

916186

高等学校试用教材

# 大学物理

第二册 电 磁 学

周勇志 主编

华南理工大学出版社

04

7714

2

高等学校试用教材

# 大学物理

(第二册 电磁学)

周勇志(主编) 简趣玲 编

华南理工大学出版社

## 内 容 简 介

《大学物理》是高等学校工科物理课程教学基本要求制订后新编的教材,全书分三册。第一册为《力学与热学》,内容有:力学(包括相对论)、机械振动与机械波、热学;第二册为《电磁学》;第三册为《光学与量子物理》。此外,还另编有适应标准化考试要求的习题集,与本教材配套使用。

本书可作高等工业院校各专业的大学物理(原普通物理学)课程教材,也可作综合大学、高等师范大学非物理系的物理课程教材或教学参考书、科技人员的参考书和自学用书。

高等学校试用教材

### 大 学 物 理

(第二册 电磁学)

周勇志 主编

责任编辑 江厚祥

\*

华南理工大学出版社出版发行

(广州 五山)

新华书店经销

华南师范大学印刷厂印刷

\*

开本 787×1092 1/32 印张9.75 字数218千字

1989年3月第1版 1989年3月第1次印刷

印数: 1—7 300

ISBN 7—5623—0073—9/O·9 元

定价: 1.95元

# 目 录

## 第四篇 电磁学

第十一章 静电场	( 3 )
§ 11-1 电荷 库仑定律	( 3 )
一、电荷	( 3 )
二、库仑定律	( 6 )
三、电介质对电荷相互作用的影响	( 9 )
§ 11-2 电场 电场强度	( 12 )
一、电场	( 12 )
二、电场强度	( 13 )
§ 11-3 电位移 电通量 高斯定理	( 26 )
一、电位移	( 26 )
二、电通量 ( $D$ 通量)	( 28 )
三、高斯定理	( 29 )
四、高斯定理的应用	( 34 )
§ 11-4 电场力的功 电位 (电势)	( 40 )
一、电场力的功 电位能	( 40 )
二、电位 (电势)	( 43 )
*三、电子伏特	( 56 )
§ 11-5 电场强度与电位的关系	( 58 )
一、电位梯度	( 58 )
二、电场强度与电位梯度的关系	( 59 )
* § 11-6 带电粒子在电场中的运动	( 61 )
一、带电粒子在电场中的加速运动	( 62 )
二、带电粒子在电场中的电偏转	( 62 )

三、电子束在电场中的电聚焦.....	( 63 )
<b>第十二章 静电场中的导体和电介质.....</b>	<b>( 65 )</b>
§ 12-1 静电场中的导体.....	( 65 )
一、导体的静电平衡条件.....	( 65 )
二、导体上的电荷分布.....	( 67 )
三、导体表面附近的场强.....	( 69 )
四、静电屏蔽.....	( 72 )
§ 12-2 电容 电容器.....	( 78 )
一、孤立导体的电容.....	( 79 )
二、电容器及其电容.....	( 80 )
三、电容器的组合——串联与并联.....	( 84 )
§ 12-3 静电场中的电介质.....	( 87 )
一、电介质.....	( 87 )
二、电介质的极化.....	( 87 )
三、电极化强度矢量.....	( 89 )
*四、 <b><math>D</math>、<math>E</math>、<math>P</math></b> 之间的关系.....	( 90 )
* § 12-4 电介质的损耗和击穿 变电体 压电现象.....	( 93 )
一、电介质的损耗.....	( 93 )
二、电介质的击穿.....	( 93 )
三、变电体.....	( 94 )
四、压电现象.....	( 95 )
§ 12-5 静电场的能量.....	( 95 )
一、带电系统的能量.....	( 95 )
二、电场的能量.....	( 97 )
* § 12-6 静电的应用与危害.....	( 99 )
一、静电的一些应用.....	( 102 )
二、静电的危害与消除.....	( 104 )

