



普通高等教育“十二五”规划教材

PHYSICS

# 物理学教程

## 下册

张庆国 尤景汉 主编

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



013064655

04-43  
208  
V2

普通高等教育“十二五”规划教材

# 物理学教程

## 下册

主 编 张庆国 尤景汉

副主编 陈庆东 汤正新



机械工业出版社



北航

C1672317

04-43  
208  
V2

013084222

本书是根据 2010 年教育部新颁发的《理工科类大学物理课程教学基本要求》，并结合编者多年的教学实践编写而成的。全书涵盖了基本要求中 A 类知识点的全部核心内容，同时也包含了 B 类知识点大部分的拓展内容。全书分上、下两册。本书是下册，内容包括：磁学、光学、相对论基础、量子理论基础以及专题选讲。

本书在保证基本内容的前提下，适当拓宽了近代物理部分，增加了在工程中的一些实际应用。本书可作为一般院校非物理专业的理工科类大学物理教材或参考书，也可用于专科物理（包括夜大、电大、函授等）的教学。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

物理学教程. 下册/张庆国, 尤景汉主编. —北京: 机械工业出版社, 2013. 6  
普通高等教育“十二五”规划教材  
ISBN 978-7-111-42404-8

I. ①物… II. ①张…②尤… III. ①物理学—高等学校—教材 IV. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 092645 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 李永联 责任编辑: 李永联 陈崇昱

版式设计: 霍永明 责任校对: 刘怡丹

封面设计: 饶薇 责任印制: 张楠

涿州市京南印刷厂印刷

2013 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·20 印张·388 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-42404-8

定价: 32.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

## 前 言

为贯彻“国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020)”的精神,按照教育部高等学校物理基础课程教学指导分委员会2010年制定的《理工科类大学物理课程教学基本要求》,结合我们多年的教学经验和教学研究成果编写了这套适用于一般院校的大学物理教材。

大学物理教学的目的是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 and 正确的理解,增强分析问题和解决问题的能力,培养探索精神和创新意识,提高科学素养,树立科学的世界观。加之它的普遍性、基础性以及与其他学科的相关性,所以,在高等学校各专业的人才培养过程中,大学物理都是一门重要的通识性必修基础课。

在编写本教材时,主要注意了以下几点:

(1) 考虑到一般院校大学物理课程学时的限制,本书主要将“基本要求”中的A类知识点作为核心内容,阐述物理学的基础理论,涵盖了全部的74条内容。同时,对B类知识点的51条内容有选择地进行拓宽。这样,既保证了课程的系统性和完整性,又能使学生的知识面得到一定的拓宽。

(2) 正确处理经典物理和近代物理的关系。“加强基础,拓宽近代”已成为大学物理教学改革的发展趋势。我们认为,经典物理不但是学习理工科各专业知识的基础理论,而且也是学习近代科学技术的理论基础。同时,经典物理是当今科学和技术各领域应用最广泛的基础理论,所以,在拓宽近代内容的同时,我们并不是一味压缩经典内容,而是尽可能挖掘经典内容更深层次的涵义和应用。比如,在力学中,我们介绍了对称性与守恒律的关系;在热学中,介绍了熵与信息;在电磁学中,介绍了场致发射显微镜等,使经典物理与近代物理有机联系起来,处处充满了现代气息。

(3) 提高教学质量是高等教育的永恒主题,而创新能力的培养是近期高等教育改革的热门话题。作为高校的一门公共基础课,如何在这方面有所担当,是从事大学物理课程教学的每个工作者应该思考的问题。在本书内容的编排和习题的选择上,我们力求在这方面有所体现。比如,注重对问题的分析,注重物理学理论在工程中的应用,注重与生产、生活实际相结合等。本书特别强调,对于物理问题,首先要进行认真的分析,只有通过分析,才能透彻地理解问题、解决问



题。例如，对一些物理概念的引出、定理的证明注意了分析的方法；对于力学例题，不是简单地写上“根据（或利用）……定理，列出方程”，而是根据研究对象的受力图，自然地分析出所用的定理、定律等。正是基于此，本书不仅适用老师的教，更适用于学生的学。

