



# 普通物理学

# 电磁学

钟采池等 编著



普通物理学

# 电磁学

钟秉池 张东壁 钟克武等 编著

科学技术文献出版社

## 内 容 简 介

本书着重反映教学改革与教材更新精神,体现师范教育特点,内容新颖丰富。全书以场的概念为主线,阐述电磁现象中的基本概念和定律,多处介绍了相对论思想。具体内容有:真空中的静电场,有导体存在时的静电场,电介质中的静电场,稳恒电流,金属、电解质和气体中的电现象,真空中的稳恒磁场,磁介质中的磁场,电磁感应和暂态过程,电磁场和电磁波,相对论电磁学初步。

本书可用作师专、教育学院、高等职业技术院校的专用教材,也可作为普通中学、职业中学物理教师,电大、职大以及各类理工科大学物理学参考书。

普通物理学

电 磁 学

钟采池等 编著

科学技术文献出版社出版

(北京复兴路15号)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行 各地新华书店经售

787×1092毫米 32开本 15.25印张 340千字

1990年1月第1版 1990年1月第1次印刷

印数: 1—6500册

科技新书目: 213—112

ISBN 7-5023-0981-0/G · 373

定 价: 7.00元

## 前 言

为了适应我国教育事业发展的需要，高等师范专科学校物理教师开展了多种教材研究活动，积累了较为丰富的经验。在此基础上，全国师专物理教学研究会（中国物理学会教研会师专分会的前身）经过一再酝酿，组织编写了几本教材，本书就是其中之一。

本书着意反映教学改革、教材更新精神，体现师范教育特点，介绍了物理学家的贡献及其物理思想的发生和发展过程。全书以场的概念为主线，铺陈展开，前后呼应，阐述电磁现象中的基本概念和定律，多处介绍了相对论思想，反映了新的科学成就，编选了多种典型例题，力求便于教学，有利于启迪学生科学思维，培养学生自学、适应和开创能力。

本书由钟采池、张东壁、钟克武三同志主编。全书共十章，作者共十人。通过研究讨论，每人执笔写一章。从第一章至第十章，作者依次为：张东壁、李秀峰、张天喆、丁士章、谭树杰、钟采池、汪昭义、马存祥、李先荣、钟克武。1986年6月完成初稿，几经修改统稿，于1987年3月定稿。本书蒙国家教委理科教材编审会委员、华东师范大学胡瑶光教授审稿，提出了宝贵意见。研究会吕学光同志和刘以康、余培岳同志对本书的编写和出版给予热情支持和帮助。科学技术文献出版社审阅了本书稿以后，在众所周知的出版界现状下，对我们大力支持，表现了对教育事业的高度热忱。谨此一并致谢。

由于我们水平所限，书中缺点错误在所难免，欢迎批评  
指正。

编 者

1989年3月

# 目 录

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第一章 真空中的静电场 .....        | 1  |
| § 1.1 电荷和电荷守恒定律 .....    | 1  |
| 1. 电荷 .....              | 1  |
| 2. 物质的电结构 .....          | 3  |
| 3. 电荷守恒定律 .....          | 4  |
| § 1.2 库仑定律 .....         | 5  |
| 1. 库仑定律的建立 .....         | 5  |
| 2. 库仑定律 .....            | 8  |
| 3. 应用库仑定律应该注意的几个问题 ..... | 10 |
| § 1.3 电场与电场强度 .....      | 14 |
| 1. 电场 .....              | 14 |
| 2. 电场强度矢量 .....          | 15 |
| 3. 点电荷的电场强度 .....        | 17 |
| 4. 电场的叠加原理 .....         | 18 |
| § 1.4 静电场的高斯定理 .....     | 25 |
| 1. 电力线 .....             | 26 |
| 2. 电通量 .....             | 27 |
| 3. 静电场的高斯定理 .....        | 30 |
| § 1.5 静电场高斯定理的应用 .....   | 34 |
| 1. 已知电荷分布求通量 .....       | 34 |
| 2. 利用高斯定理求电场分布 .....     | 35 |
| § 1.6 静电场的环路定理 .....     | 41 |
| 1. 静电场力作功的特点 .....       | 41 |
| 2. 静电场的环路定理 .....        | 42 |

