



0323309

高等学校试用教材

# 大学物理学

## 电 磁 学

杨 仲 著 等 编

4026/16



\*21113000836123\*



人民教育出版社

本书内容有：静电场，静电场中的导体和电介质，导电机理，电流的磁场，带电粒子在电磁场中的运动，磁场中的磁介质，电磁感应，电能与其它能量的转化，麦克斯韦方程组等。在编写时，着重从场的观点介绍主要的电磁现象及规律。对于基本概念，从便于教学角度出发加以阐述。对基本规律除讲清内容外，并介绍了规律的应用。书中例题、习题较多，有助于对基本概念和规律的理解。习题附有答案。

本书可作为高等工科院校的普通物理教材，也可供有关读者参考。

本书由倪守正等执笔

高等学校试用教材

大学物理学

电磁学

杨仲耆 等编

\*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

咸宁地区印刷厂印装

开本850×1168 1/32 印张12.5 字数302,000

1980年6月第1版，1980年11月湖北第1次印刷

印数25,000

书号 13012·0476 定价 1.10 元

# 前 言

本书是以天津大学物理教研室历年所编写的讲义为基础，参考国内外先进教材，根据1977年11月西安工科院校物理教材会议讨论过的编写大纲编写的。

编写时我们注意了以下各点：

一、在保证经典理论的基础上，加强了近代理论。对牛顿力学、电磁学和波动过程等经典部分作了适当的选择和安排。将狭义相对论基础知识列于牛顿力学之后。以上各部分共占全书篇幅的 $\frac{3}{4}$ ，其余 $\frac{1}{4}$ 篇幅对量子统计物理基础作了初步论述。

二、力图以能量观点、守恒定律、迭加原理和波动特征等基本概念贯穿于全书，以使物理学的基本知识有机的联系起来。

三、注意引导和培养学生运用高等数学分析和解决物理问题的能力。本书宜于第一学年第二学期开课讲授。

四、例题、习题较多，可选择讲授。讲授时间为140—180学时。

本书拟分为力学；电磁学；振动、波动与光学；量子与统计物理基础等四册。

本书初稿经西北工业大学、华中工学院、华南工学院、武汉钢铁学院及我校共三千多名学生试用，他们提了很多宝贵意见；修改后承南开大学赵景员教授、哈尔滨工业大学洪晶教授、北京邮电学院施国钧教授和重庆大学刘之麟教授等九所兄弟院校代表的审阅；在编写过程中，我校物理教研室同志从各方面给予了大力帮助，对此我们一并表示衷心的感谢。参加本书编写的有杨仲耆、倪

守正、**高敦怡**、马世宁和陈宜生，廖惕生负责插图设计，杨仲耆统稿。本书尚欠成熟，某些方面仅是初步尝试，有待于在教学实践中逐步提高。限于水平，缺点和错误在所难免，请批评指正。

编 者

1979年6日

# 目 录

## 第 二 篇 电 磁 学

<b>第一章 真空中的静电场</b> .....	2
§ 2-1-1 电荷的量子化与电量守恒.....	2
§ 2-1-2 库仑定律.....	5
§ 2-1-3 电场与电场强度.....	9
§ 2-1-4 场强迭加原理.....	16
§ 2-1-5 电场强度的计算.....	19
§ 2-1-6 电力线与电通量.....	27
§ 2-1-7 高斯定律.....	34
§ 2-1-8 高斯定律的应用.....	37
§ 2-1-9 静电力做功的特性.....	42
§ 2-1-10 电位能 电位 电位差.....	44
§ 2-1-11 电位的计算.....	51
§ 2-1-12 等位面.....	58
§ 2-1-13 场强与电位的关系 电位梯度.....	61
* § 2-1-14 点电荷组的电位能.....	68
习题.....	71
<b>第二章 静电场中的导体和电介质</b> .....	78
§ 2-2-1 电场中的导体.....	78
§ 2-2-2 电介质的极化.....	87
§ 2-2-3 电介质内的场强.....	95
§ 2-2-4 有电介质时的高斯定律 电位移.....	98
§ 2-2-5 三个电矢量.....	103
§ 2-2-6 导体的电容.....	105
§ 2-2-7 电容器.....	106
§ 2-2-8 几种形状的电容器电容的计算.....	110