(4) 编写本书时，尽量采用书刊上发表的较新的教学研究成果，并尽量结合作者多年的教学经验，例如，稳恒磁场的镜像对称电流元定理、位移电流的引入、机械波的多普勒效应、在相对论中通过实例讲述光的多普勒效应、两个独立普通光源的干涉等。有些教研成果则通过习题予以介绍，例如不用洛仑兹变换导出相对论的速度变换公式。

(5) 按照新的《教学基本要求》，同时借鉴国外物理教材的基本内容以及现行我国中学物理课程的改革等，在基本内容和知识点上较之传统大学物理教材有所增加。如把以前从未涉及的“几何光学”内容也编入书中，这使得本书在内容和结构上更趋完整。

(6) 为了提高学生思想品德的修养，培养学生追求真理、不畏权势和实事求是的科学精神，我们在本书的每章开头均介绍了一位颇有建树的物理学家，如坚持真理、不畏权势的科学先驱——伽利略，善于思考、富于想象的物理鼻祖——牛顿，聪颖勤奋、锐意进取的电磁理论创始人——麦克斯韦，淡泊名利、大胆创新的物理大师——爱因斯坦等。这样，一方面介绍了他们在科学上的贡献和高尚的品德，另一方面使学生了解了物理学的发展。

(7) 本书使用全国科学技术名词审定委员会审定公布的物理学名词。书中如果不作特别说明，各物理量均采用国际单位制。

(8) 为方便教学，在本书出版的同时，还制作了与之配套的电子教案和学习辅导用书。电子教案可根据任课老师的讲课特点进行修改使用。

本书的参考教学时数在 130 以内，可作为一般院校非物理专业的理工科大学物理教材，也可用于专科物理（包括夜大、电大、函授等）的教学。根据使用者的具体情况，本书加有 \* 号的内容可以选讲或自学。

本书由张庆国、尤景汉任主编，负责全书框架的设计和统稿，陈庆东、汤正新任副主编。参加编写的人员有：张庆国（编写第 1、2、9 章、附录），陈庆东（编写第 3、4、5 章），刘香茹（编写第 6、7 章），巩晓阳（编写第 8、10 章），汤正新（编写第 11、12、13、14、15 章），尤景汉（编写第 16、17、18、19、20 章）。

在编写本书时，我们还参考了一些国内外大学物理教材，特别是郑思明教授主编的《大学物理学》和张三慧教授主编的《大学物理学》，借鉴了其中的部分

内容。在编写过程中，我校大学物理教研室的老师们提出了很多建设性建议。本书的出版得到了机械工业出版社和河南科技大学教务处的大力支持。在此，我们一并表示衷心的感谢。

由于我们水平有限，编写时间仓促，书中错误之处在所难免，希望广大读者多提宝贵意见，以使本书更趋完善。

|    |       |        |
|----|-------|--------|
| 1  | ..... | 编 者    |
| 1  | ..... | 1.1    |
| 1  | ..... | 1.1.1  |
| 2  | ..... | 1.1.2  |
| 3  | ..... | 1.1.3  |
| 3  | ..... | 1.1.4  |
| 4  | ..... | 1.1.5  |
| 5  | ..... | 1.1.6  |
| 6  | ..... | 1.1.7  |
| 9  | ..... | 1.1.8  |
| 10 | ..... | 1.1.9  |
| 11 | ..... | 1.1.10 |
| 11 | ..... | 1.1.11 |
| 11 | ..... | 1.1.12 |
| 15 | ..... | 1.1.13 |
| 15 | ..... | 1.1.14 |
| 15 | ..... | 1.1.15 |
| 14 | ..... | 1.1.16 |
| 12 | ..... | 1.1.17 |
| 10 | ..... | 1.1.18 |
| 10 | ..... | 1.1.19 |
| 10 | ..... | 1.1.20 |
| 17 | ..... | 1.1.21 |
| 23 | ..... | 1.1.22 |
| 24 | ..... | 1.1.23 |
| 22 | ..... | 1.1.24 |
| 22 | ..... | 1.1.25 |
| 22 | ..... | 1.1.26 |
| 28 | ..... | 1.1.27 |
| 33 | ..... | 1.1.28 |

