

# 大学物理学

(中册)

唐南 王佳眉 主编  
唐南 陈宁 胡炳全 向黎 编著

高等教育出版社

## 内容简介

本书是作者在多年讲授大学物理课程的基础上,根据教育部颁布的工科本科大学物理课程教学基本要求编写而成的.全书内容精练、概念清晰,力图在有限的课时内清晰准确地讲授大学物理的基本内容.本书将能力的培养与知识的传授有机地融为一体,在内容的选取上涵盖了大学物理最基本、最重要的知识点,在保留经典物理基本框架的同时,对近代物理部分(相对论和量子物理)和新技术的基本物理原理进行了加强和拓展.全书各章均有内容提要及丰富的例题和习题,并附有习题答案.全书共三册,上册为力学和热学,中册为电磁学,下册为波动学、相对论和量子物理.

本书可作为高等院校理工科非物理类专业大学物理课程的教材或参考书,也可供其它专业和社会读者阅读.

## 图书在版编目(CIP)数据

大学物理学. 中册/唐南,王佳眉主编. —北京:高等教育出版社,2003.12

ISBN 7 - 04 - 012984 - 1

. 大 ... . 唐 ... 王 ... . 物理学 - 高等学校 - 教材 . 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 084189 号

---

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010 - 64054588
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800 - 810 - 0598
邮政编码	100011	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http:// www . hep . edu . cn</a>
总 机	010 - 82028899		<a href="http://www.hep.com.cn">http:// www . hep . com . cn</a>

经 销 新华书店北京发行所  
印 刷

开 本	787×960 1/16	版 次	年 月第 1 版
印 张	12.75	印 次	年 月第 次印刷
字 数	230 000	定 价	13.90 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

策划编辑	庞永江
责任编辑	庞永江
封面设计	刘晓翔
责任绘图	吴文信
版式设计	陆瑞红
责任校对	胡晓琪
责任印制	

# 目 录

第八章 静电场 .....	3
§ 8 - 1 电荷 电荷守恒 库仑定律 .....	3
一 电荷与电荷守恒 .....	3
二 电荷的量子性 .....	3
三 库仑定律 .....	4
§ 8 - 2 电场 电场强度及其计算 .....	5
一 电场的概念 .....	5
二 电场强度 .....	6
三 电场力及其计算方法 .....	7
四 点电荷产生的电场与场强叠加原理 .....	10
五 用叠加原理计算电场强度 .....	12
§ 8 - 3 电场线 电场强度通量 高斯定理 .....	17
一 电场线 .....	17
二 电场强度通量 .....	18
三 高斯定理 .....	21
四 应用高斯定理求解具有对称性的带电体系的电场 .....	23
§ 8 - 4 静电场的保守性 静电场环流定理 .....	30
一 电场力做功的特点 .....	30
二 静电场的环流定理 .....	31
§ 8 - 5 电势能 电势 .....	32
一 电势能 .....	32
二 电势 .....	33
三 电势的计算方法 .....	35
§ 8 - 6 场强与电势梯度的关系 .....	41
一 等势面 .....	41
二 场强分量与电势方向导数的关系 .....	42
三 场强与电势梯度的关系 .....	42
内容提要 .....	45

---

习题 .....	46
<b>第九章 导体和电介质 .....</b>	<b>52</b>
§ 9 - 1 静电场中的导体 .....	52
一 导体静电平衡条件 .....	53
二 导体空腔 静电屏蔽 .....	57
§ 9 - 2 电介质 电介质中的高斯定理 .....	61
一 电介质的极化 .....	61
二 电介质中的电场 .....	63
三 介质中的高斯定理 .....	65
四 介质中的高斯定理的应用 .....	67
§ 9 - 3 电容器 .....	69
一 常见电容器 .....	70
二 电容器的连接 .....	72
§ 9 - 4 静电场的能量 .....	75
一 电容器的能量 .....	75
二 静电场的能量 .....	76
内容提要 .....	77
习题 .....	78
<b>第十章 稳恒磁场 .....</b>	<b>84</b>
§ 10 - 1 稳恒电流 .....	84
一 电流和电流密度 .....	84
二 电流密度与载流子漂移速度的关系 .....	86
三 电流的连续性方程 .....	87
四 欧姆定律的微分形式 .....	88
§ 10 - 2 磁场 磁感应强度 .....	89
一 磁场 .....	89
二 磁感应强度 .....	90
三 运动电荷的磁场 .....	91
四 毕奥 - 萨伐尔定律 磁场叠加原理 .....	93
五 毕奥 - 萨伐尔定律的应用 .....	94
§ 10 - 3 安培环路定理 .....	98
一 磁通量 磁场高斯定理 .....	98
二 安培环路定理 .....	100