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 3. 电势能 .....             | 43 |
| 4. 电势差和电势 .....          | 43 |
| 5. 等势面 .....             | 46 |
| 6. 电势与电场强度的关系 .....      | 47 |
| § 1.7 电偶极子 .....         | 52 |
| 1. 定义 .....              | 52 |
| 2. 电偶极子的电场分布 .....       | 52 |
| 3. 电偶极子的电势分布 .....       | 56 |
| 4. 静电场中的电偶极子 .....       | 57 |
| 思考题 .....                | 61 |
| 习题 .....                 | 65 |
| 第二章 有导体存在时的静电场 .....     | 69 |
| § 2.1 静电场中导体的基本性质 .....  | 69 |
| 1. 静电感应现象 .....          | 69 |
| 2. 导体的静电平衡 .....         | 70 |
| 3. 静电平衡时导体的性质 .....      | 71 |
| 4. 导体表面附近的场强 .....       | 72 |
| 5. 孤立导体的形状对电荷分布的影响 ..... | 74 |
| § 2.2 导体空腔 .....         | 76 |
| 1. 导体空腔内无带电体 .....       | 76 |
| 2. 导体空腔内有带电体 .....       | 78 |
| 3. 静电屏蔽 .....            | 78 |
| 4. 范德格喇夫起电机 .....        | 80 |
| § 2.3 导体的电容和电容器 .....    | 84 |
| 1. 孤立导体的电容 .....         | 84 |
| 2. 电容器 .....             | 86 |
| 3. 电容器电容的计算 .....        | 88 |
| 4. 电容器的种类和使用 .....       | 91 |
| § 2.4 真空中静电场的能量 .....    | 94 |
| 1. 带电体系的静电能 .....        | 94 |

|                                                     |     |
|-----------------------------------------------------|-----|
| 2. 电场的能量和能量密度 .....                                 | 96  |
| 思考题 .....                                           | 100 |
| 习题 .....                                            | 103 |
| ✓ 第三章 电介质中的静电场 .....                                | 107 |
| § 3.1 电介质和电介质的极化 .....                              | 107 |
| 1. 电介质 .....                                        | 107 |
| 2. 电介质的极化 .....                                     | 108 |
| 3. 极化强度矢量 .....                                     | 111 |
| 4. 极化强度与场强的关系 .....                                 | 112 |
| § 3.2 束缚电荷 .....                                    | 114 |
| 1. 体束缚电荷密度与极化强度的关系 .....                            | 114 |
| 2. 束缚电荷面密度与极化强度的关系 .....                            | 116 |
| § 3.3 有介质存在时空间的场 .....                              | 118 |
| 1. 均匀电场中充满均匀电介质 .....                               | 118 |
| 2. 均匀极化的介质球 .....                                   | 119 |
| § 3.4 电介质中的静电场 .....                                | 122 |
| 1. 介质中的高斯定理 .....                                   | 122 |
| 2. $\vec{P}$ 、 $\vec{D}$ 、 $\vec{E}$ 三矢量之间的关系 ..... | 124 |
| 3. 介质中静电场能量 .....                                   | 125 |
| § 3.5 静电应用及其压电效应 .....                              | 130 |
| 1. 静电技术应用 .....                                     | 131 |
| 2. 防静电危害 .....                                      | 132 |
| 3. 压电现象 .....                                       | 133 |
| 4. 逆压电效应 .....                                      | 134 |
| 思考题 .....                                           | 135 |
| 习题 .....                                            | 135 |
| 第四章 稳恒电流 .....                                      | 139 |
| § 4.1 稳恒电流和稳恒电场 .....                               | 139 |
| 1. 电流与电流强度 .....                                    | 139 |
| 2. 电流密度 .....                                       | 141 |

