

高等学校试用教材

电 磁 学

陈 鹏 万 编

人 民 教 育 出 版 社

高等学校试用教材

电 磁 学

陈鹏万 编

人民教育出版社

044624

电 磁 学

陈鹏万编

*

人民教育出版社出版

新华书店上海发行所发行

上海中华印刷厂印装

*

1978年3月第1版 1980年1月第3次印刷

书号 13012·0129 定价 0.74元

序

本书是以编者在山东大学的自编讲义为基础,根据1977年秋在苏州召开的高等学校理科物理教材会议上通过的电磁学教材编写大纲修改而成的。

全书共分十一章,约二十二万字左右,供70—90学时讲授使用。书中以静电学的基本原理、直流电的基本定律、真空中稳定电流的磁场、电磁感应及交流电路等五部分为重点。全书均采用国际单位制,最后一章还介绍了高斯单位制及其与国际单位制间的换算,供学习参考。为了照顾各类学校的不同需要,某些章节打有“*”号,某些内容用小字排印,所有这些机动章节,读者可以根据具体情况选用或参考。为了便于启发学生思维和巩固所学内容,在每章之后附有思考题与习题。

在本教材的审稿会上,承南京大学(主审)、武汉大学、厦门大学、兰州大学、中山大学、北京师范大学、华南师范学院、华中师范学院等院校的同志参加审查讨论,提出了很多建设性的意见,促进了编写质量的提高。谨此表示感谢。

由于编者水平所限,时间又比较仓促,书中一定还有很多缺点与错误,希望读者批评指正。

编 者

1978年3月

引 言

电磁学(简称电学)的研究对象,就是电磁现象所具有的特殊矛盾性。人们通过对电磁现象的长期观察、分析和归纳,总结出有关电磁现象的基本规律。它的主要内容可以分为三类:(1)有关静电场、稳定电流的磁场、似稳场与迅变场等几类电磁场的基本概念和基本规律;(2)直流与交流电路的基本规律和解决这些电路问题的基本方法;(3)电、磁场与物质的相互作用,包括电介质的极化与磁介质的磁化,电、磁介质对电、磁场的影响,以及金属、电解质及气体在不同条件下的导电现象。当然这三者是密切联系的。例如,常常要用各种电路来产生场,同时,电路中的一些规律归根到底又都是电磁场对物质的作用。通过物质的导电现象,可以进一步研究电磁场的性质,反之,要说明这些导电现象,又必须用到电磁场的基本规律。由此可以看出,电磁场和电路,是电磁现象中互相联系的两个方面。在电磁学中,以第一、第二两类内容为重点,而对第三类只作定性的讨论。

与其他学科一样,电磁学也导源于人类的生产活动,并随着生产的发展而逐步完善起来。人们对于电磁现象的认识,也是一步一步由低级向高级发展,由浅入深,由片面到更多的方面。

根据记载,在二、三千年前,人们就已有电与磁的原始知识,例如那时就已认识了摩擦起电等静电现象。在我国战国末年就发现了磁铁矿吸铁的现象,后来将它用于指南针及航海等等。但是由于长期生产力的停滞,电磁学发展十分缓慢,直到1819年奥斯特发现电流的磁场以前,还只积累了一些静电与静磁的初步知识,而且电学与磁学这两门科学是彼此完全孤立地发展的。到了十九

世纪,由于生产的迅速发展,电磁学也获得了重要的进展。在这个时期内,除了发现电流的磁效应外,在1831年法拉第等人发现了电磁感应现象的规律,使人们对电磁现象的内在联系有了进一步的认识,并使大量利用电能成为现实,例如在第二年就出现了第一台原始的直流发电机。到十九世纪八十年代,麦克斯韦在总结前人工作的基础上,把电磁学规律归纳成对迅变电磁场也适用的方程组,确立了电荷、电流与电场、磁场之间的普遍联系,并预言了电磁波的存在,建立了光的电磁理论,从而把光现象与电磁现象统一起来,同时也促进了微波及无线电技术等的发展。但是把这方程组推广到微观领域时,又遇到了不可克服的困难。微观领域中的电磁现象需要用量子电动力学来处理,而电磁学则是宏观场的理论。

