

电磁学基础

普通物理自学丛书

电 磁 学 基 础

林 典 要

杨 绪 殷 编

李 义 钟

541.140/14



山东教育出版社

一九八三年·济南

内 容 提 要

本书系统地阐述了电磁学的基本概念和基本规律。全书分静电场、导体和电介质、直流电路、液体和气体中的电流、磁场、磁介质、电磁感应、交流电路、电磁振荡和电磁波九章。

本书除供中学教师自学，或作为教师进修教材外，还可供高等院校理工科学生学习普通物理时参考和知识青年阅读。

普通物理自学丛书

电磁学基础

林典要

杨绪殷 编

李义钟

*

山东教育出版社出版

(济南经九路胜利大街)

山东省新华书店发行 山东新华印刷厂潍坊厂印刷

*

787×1092 毫米 32 开本 15.625 印张 316 千字

1983 年 2 月第 1 版 1983 年 2 月第 1 次印刷

印数 1—5,200

书号 13275·6 定价 1.30 元

前 言

为提高我省中学教师的物理知识水平，以适应国民经济发展的需要，今特组织了我系部分教师编写了这套《普通物理自学丛书》。全书共分五册：力学基础、分子物理学基础、电磁学基础、光学基础和原子物理学基础。我们期望具有高中文化水平的读者，系统地学习这套书后，能达到大学专科的水平。

在编写过程中，我们力求在中学物理的基础上，系统地阐述基本概念、基本原理，并通过对典型例题的分析，加深理解。书中每章都附有小结和适量的思考题、习题；书后附有答案，以供复习巩固之用。

这套《丛书》除供中学教师自学，或作教师进修教材外，还可供高等院校理科学生学习普通物理时参考和知识青年阅读。

在这本《电磁学基础》中，我们着重介绍了描写电磁场的一些重要概念，如电场强度、电势、电容、电动势、磁感应强度等。同时也提供了一些切实可行的演示实验，如电源的内、外电势降落的测量、洛伦兹力的观察等。并对静电现象的应用及趋肤效应做了简单说明。

由于我们水平有限，其中可能有缺点和错误，希望读者批评指正。

山东师范大学物理系

1982年5月

目 录

第一章 静 电 场

第一节	物质的电结构	1
第二节	电量 电量的单位	3
第三节	库仑定律	4
第四节	静电场	10
第五节	电场强度矢量	11
第六节	电场强度的计算	15
第七节	电力线和电通量	20
第八节	高斯定理及其应用	23
第九节	电场力所做的功	29
第十节	电势能	32
第十一节	电势和电势差	38
第十二节	等势面	43
第十三节	场强和电势的关系	45
第十四节	外电场中的电偶极子	49
本章小结	.....	51
思考题	.....	53
习题	.....	54

第二章 导体和电介质

第一节	导体静电平衡的条件	59
-----	-----------------	----

第二节	电荷在导体上的分布·····	62
第三节	导体表面的电荷分布·····	66
第四节	静电起电机·····	69
第五节	导体的电容 电容器·····	71
第六节	电容器的联接·····	78
第七节	静电场中的电介质·····	84
第八节	介质存在时的高斯定理 电位移矢量·····	93
第九节	电容器的能量 电场能·····	95
第十节	静电现象的应用·····	99
本章小结	·····	109
思考题	·····	111
习题	·····	112

第三章 直流电路

第一节	电流 电流强度·····	116
第二节	三种速度·····	118
第三节	一段均匀电路的欧姆定律·····	121
第四节	电功率 焦耳定律·····	126
第五节	电阻的串联和并联·····	130
第六节	安培表和伏特表的量程扩大·····	134
第七节	电源 电动势·····	142
第八节	全电路欧姆定律·····	148
第九节	欧姆表的原理·····	156
第十节	一段非均匀电路的欧姆定律·····	158
第十一节	基尔霍夫定律·····	161
第十二节	惠斯通电桥·····	168

