

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

University Physics

大学物理学

（第二版）下册

主编　施建青

编者　施建青　徐志君　林国成　徐东辉

高等教育出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

University Physics

大学物理学

（第二版）下册

主编　施建青

编者　施建青　徐志君　林国成　徐东辉

高等教育出版社·北京

内容提要

本书是“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。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，做好新高考背景下与中学物理教学内容的衔接，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和培养学生的科学素质。

本书可作为高等学校理科非物理学类专业和工科各专业的大学物理课程教材，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. -- 2 版. -- 北京 : 高等教育出版社, 2019.1

ISBN 978-7-04-051367-7

Ⅰ. ①大… Ⅱ. ①施… 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(2019)第 036709 号

DAXUE WULIXUE

策划编辑 王 硕	责任编辑 王 硕	封面设计 杨立新	版式设计 杜微言
插图绘制 于 博	责任校对 张 薇	责任印制 韩 刚	

出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街 4 号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.hepmall.com.cn
印 刷	唐山市润丰印务有限公司		http://www.hepmall.com
开 本	787mm × 1092mm 1/16		http://www.hepmall.cn
印 张	24.5	版 次	2009 年 2 月第 1 版
字 数	520 千字		2019 年 1 月第 2 版
购书热线	010-58581118	印 次	2019 年 1 月第 1 次印刷
咨询电话	400-810-0598	定 价	48.50 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 51367-00

大学物理学

(第二版)下册

主编　施建青

1　计算机访问http://abook.hep.com.cn/1245834，或手机扫描二维码、下载并安装Abook应用。

2　注册并登录，进入“我的课程”。

3　输入封底数字课程账号（20位密码，刮开涂层可见），或通过Abook应用扫描封底数字课程账号二维码，完成课程绑定。

4　单击“进入课程”按钮，开始本数字课程的学习。



课程绑定后一年为数字课程使用有效期。受硬件限制，部分内容无法在手机端显示，请按提示通过计算机访问学习。

如有使用问题，请发邮件至abook@hep.com.cn。



http://abook.hep.com.cn/1245834

目　录

第七章　恒定磁场 …… 001
7.1　恒定电流的基本概念 …… 002
7.1.1　电流与电流密度 …… 002
7.1.2　电动势 …… 003
7.1.3　欧姆定律的微分形式 …… 005
7.2　磁场的磁感应强度 …… 006
7.2.1　磁现象 …… 006
7.2.2　磁起源于电流 …… 007
7.2.3　磁场 …… 008
7.2.4　磁感应强度 …… 008
7.2.5　磁场的叠加原理 …… 009
7.3　毕奥-萨伐尔定律及其应用 …… 010
7.3.1　毕奥-萨伐尔定律 …… 010
7.3.2　毕奥-萨伐尔定律的应用 …… 011
7.3.3　运动电荷的磁场 …… 019
7.4　恒定磁场的基本性质 …… 020
7.4.1　磁场的高斯定理 …… 020
7.4.2　磁场的安培环路定理 …… 024
7.5　磁场对运动电荷的作用 …… 029
7.5.1　洛伦兹力 …… 029
7.5.2　带电粒子在磁场中的运动 …… 031
7.5.3　霍尔效应 …… 033
7.5.4　磁聚焦和磁约束 …… 035
7.6　磁场对电流的作用 …… 037
7.6.1　安培定律 …… 037
7.6.2　磁场对载流导线的作用 …… 037
7.6.3　磁场对载流线圈的作用 …… 041
7.6.4　磁力的功 …… 045
7.7　磁场中的磁介质 …… 048
7.7.1　磁介质 …… 048
7.7.2　顺磁质和抗磁质的磁化机制 …… 049
7.7.3　磁化强度与磁化电流 …… 051
7.7.4　磁介质中的安培环路定理 …… 052
7.7.5　铁磁质 …… 055
本章提要 …… 059
习题 …… 062
第八章　变化的电磁场 …… 069
8.1　电磁感应的基本定律 …… 070
8.1.1　电磁感应现象 …… 070
8.1.2　楞次定律 …… 071
8.1.3　法拉第电磁感应定律 …… 071
8.2　动生电动势和感生电动势 …… 074
8.2.1　动生电动势 …… 075
8.2.2　感生电动势 …… 080
8.2.3　感生电场的应用 …… 084
8.3　互感和自感 …… 087
8.3.1　互感 …… 088
8.3.2　自感 …… 089
8.3.3　自感的串联 …… 092
8.4　磁场能量 …… 093
8.4.1　自感磁能 …… 093
8.4.2　磁场能量 …… 094
8.5　位移电流 …… 097
8.5.1　位移电流假设 …… 098
8.5.2　全电流　全电流定理 …… 099
8.6　麦克斯韦方程组 …… 102
8.6.1　静电场和恒定磁场基本规律的回顾 …… 102
8.6.2　麦克斯韦方程组 …… 102
8.6.3　麦克斯韦方程组的意义 …… 103
8.6.4　电磁场是物质的一种形态 …… 105
本章提要 …… 106
习题 …… 108

