



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 大学物理学

下 册

施建青 主编



高等教育出版社  
Higher Education Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 大学物理学

下 册

施建青 主编  
徐志君 林国成 徐东辉 编著

高等教育出版社

## 内容提要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本书从新世纪工程技术人才培养的总体要求出发,以培养学生的能力和素质为目的,以现代教育思想、教育方法为指导,以物质的存在形式和基本性质为主线,来设计大学物理的内容和课程体系;以现代物理思想统筹教学内容,注意加强物理学与现代科学技术的联系,来安排大学物理的教学内容;以统一性思想贯穿整个教材,从现代物理的思想高度来阐述基础物理的内容,并注意保持基础课程的风格。这是一部突破传统体系,改革力度较大的面向理工科学生的新教材,有利于提高物理教学的水平 and 培养学生的科学素质。

本书可作为普通高等学校理工科类本科生大学物理课程的教材,也可供其他读者参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

大学物理学.下册/施建青主编. —北京:高等教育出版社, 2009. 2

ISBN 978 - 7 - 04 - 025729 - 8

I. 大… II. 施… III. 物理学 - 高等学校 - 教材  
IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 003583 号

策划编辑 陶 铮 责任编辑 张海雁 封面设计 张 楠 责任绘图 朱 静  
版式设计 余 杨 责任校对 刘 莉 责任印制 毛斯璐

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街 4 号  
邮政编码 100120  
总 机 010 - 58581000  
经 销 蓝色畅想图书发行有限公司  
印 刷 北京市联华印刷厂

购书热线 010 - 58581118  
免费咨询 800 - 810 - 0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landaco.com>  
<http://www.landaco.com.cn>  
畅想教育 <http://www.widedu.com>

开 本 787 × 960 1/16  
印 张 25.5  
字 数 470 000

版 次 2009 年 2 月第 1 版  
印 次 2009 年 2 月第 1 次印刷  
定 价 26.60 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 25729 - 00

# 前 言

物理学是自然科学的基础,是自然科学中最具有活力的带头学科,也是高新技术的先导和源泉。历史上,每次产业革命都与物理学的重大发现和发展密切相关。当代信息、生命、材料、环境、能源、地球、空间、核科学等八大科学领域的蓬勃发展都是以现代物理学的迅速发展为基础。在人类追求真理、探索未知世界的过程中,物理学展现了一系列科学的世界观和方法论,深刻影响着人类对物质世界的基本认识、人类的思维方式和社会生活,是人类文明发展的基石,是人类认识自然、改造自然和创造财富所不可缺少的理论工具及手段,在素质教育中有着极其重要的地位和作用。随着科学技术迅猛发展,物理学不断揭示出许多新的现象与规律,这势必迫切要求物理教学能及时反映物理学的进展。

以物理学基础为内容的大学物理课程,是高等学校理工科各专业学生的一门非常重要的通识性必修基础课。大学物理课程在为学生系统地打好必要的物理基础,培养学生树立科学的世界观,增强学生分析问题和解决问题的能力,培养学生科学观念、探索精神和创新精神、科学思维能力和智力、科学的方法、科学精神和科学作风等方面,具有其他课程不能替代的重要作用。这门课程所教授的基本概念、基本理论和基本方法是构成学生科学素养的重要组成部分,是一个科学工作者和工程技术人员所必备的。通过大学物理课程的教学,使学生对物理学的基本概念、基本理论和基本方法有比较系统的认识和正确的理解,为进一步学习打下坚实的基础。在大学物理课程的各个教学环节中,我们都应在传授知识的同时,注重学生分析问题和解决问题能力的培养,注重学生探索精神和创新意识的培养,努力实现学生知识、能力、素质的协调发展。

本教材从新世纪工程技术人才培养的总体要求出发,以培养学生的能力和素质为目的,以现代教育思想、教育方法为指导,以物质的存在形式和基本性质为主线,来设计大学物理的内容和课程体系;以现代物理思想统筹教学内容,注意加强物理学与现代科学技术的联系,来安排大学物理的教学内容;以统一性思想贯穿整个教材,从现代物理的思想高度来阐述基础物理的内容,并注意保持基础课程的风格。这是一部突破传统体系,改革力度较大的面向工科学生的新教材,有利于提高物理教学的水平和培养学生的科学素质。

