

基础物理教程之三

电 磁 学

张玉民 戚伯云 编

中国科学技术大学出版社



基础物理教程之三

电 磁 学

张玉民 戚伯云 编

中国科学技术大学出版社

1997·合肥

图书在版编目(CIP)数据

电磁学/张玉民 戚伯云 编. —合肥:中国科学技术大学出版社,1997年9月

ISBN 7-312-00942-5

I 电磁学

II 张玉民 戚伯云

III ①基础物理 ②电磁学

IV O

中国科学技术大学出版社出版发行

(安徽省合肥市金寨路96号,230026)

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本:850×1168/32 印张:17.5 字数:455千

1997年9月第一版 1997年9月第一次印刷

印数:1—5000册

ISBN 7-312-00942-5/O · 196 定价:16.80元

JYI/186/02

基础物理教程

尹鸿钧 主编

- ☐ 力学
- ☐ 热学
- ☒ 电磁学
- ☐ 光学
- ☐ 原子物理学

内 容 提 要

本书为中国科学技术大学尹鸿钧教授主编的《基础物理教程》第三分册。

本书在着重对电磁学基本概念、基本规律与基本方法进行阐述的基础上,重视内容取材的更新,适当增添一些与电磁学相关的现代科技知识介绍,使学生开阔眼界、扩大知识面.在内容讲述上,力求做到突出重点、层次分明、由浅入深、易于理解.为帮助读者加深对基本概念和规律的理解,书中精选了不少有启发性的例题.结合各章所讲内容,章末均附有一定难度和数量的习题,供学生课后练习和检验对内容的理解程度.

本书可作为综合大学、理工科院校及师范院校的普通物理电磁学教材,也可供大专院校、中学物理教师及教学研究者参考.

《基础物理教程》编委会

主编：尹鸿钧

编委：程福臻

朱栋培

程稼夫

张玉民

戚伯云

吴 强

郭光灿

陈宏芳

前 言

中国科学技术大学正在积极进行着“面向 21 世纪教学内容和课程体系改革”的研究和探索. 在深入研讨大学物理教学的目的、任务和改革方案时, 我们深切地感到必须从培养人才的全面素质、人才的培养规格、模式、方法等方面来思考和定向. 我校提出的基础“宽、厚、实”, 专业“精、新、活”, 注意培养“全面素质”和注重培养“创新精神”的教学原则, 应该在我校大学物理教学中得到充分体现.

我们在制定新的教育教学计划、课程设置、课程体系的过程中, 按学科群组织实施教学, 将大学物理分为 3 种类型: (1) 物理学科群, 按 18 学分课程设计, 编写了《普通物理》教材共 5 册, 已由高等教育出版社陆续出版; (2) 非物理类学科群, 按 12 学分课程设计, 编写了《基础物理教程》共 5 册, 由中国科学技术大学出版社陆续出版; (3) 经营管理、人文科学、社会科学类学科群, 按 8 学分课程设计, 编写了《基础物理简明教程》, 也即将由中国科学技术大学出版社出版. 我校 95 级本科生已经开始全面使用这 3 套教材, 以期进一步取得教学实践的经验, 深化我校大学物理的教学改革.

本套《基础物理教程》是非物理类学科群使用的教材, 共 5 册: 力学、热学、电磁学、光学、原子物理学. 在编写过程中, 我们遵循以下两条基本原则:

(1) 使学生对物理学的内容和方法, 物理图像和概念, 工作语言, 历史、现状和前沿状况有一个整体的理解和掌握, 力求将当今前沿科学和技术问题中的物理内核在基础层次上反映到教学内容中来.

(2) 对学生进行物理素质这一科学素质重要方面的培养, 培养

学生科学思维,逐步掌握正确的科学研究方法,具有提出和解决问题、探索自然规律的能力,并具有创新精神.

由于我们水平、能力、教学实践范围的限制,错误和不妥之处在所难免,欢迎使用本教材的老师 and 同学批评指正.