<b>第十三章 稳恒电流的磁场</b> .....	( 104 )
§ 13-1 稳恒电流.....	( 104 )
一、电流密度 稳恒电流.....	( 104 )
二、电动势.....	( 108 )
§ 13-2 磁场 磁感应强度.....	( 110 )
一、磁场.....	( 110 )
二、磁感应强度.....	( 113 )
三、磁力线.....	( 115 )
§ 13-3 毕奥—萨伐尔定律.....	( 116 )
一、毕奥—萨伐尔定律.....	( 116 )
二、毕奥—萨伐尔定律的应用.....	( 118 )
三、毕奥—萨伐尔定律的微观意义	
——运动电荷的磁场.....	( 127 )
§ 13-4 磁场的高斯定理和安培环路定律.....	( 130 )
一、磁通量与磁场的高斯定理.....	( 130 )
二、磁场强度 安培环路定律.....	( 133 )
<b>第十四章 磁场对电流的作用</b> .....	( 142 )
§ 14-1 磁场对载流导体的作用.....	( 142 )
一、安培定律.....	( 142 )
二、两个平行电流的相互作用力、电流单位“安培”的定义.....	( 146 )
三、磁场对载流线圈的作用.....	( 148 )
四、磁力的功.....	( 155 )
§ 14-2 磁场对运动电荷的作用.....	( 158 )
一、洛仑兹力.....	( 158 )
二、洛仑兹力与安培力的关系.....	( 164 )
三、霍尔效应.....	( 165 )
§ 14-3 带电粒子在磁场中的运动.....	( 172 )

一、带电粒子在均匀磁场中的运动规律 .....	( 172 )
*二、带电粒子在电、磁场中运动规律的应用 .....	( 176 )
<b>第十五章 电磁感应</b> .....	(185)
§ 15-1 电磁感应定律 .....	( 185 )
一、电磁感应现象和楞次定律 .....	( 185 )
二、法拉第电磁感应定律 .....	( 188 )
§ 15-2 动生电动势与感生电动势 .....	( 191 )
一、动生电动势 .....	( 191 )
二、感生电动势 .....	( 203 )
*三、动生电动势与感生电动势相对性的讨论 .....	( 209 )
§ 15-3 自感 互感 涡电流 .....	( 212 )
一、自感应 .....	( 212 )
二、互感应 .....	( 219 )
三、涡流及其应用 .....	( 224 )
§ 15-4 磁场能量 .....	( 227 )
* § 15-5 非电量电测法 .....	( 231 )
一、电能与其它能量的转换 .....	( 231 )
二、非电量电测法 .....	( 233 )
<b>第十六章 物质的磁性</b> .....	(238)
§ 16-1 物质的磁性 .....	( 238 )
§ 16-2 顺磁质与抗磁质的磁化 .....	( 239 )
§ 16-3 磁化强度 * $B$ 、 $H$ 、 $M$ 的关系 .....	( 242 )
一、磁化强度 .....	( 242 )
*二、 $B$ 、 $H$ 、 $M$ 的关系 .....	( 243 )
§ 16-4 铁磁质的磁化和应用 .....	( 245 )
一、铁磁质的特性 .....	( 245 )
二、铁磁质的磁化机理 .....	( 250 )

*三、铁磁材料的分类与应用 .....	( 252 )
* § 16-5 超导体的磁效应 .....	(254)
一、超导强磁体 .....	( 255 )
二、超导体的抗磁效应 .....	( 256 )
* § 16-6 原子核的磁性和核磁共振 .....	(259)
一、原子核磁矩 .....	( 260 )
二、核磁共振原理 .....	( 260 )
三、核磁共振的应用 .....	( 262 )
<b>第十七章 电磁场和电磁波 .....</b>	<b>(264)</b>
§ 17-1 电、磁场知识的回顾 .....	( 264 )
一、电场方面 .....	( 264 )
二、磁场方面 .....	( 265 )
§ 17-2 位移电流及其所激发的磁场 .....	( 267 )
一、位移电流 .....	( 267 )
二、位移电流与全电流 .....	( 270 )
三、位移电流的磁场 .....	( 271 )
§ 17-3 麦克斯韦方程组 .....	( 275 )
§ 17-4 电磁波 .....	( 277 )
一、电磁场的传播——电磁波 .....	( 277 )
二、电磁波的能量 .....	( 279 )
*三、电磁波的辐射 .....	( 282 )
四、振荡电路 赫兹实验 .....	( 285 )
五、电磁波谱 .....	( 294 )
* § 17-5 电磁场的物质性与统一性 .....	(299)
一、电磁场是物质的一种形态 .....	( 299 )
二、电磁场是统一的整体 .....	( 302 )