本教材是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,共分两册,分为实物、场、物质与波三篇。上册为实物、场(静电场部分),包括绪论、运动的描述、三大守恒定律、多粒子体系(统计物理学基础和热力学基础)、狭义相对论、静电场等

## II 前 言

内容;下册为场(磁学部分)、物质与波,包括恒定磁场、变化电磁场、振动学基础、波动学基础、波动光学、场的量子性、量子力学基础及其应用等内容。

本教材的教学内容要求和安排,与浙江省高等学校大学物理教学指导委员会主持的、由浙江省16所省属高等学校(包括浙江工业大学、浙江师范大学、宁波大学、浙江理工大学、杭州电子科技大学、浙江工商大学、浙江财经学院、杭州师范大学、中国计量学院、浙江海洋学院、浙江科技学院、绍兴文理学院、湖州师范学院、嘉兴学院、台州学院、丽水学院等)联合参加研制的“浙江省高等学校大学物理试题库”建设要求相适应,该试题库建设工作由本教材主编施建青老师负责。

本教材的教学内容要求和安排还与高中物理新课改的教学内容紧密衔接,与教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理基础课程教学指导分委员会制定的《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2008)相适应,符合国内各高等学校大学物理教学基本要求和现状。

本教材适用于80~128学时的理工科类大学物理课程教学,可作为理工科类学生的大学物理课程教材,也可以作为专科院校、函授、电视大学、夜大学师生的教学参考书。

本书为下册。本书的第六章、第七章、第九章、第十章由施建青执笔,第十一章由林国成执笔,第十二章和第十三章由施建青、徐东辉共同执笔,第十四章由徐志君执笔,全书由施建青修改和统稿。本书力图成为大学物理课程建设的结晶,凝聚着参与课程建设教师们多年来的集体智慧和心血。在本书的编写过程中,自始至终得到兄弟院校同行老师和同学们的关心和支持,得到浙江工业大学应用物理系基础物理系列课程教学团队老师们的指导和热情帮助,在此致以衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中的不足不妥之处,敬请专家、同行和读者批评指正。

编 者

2008年7月

# 目 录

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 第七章 恒定磁场 .....            | 1  |
| 7.1 恒定电流的基本概念 .....       | 1  |
| 7.1.1 电流与电流密度 .....       | 1  |
| 7.1.2 电动势 .....           | 3  |
| 7.1.3 欧姆定律的微分形式 .....     | 5  |
| 7.2 磁场的磁感应强度 .....        | 6  |
| 7.2.1 磁现象 .....           | 6  |
| 7.2.2 磁起源于电流 .....        | 6  |
| 7.2.3 磁场 .....            | 8  |
| 7.2.4 磁感应强度 .....         | 8  |
| 7.2.5 磁场的叠加原理 .....       | 9  |
| 7.3 毕奥 - 萨伐尔定律及其应用 .....  | 10 |
| 7.3.1 毕奥 - 萨伐尔定律 .....    | 10 |
| 7.3.2 毕奥 - 萨伐尔定律的应用 ..... | 11 |
| 7.3.3 运动电荷的磁场 .....       | 20 |
| 7.4 恒定磁场的基本性质 .....       | 21 |
| 7.4.1 磁场的高斯定理 .....       | 21 |
| 7.4.2 磁场的安培环路定理 .....     | 26 |
| 7.5 磁场对运动电荷的作用 .....      | 31 |
| 7.5.1 洛伦兹力 .....          | 31 |
| 7.5.2 带电粒子在磁场中的运动 .....   | 33 |
| 7.5.3 霍尔效应 .....          | 35 |
| 7.5.4 磁聚焦和磁约束 .....       | 37 |
| 7.6 磁场对电流的作用 .....        | 39 |
| 7.6.1 安培定律 .....          | 39 |
| 7.6.2 磁场对载流导线的作用 .....    | 39 |
| 7.6.3 磁场对载流线圈的作用 .....    | 44 |
| 7.7 磁场中的磁介质 .....         | 46 |
| 7.7.1 磁介质 .....           | 47 |
| 7.7.2 顺磁质和抗磁质的磁化机制 .....  | 48 |

