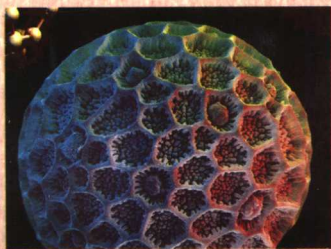


大学物理

邓顺蓉
主编



UNIVERSITY PHYSICS
UNIVERSITY PHYSICS
UNIVERSITY PHYSICS

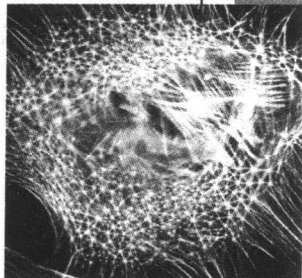
II

湖北科学技术出版社

大学物理

UNIVERSITY PHYSICS

主编 邓顺蓉
编者 邓顺蓉 孙威娜
易丽莎
(以所编内容先后为序)



湖北科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理/邓顺蓉主编. —武汉:湖北科学技术出版社, 1998.1
(2000.7 重印)

ISBN 7-5352-2042-8

I. 大… II. 邓… III. 物理学-高等学校-教材 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 35141 号

大学物理 II

© 邓顺蓉 主编

责任编辑:杨小复 王连弟

封面设计:戴 旻

出版发行:湖北科学技术出版社

电话:86782508

地 址:武汉市武昌黄鹄路 75 号

邮编:430077

印 刷:华中理工大学印刷厂

邮编:430074

787mm × 1092mm

32 开

11.375 印张

260 千字

1998 年 1 月第 1 版

2002 年 1 月第 3 次印刷

印数:11 601 - 17 600

ISBN 7 - 5352 - 2042 - 8/N·36

定价:36.00 元(套)

本书如有印装质量问题 可找承印厂更换

目 录

第 3 篇 电磁学

第 9 章 电相互作用 真空中的静电场	1
第 1 节 静电场理论的基础.....	1
第 2 节 静电场 电场强度.....	8
第 3 节 静电场的高斯定理	21
第 4 节 电荷在电场中所受的力	36
第 5 节 静电场的环路定理	37
第 6 节 电位差和电位	40
第 7 节 电场强度与电位梯度的关系	48
第 8 节 电荷在外电场中的静电势能	52
思考题	54
习题	55
第 10 章 静电场与实物的相互作用	60
第 1 节 静电场中的导体	60
第 2 节 静电场中的电介质	66
思考题	76
习题	77
第 11 章 电容器的电容和电场的能量	80
第 1 节 电容 电容器的电容	80
第 2 节 电场的能量	87
思考题	91
习题	93
第 12 章 电流与电场	96

第1节	电流的稳恒条件	96
第2节	欧姆定律及其微分形式	101
第3节	电源及其电动势	106
思考题		113
习题		114
第13章	真空中的稳恒磁场	117
第1节	磁场 磁感应强度	117
第2节	毕奥—萨伐尔定律	120
第3节	稳恒磁场的高斯定理	129
第4节	安培环路定理	132
思考题		141
习题		142
第14章	磁相互作用	147
第1节	带电粒子在均匀磁场中的运动	147
第2节	同步回旋加速器 磁聚焦原理 磁约束	151
第3节	霍耳效应	155
第4节	载流导线在磁场中所受到的力	158
第5节	载流线圈在磁场中所受的力和力矩	162
第6节	磁力的功	165
习题		167
第15章	磁场与实物的相互作用	174
第1节	顺磁性与抗磁性	174
第2节	磁化强度矢量 M 及其与 B 、 H 的关系	178
第3节	铁磁性	184
思考题		190
习题		191
第16章	电磁感应	193

第 1 节	法拉第的实验研究	193
第 2 节	电磁感应定律	196
第 3 节	感生电动势 感应电场	204
第 4 节	动生电动势	211
第 5 节	自感与互感	215
第 6 节	磁场的能量	226
	思考题	229
	习题	231
第 17 章	麦克斯韦方程组	240
第 1 节	位移电流 全电流定理	240
第 2 节	麦克斯韦方程组	248
	思考题	253
	习题	253

现代物理专题

A.	广义相对论简介	254
B.	等离子体	264
C.	超导	281
D.	混沌与分形	297
E.	信息光学(付里叶光学)	318
F.	粒子物理	330
	思考题和习题答案	345

第 3 篇 电 磁 学

第 9 章 电相互作用 真空中的静电场

本章从静止点电荷间相互作用的基本规律——库仑定律出发,研究传递这种相互作用的静电场的性质和规律.从电场对电荷有力作用,及电荷在静电场中移动时电场力对电荷做功这两个方面,引入描述静电场的两个重要物理量:电场强度和电位.并介绍了电场强度和电位之间的积分关系和微分关系,以及计算电场强度和电位的几种方法.

