

- 武汉大学本科生系列教材
- 张援农 宋骞 李吉星 编

(电磁学部分)

基础物理教程

(中)

武汉大学出版社

基础物理教程(中)

(电磁学部分)

张振农 宋 骥 李吉星 编

武汉大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

基础物理教程 (中): 电磁学部分/张援农, 宋 骞, 李吉星编. —武汉: 武汉大学出版社, 1999. 3

ISBN 7-307-02680-5

I. 基… I. ①张… ②宋… ③李… III. ①物理学—高等学校—教材 ②电磁学—高等学校—教材 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 33550 号

武汉大学出版社出版

(430072 武昌 珞珈山)

湖北科学技术出版社黄冈印刷厂印刷

(436100 湖北省黄冈市宝塔大道 85 号)

新华书店湖北发行所发行

1999 年 3 月第 1 版 1999 年 3 月第 1 次印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 13.625

字数: 349 千字 印数: 1—3000

ISBN 7-307-02680-5/O · 200 定价: 14.50 元

本书如有印装质量问题, 请寄承印厂调换

内 容 简 介

本书内容为电磁学部分，在保持电磁理论的系统性和完整性的基础上，原理的论述和概念的解释简练、精辟，突出重点，在内容上根据专业需要作适当的取舍，注意该课程与相关课程的衔接，注重对实际问题的分析，强调理论的应用。在相应章节增加了电磁传感器的原理及应用，加强了电磁波的内容。

本书可作为非物理类专业，尤其是电子信息类专业、计算机类专业、自动控制及仪器仪表等理工科专业的物理教材，也可兼作普通高等学校师生的教学参考书。

目 录

第一章 真空中的静电场	(1)
§ 1.1 电荷 库仑定律	(1)
§ 1.2 电场 电场强度	(8)
§ 1.3 高斯定理	(18)
§ 1.4 电势及其与场强的关系	(33)
思考题一	(54)
习题一	(55)
第二章 静电场中的导体和电介质	(62)
§ 2.1 静电场中的导体	(62)
§ 2.2 电容 电容器	(79)
§ 2.3 静电场中的电介质	(88)
§ 2.4 电场的能量 能量密度	(109)
* § 2.5 压电效应及压电式传感器	(114)
* § 2.6 电容式传感器	(116)
思考题二	(120)
习题二	(124)
第三章 稳恒电流	(133)
§ 3.1 电流的稳恒条件和导电规律	(133)
§ 3.2 电源及电动势	(153)
§ 3.3 稳恒电流电场的若干性质	(164)

§ 3.4	基尔霍夫定律的理论基础	(169)
§ 3.5	温差电现象与脱出功	(174)
* § 3.6	电阻式传感器和热电式传感器	(181)
	思考题三	(185)
	习题三	(188)
第四章	稳恒磁场	(195)
§ 4.1	磁场 磁感应强度矢量	(195)
§ 4.2	毕奥-萨伐尔定律及应用	(201)
§ 4.3	磁场的“高斯定理”与安培环路定理	(212)
§ 4.4	磁场对载流导线的作用力	(222)
§ 4.5	带电粒子在电场和磁场中的运动	(237)
§ 4.6	霍尔效应及应用	(251)
	思考题四	(257)
	习题四	(263)
第五章	磁场中的磁介质	(271)
§ 5.1	磁介质的磁化 磁化强度矢量 $\mathbf{M}$	(271)
§ 5.2	磁介质中的安培环路定理 磁场强度矢量 $\mathbf{H}$	(279)
§ 5.3	铁磁质	(286)
§ 5.4	磁路定理	(294)
* § 5.5	磁性材料的应用	(301)
	思考题五	(305)
	习题五	(308)
第六章	电磁感应	(313)
§ 6.1	电磁感应定律	(313)
§ 6.2	动生电动势和感生电动势	(321)

§ 6.3 自感和互感	(336)
§ 6.4 磁场的能量	(344)
* § 6.5 涡电流 趋肤效应	(351)
思考题六	(355)
习题六	(358)
第七章 麦克斯韦方程	(365)
§ 7.1 麦克斯韦的另一个假设——位移电流	(365)
§ 7.2 麦克斯韦方程	(373)
§ 7.3 场论和路论的关系	(378)
思考题七	(382)
习题七	(383)
第八章 电磁波	(385)
§ 8.1 平面电磁波	(385)
§ 8.2 电磁场的能流密度与动量	(390)
§ 8.3 电磁波的辐射	(399)
§ 8.4 电磁波谱	(405)
思考题八	(407)
习题八	(409)
附 录	(412)
一、物理常数	(412)
二、国际单位制及其符号	(413)
三、国际单位制词冠及其符号	(414)
四、一些矢量公式	(414)
习题答案	(416)