第十三节 电位(差)计	169
本章小结	173
思考题	175
习题	176

第四章 液体和气体中的电流

第一节 液体中的电流	181
第二节 法拉第电解定律	186
第三节 电解的应用	190
第四节 气体的被激导电和自激导电	192
第五节 辉光放电及其应用	195
第六节 弧光放电和火花放电	199
第七节 新型电光源	200
第八节 热电子发射	202
本章小结	204
思考题	205

第五章 磁 场

第一节 磁场	206
第二节 磁感应强度矢量	210
第三节 毕奥—沙伐—拉普拉斯定律	213
第四节 磁感应线和磁感应通量	226
第五节 安培定律	233
第六节 载流线圈在磁场中所受的力和力矩	238
第七节 运动电荷的磁场	244
第八节 磁场对运动电荷的作用	247

第九节	电荷在均匀磁场中的运动	252
第十节	霍耳效应	262
本章小结	.....	265
思考题	.....	268
习题	.....	274

第六章 磁 介 质

第一节	磁介质	283
第二节	磁介质的磁化	285
第三节	介质存在时的磁感应强度矢量	290
第四节	磁场强度矢量	292
第五节	铁磁质	295
第六节	磁电式仪表的工作原理	304
第七节	安培环路定律	307
第八节	磁路定律	314
本章小结	.....	320
思考题	.....	323
习题	.....	325

第七章 电 磁 感 应

第一节	电磁感应现象	328
第二节	楞次定律	332
第三节	法拉第电磁感应定律	335
第四节	电磁感应的本质	343
第五节	交流发电机和电子感应加速器原理	352
第六节	自感现象 自感系数	359

第七节	RL 电路的暂态过程	365
第八节	日光灯	371
第九节	互感现象 互感系数	372
第十节	感应圈	377
第十一节	涡流 趋肤效应	379
第十二节	磁场的能量	384
本章小结	.....	387
思考题	.....	390
习题	.....	396

第八章 交流电路

第一节	交流电路的基本概念	402
第二节	交流电路的平均值和有效值	406
第三节	仅有电感或电容的交流电路	410
第四节	矢量图解法	419
第五节	电感与电阻的串联电路	423
第六节	电容与电阻的串联电路	427
第七节	电阻、电感和电容的串联电路	431
第八节	电阻、电感和电容的并联电路	438
第九节	交流电路的功率	441
本章小结	.....	451
思考题	.....	453
习题	.....	454

第九章 电磁振荡和电磁波

第一节	自由振荡	456
-----	------------	-----

第二节	阻尼振荡和受迫振荡	460
第三节	电磁场	463
✓第四节	电磁波	465
第五节	电磁波的辐射强度	470
✓第六节	电磁波谱	472
本章小结	.....	473
思考题	.....	474
习题	.....	474
习题答案	.....	475
附录 I	趋肤效应的一种解释	484
附录 II	电磁量在各单位制中的换算关系表	489

第一章 静 电 场

本章从静止电荷之间的相互作用出发引出静电场，并着重讨论描写静电场的两个基本概念——电场强度矢量（简称场强）和电势，以及它们之间的联系；介绍计算场强和电势的一些基本方法。另外，对静电现象在实际中的应用也做了简单介绍。本章是学习电磁学的基础。

第一节 物质的电结构

对一根用毛皮摩擦过的胶木棒或者一根用丝绸摩擦过的玻璃棒，便能吸引轻小的物体的现象，我们就说这些棒上带了电。实验事实证明，只有两种电——正电和负电，并且正、负电荷总是同时产生的。如用毛皮摩擦的胶木棒上带负电，毛皮上则带有正电；用丝绸摩擦的玻璃棒上带正电，丝绸上则带有负电。我们进一步发现，带有同号电荷的物体彼此排斥，带有异号电荷的物体互相吸引。那么电究竟是什么呢？这就要从物质的结构说起。

