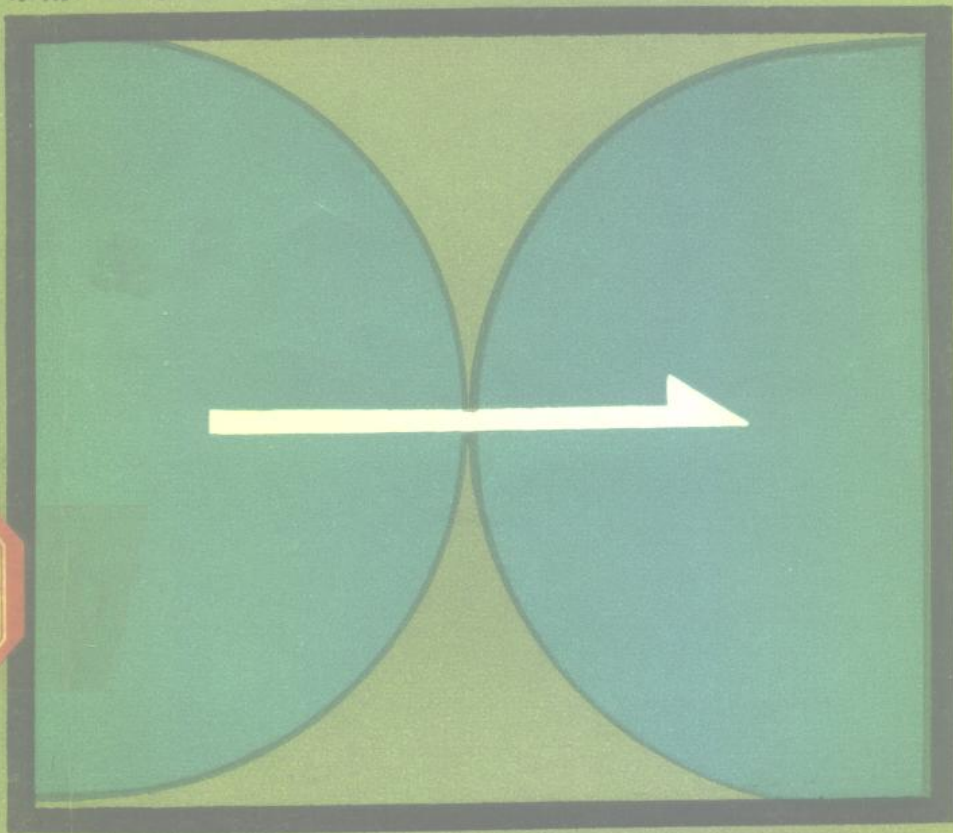


高等学校教材

物理学

(中册) · 第三版 ·

东南大学等七所工科院校 编 马文蔚 改编



高等教育出版社

高等学校教材

物 理 学

中 册

(第三版)

东南大学等七所工科院校编写 马文蔚 改编

高等教育出版社

(京) 112号

内 容 提 要

本书是在东南大学(原南京工学院)等七所工科院校编马文蔚柯景凤改编《物理学》(第二版)的基础上修订的。修订时参照了国家教委于1987年颁布的《高等工业学校大学物理课程教学基本要求》。本书中册在保持第二版特点的同时,调整了部分章节的次序,如将毕奥-萨伐尔定律从磁力矩之后移到磁场的高斯定理之前;改写了部分内容,如静电场的高斯定理、电场中的电介质、电磁感应定律等;适当增加一些联系实际的问题;精选了例题、习题和问题。使第三版在体系、内容、文字表述等方面趋于完善。全书采用国际单位制,并按照全国自然科学名词审定委员会公布的《物理学名词》校核了全部名词。书末附有汉英物理名词索引。

本书仍分三册,上册为力学、气体动理论和热力学基础,中册为电磁学,下册为波动过程和近代物理基础。

本书可作为讲课时数为130学时左右的一般工科专业大学物理的教材,也可作为理科非物理专业的普通物理教材。

责任编辑:奚静平

高等工科教材

物 理 学

中 册

(第 三 版)