在库仑定律和场的叠加原理基础上,导出了反映静电场性质的两个基本规律,即高斯定理和静电场的环路定理.它们指出了静电场是一个有源无旋的矢量场.

本章还讨论了电荷在外电场中的静电位能.

第 1 节 静电场理论的基础

一、电荷与物质

1. 电荷

电荷一词来源于静电的基本现象.例如任何两个不同性质的物体摩擦之后,都能够吸引毛发、小纸片等轻小物体.当物体有了吸引轻小物体的性质,就说它带了电,或有了电荷.

实验证明,自然界只有两种电荷.18 世纪美国物理学家富兰克林(Benjamin Franklin 1706—1790)第一个将它们命名为

正电荷和负电荷.从根本上讲,正电荷和负电荷是电荷对偶性的两个对立方面,电荷对偶性又是自然界普遍对称性的一种反映.电荷对电荷的作用表现为,同种电荷互相排斥,异种电荷互相吸引.

量度物体所带电荷数量的多少的物理量,叫电量,通常用 q 或 Q 表示.在国际单位制(SI)中,电量的单位是库仑,单位符号为 C.

究竟什么是电荷?当今的看法是:电荷和质量一样,它们都是粒子(或物质)的基本属性.粒子具有质量,就是说它具有引力相互作用的本领.粒子具有电荷,就说它具有电(磁)相互作用的本领.由于引力和电(磁)力是彼此互不相关的,因此粒子的质量和电荷之间不存在固定的关系.

2. 电荷的量子化

量子化的概念本世纪初才提出.当某一物理量的值不是连续的,而只能取一系列分立值时,就称这一物理量是量子化的.无数实验表明,自然界中物体所带的电量是不连续的,电荷总以一确定的量为基本单元,我们用 e 表示,其值为一个电子所带电量的绝对值,即

$$e = 1.602\ 10 \times 10^{-19}(\text{C}) \textcircled{1}$$

任何带电体所带的电荷,不论其来源如何,其电量 q 都只能是 e 的正的或负的整数倍,即

$$q = ne$$

其中 n 是正或负整数.上式表明,任何实际存在着的电荷,都只能取一系列不连续的值,不能取任意值.通常我们将电荷的这种

^① 1913年密立根(Robert Andrews Millikan, 1868—1953)通过油滴实验,首次测定了电子的电量即 e 的数值.

特性称为电荷的量子化，而把电荷的基本单元 e 称为电荷的量子。迄今所有能测定的带电基本粒子都有 $+e$ 或 $-e$ 的电量。例如电子、反质子和负介子等带电为 $-e$ ，正电子和质子等带电量为 $+e$ 。另外一些基本粒子不带电，如中子、光子和中微子等。

电荷的量子化当今已被公认是自然界的一个普遍的客观规律。但是，由于电荷的量子 e 如此之小，通常带电物体所带电荷常常是 e 的许许多多倍，以至在宏观电磁现象中，电荷的不连续性表现不出来，就象我们感觉不出呼吸的空气或喝的水是由分子、原子组成一样。因此，在处理宏观带电问题时，从平均效果上考虑，可以认为电荷在带电物体上的分布是连续的。

1965 年我国理论物理工作者提出了层子模型（几乎在同一时期国外提出类似的夸克模型），认为基本粒子是由更深层次的“层子”构成的，可能有分数电荷的“层子”，它们所带的电量是 $\pm \frac{1}{3}e$ 或 $\pm \frac{2}{3}e$ 。是否存在 e 的分数倍的“层子”（国外叫“夸克”），还有待于实验证实。只是到目前为止，还没有发现它们。

3. 电荷的不变性

带电粒子的电量是可测量量，测量可在不同的参照系中进行，不同参照系观察同一粒子的运动状态是不同的。狭义相对论告诉我们，粒子的质量与运动状态（速度）有关，对于不同参照系来说，粒子的质量不相等，这一事实可称为质量不具有不变性。粒子的电荷与运动状态无关，对于不同参照系来说，粒子的电荷大小（即电量）是相等的。这一事实称为电荷的不变性。

原子和分子是精确电中性的，是电荷不变性的一个很好的证明。例如氢分子和氦原子都有两个质子和两个电子，但是它们内部的电子和质子（尤其是质子）的运动是很不相同的。如果运动对电量有任何影响，那么我们就看不到，既在氢分子中，

又在氦原子中,原子核的电荷和电子的电荷都恰好抵消.事实上,氢分子和氦原子几乎以相同的实验精确度被证明是电中性的.