§ 2-2-9	电容器的连接法	115
§ 2-2-10	电场的能量	118
§ 2-2-11	电容器的充电与放电	121
* § 2-2-12	电场的边界条件	128
	习题	132
<b>第三章 带电粒子的导电机理</b> .....136		
§ 2-3-1	欧姆定律及焦耳-楞次定律的微分形式	136
§ 2-3-2	金属导电的古典电子论	144
* § 2-3-3	电解质及气体的导电性	149
* § 2-3-4	半导体的导电机理	152
	习题	153
<b>第四章 真空中电流的磁场</b> .....155		
§ 2-4-1	基本磁现象与安培假说	155
§ 2-4-2	磁感应强度	159
§ 2-4-3	毕奥-沙伐-拉普拉斯定律	163
§ 2-4-4	磁场的迭加原理 毕-沙-拉定律的应用	165
§ 2-4-5	磁力线 磁通量	171
§ 2-4-6	安培环路定律	175
§ 2-4-7	安培环路定律的应用举例	179
§ 2-4-8	安培力——磁场对载流导线的作用力	183
§ 2-4-9	平行长直电流间的相互作用力	185
§ 2-4-10	载流线圈在均匀磁场中所受的力矩 载流线圈的磁矩	187
§ 2-4-11	运动电荷的磁场	191
	习题	195
<b>第五章 带电粒子在电磁场中的运动</b> .....202		
§ 2-5-1	磁场对运动电荷的作用力——洛伦兹力	202
§ 2-5-2	带电粒子在电磁场中的运动	206
§ 2-5-3	回旋加速器	218
§ 2-5-4	霍尔效应及其应用	221
* § 2-5-5	库仑力与洛伦兹力的变换	227
	习题	231

<b>第六章 物质的磁性</b> .....	234
§ 2-6-1 磁性物质的分类.....	234
§ 2-6-2 物质磁性的测定.....	235
§ 2-6-3 顺磁质和抗磁质的根源.....	237
§ 2-6-4 三个磁矢量的关系 安培环路定律.....	244
§ 2-6-5 铁磁性.....	252
* § 2-6-6 磁场的边界条件.....	259
* § 2-6-7 条形磁铁.....	262
* § 2-6-8 铁氧体——非金属磁性材料.....	263
习题.....	264
<b>第七章 电磁感应</b> .....	266
§ 2-7-1 电源的电动势.....	266
§ 2-7-2 法拉第电磁感应定律.....	270
§ 2-7-3 动生电动势与交流电的产生.....	275
§ 2-7-4 由能量守恒和转换定律推导电磁感应定律 反电动势.....	282
§ 2-7-5 麦克斯韦对电磁感应定律的解释 涡旋电场.....	287
§ 2-7-6 自感.....	293
§ 2-7-7 $R-L$ 电路的暂态过程.....	300
§ 2-7-8 自感储能.....	303
§ 2-7-9 磁场的能量.....	305
§ 2-7-10 互感.....	308
§ 2-7-11 涡电流.....	312
习题.....	315
<b>第八章 电能与其它能量的转化</b> .....	321
§ 2-8-1 机械能与电能 压电效应.....	323
§ 2-8-2 金属的逸出功与接触电位差.....	325
§ 2-8-3 热能与电能 温差电现象.....	333
§ 2-8-4 化学能与电能 化学电池.....	337
§ 2-8-5 非电量的电测法.....	343
习题.....	347
<b>第九章 麦克斯韦方程组</b> .....	350