本。对奥斯特实验进行了定量研究，建立了安培定律，并提出了安培环路定理。楞次定律，磁通量。对安培定律进行了定量研究，建立了安培环路定理。楞次定律，磁通量。对安培定律进行了定量研究，建立了安培环路定理。楞次定律，磁通量。

## 目 录

### 前言

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第 9 章 稳恒电流 .....             | 1  |
| 9.1 电流和电流密度 .....            | 1  |
| 9.1.1 电流 .....               | 1  |
| 9.1.2 电流密度 .....             | 2  |
| 9.1.3 稳恒电流 .....             | 3  |
| 9.1.4 稳恒电流的电流密度 .....        | 3  |
| 9.2 欧姆定律的微分形式 .....          | 4  |
| 9.3 电源的电动势 .....             | 5  |
| 9.4 全电路欧姆定律 .....            | 6  |
| 习题 .....                     | 9  |
| 第 10 章 稳恒磁场 .....            | 10 |
| 10.1 磁现象及磁学理论发展 .....        | 11 |
| 10.1.1 磁现象 .....             | 11 |
| 10.1.2 磁学理论的发展 .....         | 11 |
| 10.1.3 安培分子电流假说及物质磁性起源 ..... | 12 |
| 10.2 磁场 磁感应强度 磁场的高斯定理 .....  | 12 |
| 10.2.1 磁感应强度 .....           | 12 |
| 10.2.2 磁感线 .....             | 14 |
| 10.2.3 磁通量 .....             | 15 |
| 10.2.4 磁场的高斯定理 .....         | 16 |
| 10.3 毕奥-萨伐尔定律及其应用 .....      | 16 |
| 10.3.1 毕奥-萨伐尔定律 .....        | 16 |
| 10.3.2 毕奥-萨伐尔定律的应用 .....     | 17 |
| 10.3.3 镜像对称电流元定理 .....       | 23 |
| 10.3.4 运动电荷产生的磁场 .....       | 24 |
| 10.4 安培环路定理 .....            | 25 |
| 10.4.1 安培环路定理 .....          | 25 |
| 10.4.2 由安培环路定理求磁场 .....      | 28 |
| 10.5 洛仑兹力及其应用 .....          | 33 |

|               |                  |           |
|---------------|------------------|-----------|
| 10.5.1        | 洛伦兹力             | 33        |
| 10.5.2        | 洛伦兹力的应用          | 33        |
| 10.6          | 磁场对电流的作用         | 40        |
| 10.6.1        | 磁场对载流导线的作用——安培定律 | 40        |
| 10.6.2        | 安培定律的应用          | 40        |
| 10.6.3        | 磁力的功             | 46        |
| 10.7          | 磁介质中的磁场          | 47        |
| 10.7.1        | 磁介质的分类           | 47        |
| 10.7.2        | 分子电流和分子磁矩        | 48        |
| 10.7.3        | 顺磁质和抗磁质的磁化机制     | 49        |
| 10.7.4        | 磁介质的磁化 磁化强度      | 50        |
| 10.7.5        | 有介质时的安培环路定理和磁场强度 | 51        |
| 10.7.6        | 铁磁质              | 54        |
|               | 习题               | 57        |
| <b>第 11 章</b> | <b>电磁感应</b>      | <b>64</b> |
| 11.1          | 电磁感应定律           | 64        |
| 11.1.1        | 电磁感应现象的发现        | 64        |
| 11.1.2        | 电磁感应现象           | 65        |
| 11.1.3        | 法拉第电磁感应定律        | 66        |
| 11.2          | 动生电动势            | 72        |
| 11.3          | 感生电动势 感应电场       | 78        |
| 11.3.1        | 感生电动势和感应电场       | 78        |
| 11.3.2        | 电子感应加速器的基本原理     | 83        |
| 11.3.3        | 涡电流              | 84        |
| 11.4          | 自感应              | 86        |
| 11.5          | 磁场的能量            | 89        |
| 11.5.1        | 通电自感线圈的能量        | 89        |
| 11.5.2        | 磁场的能量            | 90        |
| 11.6          | 互感应              | 91        |
| 11.7          | 电磁场理论的基本概念       | 94        |
| 11.7.1        | 电磁场规律总结          | 94        |
| 11.7.2        | 位移电流             | 95        |
| 11.7.3        | 电磁场 麦克斯韦方程组      | 99        |
| 11.8          | 电磁波的产生及其性质       | 101       |
| 11.8.1        | 电磁波的产生           | 101       |
| 11.8.2        | 平面电磁波的性质         | 102       |