## 第四篇 电 磁 学

电磁学是研究电磁场的基本性质和规律，以及电磁场和带电粒子相互作用的一门学科。远在公元前七世纪，我国已有发现磁矿石的记载。公元前585年，古希腊发现了摩擦后的琥珀会吸引草屑的现象。公元前239年，在我国的《吕氏春秋》中，载有“慈石召铁”的现象。东汉时(公元25—220年)，我国发明了磁性指南器具——司南。北宋时(公元十一世纪)发明了指南针。但在相当长的一段时间里，却认为电现象和磁现象是互不相关的，电学与磁学一直彼此独立地发展。直到1819年，奥斯特发现了电流对磁针的作用，1820年安培发现了磁铁对电流的作用，开始认识到电与磁的联系。1831年，法拉第发现了电磁感应规律，人们对电与磁的关系便有了更为深刻的认识。麦克斯韦在这基础上，于1865年建立了系统的电磁场理论，并指出了光波也是电磁波，从而使光学成为电磁场理论的组成部分。

电磁学的研究对人类社会起着越来越重要的作用。现今，从日常生活到生产部门，从各种新技术的应用到尖端科学的研究，都离不开电与磁。现代化程度越高，电磁应用的范围就越广。一切电磁器件和光电器件，例如电动机、发电机、电视机、微波、雷达、高能加速器、电子显微镜和电子计算机等，莫不有赖于电磁学的基本原理。而电工学、无线电电子学、自动控制学和物质的电结构理论等，都是在电磁学的基础上建立和发展起来的。特别值得指出的是超导材料的

研究，1986年以来取得了历史性的突破，被誉为这是百年一遇的重大发现，它将会在二十一世纪引起一场重大的产业革命。

本篇将介绍电磁现象与电磁规律及其在生产 and 科研中的一些应用。由于电和磁有着密切的联系，电场和磁场是统一电磁场的两个侧面，因此，在讨论电现象和磁现象的基础上，再讨论电和磁的联系，介绍统一的电磁运动的规律。

## 第十一章 静 电 场

静电场是相对于观察者静止的电荷所产生的场。本章首先从电场对电荷有力的作用，和电荷在电场中移动时电场力对电荷作功出发，引入电场强度和电位来描述静电场的特性，进而阐明反映静电场基本规律的场强叠加原理、高斯定理和场强环流定律，最后讨论场强和电位两者的关系。

### § 11-1 电 荷 库 仑 定 律

#### 一、电 荷

**1. 电荷与电荷守恒** 物质世界往往是千奇百怪的，物质所具有的质量没有正负之分，而物质所带的电荷却有正负之别。物质中的原子是由带正电荷的原子核和带负电荷的电子组成的。在正常状态下，原子呈电中性，没有净电荷，即核外电子的负电荷数目与核内的正电荷数目相等。然而，我们可用各种各样的方法使得物体带电，例如：摩擦起电、静电感应、气体电离、电磁感应和化学作用等，都能使物体带电。

物体所带电荷数量的多少叫做电荷量，简称电荷。在国际单位制中，电荷的单位是库仑（简称库，用C表示）。电子所带负电荷为 $-1.60 \times 10^{-19} \text{C}$ ，这个数值是电荷的最小自然单位。1库仑电荷量是这个最小单位的

$$\frac{1}{1.60 \times 10^{-19}} = 6.25 \times 10^{18} \text{ 倍}$$

实验证明，物体所带的净电荷不是无中生有地产生，而是使物体中原有的正、负电荷分离或转移的结果。也就是说，物体的带电过程，是把一些电子从一个物体转移到另一个物体，或从物体的一部分转移到另一部分的过程。总之，缺少了电子的物体带正电荷，具有多余电子的物体带负电荷。而且，不管用什么方法使物体带电，正、负电荷总是同时出现，量值又总是相等的。

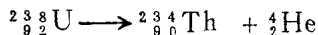
因此，某个系统若与外界无电荷交换，那末无论系统发生怎样的物理、化学变化，这个系统电荷的代数和总是保持不变的，这个规律叫做电荷守恒定律。电荷守恒定律是自然界的基本定律之一，它不仅在一切宏观过程中成立，一切微观过程（如核反应和基本粒子相互作用过程）也是普遍遵循的。