现在,电能已愈来愈广泛地应用到我国的工业、农业、国防、交通运输和日常生活等各方面。另外如人造卫星的遥测、遥控、原子能发电、电子显微镜、双水内冷汽轮发电机、电子计算机、等离子喷枪及高压氙弧灯以及在生产与科研中遇到的电路与电器等等,都用到了有关电磁学的基本原理。我国的电磁科学与技术正在三大革命运动中日益发挥着作用。

毛主席告诉我们:“自然科学是人们争取自由的一种武装。人们为着要在社会上得到自由,就要用社会科学来了解社会,改造社会进行社会革命。人们为着要在自然界里得到自由,就要用自然科学来了解自然,克服自然和改造自然,从自然里得到自由。”我们学习电磁学的目的,也就是正确认识电磁现象,很好地掌握并运用电磁现象的规律为三大革命运动服务,促进我国农业、工业、国防和科学技术的现代化。

目 录

引言	3
----------	---

第一章 静电学的基本原理

§ 1.1 库仑定律	1	§ 1.6 静电场强与电势间的关系	27
§ 1.2 电场强度	5	思考题	32
§ 1.3 高斯定理	12	习题	33
§ 1.4 静电场力所作的功	19		
§ 1.5 电势能 电势差与电势	22		

第二章 静电场中的导体

§ 2.1 静电场中导体的基本性质	37	*§ 2.4 静电计 静电感应起电机	52
§ 2.2 导体空腔	41	思考题	54
§ 2.3 电容器 电容器的串联和并联	47	习题	55

第三章 电介质中的静电场

§ 3.1 电介质的极化 电极化矢量	57	§ 3.4 静电场的能量	71
§ 3.2 电介质中的场强	64	§ 3.5 静电的应用	74
§ 3.3 介质中的高斯定理 电位移矢量	66	思考题	76
		习题	76

第四章 直流电的基本定律

§ 4.1 欧姆定律	78	§ 4.4 电动势	91
§ 4.2 金属导电的经典电子论解释	87	§ 4.5 基尔霍夫定律	98
§ 4.3 电功和电功率	89	思考题	104
		习题	105

第五章 金属、电解质和气体中的一些电现象

§ 5.1 脱出功及热电子发射	111	的极化	119
§ 5.2 接触电势差	113	*§ 5.5 气体导电	122
§ 5.3 温差电现象及其应用	114	思考题	127
*§ 5.4 电解质导电 电极		习题	128

第六章 真空中稳定电流的磁场

§ 6.1 磁场 磁感应强度矢量	129	§ 6.5 安培定律	150
§ 6.2 毕奥-萨伐尔定律	134	§ 6.6 电荷在磁场中的运动	154
§ 6.3 磁感应通量 磁感应线 的闭合性	141	§ 6.7 霍耳效应	159
§ 6.4 磁场环路定律	144	思考题	162
		习题	163

第七章 物质的磁性和磁介质中的磁场

§ 7.1 磁介质的磁化 磁化 强度矢量	169	§ 7.4 磁荷观点	183
§ 7.2 磁介质中的总磁场 磁 介质中的环路定律	171	* § 7.5 磁路定理	186
§ 7.3 铁磁性	176	思考题	189
		习题	189

第八章 电磁感应

§ 8.1 电磁感应定律	191	振荡电路	214
§ 8.2 自感与互感现象	198	§ 8.6 灵敏电流计及冲击 电流计原理	220
§ 8.3 磁场的能量	206	思考题	225
§ 8.4 电子感应加速器 涡流	210	习题	226
§ 8.5 电感与电容器的			

第九章 交流电路

§ 9.1 纯电阻、纯电感及纯电容 的交流电路	230	§ 9.6 并联谐振电路	258
§ 9.2 交流电的有效值	235	§ 9.7 交流电路的功率	260
§ 9.3 $R-L-C$ 串联电路	237	§ 9.8 三相交流电	265
§ 9.4 交流电路的矢量图解法	245	§ 9.9 变压器	273
§ 9.5 交流电路的复数解法	250	思考题	275
		习题	276

