	54
7-1	恒定电流 电动势	54
7-1-1	恒定电流	54
7-1-2	电动势	55
7-2	磁场 磁感应强度	56
7-2-1	磁场	56
7-2-2	磁感应强度	57
7-2-3	磁感应线	59
7-3	毕奥-萨伐尔定律	60
7-3-1	毕奥-萨伐尔定律	60
7-3-2	毕奥-萨伐尔定律的应用	61
7-4	磁场的高斯定理 安培环路定理	65
7-4-1	磁通量	65
7-4-2	磁场的高斯定理	66
7-4-3	安培环路定理	66
7-4-4	安培环路定理的应用	68
7-5	磁场对载流导线的作用	71
7-5-1	安培力	71
7-5-2	磁场对平面载流线圈的作用	74
7-6	带电粒子在电场和磁场中的运动	77
7-6-1	带电粒子在横向磁场中的圆周运动	77
7-6-2	带电粒子在磁场中的螺旋线运动	80
7-7	磁场中的磁介质	82
7-7-1	磁介质的分类	82
7-7-2	顺磁质和抗磁质的磁化	83
7-7-3	存在磁介质时磁场的基本定理	85

7-7-4 铁磁质	87
思考题与习题	91
第8章 变化的电场和磁场	97
8-1 电磁感应的基本定律	97
8-1-1 电磁感应现象	97
8-1-2 法拉第电磁感应定律	98
8-1-3 楞次定律	98
8-2 动生电动势和感生电动势	101
8-2-1 动生电动势	101
8-2-2 动生电动势的计算	102
8-2-3 感生电动势 感生电场	105
8-2-4 涡电流	107
8-3 自感和互感	109
8-3-1 自感	109
8-3-2 互感	111
8-4 磁场的能量	112
8-4-1 自感磁能	113
8-4-2 磁场的能量	113
8-5 麦克斯韦方程组	115
8-5-1 位移电流 全电流安培环路定理	115
8-5-2 麦克斯韦方程组	117
8-5-3 电磁波	118
8-5-4 电磁波的辐射 赫兹实验	120
8-5-5 电磁波谱	122
思考题与习题	124
第9章 波动光学	128
9-1 光源 相干光	128
9-1-1 光源	128
9-1-2 相干光	129
9-2 双缝干涉	130
9-2-1 干涉条纹的位置	131
9-2-2 劳埃德镜实验	133
9-2-3 光程	134
9-3 薄膜干涉	135
9-3-1 等厚干涉	136

9-3-2 增透膜和高反射膜	140
*9-3-3 迈克耳孙干涉仪	142
9-4 光的衍射	142
9-4-1 光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理	143
9-4-2 单缝夫琅禾费衍射	145
9-4-3 圆孔衍射 光学仪器的分辨本领	148
9-4-4 光栅衍射	150
9-4-5 X射线在晶体上的衍射	155
*9-4-6 全息照相	157
9-5 光的偏振	159
9-5-1 自然光和偏振光	159
9-5-2 起偏和检偏 马吕斯定律	161
9-5-3 反射、折射和散射时光的偏振	162
9-5-4 光的双折射	164
9-5-5 旋光现象	165
思考题与习题	166
*第10章 几何光学	171
10-1 几何光学基本定律	171
10-1-1 几何光学的基本定律	171
10-1-2 费马原理	172
10-1-3 全反射	173
10-2 反射成像	174
10-2-1 平面镜反射成像	174
10-2-2 球面镜反射成像	175
10-2-3 符号法则	178
10-3 折射成像	178
10-3-1 单球面折射成像	178
10-3-2 平面折射成像	179
10-4 薄透镜	180
10-4-1 正透镜和负透镜	180
10-4-2 薄透镜公式	181
10-4-3 薄透镜作图法	182
10-5 光学器件	183
10-5-1 放大镜	184
10-5-2 显微镜	185