§ 2-9-1	电磁场小结	350
§ 2-9-2	电流连续性方程 位移电流	353
§ 2-9-3	麦克斯韦方程组的积分形式	360
§ 2-9-4	电磁场方程组的微分形式	362
* § 2-9-5	矢量场的散度 高斯定理	370
* § 2-9-6	矢量场的旋度 斯托克斯定理	373
	习题	378
<b>附录</b>		<b>380</b>
	附录 I. 重要物理常数表	380
	附录 II. 电磁学单位制	380
	附录 III. 国际单位制(SI)基本单位	384
	<b>习题答案</b>	<b>386</b>

## 第二篇 电 磁 学

电磁学是研究电磁现象及其规律的一门科学。

远在公元前六世纪左右<sup>①</sup>，人们已经发现用琥珀与布摩擦之后能够吸引毛发和碎纸片一类的轻微物体，也发现了天然磁铁可以吸引铁屑等电磁现象。但是，在此后一段较长的历史时期内，人们对电磁现象的认识却进展较慢。直到十八世纪，情况才开始改观。自十八世纪中叶起，在大约一百多年的时间内，相继发现了许多重要的电磁现象并确立了有关的规律，为电磁的各种应用，开拓了广阔的领域。在现代，从一般的生产部门到日常生活，从各种新技术的应用到尖端科学研究，都离不开电和磁。事实说明，现代化的程度越高，电磁应用的范围也越广，与此相应地建立了一些新学科，例如，电工学、无线电电子学、自动控制等等。所以如此，这是由电磁能量独具的下列特点所决定的：

- 一、电磁能很容易转变为机械能、热能、光能、化学能等等；
- 二、电磁能便于远距离输送；
- 三、电磁能可由电磁波的形式在空中传播，能在极短的时间内把讯号传到远方；
- 四、电测仪表和调节、控制仪表等操作都具有极高的准确性和灵敏性。

电磁学除了在生产技术和科学研究等方面有着极为重要和广泛的应用之外，它还是人类深入认识物质世界必不可少的基础理论。例如，人类对原子结构、原子核结构以及基本粒子的研究等，都和电磁现象的研究分不开。

---

<sup>①</sup> 参考《自然科学大事年表》(上海人民出版社)第2页。

# 第一章 真空中的静电场

## § 2-1-1 电荷的量子化与电量守恒

人们经过多年的探讨并通过大量的精确实验,到二十世纪初,对原子结构的研究得到如下的结论:

原子由原子核以及外围的电子所组成。原子核带正电,电子带负电。除氢原子核外,其它元素的原子核又是由质子和中子组成(氢原子核只含一个质子)。质子带正电,中子不带电。每一质子所带的正电和每一电子所带的负电数值相等。带电体上所带的电量,简称电荷。在正常情况下,原子核中有多少质子,原子核外围就有多少电子,所以原子核所带正电的总电量(正电荷)总是等于核外所有电子所带负电的总电量(负电荷)。一般物体所以不显电性是因为每一原子内,这两种电荷(正的和负的)离得太近,以致它们对外界的电效应互相抵消,因而显不出带电的现象。这种状态称为“电中和”,即“不带电”。只有打乱这种电中和状态,才能使物体带电。使一个物体带电,实际上就是让它得到多余的电子或者使它失去一些电子。得到多余电子的物体就带负电,失去电子的物体就带正电。由此看来,使物体带电无非是把原来聚在一起而呈现电中和状态的正负电荷分开罢了,决不是无中生有地产生了一种符号的电荷。