例如，两个高能光子湮没会产生正、负电子对，湮没前两个光子与湮没后正、负电子对的电荷代数和均为零，电荷是守恒的。又如1919年卢瑟福的 $\alpha$ 粒子散射实验：



反应前的电荷数（2 + 7）与反应后的电荷数（8 + 1）

相等。铀核 ${}^{238}_{92}\text{U}$ 核裂变



反应前电荷数（92）也等于反应后电荷数（90 + 2）。可见电荷守恒定律是自然界一切现象所必须遵循的基本规律。

**2. 电荷量子化** 前面已经指出，电子电荷的绝对值（用 $e$ 表示）是电荷的最小自然单位，因此任何带电体所带

的电荷量 $Q$ 可表示为

$$Q = ne$$

式中 $n$ 是正或负的整数。若物体带正电， $n$ 取正值，如对质子来说， $n = +1$ ；若物体带负电， $n$ 取负值，如对电子来说， $n = -1$ 。这就是说物体所带的电荷不是以连续的方式出现的，而是以一个个不连续的量值出现的。电荷这种只能取分立的、不连续量值的性质，叫做电荷的量子化。电荷的量子就是 $e$ 。

电荷的量子 $e$ 是一个很小的量，小得使电的“微粒性”在研究宏观电现象的实验中表现不出来。就象我们喝水时感觉不到水是由一个个水分子组成的那样。

然而，近代物理学已从理论上预言，有电荷量为 $\pm \frac{1}{3}e$ 或 $\pm \frac{2}{3}e$ 的粒子——层子（或称夸克）存在，并认为质子和中子等许多粒子都是由这更深层次的粒子——层子组成的。不过这种层子至今尚未直接为实验所发现。但可以相信，随着理论和实验研究的进一步深入，电荷的最小单元是可能会有新的变更的。而无论科学的发展是否能证实层子的存在，也无论电荷量子如何变更，电荷量子化的概念却是不会改变的。

在科学发展的今天，人们已深信电荷量子化的性质是毋庸置疑的。量子化是近代物理学中的一个基本概念，在以后的学习中还会知道，除了电荷量以外，诸如质量、能量、角动量等都是量子化的，故量子化概念也是研究物质及其运动的一个基本概念。

## 二、库仑定律

人们很早就知道，电荷间存在着力的作用。但对这种力的认识，很长一段时间都处于定性的初级阶段。直至十八世纪后期才开始作定量的研究。法国物理学家库仑利用扭秤装置，于1785年首先确立了点电荷间相互作用力的规律，即库仑定律。为更好学习库仑定律，以精确研究电荷的相互作用，我们先来讨论点电荷的概念。

**1. 点电荷概念** 观察表明，两个带电体间相互作用的静电力<sup>①</sup>，除与它们所带的电荷、它们之间的相对位置有关外，还与带电体的形状、大小、电荷分布情况及带电体所处介质的性质有关。要用实验直接确定所有这些因素对静电力的影响是困难的。但在一些具体问题中，若带电体的线度比起带电体间的距离来小得多，这时带电体的形状、大小就可以忽略不计。比如研究两个带电球体的相互作用，只要球体的直径远远小于球体间的距离，那么，静电力基本取决于它们的电荷量和距离，以及所在处介质的性质，即可以把带电球体所带的电荷看成集中在一个“点”上，而视为点电荷。所谓点电荷实质上是指这样的带电体，它本身的几何线度比它到其它带电体的距离（或比有关问题的距离）小得多。这种带电体的形状和电荷在体内的分布，对问题的研究已无关紧要，因此可把它抽象成一个几何点。

点电荷的概念类似于力学中质点的概念，是为简化问题的研究而抽象出来的一个物理模型。带电体能否看作点电荷，不仅取决于本身的大小，而且取决于相关问题的距离及

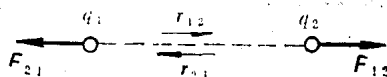
① 静电力——相对静止的电荷间的相互作用力

研究问题的精度。然而当带电体不能视为点电荷时，仍可以把带电体分成很多小块，使每一小块都足够小，以致可以把它们看成是点电荷。这样，整个带电体就可以看成是无限多个点电荷的集合体，整个带电体的电性质就由这些点电荷性质的总和来决定。