|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 习题                    | 103 |
| <b>第 5 篇 光学</b>       | 111 |
| <b>第 12 章 几何光学</b>    | 112 |
| 12.1 几何光学的基本定律        | 112 |
| 12.1.1 几何光学的基本定律      | 112 |
| 12.1.2 费马原理           | 113 |
| 12.1.3 单心光束 实像和虚像     | 114 |
| 12.1.4 光在平面上的反射和折射    | 114 |
| 12.2 光在球面上的反射和折射      | 116 |
| 12.2.1 球面反射对光束单心性的破坏  | 117 |
| 12.2.2 近轴光线下球面反射的物像公式 | 117 |
| 12.2.3 球面折射对光束单心性的破坏  | 118 |
| 12.2.4 近轴光线下球面折射的物像公式 | 118 |
| 12.2.5 共轴球面系统的成像      | 119 |
| 12.3 薄透镜              | 120 |
| 12.3.1 近轴条件下薄透镜的物像公式  | 120 |
| 12.3.2 薄透镜成像的作图法      | 121 |
| 习题                    | 123 |
| <b>第 13 章 光的干涉</b>    | 124 |
| 13.1 单色光的波动表达式        | 124 |
| 13.2 相干光              | 126 |
| 13.2.1 相干光的获得         | 126 |
| 13.2.2 干涉加强或减弱的条件     | 127 |
| 13.3 杨氏双缝干涉           | 129 |
| 13.3.1 实验装置           | 129 |
| 13.3.2 双缝干涉的条纹分布及其特征  | 129 |
| 13.3.3 其他双缝型的干涉实验     | 131 |
| 13.4 光程差与相位差          | 132 |
| 13.4.1 光程差            | 132 |
| 13.4.2 透镜不引起额外的光程差    | 132 |
| 13.5 薄膜干涉             | 134 |
| 13.5.1 薄膜等倾干涉         | 134 |
| 13.5.2 薄膜等厚干涉         | 138 |
| 13.6 迈克耳逊干涉仪          | 142 |
| 13.7 光的相干性            | 144 |

|                    |                   |     |
|--------------------|-------------------|-----|
| 13.7.1             | 光的时间相干性           | 144 |
| 13.7.2             | 光的空间相干性           | 146 |
|                    | 习题                | 147 |
| <b>第 14 章 光的衍射</b> |                   | 152 |
| 14.1               | 光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理  | 152 |
| 14.1.1             | 光的衍射现象            | 152 |
| 14.1.2             | 惠更斯-菲涅耳原理         | 153 |
| 14.1.3             | 衍射现象的分类           | 154 |
| 14.2               | 夫琅禾费单缝衍射          | 155 |
| 14.2.1             | 旋转矢量法             | 156 |
| 14.2.2             | 菲涅耳半波带法           | 157 |
| 14.2.3             | 光强的分布特征           | 158 |
| 14.2.4             | 条纹间距              | 159 |
| 14.3               | 衍射光栅              | 160 |
| 14.3.1             | 光栅的构成             | 160 |
| 14.3.2             | 光栅衍射              | 161 |
| 14.4               | 圆孔衍射 光学仪器的分辨本领    | 165 |
| 14.4.1             | 圆孔夫琅禾费衍射          | 165 |
| 14.4.2             | 光学仪器的分辨本领         | 166 |
|                    | 习题                | 168 |
| <b>第 15 章 光的偏振</b> |                   | 171 |
| 15.1               | 自然光与偏振光           | 171 |
| 15.2               | 偏振片的起偏与检偏 马吕斯定律   | 173 |
| 15.2.1             | 偏振片的起偏与检偏         | 173 |
| 15.2.2             | 马吕斯定律             | 174 |
| 15.3               | 反射和折射时光的偏振 布儒斯特定律 | 175 |
| 15.3.1             | 光在反射和折射时的偏振       | 175 |
| 15.3.2             | 布儒斯特定律            | 176 |
| 15.4               | 光通过晶体时的偏振现象       | 177 |
| 15.4.1             | 双折射现象 o 光和 e 光    | 177 |
| 15.4.2             | 光轴和主截面            | 177 |
| 15.4.3             | 双折射现象的解释          | 179 |
| 15.5               | 偏振光的应用            | 180 |
| 15.5.1             | 偏振片的应用            | 180 |
| 15.5.2             | 偏振光的干涉            | 180 |
| 15.5.3             | 克尔效应              | 181 |