10-5-3 望远镜	185
10-5-4 照相机	186
思考题与习题	187
第 11 章 狭义相对论	188
11-1 狭义相对论的基本原理 洛伦兹变换	188
11-1-1 狭义相对论的基本原理	189
11-1-2 洛伦兹变换	190
11-1-3 相对论速度变换	191
11-2 狭义相对论的时空观	192
11-2-1 同时的相对性	192
11-2-2 长度的相对性 长度收缩	193
11-2-3 高速运动物体的视觉效应	195
11-2-4 时间间隔的相对性 时间延缓	196
11-2-5 孪生子佯谬	197
11-3 相对论质量 动量 能量	197
11-3-1 相对论质量与动量	197
11-3-2 相对论能量	198
11-3-3 动量和能量的关系	200
思考题与习题	200
第 12 章 量子物理学	202
12-1 黑体辐射和普朗克假设	202
12-1-1 黑体辐射	202
12-1-2 普朗克量子假设	204
12-2 光电效应	206
12-2-1 光电效应的实验规律	206
12-2-2 经典电磁理论的困难	207
12-2-3 爱因斯坦光子理论	208
12-2-4 光的波粒二象性	209
12-3 康普顿效应	211
12-3-1 康普顿效应实验规律	211
12-3-2 光子理论对康普顿效应的解释	212
12-4 实物粒子的波动性	214
12-4-1 德布罗意 (de Broglie) 假设	214
12-4-2 德布罗意波的实验验证	215
12-5 不确定关系	217

12-5-1	坐标和动量的不确定关系	217
12-5-2	能量和时间的不确定关系	219
12-6	波函数 薛定谔方程	220
12-6-1	波函数的引入	220
12-6-2	波函数的统计解释	221
12-6-3	薛定谔方程	223
12-6-4	薛定谔方程的应用	223
*12-6-5	扫描隧穿显微镜	226
12-7	氢原子 多电子原子	227
12-7-1	原子光谱的实验规律	227
12-7-2	氢原子的玻尔理论	229
12-7-3	氢原子的量子力学处理	233
12-7-4	电子的自旋	235
12-7-5	原子的电子壳层结构	237
12-8	激光	239
12-8-1	受激吸收 自发辐射 受激辐射	239
12-8-2	粒子数反转和光放大	240
12-8-3	光学谐振腔	241
*12-8-4	激光器	242
12-8-5	激光的特性和应用	243
12-9	固体中的电子	245
12-9-1	固体能带的形成	245
12-9-2	满带、价带和空带	246
12-9-3	导体、绝缘体和半导体	247
12-9-4	n型半导体和p型半导体	248
12-9-5	pn结	249
	思考题与习题	251
	习题参考答案	254
附录 I	国际单位制(SI)	260
附录 II	常用的物理量	262
附录 III	希腊字母	263
附录 IV	部分常用数学公式	264

第 6 章 静 电 学

电磁学是物理学的一个重要分支，是研究电磁现象及其运动规律的一门学科。

早在公元前几百年，人类就已经观察到电现象和磁现象，然而对电磁现象的系统研究却是近二百年的事。按照近代物理观点，电磁现象和物质结构密切相关，电磁相互作用是物质间四种基本相互作用之一，在决定原子和分子的结构上起着关键性的作用。因此，研究电磁现象已成为认识物质微观构造和性质的重要基础和途径，电磁学理论在现代物理学中占有重要的地位。电磁相互作用的规律也是其他许多学科的基础，如电工学、无线电电子学、自动控制学、电化学、固态电子学等都是以电磁学为基础发展起来的。电磁学知识又是应用最广泛的物理知识之一，从科学研究、工农业生产乃至日常生活无不有它涉足之处。随着时代的进步，以及人们对电磁现象认识的不断深化，电磁学理论及其应用正日益完善和普及。

第 6 章至第 8 章先分别讲述电现象和磁现象，然后介绍电现象与磁现象的相互联系，以及电磁场理论的初步知识。本章的内容属于静电学范围，主要讨论静止于惯性参考系中的电荷所具有的性质及其相互作用规律。