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 3. 电流连续性方程            | 142 |
| 4. 稳恒电流与稳恒电场          | 144 |
| § 4.2 欧姆定律与焦耳定律       | 145 |
| 1. 欧姆定律 电阻 电阻率        | 145 |
| 2. 欧姆定律微分形式           | 149 |
| 3. 电流的功和功率 焦耳定律及其微分形式 | 150 |
| 4. 金属导电的微观解释          | 154 |
| § 4.3 超导电性            | 157 |
| 1. 超导体的基本性质           | 157 |
| 2. 超导材料的研究近况          | 161 |
| § 4.4 电源与电动势          | 163 |
| 1. 电源与非静电力            | 163 |
| 2. 电源电动势              | 166 |
| § 4.5 全电路和一段含源电路的欧姆定律 | 169 |
| 1. 全电路欧姆定律            | 169 |
| 2. 部分含源电路的欧姆定律        | 171 |
| § 4.6 简单直流电路          | 175 |
| 1. 串联电路               | 175 |
| 2. 并联电路               | 176 |
| 3. 混联电路               | 177 |
| 4. 应用举例               | 178 |
| § 4.7 基尔霍夫定律          | 184 |
| 1. 节点和回路              | 184 |
| 2. 节点定律               | 185 |
| 3. 回路定律               | 186 |
| 思考题                   | 190 |
| 习题                    | 193 |
| 第五章 金属、电解质和气体中的电现象    | 197 |
| § 5.1 脱出功与电子发射        | 197 |
| 1. 金属的脱出功             | 197 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 2. 热电子发射·····          | 199 |
| § 5.2 接触电势差和温差电现象····· | 201 |
| 1. 金属的接触电势差·····       | 201 |
| 2. 温差电现象及应用·····       | 205 |
| § 5.3 电解质的导电·····      | 209 |
| 1. 电解质的导电机理·····       | 209 |
| 2. 液体的电导率·····         | 210 |
| 3. 电解和电镀简介·····        | 211 |
| § 5.4 气体导电·····        | 212 |
| 1. 气体的被激导电和自激导电·····   | 212 |
| 2. 自激导电的几种形式·····      | 214 |
| 3. 等离子体简介·····         | 216 |
| 思考题·····               | 218 |
| 习题·····                | 219 |
| 第六章 真空中的稳恒磁场·····      | 221 |
| § 6.1 磁场 磁感应强度·····    | 221 |
| 1. 永磁体·····            | 221 |
| 2. 奥斯特实验·····          | 223 |
| 3. 磁的相互作用 磁场·····      | 225 |
| 4. 磁感应强度·····          | 228 |
| § 6.2 电流与运动电荷的磁场·····  | 231 |
| 1. 毕奥-萨伐尔定律·····       | 231 |
| 2. 几种载流线的磁场·····       | 233 |
| 3. 低速运动电荷的磁场·····      | 238 |
| § 6.3 磁场的高斯定理·····     | 240 |
| 1. 磁感应线·····           | 240 |
| 2. 磁通量·····            | 243 |
| 3. 磁场的高斯定理·····        | 244 |
| § 6.4 磁场的环路定理·····     | 245 |
| 1. 安培环路定理·····         | 245 |