电荷不变性的实验证明很多.例如,人们在实验室参照系中测量从加速器中发射出来的速度接近光速的电子所带的电量为 $1.602 \times 10^{-19} \text{C}$,与密立根油滴实验中,通过在电场中以几毫米/分的低速运动的带电油滴电量的测量确定的电子的电量完全相等.

4. 电荷守恒定律

电荷守恒定律是物理学中最基本的守恒定律之一;这定律是富兰克林首先于 1747 年提出的.这定律指出,在一封闭系统中,无论进行怎样的物理过程,系统的正、负电荷的电量的代数和保持不变.

实验证明,无论是摩擦起电,还是其它方法使物体的带电过程,正负电荷总是同时出现,而且这两类电荷的量值一定相等.物体带电过程实际上是电荷从一物体迁移到另一物体、或者从物体的一部分迁移到另一部分,但电荷的总量保持不变.

近代实验还证明,一切微观过程(如放射性衰变,核反应及基本粒子过程)系统电荷的代数和是守恒的.例如电子(电荷 $= -e$)和正电子(电荷 $= +e$)彼此相遇时,这两个基本粒子完全消失,在它们原来所在的地方出现方向相反的两条 γ 射线,这一过程叫电子偶湮没. γ 射线不带电,因此湮没前后,净电荷都为零,这一过程电荷是守恒的.

5. 电荷与物质

通常的宏观物质由三种基本粒子所组成,即质子、中子和电子,表 9-1 列出了它们的质量和电荷.

表 9-1 质子、中子和电子的性质

粒 子	符 号	电 荷	质 量
质子	p	$+e$	$1.672\ 52 \times 10^{-27} \text{kg}$
中子	n	0	$1.674\ 82 \times 10^{-27} \text{kg}$
电子	e	$-e$	$9.109\ 1 \times 10^{-31} \text{kg}$

原子由带正电的原子核和带负电的电子组成. 正常情况下物体任何一部分所包含的电子的总数和质子的总数是相等的, 所以对外界不表现电性, 通称电中性. 而物体带电过程的内在根据即在物质内部固有地存在着电子和质子这两类基本带电粒子. 物质带负电说明它从别的物体获得了额外电子, 物体带正电说明它失去了电子.

二、库仑定律

静电现象的研究中, 我们经常用到点电荷的概念. 应该指出它和质点、刚体、理想气体等一样都属于理想的物理模型. 在具体问题中, 当带电体形状和大小可以忽略不计时, 这一带电体可看作点电荷. 在带电体不能视为点电荷时, 可以把它看成由很多点电荷组成的集合体.

1785 年法国科学家库仑 (Charles Augustin de Coulomb 1736—1806) 从实验结果总结出点电荷之间的相互作用的基本规律, 称库仑定律. 库仑定律的文字叙述是: 在真空中 q_1 和 q_2 两个点电荷之间的相互作用力的方向沿着这两个点电荷的连线, 同号电荷相斥, 异号电荷相吸, 作用力的大小与 q_1 和 q_2 的乘积成正比, 与两点电荷间的距离的平方成反比.

令 F 代表 q_1 给 q_2 的力, r 代表由 q_1 到 q_2 矢径, 则有

$$F = K \frac{q_1 q_2}{r^3} r \quad (9-1-1)$$

静止电荷间的相互作用力,遵从牛顿第三定律, q_2 给 q_1 的力为 $-F$. F 与 $-F$ 大小相等,方向相反(见图 9-1-1).

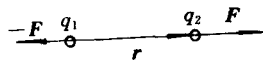


图 9-1-1

(9-1-1)式中的 K 为比例系数,在国际单位制中, K 可写成如下形式

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

ϵ_0 称为真空的介电系数或电容率. 实验测得:

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{C}^2 \text{N}^{-1} \text{m}^{-2}$$

因此

$$K = \frac{1}{4\pi \times 8.85 \times 10^{-12}} \doteq 9.00 \times 10^9 \text{Nm}^2 \text{C}^{-2}$$

真空中的库仑定律表达式为

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (9-1-2)$$

如果 q_1 、 q_2 在电介质中,由于电介质的影响,使得 q_1 、 q_2 相互作用力改变. 但由于空气这种电介质,对电荷间相互作用力影响甚小,因此在空气中得到的电荷相互作用规律亦适用于真空. 库仑的扭秤实验就是在空气中进行的. 因为 $F \propto \frac{1}{r^2}$, 所以该定律又称库仑的平方反比定律. 其中 r 的幂是“2”,库仑的扭秤实验误差在百分之几的范围内,近代精确实验证明其误差不超过 10^{-16} 数量级. 进一步研究已证实,两点电荷间的距离在 10^{-15}m 到 10^6m 范围内库仑定律是可靠的. 因而我们把库仑定律作为静电场理论的基础.