## II 目 录

|                             |           |
|-----------------------------|-----------|
| 7.7.3 磁化强度与磁化电流 .....       | 50        |
| 7.7.4 磁介质中的安培环路定理 .....     | 51        |
| 7.7.5 铁磁质 .....             | 54        |
| 本章提要 .....                  | 59        |
| 习题 .....                    | 62        |
| <b>第八章 变化的电磁场</b> .....     | <b>69</b> |
| 8.1 电磁感应的基本定律 .....         | 69        |
| 8.1.1 电磁感应现象 .....          | 69        |
| 8.1.2 楞次定律 .....            | 69        |
| 8.1.3 法拉第电磁感应定律 .....       | 70        |
| 8.2 动生电动势和感生电动势 .....       | 74        |
| 8.2.1 动生电动势 .....           | 74        |
| 8.2.2 感生电动势 .....           | 80        |
| 8.2.3 感生电场的应用 .....         | 84        |
| 8.3 互感和自感 .....             | 88        |
| 8.3.1 互感 .....              | 88        |
| 8.3.2 自感 .....              | 90        |
| 8.3.3 自感的串联 .....           | 92        |
| 8.4 磁场能量 .....              | 94        |
| 8.4.1 自感磁能 .....            | 94        |
| 8.4.2 磁场能量 .....            | 95        |
| 8.5 位移电流 .....              | 98        |
| 8.5.1 位移电流假设 .....          | 98        |
| 8.5.2 全电流 全电流定理 .....       | 100       |
| 8.6 麦克斯韦方程组 .....           | 103       |
| 8.6.1 静电场和恒定磁场基本规律的回顾 ..... | 103       |
| 8.6.2 麦克斯韦方程组 .....         | 103       |
| 8.6.3 电磁场是物质的一种形态 .....     | 105       |
| 本章提要 .....                  | 105       |
| 习题 .....                    | 108       |

## 物 质 与 波

|                        |            |
|------------------------|------------|
| <b>第九章 振动学基础</b> ..... | <b>117</b> |
| 9.1 简谐振动 .....         | 117        |
| 9.1.1 简谐振动的运动方程 .....  | 118        |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 9.1.2 简谐振动的特征量 .....          | 120        |
| 9.1.3 简谐振动的实例 .....           | 125        |
| 9.1.4 简谐振动的旋转矢量法 .....        | 129        |
| 9.1.5 简谐振动的能量 .....           | 131        |
| 9.2 简谐振动的合成与分解 .....          | 133        |
| 9.2.1 同一直线上同频率的简谐振动的合成 .....  | 134        |
| 9.2.2 同一直线上不同频率的简谐振动的合成 ..... | 137        |
| 9.2.3 相互垂直的简谐振动的合成 .....      | 139        |
| 9.2.4 振动的分解 .....             | 142        |
| 9.3 阻尼振动 .....                | 144        |
| 9.3.1 阻尼振动 .....              | 144        |
| 9.3.2 受迫振动 共振 .....           | 146        |
| 本章提要 .....                    | 150        |
| 习题 .....                      | 152        |
| <b>第十章 波动学基础</b> .....        | <b>156</b> |
| 10.1 波动的基本概念 .....            | 156        |
| 10.1.1 机械波的产生 .....           | 156        |
| 10.1.2 横波和纵波 .....            | 157        |
| 10.1.3 波线和波面 .....            | 158        |
| 10.1.4 波的特征量 .....            | 159        |
| 10.1.5 波形曲线 .....             | 162        |
| 10.1.6 波动所遵从的基本原理 .....       | 163        |
| 10.2 简谐波 .....                | 165        |
| 10.2.1 波函数 .....              | 165        |
| 10.2.2 波函数的物理意义 .....         | 167        |
| 10.2.3 波动微分方程 .....           | 171        |
| 10.3 波的能量 .....               | 172        |
| 10.3.1 波的能量和强度 .....          | 172        |
| 10.3.2 声波 .....               | 176        |
| 10.4 波的干涉 .....               | 181        |
| 10.4.1 波的干涉 .....             | 181        |
| 10.4.2 驻波 .....               | 185        |
| 10.5 电磁波 .....                | 193        |
| 10.5.1 电磁波的产生和传播 .....        | 193        |
| 10.5.2 电磁波的性质 .....           | 196        |