三 安培环路定理的应用 .....	102
§ 10 - 4 洛伦兹力 .....	106
一 磁场对运动电荷的作用力 .....	106
二 带电粒子在均匀磁场中的运动 .....	107
三 霍尔效应 .....	109
§ 10 - 5 安培力 .....	111
一 安培力 .....	111
二 两无限长平行载流直导线间的相互作用力 .....	113
§ 10 - 6 载流导线在磁场中受到的磁力矩 .....	114
一 定轴转动磁力矩的一般计算 .....	114
二 载流线圈在均匀磁场中受到的磁力矩 .....	115
内容提要 .....	117
习题 .....	118
第十一章 磁场中的磁介质 .....	127
§ 11 - 1 磁介质对磁场的影响 .....	127
一 磁介质对磁场的影响 .....	127
二 磁介质的磁化 .....	128
三 有磁介质存在时的安培环路定理 .....	129
§ 11 - 2 铁磁质 .....	132
一 铁磁质的磁化特性 .....	132
二 铁磁质的分类 .....	134
三 磁畴理论 .....	134
内容提要 .....	135
习题 .....	135
第十二章 电磁感应 .....	137
§ 12 - 1 电动势 .....	137
§ 12 - 2 电磁感应定律 .....	140
一 楞次定律 .....	140
二 法拉第电磁感应定律 .....	141
三 感应电流和感应电量 .....	145
§ 12 - 3 动生电动势 .....	145
一 动生电动势 .....	146
二 动生电动势的解释 .....	147

---

三 动生电动势与能量转换 .....	150
§ 12 - 4 感生电动势 有旋电场 .....	152
§ 12 - 5 自感 .....	155
§ 12 - 6 互感 .....	158
§ 12 - 7 磁场的能量 .....	162
一 自感的磁能 .....	162
二 磁能密度 .....	163
内容提要 .....	165
习题 .....	167
第十三章 电磁场 .....	176
§ 13 - 1 位移电流 .....	176
§ 13 - 2 麦克斯韦方程组 .....	181
内容提要 .....	183
习题 .....	184
附录 .....	185
常用物理量 .....	185
电磁学的量和单位 .....	186
习题解答 .....	187

电磁现象是基本的自然现象,电磁相互作用是自然界四种基本相互作用之一,电磁学是研究电磁作用的规律的学科.人类注意到电磁现象并对其规律进行研究已经有几千年的历史了.早在公元前6世纪希腊学者就已经观察到用布摩擦过的琥珀能吸引轻微的物体.在我国,最早是在公元前4到3世纪战国时期就发现了天然磁石有指向的作用.16世纪末,吉尔伯特对电和磁做了较仔细的观察和比较,并创造了 electricity(电)这个字.1747年富兰克林发现了正电荷和负电荷及电荷守恒定律.1785年库仑开始定量地研究电荷之间的相互作用.其后通过泊松、高斯等人的研究形成了静电场理论.伽伐尼于1786年发现了电流,伏特1800年发明了电池,后经欧姆、法拉第等人的不断研究最终确定了关于电流的定律.在历史上一段较长的时间里,人们一直认为电现象和磁现象是两种不同的自然现象.直到1820年奥斯特发现了电流的磁效应,安培、毕奥、萨伐尔、拉普拉斯等人很快作了进一步定量研究从而确定了电流产生磁性的基本规律.特别是1831年法拉第发现了有名的电磁感应现象,并提出了场的概念,进一步揭示了电与磁的联系.在这样的基础上,麦克斯韦集前人之大成,加上他极富创见的关于感生电场和位移电流的假说,建立了完整的电磁场理论.至此,人类才最终认识到电现象和磁现象是内在统一的.

电磁学介绍宏观电磁场的基本规律.我们将遵从电磁学发展的历史,先介绍静电场的描述方法、计算方法以及静电场的特点;其后我们将介绍稳恒磁场及其特点;最后介绍电磁感应和电磁场统一的基本理论.

