

独立学院应用型创新人才培养系列规划教材

大学应用物理学

(下册)

主编 戴剑锋 赵海军 王 青 李维学



科学出版社

独立学院应用型创新人才培养系列规划教材

大学应用物理学

(下册)

主编 戴剑锋 赵海军
王 青 李维学

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理基础课程教学指导分委会编制的《理工科类大学物理课程教学基本要求(2008版)》和国内工科物理教材改革动态,并结合编者多年在独立学院的教学经验编写而成. 特别强调物理知识在工程技术中的应用. 全书共分为两册,上册包括机械运动、气体动理论与真空技术、热力学基础和波动光学,下册包括静电场、稳恒磁场、电磁感应及电磁场理论、量子物理基础和工程技术应用专题.

本书可作为独立学院各工科专业的大学物理课教材,还可作为一般读者了解物理知识与工程技术的参考读物.

图书在版编目(CIP)数据

大学应用物理学. 下册/戴剑锋等主编. —北京:科学出版社,2011
独立学院应用型创新人才培养系列规划教材
ISBN 978-7-03-029846-1

I. ①大… II. ①戴… III. ①应用物理学-高等学校-教材 IV. ①O59

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 259369 号

责任编辑:滕亚帆 唐保军 / 责任校对:朱光兰
责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京市安泰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 12 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2010 年 12 月第一次印刷 印张: 32 3/4

印数: 1—4 000 字数: 660 000

定价: 58.00 元 (上、下册)

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

目 录

第 5 章 静电场	1
5.1 电荷 库仑定律	1
5.1.1 电荷	1
5.1.2 物质的电结构	1
5.1.3 电荷的量子化	2
5.1.4 电荷守恒定律	2
5.1.5 电荷的不变性	2
5.1.6 点电荷	3
5.1.7 真空中的库仑定律	3
5.1.8 静电力叠加原理	5
5.2 电场 电场强度	6
5.2.1 电场	6
5.2.2 电场强度	7
5.2.3 场强叠加原理	8
5.2.4 电场强度的计算	8
5.3 电通量 高斯定理	15
5.3.1 电力线	15
5.3.2 电场强度通量	16
5.3.3 高斯定理	18
5.3.4 应用高斯定理求场强	21
5.4 静电场的环流定理 电势	27
5.4.1 静电场力的功	27
5.4.2 静电场的环流定理	29
5.4.3 静电势能 电势和电势差	29
5.4.4 电势的计算	31
5.5 电场强度与电势的微分关系	37
5.5.1 等势面	37
5.5.2 场强和电势的微分关系	38

5.6 静电场中的导体	40
5.6.1 导体的静电平衡及其条件	40
5.6.2 静电平衡导体的性质	42
5.6.3 静电屏蔽	45
5.6.4 静电的应用	47
5.7 电介质中的静电场	50
5.7.1 电介质的极化	51
5.7.2 极化电荷与电介质中的电场	53
5.7.3 介质中静电场的高斯定理 电位移矢量	55
5.7.4 应用高斯定理求介质中的场强	57
5.7.5 电介质的应用	59
5.8 导体的电容 电容器	60
5.8.1 电容	60
5.8.2 电容器电容的计算	62
5.8.3 电容器的串联和并联	65
5.9 静电场的能量	66
5.9.1 带电电容器的静电能	66
5.9.2 电场能量 能量密度	67
习题	68
第6章 稳恒磁场	73
6.1 磁场 磁感应强度	73
6.1.1 磁场	73
6.1.2 磁感应强度	75
6.2 磁感应线 磁通量 磁场的高斯定理	76
6.2.1 磁感应线	76
6.2.2 磁通量	78
6.2.3 磁场中的高斯定理	78
6.3 毕奥-萨伐尔-拉普拉斯定律	79
6.3.1 毕奥-萨伐尔-拉普拉斯定律	79
6.3.2 毕奥-萨伐尔定律的应用	80
6.4 磁场强度 安培环路定理	85
6.4.1 磁场强度	85
6.4.2 安培环路定理	86