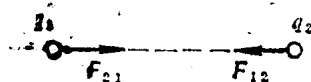
**2. 库仑定律** 它是两个点电荷间的静电力所服从的规律。该定律可表述为：

在真空中，两个静止的点电荷  $q_1$  及  $q_2$  之间的相互作用力的方向沿着它们的连线，同号电荷相斥，异号电荷相吸，作用力的大小与  $q_1$  和  $q_2$  的乘积成正比，与它们之间的距离  $r$  的平方成反比。即

$$F = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \quad (11-1)$$



a)  $q_1, q_2$  同号时为斥力



b)  $q_1, q_2$  异号时为吸力

图11-1 两个点电荷间的相互作用力

式中  $k$  是比例系数。

若以  $F_{12}$  表示  $q_1$  对  $q_2$  的作用力， $\hat{r}_{12}$  表示由  $q_1$  至  $q_2$  方向的单位矢量（见图11-1），则库仑定律可用矢量式表示为

$$F_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \hat{r}_{12}$$

当 $q_1$ 、 $q_2$ 同号时， $F_{12}$ 沿 $r_{12}$ 方向，即为排斥力如图11-1(a)所示；当 $q_1$ 、 $q_2$ 异号时， $F_{12}$ 沿 $-r_{12}$ 方向，即为吸引力如图11-1(b)所示。若将上式下标1、2对调，则此式将表示 $q_2$ 对 $q_1$ 的作用力 $F_{21}$ ，由于 $r_{21} = -r_{12}$ ，则 $F_{21} = -F_{12}$ 。可见静止电荷之间的库仑力满足牛顿第三定律。

如果用 $\hat{r}$ 表示由施力点电荷指向受力点电荷的单位矢量，则可把上面式中的脚标去掉，库仑定律的矢量式可表示成

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r} \quad (11-2)$$

**3. 电磁学的国际单位制** 在国际单位制(即SI制)中，电磁学的单位采用MKSA有理制。

MKSA制以长度、质量、时间及电流强度为基本量，以米、千克、秒及安培为基本单位。在MKSA制中，库仑定律即(11-2)式中的电量单位用库仑(=秒·安培)，力的单位用牛顿(=米·千克/秒<sup>2</sup>)，距离单位用米。比例系数 $k$ 的数值和单位，取决于式中各量所采用的单位，在MKSA制中实验测得

$$k = 8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \approx 9.00 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$$

国际单位制的电磁学部分，迄今通用“有理化米千克秒安培制”，又称MKSA有理制。即通常引入新恒量 $\epsilon_0$ 代替 $k$ ，令

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



$\epsilon_0$  称为真空中的介电系数，则

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = \frac{1}{4\pi \times 8.99 \times 10^9} \approx 8.85 \times 10^{-12} \text{C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \quad (11-3)$$

在国际制单位中，库仑定律应写为

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \hat{r} \quad (11-4)$$

所谓“有理化”，就在于因子  $4\pi$  的引入。这样库仑定律的形式虽然变得复杂一些，但却使一些常用公式不出现  $4\pi$  因子，形式变得简化。其优越性可在以后的学习中逐步体会到。

### 三、电介质对电荷相互作用的影响

当带电体处在电介质中，电介质会发生极化而出现极化电荷（又称束缚电荷）。即电介质分子中的正、负电荷会发生微观移动，在带电体周围将出现与带电体电荷异号的极化电荷，如图11-2所示。其作用就相当于减少了带电体的电荷量，而使电介质中带电体间的相互作用力减弱。

电介质中两个带电体间相互作用力的关系往往比较复杂，现仅介绍两个点电荷在无限大均匀电介质中的简单情况。

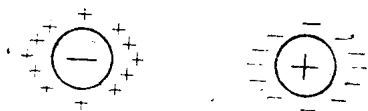


图11-2 电介质对电荷间相互的影响

设两个点电荷  $q_1$  和  $q_2$  处在无限大均匀电介质中，相距为  $r$ 。实验和理论均表明，这两个点电荷之间的相互作用力为真空中的  $\frac{1}{\epsilon_r}$  倍。因此这时库仑定律的表达式可写成