# 第八章 静电场

## §8-1 电荷 电荷守恒 库仑定律

### 一 电荷与电荷守恒

实验发现,自然界的电荷分为两种——正电荷和负电荷.根据现代物理学关于物质结构的理论,我们知道构成物体的最小单元——原子是由原子核和电子所构成的.将电子束缚在原子核周围的力是电磁相互作用力.因此,我们规定电子是带负电荷的粒子,而原子核中的质子是带正电荷的粒子.宏观物体失去电子会带正电(即正电荷),物体获得额外的电子将带负电(即负电荷).

物体带电的多少或参与电磁相互作用的强弱叫电荷的电荷量,电荷量的单位是库仑(C).1 C的电荷量规定为1 A的电流在1 s的时间内流过导线横截面的电荷量,即: $1\text{ C} = 1\text{ A} \cdot 1\text{ s}$ .电荷量是标量,有大小和符号.

实验指出,对于一个系统,如果没有净电荷出入其边界,则该系统的正、负电荷的电荷量的代数和将保持不变,这个自然规律就叫电荷守恒定律.现代物理学的很多实验都证明了电荷守恒定律.例如,一个高能光子受到一个外电场影响时,该光子可以转化为一个正电子和一个负电子(这叫电子对的产生),其转化前后的电荷量的代数和都为零;而一个正电子和一个负电子相遇时就会湮没成光子,前后的电荷量代数和仍然为零.

实验证明一个电荷的电荷量与它的运动状态无关.这叫做电荷的相对论不变性.这个结论告诉我们不同的参考系对同一个电荷的电荷量的描述是完全一样的.

### 二 电荷的量子性

实验证明,在自然界中,电荷的电荷量总是以一个基本单元的整数倍出现,电荷的这个特性叫做电荷的量子性.电荷的基本单元(元电荷)就是一个电子所带电荷量的绝对值: $1e = -1.602 \times 10^{-19}\text{ C}$ ,任何物体所带电荷量一定是元电荷的正负整数倍.微观粒子所带的元电荷的数目(正整数或负整数)也叫做它们各自的电荷数.现代物理学理论认为微观粒子中的强子是由若干种夸克或反夸克组成,而夸克或反夸克带有 $\pm \frac{1}{3}$ 或 $\pm \frac{2}{3}$ 的电荷量.然而,粒子物理学本身要求夸克不能单独存在,高能物理实验目前也没有发现自由的夸克.夸克的存在

与否都不会影响电荷的量子性这一科学结论的成立。

由于电磁学理论主要是讨论宏观电磁现象,所涉及电荷数通常是元电荷的许多倍。从微观上看,这些元电荷离散地分布在物体内部。但从宏观上看,可以认为电荷连续地分布在带电物体上,而忽略电荷的量子性所引起的微观起伏。犹如宏观上看到的水是连续的,而微观上我们知道水是由一个个水分子组成的,水分子之间是有空隙的。宏观上对电荷的这种连续性处理非常有利于使用微积分方法来计算电场。

在后面的分析中经常用到点电荷这一概念。点电荷是一个理想模型,它是一个没有形状和大小而只带有电荷的物体。当一个带电体本身的线度比所研究的问题中涉及的距离小很多时,该带电体的形状对所讨论的问题没有影响或其影响可以忽略,该带电体就可以看作一个带电的点,即点电荷。点电荷是一个相对的概念,至于带电体的线度比相关的距离小多少时它才能当作点电荷,要看问题所要求的精度而定。在宏观意义上讨论电子、质子等带电粒子时,完全可以把它们视为点电荷。

### 三 库仑定律

法国物理学家库仑利用扭秤实验直接测定了两个带电球体之间的相互作用的电力(或叫库仑力)。在其实验的基础上,库仑确定了两个点电荷之间相互作用的规律,即库仑定律。它可以表述为:在真空中,两个静止的点电荷之间的相互作用力的大小与它们电荷量的乘积成正比。与它们之间距离的平方成反比;作用力的方向沿着两点电荷的连线并且同号电荷相互排斥,异号电荷相互吸引。

如图 8 - 1 所示,有两个点电荷,其电荷量分别为  $q_1$  和  $q_2$ , 设矢量  $\mathbf{r}$  由  $q_1$  指向  $q_2$ , 则  $q_2$  所受的库仑力为:

$$\mathbf{F}_2 = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{e} \quad (8 - 1)$$