6.4.3 安培环路定理的应用	87
6.5 磁场对电流的作用 安培定律	89
6.5.1 磁场对电流元的作用 安培定律	89
6.5.2 匀强磁场对平面载流线圈的作用	94
6.5.3 磁电式仪表 电动机	97
6.5.4 磁悬浮技术	100
6.6 磁场对运动电荷的作用	101
6.6.1 洛伦兹力	101
6.6.2 运动电荷在匀强磁场中的运动	102
6.6.3 回旋加速器 质谱仪 滤速器	103
6.6.4 磁聚焦技术	107
6.6.5 霍尔效应	110
6.7 磁场中的磁介质	112
6.7.1 磁介质的磁化和分类	112
6.7.2 磁介质磁化状态的描述	113
6.7.3 铁磁质磁化	119
6.7.4 磁性材料及其应用	121
习题	123
第7章 电磁感应及电磁场理论	126
7.1 电源电动势	126
7.1.1 稳恒电流 非静电力 电源	126
7.1.2 非静电力场 电源电动势	127
7.2 电磁感应的基本定律	128
7.2.1 电磁感应现象	128
7.2.2 法拉第电磁感应定律	130
7.2.3 楞次定律	133
7.3 动生电动势和感生电动势	135
7.3.1 动生电动势	135
7.3.2 感生电动势、涡旋电场和涡电流	141
7.4 自感和互感	147
7.4.1 自感	147
7.4.2 互感	149
7.4.3 磁场的能量	151

7.5 电磁场理论的基本概念	153
7.5.1 位移电流	153
7.5.2 麦克斯韦方程组	155
7.5.3 电磁波的产生和传播	156
7.5.4 微波技术	164
习题	167
第8章 量子物理基础和工程技术应用专题	170
8.1 黑体辐射与普朗克量子化假说	170
8.1.1 热辐射	170
8.1.2 黑体辐射实验规律	170
8.1.3 普朗克的能量子假设	173
8.2 光电效应	174
8.2.1 光电效应实验规律	175
8.2.2 经典理论的解释及其困难	177
8.2.3 光子假设及光的波粒二象性	177
8.2.4 光子假说对光电效应的解释	178
8.2.5 爱因斯坦的光电效应方程	179
8.3 量子力学基础	180
8.3.1 波函数及其统计解释	180
8.3.2 一般薛定谔波动方程	182
8.3.3 定态薛定谔波动方程	183
8.4 激光技术	184
8.4.1 氦-氖激光器	185
8.4.2 原子的跃迁	186
8.4.3 激光的获得	187
8.4.4 激光的应用	189
8.5 红外技术与紫外技术	200
8.5.1 红外线	200
8.5.2 红外技术	201
8.5.3 紫外线	206
8.6 超导材料	207
8.6.1 超导的发现	207
8.6.2 超导体的电磁性质	208

8.6.3 两类超导体	210
8.6.4 BCS 超导理论	211
8.6.5 约瑟夫森效应	211
8.6.6 高温超导体	212
8.6.7 超导体的应用	213
8.7 传感器技术	213
8.7.1 电阻式传感器	214
8.7.2 电容式传感器	216
8.7.3 压电传感器	218
8.7.4 光敏电阻	218
8.7.5 温差电现象和温度传感器	219
习题	221

第5章 静 电 场

当空间的电荷相对于观察者静止时所产生的电场为静电场,它是研究电磁运动的基础.要完整地描述静电场的特性,必须给出空间每一点的电势或电场强度.本章从静电场的两条基本规律——库仑定律和场叠加原理出发,推导出反映静电场性质的两条基本定理——高斯定理和环路定理;从电荷在电场中受力和电场力对电荷做功两方面,引入电场强度和电势两个基本物理量;最后研究在静电场中的导体和电介质的基本性质,以及导体和电介质对电场分布的影响,引入电位移矢量.此外,在本章中还要研究电容、电容器及电场的能量.

5.1 电荷 库仑定律

5.1.1 电荷

两种不同材料的物体,如丝绸和玻璃棒,互相摩擦后,都能吸引轻微物体,这时,我们称物体带了电或带了电荷.物体带电的多少称为电荷量,也称电量,用 q 表示.在国际单位制中,电量的单位是库仑,简称库(C).1C就是1A的电流在1s时间内通过导线截面的电量,一个质子或电子所带的电量为电荷的基本单元,它等于 $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$,通常用 e 表示.近代物理的发展,使我们对物体带电现象的本质有了进一步的认识.物质电结构理论进一步表明:电荷是实物粒子的一种属性.它描述实物粒子的电性质,正如质量是反映实物粒子惯性或引力的属性一样.一切实物粒子(无论宏观物体或微观粒子)都有一定质量,但带电性质则可以不同.例如,中子不带电,质子带正电,而电子带负电.电荷只能随带电的基本粒子(电子、质子)的迁移而迁移,而物体的原子核是不容易迁移的.所以物体带电的本质是两种物体间发生了电子的转移.