第十章 电磁场与电磁波

§ 10.1 电磁场 麦克斯韦 方程组	280	及其性质	290
§ 10.2 电磁波的产生		§ 10.3 电磁波理论 坡印亭 矢量	294

第十一章 电磁学单位制

§ 11.1 物理量的单位制 量纲	301	§ 11.3 高斯单位制	308
§ 11.2 国际单位制	303	§ 11.4 单位制的换算	313

第一章 静电学的基本原理

本书前三章都属于静电学的范围，静电学主要研究静止电荷所产生的电场和带电体在静电场中的受力情形及平衡条件。本章主要内容是真空中静电场的基本原理。我们从点电荷间相互作用的库仑定律出发，引入描写静电场的两个基本物理量：电场强度和电势。在这个基础上讨论静电场的两个基本规律——高斯定理及电场强度矢量 E 的环流定律，以及电势与场强的关系。

本章是电磁学中第一次引入场的概念和介绍场的方法，又是学习静电场中的导体、电介质和直流电路等章的基础。在研究磁场时，所用方法也与静电场类似，所以我们应该把本章的内容学好，为今后的学习打下一个良好的基础。

§ 1.1 库 仑 定 律

一、电荷 物质的电结构

人们可以用摩擦或别的方法使物体带电。我们把带电体所带的电叫做电荷，有时候把小的带电体本身简称为电荷。实验指出，电荷有两种，而且只有两种，一种叫正电荷，另一种叫负电荷。总结各类电现象，我们发现电荷既不能产生，也不能消灭，只能从一个物体转移到另一个物体上，这就是电荷守恒定律。这个定律不仅在宏观现象中成立，而且在微观领域中亦成立，它是物理学中最普遍的规律之一。

近代物理学的发展，使我们对带电现象的本质有了进一步的认识。电荷之所以只有两种，是与物质的电结构分不开的。我们知道，各种物质都是由原子组成的，原子是由原子核和核外电子组

成的,而原子核又是由中子和质子组成的. 中子不带电,质子带正电,电子带负电,而且质子和电子所带电量的绝对值相等. 每个原子中,核内的质子数与核外的电子数相等,所以在通常情况下原子呈电中性状态,即不带电,因而整个物体亦表现为不带电. 在某些情况下,如两不同物体相互摩擦,可使一物体失去一些电子而带正电,另一物体得到这些电子而带负电. 物质的电结构表明,电荷的携带者是组成物质的基本粒子(即电子和质子),因而电荷是物质具有的一种属性,它只能随带电的基本粒子(电子、质子)的迁移而迁移. 一般物体的原子核是不易迁移的,所以带电现象通常是由于电子的迁移——从一物体转移到另一物体或者从同一物体的一部分转移到另一部分——而引起的.

二、库仑定律

现在我们从电荷的相互作用来开始研究静电学.

实验指出:带电体之间具有相互作用,这种相互作用和带电体间的距离及电荷的多少有关,也与带电体的大小、形状及电荷在带电体上的分布有关. 但是当带电体本身的几何线度远比带电体间的距离小得多时,在测量的精密范围内,带电体的形状与其上的电荷分布对作用力没有影响,作用力仅仅与带电体间的距离及电荷的多少有关,针对这样的事实,我们引入点电荷的概念. 点电荷与力学中的质点相似,是从实际带电体中抽象出来的. 当带电体的大小和带电体间的距离相比很小时,我们把这种带电体看作是点电荷. 必须指出,点电荷这一概念只有相对的意义,它本身不一定是很小的带电体. 例如:有两个带电体线度皆为 $a \approx 10$ 厘米,若两者相距 $r = 100$ 米,由于 $r \gg a$,这时当我们研究它们之间的电力时,可以把它们当作点电荷来处理;若两者只相距 10 厘米,这时就不能把它们当作点电荷来处理了. 正象在力学中可把任何物体看作质点的集合一样,任何带电体都可以看作是点电荷的集合.

库仑定律就是两个点电荷之间的相互作用定律，它是从实验总结出来的。它的内容是：两个点电荷 q_i 和 q_k 之间的相互作用力 F_{ik} 的大小与电荷 q_i 和 q_k 的乘积成正比，与它们之间的距离 r_{ik} 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。 即

$$F_{ik} \propto \frac{q_i q_k}{r_{ik}^2}$$

把上面的比例关系写成等式，就得

$$F_{ik} = k \frac{q_i q_k}{r_{ik}^2} \quad (1.1)$$

式中 k 为比例系数，它与力 F_{ik} 、距离 r_{ik} 及电量 q_i 、 q_k 所选取的单位有关。

库仑定律 (1.1) 式可以写作矢量的形式，由点电荷 q_i (图 1.1) 至点电荷 q_k 作矢径 $\mathbf{r}_{ik}$ ，它的大小等于 r_{ik} ，即 $r_{ik} \equiv |\mathbf{r}_{ik}|$ ，方向由 q_i 指向 q_k ，则电荷 q_i 作用在电荷 q_k 上的力 $\mathbf{F}_{ik}$ 是

