



21 世纪精品规划教材系列

电 磁 学

DIANCI XUE

主编◎孙丽萍

 吉林大学出版社

21 世纪精品规划教材系列

电 磁 学

主 编 孙丽萍

副主编 杨海兰

主 审 孙福成

 吉林大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电磁学 / 孙丽萍主编. — 长春: 吉林大学出版社,

2016.6

ISBN 978-7-5677-6698-3

I. ①电… II. ①孙… III. ①电磁学—高等职业教育—教材 IV. ①O441

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 133248 号

书 名: 电磁学

作 者: 孙丽萍 主编

责任编辑:李伟华 责任校对:魏丹丹

吉林大学出版社出版、发行

开本:787×1092 毫米 1/16

印张:20 字数:470 千字

ISBN 978-7-5677-6698-3

封面设计:可可工作室

北京市楠海印刷厂印刷

2016 年 6 月 第 1 版

2016 年 8 月 第 1 次印刷

定价:45.00 元

版权所有 翻印必究

社址:长春市明德路 501 号 邮编:130021

发行部电话:0431-89580028/29

网址:<http://www.jlup.com.cn>

E-mail:jlup@mail.jlu.edu.cn

前 言

《电磁学》可作为高等学校物理专业电磁学课程教材,也可供其他专业有关教师、学生参考、本书系统地阐述了电磁现象的基本规律和基本概念,内容较丰富,并收集了较多的习题。全书内容包括:静电场的基本规律、静电场中的导体和电介质、恒定电流、恒定电流的磁场、电磁感应和暂态过程、磁介质、物质中的磁场、交流电、麦克斯韦电磁理论和电磁波等。

本书注重基本概念、基本规律阐述的严谨顺畅,给学生严格的训练,使学生打下比较扎实的基础,又注意引导学生思考、钻研和总结,培养学生的学习能力,使学生具有自学新知识的基础、能力、方法、习惯和勇气。

《电磁学》的特点如下:

1. 在适应课程改革的需要的前提下,在内容叙述上,概念清楚,深入浅出,重点突出。
2. 精选了例题和习题,供学习各章节时使用,以便更好地理解课程内容。
3. 全书由真空中的电磁场、介质中的电磁场和交流电路三个板块组成。三板块相对独立,即使后一板块或后两个板块不学,学生基本上也已掌握了电磁学的最基本的知识和规律以及学习电磁学的基本方法,学生已具备进一步学习电磁场理论或电动力学等其他课程的基础。

4. 本书中加入了介绍电磁学与物理学新进展、物理学与其他自然学科或新技术相关的知识。

本书由孙丽萍任主编,杨海兰任副主编。全书由甘肃畜牧工程职业技术学院孙福成主审。参加编写的有:甘肃畜牧工程职业技术学院孙丽萍(第一、二、三章及全书统稿、校对),甘肃畜牧工程职业技术学院杨海兰(第四、五、六章)。

由于投入时间有限,再加上编者水平有限,书中难免存在疏漏和错误之处,恳请广大读者在使用和阅读过程中,对书中的错误和不足予以关注,并将意见和建议反馈给我们,以便修订时完善。

编 者

目 录

第 1 章 静电学的基本规律 静电场	(1)
1 静电学的基本现象和基本规律	(1)
2 电场 电场强度	(6)
3 电势	(17)
4 高斯定理	(26)
5 静电能	(35)
6 静电场中的导体	(43)
7 静电场的唯一性定理	(54)
8 尖端效应	(55)
9 电容和电容器	(60)
10 静电场的能量	(65)
第 2 章 恒定电流 恒定磁场	(73)
1 恒定电流的闭合性	(73)
2 欧姆定律	(76)
3 固体导电机理简介	(81)
4 电动势和全电路欧姆定律	(84)
5 电路定律	(94)
6 磁的基本现象和基本规律	(98)
7 电流的磁场 磁场强度 毕奥-萨伐尔定律	(103)
8 恒定电流磁场的基本方程式	(112)
9 带电粒子在电场和磁场中的运动	(119)
10 磁场的矢势	(127)
第 3 章 随时间变化的电磁场 麦克斯韦方程	(135)
1 电磁感应现象和电磁感应定律	(135)
2 电磁感应现象的物理实质	(142)
3 互感与自感	(154)
4 LR 电路中的暂态过程 磁场的能量	(158)
5 位移电流及其物理实质	(165)
6 真空中的麦克斯韦方程组 电磁波	(172)
7 电磁场的能量与动量	(181)
8 电磁波的产生 辐射	(183)
9 几种辐射介绍	(189)