东南大学等七所工科院校编 马文蔚改编

高等教育出版社出版

新华书店总店科技发行所发行

文字六〇三厂印装

开本850×1168 1/32 印张14.375 字数280 000

1978年2月第1版 1993年5月第3版 1993年5月第1次印刷

印数 0001— 68175

ISBN 7-04-004139-1/O·1189

定价4.30元

电磁学量的名称、符号和单位

量		单 位	
名 称	符 号	名 称	符 号
电 荷(量)	q, Q	库 仑	C
电场强度	E	伏特每米	$V \cdot m^{-1}$
真空电容率	ϵ_0	法拉每米	$F \cdot m^{-1}$
相对电容率	ϵ_r		
电场强度通量	Φ_e	伏 特 米	$V \cdot m$
电 势 能	E_p	焦 耳	J
电 势	V	伏 特	V
电 势 差	U	伏 特	V
电偶极矩	p	库 仑 米	$C \cdot m$
电 容	C	法 拉	F
电极化强度	P	库仑每二次方米	$C \cdot m^{-2}$
电 位 移	D	库仑每二次方米	$C \cdot m^{-2}$
电 流	I	安 培	A
电流密度	j	安培每平方米	$A \cdot m^{-2}$
电 阻	R	欧 姆	Ω
电 阻 率	ρ	欧 姆 米	$\Omega \cdot m$
电 动 势	\mathcal{E}	伏 特	V
磁感强度	B	特 斯 拉	T
磁偶极矩	m	安培平方米	$A \cdot m^2$
磁化强度	M	安培每米	$A \cdot m^{-1}$
真空磁导率	μ_0	牛顿平方米	$N \cdot m^2$
相对磁导率	μ_r		
磁场强度	H	安培每米	$A \cdot m^{-1}$
磁 通 量	Φ_m	韦 伯	Wb
自感系数	L	亨 利	H
互感系数	M	亨 利	H
位移电流	I_d	安 培	A

目 录

第九章 静电场	1
9-1 电荷的量子化 电荷守恒定律	1
9-2 库仑定律	3
9-3 静电场 电场强度	7
9-4 电场强度的计算	13
9-5 电场线 电场强度通量	23
9-6 高斯定理及其应用	30
*9-7 密立根测定电子电荷实验	41
9-8 静电场力所作的功 电势能	44
9-9 电势 电势差	50
9-10 电势的叠加原理 电势的计算	53
9-11 等势面 场强与电势的关系	60
*9-12 静电场中的电偶极子	68
问题	71
习题	73
第十章 静电场中导体与电介质	81
10-1 静电场中的导体	81
10-2 电容 电容器	93
10-3 静电场中的电介质 电极化强度	103
10-4 电位移 有电介质时的高斯定理	113
*10-5 电场的边界条件	119
*10-6 压电效应 铁电体 驻极体	122
10-7 静电场的能量 能量密度	126
10-8 静电的应用	131
问题	137

习题	139
第十一章 稳恒电流	146
11-1 电流 电流密度	146
11-2 电阻率 欧姆定律的微分形式	152
11-3 电源 电动势	157
11-4 闭合电路的欧姆定律	160
*11-5 基尔霍夫定律	163
*11-6 电容器的充放电	168
问题	173
习题	176
第十二章 稳恒磁场	180
12-1 基本磁现象	180
12-2 磁场 磁感强度	185
12-3 毕奥-萨伐尔定律	189
12-4 磁通量 磁场的高斯定理	198
12-5 安培环路定理	202
12-6 运动电荷在磁场中所受的力——洛伦兹力	212
12-7 载流导线在磁场中所受的力——安培力	219
12-8 磁场对载流线圈的作用	227
12-9 带电粒子在电场和磁场中运动举例	233
12-10 运动电荷的磁场	245
问题	247
习题	253
第十三章 磁介质	262
13-1 磁介质 磁化强度	262
13-2 磁场强度 磁介质中的安培环路定理	267
13-3 铁磁质	272
*13-4 磁场的边界条件	279
问题	283
习题	284