|                    |                       |            |
|--------------------|-----------------------|------------|
| 15.5.4             | 旋光效应                  | 182        |
|                    | 习题                    | 182        |
| <b>第6篇 近代物理</b>    |                       | <b>185</b> |
| <b>第16章 相对论基础</b>  |                       | <b>186</b> |
| 16.1               | 伽利略变换 力学相对性原理         | 186        |
| 16.1.1             | 伽利略变换 力学相对性原理         | 186        |
| 16.1.2             | 迈克耳逊-莫雷实验 伽利略变换遇到的问题  | 188        |
| 16.2               | 狭义相对论的基本假设和时空观        | 191        |
| 16.2.1             | 狭义相对论的两条基本假设          | 191        |
| 16.2.2             | 狭义相对论的时空观             | 191        |
| 16.3               | 狭义相对论动力学基础            | 202        |
| 16.3.1             | 相对论质量                 | 202        |
| 16.3.2             | 相对论动力学基本方程            | 203        |
| 16.3.3             | 相对论能量                 | 204        |
| 16.3.4             | 动量和能量的关系              | 205        |
| 16.4*              | 广义相对论简介               | 206        |
| 16.4.1             | 广义相对论原理与时空弯曲          | 206        |
| 16.4.2             | 等效原理和局部惯性系            | 209        |
| 16.4.3             | 广义相对论的可观测效应           | 210        |
| 16.4.4             | 黑洞                    | 213        |
|                    | 习题                    | 215        |
| <b>第17章 早期的量子论</b> |                       | <b>216</b> |
| 17.1               | 热辐射和普朗克量子假说           | 216        |
| 17.1.1             | 热辐射的单色辐射出射度           | 216        |
| 17.1.2             | 绝对黑体热辐射的实验规律和经典理论的困难  | 217        |
| 17.1.3             | 普朗克量子假说               | 220        |
| 17.1.4             | 对应原理                  | 220        |
| 17.2               | 光电效应                  | 221        |
| 17.2.1             | 光电效应的实验规律             | 221        |
| 17.2.2             | 经典理论的困难               | 223        |
| 17.2.3             | 爱因斯坦光量子假设以及对光电效应实验的解释 | 223        |
| 17.3               | 光的波粒二象性               | 225        |
| 17.4               | 康普顿效应                 | 226        |
| 17.4.1             | 康普顿效应的实验规律            | 226        |
| 17.4.2             | 经典理论的困难               | 228        |

|                      |                |     |
|----------------------|----------------|-----|
| 17.4.3               | 康普顿效应的正确解释     | 228 |
| 17.5                 | 玻尔的氢原子理论       | 231 |
| 17.5.1               | 氢原子光谱的实验规律     | 231 |
| 17.5.2               | 卢瑟福的原子核式模型     | 232 |
| 17.5.3               | 玻尔的氢原子理论       | 232 |
| 17.5.4               | 弗兰克-赫兹实验       | 234 |
|                      | 习题             | 236 |
| <b>第 18 章 量子力学基础</b> |                | 238 |
| 18.1                 | 实物粒子的波粒二象性     | 238 |
| 18.1.1               | 德布罗意假设         | 238 |
| 18.1.2               | 电子衍射实验         | 239 |
| 18.2                 | 微观粒子的状态描述      | 241 |
| 18.2.1               | 概率波            | 241 |
| 18.2.2               | 不确定关系          | 244 |
| 18.2.3               | 波函数            | 248 |
| 18.3                 | 微观粒子的运动方程      | 249 |
| 18.3.1               | 定态薛定谔方程        | 249 |
| 18.3.2               | 一维定态问题         | 252 |
| 18.4                 | 氢原子 电子自旋 四个量子数 | 258 |
| 18.4.1               | 氢原子            | 259 |
| 18.4.2               | 电子自旋           | 261 |
| 18.4.3               | 四个量子数          | 262 |
| 18.5                 | 原子的壳层结构        | 262 |
| 18.5.1               | 泡利不相容原理        | 262 |
| 18.5.2               | 能量最小原理         | 263 |
|                      | 习题             | 266 |
| <b>* 第 19 章 激光</b>   |                | 268 |
| 19.1                 | 自发辐射 受激辐射 受激吸收 | 269 |
| 19.1.1               | 自发辐射           | 269 |
| 19.1.2               | 受激辐射           | 269 |
| 19.1.3               | 受激吸收           | 270 |
| 19.2                 | 粒子数反转和光放大      | 271 |
| 19.3                 | 激光器和激光的形成      | 272 |
| 19.3.1               | 激光器的基本构造       | 272 |
| 19.3.2               | 激光的形成          | 272 |
| 19.4                 | 激光的纵模与横模       | 274 |