第 4 章 物质中的电场	(194)
1 电介质的极化	(194)
2 极化强度和极化电荷	(198)
3 介质中的静电场	(206)
4 铁电体,压电体和驻极体	(211)
5 介质中的高斯定理	(212)
6 电介质中的静电能	(223)
第 5 章 物质中的磁场	(232)
1 顺磁性和抗磁性	(232)
2 磁化强度和磁化电流	(238)
3 介质中的磁场	(244)
4 磁场强度 介质中磁场的基本方程式	(247)
5 铁磁性	(255)
6 超导体简介	(261)
7 介质中电磁场的方程组	(264)
第 6 章 交流电路	(272)
1 简谐交流电的产生和表示方法	(272)
2 交流电路中的元件	(278)
3 电阻、电感、电容串联电路	(284)
4 并联电路的计算	(290)
5 交流电路的功率	(292)
6 谐振电路和品质因数	(295)
7 三相交流电	(299)
参考答案	(307)
参考文献	(314)



第1章 静电学的基本规律 静电场

1 静电学的基本现象和基本规律

1.1 两种电荷 摩擦起电

早在古希腊时代,雕刻玉石的匠人就发现,用毛皮摩擦过的琥珀能吸引羽毛、头发、干草等轻小物体.在我国东汉成书的《论衡》中,也有“顿牟掇芥”的记载.以后相继发现许多材料如玻璃、水晶、硬橡胶、硫黄和火漆等经摩擦后都有吸引轻小物体的能力.物体有了这种吸引轻小物体的性质,就说它带了电,或有了电荷.带电的物体叫带电体,使物体带电叫做起电,用摩擦方法使物体带电叫摩擦起电.

实验指出,两根用毛皮摩擦过的硬橡胶棒互相排斥;两根用绸子摩擦过的玻璃棒也互相排斥;可是,用皮毛摩擦过的橡胶棒与用绸子摩擦过的玻璃棒相互吸引,这表明橡胶棒上的电荷和玻璃棒上的电荷是不同的.实验证明,所有其他物体,无论用什么方法起电,所带的电荷或者与玻璃棒上的电荷相同,或者与橡胶棒上的电荷相同.所以,自然界中只存在两种电荷;而且,同种电荷互相排斥(图 1-1),异种电荷互相吸引.

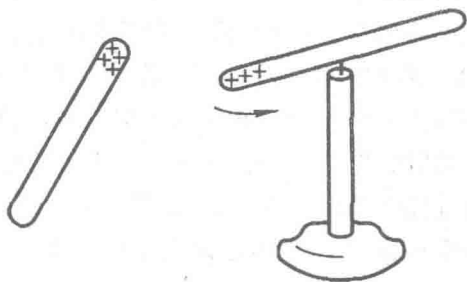


图 1-1 两根带同类电荷的棒相互排斥

物体所带的电荷数量的多少,叫做电荷量,简称电量.正、负电荷互相完全抵消的状态叫做中和.下面我们将从物质的微观结构看到,任何所谓不带电的物体,并不意味着其中根本没有电荷,而是其中具有等量异号的电荷,已致其整体处在中和状态,所以对外界不显电性.

实验证明,摩擦起电还有一个重要的特点,就是相互摩擦的两个物体总是带电的,而且所带的电荷等量异号.

1.2 静电感应 电荷守恒定律

另一种重要的起电方法是静电感应.取一对由玻璃柱支持着的金属体 A 和 B,它们起初



彼此接触,且不带电。

当我们把另一个带电的金属球 C 移近时,将发现 A、B 都带了电,靠近 C 的柱体 A 所带的电荷与 C 异号,较远的柱体 B 带的电荷与 C 同号。这种现象叫做静电感应。如果先把 A、B 分开,然后移去 C,则发现 A、B 上仍保持一定的电荷。最后如果让 A、B 重新接触,它们所带的电荷就全部消失。这表明, A、B 重新接触前所带的电荷是等量异号的。

带电体之间存在相互作用,这种作用表现为相互吸引或相互排斥。实验表明,电荷有两类,同类电荷相互排斥,异类电荷相互吸引。由于只存在两类电荷,我们可以称一类电荷为正电荷,另一类电荷为负电荷。历史上,富兰克林(B. Franklin)最早对电荷的正负做了规定:玻璃与丝绸摩擦后,玻璃所带的电荷为正电荷,凡与它有吸引的电荷为负电荷。直到现在,我们仍沿用富兰克林的规定。存在两类电荷及同类电荷相斥、异类电荷相吸是电荷的基本属性,至于规定哪种电荷为正,哪种电荷为负,完全是任意的,具有一定的历史偶然性。富兰克林的命名法基于正电荷容易从一物体流到另一物体的错误猜测,事实上,容易流动的电荷是电子所带的负电荷。摩擦起电是一个非常复杂的过程。两物体摩擦后带何种符号的电荷是由许多因素决定的,如表面的杂质层、物体的温度、物体表面的光洁程度等。