5.1.2 物质的电结构

物质由分子组成,分子又由原子组成,原子由质子、中子和电子三种粒子所组成.质子带正电,电子带负电,中子不带电;质子与中子的质量差不多相等,电子的质量却小得多,约为质子质量的 $1/1840$.原子核由质子和中子组成,原子核的限度为 10^{-15}m 数量级.原子核外部为围绕核快速运动的电子(图5-1),组成所谓的电子云,原子的直径(即电子云的外直径)约为 10^{-10}m ,比核的直径大 10^5 倍.

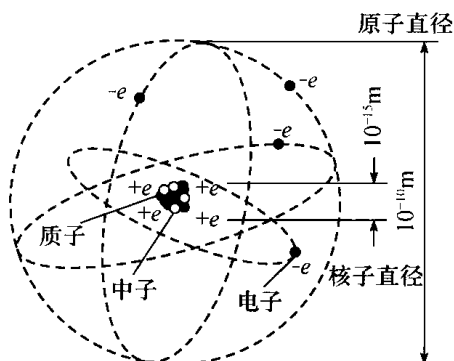


图 5-1 原子的结构

在正常情况下,原子核带的正电荷的总量(质子数)等于核外所带负电荷(电子数)的总电量,所以一般物体在正常情况下不显电性,即为“电中性”。一个物体带电,实际上是物体具有多余的电子或者失去了一部分电子。

5.1.3 电荷的量子化

在已知的基本粒子中,不仅电子和质子带有电荷,另外一些粒子也带有电荷,比如介子、超子中的部分粒子带有电荷;还有一些粒子不带电,如光子、中微子和中子等。除上述提到的基本粒子之外,还存在反粒子。例如,反电子(正电子)带的电荷为 $+e$,反质子带的电荷为 $-e$,反中子的电荷为零等。综上所述,可以看出所有基本粒子所带的电荷有个重要的特点,就是它们都是基本电荷 e 的整数倍,也就是说,电荷只能取 $0, \pm e, \pm 2e, \dots$ 由此可以推知,任何宏观带电体,只能是基本电荷 e 的整数倍,这表明电荷是量子化的。基本电荷就是电荷量子。当一种物理性质像电荷那样以分离、不连续的方式存在,我们就说这种性质是量子化的。在近代物理学中,量子化是基本的概念。在微观世界中,我们将看到如能量、角动量等也是量子化的。

在粒子物理研究中,理论上曾预言有电量为 $\pm 1e/3$ 或 $\pm 2e/3$ 的粒子(夸克)存在。并认为很多基本粒子是由若干种夸克或反夸克组成的。1990年诺贝尔物理学奖就授予几位美国物理学家,以表彰他们对夸克理论的杰出贡献,使得电荷的最小值又有了新的结论。但是电荷量子化规律并没有改变,即电荷只能取分立的、不连续的数值。

5.1.4 电荷守恒定律

电荷守恒定律是物理学最基本的定律之一,首先是由富兰克林于1747年提出的。定律指出,在一个与外界没有电荷交换的系统内,无论进行怎样的物理过程,过程中电荷总数(即正负电荷的代数和)保持不变。这就是电荷守恒定律。在宏观物体的带电过程中,随着带电粒子的迁移,物体所带电荷可以从一个物体迁移到另一个物体上,但在其所构成的系统中的电荷总量既不会增加,也不会减少。即使在微观领域内,电荷守恒定律也被证明是正确的。例如,当高能光子穿过铅板后,可以产生正负电子偶(一个正电子,另一个为负电子)。光子并不带电,而产生的正电子和负电子带有等量异号电荷,所以光子穿过铅板前后系统的电荷量值相等且均为零。可见系统的总电量保持不变,电荷守恒定律已被实验所证实。

5.1.5 电荷的不变性

实验发现,一个电荷的电量与它的运动状态无关,也就是说与观测者所选的参

照系无关. 电荷的这一特性, 称为电荷的不变性.