第一章 真空中的静电场

§ 1.1 电荷 库仑定律

电磁学是研究电磁现象的规律的学科。对电磁学的研究可以追溯到公元前 6 世纪, 希腊学者泰勒斯 (Thales) 曾记载了琥珀摩擦后能吸引轻微物体。在我国, 最早是在公元前 4 到 3 世纪的战国时代, 当时人们已经知道琥珀摩擦后能吸引轻微物体, 天然磁石能够吸铁。但对电磁现象的系统研究, 只能说在 16 世纪才开始, 1600 年吉尔伯特 (W. Gilbert) 在英国发表一篇论文“De Magnete”, 揭示了关于电学和磁学的许多新事实, 使这些领域进入了真正的科学研究阶段。特别是吉尔伯特发现, 起电现象绝不只限于琥珀, 而是一种普遍现象。物体能产生电磁现象, 现在都归因于物体带上了电荷以及这些电荷的运动。静电学研究的对象是相对观察者静止的电荷和它周围的电场。

一、电荷

通过电荷的各种相互作用和效应的研究, 人们现在认识到电荷的基本性质有以下几个方面:

1. 电荷的种类

自然界的一切物体都能够带电, 即可以获得电荷。电荷的存在, 表现于一个带电体与其他带电体之间存在相互作用。电荷有两种, 同种电荷相斥, 异种电荷相吸。美国物理学家富兰克林 (B. Franklin) 首先以正电荷、负电荷的名称来区分两种电荷, 这种命名法一直延续到现在。把用丝绢摩擦过的玻璃棒所带的电叫正电,

把用毛皮摩擦过的硬橡皮棒所带的电叫负电。物体所带电荷的量值叫电量,用 Q 或 q 表示,电量的单位名叫库仑,记作 C 。

2. 电荷的量子效应

实验证明,在自然界中,电荷的量值是不连续的,电荷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。电荷的基本单元就是一个电子所带电量的绝对值,常以 e 表示。 $e = 1.602 \times 10^{-19} C$ 。近代物理从理论上提出存在具有 $\frac{1}{3}e$ 和 $\frac{2}{3}e$ 电荷的基本粒子(夸克),但至今仍未找到自由夸克。即使发现了带分数电荷的粒子,也不破坏电荷的量子性,只是最小基本单元不同而已。

我们讨论电磁现象的宏观规律时,所涉及的电荷常常是基本电荷的许许多多倍,而基本电荷很小,所以宏观电荷的电量都可以看成是连续变化的。

3. 电荷守恒

对于一个系统,如果没有净电荷出入其边界,称为电孤立系统。电孤立系统的电荷总量保持不变,它既不能创生,也不能消灭,只能从系统内的一个物体转移到另一个物体,或者从物体的一部分转移到另一部分,不论发生怎样的变化过程,系统电量的代数和保持不变,这个结论称为电荷守恒定律。

现代物理研究表明,在粒子的相互作用过程中,等量正负电荷是可以产生和消失的,然而电荷守恒并未因此而遭破坏。例如,电子和正电子在相遇时将湮没,即转变为中性的 γ 光子, $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$; 一个 γ 光子与一个重原子核作用时,该光子可转化为一个正电子和一个负电子。在这个过程中正负电荷总是成对出现或成对消失,并不改变系统中电荷数的代数和,因而电荷守恒定律仍然有效。实验表明电荷守恒定律不仅在一切宏观过程中成立,而且在已知的一切微观过程中普遍成立。它是物理学中重要的基本规律之一。

4. 电荷的相对论不变性

从不同的惯性参考系中测量同一电荷,所得的电量都相等,因而电荷乃是相对论性不变量。因此,电荷的电量与该电荷运动状态无关。

应当指出,电荷守恒定律与电荷的相对论不变性是紧密相互联系的。要是电荷的量值与电荷的速度有关,则当我们使某一种符号的电荷运动起来时,孤立系统的总电量就会改变了。

5. 电荷究竟是什么?