任何物体,不论固体、液体还是气体,内部都存在正、负电荷。在通常情况下,物体内部正负电荷数量相等,电效应相互抵消,不呈现带电状态。如果由于某种原因,物体失去一定量的电子,它就呈现带正电状态;若物体获得一定量过剩的电子,它便呈现带负电状态。物体的带电过程实质上就是使物体失去一定数量的电子或获得一定数量的电子的过程。

大量实验事实表明,电荷还有一个属性是守恒性,即在任何时刻,存在于孤立系统内部的正电荷与负电荷的代数和恒定不变,这一结论称为电荷守恒定律。电荷守恒定律是一切宏观过程和一切微观过程都必须遵循的基本规律,它在所有的惯性系中都成立,而且在不同的惯性系内的观察者对电荷进行测量所得到的量值都相同。换句话说,电荷是一个相对论性不变量。

由摩擦起电和其他起电过程的大量实验事实表明,一切起电过程其实都是使物体上正、负电荷分离或转移的过程中,在这种过程中,电荷既不能消灭,也不能创生,只能使原有的电荷重新分布。由此就可以总结出电荷守恒定律:一个孤立系统的总电荷(即系统中所有正、负电荷之代数和)在任何物理过程中始终保持不变。所谓孤立系统,就是指它与外界没有任何相互作用的系统,是一种理想状态。电荷守恒定律也是自然界中一条基本的守恒定律,在宏观和微观领域中普遍适用。

1.3 导体和绝缘体

金属原子的原子核对离核最远的电子(价电子)的作用力较小,当受到某种影响时,价电子很容易脱离原子核的束缚而成为自由电子,失去电子的原子核成为带正电的离子。当大量金属原子组成金属时,由于原子间的相互影响,几乎所有的价电子都变成自由电子,它们在金属内部自由运动,但不会跑到金属外面,这种情况与密封于容器中的气体分子很相似,故通常把金属中的自由电子称为电子气。酸、碱、盐溶于水时,将电离成可在溶液中自由运动的正离子和负离子。所以不论金属内部还是酸、碱、盐的溶液中都存在大量的自由电荷,当自由电荷受力作用时,很容易从一处向另一处迁移,因而它们有很好的导电性,故金属以及酸、



碱、盐溶液称为导体. 金属内部发生电荷迁移时, 并不发生可觉察到的质量迁移, 而酸、碱、盐溶液中发生电荷迁移时, 将伴随质量的迁移. 我们把前者称为第一类导体, 后者称为第二类导体.

许多非金属, 其内部原子核对核外电子的作用力比较大, 电子被正离子牢固地束缚着, 不能自由运动(但是, 电子在原子或分子内部极小范围内, 仍可运动), 故非金属几乎没有导电本领, 称为绝缘体.

导体和绝缘体之间并无严格的界线, 在一定条件下, 绝缘体可以转化为导体. 例如, 绝缘体在强电力作用下将被击穿, 使束缚电子变成自由电子, 绝缘体就变成导体.

还有些物质如锗、硅和某些化合物等, 其导电性能介于导体和绝缘体之间, 称为半导体. 半导体的导电性会因其中杂质含量和外界条件的改变(如温度、光照等)而发生显著变化.

1.4 电子 质子 夸克

电磁现象的基本规律和电磁学的基本理论是在 18 至 19 世纪期间通过实验发现并总结出来的. 当时, 人们对物质的微观结构了解甚少, 所以在宏观电磁理论的表述中, 常常不涉及物质的微观结构. 但在今天, 如果我们能结合物质电结构的初步知识来学习电磁学, 对深入理解电磁学的基本规律是有帮助的.

从物理和化学的观点来看, 物质由原子、分子构成, 而原子是由电子、质子和中子构成的. 质子和中子是原子核的组成部分, 统称核子. 电子在核外运动, 质量很小, 约为 10^{-30} kg, 大小很难严格确定. 迄今为止的实验和理论都未发现电子具有内部结构, 故都把电子作为点粒子. 电子所带电荷的绝对值 e 是电荷的最小单元, 称为元电荷. 至今尚未发现电荷量比一个元电荷更小的稳定的带电体. 但近年来, 关于分数电荷的研究已引起广泛的兴趣. 所谓分数电荷就是指比元电荷更小的电荷. 粒子物理学的研究表明, 核子等重粒子是由电荷量为 $(-1/3)e$ 或 $(2/3)e$ 的称为夸克的粒子组成的. 但实验上尚未发现独立存在的带分数电荷的粒子. 电荷具有最小单元的性质称为电荷的量子化, 它是电荷的又一基本属性. 质子和中子的质量几乎相等, 约为电子质量的 1840 倍(10^{-27} kg). 质子带正电, 电荷量与电子的相等(相等的精确程度达到 10^{20} 分之一), 中子不带电. 质子可以稳定的独立存在, 中子则不能, 它将衰变(半衰期 13 min)为一个质子、一个电子和一个中微子. 电子和质子的质量和电荷量的数值如表 1-1 所示.