一般情况下, 不同种类分子中电子的运动状态是不同的. 通过化学反应可以改变分子中电子的运动状态. 如果电荷对其运动速率有一个十分微小的依赖关系, 由于物体中包含有大量分子, 也会通过化学反应产生十分可观的电量来, 但这种效应从未被观测到过.

电荷不变性与电荷守恒是电荷的两个本质上不同的属性. 以往我们所接触的质量、动量与能量都是守恒量, 却不是不变量. 守恒量是指在选定的参照系下, 在某一过程中, 某物理量保持不变; 不变量是指在不同的参照系中, 对同一物理量的测量结果不变, 即与参照系的选择无关. 正是两种电荷的存在及电荷的不变性, 使得由电荷组成依靠电力结合起来的与由质点组成依靠引力结合起来的有某些本质上不同的特征. 而电荷与质点都不存在内在的方向性, 以及电力与引力都遵循平方反比关系, 又使得这两个世界呈现出某些相似的特征.

5.1.6 点电荷

点电荷是一个理想模型, 在以后的讨论中经常要用到点电荷这一概念. 所谓点电荷, 是指这样的一个带电体, 它本身的几何线度 d 比所研究的问题中涉及的距离 r 小很多. 如图 5-2 所示, $r \gg d$ 时, 该带电体的形状和电荷在其上的分布状况均无关紧要, 可以忽略它们的形状和大小, 把带电体所带的电量看成是集中在一“点”上, 称为点电荷. 由此可见, 点电荷是个相对的概念. 当在宏观意义上谈论电子、质子等带电粒子时, 完全可以把它们视为点电荷. 另外, 因为电荷的基本单元 e 是如此之小, 以致电荷的量子性在研究宏观现象的绝大多数实验中表现不出来, 可引入电荷密度的概念.

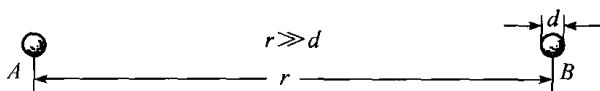


图 5-2 当 $r \gg d$ 时可以把带电体看成点电荷

5.1.7 真空中的库仑定律

研究静止电荷之间相互作用的理论称为静电学. 它是以 1785 年法国科学家库仑通过实验总结出的规律——库仑定律为基础的. 这一定律的表述如下: 真空中两个静止的点电荷之间的作用力与这两个电荷所带电量的乘积成正比, 与它们之间距离的平方成反比. 作用力的方向沿着这两个点电荷的连线, 同种电荷互相排斥, 异种电荷互相吸引. 这一规律用矢量公式表示为

$$\mathbf{F}_{21} = k \frac{q_1 q_2}{r_{21}^3} \mathbf{r}_{21} \quad (5-1)$$

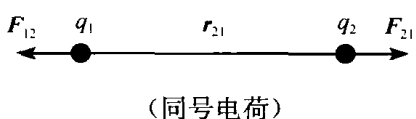


图 5-3 库仑定理

式中 $\mathbf{F}_{21}$ 表示点电荷 q_2 所受点电荷 q_1 的作用力, q_1 、 q_2 分别表示两个点电荷的电量并包含符号, r_{21} 表示两个点电荷的距离, $\mathbf{r}_{21}$ 是从 q_1 指向 q_2 的矢量(图 5-3), k 为比例系数, 由公式中各量所选取的单位而定. 若 $\mathbf{F}_{12}$ 表示点电荷 q_1 所受点电荷 q_2 的作用力, 则由式(5-1)可知, 两个静止的点电荷之间的作用力符合牛顿第三定律, 即

$$\mathbf{F}_{21} = -\mathbf{F}_{12}$$

在国际单位制(SI)中, 比例系数

$$k = 8.9880 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \approx 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$$

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常数并用 ϵ_0 来表示它, 即

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

式中 ϵ_0 称为真空介电常量, 或真空电容率, 它是电磁学的一个基本物理常数. 用 ϵ_0

代替 k 后, 即有 $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, 因而库仑定律的数学表达式改写为

$$\mathbf{F}_{21} = \frac{1}{4\pi k} \cdot \frac{q_1 q_2}{r_{21}^3} \mathbf{r}_{21} \quad (5-2)$$

实验证实, 点电荷放在空气中时, 其相互作用力与其在真空中的情形相差极小, 故式(5-2)的库仑定律对空气中的点电荷亦成立. 用 ϵ_0 表达的库仑定律中出现了 4π , 公式要复杂些. 但是以后可以看到, 由此而推出来的一些基本方程中, 都不出现因子 4π , 形式变得很简单, 因此引入 ϵ_0 是合适的.