|          |                      |            |
|----------|----------------------|------------|
| 19.4.1   | 激光的纵模                | 274        |
| 19.4.2   | 激光的横模                | 275        |
| 19.5     | 激光的特性与应用             | 276        |
| 19.5.1   | 激光的特性                | 276        |
| 19.5.2   | 激光的应用                | 277        |
|          | 习题                   | 277        |
| <b>*</b> | <b>第 20 章 固体中的电子</b> | <b>278</b> |
| 20.1     | 自由电子按能量的分布           | 278        |
| 20.2     | 金属导电的量子论解释           | 283        |
| 20.3     | 量子统计                 | 284        |
| 20.4     | 能带 导体和绝缘体            | 287        |
| 20.5     | 半导体                  | 290        |
| 20.6     | pn 结                 | 291        |
| 20.7     | 半导体器件                | 293        |
| 20.7.1   | 发光二极管 (LED)          | 293        |
| 20.7.2   | 光电池                  | 293        |
| 20.7.3   | 半导体三极管               | 294        |
| 20.7.4   | 金属氧化物场效应管 (MOSFET)   | 294        |
| 20.7.5   | 集成电路                 | 295        |
|          | 习题                   | 295        |
|          | <b>附录</b>            | <b>296</b> |
|          | 附录 A 习题答案            | 296        |
|          | 附录 B 基本物理常量          | 304        |
|          | 附录 C 国际单位制           | 305        |
|          | <b>参考文献</b>          | <b>307</b> |





安培 (André - Marie Ampère, 1775—1836), 法国物理学家。他博览群书, 勤于思考, 勇于探索, 是自学成才的典范。他发现了安培定则、电流的相互作用规律、发明了电流计、提出分子电流假说、给出了安培定律, 电流的单位“安培”就是以他的姓氏命名的。他在数学和化学方面也有突出的贡献。《电动力学现象的数学理论》一书是他在电磁学研究中的经典论著。麦克斯韦称赞他的工作是科学史上最光辉的成就之一, 还把安培誉为“电学中的牛顿”。

## 第9章 稳恒电流

有关稳恒电流的很多内容我们已经在中学物理中学习过。本章只介绍电流密度、欧姆定律的微分形式和电源电动势等。

### 9.1 电流和电流密度

#### 9.1.1 电流

电荷的定向运动形成电流。这里所指的“电荷”可以是多种多样的, 例如, 金属中的电子、电解质(酸、碱、盐)溶液中的正、负离子, 这些统称为“载流子”, 它们的定向移动形成的电流称为传导电流。宏观带电粒子或带电物体的机械运动也形成电流, 称为运流电流。还有一种电流称为位移电流, 是由于变化的电场引起的, 将在第11章电磁感应中讨论。本章主要讨论传导电流。

要形成电流, 也就是要使载流子作有规则的移动, 必须使它们受力, 使它们处于电场之中。我们知道, 当导体处于静电平衡时, 其内部没有电场, 电荷不会发生定向移动, 整个导体是等势体。因此, 要形成电流, 必须使载流子所在的区域内有电势差存在。这里要注意“有规则”或“定向”几个字, 在没有外电场的情况下, 载流子在导体内作的是无规则的热运动, 从总体来看, 它们并不形成电流。