## IV 目 录

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 10.5.3 电磁波谱 .....            | 198        |
| 10.6 多普勒效应 .....             | 200        |
| 10.6.1 机械波的多普勒效应 .....       | 200        |
| 10.6.2 电磁波的多普勒效应 .....       | 203        |
| 10.6.3 冲击波 .....             | 205        |
| 10.7 非线性波简介 .....            | 206        |
| 10.7.1 非线性效应对波动的影响 .....     | 206        |
| 10.7.2 孤波与孤子 .....           | 207        |
| 本章提要 .....                   | 208        |
| 习题 .....                     | 209        |
| <b>第十一章 波动光学</b> .....       | <b>214</b> |
| 11.1 光的干涉 .....              | 214        |
| 11.1.1 光的相干性 .....           | 214        |
| 11.1.2 分波阵面干涉 .....          | 219        |
| 11.1.3 分振幅干涉 .....           | 224        |
| 11.2 光的衍射 .....              | 232        |
| 11.2.1 光的衍射现象 .....          | 232        |
| 11.2.2 惠更斯-菲涅耳原理 .....       | 233        |
| 11.2.3 单缝夫琅禾费衍射 .....        | 234        |
| 11.2.4 光栅衍射 .....            | 241        |
| 11.2.5 圆孔衍射、光学仪器的分辨本领 .....  | 245        |
| 11.2.6 X射线的衍射 .....          | 248        |
| 11.3 光的偏振 .....              | 249        |
| 11.3.1 自然光与偏振光 .....         | 249        |
| 11.3.2 偏振光的起偏和检偏 .....       | 251        |
| 11.3.3 反射光和折射光的偏振 .....      | 253        |
| 11.3.4 光的双折射 .....           | 255        |
| 11.3.5 椭圆偏振光与圆偏振光 .....      | 257        |
| 11.3.6 旋光现象 .....            | 260        |
| 本章提要 .....                   | 263        |
| 习题 .....                     | 266        |
| <b>第十二章 场的量子性</b> .....      | <b>272</b> |
| 12.1 黑体辐射与普朗克量子假设 .....      | 272        |
| 12.1.1 热辐射 黑体辐射的规律 .....     | 272        |
| 12.1.2 经典理论的困难与普朗克量子假设 ..... | 275        |

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| 12.2 光电效应与爱因斯坦光子假说 .....          | 277        |
| 12.2.1 光电效应的实验规律与经典电磁学理论的困难 ..... | 277        |
| 12.2.2 光子假说与爱因斯坦光电效应方程 .....      | 279        |
| 12.2.3 光的波粒二象性 .....              | 281        |
| 12.3 康普顿效应 .....                  | 282        |
| 12.3.1 康普顿效应的实验规律 .....           | 282        |
| 12.3.2 对康普顿效应的量子解释 .....          | 283        |
| 12.3.3 单位与常量 .....                | 285        |
| 12.4 氢原子光谱与玻尔理论 .....             | 287        |
| 12.4.1 氢原子光谱与巴耳末公式 .....          | 288        |
| 12.4.2 卢瑟福原子核式模型与经典理论的困难 .....    | 289        |
| 12.4.3 玻尔理论的基本假设 .....            | 290        |
| 12.4.4 氢原子的能级和光谱 .....            | 291        |
| 12.4.5 玻尔理论的成功和局限 .....           | 294        |
| 12.5 激光的基本原理 .....                | 297        |
| 12.5.1 激光产生的基本原理 .....            | 297        |
| 12.5.2 激光的特性 .....                | 302        |
| 本章提要 .....                        | 303        |
| 习题 .....                          | 304        |
| <b>第十三章 量子力学基本原理</b> .....        | <b>306</b> |
| 13.1 物质波假说及其实验验证 .....            | 306        |
| 13.1.1 德布罗意的物质波假说 .....           | 306        |
| 13.1.2 德布罗意波的实验验证 .....           | 309        |
| 13.2 不确定性关系 .....                 | 311        |
| 13.2.1 海森伯不确定性关系 .....            | 311        |
| 13.2.2 不确定性关系应用举例 .....           | 313        |
| 13.3 微观粒子状态的描述——波函数 .....         | 315        |
| 13.3.1 描述自由粒子的波函数 .....           | 315        |
| 13.3.2 波函数的统计诠释 .....             | 316        |
| 13.3.3 波函数的归一化条件和标准条件 .....       | 318        |
| 13.4 微观粒子状态演化的描述——薛定谔方程 .....     | 319        |
| 13.4.1 含时薛定谔方程 .....              | 319        |
| 13.4.2 定态薛定谔方程 .....              | 321        |
| 13.5 一维势阱 .....                   | 322        |
| 13.5.1 一维无限深势阱中的粒子 .....          | 323        |