库仑定律是一条实验规律, 定律中关于静电相互作用的平方反比关系是根据实验提出的理论假设, 其正确性永远要经受实验的检验. 现代高能电子散射实验证实: 小到 10^{-15} m 的范围, 库仑定律仍然精确地成立. 而通过人造地球卫星研究地球磁场时又证明了库仑定律精确地适用于大到 10^7 m 的范围, 并且有理由相信在更大的范围内库仑定律仍然有效. 然而, 在高速电子与质子碰撞实验中, 在短于 10^{-16} m 距离内发现: 电力的测量结果比按库仑定律预期的计算结果要弱 10 倍. 对此有两种解释: 一种认为库仑定律所显示的平方反比关系在这一尺度内失效; 另一种则认为此时质子已不能看成点电荷. 目前, 大多数物理学家倾向于后者.

现代量子电动力学理论指出, 库仑定律中分母 r 的指数与光子的静止质量有关, 如果光子静止质量严格为零, 则该指数严格地为 2. 如果 r 的指数为 $2+\alpha$, 则光子的静止质量将可能不严格为零, 目前的实验给出光子的静止质量的上限为 10^{-48} kg ,

这差不多相当于 α 的绝对值 $\leq 10^{-16}$.

5.1.8 静电力叠加原理

实验表明,两个点电荷之间的静电力并不因其他电荷存在而改变,这就是静电力的独立作用原理. 设空间存在一点电荷系统,由 n 个电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 组成,它们对电荷系外的另一个点电荷 q_0 的静电力如何求解? 根据静电力独立作用原理,点电荷 q_0 所受的静电力等于电荷系中各个点电荷单独存在时作用于 q_0 上的静电力的矢量和. 设 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 对 q_0 的作用力分别为 $F_1, F_2, \dots, F_n$, 则 q_0 所受静电力的合力 F 为

$$F = F_1 + F_2 + \dots + F_n = \sum_{i=1}^n F_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i \cdot q_0}{r_i^2} r_{0i} \quad (5-3)$$

式中 r_{0i} 为 r_i 的单位矢量. 这就是静电力叠加原理的表示式. 库仑定律和静电力叠加原理,是静电学的基本实验定律. 原则上,有关静电学的问题可用这两条定律相结合加以解决.

例 5-1 氢原子中质子和电子的距离约为 $5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$. 试计算这两个粒子之间的静电力和万有引力,并比较两者的大小. 引力常数为 $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$.

解 按库仑定律计算,质子和电子之间的静电力为

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = 9.0 \times 10^9 \times \frac{(1.60 \times 10^{-19})^2}{(5.3 \times 10^{-11})^2} \\ &= 8.1 \times 10^{-8} (\text{N}) \end{aligned}$$

应用万有引力定律,质子和电子之间的万有引力为

$$\begin{aligned} F &= G \frac{m_1 m_2}{r^2} \\ &= 6.67 \times 10^{-11} \times \frac{9.11 \times 10^{-31} \times 1.67 \times 10^{-27}}{(0.529 \times 10^{-10})^2} \\ &= 3.63 \times 10^{-47} (\text{N}) \end{aligned}$$

可见在原子中,质子和电子之间的静电力远大于万有引力,静电力约为万有引力的 10^{39} 倍. 因此,在处理质子和电子之间的相互作用时,只需考虑静电力,万有引力可以略去不计,而在原子结合成分子,原子或分子组成液体或固体时,它们的结合力在本质上也都属于电力.

例 5-2 假设原子核中的两个质子相距 $4.0 \times 10^{-15} \text{ m}$,问这两个质子之间有多大的库仑斥力.

解 由库仑定律得

$$F_c = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} = 9.0 \times 10^9 \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2}{(4.0 \times 10^{-15})^2} = 14(\text{N})$$

可见,在原子核内质子间的斥力是很大的.质子之所以能结合在一起组成原子核,是由于核内除了有这种斥力外还存在着远比斥力更强的引力——核力的缘故,这种核力称为短程力.

上述两个例题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条件下的万有引力.