中国科学技术大学副校长、教授

尹鸿钧

1996 年 1 月于合肥

目 次

前 言	I
第一章 真空中的静电场	1
1.1 电荷与库仑定律	1
1.2 电场与电场强度	11
1.3 静电场的高斯定理及其应用	24
1.4 静电场的环路定理与电势	39
1.5 电场对带电系统的作用力	57
习题	63
第二章 静电场与物质的相互作用	71
2.1 物质的电性质	72
2.2 静电场中的导体	76
2.3 孤立导体的电容与电容器	93
2.4 静电场中的电介质	100
2.5 带电系统的静电能与电场的能量	131
习题	158
第三章 稳恒电流	173
3.1 电流的稳恒条件与欧姆定律	173
3.2 非静电力与电源电动势	183
3.3 复杂电路与基尔霍夫定律	199
习题	205
第四章 稳恒磁场	212

4.1	磁现象与安培定律	212
4.2	稳恒磁场与毕奥-萨伐尔定律	223
4.3	稳恒磁场的基本性质	237
4.4	安培力与洛伦兹力	253
* 4.5	不同参考系中的电磁场	280
	习题	299
第五章 磁场与物质的相互作用		308
5.1	磁介质的磁化与有磁介质的磁场	308
5.2	有介质磁场的性质与磁介质磁化规律	312
5.3	边界条件与磁路定理	326
5.4	磁场的唯一性定理与几种磁场解讨论	335
5.5	磁荷法	348
	习题	362
第六章 电磁感应		366
6.1	电磁感应定律	366
6.2	动生电动势与感生电动势	375
6.3	互感与自感	389
6.4	涡电流与趋肤效应	395
6.5	暂态过程	400
6.6	磁能	407
	习题	416
第七章 交流电		426
7.1	描述简谐交流电的特征量	428
7.2	似稳条件	431
7.3	交流电路中的元件及其性质	434
7.4	交流电路的分析方法	441

7.5 交流电路的电功率	467
7.6 变压器	473
习题	479
第八章 电磁场的麦克斯韦方程组和电磁波	485
8.1 实验规律的总结和推广	485
8.2 麦克斯韦方程组和边界条件	493
8.3 电磁波	495
8.4 电磁波的辐射	503
8.5 电磁波谱	507
8.6 电磁场的能量与动量	509
习题	515
附录一 物理常数表	519
附录二 矢量分析中的常用公式	521
习题答案	529

第一章 真空中的静电场

1.1 电荷与库仑定律

自然界一切电磁现象都起源于物质具有电荷属性,电现象起源于电荷,磁现象起源于电荷运动,所以“电荷”概念是电磁学中的第一个重要概念.

一、电荷与电荷守恒定律

人类对电现象的认识开始于摩擦起电.早在两千五百年多前,人们发现用琥珀(一种矿物化了的树脂)同毛皮摩擦之后具有吸引轻小物体(如毛发、羽毛等)的性质.后来又发现,除琥珀外,硫磺、水晶、金钢石、橡胶棒、玻璃棒等同毛皮或丝绸摩擦后,都有这种吸引轻小物体的性质.经摩擦后的物体具有吸引轻小物体的性质,就说这物体带了电,或者说物体上有了电荷.带电荷物体称为带电体,带电体上所带电荷的数量称为电量.使物体带电称为起电,通过摩擦方法使物体带电称为摩擦起电.

实验指出:任何两个带电体之间都有相互作用力.经毛皮摩擦过的两根橡胶棒之间有相互排斥力,经丝绸摩擦过的两根玻璃棒之间也有相互排斥力,这表明带同种性质电荷的物体间存在斥力.经毛皮摩擦过的橡胶棒与经丝绸摩擦过的玻璃棒之间的作用力是引力而不是斥力,这表明它们所带电荷的电性不同.大量实验表明,任何带电体同用丝绸摩擦过的玻璃棒之间的作用力不是斥力就是引力,而且同这玻璃棒相排斥的带电体,同用毛皮摩擦过的橡胶棒一定相吸引,同玻璃棒相吸引的带电体,同橡胶棒一定排斥.