第十四章 电磁感应 电磁场	285
14-1 电磁感应定律	285
14-2 动生电动势和感生电动势	293
14-3 自感和互感	307
*14-4 RL 电路	317
14-5 磁场的能量	320
14-6 位移电流 电磁场基本方程的积分形式	324
问题	331
习题	336
中册习题答案	343
中册索引	350

第九章 静 电 场

电磁运动是物质的一种基本运动形式。电磁相互作用是自然界已知的四种基本相互作用之一。在日常生活和生产活动中，在对物质结构的深入认识过程中，都要涉及电磁运动。因此，理解和掌握电磁运动的基本规律，在理论上和实践上都有极重要的意义。

一般来说，运动电荷将同时存在电场和磁场，电场和磁场是相互关联的。但是，在某种情况下，例如当我们所研究的电荷处于静平衡（即电荷相对某参考系静止）时，就可以只研究电场，而不涉及磁场。这就是本章所要讨论的静止电荷所激发的静电场。

本章的主要内容有：静电场的基本定律——库仑定律，静电场的两条基本定理——高斯定理和环路定理，描述静电场的两个基本物理量——电场强度和电势等。

9-1 电荷的量子化 电荷守恒定律

按照原子理论，在每个原子中，电子环绕由中子和质子组成的原子核而运动，这些电子的状况可视为如图 9-1 所示的电子云。原子核的线度较之电子云的线度要小得多（图 9-1）。一般来说，原子核的线度约为 $5 \times 10^{-15} \text{ m}$ ，电子云的线度（即原子的直径）约为 $2 \times 10^{-10} \text{ m}$ 。这就是说，原子的线度约为原子核线度的 10^5 倍。原子中的质子带正电，电子带负电，中子不带电，质子与电子所带电量的绝对值是相等的。此外，物质结构理论还认为，分子是由许多原子所组成，不同的分子集团就成为形形色色的宏观物体。在正常情况下，每个原子中的电子数与质子数相

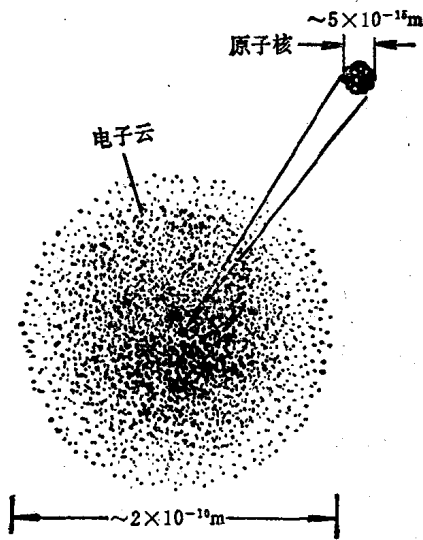


图 9-1 电子云

等，故物体呈电中性。当物体受到摩擦等作用时，造成物体的电子过多或不足，这时，我们说物体带电。当电子过多时，物体带负电，当电子不足时，物体带正电。

一 电荷的量子化

1897年J.J.汤姆孙从实验中测出电子的比荷^①(即电子的电荷与质量之比 e/m)。1907年R.A.密立根从实验中测出所有电子都具有相同的电荷^②，而且带电体的电荷是电子电荷的整数倍，如以 e 代表电子的电荷，带电体的电荷为 $q=ne$ ， n 为 $1, 2, 3, \dots$ 。这是自然界存在不连续性(即量子化)的一个例子。电荷的这种只