6-1 电 荷

人类对于电现象的观察和认识有着悠久的历史。早在公元前 600 年，古希腊哲学家已经记载了琥珀经过摩擦后能吸引干草屑的现象。我国西汉末年(公元 20 年前)也有“玳瑁吸褚”的记载。自 16 世纪起，人们对电现象就开始了系统的研究，将物体经过摩擦后具有吸引轻小物体的现象，称为该物体带了电，或带有电荷。带有电荷的物体称为带电体，其所带电荷的量值称为电荷量。人们并且认识到，电荷是某些基本粒子，如电子、质子、 μ 子等的基本属性，它与质量一样，不能离开这些基本粒子而单独存在。通过对电荷间各种相互作用及其电效应的研究，人们认识到电荷有以下基本性质：

两种电荷

自然界只存在两种电荷，分别称为正电荷和负电荷^①，这是电荷的一种基本属性。实验表明，同种电荷互相排斥，异种电荷互相吸引。

随着物理学的发展，人们逐渐认识到电荷之所以只有两种，是因为自然界中实物形式的物质（包括固体、液体、气体）都由原子组成，而原子是由带正电的核和核外电子^②组成，原子核又是由质子和中子组成。原子中的质子带正电，电子带负电，中子不带电，质子与电子所带电荷量的绝对值相等。物质内部固有地存在电子和质子，这正是各种物质带电过程的内在根据。在正常情况下，物质内部的正、负电荷数量相等，呈电中性。物体的带电过程，实际上是正负电荷的分离过程。

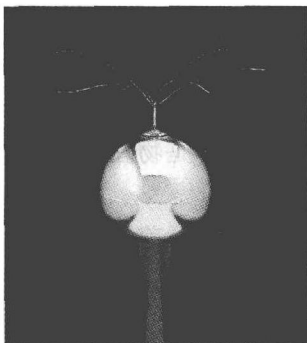


图 6-1 将纸带连接到高压范德格拉夫起电机的顶部，当起电机工作时，纸带带有同种电荷，相互排斥

电荷守恒

大量实验证明，一个孤立系统（即与外界无电荷交换的系统）的总电荷量（正负电荷的代数和）保持不变，电荷既不能被创造，也不能被消灭，它只能从一个物体转移到另一个物体，或者从物体的一部分转移到另一部分。这个定律称为电荷守恒定律。例如，电中性的丝绸和玻璃棒组成一孤立系统，电荷总量为零，摩擦后两者分别带有等量异种电荷，系统的总电荷量仍为零。电荷守恒是自然界最普遍的规律之一，它不仅在一切宏观过程中成立，而且在任何微观过程中也都严格成立。

电荷量子化

密立根（R. A. Millikan）油滴实验和大量其他实验表明，在自然界中，任何可被观测到的电荷，总是以一个基本的电荷单元 e 的整数倍出现的，即 $q = ne$ ($n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$)，这个基本电荷单元 e 称为电荷量子。根据国际科学技术委员会 2002 年的推荐值， $e = 1.602\ 176\ 53(14) \times 10^{-19}$ C。它是自然界的普适量。电荷只能取一份一份不连续的量值的性质称为电荷量子化。近代实验已

^① 18 世纪中期，美国科学家富兰克林（B. Franklin）将被丝绸摩擦过的玻璃棒带的电荷称为正电荷，被毛皮摩擦过的硬橡皮棒带的电荷称为负电荷。这种定义一直沿用至今。

^② 1897 年，美国物理学家汤姆孙（J. J. Thomson, 1856—1940 年）首次用实验证明了一种基本粒子——电子的存在，所以人们称他是“一位最先打开通向基本粒子物理大门的伟人”。由于在气体放电的理论和实验研究方面作出的卓越贡献，汤姆孙于 1906 年获诺贝尔物理学奖。

精确地验证,电子和质子带有异种等量的基本单元电荷量,分别为 $-e$ 和 $+e$ 。

1964年,物理学家在理论上预言,一些基本粒子,如质子和中子是由更小的粒子组成,这种粒子称为夸克,它们所带的电荷量为 $\pm \frac{1}{3}e$ 或 $\pm \frac{2}{3}e$ 。此后,在电子对核的散射实验中发现了核子中存在夸克。由于这一杰出贡献,美国物理学家泰勒(R. E. Taylor),弗里德曼(J. I. Friedman)和肯德尔(H. N. Kendall)荣获1990年度诺贝尔物理学奖。但是,至今尚未在实验中发现以自由状态存在的夸克。即使发现了带分数电荷的夸克,电荷仍取不连续值,也不会改变电荷的量子性,只是使最小的一份电荷量变得更小而已。