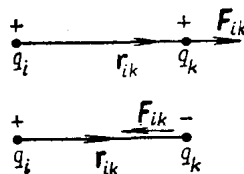


图 1.1 库仑力

$$\mathbf{F}_{ik} = k \frac{q_i q_k}{r_{ik}^2} \mathbf{r}_{ik} \quad (1.2)$$

从上式可知， $\mathbf{F}_{ik}$ 的大小等于 $k \frac{q_i q_k}{r_{ik}^2}$ ，在电荷 q_i 和 q_k 同号时，力和矢径 $\mathbf{r}_{ik}$ 的方向相同，这时两者之间为斥力；在电荷 q_i 和 q_k 异号时，力和矢径 $\mathbf{r}_{ik}$ 的方向相反，这时两者之间是引力。由此可见，不论电荷 q_i 和 q_k 是同号或异号，库仑定律的矢量形式 (1.2) 式都成立，它同时给出了作用力的大小和方向。

必须指出，库仑定律仅仅对两个点电荷才成立。另外，库仑当时的所有测定，都是在空气中进行的，但是严格地讲，库仑定律仅当电荷处于真空中才准确地成立。

前曾指出, 库仑定律(1.1)式中的比例系数 k 所取的数值, 与式中各量所采用的单位有关, 而各量的单位取决于所采用的单位制。本书一律采用国际单位制。国际单位制是一九六〇年第十一届国际计量大会通过的, 其国际代号为 SI, 我国简称为国际制, 其中有关电磁学部分的单位制就是 MKSA 有理制。在这个单位制中, 以长度、质量、时间、电流四个物理量作为基本量, 以米、千克、秒、安培作为基本单位, 其它电磁学量的单位为导出单位, 它们可以根据一定的物理公式或定义导出。

采用 MKSA 有理制, 电量的单位为库仑 (当导线中有 1 安培的稳定电流时, 在 1 秒钟内通过导线横截面的电量定义为 1 库仑, 即 1 库仑 = 1 安 · 秒), 长度的单位为米, 力的单位为牛顿 (中文代号为牛), 在库仑定律 (1.1) 式中的比例系数 k 的数值不能任意确定, 它是一个有数值有量纲的量, 要通过实验来测定, 实验测得

$$k = 9.0 \times 10^9 \text{ 牛} \cdot \text{米}^2 / \text{库}^2$$

在 MKSA 有理制中, 常常将 k 写成

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

的形式, 式中 ϵ_0 称为真空介电常数, 它的数值为

$$\epsilon_0 = 8.9 \times 10^{-12} \text{ 库}^2 / \text{牛} \cdot \text{米}^2 (\text{或法/米})$$

它的量纲为

$$[\epsilon_0] = \frac{[q]^2}{[F][r^2]} = L^{-2} M^{-1} T^4 I^2$$

用这种单位制, 库仑定律(1.2)式可写成如下的形式

$$F_{ik} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i q_k}{r_{ik}^2} \mathbf{r}_{ik} \quad (1.3)$$

§ 1.2 电 场 强 度

一、电场 静电场

由上节得知,电荷与电荷之间有相互作用,这种作用是如何传递的呢?物体间的相互作用必须相互接触或借助于介乎其间的物质才能传递.没有物质,物体之间的相互作用就不可能发生.与此相似,电荷间的相互作用是通过一种特殊的媒介物——电场来作用的.每当电荷出现时,在它的周围就会激发起电场来,任何置于其中的其它电荷都将受到电场对它的作用力.图1.2表示 q_2 在 q_1 激发的场中受力的情形.与观察者相对静止的电荷所产生的电场称为静电场.