① 电子的电荷与质量之比 e/m ，过去称作电子的荷质比，按1988年，全国自然科学名词审查委员会公布的《物理学名词》， e/m 定名为“比荷”，而“电子荷质比”为不推荐用名。有关J.J.汤姆孙的电子比荷测定的实验，请参阅本书第十二章节12-9。

② 关于密立根实验，请参阅本章节9-7。

能取离散的、不连续的量值的性质，叫做电荷的量子化。电子的电荷 e 为基元电荷，或称电荷的量子。

物体所带电荷的量值叫做电量。电量的单位名称为库仑，简称库，符号为C，1986年国际推荐值，电子电荷为

$$e = 1.60217733(49) \times 10^{-19} \text{C}$$

在通常的计算中，取它的近似值

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

现在知道，自然界包括电子、质子、中子在内，有几百种粒子，其中带电的粒子，它们所带的电荷或者是 $+e$ 、 $-e$ 。因此可以说，电荷量子化是一个普遍的量子化规则。量子化是近代物理中的一个基本概念，当研究的范围在原子线度大小时，很多物理量如频率、能量等也都是量子化的。这些，本书将在光的量子性、原子结构等章节中再加以介绍。

二 电荷守恒定律

前面已指出，在正常状态下，物体是电中性的，物体里正、负电量的代数和为零。如果在一个孤立系统中有两个电中性的物体，由某些原因，使一些电子从一个物体移到另一个物体上，则前者带正电，后者带负电，不过两物体正、负电量的代数和仍为零。总之，在孤立系统中，不管系统中的电荷如何迁移，系统的电荷的代数和保持不变，这就是电荷守恒定律。电荷守恒定律是自然界的基本守恒定律之一。无论是在宏观领域里，还是在原子、原子核和粒子范围内，电荷守恒定律都是成立的。

9-2 库仑定律

1785年法国物理学家库仑利用扭秤^①实验直接测定了两个带

^① 十二年后，1798年英国化学家卡文迪许(H. Cavendish, 1731—1810)利用与库仑相似的扭秤测出引力常量G。

电球体之间的相互作用的电力。库仑在实验的基础上提出了两点电荷之间相互作用的规律，即库仑定律。库仑定律的表述为：

在真空中，两个静止的点电荷之间的相互作用力，其大小与点电荷电量的乘积成正比，与两点电荷间距离的平方成反比，作用力在两点电荷的连线上，同号电荷相斥，异号电荷相吸。

“点电荷”是一个抽象的模型。当两带电体本身的线度 d 较之它们间的距离 r 要小得很多时，即 $d \ll r$ ，带电体可近似当成是“点电荷”。

如图9-2所示，两点电荷的电量分别为 q_1 和 q_2 ①，由电荷 q_1 指向电荷 q_2 的位置矢量用 r_{12} 表示。那么，电荷 q_2 受到电荷 q_1 的作用力 F_{12} 为

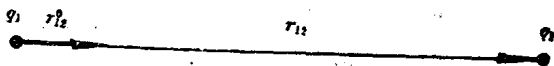


图 9-2 库仑定律

$$F_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} r_{12}^0 \quad (9-1)$$

式中 r_{12}^0 为从电荷 q_1 指向电荷 q_2 位置矢量的单位矢量，即 $r_{12}^0 = r_{12}/r_{12}$ ， k 为比例系数。 k 的数值和单位取决于上式中各量的单位，且可由实验确定。在国际单位制中，