电荷的运动不变性

实验还证明,一个电荷的电荷量与其运动状态无关,在不同参考系中对电荷进行测量,测得的结果都相同。电荷的这一性质称为电荷的运动不变性。

6-2 库仑定律

一般来说,带电体之间的相互作用力与许多因素有关,它不仅取决于电荷的正负,电荷量的多少,而且还与带电体的大小、形状以及周围介质的性质有关,情况比较复杂。为了使问题简化,本节先讨论点电荷在真空中的相互作用。

点电荷是电学中引进的一个理想模型,与力学中的质点概念类似。所谓点电荷,是指带电体的线度与它到其他带电体之间距离相比很小,以至该带电体本身的形状和大小可以忽略。尽管有时不能将带电体作为点电荷处理,但是总可以将带电体看成是大量点电荷的集合。因此,研究点电荷之间的相互作用规律是研究带电体相互作用规律的基础。

法国科学家库仑(C. A. Coulomb)^①通过扭秤实验(如图6-2所示)的定量研究,于1785年总结出两个静止

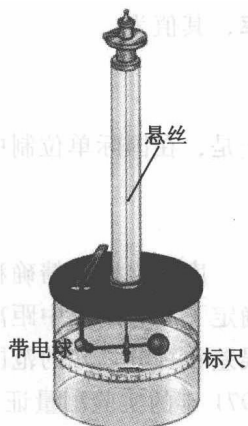


图6-2 库仑扭秤实验装置简图

^① 库仑(C. A. Coulomb, 1736—1806年)法国物理学家,法国科学院院士。库仑在物理学上有许多重要贡献,他通过对滑动摩擦和滚动摩擦的研究提出摩擦定律;他证明地磁场对磁铁的作用,相当于与偏差角正弦成正比的一力偶;他建立了磁体在磁场中的运动方程式;他发现了电场力与电荷量成正比;静电平衡时导体上的电荷都分布在外表面。库仑最重要的成就是自行设计制造了一台精度很高的扭秤,用来测量电荷之间的作用力,于1785年发现了库仑定律。这个定律是电学史上第一个定量规律,电学研究从此由定性进入定量阶段,完成了电学发展中的一次飞跃。

点电荷之间相互作用的基本规律, 现称之为库仑定律, 具体表述为: 在真空中, 两个静止的点电荷 q_1 与 q_2 之间的相互作用力的大小和 q_1 与 q_2 的乘积成正比, 和它们之间距离 r_{12} 的平方成反比, 作用力的方向沿着两点电荷的连线, 同种电荷相斥, 异种电荷相吸. 库仑定律的数学表述式是

$$F_{21} = k \frac{q_1 q_2}{r_{21}^2} e_{21} \quad (6-1)$$

式中 F_{21} 表示 q_1 对 q_2 的作用力, r_{21} 表示点电荷 q_1 和 q_2 间的距离, e_{21} 表示从 q_1 指向 q_2 的单位矢量(图 6-3). 根据牛顿第三定律, q_2 施于 q_1 的力 F_{12} 与 F_{21} 在数值上相等, 但方向相反. 若 q_1 与 q_2 同号, 则作用于 q_2 的力 F_{21} 沿 e_{21} 方向, 作用于 q_1 的力 F_{12} 沿 $-e_{21}$ 方向, 表示斥力; 若 q_1 与 q_2 异号, 则 F_{21} 与 e_{21} 反向, F_{12} 与 e_{21} 同向, 表示引力. 式中 k 是比例系数, 由实验测定, 并与所取的单位制有关.