表 1-1 电子、质子的电荷量和质量

	电荷量/C	质量/kg
电子	$-(1.6021892 \pm 0.000046) \times 10^{-19}$	$(9.109534 \pm 0.000047) \times 10^{-31}$
质子	$(1.6021892 \pm 0.000046) \times 10^{-19}$	$(1.6726485 \pm 0.000086) \times 10^{-27}$

为什么电子和质子的电荷量值相等的精度如此之高? 为什么所有电子都能保持这样精确的固定的电荷量值? 是何种力量保持电子成为一个整体? 这些问题至今令人迷惑不解. 如果电子有内部结构的话, 那么内部各部分之间应有静电斥力, 电子结构的稳定性似乎表明其内部应存在某种比静电力更强的吸引力. 所有这一切都是当今物理学尚未搞清楚的问题.

不同数目的质子和中子结合成各种不同的原子核. 自然界中最重的原子核是铀-238

的核(^{238}u),它含有 238 个核子,质量约为 $4 \times 10^{-25} \text{ kg}$. 所有原子核的密度差不多都相等,而它们的直径大致正比于核子数的立方根. 原子核的直径为 $3 \times 10^{-15} \sim 2 \times 10^{-14} \text{ m}$. 铀原子核的半径约为 10^{-14} m ,密度约为 10^{17} kg/m^3 .

原子核和电子组成原子. 原子核带正电,电荷量取决于核内的质子数. 原子核外的电子数与核内的质子数相等. 整个原子的净电荷为零. 原子的质量几乎全部集中在原子核中,如氢原子核占氢原子质量的 99.95%,铀原子核占铀原子质量的 99.98%. 在第一级近似下,可以认为原子的质量就是它的原子核的质量. 原子的大小要比原子核大出好几个数量级. 原子半径的典型值的数量级为 10^{-10} m .

分子由原子组成. 由少数几个原子组成的分子,如 H_2O , CO_2 , Na_2SO_4 , C_6H_6 等,直径约为十分之几 nm. 它们的大小和质量与单个原子相比相差不大. 但也有一些分子很大、很复杂. 至今知道的最大的分子是蛋白质分子和脱氧核糖核酸(DNA)分子, DNA 分子的质量达 10^9 u (原子质量单位).

1.5 库仑定律

带电体之间作用力的大小和方向与带电体的几何形状、电荷的种类以及电荷量的多少等许多因素有关. 库仑(C. A. Coulomb)首先全面研究了两个点电荷间相互作用力的规律. 点电荷是这样的带电体,它本身的几何线度比它与其他带电体之间的距离小得多,这样,在研究它与其他带电体的相互作用时,可以把它当作一个几何点处理.

对于两个点电荷,它们之间的距离具有完全确定的意义,而两带电体的形状、电荷在带电体上的分布情况已无关紧要. 点电荷的概念与力学中质点的概念相似,它是从实际带电体中抽象出来的理想模型,只具有相对意义,本身不一定是非常小的带电体. 库仑于 1785 年通过对实验(著名的扭秤实验)结果的分析,总结了两个静止点电荷间相互作用力的规律,这就是我们熟知的库仑定律,其主要内容是:(1)同号电荷相互排斥,异号电荷相互吸引;(2)作用力沿两点电荷的连线;(3)力的大小正比于每个点电荷电荷量的多少;(4)力的大小反比于两点电荷之间距离的平方. 用数学可表示

$$F_{12} \propto \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} e_r \quad (1-1)$$

F_{12} 代表点电荷 1 作用于点电荷 2 上的力, q_1 和 q_2 分别为该两点电荷的电荷量, r_{12} 是点电荷 q_1 到 q_2 的矢径 r_{12} 的大小, r_{12} 的方向由指 q_1 向 q_2 , 如图 1-2 所示, e_r 为该方向的单位矢量,即

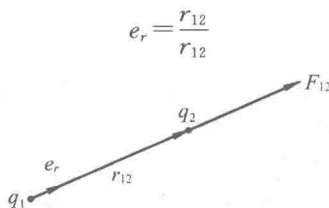
$$e_r = \frac{r_{12}}{r_{12}} \quad (1-2)$$


图 1-2

把(1-1)式写成等式,就得到库仑定律的数学表示式



$$F_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} e_r \quad (1-3)$$

比例系数 k 的值取决于式中各量的单位, 对同号电荷, F_{12} 与 e_r 同方向, 作用力为排斥力; 对异号电荷, F_{12} 与 e_r 反方向, 作用力为吸引力. 点电荷 2 对点电荷 1 的作用力 F_{21} 与的 F_{12} 大小相等, 方向相反, 满足牛顿第三定律.