本世纪初，通过一系列科学实验和理论工作证明：构成物质的各种元素的原子，都有一个带正电的中心部分，称为原子核；在它的周围，具有围绕原子核转动的电子。电子的质量等于 9.108×10^{-31} 千克，电子带有负电，它的电量等于

1.603×10^{-19} 库仑。原子核由中性的中子和带正电的质子所组成。中子的质量等于 1.675×10^{-27} 千克。质子的质量等于 1.672×10^{-27} 千克。质子所带正电的电量等于 1.603×10^{-19} 库仑，和电子的电量数值相同，符号相反。原子核直径的数量级约为 10^{-15} 米，而电子围绕原子核转动的轨道直径的数量级约为 10^{-10} 米，原子的这种结构和太阳系中行星围绕太阳转动相类似。在正常状态下，原子外围的电子数等于原子核中的质子数，因而原子呈现中性状态，不显电性。图 1.1 表示氢原子和氦原子的结构示意图。

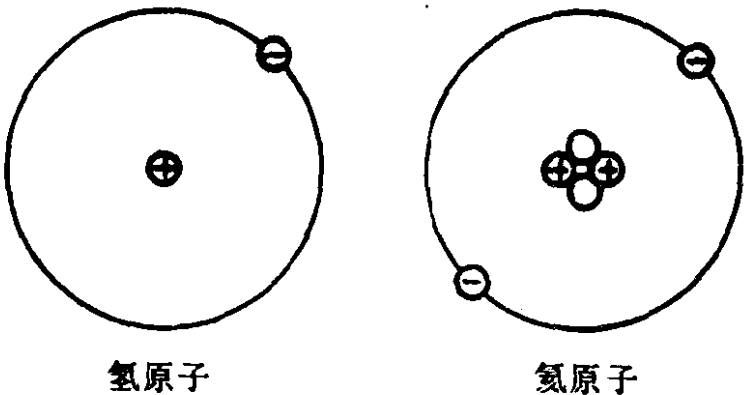


图 1.1

根据以上分析可知，一切物质都是由电子、质子、中子等基本粒子所组成的，而且这些粒子都带有电，它们之间存在着电的相互作用。所谓物质的电结构，就是说一切物质都是由相互作用着的带电的基本粒子所组成的*。前面提到的摩擦起电过程，只是带电粒子（通常是电子）从一个物体转移到另一个物体的过程。例如，胶木棒与毛皮摩擦时，电子

* 中子虽然不带电，但近代的实验指出，中子可以转变成一个质子和一个电子，所以中子也可看成是一个复杂的带电系统。

从毛皮上转移到胶木棒上，胶木棒因获得电子而带负电，而毛皮因失去电子而带正电。

在力学中，我们已经知道，一切物质之间都存在着万有引力的作用，也就是说，万有引力是一切物质所具有的基本属性。现在，我们可以说，组成物质的基本粒子都存在着电力的相互作用，所以，电的相互作用（简称电力）也是物质的一种固有的基本属性。

第二节 电量 电量的单位

在力学中我们用质量来表示某物体与其它物体间的万有引力作用的量度，完全类似，我们可用电量来表示一带电体与其它带电体间电力作用的量度，并以 Q (或 q) 来表示。

电量的实用单位是库仑。在实用单位制中，除了用长度、质量和时间三个基本单位之外，还用电流强度的单位“安培”作第四个基本单位，这种单位制也称为有理化米 千 克 秒 安培制，通常用符号 MKSA 表示。（关于“安培”的规定将在第五章中介绍）根据电流强度与电量的关系式 $q = It$ 规定，在通有 1 安培电流强度的稳定电流的导线中，每一秒钟内通过导线的任一截面的电量为 1 库仑。1 库仑的电量又相当于 6.238×10^{18} 个质子（或电子）的电量。在 MKSA 单位制中，电量的量纲是：