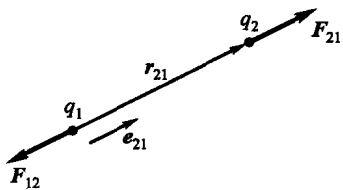


图 6-3 两点电荷间的作用力

采用国际单位制时, 库仑定律中的比例系数通过实验确定, 数值为

$$k = 8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2 \approx 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$$

为了简化电场基本定理的表达式, 进一步取 $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, ϵ_0 称为真空电容率, 其值为

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

于是, 在国际单位制中, 库仑定律又可表示为

$$F_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} e_{21} \quad (6-2)$$

库仑定律的精确程度不是只以库仑实验为基础的. 库仑当年根据扭秤实验确定了库仑定律中距离 r 的幂指数为整数 2, 但是扭秤测量的精度不可能很高, 误差在百分之几的范围. 之后, 随着实验方法的改进, 测量结果愈来愈精确, 1971 年的实验测量证实, 这个幂指数 2 的误差小于 10^{-16} .

库仑定律适用范围很广, 近代的有关实验指出, 在大到 10^3 m 量级, 小到 10^{-15} m 量级的巨大范围内, 库仑定律都准确无误. 因而我们将它列为电磁学的基础之一.

例 6-1 库仑定律与万有引力定律都是平方反比定律, 在形式上十分相似. 试比较氢原子中的电子与原子核(质子)间的库仑力与万有引力的大小.

解 电子和质子的电荷量相同

$$e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$$

电子质量和质子质量分别为

$$m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg} \quad \text{和} \quad m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

电子与原子核之间的万有引力与库仑力为

$$F_G = G \frac{m_e m_p}{r^2} \quad \text{和} \quad F_e = k \frac{e^2}{r^2}$$

因此库仑力与万有引力大小之比为

$$\begin{aligned} \frac{F_G}{F_e} &= \frac{G}{k} \frac{m_e m_p}{e^2} \\ &= \frac{(6.67 \times 10^{-11})(9.11 \times 10^{-31})(1.67 \times 10^{-27})}{(8.99 \times 10^9)(1.60 \times 10^{-19})^2} \\ &= 4.41 \times 10^{-40} \end{aligned}$$

可见万有引力与库仑力相比是十分微小的，在质量不太大的情况下完全可以略去不计。

实验证明当空间存在两个以上的点电荷时，任意两个点电荷之间的相互作用力仍然遵循库仑定律，并不因为有其他点电荷的存在而改变。因此，当空间存在几个静止点电荷时，作用在任一点电荷 q_1 上的库仑力，应等于各点电荷单独存在时作用于该电荷的库仑力的矢量和，即

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{13} + \cdots + \mathbf{F}_{1n} = \sum_{i=2}^n \mathbf{F}_{1i} = \sum_{i=2}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_i}{r_{1i}^2} \mathbf{e}_{1i} \quad (6-3)$$

这就是库仑力叠加原理。式中 r_{1i} 和 \mathbf{e}_{1i} 为第 i 个点电荷到第 1 个点电荷的距离和单位矢量。应该注意的是，上述叠加原理并非对任何情况都成立，特别在极强库仑力作用时，需要用实验确定此原理是否还能适用。

库仑定律的公式只适用于点电荷，如果这个条件不满足，那么必须把带电体看成是许多点电荷的集合，应用上述公式分别计算每一对点电荷之间的相互作用力，再按叠加原理求出库仑力的矢量和。

6-3 电场 电场强度

6-3-1 电场

库仑定律描述了两个点电荷之间相互作用的定量关系，但并没有说明这种相互作用是怎样传递的。关于库仑力传递的问题，历史上有过长期的争论。一种观点认为，库仑力与万有引力都是超距作用，一个电荷对另一个电荷的作用无需借助任何中间物质，也不需要传递时间，就能超越空间直接、瞬时地进行。另一种看法是，电荷间的相互作用不可能超越距离，而需要通过某种中间物作为媒介，以有限的速度由近及远进行传递，这就是近距作用的观点，或称

场论观点. 法拉第(M. Faraday)^①最先对场的概念作了探讨, 他设想电荷周围存在一种特殊的物质, 这种物质称为**电场**, 电荷之间的相互作用是通过电场以一定速度传递的. 但是在研究两个静止电荷间的相互作用时, 我们无法用实验区分库仑力是超距作用还是近距离作用. 然而实验上证实了在任意电荷发生运动的情况下, 另一电荷受到的作用力有相应的变化, 以及在时间上有滞后效应, 并且证明了电场传递信息的速度就是光速. 这就说明近距离作用的观点, 即场的概念是正确的.