这表明：自然界的电荷就其电性质而论，只有两种电荷，不是与丝绸摩擦过的玻璃棒上电荷同性质的电荷，就是与毛皮摩擦过的橡胶棒上电荷同性质的电荷。1747年，美国科学家富兰克林(B. Franklin)把自然界中与丝绸摩擦过的玻璃棒上电荷性质相同的电荷称为正电荷，与毛皮摩擦过的橡胶棒上电荷性质相同的电荷称为负电荷，这种对自然界两种电荷的命名一直沿用至今。为区分这两种电荷，习惯上把正电荷的电量用正数值表示，负电荷的电量用负数值表示。

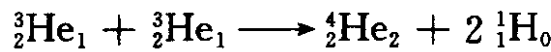
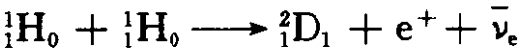
以上对电荷的讨论比较笼统，电荷到底是什么？是物质的一种属性，还是不依附于任何物体而独立存在的东西？用近代物理学的观点来看，电荷是一些基本粒子（如电子、质子、 $\mu^\pm$ 子、 $\pi^\pm$ 介子等）的一种属性，自然界不存在不依附于任何物体的“单独电荷”这种东西。通过摩擦或静电感应方法之所以会使宏观物体显示出带电性质，是由于各种宏观物体都是由原子（或分子）组成的，而原子是由带负电荷的电子和由带正电荷的质子与不带电荷的中子组成的原子核所构成的。正常原子中，原子核内的质子数与核外电子数相等，而每个质子所带正电荷电量与电子所带负电荷电量的绝对值（用符号 e 表示）相等，所以一个原子内的正、负电荷电量的绝对值相等，对外其正、负电性相消，加之宏观物体内部分子热运动的进一步均匀搅拌，正常的宏观物体对外呈现出不带电的电中性状态。通过摩擦或静电感应，会使宏观物体内部电子转移到另一宏观物体上，或使宏观物体上带负电荷的电子的均匀分布状态遭到破坏，这样有过剩电子的宏观物体（或宏观物体部分区域）对外呈现带负电性质，而缺少电子的宏观物体（或宏观物体部分区域）对外显示出带正电性质。这就是宏观物体带电的情景。

上面已讲到，电荷是带电基本粒子的一种属性。实验上又发现所有带电基本粒子的电荷电量都是电子电荷电量绝对值 e 的正、负整数倍。而 e 的精确值实验测得为

$$e = 1.6021892(46) \times 10^{-19} \text{C}.$$

所以自然界任何宏观带电体所带电荷电量的最小变化量为 e , 即带电体电量的改变是一份一份地增加或减小, 每一份的电量值为 e , 这称为电荷的量子化. 电量 e 对宏观电磁测量仪器来说是太小了, 以致于 e 电量对宏观测量带来的影响无法察觉, 所以在以研究宏观电磁现象规律为其内容的经典电磁学中, 一般不考虑电荷的量子化, 任何宏观带电体的电量变化量 Δq 宏观上仍可看做是连续变化的随意小量.

大量实验事实表明: 对于任何一个没有净电量出入其边界面的物质系统(称为电孤立系统), 不管系统内的物质如何运动或变化, 系统内正、负电荷电量的代数和, 即系统的总电量将保持不变. 这是一条自然界的普遍规律, 称为电荷守恒定律. 对于摩擦起电来说, 摩擦前的玻璃棒和丝绸可看做一个电孤立系统, 系统的总电量为零, 摩擦后, 玻璃棒上带的正电荷电量 q 一定等于丝绸上带的负电荷电量 $-q$, 系统总的电量仍等于零. 如果以玻璃棒作为我们的研究系统, 在同丝绸接触摩擦时, 这不是一个电孤立系统, 摩擦过程中玻璃棒里的部分电子将带着负电荷通过其表面(边界面)跑到丝绸上, 或者说通过玻璃棒的边界面有正电荷从丝绸流到了玻璃棒上, 摩擦前后玻璃棒上电量的改变量就等于摩擦过程中从玻璃棒表面流进的正电荷电量. 因此, 电荷守恒定律也可以这样叙述: 一个系统内电荷的总电量的改变量等于通过其边界流入的净电荷电量. 电荷守恒定律的这种表述的数学表达式, 我们将在第三章中给出. 电荷守恒定律不管在宏观领域还是在微观领域都是成立的. 譬如在核反应、核衰变、核聚变乃至基本粒子的产生、湮灭过程中, 都是成立的. 下面是太阳上核聚变反应的一种可能链式反应过程:



其中, 每一步反应都是遵守电荷守恒定律的. 高能光子在重核作用下产生正、负电子的过程

$$\gamma \xrightarrow{\text{(重核旁)}} e^- + e^+$$

也满足电荷守恒定律.