$$[Q] = [I][t] = IT.$$

在电学中我们还经常用到电荷这个名词，过去由于对物质的电结构认识不清，而把物体上所带的电，即物体内部正负电荷抵消后净多出来的电子或质子，称为电荷。目前，我们

常用电荷来代表微小的带电体。例如，一带电的质点就称为点电荷。

第三节 库 仑 定 律

电荷之间的相互作用力与什么因素有关呢？实验告诉我们，这个力与电荷的电量有关，与它们的形状以及相对位置有关，一般来说是比较复杂的（有关介质的影响将在第二章中讨论）。为了计算方便，先讨论点电荷之间的相互作用力。所谓点电荷，就是电荷之间的距离比起它们本身的线度大得很多，以致它们的形状对力的影响微弱到可以忽略不计的电荷。因此，点电荷的概念是相对的，一个带电体能否看作是点电荷，要从问题的具体情况来分析，正好象力学中的质点的概念一样。

1785 年，法国物理学家库仑用实验总结出了点电荷之间相互作用的规律，称为库仑定律。

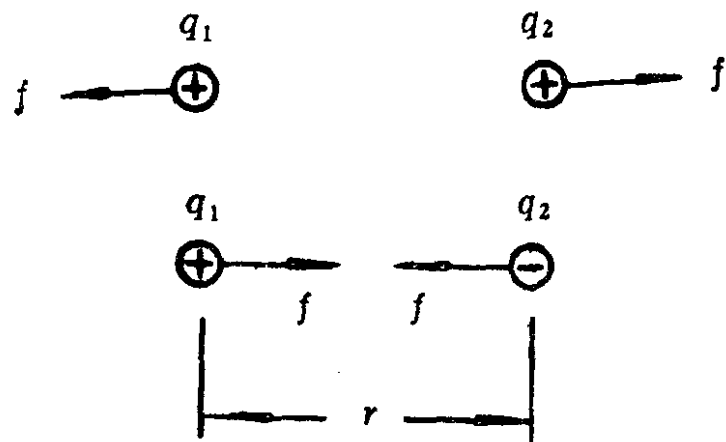


图 1.2

库仑定律可叙述如下：在真空中，电量分别为 q_1 和 q_2

的两个点电荷之间的相互作用力的方向沿着这两个点电荷的连线，同号相斥，异号相吸(图 1·2)；作用力的大小与两个点电荷的电量 q_1 和 q_2 的相乘积成正比，与两电荷之间的距离 r 的平方成反比。即

$$f = K \frac{q_1 q_2}{r^2}.$$

式中 K 是比例系数，它的数值和量纲取决于单位制的选择。如果用 $\mathbf{r}_{12}$ 表示从 q_1 至 q_2 所作的矢径，则 $\mathbf{r}_{12}/r_{12}$ 就表示 $\mathbf{r}_{12}$ 方向上，数值等于 1 的单位矢量，于是点电荷 q_1 作用于点电荷 q_2 的力应为

$$\mathbf{f}_{12} = K \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \cdot \frac{\mathbf{r}_{12}}{r_{12}}.$$

这就是库仑定律的完整数学表达式，它不仅表示了力的大小，又表示了力的方向。当 q_1 与 q_2 同号时， $\mathbf{f}_{12}$ 与 $\mathbf{r}_{12}$ 方向相同，即互相排斥；当 q_1 与 q_2 异号时， $\mathbf{f}_{12}$ 与 $\mathbf{r}_{12}$ 方向相反，即互相吸引(图 1·3)。