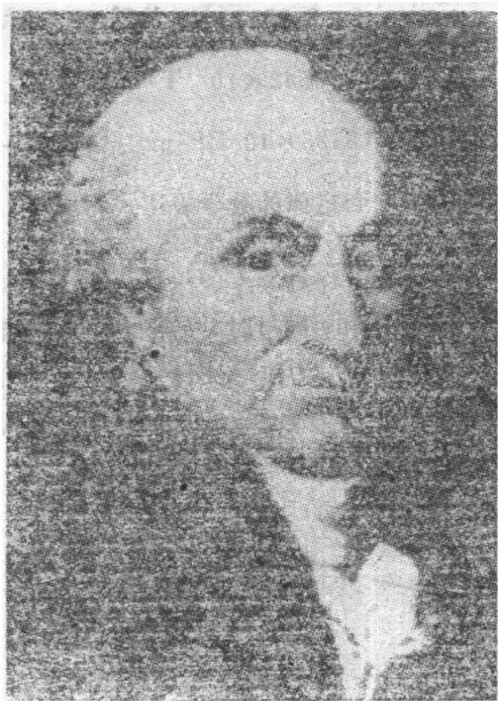
$$k = 8.98755 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$$

通常在计算中取它的近似值， $k \approx 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$ 。

在实际问题中，直接用到库仑定律的机会很少，常用的却是从它推导出来的其他公式②。为了使这些常用公式的形式简单

① 以后为叙述简便，常将“电量为 q 的电荷”表述为“电荷 q ”。因此，“两电量分别为 q_1 和 q_2 的点电荷”，可表述为“两点电荷 q_1 和 q_2 ”。

② 如节9-6的高斯定理和节10-2电容器的电容等。



库仑(Charles Augustino de Coulomb, 1736-1806)法国物理学家。他使用自己创制的扭秤确定电荷间作用力的库仑定律。他通过对滚动和滑动摩擦的实验研究,得出摩擦定律。

些,这里我们宁可使库仑定律中的比例系数复杂些。令比例系数 k 表示为

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

式中 ϵ_0 叫做真空电容率①是电学中常用到的一个常量。它的大小和单位为

① ϵ_0 的名称,以前又称真空介电系数,现称真空电容率。

$$\begin{aligned} \epsilon_0 &= \frac{1}{4\pi k} = 8.8542 \times 10^{-12} \text{C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \\ &= 8.8542 \times 10^{-12} \text{F} \cdot \text{m}^{-1} \textcircled{1} \end{aligned}$$

在一般计算中 ϵ_0 取 $8.85 \times 10^{-12} \text{F} \cdot \text{m}^{-1}$ 。把 $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ 代入式(9-1)，可将真空中库仑定律的数学表达式写成

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} r_{12}^0 \quad (9-2)$$

由上式可以看出，当 q_1 和 q_2 同号时， $q_1 q_2 > 0$ ， q_2 受到 q_1 的作用力 F_{12} 与 r_{12}^0 同向，即 q_2 受到斥力作用(图9-3a)，当 q_1 和 q_2 异号时， $q_1 q_2 < 0$ ， q_2 受到 q_1 的作用力 F_{12} 与 r_{12}^0 反向，即 q_2 受到引力作用(图9-3b)。静止电荷间的作用力，又称库仑力。

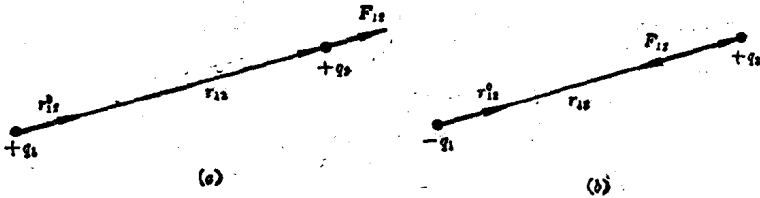


图 9-3 q_2 受到的 q_1 的作用力

然而 q_1 受到 q_2 的作用力 F_{21} 与 q_2 受到 q_1 的作用力 F_{12} ，它们大小相等、方向相反、且在同一直线上，即

$$F_{12} = -F_{21}$$

上述结果表明，两静止点电荷之间的作用力遵守牛顿第三定律。

必须指出，库仑定律只能用于研究点电荷之间的相互作用，在计算任意带电体之间的相互作用时，不能直接应用。当空间存在两个以上的点电荷时，按照力的叠加原理，作用在其中任意一个点电荷上的力，是各个点电荷对其作用力的矢量和。如 F_{21} 、 F_{31} 、