|                                             |     |
|---------------------------------------------|-----|
| 2. 几种对称分布电流的磁场                              | 249 |
| 3. 磁场基本定理的重要性                               | 253 |
| § 6.5 磁场对电流的作用                              | 254 |
| 1. 安培力                                      | 254 |
| 2. 平行长直电流间的作用力                              | 255 |
| 3. 磁场中的载流平面线圈                               | 257 |
| § 6.6 磁场对运动电荷的作用                            | 264 |
| 1. 洛伦兹力公式                                   | 264 |
| 2. 带电粒子在磁场中的运动                              | 265 |
| 3. 磁场力在科学技术中的应用举例                           | 267 |
| § 6.7 电场磁场变换的定性说明                           | 275 |
| 1. 电荷的不变性                                   | 275 |
| 2. 场的重要作用                                   | 275 |
| 3. 电场磁场变换的定性说明                              | 276 |
| 思考题                                         | 278 |
| 习题                                          | 283 |
| 第七章 磁介质中的磁场                                 | 291 |
| § 7.1 磁介质的磁化                                | 291 |
| 1. 磁化 安培分子电流观点                              | 291 |
| 2. 介质磁化的微观机制                                | 292 |
| 3. 磁化强度矢量与磁化电流                              | 294 |
| § 7.2 磁介质中的磁场                               | 298 |
| 1. 磁介质内部的磁感应强度                              | 298 |
| 2. 有磁介质时的安培环路定理                             | 298 |
| 3. 有磁介质时的磁场高斯定理                             | 300 |
| 4. $\vec{M}$ 、 $\vec{B}$ 、 $\vec{H}$ 三矢量的关系 | 300 |
| § 7.3 铁磁性与铁磁质                               | 303 |
| 1. 铁磁质的磁化曲线                                 | 304 |
| 2. 磁滞现象和磁滞回线                                | 305 |
| 3. 铁磁材料的分类和应用                               | 308 |

|                        |      |
|------------------------|------|
| 4. 铁磁性起因 磁畴·····       | 30 9 |
| § 7.4 磁路定理·····        | 311  |
| 1. 磁路定理及简单磁路计算·····    | 312  |
| 2. 磁屏蔽·····            | 316  |
| 思考题 ·····              | 317  |
| 习题 ·····               | 319  |
| ✓ 第八章 电磁感应和暂态过程 ·····  | 322  |
| § 8.1 电磁感应定律·····      | 322  |
| 1. 电磁感应现象·····         | 322  |
| 2. 法拉第电磁感应定律·····      | 326  |
| 3. 楞次定律·····           | 329  |
| § 8.2 动生电动势与感生电动势····· | 330  |
| 1. 动生电动势与洛伦兹力·····     | 331  |
| 2. 感生电动势和感生电场·····     | 339  |
| 3. 电磁感应在生产技术中的应用·····  | 347  |
| § 8.3 自感与互感·····       | 354  |
| 1. 自感与自感系数·····        | 354  |
| 2. 互感与互感系数·····        | 357  |
| § 8.4 暂态过程·····        | 361  |
| 1. $RL$ 电路的暂态过程 ·····  | 361  |
| 2. $RC$ 电路的暂态过程 ·····  | 365  |
| § 8.5 磁场的能量·····       | 368  |
| 1. 自感磁能·····           | 368  |
| 2. 互感磁能·····           | 369  |
| 3. 磁场的能量和磁能密度·····     | 370  |
| 思考题 ·····              | 375  |
| 习题 ·····               | 378  |
| ✓ 第九章 电磁场和电磁波 ·····    | 387  |
| § 9.1 麦克斯韦电磁场理论·····   | 387  |
| 1. 稳恒电磁场基本定律的回顾·····   | 388  |