按照场论的观点, 无论电荷运动与否, 其周围都存在电场, 即任何电荷都在其周围空间激发电场, 此电荷称为**场源电荷**. 后面我们还会讨论到, 电场不仅常常伴随电荷而存在, 且可脱离电荷而单独存在. 当电荷相对于观察者是静止时, 其周围的电场称为**静电场**. 静电场对处于场中的电荷有力的作用, 此力称为**静电力**或**静电力**. 两个静止电荷间的相互作用, 是通过各自激发的静电场对另一电荷施加静电力来实现的.

6-3-2 电场强度

既然静电场对处于场中的电荷有力的作用, 那就可以从这一性质出发对静电场进行定量分析研究. 为此, 我们在电场中引入一个电荷量为 q_0 的电荷作为检验电荷, 探测它在场中各点所受的静电力.

检验电荷本身的电荷量足够小, 不致影响待探测电场的分布, 检验电荷的几何线度也非常小, 可把 q_0 视为点电荷. 实验发现, 在电场中的不同位置, 检验电荷 q_0 所受静电力的大小和方向一般并不相同(如图 6-4 所示). 它不仅与检验电荷所在处电场本身的性质有关, 还与检验电荷所带电荷量的大小和正、负有关. 若直接用 q_0 受到的电场力 F 来描述电场显然是不恰当的.

然而实验结果表明, 对电场中任一确定点来说, 检验电荷所受到的作用力 F 与检验电荷所带电荷量 q_0 的比值 F/q_0 , 是一个确定的常矢量, 它与检验电荷的大小、正负无关, 只与该场点位置有关. 这个矢量能反映给定电场中各确定

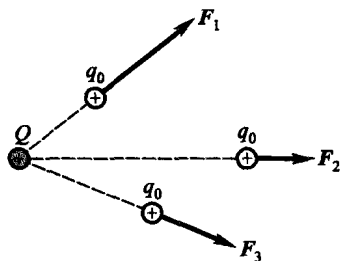


图 6-4 检验电荷 q_0

在电场中受力

^① 法拉第(M. Faraday, 1791—1867年), 英国物理学家和化学家, 曾任皇家研究所实验室主任, 英国皇家学会会员. 他是一位学徒出身的著名科学家, 自学成才的典范. 法拉第在电磁学方面有许多重要贡献, 如发现电磁感应定律、电解定律、磁光效应等, 还创造了第一台感应电动机. 他提出的“场”的概念已成为当今物理学的基石之一. 在化学方面, 他发现两种新的氟化物; 对气体扩散, 气体液化的实验研究都作出了贡献; 他还创制了若干光学玻璃新品种, 发现了苯. 由于法拉第对物理学、化学都作了重大贡献, 所以电容的单位被命名为法拉.

点电场本身的性质, 因此可以用它来定量描述电场. 我们把这个矢量定义为电场中各确定点的电场强度, 简称场强, 用 E 表示, 即

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (6-4)$$

则电场中某点场强 E 的大小等于单位正电荷在该点所受电场力的大小, 其方向为正电荷所受电场力的方向. 一般来说, 空间各处电场强度的大小和方向并不一定相同, 它是场中各点坐标的矢量函数, 可写成 $E(\mathbf{r})$ 或 $E(x, y, z)$.

在国际单位制中, 场强的单位为牛顿每库仑(N/C)或伏特每米(V/m).

6-3-3 电场强度的计算

1. 点电荷的电场强度

若场源是电场中点电荷 q , 为了研究它的场, 我们设想将检验电荷 q_0 引入场内 P 点, 该点到 q 的距离为 r , 根据库仑定律, 场源电荷 q 作用于检验电荷 q_0 的力为

$$F = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0 r^2} e_r$$

式中 e_r 为从 q 指向 P 点的单位矢量. 再由场强的定义得 P 点的电场强度为

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} e_r \quad (6-5)$$

上式表明, 点电荷周围的电场是不均匀的, 但具有球对称性, 在以 q 为中心的球面上场强的大小相等, 方向为沿径矢方向($q > 0$), 见图 6-5(a), 或反方向($q < 0$), 见图 6-5(b).