电荷定向运动的强弱用电流来表示,它是单位时间内通过导体某一截面的电荷量。如果在导体上任取一个截面,在时间  $dt$  内,通过这一截面的电荷量为  $dQ$ ,则电流  $I$  就定义为

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (9-1)$$

电流是一个标量,但是电荷的移动是有方向的,我们习惯上规定:正电荷定向移动的方向为电流的方向。在国际单位制(SI)中,电流的单位是安培(A)。安培是国际单位制中的基本单位之一。

### 9.1.2 电流密度

电流是一个标量,它描述导体中通过某一截面电流的整体特性。当大块导体中有电流通过时,导体中任一截面上的不同点处电流的大小和方向一般是不同的。例如,在图9-1中,电流通过粗细不均匀的导体,  $A$ ,  $B$  两点的电流特征就不相同。因此,我们引入电流密度矢量  $\boldsymbol{j}$  来描述电流在导体中的分布情况。某点电流密度的大小等于通过与该点处正电荷运动方向垂直的单位面积的电流,也就是在单位时间内通过与该点处正电荷运动方向垂直的单位面积的电量;电流密度的方向是该点处正电荷定向移动的方向,或该点处电场强度的方向。

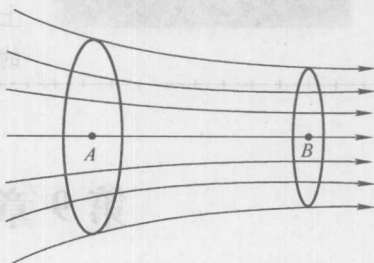


图9-1 电流的分布

在导体内部某一点附近,取一个面积为  $dS_{\perp}$  的面积元,并使它与该处电场强度  $\boldsymbol{E}$  的方向垂直,也就是使它的法线方向与该处电场强度  $\boldsymbol{E}$  的方向相同,如图9-2a所示,用  $\boldsymbol{n}$  表示面积元法线方向的单位矢量,则面积元可写为  $d\boldsymbol{S}_{\perp} = dS_{\perp} \boldsymbol{n}$ 。如果通过  $dS_{\perp}$  的电流为  $dI$ ,则比值  $dI/dS_{\perp}$  表示在该点附近通过单位面积的电流,也就是该点处电流密度的大小,即

$$\boldsymbol{j} = \frac{dI}{dS_{\perp}} \quad (9-2)$$

或

$$dI = j dS_{\perp} \quad (9-3)$$

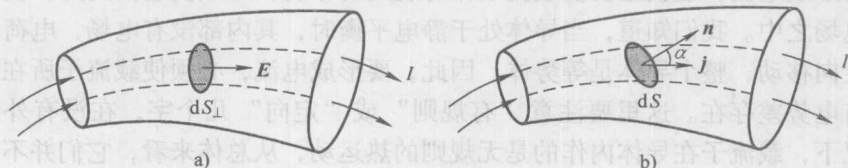


图9-2 电流密度

如果所取面积元  $dS$  的法线方向与该点场强  $E$  的方向 (或  $j$  的方向) 不一致, 可以将  $dS$  投影到与  $j$  一致的方向上 (也就是将面积元投影到与  $j$  垂直的方向上), 如图 9-2b 所示, 因为  $dS_{\perp} = dS \cos \alpha$ , 代入式 (9-3), 得

$$dI = j dS \cos \alpha = j \cdot dS$$

所以, 通过一个任意曲面的电流就可以写为

$$I = \int_S j \cdot dS \quad (9-4)$$

### 9.1.3 稳恒电流

在大块导体中, 各点的电流密度  $j$  可以有不同的数值和方向, 这就形成了一个矢量场, 称为电流场。如果电流场不随时间变化, 这样的电流就称为稳恒电流, 这就要求电荷的分布不随时间变化, 因而电荷产生的电场也不随时间变化, 称为稳恒电场 (静电场的电荷分布也不随时间变化, 它的基本规律, 如高斯定理、环流定理等对稳恒电场也适用)。