库仑定律(1-3)式中的比例系数 k 的数值、量纲与单位制的选择有关. 在 SI 中, 力的单位是 N(牛顿), 电荷量的单位是 C(库仑). 电荷量的单位 C 是导出单位,

$$1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot \text{S}$$

其中 A 是 SI 中电流的单位, 称为安培, S 为时间的单位, 称为秒. 既然库仑定律(1-3)式中各量的单位都已规定, 比例系数 k 的值只能由测量来确定. 设两个点电荷的电荷量 $q_1 = q_2 = 1\text{C}$, 在真空中相距 $r_{12} = 1\text{m}$, 当用 N 为单位去量度它们的作用力时, 所得的数值就等于(1-3)式中的 k , 这样确定的 k 的值为

$$k = 8.987\ 551\ 787 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2 \approx 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2 / \text{C}^2$$

为了后面的方便, 我们用另一常数 ϵ_0 表示 k , 规定

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (1-4)$$

由此得 $\epsilon_0 = 8.854\ 187\ 82 \times 10^{12} \text{ C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2)$, 近似可取

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2) \quad (1-5)$$

ϵ_0 称为真空介电常数. 这样, 在 SI 中, 库仑定律的表示式为

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

1.6 真空的概念及其演变

库仑定律(1-6)式给出了处在真空中的两点电荷之间的作用力, 通常称为真空中的库仑定律. 在物理学中, 真空的概念是在不断演变的, 真空变得越来越复杂. 真空并非什么都没有, 恰恰相反, 真空有许多复杂的性质, 有丰富的内容.

最早, 人们头脑中的真空是指什么都不存在的空间, 若房间内什么物件都不存在, 则此房间便是真空. 后来发现, 房间内虽无看得见的东西, 但仍充满着各种气体的原子或分子, 并非真空, 于是认为只要把气体抽去后, 房间便成真空. 场的概念确立以后, 认识到真空中虽无原子、分子, 但仍充满着场, 场是物质的一种形态, 因此真空仍是有物质存在的空间. 在经典的电磁理论范围内, 把真空看做没有原子、分子存在的空间就可以了. 但随着物理学的不断发展, 真空的概念亦在发展, 内容也更加丰富.

1.7 几点说明

(1) 库仑定律中的电荷相对观察者(或实验室参考系)都处在静止状态. 实验表明, 静止电荷对运动电荷的作用力仍由(1-6)式给出, 但是运动电荷对静止电荷的作用力不能用库仑定律来表示, 运动电荷的电效应比较复杂, 需用相对论电磁学来解决.

(2)库仑定律指出,两静止电荷间的作用是有心力,力的大小与两电荷间的距离服从平方反比律.我们将看到,静电场的基本性质正是由静电力的这两个基本特性决定的.

(3)库仑定律是一条实验定律.在库仑时代,测量仪器的精度较低(即使在现代,直接用库仑的实验方法,所得结果的精度也是不高的),但是库仑定律中静电力对距离的依赖关系,即平方反比律,却有非常高的精度.验证平方反比律的一种方法是假定力按 $1/r^{2+\delta}$ 变化,然后通过实验求出 δ 的数值(当然这些实验并不是用扭秤进行的).1971 年的实验结果是 $\delta \leq 2 \times 10^{-16}$.

(4)库仑定律给出的平方反比律中, r 值的范围相当大.虽然在库仑的实验中, r 只有若干英寸(1 英寸 = 25.4 mm),但近代物理与地球物理的实验表明, r 值的数量级大到 10^7 m 或小到 10^{-17} m 的时候,平方反比律仍然成立.

2 电场 电场强度

2.1 电场

库仑定律给出了两个静止电荷间的相互作用力,但没有说明这种作用是通过什么途径发生的.两个电荷相隔一定距离,虽无任何由原子、分子所组成的物质媒介,却可以发生相互作用.历史上,围绕电力的传递问题有过长期争论,一种看法认为:一个电荷对另一电荷的作用无需经中间物传递,而是超越空间直接地瞬时地发生的,这就是超距作用的观点,即

电荷 $\Leftrightarrow$ 电荷

另一种看法是:一个电荷对另一个电荷的作用是通过空间某种中间物为媒介,以一定的有限的速度传递过去的,这就是近距作用的观点.传递相互作用的中间物,历史上最早认为是一种特殊的弹性介质——以太.