# VI 目 录

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 13.5.2 隧道效应 .....          | 328 |
| 13.6 氢原子 .....             | 329 |
| 13.6.1 氢原子的定态薛定谔方程 .....   | 330 |
| 13.6.2 描述氢原子状态的三个量子数 ..... | 331 |
| 13.6.3 电子自旋与第四个量子数 .....   | 333 |
| 13.6.4 多电子原子的壳层结构 .....    | 335 |
| 本章提要 .....                 | 338 |
| 习题 .....                   | 339 |
| 第十四章 量子力学的应用 .....         | 341 |
| 14.1 固体中的电子 .....          | 341 |
| 14.1.1 固体的量子理论 .....       | 341 |
| 14.1.2 自由电子按能量分布 .....     | 342 |
| 14.1.3 金属导电的量子论解释 .....    | 348 |
| 14.1.4 能带、导体和绝缘体 .....     | 351 |
| 14.1.5 半导体 .....           | 354 |
| 14.1.6 PN 结 .....          | 356 |
| 14.1.7 晶体管 .....           | 358 |
| 14.2 核物理 .....             | 360 |
| 14.2.1 核的一般性质 .....        | 360 |
| 14.2.2 核的结合能 .....         | 363 |
| 14.2.3 核的自旋和磁矩 .....       | 365 |
| 14.2.4 放射性衰变 .....         | 368 |
| 14.2.5 穆斯堡尔效应 .....        | 375 |
| 14.2.6 核反应 .....           | 378 |
| 14.2.7 核裂变与核聚变 .....       | 381 |
| 本章提要 .....                 | 382 |
| 习题 .....                   | 384 |
| 习题参考答案 .....               | 386 |

# 第七章 恒定磁场

在上一章中,已经详细地讨论了静电场的性质和规律,本章将讨论由恒定电流产生的磁场的性质和规律。这种磁场在空间的分布不随时间变化,故称为恒定磁场。

恒定磁场和静电场是性质不同的两种场,但这两种场在空间的分布都不随时间变化,在研究方法上也有很多类似之处。因此,读者在学习时要注意恒定磁场和静电场的对比,这样可以加深对有关概念和原理、定律的理解。

在这一章里,将讨论恒定电流的基本概念、磁现象、磁感应强度的概念、恒定磁场的基本性质,以及恒定磁场与运动电荷、载流导线及线圈、磁介质的相互作用等。

## 7.1 恒定电流的基本概念

本节主要介绍恒定电流、电动势等重要概念。

### 7.1.1 电流与电流密度

#### 1. 电流与恒定电流

通常,电流是由大量电荷做定向运动形成的。电荷的携带者叫载流子(carrier),金属导体和气态导体中的载流子是大量可以做自由运动的电子;N型和P型半导体中载流子分别是电子和带正电的“空穴”(hole);电解液中的载流子是其中的正负离子,由载流子形成的电流叫传导电流(conduction current)。形成传导电流的条件是:①存在载流子;②两端有电势差,即电压。这两个条件是缺一不可的。

由于负电荷沿某一方向运动和等量的正电荷沿反方向运动所产生的电磁效应是相同的,由于历史的原因,习惯上将电流看成是正电荷的定向运动形成的,并规定正电荷的运动方向为电流方向。

一般地,电流在固体、液体、气体以及真空中都可以存在,但考虑到在实际生活和工作中遇见的电流多数是金属导体中的电流,所以本节下面的讨论将是针对金属导体中的电流进行的。这其中包括的原理都不难推广到其他形式的电流。

电流的强弱用电流(electric current)这个物理量来描述,用符号 $I$ 表示。电

流的定义为单位时间内通过导体截面的电荷量:

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (7-1-1)$$

如果电流的大小和方向不随时间而变化,这种电流叫做恒定电流(steady electric current),又称直流。电流是一个标量。在国际单位制(SI)中,规定电流为基本量,单位是安培,简称安,用符号 A 表示。 $1 \text{ A} = 1 \text{ C} \cdot \text{s}^{-1}$ 。常用的电流单位还有 mA(毫安)和  $\mu\text{A}$ (微安)。

在恒定电流情况下,导体内部电荷分布不随时间改变。不随时间改变的电荷分布产生不随时间变化的电场,这种电场称为恒定电场。恒定电场与静电场有许多相似之处,它服从静电场的高斯定理和环路定理,也可以引入电势、电势差等概念。所以,在许多讨论中,常常把恒定电场视为静电场。

## 2. 电流密度

电流  $I$  虽能描写电流的强弱,但它只能描述通过导体中某一截面电流的整体特性,并不能说明电流通过截面上各点的情况。当电流通过粗细不均匀的导体时,如图 7-1-1 所示,通过截面积大的  $S_1$  面和截面积小的  $S_2$  面的电流相同,但这两个面中的电流分布并不相同。为了细致描述导体内各点的电流分布,必须引入一个新的物理量——电流密度(current density)。电流密度用  $\boldsymbol{j}$  表示。电流密度是矢量,其方向与该点正电荷运动方向一致,其大小等于垂直于电流方向的单位面积的电流,记作

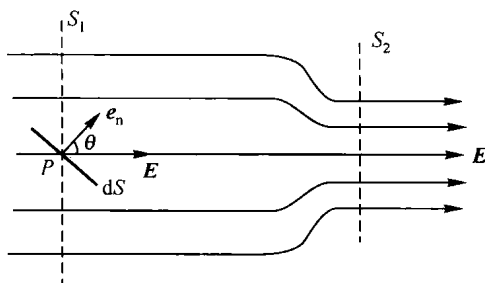


图 7-1-1

$$\boldsymbol{j} = \frac{dI}{dS} \quad (7-1-2)$$

在国际单位制中,电流密度的单位是安培每平方米,符号为  $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ 。电流密度是空间位置的矢量函数,它能精确描述导体中电流分布情况。

在一般情况下,截面元  $dS$  法线的单位矢量  $\boldsymbol{e}_n$  与该点电流密度  $\boldsymbol{j}$  之间有一个夹角  $\theta$ ,如图 7-1-1 所示。面积元矢量为  $d\boldsymbol{S} = dS\boldsymbol{e}_n$ ,此时通过任一截面电流为

$$I = \int dI = \int_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} = \int_S j dS \cos \theta \quad (7-1-3)$$

在导体中各点的电流密度  $\mathbf{j}$  可以有不同的大小和方向,这就构成了一个矢量场,叫电流场。像电场分布可以用电场线形象描绘一样,电流场也可以用电流线形象描绘。所谓电流线就是这样一些曲线,其上任意一点的切线方向就是该点  $\mathbf{j}$  的方向,通过任一垂直截面的电流线数目与该点  $\mathbf{j}$  的大小成正比。通常所说的电流分布实际上是指电流密度  $\mathbf{j}$  的分布,而电流的强弱和方向严格意义上应该是指电流密度的大小和方向。

### 7.1.2 电动势

在电路中,若能在导体两端维持恒定的电势差,导体中就将有恒定的电流流过。那么怎样来维持恒定的电势差呢?

在如图 7-1-2 所示的电路中,如开始时,极板 A 和极板 B 分别带有正、负电荷。在电场力作用下,正电荷从极板 A 通过导线移到极板 B(当然,实际上,在导体中做宏观定向运动的是自由电子),并与极板 B 上的负电荷中和,直至两极板间的电势差消失。