最后需指出,大量事实表明,带电体所带电荷的电量与带电体的运动速度无关.带电体相对于不同的参考系,其运动速度是不同的,但其电荷电量是相同的,这与物体的质量随其速度变化而改变不同,称之为电荷的相对论不变性.

二、库仑定律

任何两个带电体之间都有相互作用力.两个静止带电体间的相互作用力,一般与两带电体的形状、大小、电荷在它们上面的分布情况以及它们之间的相对距离都有关系.实验发现,随着两带电体之间的距离增大,它们之间的作用力受它们的大小、形状及电荷分布情况的影响会减小.当两个带电体之间的距离远远大于它们本身的线度时,它们之间的相互作用力受它们的大小、形状及电荷分布情况的影响可以忽略,在这种情况下,两个带电体可以简化为两个具有一定电荷电量的空间点.这种具有一定电量而可以忽略其体积大小、形状及其电荷分布情况对所讨论问题的影响的带电体,称为点电荷.“点电荷”与力学中的“质点”一样,是抽象化了的理想模型,借助这种模型,可以把很小的带电体所带电量与其空间位置这两个因素在所讨论的问题中突出出来进行研究,而把带电体的大小、形状及其上的电荷分布等次要因素忽略掉,从而使问题得以简化,待主要因素对问题的影响关系搞清楚之后,再去研究那些次要因素对问题的影响就方便多了.这种借理想模型使问题简化的方法,是物理学中研究问题的一种重要方法,也是“抓主要矛盾”这一原则的具体运用.

直到 18 世纪中叶,人们对电磁现象的研究基本上还是处于定性的观察摸索阶段.1785 年,法国物理家库仑(C. A. Coulomb, 1736~1806)利用他自己设计的库仑扭秤研究了两个可视为点电

荷的静止带电体之间的相互作用力,并发表了著名的库仑定律,从此电磁学的研究才进入了定量的实验研究阶段.

库仑定律用文字表述为:真空中两个静止点电荷之间的作用力与它们所带电荷的电量乘积成正比,与它们之间的距离平方成反比,作用力的方向沿它们之间的连线,同性电荷为斥力,异性电荷为引力.如果用 q_1, q_2 分别表示两个点电荷的电量, $\mathbf{r}_{12} = r_{12} \hat{\mathbf{r}}_{12}$ 表示从点电荷 q_1 到点电荷 q_2 的距离矢量(r_{12} 为 q_1 与 q_2 之间的距离, $\hat{\mathbf{r}}_{12} = \frac{\mathbf{r}_{12}}{r_{12}}$ 为从 q_1 指向 q_2 方向的单位矢量), $\mathbf{r}_{21} = r_{21} \hat{\mathbf{r}}_{21}$ 表示从点电荷 q_2 到点电荷 q_1 的距离矢量($r_{21} = r_{12}$, 仍为 q_1 与 q_2 之间的距离; $\hat{\mathbf{r}}_{21} = \frac{\mathbf{r}_{21}}{r_{21}} = -\hat{\mathbf{r}}_{12}$, 为从 q_2 指向 q_1 方向的单位矢量),则按库仑定律,点电荷 q_1 作用于点电荷 q_2 的静电力 $\mathbf{f}_{12}$ 和点电荷 q_2 作用于点电荷 q_1 的作用力 $\mathbf{f}_{21}$ 分别为

$$\mathbf{f}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \hat{\mathbf{r}}_{12}, \quad (1-1-1)$$

$$\mathbf{f}_{21} = k \frac{q_1 q_2}{r_{21}^2} \hat{\mathbf{r}}_{21}. \quad (1-1-1')$$

显然, $\mathbf{f}_{12} = -\mathbf{f}_{21}$, 两静止电荷间的静电力满足牛顿第三定律.