既然电子带有负电,质子带有正电,那么它们各自带的电荷到底有多大?此外,每个电子(或质子)所带的电荷是否都相等呢?为了回答上述问题,人们做了不少实验。

在这方面最早给人启示的实验事实是法拉第电解定律。当以

电流  $I$  通过硝酸银(举例而言)的稀溶液时, 在时间  $t$  内即有一定的银量  $m$  在阴极上析出。由法拉第电解定律可知其数值为

$$m = \frac{AIt}{96500n}$$

式中  $I$  以安培为单位,  $m$  以克为单位,  $A$  为原子量,  $n$  为化合价。对银而言,  $A=107.87$ ,  $n=1$ , 由此可得

$$It = q = \frac{mn}{A} \cdot 96500 \text{ 库仑}$$

在电解时, 每析出 1 摩尔(即  $m=A$  克)的物质, 通过电解液的电量  $q$  应为

对单价原子( $n=1$ ),  $q=96500$  库仑

对二价原子( $n=2$ ),  $q=2 \times 96500$  库仑

对三价原子( $n=3$ ),  $q=3 \times 96500$  库仑

根据摩尔的定义(见附录), 在物系是由离子构成时, 则 1 摩尔物质中的正(或负)离子数(阿伏加德罗数)  $N_0=6.022 \times 10^{23}$ /摩尔。在电解过程中运输电荷的是离子, 上述结果表明: 每一单价离子到达阴极还原为原子后, 给予阴极的电荷  $e$  为

$$e = \frac{96500}{N_0} \text{ 库仑} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ 库仑}$$

一个二价离子运输的电荷应为  $2e$ , 依此类推。

此项事实早于 1881 年就曾引起亥姆霍兹的注意, 他在法拉第纪念词中曾说: “法拉第电解定律的最使人惊异的结果或许就是: 如果我们承认物质由原子组成, 那就不可避免地会得出这样的结论, 即电(不论是正电还是负电)也是分为确定的基本量子, 它的一举一动就象是电的原子一样。”

其后密立根在其著名的油滴实验中直接测得电子电荷的数值  $e=1.60 \times 10^{-19}$  库仑。在自然界中存在的任何电荷  $q$ , 不论其来源如何, 数值都等于  $ne$ , 这里  $n$  是任意正整数, 而  $e$  可取正值或负值。

后来发现：正电子的电荷与质子的电荷以及其它带电的基本粒子的电荷的数值也都恰恰是  $e$ 。

当一种物理量只能以分离的、一份一份确定的数量(如同颗粒一般)存在,而不是以连续的、可取任意数量的形式存在时,我们就说这种物理量是“量子化”的。电子(或质子)电荷的数量只能是  $e$ , 故电荷是量子化的。组成物质的电子、质子、中子以及原子、分子等都具有确定的、一份一份的质量,说明质量也是量子化的。虽然如此,由于电子电荷  $e$  以及原子、分子的质量都非常之小,以致量子性在宏观现象中表现不出来,所以在讨论宏观电荷或质量时,可以不考虑它们的“量子化”,而使用“连续”这一概念。

电荷不仅具有量子性,而且在任何起电过程中,等量的正负电荷总是同时产生。例如,当玻璃棒与丝绸摩擦时,玻璃棒上出现正电荷,丝绸上出现等量的负电荷。这表明摩擦(一种起电方法)并不产生电荷,只不过是把原来聚在一起的正负电分开后,使一种电荷从一物体转移到另一物体而已。又譬如,在静电感应过程中,也是等量的正负电荷同时产生。因此在任何孤立的电系统中(所谓孤立的电系统是指没有电量通过其界面的系统),总电量是不会改变的。因为一旦系统所带的电量确定之后,在这系统中不论用任何方法起电,新产生的正负电荷的代数和总是零,不会改变原有的电量。从这个事实出发,人们总结出所谓的“电荷守恒定律”,其内容如下:

一个孤立电系统中的总电量 (即在任何时间系统中所有正负电荷的代数和) 决不改变。

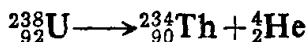
这个定律不论是在宏观现象中,或是在原子以及原子核的范围内,都已证明是正确的。现举两个微观领域内的例子说明如下:

[例题 1] 当  $\gamma$  射线穿过铅板时可以产生正负电子偶,

$$\gamma \longrightarrow e^- + e^+$$

光子并不带电,而产生的正电子  $e^+$  和负电子  $e^-$  都带有电荷,但二者的电荷数值相等、符号相反,代数和为零。故不改变系统中的总电量。

〔例题 2〕  ${}_{92}^{238}\text{U}$  放射  $\alpha$  粒子后蜕变为  ${}_{90}^{234}\text{Th}$ ,



放射性“母”核  ${}_{92}^{238}\text{U}$  含有 92 个质子,即带有正电  $92e$ ,蜕变后所得的子核  ${}_{90}^{234}\text{Th}$  带有正电  $90e$ ,放出的  $\alpha$  粒子(即  ${}_2^4\text{He}$ )带有正电  $2e$ ,总数为  $90e + 2e = 92e$ ,故蜕变前后的总电量不变。

此外,大量实验还证实:电量也不因坐标间的变换而改变。这意思是说,如果我们在某一坐标系中测得某电荷的值为  $q$ ,则从另一个坐标系(这个坐标系和前一个坐标系之间有相对运动)中对该电荷进行测量时,所得的值仍然是  $q$ 。这一事实称为“电荷不变性”。

## § 2-1-2 库仑定律

直到十八世纪前半期,人们才开始明确只有两种电荷,并称其为“正电”和“负电”;也知道了同号电荷相斥,异号电荷相吸。1785年,库仑通过扭秤实验,对于电力作了定量研究。我们不拟叙述他的实验过程,而只给出他的实验结果,即著名的库仑定律。这是电学的基本定律之一,其内容如下:

在真空中,两个静止的点电荷之间的相互作用力  $F$  与两电荷的电量  $q_1$  和  $q_2$  的乘积成正比,与它们之间的距离  $r$  的平方成反比,力的方向沿两电荷的连线。用数学形式写出,即

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (2-1-1)$$

其中  $k$  为比例恒量,决定于式中各量所用的单位。本书所用的单位制是国际单位制。

在国际单位制中,关于电磁学的单位制部分,选定了四个基本物理量:长度、质量、时间和电流。它们的单位分别是米、千克、秒和安培<sup>①</sup>(简称安,符号为A)。这四个单位组成电磁学的基本单位。其它各量的单位,都由这四个基本单位导出。

在国际单位制中,电量的单位是[库仑](简称库,符号为C)。1库仑的电量就是,当导体中的稳恒电流等于1安时,在1秒内流过导体任一断面的电量。即

$$1 \text{ 库} = 1 \text{ 安} \cdot \text{秒}$$

如用 $[q]$ 表示电量的量纲, $[I]$ 和 $[T]$ 分别表示电流*i*与时间*t*的量纲,则由

$$q = it$$

可得

$$[q] = [I] \cdot [T] = IT$$

在库仑定律中,由于各量的单位都已给定, $k$ 的数值须根据实验定出,以便使式(2-1-1)中等号两方的数值相等。根据实验测定

$$k = 8.9880 \times 10^9 \text{ [牛} \cdot \text{米}^2 \text{/库}^2 \text{]}$$

如不作精密计算,可以近似地取

$$k = 9 \times 10^9 \text{ [牛} \cdot \text{米}^2 \text{/库}^2 \text{]}$$

库仑定律虽是一个基本定律,但在有关电工的科学和技术中,直接用它处理问题的情况并不多,常用的却是和它有联系的其它公式。为了使今后常用的一些公式形式简单,我们宁愿先把库仑定律中的比例恒量 $k$ 变得复杂一点。考虑到这种原因,在国际单位制中,库仑定律常用下列形式表示

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

---

<sup>①</sup> 安培的定义,参考§2-4-9。

其中  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = k = 9 \times 10^9 \text{ 牛} \cdot \text{米}^2 / \text{库}^2$

而  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} [\text{库}^2 / \text{牛} \cdot \text{米}^2]$ , 是一个新的恒量, 叫作“真空介电常数”。