有人说,电荷就是电子质子等基本粒子,这是不对的。电子、质子带有电荷,但它们并非“电荷”。和物体的质量一样,电荷也是物体的一种属性,而不是附加于物体的额外东西,离开了这些基本粒子它便不能存在。我们为了表示电力的强度规定了电荷量,电荷量即电荷的量或称电荷的大小。

二、物质的电结构

近代物理学告诉我们,物质是由分子、原子组成的,而原子又由带正电的原子核和带负电的电子组成。原子核中有质子和中子,中子不带电,质子带正电。一个质子所带电量与一个电子所带电量数值相等(相等的精确度达到 10^{20} 分之一)。原子半径数量级为 10^{-10}m ,而原子核半径的数量级则约为 10^{-15}m 。

物质内部固有地存在着电子和质子这两类基本电荷正是各种物体带电过程的内在根据。带电现象是由于电子的迁移——从一个物体转移到另一物体或者是从同一物体的一部分转移到另一部分——引起的。

在金属导体里,原子中的最外层电子(价电子)可以摆脱原子的束缚,在整个导体中做自由运动。这类电子叫自由电子。原子中除价电子外的其余部分叫原子实。

一切导体所以能够导电,是因为它们内部都存在着大量可以自由移动的电荷,称自由电荷。在不同类型导体中,自由电荷的微

观本质是不一样的。金属中自由电荷就是自由电子。在电解液中,它们没有自由电子,而是自由运动的正负离子。

在绝缘体中,绝大部分电荷都只能在一个原子或分子范围内作微小的位移,这和电荷叫做束缚电荷。由于绝缘体中自由电子很少,所以它的导电性很差。

半导体中的导电粒子叫载流子,除带负电的电子外,还有带正电的“空穴”。它的导电能力介于导体和绝缘体之间。载流子为电子时,半导体称为 n 型半导体;载流子为“空穴”时,半导体称为 p 型半导体。

三、库仑定律

对电现象的定量研究,是从电荷的相互作用开始的。带电体之间相互作用力与带电体的几何形状、电荷种类及电量有关。点电荷之间相互作用力所遵从的规律,是库仑(Coulomb)于 1785 年从实验中总结出来的。点电荷是指这样的带电体,它的几何线度与它到其他带电体的距离相比小得多。这样,在研究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。点电荷本身不一定是非常小的带电体。

至于带电体的线度要比带电体之间的距离小多少才能被看成点电荷,没有一个绝对的标准,它取决于所研究的问题要求的精确度。

库仑定律的表述为:真空中两静止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联线,同号电荷相斥,异号电荷相吸。

令 F_{12} 代表电荷 q_1 给 q_2 的作用力, r_{12} 代表由 q_1 到 q_2 方向的单位矢量, 则

$$F_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} r_{12} \quad (1.1.1)$$

无论 q_1 、 q_2 的正负如何, 此式都适用。当 q_1 、 q_2 同号时, F_{12} 沿 r_{12} 的方向, 即为排斥力; 当 q_1 、 q_2 异号时, q_1 、 q_2 乘积为负, F_{12} 沿 r_{12} 的负方向, 即为吸引力。由此式还可以看出, 两个静止的点电荷之间作用力符合牛顿第三定律, 即

$$F_{21} = -F_{12} \quad (1.1.2)$$

在国际单位制(SI)中, 电量的单位为库仑(C)。在 SI 中, 距离 r 用米(m), 力 F 用牛顿(N)作单位, 实验测定比例系数 k 为

$$k = 8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$$

通常还引入另一常数 ϵ_0 来代替 k 使

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

于是, 真空中库仑定律就可写成

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} r_{12} \quad (1.1.3)$$

这里引入的 ϵ_0 叫真空中的介电常数, 在 SI 中它的数值为

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{N} \cdot \text{m}^2$$

库仑定律(1.1.3)式给出了处在真空中的两点电荷之间的作用力, 在物理学中, 把没有原子或分子存在的空间称为真空。但真空并非是一无所有的空间, 正如以后将看到的, 真空中存在着场。库仑定律中的电荷相对观察者(或实验室参照系)都处于静止状态。实验表明, 静止电荷对运动电荷的作用力仍由(1.1.3)式给出; 但是, 运动电荷对静止电荷的作用力一般不能用库仑定律来计

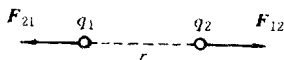


图 1-1 库仑定律
(q_1 、 q_2 同号)