|                                           |     |
|-------------------------------------------|-----|
| 2. 涡旋电场和位移电流假说·····                       | 389 |
| 3. 麦克斯韦方程组·····                           | 398 |
| § 9.2 电磁波·····                            | 404 |
| 1. 从麦克斯韦方程组到电磁场波动方程·····                  | 404 |
| 2. 平面电磁波的性质·····                          | 407 |
| § 9.3 电磁波的辐射·····                         | 412 |
| 1. $LC$ 振荡电路 ·····                        | 413 |
| 2. 赫兹实验·····                              | 420 |
| 3. 电偶极辐射·····                             | 422 |
| 4. 电磁波谱与电磁波的物质性·····                      | 427 |
| 思考题 ·····                                 | 430 |
| 习题 ·····                                  | 432 |
| 第十章 相对论电磁学初步 ·····                        | 434 |
| § 10.1 惯性系间纯磁场力与纯电场力的变换 ·····             | 434 |
| 1. 任意两惯性系间电荷密度与电流密度的相对论变换·····            | 435 |
| 2. 在特定的惯性系间纯磁场力与纯电场力的变换·····              | 438 |
| § 10.2 电磁场的变换规律 ·····                     | 444 |
| 1. 带电平行板电容器在不同惯性系中的不同方位上呈<br>现的电磁场变换····· | 445 |
| 2. 载流线圈平行于运动方向时不同惯性系间的磁场变换·····           | 450 |
| 3. 惯性系间电磁场的变换规律·····                      | 451 |
| § 10.3 匀速运动带电粒子的电磁场 ·····                 | 454 |
| 1. 直角坐标下匀速运动带电粒子的电磁场·····                 | 455 |
| 2. 球坐标下匀速运动带电粒子的电磁场·····                  | 458 |
| § 10.4 电磁运动的普遍规律 ·····                    | 466 |
| 1. 时间与空间坐标偏微商算符的洛伦兹变换·····                | 466 |
| 2. 麦克斯韦方程组的洛伦兹变换不变性·····                  | 469 |
| 思考题 ·····                                 | 472 |
| 习题 ·····                                  | 472 |

# 第一章 真空中的静电场

本章研究真空中静止电荷所激发的电场。

库仑定律是静电学的一条基本的实验定律。由电荷在静电场中受到的电场力而引入了电场强度的概念。高斯定理和环路定理则是描述静电场的两条基本定理。由静电场力做功与路径无关的特点而引入电势能的概念。最后讨论带电粒子在电场中的运动。

## § 1.1 电荷和电荷守恒定律

### 1. 电荷

早在公元前六百年，古希腊人就知道琥珀与毛织物摩擦后，具有吸引轻小物体的性质。具有这种性质的物体，我们就称之为带电体，或者说该物体带上了电，简称带电。使物体带电的过程，称为起电。

实验表明，任何固体材料同任何其它材料相摩擦，都可以带电。通过物体间的相互摩擦达到使物体带电的方式，称为摩擦起电。

实验表明，用丝绢摩擦过的两根玻璃棒互相排斥（图1-1）；用毛皮摩擦过的

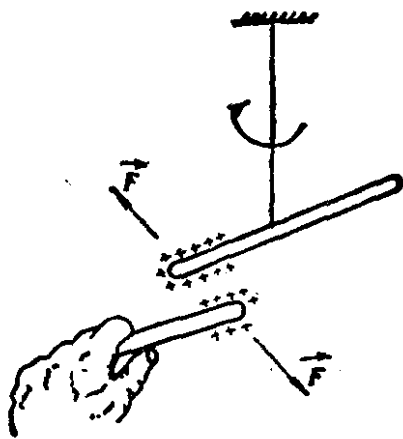


图 1-1

两根硬橡胶棒也是互相排斥。但是用丝绢摩擦过的玻璃棒与用毛皮摩擦过的硬橡胶棒之间却互相吸引。这就说明玻璃棒和硬橡胶棒上带的电荷有不同的类型。大量的实验表明，电荷有两种，而且也只有两种。美国科学家富兰克林（Benjamin Franklin 1706—1790）首先提出正电和负电的名词，他称呈现在玻璃棒上的电荷为正电荷，呈现在硬橡胶棒上的电荷为负电荷。

上述实验告诉我们：带同号电荷的物体互相排斥；带异号电荷的物体互相吸引。用带正电的玻璃棒或带负电的硬橡胶棒可以通过其与未知带电体之间的相互作用，来判断未知带电体带的是何种电荷。

电荷的单位是库仑。1库仑的电量定义如下：若导线中有1安培的稳定电流，则在1秒钟内流过此导线截面的电量就是1库仑。

电荷的量值是不连续的，它的基本的单元是一个质子或一个电子所带电量的绝对值 $e$ 。原子核、原子或离子、分子，以至于宏观物体所带的电量，都只能是这个基本电荷 $e$ 的整数倍，这就是电荷的“量子化”。近代物理从理论上预言有一种电量为 $\pm \frac{1}{3}e$ 或 $\pm \frac{2}{3}e$ 的基本粒子（称为层子或夸克）存在，并认为质子和中子等许多粒子都由层子组成，不过层子至今尚未直接为实验发现。