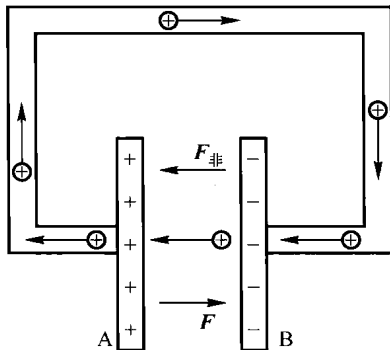


图 7-1-2

但是,如果能把正电荷从负极板 B 沿着两极板间另一路径,移至正极板 A 上,并使两极板维持正、负电荷不变,这

样两极板间就有恒定的电势差,导线中也就有恒定的电流通过。显然,要把正电荷从极板 B 移至极板 A 必须有非静电力作用才行。这种能提供非静电力的装置称电源。可以设想,电源内部存在“非静电力场”。电源的种类很多,常见的有电解电池、蓄电池、光电池、发电机等,它们把化学能、光能或者机械能转化为电能。尽管各种电源的非静电力的性质不同,但在电源内部,非静电力  $F_{\text{非}}$  都要克服静电力  $F$  做功(如图 7-1-2 所示),因此,电源中非静电力  $F_{\text{非}}$  做功的过程,就是把其他形式的能量转化为电能的过程。

在电路内一般既有静电力又有非静电力,现以  $\mathbf{E}$  表示静电场强,  $\mathbf{E}_{\text{非}}$  表示非静电电力场的场强,那么,当正电荷通过电源绕闭合电路一周时,静电力与非静电力对正电荷所做的功为

$$W = \oint_L q(\mathbf{E} + \mathbf{E}_{\text{非}}) \cdot d\mathbf{l}$$

由于静电场是保守力场,故

$$\oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$$

则

$$W = q \oint_L \mathbf{E}_{\text{非}} \cdot d\mathbf{l} \quad (7-1-4)$$

把单位正电荷绕闭合回路一周时,非静电力对它所做的功定义为电源的电动势,用符号  $\mathcal{E}$  表示,有

$$\mathcal{E} = \frac{W}{q} = \oint_L \mathbf{E}_{\text{非}} \cdot d\mathbf{l} \quad (7-1-5)$$

这就是说,“非静电力场的场强”沿整个闭合电路的环流不等于零,而等于电源的电动势。这就是非静电力场的场强与静电场的区别,后者的电场强度环流为零。由于非静电力的环流不等于零,因此这种非静电力是非保守力,非静电力场是非保守力场。

由于非静电力和非静电力场只存在于电源内部,在外电路中没有非静电力,所以在图 7-1-2 所示的外电路上

$$\int_{\text{外电路}} \mathbf{E}_{\text{非}} \cdot d\mathbf{l} = 0$$

这样,(7-1-5)式可改写为

$$\mathcal{E} = \oint_L \mathbf{E}_{\text{非}} \cdot d\mathbf{l} = \int_B^A \mathbf{E}_{\text{非}} \cdot d\mathbf{l} \quad (7-1-6)$$

(7-1-6)式表示电源电动势的大小等于把单位正电荷从负极经电源内部移至正极时非静电力所做的功。在(7-1-6)式的积分号中,A 为电源正极,B 为电源负极,所以(7-1-6)式也可以写成

$$\mathcal{E} = \int_{(-)}^{(+)} \mathbf{E}_{\text{非}} \cdot d\mathbf{l} \quad (7-1-7)$$

电动势的单位是伏特,用符号 V 表示。它虽是一标量,但它和电流一样也规定有方向,即电源内部电势升高的方向,也就是说,从负极经电源内部到正极的方向规定为电动势的方向。需要注意的是,虽然电动势和电势的单位相同,但是它们是两个不同的物理量。电动势是与非静电力的功联系在一起的;而电势则是与静电力的功联系在一起的。

电源电动势的大小只取决于电源本身的性质。一定的电源具有一定的电动势,而与外电路无关。应该指出,电流通过电源内部时与通过外电路一样,也要受到阻碍,换句话说,电源内部也有电阻,叫做电源的内阻,一般用符号  $R_i$  表示。为了方便起见,在作电路图时常将电源的电动势  $\mathcal{E}$  和内阻  $R_i$  表述为如图 7-1-3 所示。