例 5-3 把一电荷 Q 分成 q 与 $Q-q$ 两个部分,且相隔一定距离,求使这两部分有最大排斥力时, q 与 Q 的关系.

解 设将 Q 分成 q 与 $Q-q$ 两部分时,两者相距为 r .由库仑定律可知,两部分之间相互排斥力大小为

$$F = \frac{q(Q-q)}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r^2} (qQ - q^2)$$

$$\text{令} \quad \frac{dF}{dq} = 0$$

$$\text{即} \quad \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r^2} (Q - 2q) = 0$$

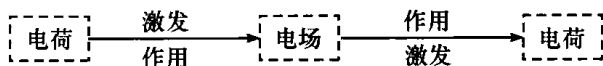
$$\text{则} \quad Q - 2q = 0$$

$$\text{得} \quad q = \frac{Q}{2}$$

5.2 电场 电场强度

5.2.1 电场

对于带电体之间的相互作用是如何发生的,曾有过两种不同的观点.一种观点认为,由库仑定律可知,真空中两个隔开的点电荷间可以发生相互作用,这意味着电荷间的相互作用不需要中间物质作介质,且无须传递的时间,因此很长一段时期内,人们认为电力是由一个带电体直接作用到另一个带电体上的,即所谓的“超距作用观点”;另一种观点直到 19 世纪初,才被人们所认识,即“近距作用观点”,又称“场的观点”.人们从电、磁现象的实践和电磁波的发现中认识到,任何带电体的周围空间内都存在一种不同于一般由分子、原子所组成的特殊的物质——电场;电荷之间的相互作用是通过电场来传递的,且传递也需要时间,不过传递速度非常快,约为 $3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,传递时间极短.这种场的观点可用下面的模式表示:



理论和大量实验证明场的观点是正确的. 场也是物质存在的一种形态, 它分布在一定范围的空间里, 和一切实物一样, 具有能量、动量、质量等属性. 但它又不同于一般的实物, 具有“可加性”, 如某一实物所占的空间, 不能同时被另一实物占有, 而各个电荷激发的电场可占有同一空间. 本章所研究的静电场, 是由相对于参考系或观察者静止的带电体激发的电场, 又称库仑场. 静电场是电磁场的一种特殊情况, 其特点是电场分布不随时间变化.

静电场的对外表现: 一是场中任何带电体都要受到电场力的作用; 二是带电体在场中移动时, 电场力对带电体做功. 下面我们将从这两点出发, 引入描述静电场特性的两个物理量: 电场强度和电势.

5.2.2 电场强度

静电场既然是客观存在的物质, 但又不像实物可以看得见、摸得着, 如何研究它呢? 根据电场对电荷有电力作用来研究场及其规律. 为了定量地描述电场中任一点处电场的性质, 可以将一带电荷量为 q_0 的检验电荷放到电场中的不同位置, 观察检验电荷 q_0 的受力情况.

检验电荷必须满足两个条件: ①检验电荷的线度必须小到可以视为点电荷, 以使确定的性质是电场中每点的性质; ②检验电荷的电荷量应足够小, 以至于把它放到电场中后对原有电场几乎没有什么影响.

为叙述方便, 下面的讨论中均用正电荷作为检验电荷, 产生静电场的电荷称为场源电荷.

如图 5-4 所示, 将检验电荷依次放入静电场的不同位置(称为场点). q_0 所受的电场力 F 的大小和方向依场点的位置而异. 如果在电场中某确定位置依次放入电荷量不同的检验电荷, 实验表明检验电荷所受的电场力 F 的大小与检验电荷的电荷量成正比. 而 F 与 q_0 的比值 F/q_0 与检验电荷的电荷量无关, 只与电荷在电场中的位置有关. 因此, 可以用 F/q_0 来描述电场的性质, 这个量称为电场强度(简称场强), 用符号 E 表示

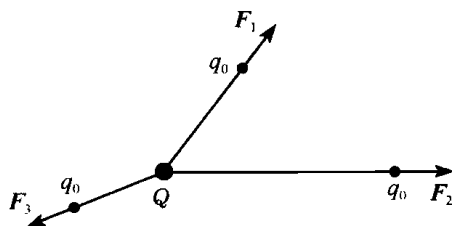


图 5-4 检验电荷在静电场中的受力情况

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

上式表明, 电场中某点的电场强度矢量, 其大小等于单位检验电荷在该点所受的电场力; 方向与正检验电荷在该点的受力方向一致.