测量表明，基本电荷 $e$ 的量值为

$$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ 库仑。}$$

因而，1库仑的电量也可以说是基本电荷的

$$\frac{1}{1.602 \times 10^{-19}} = 6.24 \times 10^{18} \text{ 倍。}$$

## 2. 物质的电结构

我们发现用手拿着一根金属棒，再用毛皮摩擦它，这根金属棒好象不会带电。但是同样地摩擦一根硬橡胶棒就可以带电。这是为什么呢？要回答这个问题，我们就要从物质的电结构谈起。

我们知道一切宏观物体（固体、液体和气体）都是由分子构成的，分子是由原子构成的，原子内部有一个带正电的原子核，周围是一些带负电的电子围绕原子核运动。在一般情况下，核外电子数与核内正电荷数相同，因而就整个原子来说，是呈电中性的。但是，如果在一定的外因作用下（例如物体互相摩擦时），物体（或其中的一部分）得到或失去一定数量的电子，使得物体的电子的总数和正电荷总数不再相等，物体就呈现电性。

用上述物质电结构模型可以很好地解释摩擦起电的过程。例如，用丝绸摩擦玻璃棒时，玻璃棒失去电子而带正电，丝绸则获得电子而带负电。

根据电荷在物体上是否容易移动或传导，可以把物体大致分为两类：（1）电荷能够从产生的地方迅速转移或传导到其它部分的那种物体，称为导体。例如金属、石墨、电解液、人体、地，电离了的气体等都是导体。（2）电荷几乎只能停留在产生的地方的那种物体，称为绝缘体。例如玻璃、橡胶、丝绸、琥珀、松香、瓷器、油类、未电离的气体等都是绝缘体。

物体具有不同的导电性，这可以用物质的微观结构解释。金属之所以导电，是因为金属原子核最外层电子受到原子核的束缚力很弱，容易脱离它们所属的原子束缚而自由地在金属内运动。这些电子就称为自由电子，相当于气体的分子可以自由运动一样，这些自由电子也称为“电子气”。电解液之

所以导电，是因为其内部存在许多能作宏观运动的正、负离子。反之，在绝缘体内部，由于电子受到原子核的束缚作用很强，使它不能脱离其所属的原子。一般情况下，在绝缘体中几乎没有可以自由移动的电子，所以绝缘体不能导电。

除了导体和绝缘体之外，还有一类物质，其中可以移动的带电粒子比导体少，比绝缘体多，它的导电能力介于导体和绝缘体之间。这类物质称为半导体。硅、锗都是大家熟悉的半导体材料。

应当指出，上述分类不是绝对的，导体和绝缘体之间并没有严格的界限。在一定的条件下，物体转移或传导电荷的能力将发生变化。例如，在强电力作用下，绝缘体可以被击穿而变成导体。

### 3. 电荷守恒定律

当玻璃棒被丝绢摩擦后，玻璃棒上带有正电荷，实验测定表明，丝绢上出现等量的负电荷。在大家所熟知的静电感应中，导体的一侧出现正电荷，则导体的另一侧必出现等量的负电荷。这些事实告诉我们，摩擦起电和静电感应起电的过程中，并不产生新的电荷，只不过是把电荷从一个物体转移到另一个物体，或者是把电荷从物体的这个地方转移到另一个地方罢了。

大量实验证明，电荷既不能创造，也不能消灭，它们只能从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。也就是说，在一个与外界没有电荷交换的系统内，正负电荷的代数和在任何物理过程中始终保持不变，这叫做**电荷守恒定律**。电荷守恒定律在宏观现象和原子范围内两个方面，都经得起实验的严格考验，从未发现例外。电荷守恒定律是否经得起相对论不变性的检验呢？答案是肯定的，