式中  $r$  是矢量  $\mathbf{r}$  的大小即两个点电荷之间的距离,  $\mathbf{e}$  是矢量  $\mathbf{r}$  的单位矢量, 即  $\mathbf{e} = \mathbf{r} / r$ 。而  $k$  为比例系数, 可由实验确定, 其数值和单位取决于上式中各量的单位, 在国际单位制中:

$$k = 8.98755 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \quad (8 - 2)$$

通常在练习题的计算中取它的近似值  $k \approx 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$ 。

在电磁学大量的公式中都会出现  $\frac{1}{4\pi k}$  这个因子, 为了方便, 我们把这个因子定义为一个新的常数并用  $\epsilon_0$  来表示它, 即

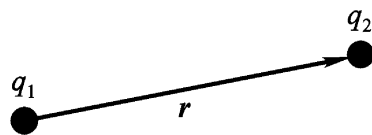


图 8 - 1 点电荷之间的库仑力

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$$

$\epsilon_0$  叫做真空介电常量, 或真空电容率, 它是电磁学的一个基本物理常数. 用  $\epsilon_0$  代替  $k$  后, 注意到  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ , 因而库仑定律的数学表达式改写为:

$$\mathbf{F}_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{e}_r \quad (8-3)$$

从库仑定律的数学表达式可以看出, 当  $q_1$  和  $q_2$  同号时其乘积大于 0,  $q_2$  的受力方向与  $\mathbf{r}$  同向表示排斥力, 反之则是吸引力. 因此, 上面的数学表达式不仅表示了库仑力的大小而且也表示了库仑力的方向. 由 (8-3) 式同样可求  $q_1$  受到的库仑力  $\mathbf{F}_1$ , 可知库仑力仍然满足牛顿第三定律, 即作用力与反作用力大小相等方向相反.

近代物理学实验证明库仑定律在两个点电荷的距离很大或很小时都是成立的, 这说明库仑力是一种长程力. 可以认为  $r$  在 0 到  $\infty$  的范围内, 库仑定律都成立.

## §8-2 电场 电场强度及其计算

### 一 电场的概念

在上一节中我们知道, 两个点电荷之间存在着相互作用的库仑力. 深入分析这种力与经典力学中其它力如弹力、张力的差别, 对掌握电磁理论具有重要的意义. 例如, 力学中物体受绳子的拉力时, 绳子与物体是有接触的; 一根木棒顶着一个重物, 物体所受的支持力也是因为它与木棒有接触. 而一个电荷对另一个电荷的库仑力, 则是在两个电荷没有接触的情况下发生的. 在早期, 人们把这种没有接触就发生的相互作用叫超距作用. 当用超距作用的观点来解释电磁现象时会遇到困难. 为了克服这个困难, 法拉第最早提出了场和力线的概念试图解决电荷间相互作用力的传递问题. 其基本的观点是; 电荷与电荷之间的相互作用不是超距离的, 而是近距离的; 一个电荷之所以对另一个电荷有作用力是因为电荷要产生一个场, 当其它电荷处于这个场中时这个场就对其有作用力, 如下框图所示. 电荷作为电场的源, 常称为场源电荷. 法拉第的这个观点, 完全为其后的科学实验和理论所证实.

如果电荷是静止的,则空间就只有电荷产生的电场,称为静电场,本章我们只讨论静电场.进一步的研究表明:静电场是由电荷产生或激发的一种物质,静电场对处于其中的其它电荷有作用力,经典物理学中没有自作用的概念,某个电荷所激发的静电场对这个电荷本身没有作用力,我们所谈到的作用力都是指对处于其场中的其它电荷的作用力.

根据静电场的观点,我们所观察到的两个电荷之间的相互作用力实质上是电场对电荷的作用力,库仑力不再是一个恰当反映实际的概念.因此,我们将用电场力来称呼电荷在电场中所受的力.

场是现代物理学中的重要概念.现代物理学认为自然界中的万事万物都是由各种各样的场组成的,粒子和场是等价的.但在经典物理学中场与粒子是有区别的.在经典物理学看来,场具有空间兼容性,即不同的场可以同时存在于同一个空间区域内.而粒子是具有空间排斥性的,即不同粒子不能同时占据同一空间区域.场的空间兼容性将导致场的可叠加性,我们将在后面予以介绍.

静电场概念的提出,同时也就提出了如下问题:电荷以什么样的规律产生电场?电场作用于其它电荷的力该怎么计算?静电场有什么样的特点?回答这些问题就是本章后面部分的任务.