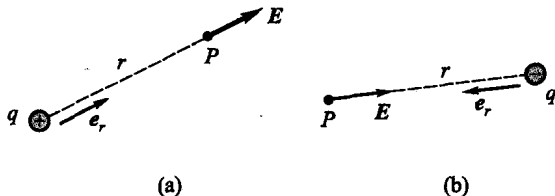


图 6-5 点电荷的电场强度

2. 点电荷系电场中的电场强度

若场源由 n 个点电荷 q_1, q_2, \dots, q_n 组成, 设想将检验电荷 q_0 置于场内的考察点 P , 以 F_1, F_2, \dots, F_n 分别表示 q_1, q_2, \dots, q_n 单独存在时对 q_0 的作用力, 则按电场力叠加原理, q_0 受到的合力 F 为

$$F = F_1 + F_2 + \dots + F_n$$

将上式两边分别除以 q_0 , 得

$$\frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{\mathbf{F}_1}{q_0} + \frac{\mathbf{F}_2}{q_0} + \cdots + \frac{\mathbf{F}_n}{q_0}$$

按场强的定义，于是有

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \cdots + \mathbf{E}_n = \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i^2} \mathbf{e}_i \quad (6-6)$$

由此可见，点电荷系所产生的电场在某点的场强等于各点电荷单独存在时所产生的电场在该点的场强的矢量和。这一结论称为电场强度叠加原理，简称场强叠加原理。

3. 连续分布电荷电场中的电场强度

当场源电荷在所讨论的问题中不能当做点电荷处理时，我们必须考虑其形状和大小，并将带电体上的电荷看做是连续分布的。设想将带电体分割成许多微小的电荷元 dq (见图 6-6)，则每一电荷元都可看做是点电荷，于是任一电荷元在给定点 P 所产生的场强为

$$d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \mathbf{e}_r$$

式中 r 和 \mathbf{e}_r 分别是电荷元 dq 到 P 点的距离和单位矢量。根据场强叠加原理，带电体产生的电场的场强为

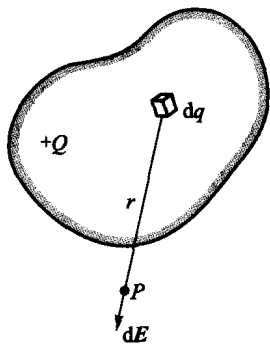


图 6-6 电荷元的场强

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r^2} \mathbf{e}_r \quad (6-7)$$

上式是矢量积分式，在具体计算中一般可以列出各坐标轴方向上的分量式，再求标量积分，最后得到合场强 E 。如在直角坐标系中，则可写成

$$E_x = \int dE_x, \quad E_y = \int dE_y, \quad E_z = \int dE_z,$$

$$\mathbf{E} = E_x \mathbf{i} + E_y \mathbf{j} + E_z \mathbf{k}$$

电荷在带电体上连续分布的形式有三种，我们引入电荷密度的概念进行描述。若电荷连续分布在细线上，线的粗细在所讨论的问题中可以忽略不计，电荷线密度为 λ ，则任意线元 dl 的带电荷量为 $dq = \lambda dl$ ；若电荷连续分布在一个薄层内，而在所讨论的问题中薄层厚度可以忽略不计，电荷面密度为 σ ，则任意面积元 dS 的带电荷量为 $dq = \sigma dS$ ；若电荷连续分布在一个体积内，电荷体密度为 ρ ，则任一体积元 dV 的带电荷量为 $dq = \rho dV$ 。这样，对电荷连续分布的带电体，可按不同的电荷分布方式代入式(6-7)，写出场强公式。

例 6-2 一对等量异种点电荷 $+q$ 和 $-q$ ，相距为 l 。当从观察到点两电荷连线的距离 $x \gg l$ 时，则这一对点电荷称电偶极子，定义电偶极矩 $p_e = ql$ ， l 的方向由负电荷指向正电