近代物理的发展证明,超距作用的观点是错误的,近距作用的观点才是正确的.电力(磁力也是这样)虽然以极快的速度传递,但该速度仍然有限.在真空中,它的速度就是真空中的光速 C

$$C = 299\,792\,458 \text{ m/s} \rightarrow 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

但“以太”并不存在,电力(磁力)通过电场(磁场)传递.凡是有电荷的地方,周围就存在电场,即电荷在自己的周围产生电场或激发电场,电场对处在场内的其电池电荷有力的作用.电荷受到电场的作用力仅由该电荷所在处的电场决定,与其他地方的电场无关,这就是场的观点.按照这种观点,电荷间的相互作用可表示为

电荷 $\Leftrightarrow$ 电场 $\Leftrightarrow$ 电荷

静止电荷产生的电场称为静电场,静电场对其他静止电荷的作用力就是静电力.电场并不限于静电场,凡对静止电荷有作用力的场都是电场.在静电范围内,电荷间的作用是超距作用还是通过场传递,无法判断,因而也就无法确定超距作用和近距作用两种观点谁是谁非.然而,在电场随时间变化的情况下,例如当场源运动时,两种观点的区别就显示出来了.设两点电荷,电荷量分别为 q_1 和 q_2 ,在某一时刻 t ,它们的距离为 r .这时, q_2 对 q_1 ,有一定的



作用力,若 q_2 突然改变位置,使两电荷的距离发生变化,按超距作用的观点, q_1 受到的作用应同时变化.但按场的观点,当 q_2 位置变化时, q_1 受到的作用力并不立即变化.因为 q_2 在新位置产生的场将以有限的速度 c 向 q_1 传播,经过一定的时间 Δt 之后,当 q_1 所在处的场发生变化时, q_1 受到的作用力才变化.所以, q_2 对 q_1 作用力的变化要比其位置的变化推迟一定时间 $\Delta t=r/c$. 实验结果证明场的观点是正确的.以后我们还将看到,电场和磁场与实物(由原子或分子构成的物质)一样,具有动量和能量,服从一定的运动规律,它们可以脱离电荷和电流单独存在.与物质的实物形式一样,电磁场也是物质的一种形式.

2.2 电场强度

电场的的一个重要特性是对处在场内的其他静止电荷有力的作用.因此,我们可以通过电场对电荷的作用力来研究电场,并用电荷作为研究和检测电场的工具.例如,把一点电荷逐次置于空间某个区域的各个位置上,如果这点电荷总是不受力的作用,则该区域内无其他电荷的电场存在;反之,则存在电场.用于研究和检测电场的电荷称为试探电荷或检测电荷.产生被研究电场的电荷称为源电荷.源电荷可以是若干个电荷,也可以是具有某种电荷分布和某种形状的带电物体.试探电荷应满足一定的条件.首先,它的电荷量 q_0 应尽可能小,使它对源电荷的作用非常小,这样,试探电荷的引入几乎不会引起源电荷分布的变化;其次,试探电荷本身的几何线度应尽可能小,这样才可能用它来探测场内每一点的性质.今后凡讲到试探电荷,我们都认为是满足这些条件的.

在电场内任一确定点,试探电荷受到的电场作用力与试探电荷的电荷量有关.电场对试探电荷的作用力是由电场与试探电荷共同决定的.但是电场对试探电荷的作用力与试探电荷电荷量之比是一个与试探电荷无关而仅由电场本身性质决定的物理量,我们用它来描写电场,称为电场强度,简称场强.

若电荷量为 q_0 的试探电荷在场内某点受到的作用力为 F ,则该点的电场强度定义为

$$E = \frac{F}{q_0}$$

电场内任意一点的电场强度在数值上等于一个单位电荷量的电荷在该点受到的作用力,电场强度的方向与正电荷在该点受力的方向相同.

一般讲来,空间不同点的场强的大小和方向都是不同的,即电场强度是空间位置 X, Y, Z 的函数,

$$E = E(X, Y, Z)$$

电场是矢量场.若空间各点场强的大小和方向都相同,则称之为均匀电场或匀强电场.电场强度的单位是 N/C .

2.3 叠加原理

当空间存在两个以上的点电荷时,任意两个点电荷间都存在相互作用.实验指出,两个点电荷间的作用力不因第三个电荷的存在而改变.不管一个体系中存在多少个点电荷,每一对点电荷之间的作用力都服从库仑定律,而任一点电荷所受到的力等于所有其他点电荷单



独作用于该点电荷的库仑力的矢量和,这一结论称为叠加原理。

设有 n 个点电荷组成的体系,第 i 个点电荷 q_i 作用于第 j 个点电荷 q_j 的库仑力为

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i q_j}{r_{ij}^2} e_{ij}$$

式中 r_{ij} 为 q_i 到 q_j 的距离, e_{ij} 为从 q_i 指向 q_j 方向的单位矢量,根据叠加原理, q_j 受到的合力为

$$F = \sum_i F_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_N \frac{q_i q_j}{r_{ij}^2} e_{ij}$$