对于封闭曲面, 我们规定垂直于曲面向外的方向为法线方向, 那么流入曲面的  $j$  与那里的  $dS$  成钝角, 因此, 流入曲面的电

流  $I_{\text{入}} = \int_S j \cdot dS < 0$ ; 流出曲面的  $j$  与那里的

$dS$  成锐角,  $I_{\text{出}} = \int_S j \cdot dS > 0$ , 如图 9-3 所示。

通过整个曲面的电流  $I = \oint_S j \cdot dS = I_{\text{入}} + I_{\text{出}}$ 。

稳恒电流的特点是, 在单位时间内进入任意封闭曲面的电荷量等于从曲面流出的电荷量, 即闭合曲面内的电荷量保持不变, 因此, 进入曲面的电流等于从曲面流出的电流, 通过整个曲面的电流为零, 即

$$\oint_S j \cdot dS = 0 \quad (9-5)$$

该式称为电流的稳恒条件。在中学物理中, 我们知道, 在电路的任何一个分支点, 流入该点的电流之和等于从该点流出的电流之和, 实际上就是应用了式 (9-5)。

### 9.1.4 稳恒电流的电流密度

稳恒电流的电流密度与电荷定向移动的速度有什么关系? 我们以金属中的电流为例来研究。

如果导体内部的电场强度为  $E$ , 并设导体内的载流子为正电荷, 它定向运动

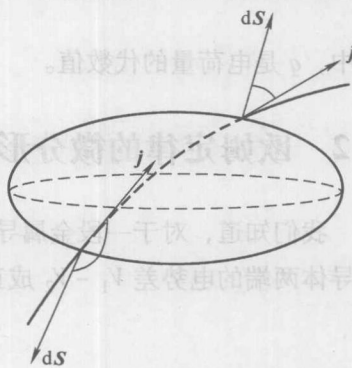


图 9-3 闭合曲面的电流

(也叫漂移)的平均速度为 $v$ ,方向与 $E$ 的方向相同,则电流在数值上等于在单位时间内通过与 $E$ 垂直的面积 $dS_{\perp}$ 的载流子的电荷量。这些载流子必定是在以面积 $dS_{\perp}$ 为底,以 $v$ 为高的柱体内,如图9-4所示,该柱体的体积是 $vdS_{\perp}$ ,其中有 $nvdS_{\perp}$ 个载流子( $n$ 表示单位体

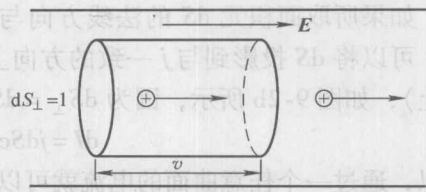


图9-4 稳恒电流密度

积内的载流子数),每个载流子带有电荷量 $q$ ,则在单位时间内通过 $dS_{\perp}$ 的电荷量为 $nqv dS_{\perp}$ ,于是

$$dI = nqv dS_{\perp} \quad (9-6)$$

因此,电流密度为

$$j = nqv \quad (9-7)$$

对于正电荷, $j$ 的方向与 $v$ 的方向相同;对于负电荷, $j$ 的方向与 $v$ 的方向相反,可以将式(9-7)写成矢量式

$$j = nqv \quad (9-8)$$

式中, $q$ 是电荷量的代数值。

## 9.2 欧姆定律的微分形式

我们知道,对于一段金属导体,有部分电路的欧姆定律:通过导体的电流 $I$ 与导体两端的电势差 $V_1 - V_2$ 成正比,比例系数就是导体电阻 $R$ 的倒数,即

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R} \quad (9-9)$$

电阻

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (9-10)$$

式中, $\rho$ , $l$ 和 $S$ 分别是导体的电阻率、长度和横截面积。在国际单位制中,电阻的单位是欧姆,简称欧( $\Omega$ )。

式(9-10)只适用于在电流的方向(即 $l$ 方向)上横截面积 $S$ 都相等的均匀导体。对于非均匀导体,应有

$$R = \rho \int \frac{dl}{S} \quad (9-11)$$

如果在导体中某点附近沿电流方向选取一小段,其长为 $dl$ ,横截面积为 $dS$ ,两端的电势分别为 $V$ 和 $V + dU$ ,如图9-5所示,则式(9-9)写成