① F是电容单位名称法拉的符号，有关电容单位的规定可参阅节10-2。

⋯、分别代表 q_2, q_3, \dots 作用在 q_1 上的力,那么,各个点电荷作用在 q_1 上的合力则为

$$F_1 = F_{21} + F_{31} + \dots = \sum_{i=1}^n F_{i1} \quad (9-3)$$

例 1 在氢原子中,电子与质子的距离约为 $5.3 \times 10^{-11} \text{m}$ 。求它们之间电的相互作用力和万有引力,并比较这两种力的大小。

解 由于电子与质子之间的距离约为它们本身直径的 10^6 倍,故电子与质子都可看成为点电荷。质子带的电荷为 $+e$,电子带的电荷为 $-e$,故它们之间的电力为引力。根据式(9-2),此电力的大小为

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$$

此外,由万有引力定律知,电子和质子间万有引力的大小为

$$F_g = G \frac{mM}{r^2}$$

于是,电力和万有引力的比值为

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 GmM}$$

由于电子的质量 $m = 9.1 \times 10^{-31} \text{kg}$,质子的质量 $M = 1.67 \times 10^{-27} \text{kg}$, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$, $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$,所以

$$\frac{F_e}{F_g} = 2.3 \times 10^{39}$$

亦即电力要比万有引力大得多。所以在原子中,作用在电子上的力主要为电力,而万有引力完全可以忽略不计。

9-3 静电场 电场强度

一 静电场

实验已证实,两静止点电荷间存在相互作用的静电力(即库仑力)。但两静止点电荷间的这种相互作用又是通过什么途径才得以实现的呢?历史上曾有过不同的观点,其中之一就是认为电荷

之间的静电力不需要任何媒介,也不需要时间,就能够由一个电荷立即作用到相隔一定距离的另一个电荷上,即所谓超距作用。后来,人们通过反复研究,终于弄清了在任何电荷周围都存在着特殊形态的物质——电场,电荷间的相互作用是通过电场来传递的。例如,甲、乙两电荷间的相互作用,就是由于电荷甲周围存在的电场对电荷乙施加作用,同时电荷乙周围存在的电场对电荷甲也施加作用,即电荷之间的相互作用力是通过电场对电荷的作用来实现的,电场对电荷的作用力叫做电场力。

如果带电体相对于观察者来说是静止的,那么在它周围存在的电场就叫做静电场。

现代科学和技术已充分证明电场的存在。示波管中电子束在带电平行板之间要发生偏转,就是电场存在的一个非常普通的佐证。在本书的第十二、十四章和第十七章里我们还将从大量的实验中知道,静止电荷周围不仅存在着电场,而且若使电荷运动,运动电荷周围还存在磁场,变化磁场要激发出电场,变化电场又激发出磁场,从而形成电磁波。电磁波于1888年首先被赫兹实验所证实。

场是物质的一种形式,它和物质的另一种形式——实物(原子、分子等微观粒子,以及由它们组成的宏观物体)一起构成了物质世界非常丰富的图景。静电场存在于静止电荷的周围,并分布在一定的空间。我们知道,处于万有引力场中的物体要受到万有引力的作用,并且当物体移动时,引力要对它做功;处于静电场中的电荷也要受到电场力的作用,并且当电荷在电场中运动时电场力也要对它做功。我们曾从力和功这两方面来研究引力场的性质,分别引出引力场强和引力势能两个物理量,现在我们仍将从力和功这两方面来研究静电场的性质,分别引出描述电场性质的两个物理量——电场强度和电势。下面我们先介绍电场强度,电势则在节9-9中介绍。