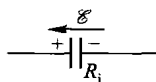


图 7-1-3

### 7.1.3 欧姆定律的微分形式

如图 7-1-4 所示,在导体中取一长为  $dl$ 、截面积为  $dS$  的小圆柱体,圆柱体的轴线与电流流向平行。设小圆柱体两端面上的电势分别为  $V$  和  $V+dV$ 。根据欧姆定律,通过截面  $dS$  的电流为

$$dI = \frac{V - (V + dV)}{R} = -\frac{dV}{R} \quad (7-1-8)$$

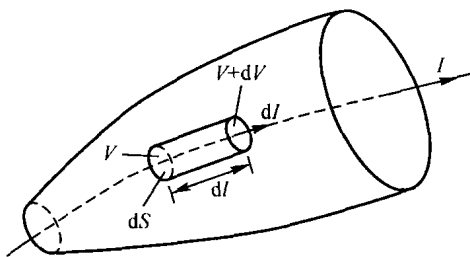


图 7-1-4

式中  $R$  为小圆柱体的电阻,有  $R = \rho dl/dS$ 。于是上式可以表示为

$$dI = -\frac{1}{\rho} \frac{dV}{dl} dS$$

即

$$\frac{dI}{dS} = -\frac{1}{\rho} \frac{dV}{dl} = j \quad (7-1-9)$$

根据电场强度与电势的关系

$$-dV = \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$$

(7-1-9)式可写成

$$j = \frac{1}{\rho} \mathbf{E}$$

由于导体中任一点的电流密度  $\mathbf{j}$  和电场强度  $\mathbf{E}$  都是矢量,并且它们的方向相同,故有

$$\mathbf{j} = \frac{1}{\rho} \mathbf{E} = \gamma \mathbf{E} \quad (7-1-10)$$

这就是欧姆定律的微分形式,其中

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad (7-1-11)$$

称为电导率。在国际单位制中,电导率的单位为  $S/m$  (西门子每米)。(7-1-10)式表明,通过导体中任一点的电流密度  $\mathbf{j}$  等于该点的场强  $\mathbf{E}$  与导体的电阻率  $\rho$  之比值。可见,电流密度和导体材料的性质有关,而与导体的形状和



大小无关。

此外,由(7-1-10)式可见,当导体处于静电平衡时,由于 $E=0$ ,所以 $j=0$ 。

## 7.2 磁场的磁感应强度

本节将讨论磁现象、电磁起源、磁感应强度的概念和磁场的叠加原理。

### 7.2.1 磁现象

能够吸引铁、镍、钴及其合金的性质称之为磁性(magnetism),具有磁性的物质叫做磁体。早在公元前3世纪的战国时期,我国就有磁石吸铁的记载,东汉“司南勺”被公认为是最早的磁性指南器具,后发展成为指南针用于航海,并发现地球的地磁偏角。

通过对早期磁现象的研究,不难得到磁铁的一些特性,主要有:

(1) 磁铁的磁极是成对出现的。若把条形天然磁铁置入铁粉中,可以看到它的两端吸引铁粉最多,中部吸引铁粉很少,甚至没有,表明条形磁铁的两端磁性最强,中间部分的磁性最弱。磁性最强的区域称为磁铁的磁极区,简称磁极(magnetic pole);磁性最弱的区域称为中性区。实验表明,任何形状的磁铁,均具有同样的两个磁极区和一个中性区。若将一个磁铁分成两部分,则每一部分亦同样有两个磁极区和一个中性区。无论将磁铁分得多么小,每一小块磁铁均同样有两个磁极,可见,磁铁的磁极总是成对出现的。

(2) 磁极具有指示南北的性质。若将一小磁针悬吊起,使它能在水平面内自由转动。实验表明,小磁针静止时,它的磁极总是指向地球的南北方向,指向北方的磁极称为指北极,简称北极(用N表示),指向南方的磁极称为指南极,简称南极(用S表示)。

(3) 同名磁极相互排斥,异名磁极相互吸引。由于磁极有指示南北的性质,说明地球本身是一个大的磁铁。地球的磁北极在地球地理南极附近,地球的磁南极在地球地理北极附近。地理极轴和地磁轴并不重合,它们间的夹角叫地磁偏角(geomagnetic declination),约为 $15^\circ$ 。

(4) 磁单极(magnetic monopole)还没有发现。在自然界中,目前还没有发现独立存在的磁北极或磁南极,即没有发现磁单极的存在。

### 7.2.2 磁起源于电流

在19世纪以前,人们不知道电和磁的联系,认为电现象和磁现象彼此无关。1600年,吉尔伯特在他写的《论磁、磁体和作为一个巨大磁体的地球》一书中,指出了电现象和磁现象之间深刻的差异,诸如磁性质是几种少数磁体具有的性质,