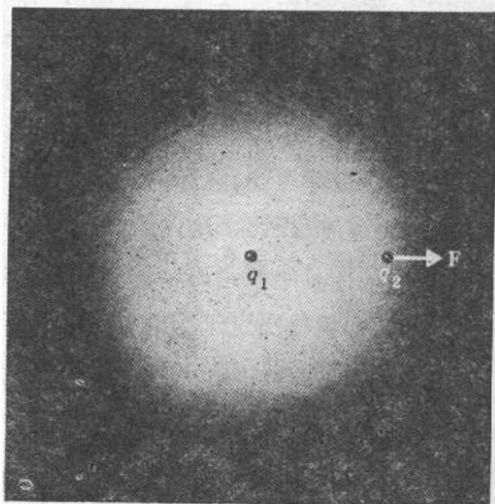


图1.2 电荷 q_1 的场对场中另一电荷 q_2 的力

电荷周围有电场,
这是客观实在,不依
人的意识为转移,并且

它的存在能为人们所反映,所以我们说电场是一种物质.例如我们可以通过 q_k 在 q_i 的场中受到电力来反映 q_i 周围有电场,但是不管 q_k 存在不存在, q_i 周围的电场是客观存在的.在今后的学习中,我们会看到静电场不过是电磁场中的一种特殊情形,而电磁场与实物一样具有质量、能量、动量等等,而且电磁场一经产生就能单独存在,即使产生它的电荷已经消失,它还能继续存在.但是,电磁场(包括静电场在内)究竟不同于实物物质,实物的分子或原

子所占的空间不能同时为另一分子或原子所占据，但是几个电磁场，例如几个电荷产生的静电场，却可以同时占据同一个空间。因此场和实物虽然都是物质，但它们又有区别，是物质存在的两种不同形式。

过去曾认为，电荷之间可以超越空间而即时地、直接地发生作用，即所谓“超距作用”。这种观点不承认场的存在，与场的物质性相违背，所以它是不正确的。

二、电场强度

为了定量描述电场的性质，我们引入试探电荷 q_0 ，它必须是足够微小的点电荷，当它被引入电场后，产生电场的那些电荷的大小和分布情形将不致发生可觉察的变化。

由库仑定律可知，在静电场中作用在某点的试探电荷 q_0 上的电力 $\mathbf{F}$ 与 q_0 成正比，这力的大小和方向由场源电荷的分布与多少所决定。而且实验指出， $\frac{\mathbf{F}}{q_0}$ 与试探电荷 q_0 无关，只与该点的电场有关，即仅仅决定于场源电荷的分布与多少。我们用 $\frac{\mathbf{F}}{q_0}$ 来描写电场的这种物理性质，称为电场强度或简称场强。它是一个矢量，用 $\mathbf{E}$ 表示，即

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} \quad (1.4)$$

如果在上式中令 $q_0 = +1$ ，则 $\mathbf{E} = \mathbf{F}$ 。由此可见，电场中某点的电场强度，在数值上等于放在该点的单位正电荷所受的电力，其方向与正电荷受力的方向一致。

电场强度的单位是牛顿每库仑（中文代号为牛/库，以后会看到，这个单位又可写作伏/米）。

现在我们根据(1.4)式来计算几种特殊情形下的场强。

1. 点电荷的场强。取一点电荷 q ，求距离点电荷为 r 处 P 点的场强。

按库仑定律, 设在距点电荷 q 为 r 处有一试探电荷 q_0 , 则按库仑定律(1.3)式, 作用在 q_0 上的力 F 等于

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

式中 r 是从电荷 q 指向 q_0 . 根据定义, 该点的场强是

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^3} r \quad (1.5)$$

由上式可以看出, 场强 E 只与产生电场的电荷 q 的大小与它到场点的距离有关.

若 q 是正电荷, 则场强的方向是由电荷所在处指向 P 点, 如图 1.3 所示, 若 q 为负, 则 E 自 P 点指向 q .