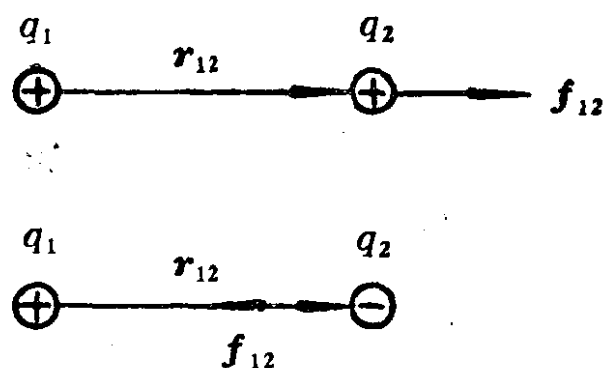


图 1·3

下面来讨论比例系数 K 的确定。在 MKSA 单位制中，因为力、距离和电量的单位都已规定好了，我们就可以用实

验的方法来确定 K 。实验证明，当真空中两个点电荷 $q_1 = q_2 = \frac{1}{3 \times 10^9}$ 库仑，它们相距 $r = 10^{-2}$ 米时，可以测出其相互作用力 $f = 10^{-5}$ 牛顿，因而可以得到

$$K = \frac{fr^2}{q_1 q_2} = 9 \times 10^9 (\text{牛顿} \cdot \text{米}^2 / \text{库仑}^2)。$$

可见， K 不是一个纯数，它是有量纲的，这与万有引力常数相类似。

为了使今后推导出的一些公式在形式上比较合理， K 可以用一个新的恒量 ϵ_0 来代替，而令

$$K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}，$$

于是在 MKSA 制中，真空中的库仑定律可写成

$$f = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \frac{r}{r}。 \quad (1-1a)$$

式中的 ϵ_0 称为真空中的介电常数。

$$\begin{aligned} \epsilon_0 &= \frac{1}{4\pi K} = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \times 10^9} \\ &= 8.85 \times 10^{-12} (\text{库仑}^2 / \text{牛顿} \cdot \text{米}^2)， \end{aligned}$$

而 ϵ_0 的量纲是

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

电磁学中有许多单位制，初学者首先应该掌握一种单位制，为此，本书主要介绍 MKSA 单位制。为了读者阅读有关参考资料的需要，也简单介绍几种常用的单位制，如绝对静电单位制 (CGSE)，绝对电磁单位制 (CGSM) 和高斯单位制。下面先介绍 CGSE 单位制。

在 CGSE 单位制中，仍用长度、质量、时间作为基本量，单位分别是厘米、克、秒，而其它单位都是导出单位。CGSE 单位制中电量的单位是这样规定的：两个带有相等电量的正电荷（注意，这里只要求两个带电体所带的电量一般多），如果在真空中相距 1 厘米，而斥力恰为 1 达因时，那么每一个正电荷所带的电量规定为 1 绝对静电电量单位，又称为 1 静库。按照这样的规定，在 CGSE 单位制中，比例系数 $K = 1$ ，库仑定律可写成

$$f = \frac{q_1 q_2}{r^2} \cdot \frac{r}{r} \quad (1-1b)$$

而电量的量纲是

$$[q] = [f]^{1/2} [r] = L^{3/2} M^{1/2} T^{-1}.$$

从电量的 CGSE 单位出发，便可导出其它各电磁量的 CGSE 单位。

下面来讨论库仑与静库的关系：设有两个点电荷 $q_1 = q_2 = 3 \times 10^9$ 静库，令它们相距 $r = 1$ 厘米，则它们之间的相互作用力，根据(1-1b)式可得

$$f = \frac{q_1 q_2}{r^2} = \frac{3 \times 10^9 \times 3 \times 10^9}{1^2} = 9 \times 10^{18} (\text{达因}).$$

若两个点电荷 $q_1 = q_2 = 1$ 库仑，而距离仍为 1 厘米，则它们之间的相互作用力，根据(1-1a)式可得

$$\begin{aligned} f &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{1 \times 1}{10^{-4}} = 9 \times 10^{13} (\text{牛顿}) \\ &= 9 \times 10^{18} (\text{达因}). \end{aligned}$$

从上面的计算可以看出，两个点电荷的距离相同，相互作用力也相同，所以可以肯定上述两种情况中，两个点电荷上的电