二 电场强度

在静止电荷周围存在着静电场，电场对处于其中的电荷施以作用力，这是电场的一个重要性质。为了表述电场的这个性质，我们把一个试验电荷 q_0 放到电场中不同位置，观察电场对试验电荷 q_0 的作用力的情况。关于试验电荷，必须具有如下要求：(1) 试验电荷必须是点电荷；(2) 试验电荷的电量应足够小，以致把它放进电场中后对原有的电场几乎没有什么影响。为叙述方便，我们取试验电荷为正电荷 $+q_0$ ①。

如图 9-4 所示，在静止电荷 Q 周围的静电场中，先后将试验电荷 $+q_0$ 放到电场中 a 、 b 和 c 三个不同的位置上。我们发现，试验电荷 $+q_0$ 在电场中不同位置上所受到的电场力大小不一定相同，这说明电场中各点的电场强度不一定相同。此外，我们还发现，试验电荷在电场中各点所受力的方向也是随位置而变的。

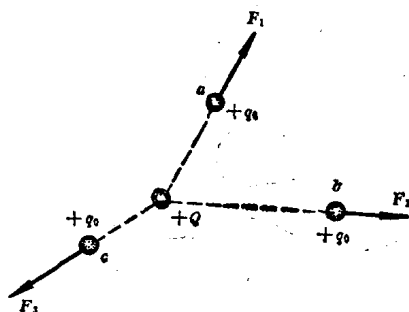


图 9-4 试验电荷在电场中不同位置受电场力的情况

若在电场中某一点先后放置电量为 q_0 、 $2q_0$ 、 $3q_0$... 的试验电荷，它们所受的电场力虽各不相同，分别为 F 、 $2F$ 、 $3F$...。但在电场中某一点，试验电荷所受电场力与其所带电量之比则为一不变的矢量。这说明不变的矢量与试验电荷的电量无关，只与该点在电场中的位置有关。这个不变的矢量为

① 试验电荷也可取负电荷，负试验电荷在电场中的受力方向与正试验电荷的受力方向相反。本章和下一章提到的试验电荷都是指正试验电荷。

$$\frac{F}{q_0} = \frac{2F}{2q_0} = \frac{3F}{3q_0} = \dots = \text{恒矢量}$$

并把它叫做电场强度(简称场强),用符号 E 表示,有

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (9-4)$$

式(9-4)为电场强度的定义式。它表明,电场中某点的电场强度等于位于该点的单位正试验电荷所受的电场力。由于我们取试验电荷为正电荷,故场强 E 的方向与正试验电荷所受力的方向相同。

在国际单位制中,场强的单位为牛顿/库仑,符号为 $N \cdot C^{-1}$;场强的单位亦为伏特/米,符号为 $V \cdot m^{-1}$ 。本章节 9-10 中将说明 $V \cdot m^{-1}$ 与 $N \cdot C^{-1}$ 是一样的。不过 $V \cdot m^{-1}$ 较 $N \cdot C^{-1}$ 使用得更普遍些。

应当指出,如果空间存在 Q_1, Q_2, Q_3, \dots 许多点电荷,那么电场中某一点的电场强度 E 仍可用电场强度的定义式(9-4)来确定。这时式中的 F 应为试验电荷在该点所受的电场力的合力, E 为单位正试验电荷在该点所受的电场力的合力, E 的方向与 F 的方向相同(图 9-5)。

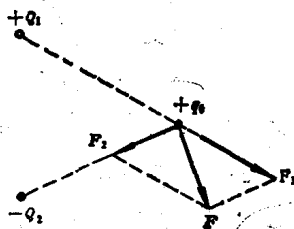


图 9-5 作用在试验电荷上的力是所
有点电荷对其作用力的合力

如果知道了电场中某点的场强 E , 又知道放于该点的电荷 q , 根据式(9-4)可以很容易计算出电荷 q 所受的电场力,即

$$F = qE \quad (9-5)$$

从式(9-5)可以看出,作用在电荷上的电场力的方向与电荷的符号有关。如图 9-6 所示,当 $q > 0$ 时,电场力的方向与场强方向相同;当 $q < 0$ 时,电场力的方向与场强方向相反。