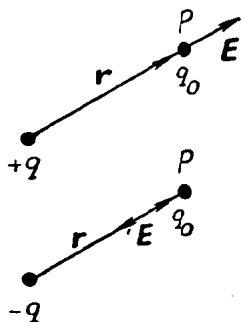


图 1.3 静电场 E 的方向

2. 点荷系的场强、电场强度的叠加原理. 若场强是由若干个电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 所产生的, 这些电荷称为点荷

系, 根据实验结果, 电力也满足力的独立作用原理. 所以作用在场中某点 P 处试探电荷 q_0 上的力 F , 等于各个电荷所产生的力 $F_1, F_2, \dots, F_n$ 的矢量和

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

由(1.4)式得出场强 E 等于

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{F_1}{q_0} + \frac{F_2}{q_0} + \dots + \frac{F_n}{q_0}$$

上式右方各项代表电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 在该点所产生的场强 $E_1, E_2, \dots, E_n$. 所以

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_n = \sum_{i=1}^n E_i \quad (1.6)$$

由此可见，点荷系在某一点所产生的场强，等于每一个点电荷单独存在时在该点分别产生的场强的矢量和。这便是电场的叠加原理。场强的可叠加性，不仅对点电荷系成立，对任意带电系统所产生的电场也是正确的。

利用场强叠加原理和点电荷激发的场强公式(1.5)，我们可以计算任何点荷系的电场分布。

[例题一] 计算电偶极子在中垂线上一点 Q 处产生的场强。

解 电偶极子是两个大小相等符号相反的点电荷 $+q$ 和 $-q$ 所组成的系统，它们间的距离 l 与它们的中心到待测场强处的距离 r 相比很小 ($r \gg l$)。从负电荷到正电荷的矢径 l 称为电偶极子的臂。电荷 q 和臂 l 的乘积定义为电偶极矩，它是一个矢量，用 p 表示

$$p = ql \quad (1.7)$$

如图 1.4，令 Q 点到偶极子中心 O 的距离为 r ，则 $+q$ 和 $-q$ 分别在 Q 处所产生的场强为

$$E_+ = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2 + \frac{l^2}{4}}$$

$$E_- = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2 + \frac{l^2}{4}}$$

它们的量值相等，即 $E_+ = E_- = E$ ，但方向不同，如图中所示。所以在 Q 处的合场强的数值为

$$E_Q = E_+ \cos \theta + E_- \cos \theta = 2E \cos \theta$$

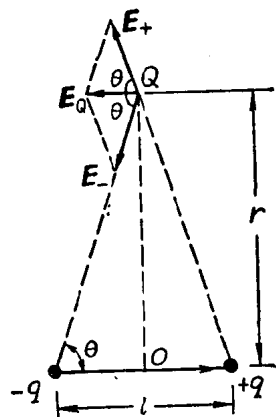


图 1.4 偶极子中垂线上的场强

由图中知

$$\cos \theta = \frac{\frac{l}{2}}{\sqrt{r^2 + \frac{l^2}{4}}}$$

所以

$$E_Q = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ql}{\left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

因为 $l \ll r$, 故 $\left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)^{\frac{3}{2}} \approx r^3$, 所以上式可写为

$$E_Q = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{r^3}$$

E_Q 的方向与 p 相反.

利用场的叠加原理, 可以计算任意带电体所产生的场强. 为此, 我们可把带电体携带的电荷看成许多极小的电荷元 dq 的集合, 每一电荷元 dq 在距离为 r 处所生的场强为

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^3} \mathbf{r} \quad (1.8)$$

其中 $\mathbf{r}$ 是由电荷元所在处指向该点的矢径. 所以整个带电体所产生的场强是

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r^3} \mathbf{r} \quad (1.9)$$

必须指出, 上式虽然写成积分形式, 实际上是矢量和, 通常须分解为 X, Y, Z 方向上的分量, 然后再积分.

前面我们曾引入点电荷这个概念, 它是带电体在一定条件下的抽象. 事实上带电体都有一定的大小及形状, 它的电荷则以一定形式分布于带电体中. 若电荷分布于整个体积中, 这样分布的电荷叫体电荷. 一般说来, 电荷的分布是不均匀的, 为了描述某一点附近电荷分布的情况, 我们引入体电荷密度这个概念. 设在带电体中任一点 O 的附近取一小体积元 dV (图 1.5), 其中所含电量为 dq , 则比值

$$\rho = \frac{dq}{dV} \quad (1.10 a)$$

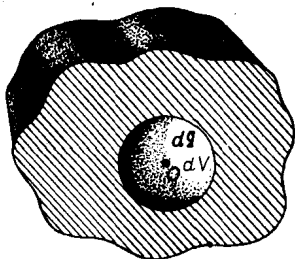


图 1.5 体电荷分布