叠加原理是自然界客观事实的总结,叠加原理与库仑定律相结合,构成了整个静电学的基础。

2.4 点电荷与点电荷系的场强

设场源是电荷量为 q 的点电荷. 为了研究它的场,设想把电荷量为 q_0 的试探电荷引入场内的考察点 P , P 点到 q 的距离为 r . 由库仑定律,源电荷 q 作用于试探电荷 q_0 的力为

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2} e_r$$

式中 e_r 是从 q 指向 q_0 的单位矢量. P 点的电场强度为

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} e_r \quad (1-7)$$

若场源由几个点电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 组成,设 E_i 为第 i 个点电荷 q_i 在考察点 p 处产生的电场的场强,由(1-7)式得

$$E_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r_i^2} e_i$$

式中 r_i 是 q_i 到 P 点的距离, e_i 是 q_i 指向 P 点的单位矢量. 根据力的叠加原理,各源电荷在 P 点产生的电场的总场强为

$$E = E_1 + E_2 + \dots = \sum_i E_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{q_i}{r_i^2} e_i \quad (1-8)$$

即一组点电荷共同产生的电场的场强等于每个点电荷在该点单独产生的电场的场强的矢量和,这一结论称为场强的叠加原理。

2.5 任意形状带电体的电场

点电荷是一种理想模型,只有当考察其场强的地点到源电荷的距离比源电荷本身的线度大得多时,源电荷才能当作点电荷,(1-7)式才成立. 当带电体不能作为点电荷处理时,就必须考虑带电体的形状和大小,以及电荷在带电体上的分布情况. 对于任意形状的带电体,我们可以想象把它分割成许多足够小的电荷元 dq ,每一电荷元在所讨论的问题中都可看做点电荷,于是电荷元 dq 单独产生的电场的场强为

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} e_r$$

式中 r 是电荷元 dq 到考察点 P 的距离, e_r 是单位矢量,由电荷元指向考察点,如图 1-4



所示. 由电场的叠加原理, 整个带电体产生的电场的场强为

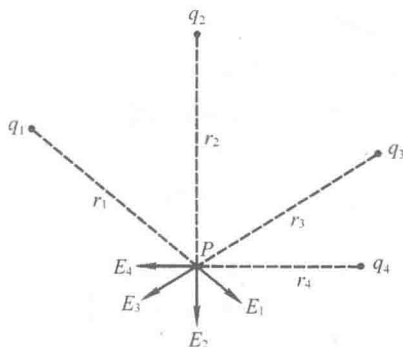


图 1-3 诸点电荷在 P 点产生的电场

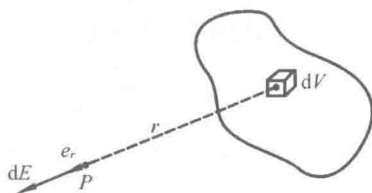


图 1-4 带电体上的电荷元在 P 点产生的电场

$$E = \int dE \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{r^2}^{dq} e_r \quad (1-9)$$

若电荷分布在带电体内部, 则可以用电荷体密度 ρ 描写电荷在带电体内的分布. 电荷体密度定义为单位体积内的电荷量, 即

$$\rho = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta v} = \frac{dq}{dv} \quad (1-10)$$

知道了电荷体密度, 带电体内任一电荷元的电荷量

$$dq = \rho dV \quad (1-11)$$

代入(1-9)式, 即可求得体分布的源电荷所产生的电场.

上面的讨论, 实际上已认为电荷在带电体上是连续分布的. 我们知道, 任何带电体所带的电都是一一个个电子或原子核所带电荷的集合, 只能是电子电荷量的整数倍, 所以带电体的电荷量具有不连续性. 但是, 宏观上的电荷量包含着极大量的元电荷(例如, 一普通的电容器充电到数百伏后, 极板上带有的元电荷数达到 10^{15} 的数量级), 因此, 在宏观范围内, 我们可以认为电荷是连续地“粘”在带电体上的, 或者说电荷是连续地分布在带电体上的, 毋需考虑电荷的不连续性. 当然, 在取电荷 dq 时, 一方面要求电荷元非常小, 可以把它看做点电荷, 另一方面 dq 又应足够大, 仍包含大量元电荷. 同样, 在电荷体密度的定义式(1-10)中, $\Delta V \rightarrow 0$ 的含义与数学上的无限小量也有所不同, 因为电荷具有分立特性, ΔV 太小, 可能使 ΔV 内一个电子也没有. 在物理上, $\Delta V \rightarrow 0$ 的含义是 ΔV 在宏观上足够小, 足以反映电荷密度在空间的细致变化, 但在微观上却相当大, 即比单个原子或分子的体积要大得多, 以致在 ΔV 内仍然包含大量的原子或分子, 电荷仍然可以看做是连续分布的. 通常, 把这种意义下的无穷小量称为物理无穷小量. 物理上的无穷小量是可实现的. 例如, 以气体为例, 在标准状态下,

每立方厘米的气体中有 3×10^{19} 个分子, 若我们取体积元 $\Delta V = 10^{-10} \text{ cm}^3$, 这在宏观上是一个非常小的量, 但其中仍然含有 10^9 个分子.