算,因为运动电荷的电效应比较复杂。库仑定律指出,两静止电荷间的作用力是有心力,力的大小与距离的关系服从平方反比律。我们将看到,静电场的基本性质正是由静电力的这两个特性决定。

最后我们指出,虽然库仑定律是通过宏观带电体的实验研究总结出来的规律,但物理学的研究表明:原子结构、分子结构,固体、液体的结构,以至化学作用等问题的微观本质都和电磁力(其中主要部分是库仑力)有关。而在这些问题中,万有引力的作用都是十分微小的。

例 1-1, 氢原子中电子和质子的距离约为 $5.3 \times 10^{-11} \text{m}$, 此两粒子间的电力和万有引力各为多少:

解:由于电子与质子之间的距离约为它们本身直径的 10^5 倍,故电子与质子都可看成点电荷。质子带的电荷为 $+e$, 电子带的电荷为 $-e$, 故它们之间的库仑力为引力。由式(1.1.3), 库仑力的大小为

$$\begin{aligned} F_e &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} \\ &= \frac{(9.0 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)(1.6 \times 10^{-19} \text{C})^2}{(5.3 \times 10^{-11} \text{m})^2} \\ &= 8.1 \times 10^{-8} \text{N} \end{aligned}$$

此外,电子的质量 $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{kg}$, 质子的质量 $m_p = 1.7 \times 10^{-27} \text{kg}$, 由万有引力定律知,电子和质子间万有引力的大小为:

$$\begin{aligned} f_g &= G \frac{mM}{r^2} \\ &= \frac{(6.7 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2)(9.1 \times 10^{-31} \text{kg})(1.7 \times 10^{-27} \text{kg})}{(5.3 \times 10^{-11} \text{m})^2} \\ &= 3.7 \times 10^{-47} \text{N} \end{aligned}$$

而

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

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。而当讨论宇宙中天体的大尺度结构和运动问题时,只涉及吸力,因为行星、恒星、星系等等都是电中性的。

库仑定律是关于一种基本力的定律,它的正确性不断经历着实验的考验。设定律分母中 r 的指数为 $2 + \alpha$,人们曾设计了各种实验来确定(一般是间接地) α 的上限。1773 年卡文迪许(H. Cavendish)的静电实验给出 $|\alpha| \leq 0.02$ 。约百年后麦克斯韦(J. C. Maxwell)的类似实验给出 $|\alpha| \leq 5 \times 10^{-5}$ 。1971 年威廉斯等人的实验得出 $|\alpha| \leq (12.7 \pm 3.11) \times 10^{-16}$ 。这些都是电荷间距在厘米到米的范围内得出的结果。对于很小的范围,卢瑟福的 α 粒子散射实验(1910 年)证实小到 10^{-15}m 的范围,现代高能电子散射实验更证实小到 10^{-17}m 的范围,库仑定律仍然成立。大范围的结果是通过人造地球卫星研究地球磁场时得到的。它给出库仑定律精确地适用于大到 10^7m 的范围。令人感兴趣的是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;如果光子的静止质量为零,则该指数严格地为 2。现在的实验给出光子的静止质量上限为 10^{-48}kg ,这差不多相当于 $|\alpha| \leq 10^{-16}$ 。

库仑定律给出了两个静止的点电荷间的作用力,当两个以上的静止的点电荷之间相互作用时,实验表明:两个点电荷之间的作用力不因第三个点电荷的存在而改变。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作用力的矢量和,这个事实叫**叠加原理**。叠加原理是由实验事实推论得到的。直到现在,至少在宏观范围内,尚未发现违反叠加原理的事实。但绝不可认为叠加原理是理所当然成立的,在某些非常小的距离范围如原子或亚原子范围内,叠加原理并不成立。

库仑定律与叠加原理是关于静止电荷相互作用的两个基本实验定律,它们构成了整个静电学的基础,应用它们原则上可以解决

静电学中的全部问题。

§ 1.2 电场 电场强度

一、电场

库仑定律给出了两个静止点电荷之间的相互作用力,但并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,但都可以发生相互作用。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,这就是超距作用的观点,即

电荷 $\longleftrightarrow$ 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,这就是近距作用的观点。传递相互作用力的中间物,历史上最早认为是一种特殊的弹性介质——“以太”。

近代物理学的发展证明,超距作用的观点是错误的,近距作用的观点是正确的。电力(磁力也如此)在真空中是以光速 $c = 299\,792\,485$ 米/秒传递,但“以太”并不存在。