由于力是矢量, 也可以把上式写成矢量式。如图 2-1-1 所示, 设  $q_1$  与  $q_2$  同号, 并以  $F$  代表  $q_1$  作用于  $q_2$  上之力,  $r_0$  代表由  $q_1$  指向  $q_2$  的单位矢径, 则

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} r_0 \quad (2-1-1b)$$

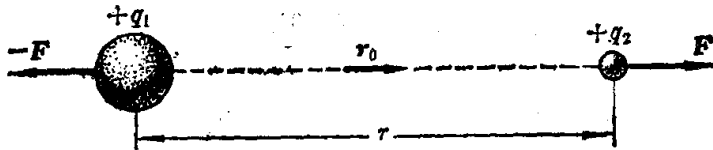


图 2-1-1 两个点电荷间的作用力

对于库仑定律, 要注意以下两点:

(1) 力  $F$  的方向总是沿着两点电荷的连线。如果两电荷同号时,  $F$  为正, 表示同号电荷相互排斥; 两电荷异号时,  $F$  为负, 表示异号电荷相互吸引。由于力  $F$  和  $q_1 q_2$  成正比, 即使两电荷的数值大小不等, 按照牛顿第三定律, 作用于每个电荷上的力的数值仍是相等的。

(2) 库仑定律只适用于点电荷。所谓“点电荷”, 就是把带电体近似地看作一个点。不言而喻, 所谓“可以看作一个点”, 并非真的就是几何学上的点, 而只是在一定条件下的一种近似。说得明确一些, 就是当带电体本身的尺寸和它们之间的距离相比可以忽略不计时, 就可以把带电体近似地看成一个点。提出“点电荷”这一概念, 乃是对实际问题的一种“简化”, 目的是为了突出主要矛盾, 略去次要矛盾, 电学中的“点电荷”与力学中的“质点”是用了类似



的简化方法。此外,只有把带电体看成点电荷后,两电荷间的距离才有明确的、唯一的意义。

〔例题1〕  $\alpha$  粒子(即是氦原子核)的质量  $m$  为  $6.68 \times 10^{-27}$  千克, 它的电荷  $q = +2e$  或  $3.2 \times 10^{-19}$  库仑。试比较两  $\alpha$  粒子间的静电斥力与万有引力。

〔解〕 静电力  $F_e$  为

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{q^2}{r^2} \right) = k \left( \frac{q^2}{r^2} \right)$$

其中  $r$  为两  $\alpha$  粒子间的距离。

万有引力  $F_g$  为

$$F_g = G \left( \frac{m^2}{r^2} \right)$$

$G = 6.67 \times 10^{-11}$  牛·米<sup>2</sup>/千克<sup>2</sup>, 为引力常数。

两力之比为

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{k}{G} \frac{q^2}{m^2} = 3.1 \times 10^{35}$$

显然在微观粒子的相互作用中, 万有引力与静电力相比真是太小了, 完全可以略去。

〔例题2〕 图 2-1-2 中, 两个相等的正电荷  $q = 2.0 \times 10^{-6}$  库仑, 与另一正电荷  $Q = 4.0 \times 10^{-6}$  库仑相互作用。求作用于  $Q$  上之合力的数值与方向。各电荷间的距离如图所示。

〔解〕 欲求合力, 必须先求出每一电荷  $q$  作用于  $Q$  上之力, 然后再求两力的矢量和。先把每一力沿坐标轴分解后再求合力, 较为方便。由图 2-1-2, 利用库仑定律可得上方的电荷  $q$  作用于  $Q$  之力  $F$  为

$$F = (9.0 \times 10^9 \text{ 牛} \cdot \text{米}^2 \cdot \text{库}^{-2}) \times \frac{(4.0 \times 10^{-6} \text{ 库})(2.0 \times 10^{-6} \text{ 库})}{(0.5 \text{ 米})^2}$$

• 8 •