## 二 电场强度

要从理论上研究静电场的性质和特点,首先应该定义一个物理量来定量描写静电场.众所周知,描写一个事物要抓住事物的特点.静电场的一个特点是它对场中的其它电荷有作用力.我们将抓住这个特点来定义描写电场的物理量——电场强度.

设有这样一种电荷,它满足:(1) 体积足够小,可以看成是点电荷,以至于可以把它放到电场中的某一个点(称为场点)上去测试它受到的电场力;(2) 电荷量足够小,以至把它放进电场中对原来的电场几乎没有影响.这种电荷叫做试验电荷(常用  $q_0$  表示).当我们将试验电荷放进电场来测量它所受的电场力时我们会发现如下的结果:(1) 在同一个电场中不同的地方其受力大小和方向一般不同(如图 8-2 所示),这说明电场是有强弱分布的,并且有方向性,它表明描写电场的物理量应该是一个矢量;(2) 在同一个电场中的同一点处试验电荷受力  $F$  的大小是与其电量  $q_0$  成正比的,这个结果表明试验电荷的受力与其电荷量之比是一个与试验电荷无关、只与考察点处电场特性有关的量.因此,我们定义

图 8-2 试验电荷在  
电场中的受力

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} \quad (8-4)$$

叫电场的电场强度(简称为场强)。在国际单位制中,电场强度的单位是伏特每米,符号为  $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ ,也可以用牛顿每库仑( $\text{N} \cdot \text{C}^{-1}$ )表示。从上面的定义式,我们可以知道电场强度的物理意义是:单位正电荷所受到的电场力。例如:某电场中的某点处的场强大小为  $5 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ ,则一个单位的正电荷在该点处所受到的电场力的大小为  $5 \text{ N}$ ,电场力的方向就是该点处场强的方向。

### 三 电场力及其计算方法

如前所述,当一个电荷处于某一个电场中时,电荷就要受到力的作用。如果电场的场强为已知,根据场强的物理意义我们非常容易计算电荷受到的电场力,现讨论如下。

若一个点电荷  $q$  处于某电场中,所在点处的场强为  $\mathbf{E}$ ,则该点电荷所受到的电场力为:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} \quad (8-5)$$

若有一个点电荷系处于某电场中(如图 8-3 所示),其电场力该怎样计算呢?显然在电场中不同地方的点电荷,其所在位置处的场强是不同的。设  $q_1$ 、 $q_2$ 、 $q_3$ 、 $q_4 \dots$  等所在位置处的场强分别为  $\mathbf{E}_1$ 、 $\mathbf{E}_2$ 、 $\mathbf{E}_3$ 、 $\mathbf{E}_4 \dots$  则有:

$$\mathbf{F} = q_1 \mathbf{E}_1 + q_2 \mathbf{E}_2 + q_3 \mathbf{E}_3 + q_4 \mathbf{E}_4 + \dots = q_i \mathbf{E} \quad (8-6)$$

即:点电荷系所受的电场力等于各个点电荷所受电场力的矢量和。在这里没有考虑点电荷系内部的电荷之间的电场力。

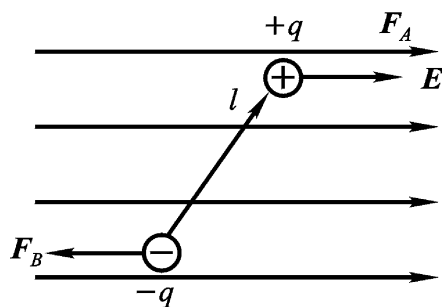


图 8-3 多个点电荷处在电场中所受到的电场力

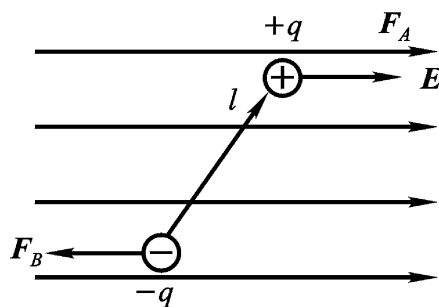


图 8-4 例 8-1 图 电偶极子在电场中受力

两个靠得很近的等量异号的点电荷所组成的点电荷组叫电偶极子。电偶极子的电矩(也叫电偶极矩)的大小等于电偶极子的电荷量乘以它们之间的距离,方向由负电荷指向正电荷,即:

$$\mathbf{p} = q\mathbf{l} \quad (8-7)$$

电偶极子是一种很基本、很重要的电荷分布。

**例 8.1** 试求电矩为  $\mathbf{p} = q\mathbf{l}$  的电偶极子(图 8 - 4)在均匀电场  $\mathbf{E}$  中所受电场力的合力和力矩 .

解: 根据(8 - 6)式, 在均匀外电场中电偶极子的正、负电荷(假设分别位于  $A$ 、 $B$  两点)所受的电场力分别为

$$\mathbf{F}_A = + q\mathbf{E}, \mathbf{F}_B = - q\mathbf{E}$$

由于是在均匀电场中, 正、负电荷所受电场力大小相等、方向相反, 是一对力偶 . 故合力

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_A + \mathbf{F}_B = 0$$

它们的力偶矩的大小为

$$M = |\mathbf{F}_A| l \sin \theta = qlE \sin \theta = pE \sin \theta$$

不难看出, 力矩的方向总是力图使电偶极子的电矩  $\mathbf{p}$  转到电场  $\mathbf{E}$  的方向, 写成矢量形式则为

$$\mathbf{M} = \mathbf{p} \times \mathbf{E}$$

如果是一个连续带电体处于某一个电场中, 其电场力的计算就必须使用微积分方法 . 如图 8 - 5 所示, 我们可以将带电体分成无限多个无限小的电荷元, 用  $dq$  表示 . 虽然电荷元有各种各样的选取方法(后面有更详细的介绍), 但理论上讲它总是可以选取为点电荷的 . 我们任取一个点电荷作为电荷元  $dq$ , 它所受的静电力为:

$$d\mathbf{F} = dq \cdot \mathbf{E}$$

我们将所有电荷元所受静电力求和, 即得连续带电体所受的静电力 . 这种无限多个无限小量的求和就是积分, 即:

$$\mathbf{F} = \int_V d\mathbf{F} = \int_V dq \cdot \mathbf{E} \quad (8 - 8)$$

上面所讨论的是计算连续带电体所受静电力的思想方法, 当我们将这个积分进行实际计算时还必须考虑积分变量的选取和积分的相关技巧, 下面介绍几种典型情况下积分的处理方法 .

### (1) 带电体上的电荷呈体分布的情况

如果电荷分布在一个体积内, 我们称之为电荷是体分布的 . 常用于描写电荷体分布的物理量是电荷体密度, 即单位体积内的电荷量, 用  $\rho$  表示 . 此时, 电荷元  $dq$  可以表示为:

$$dq = \rho dV$$

式中  $dV$  表示电荷元所占据的体积元 . 代入(8 - 8)式, 可知静电力的积分是一个体积分

$$\mathbf{F} = \int_V \rho dV \cdot \mathbf{E} \quad (8 - 9)$$

积分的范围是电荷所分布的体积 .

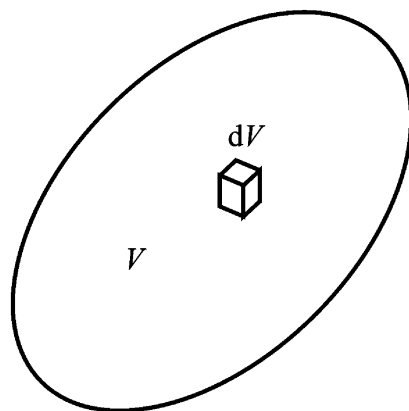


图 8 - 5 在连续带电体上选取的点电荷元

## (2) 带电体上的电荷呈面分布的情况

如图 8 - 6 所示,当电荷是分布在某一个曲面上时,我们称之为电荷是面分布的.真实的面分布在实质上都是体分布,但如果电荷分布很薄,其厚度在所讨论的问题中可以被忽略,则可以把它作为面分布处理.用于描写电荷面分布的物理量是电荷面密度,即单位面积上的电荷量,用符号  $\sigma$  表示.在这种情况下,我们只需要对带电面进行无限分割,所得到的电荷元与一个面积元相对应,