应该记住,库仑定律只适用于点电荷. 实验证明,静电力遵从叠加原理. 即不管有多少个点电荷同时存在,每两个点电荷的

相互作用力都可以用库仑定律来计算,而作用在任意一个点电荷的静电力等于其它各个点电荷对它作用力的矢量和. 假设有 n 个点电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$. 则其中任意一个电荷 q_i 所受的其它电荷的总作用力可表为

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{F}_{i1} + \mathbf{F}_{i2} + \dots + \mathbf{F}_{in} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \mathbf{F}_{ij} \quad (9-1-3)$$

前已提到,带电体可当成很多点电荷组成的集合体看待. 因此,任意带电体间的静电相互作用力,可以用库仑定律和叠加原理来求得.

[例题 9-1] 在氢原子内电子和原子核之间的距离 $r = 0.529 \times 10^{-10} \text{m}$, 试计算电子和原子核之间的静电力和万有引力,并比较两者的大小. 已知电子质量为 $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{kg}$, 氢原子核的质量为 $m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{kg}$. 电子和原子核(即质子)所带电量相等,即 $q_1 = q_2 = 1.60 \times 10^{-19} \text{C}$, 万有引力恒量 $G_0 = 6.67 \times 10^{-11} \text{Nm}^2 \text{kg}^{-2}$.

[解] 根据库仑定律,电子和原子核之间的静电力为

$$\begin{aligned} f_e &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \\ &= 9.00 \times 10^9 \times \frac{(1.60 \times 10^{-19})^2}{(0.529 \times 10^{-10})^2} \\ &= 8.23 \times 10^{-8} \text{N} \end{aligned}$$

根据牛顿万有引力定律,电子和原子核间的万有引力为

$$\begin{aligned} f_m &= G_0 \frac{m_e m_n}{r^2} \\ &= 6.67 \times 10^{-11} \times \frac{9.11 \times 10^{-31} \times 1.67 \times 10^{-27}}{(0.529 \times 10^{-10})^2} \\ &= 3.64 \times 10^{-47} \text{N} \end{aligned}$$

二力比值为

$$f_e/f_m = 2.27 \times 10^{39}$$

由此可见在原子内,电子和原子核之间的静电力 $f_e \gg$ 电子和原子核之间的万有引力 f_m ,因此在处理电子和原子核之间的相互作用时,万有引力可以忽略不计,只考虑静电力就可以了.而原子结合成分子,原子或分子组成的液体或固体,它们的结合力在本质上也都属于电性力.

〔例题 9-2〕 设原子核中两个质子相距 $4.0 \times 10^{-15} \text{m}$,求此两质子之间的静电力.

〔解〕 根据库仑定律

$$f_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} = 9.00 \times 10^9 \times \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2}{(4.0 \times 10^{-15})^2} = 14 \text{N}$$

原子核内质子间的相互作用是库仑斥力,其斥力又这样大,为什么质子能结合在一起组成原子核呢?这是由于核内除了库仑斥力之外,还存在着比斥力更大的引力——核力的缘故.核力是核子间的相互作用力不是电性力,而是强相互作用的短程力.

以上两例,说明了原子核的结合力远大于原子的结合力,原子的结合力又远大于相同粒子相隔同样距离的万有引力.

第2节 静电场 电场强度

一、电场 静电场

库仑定律说明了两个点电荷相互作用的定量关系,但是这种作用究竟是通过什么机构来进行的呢?在法拉第以前,很多人持超距作用的观点,认为相隔一定距离的两个电荷之间的相互作用不需要任何物质来传递,而是直接、瞬时的相互作用.可以表示如下:

电荷 $\rightleftharpoons$ 电荷

到了上世纪初,法拉第提出新的观点,认为电荷周围空间存

在着电场,电荷之间的相互作用是通过电场来传递的.可以表示如下:

电荷 $\rightleftharpoons$ 电场 $\rightleftharpoons$ 电荷

麦克斯韦发展了法拉第的场的观点,提出了完整的普遍的电磁场理论.现在,人们公认场的观点的是正确的.电荷间的电相互作用力(通常称为电性力、库仑力或静电力)在本质上就是电场力(电场对电荷的作用力).

相对于观察者静止的电荷周围所存在的场称为静电场,它是普遍电磁场的一种特殊情形.