(1-1-1)式和(1-1-1')式是库仑定律的数学表达式,它们一方面表明两静止点电荷间的静电力(也叫库仑力)与它们的电量 q_1, q_2 的乘积成正比,与其距离 $r_{12} = r_{21}$ 的平方成反比,作用力的方向沿其连线;另一方面也表明了两点电荷所带电荷同性(即 q_1, q_2 同为正值或同为负值)时, $\mathbf{f}_{12}$ 和 $\mathbf{f}_{21}$ 指向它们相互远离的方向,即为斥力,所带电荷异性(即 q_1, q_2 一个取正值一个取负值)时, $\mathbf{f}_{12}$ 和 $\mathbf{f}_{21}$ 指向它们相互趋近的方向,即为引力(见图 1.1).

库仑定律数学表达式中的比例系数 k 的数值与单位,取决于公式中各物理量的单位选择,而各量单位的选择取决于所采用的单位制.本书采用 MKSA 单位制,即国际单位制(SI)中的电磁单位部分.在这种单位制中,取长度、质量、时间和电流强度为基本

量,其他电磁学中的物理量为导出量.基本量的单位分别规定为米(m)、千克(kg)、秒(s)和安培(A),导出量的单位由导出量与基本量之间的基本关系式导出来.如电量 q 与基本量电流强度 I 和时

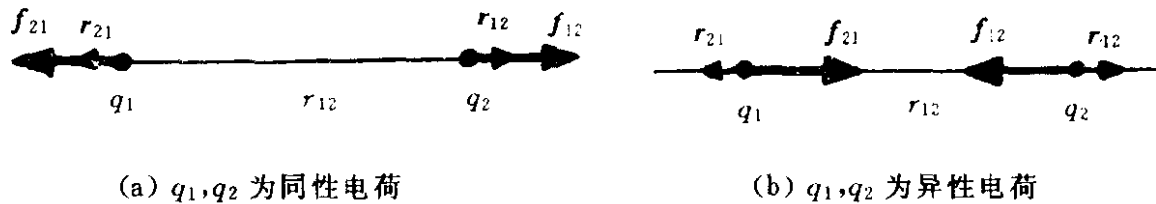


图 1.1 两点电荷 q_1, q_2 间的相互作用力

间 t 有关系 $q=It$, 在 MKSA 单位制中, 电量 q 的单位就是安培·秒($A \cdot s$), 并命名为库仑(C), 即 $1A \cdot s=1C$. 由于库仑定律的数学表达式中, 电量单位为库仑(C)、距离单位为米(m)、力的单位为牛顿(N), 式中所有物理量的单位均已确定, 在这种情况下, 公式中的比例系数 k 的数值和单位就不能随便设定了, 只能由实验来确定.

在 MKSA 单位制中, 通常用另一个实验测定的常数 ϵ_0 来代替 k , ϵ_0 与 k 的关系是 $k=\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$. 常数 ϵ_0 称为真空介电常数, 目前实验上测得 ϵ_0 的最精确值为 $\epsilon_0=8.854187818(71)\times 10^{-12}C^2 \cdot N^{-1} \cdot m^{-2}$. 一般计算中 ϵ_0 取近似值 $\epsilon_0=8.85\times 10^{-12}C^2 \cdot N^{-1} \cdot m^{-2}$ 就够了, 相应地, 比例系数 k 的值取 $k=\frac{1}{4\pi\epsilon_0}=8.99\times 10^9N \cdot m^2 \cdot C^{-2}$.

值得注意的是, k 和 ϵ_0 都不是一个单纯的数值, 它们都有单位和量纲. 在 MKSA 单位制中, 一个物理量的量纲是通过它与 4 个基本量长度(L)、质量(M)、时间(T)和电流强度(I)的基本关系式来确定的. 如电量 q 与电流强度、时间的基本关系式为 $q=It$, 电量 q 的量纲就是 $[q]=IT$. ϵ_0 的量纲由库仑定律给出, 为

$$[\epsilon_0] = \frac{[q^2]}{[f][r^2]} = L^{-3}M^{-1}T^4I^2.$$