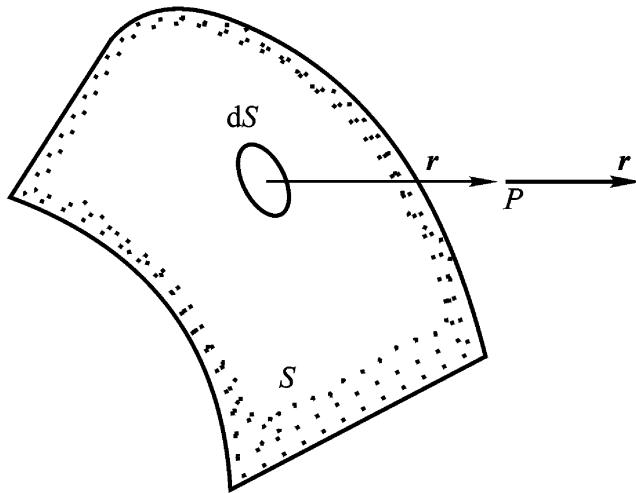


图 8 - 6 电荷面分布

即:

$$dq = \sigma dS$$

这里  $dS$  表示电荷元所对应的面积元.将电荷元的这个表达方式代入(8 - 8)式,则得静电力的计算式为:

$$\mathbf{F} = \int_S dS \cdot \mathbf{E} \quad (8 - 10)$$

从上式可以看出,在这种情况下静电力的积分是一个面积分.

## (3) 带电体上的电荷呈线分布的情况

有时电荷分布在一个细长的物体上,如图 8 - 7 所示.在这种情况下,通常可以忽略带电体的粗细而只考虑其长度,而不会对所讨论的问题产生影响,此时的带电体即是呈线分布的.用于描写电荷线分布的物理量是电荷线密度,即单位长度上的电荷量,用符号  $\lambda$  表示.在这种情况下,我们选取的电荷元一定与一个线元相对应,即:

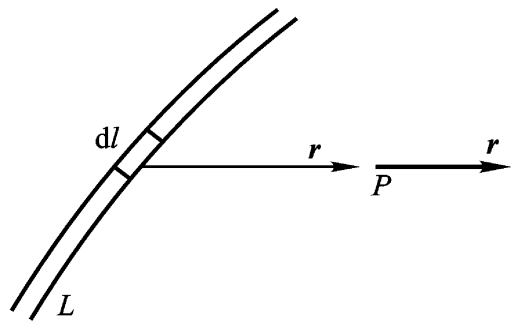


图 8 - 7 电荷线分布

$$dq = \lambda dl$$

这里  $dl$  表示电荷元所对应的线元的长度.将电荷元的这个表达方式代入

(8 - 8) 式, 则得线分布电荷静电力的计算式

$$\mathbf{F} = \int_L d\mathbf{l} \cdot \mathbf{E} \quad (8 - 11)$$

这是一个线积分. 值得注意的是, 上面所讨论的三种情况下的积分都是定积分, 都有相应的积分范围, 在具体应用的时候应注意这一点.

## 四 点电荷产生的电场与场强叠加原理

### (1) 点电荷产生的电场

点电荷产生电场的规律可以通过库仑定律直接得到. 如图 8 - 8 所示, 一个静止的点电荷  $q$  在其周围产生电场, 设场点  $P$  相对于  $q$  的位置矢量为  $\mathbf{r}$ , 简称矢径. 现在假设有一个试验电荷  $q_0$  处于  $P$  点, 根据库仑定律, 试验电荷  $q_0$  所受的电场力为

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2} \mathbf{e}_r$$

于是根据场强的定义我们可以得到

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{e}_r \quad (8 - 12)$$

上式给出点电荷场中任意一点的场强的大小和方向, 称作点电荷场强公式, 从中可以看出点电荷产生电场的规律. 由上式可知, 若  $q > 0$ , 则  $\mathbf{E}$  与  $\mathbf{r}$  同向, 即在正点电荷周围的电场中, 任意一点的场强沿该点的矢径方向 (见图 8 - 8(a)); 若  $q < 0$ , 则  $\mathbf{E}$  与  $\mathbf{r}$  反向, 即在负电荷周围的电场中, 任意点的场强沿该点矢径的负方向 (见图 8 - 8(b)). 上式还说明点电荷的电场具有球对称性, 即在以  $q$  为球心的同一球面上各点场强大小相等, 方向均与该球面正交. 在各向同性的自由空间内, 一个本身无任何方向特征的点电荷的电场分布必然具有这种对称性.