静电场和电荷(称为场源电荷)总是相伴而生,静止电荷间通过周围静电场而相互作用,这种情况下,显示不出作用传递需要时间.然而,当人们发现了电磁波,并证明光波也是电磁波以后,超距作用的观点就被彻底否定了.在发射电磁波的天线中,加速运动着的电子对远处接受天线中电子的作用,是通过电磁场来传递的,作用传递速度就等于光速.这是对场的观点的有力证明.

静电场的重要性质表现在如下两个方面:

- (1)放在电场中的带电体,都会受到电场力的作用;
- (2)带电体在电场中移动时,电场力会做功,这表明电场具有能量.

下面我们根据这两个方面,来研究静电场性质及规律.

二、静电场的定量描述—— 电场强度 E

1. 电场强度 E

设想这样一个实验,场源电荷 Q 不运动,则它周围存在静电场.一个足够微小的点电荷 q_0 作为检验电荷.所谓足够微小,首先,它带的电量很小很小,以至于当它引入电场时,不会对原有电场有显著的影响.其次,它占据的空间很小很小,即当它置

于电场时,占有确定的位置,以便我们研究电场中每一点的性质.实验表明,将 q_0 置于电场中不同的位置, q_0 所受的力的大小和方向逐点不同,如图 9-2-1 所示;当改变 q_0 带电量值,则发现场中给定点处,检验电荷受力方向不变,而力的大小与 q_0 成正比.由此可见,检验电荷在电场中某点所受的力,不仅与 q_0 所在点的

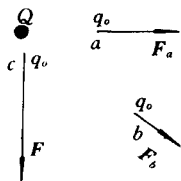


图 9-2-1

电场性质有关,而且与检验电荷本身的电量有关.但是 q_0 在给定点所受的力与 q_0 的比值是个确定值,而且只与 q_0 所在点的电场性质有关,与检验电荷本身无关.我们可以用检验电荷在电场中所受的力与检验电荷所带电量的比值,作为描述电场中给定点处电场性质的一个物理量,称为电场强度或简称场强,用 E 表示.其定义式为

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (9-2-1)$$

当 q_0 为一个单位电量的正电荷时, E 和 F 的量值相等,方向相同.这表示电场中某点的场强在量值和方向上,等于一个单位正电荷在该点所受的力.在 SI 制中, E 的单位是牛顿/库仑(N/C),又可写作伏特/米(V/m)(见第 7 节).

2. 场强叠加原理

当检验电荷 q_0 置于由若干个电荷所产生的电场中,实验指出, q_0 所受的力等于各个点电荷各自对 q_0 作用力的矢量和,即

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \cdots + \mathbf{F}_N$$

上式两边除以 q_0 ,得

$$\mathbf{F}/q_0 = \mathbf{F}_1/q_0 + \mathbf{F}_2/q_0 + \cdots + \mathbf{F}_N/q_0$$

依场强的定义,不难看出,等号右边各项分别是各个点电荷所产生的场强,而左边为总场强.即

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \cdots + \mathbf{E}_N = \sum_{i=1}^N \mathbf{E}_i \quad (9-2-2)$$

上式表明,电场中一个点的总场强等于各个点电荷在该点各自产生的场强的矢量和.这就是场强的叠加原理.

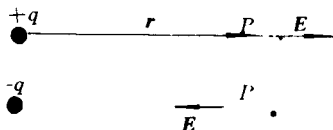
三、 $\mathbf{E}$ 的计算

1. 点电荷电场中的场强

真空中有一点电荷 q , 其周围存在静电场, 距离 q 为 r 的 p 点处的场强计算如下:

设想在 p 点处, 放一个检验电荷 q_0 , q_0 受力为

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^3} \mathbf{r}$$



再根据场强的定义求得 p 点处的场强为

图 9-2-2

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^3} \mathbf{r} \quad (9-2-3)$$

当场源电荷 q 为正电荷, 则 $\mathbf{E}$ 与 $\mathbf{r}$ 同向, 当 q 为负电荷, 则 $\mathbf{E}$ 与 $\mathbf{r}$ 反向. 如图 9-2-2 所示.

2. 点电荷系电场中的场强

设真空中的电场是由若干个电荷 $q_1, q_2, q_3, \cdots, q_N$ 所共同产生的, 各个点电荷到 p 点的矢径分别为 $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3, \cdots, \mathbf{r}_N$, 它们在 p 点的场强分别为

$$\mathbf{E}_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r_1^3} \mathbf{r}_1$$

$$\mathbf{E}_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2}{r_2^3} \mathbf{r}_2, \cdots, \mathbf{E}_N = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_N}{r_N^3} \mathbf{r}_N$$