在有些问题中, 电荷仅分布在物体表面的一个薄层内, 薄层的厚度可以忽略不计时, 可以用电荷的面密度来描写电荷在表面上的分布. 设想表面层的厚度为 δ . 取一面元 ΔS , 层内的电荷体密度为 ρ , 则对应体元内的电荷量 $\Delta q = \rho \Delta S \delta$, 如图 1-5 所示. 电荷的面分布意味着当厚度 $\delta \rightarrow 0$ 时, Δq 并不为零, 这要求薄层内电荷的体密度 $\rho \rightarrow \infty$ 以保证 $\rho \delta$ 为有限. $\rho \delta$ 的极限称为电荷的面密度, 用 σ 表示.

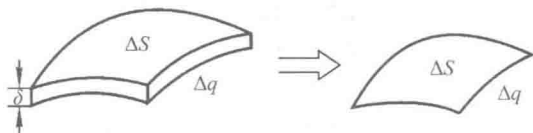


图 1-5 面分布的电荷可看成体分布电荷的极限

$$\sigma = \frac{\Delta q}{\Delta S} = \lim_{\substack{\delta \rightarrow 0 \\ \rho \rightarrow \infty}} \delta \rho \quad (1-12)$$

电荷面密度在数值上等于单位面积上的电荷量. 引入面电荷密度后, 面电荷元为

$$dq = \sigma ds \quad (1-13)$$

ds 是物理上的无限小面元.

2.6 电场线——描写电场的辅助工具

若已知电荷分布, 则空间各点的场强原则上都可求出. 为了形象化地把客观存在的电场表示出来, 常引入电场线这一辅助工具. 由于电场内每一点的场强都有确定的大小和方向, 我们可以在电场内人为地画一些曲线, 使曲线上每一点的切线的方向与相应点场强的方向一致, 这种曲线称为电场线, 它可以把场内各点场强的方向表示出来. 若进一步规定电场线的数密度与该点的场强的大小成正比, 则画出的电场线既可以表示场强的方向, 又可以表示场强的大小. 所谓电场线的数密度, 就是通过垂直于场强方向的单位面积的电场线的条数. 这样, 凡是电场线密集的地方, 场强就大, 电场线稀疏的地方, 场强就小.

几种带电体的电场的电场线分布, 如图 1-6~图 1-12 所示.

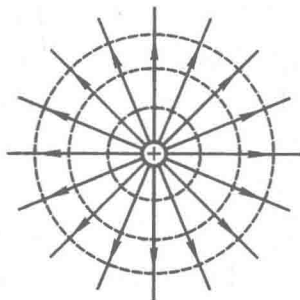


图 1-6 正点电荷电场的电场线(实线)

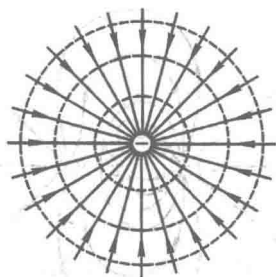


图 1-7 负点电荷电场的电场线(实线)

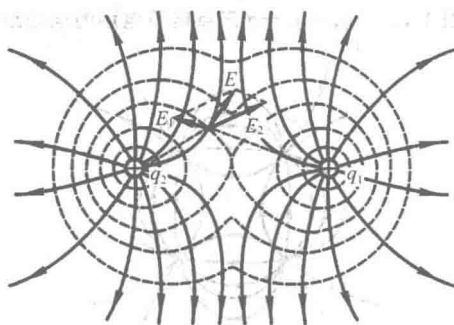


图 1-8 两等量正点电荷电场的电场线(实线)

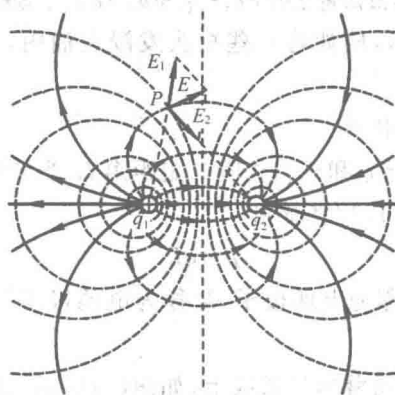


图 1-9 两等量异号点电荷电场的电场线(实线)

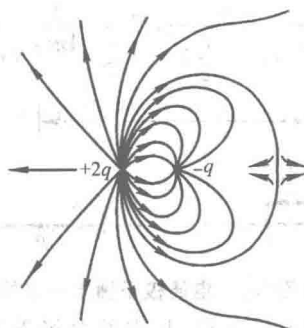


图 1-10 两不等量异号点电荷电场的电场线