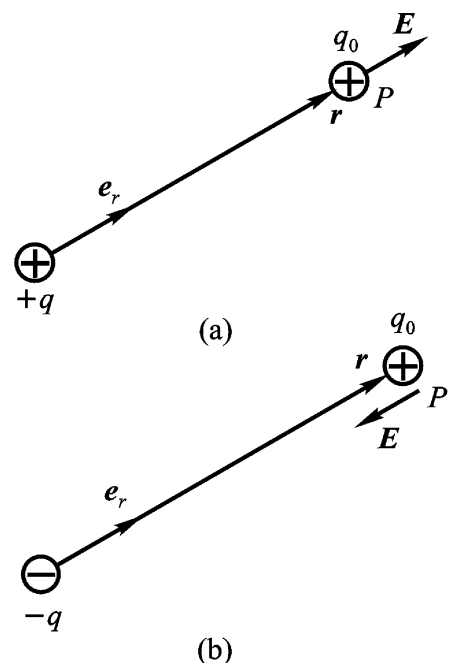


图 8 - 8 静止点电荷的电场

### (2) 电场强度的叠加原理

一般来说, 在某一个空间可能存在由许多个点电荷组成的点电荷系, 为了计算点电荷系的电场强度, 下面我们先介绍电场强度叠加原理.

库仑定律只讨论了两个静止点电荷之间的作用力, 当考虑两个以上的静止点电荷之间的作用时, 就必须补充另一个实验事实: 两个点电荷之间的作用力并不因第三个点电荷的存在而有所改变. 因此, 两个以上的点电荷对一个点电荷

的作用力等于各个点电荷单独存在时对该点电荷的作用力的矢量和,这个结论表明静电力遵从力的叠加原理.图 8-9 表示了两个点电荷  $q_1$  和  $q_2$  对第三个点电荷  $q_0$  的作用力的叠加情况.设电荷  $q_1$  和  $q_2$  单独作用在电荷  $q_0$  上的作用力分别是  $\mathbf{F}_1$  和  $\mathbf{F}_2$ ,它们共同作用在  $q_0$  上的力  $\mathbf{F}$  就是这两个力的合力,即

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

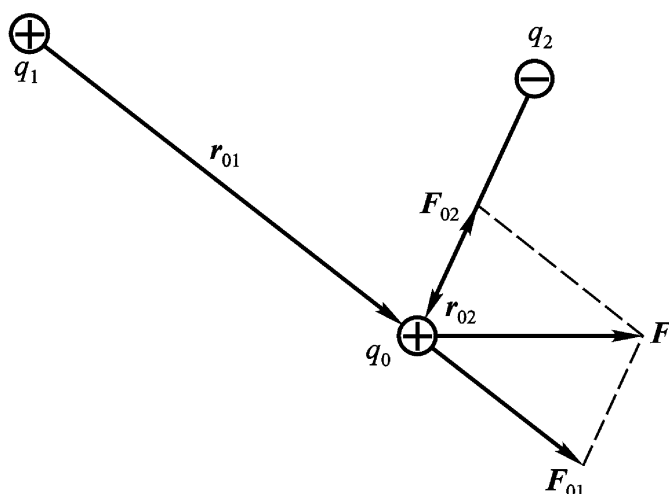


图 8-9 静电力的叠加

对于由  $n$  个点电荷  $q_1, q_2, \dots, q_n$  组成的点电荷系,若以  $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \dots, \mathbf{F}_n$  分别表示它们单独存在时各自对点电荷  $q_0$  作用的力,则按照电场的概念, $q_0$  受到的总静电力可以认为是点电荷  $q_1, q_2, \dots, q_n$  组成的电荷系在该点的总电场所产生的电场力.据此我们可以认为,多个点电荷同时在某一点处产生的电场可以用一个总电场来代替.根据电场强度的定义式,我们可以得到这个总电场的场强为

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{\mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \dots + \mathbf{F}_n}{q_0} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \dots + \mathbf{E}_n \quad (8-13)$$

即多个点电荷在某点处激发的总电场的电场强度等于各个点电荷单独存在时在该点激发的电场强度的矢量和.上述结论虽然是从点电荷系得出的,但显然容易推广到更一般的情况并得出如下普遍的结论:任意带电体系所激发的电场中某点的电场强度,等于该体系各个部分单独存在时在该点激发的电场强度的矢量和,这就是电场强度的叠加原理.

### (3) 点电荷系产生的电场

根据电场强度叠加原理,点电荷系所产生的总电场的场强应等于各个点电荷产生的场强的矢量和.对于包含  $n$  个点电荷的点电荷系,第  $i$  个点电荷  $q_i$  在场点  $P$  产生的场强为

$$\mathbf{E}_i = \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i^2} \mathbf{e}_i$$