静止电荷之间的相互作用力是通过电场实现的。任何一个电荷都要改变自己周围空间的性质,即在其周围空间产生电场。电场的存在表现在:它对处在其中的任何其他电荷都有作用力,称为电场力。因此,电荷之间的作用方式可以表示为

电荷 $\longleftrightarrow$ 电场 $\longleftrightarrow$ 电荷

如果电荷相对于观察者来说是静止的,那么在其周围产生的电场称为静电场。

场是物质的一种形式,它是客观存在的。近代物理学的理论和实验完全证实了场的观点的正确性。电场以及磁场已被证明是

一种客观实在,它们运动(或传播)的速度是有限的,这个速度就是光速。电磁场与实物一样具有能量、质量和动量。场和实物是物质存在的两种形式。

二、电场强度

既然电场对电荷有作用力,那么就可以根据电场对电荷的作用情况来定量地研究电场。为此,可利用试探电荷 q_0 。试探电荷是一个带电量很小和几何线度很小的电荷。试探电荷所带的电荷量及所占空间必须很小,这样才能保证将它引入电场后,在实验精确度范围内,不会对原有的电荷分布有任何影响,因而对原有电场不会有影响,并且测得的是空间某一点的量值。这样便可用它来研究空间各点电场的性质。

把试探电荷 q_0 放在电场中不同点时,发现 q_0 所受到的力的大小和方向是逐点不同的。但在电场中一给定点处, q_0 所受的力的大小和方向都是完全一定的。如果在电场中某点先后放置电量分别为 $q_0, 2q_0, 3q_0 \cdots$ 的试探电荷,它们所受的电场力则相应为 $F, 2F, 3F \cdots$ (如果 q_0 的正负改变,力将反向)。因此,对于电场中某一给定点而言,比值 F/q_0 是一个大小和方向都与试探电荷无关的矢量,它反映了电场本身的性质。我们把它定义为电场强度,简称场强,用 E 表示:

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (1.2.1)$$

在上式中,如果取 $q_0 = +1$, 即得 $E = F$, 由此可见,电场中某点的电场强度在量值和方向上等于单位正电荷在该点处所受的力。

一般说来,空间各点的场强,其大小和方向是不同的,即场强是空间位置坐标的矢量函数 $E(x, y, z)$ 。如果电场中各点的场强,其大小和方向都相同,叫做均匀电场。

在国际单位制中,场强的单位是牛顿/库仑(N/C),通常也写成伏特/米(V/m),这两种表示法是等同的。后一种表示法在以后

会见到。

例 1-2 点电荷的场强

解:设在真空中有一点电荷 Q , 在离该电荷 r 远的 P 点的场强可计算如下: 设想在 P 点处放一试探电荷 q_0 , 由库仑定律, q_0 的受力为

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 Q}{r^2} \boldsymbol{r}$$

式中 $\boldsymbol{r}$ 是 Q 到 P 点的单位矢径。根据电场强度的定义, P 点的场强是

$$\boldsymbol{E} = \frac{\boldsymbol{F}}{q_0} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \boldsymbol{r} \quad (1.2.2)$$

如果 $Q > 0$, $\boldsymbol{E}$ 的方向与 $\boldsymbol{r}$ 的方向一致; 如果 $Q < 0$, $\boldsymbol{E}$ 的方向与 $\boldsymbol{r}$ 的方向相反, 如图 1-2 所示。

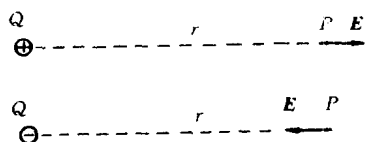


图 1-2 点电荷的场强

在上面的计算中, 场点 P 是任意的, 所以我们已经得出了点电荷 Q 激发的电场在空间的分布状况: (1) $\boldsymbol{E}$ 的方向处处沿以 Q 为中心向外的矢径 ($Q > 0$) 或其反向 ($Q < 0$); (2) $\boldsymbol{E}$ 的大小只与距离 r 有关, 在以 Q

为中心的球面上场强的大小相等。通常说这样的电场是球对称的。

三、电场强度叠加原理

设有一系列点电荷 $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$ 分布于真空中, Q_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 到空间中某点 P 的距离分别为 r_i ($i = 1, 2, \dots, n$)。如在 P 点放一个试探电荷 q_0 , 由库仑力的叠加原理可知, q_0 所受作用力等于各电荷单独存在时对 q_0 的作用力的叠加, 即