在国际单位制中, 电场强度的单位是伏特·米⁻¹, 符号为 V·m⁻¹, 也可以用牛顿·库⁻¹(N·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.当静电场中某点的 E 已知时,可求电荷量为 q 的任一点电荷在该点所受的静电力

$$F = qE \quad (5-4)$$

若 q 为正电荷,则电场力 F 的方向与电场强度 E 的方向相同;若 q 为负电荷,则电场力 F 的方向与电场强度 E 的方向相反.

5.2.3 场强叠加原理

设空间同时存在 n 个点电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 组成的点电荷系,若以 $F_1, F_2, \dots, F_n$ 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 受到这一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

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{F_1 + F_2 + \dots + F_n}{q_0} = E_1 + E_2 + \dots + E_n \quad (5-5)$$

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.

5.2.4 电场强度的计算

如果电荷分布已知,那么从点电荷的公式出发,根据电场强度的叠加原理,就可以求出任意电荷分布所激发的场强.

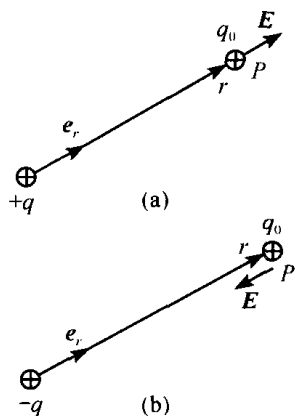


图 5-5 静电点电荷的电场

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 5-5 所示,一个静止的点电荷 q 在其周围产生电场,若以 q 为坐标原点,则点电荷 q 周围任一点 P (称场点)的位置可用位置矢量 r 表示,简称矢径 r .

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

$$F = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0 r^2} e_r \quad (5-6)$$

式中 $\mathbf{e}_r$ 为矢径的单位矢量. 根据场强的定义可以得到

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{e}_r \quad (5-7)$$

式(5-7)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, 从由式(5-7)中可以看出点电荷产生电场的规律, 若 $q > 0$, 则 $\mathbf{E}$ 与 $\mathbf{e}_r$ 同向, 即在正电荷周围的电场中, 任意一点的场强沿该点的矢径方向(见图 5-5(a)); 若 $q < 0$, 则 $\mathbf{E}$ 与 $\mathbf{e}_r$ 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 5-5(b)). 式(5-7)还说明点电荷的场是球对称的非均匀电场, 即在以 q 为心的任意球面上场强大小相等, 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.

2. 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

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

式中 r_i 为场点 P 到点电荷 q_i 的距离, $\mathbf{e}_{ri}$ 为 P 到 q_i 矢径的单位矢量. 按场强叠加原理, 总场强为

$$\mathbf{E} = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} \mathbf{e}_{r1} + \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r_2^2} \mathbf{e}_{r2} + \cdots + \frac{q_n}{4\pi\epsilon_0 r_n^2} \mathbf{e}_{rn} = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i^2} \mathbf{e}_{ri} \quad (5-8)$$

式(5-8)就是点电荷系电场强度的计算公式.

根据式(5-8), 很容易求出两个等量异号点电荷在其延长线和中垂线上任一点的场强. 若两个大小相等符号相反的点电荷 $+q$ 和 $-q$, 当它们之间的距离 l 比所考虑的场点到两者的距离小得多时, 这一电荷系统称为电偶极子. 连接两电荷的直线称为电偶极子的轴线, 取由 $-q$ 到 $+q$ 的方向为轴线的正方向 l , 电荷量 q 和 l 的乘积定义为电偶极矩, 简称电矩. 电矩是矢量, 方向为沿轴线 l 的正方向.

$$\mathbf{p}_e = q\mathbf{l} \quad (5-9)$$

根据场强叠加原理, 若已知电偶极子的电矩为 $\mathbf{p}$, 则电偶极子在其连线的延长线上任意一点的电场强度 $\mathbf{E}_A = \frac{2\mathbf{p}}{4\pi\epsilon_0 r^3}$, 在其连线的中垂线上任意一点的电场强度为

$$\mathbf{E} = -\frac{\mathbf{p}}{4\pi\epsilon_0 r^3} \quad (\text{式中 } r \text{ 是场点到电偶极子中心的距离}).$$