需要全本请访问 www.ertongbook.com

物质与波

第九章 振动学基础 …… 119
9.1 简谐振动 …… 120
9.1.1 简谐振动的运动方程 …… 120
9.1.2 简谐振动的特征量 …… 122
9.1.3 简谐振动的实例 …… 127
9.1.4 简谐振动的旋转矢量法 …… 131
9.1.5 简谐振动的能量 …… 133
9.2 简谐振动的合成与分解 …… 135
9.2.1 同一直线上同频率的简谐振动的合成 …… 135
9.2.2 同一直线上不同频率的简谐振动的合成 …… 139
9.2.3 相互垂直的简谐振动的合成 … 140
9.2.4 振动的分解 …… 143
9.3 阻尼振动 …… 145
9.3.1 阻尼振动 …… 145
9.3.2 受迫振动 共振 …… 147
本章提要 …… 150
习题 …… 152
第十章 波动学基础 …… 157
10.1 波动的基本概念 …… 158
10.1.1 机械波的产生 …… 158
10.1.2 横波和纵波 …… 158
10.1.3 波线和波面 …… 160
10.1.4 波的特征量 …… 160
10.1.5 波形曲线 …… 163
10.1.6 波动所遵从的基本原理 …… 164
10.2 简谐波 …… 166
10.2.1 波函数 …… 166
10.2.2 波函数的物理意义 …… 168
10.2.3 波动微分方程 …… 172
10.3 波的能量 …… 173
10.3.1 波的能量和强度 …… 173
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 …… 184
10.5 电磁波 …… 192
10.5.1 电磁波的产生和传播 …… 192
10.5.2 电磁波的性质 …… 194
10.5.3 电磁波谱 …… 196
10.6 多普勒效应 …… 197
10.6.1 机械波的多普勒效应 …… 198
10.6.2 电磁波的多普勒效应 …… 201
10.6.3 冲击波 …… 202
10.7 非线性波简介 …… 204
10.7.1 非线性效应对波动的影响 …… 204
10.7.2 孤波与孤子 …… 204
本章提要 …… 206
习题 …… 207
第十一章 波动光学 …… 211
11.1 光的干涉 …… 212
11.1.1 光的相干性 …… 212
11.1.2 分波阵面干涉 …… 217
11.1.3 分振幅干涉 …… 224
11.2 光的衍射 …… 236
11.2.1 光的衍射现象 …… 236
11.2.2 惠更斯-菲涅耳原理 …… 237
11.2.3 单缝夫琅禾费衍射 …… 238
11.2.4 圆孔衍射、光学仪器的分辨本领 …… 245
11.2.5 光栅衍射 …… 248
11.2.6 X 射线的衍射 …… 253
11.3 光的偏振 …… 254
11.3.1 自然光与偏振光 …… 254
11.3.2 偏振光的起偏和检偏 …… 256
11.3.3 反射光和折射光的偏振 …… 258
11.3.4 光的双折射 …… 259
11.3.5 椭圆偏振光与圆偏振光 …… 261
11.3.6 旋光现象 …… 264
本章提要 …… 266
习题 …… 269
第十二章 场的量子性 …… 275
12.1 黑体辐射与普朗克量子假设 …… 276
12.1.1 热辐射 黑体辐射的规律 …… 276
12.1.2 经典理论的困难与普朗克量子假设 …… 279
12.2 光电效应与爱因斯坦光子假说 …… 281

12.2.1 光电效应的实验规律与经典电磁学理论的困难 …… 281
12.2.2 光子假说与爱因斯坦光电效应方程 …… 282
12.2.3 光的波粒二象性 …… 284
12.3 康普顿效应 …… 285
12.3.1 康普顿效应的实验规律 …… 285
12.3.2 对康普顿效应的量子解释 …… 286
12.3.3 单位与常量 …… 288
12.4 氢原子光谱与玻尔理论 …… 290
12.4.1 氢原子光谱与巴耳末公式 …… 290
12.4.2 卢瑟福原子核式结构模型与经典理论的困难 …… 292
12.4.3 玻尔理论的基本假设 …… 293
12.4.4 氢原子的能级和光谱 …… 293
12.4.5 玻尔理论的成功和局限 …… 296
12.5 激光的基本原理 …… 299
12.5.1 激光产生的基本原理 …… 299
12.5.2 激光的特性 …… 303
本章提要 …… 304
习题 …… 305
第十三章 量子力学基本原理 …… 309
13.1 物质波假说及其实验验证 …… 310
13.1.1 德布罗意的物质波假说 …… 310
13.1.2 德布罗意波的实验验证 …… 312
13.2 不确定性关系 …… 314
13.2.1 海森伯不确定性关系 …… 314
13.2.2 不确定性关系应用举例 …… 316
13.3 微观粒子状态的描述——波函数 …… 318
13.3.1 描述自由粒子的波函数 …… 318
13.3.2 波函数的统计诠释 …… 319
13.3.3 波函数的归一化条件和标准条件 …… 321
13.4 微观粒子状态演化的描述——薛定谔方程 …… 322
13.4.1 含时薛定谔方程 …… 322
13.4.2 定态薛定谔方程 …… 324
13.5 一维势阱 …… 325
13.5.1 一维无限深势阱中的粒子 …… 325
13.5.2 隧道效应 …… 330
13.6 氢原子 …… 331
13.6.1 氢原子的定态薛定谔方程 …… 331
13.6.2 描述氢原子状态的三个量子数 …… 332
13.6.3 电子自旋与第四个量子数 …… 335
13.6.4 多电子原子的壳层结构 …… 336
本章提要 …… 339
习题 …… 340
第十四章 量子力学的应用 …… 343
14.1 固体中的电子 …… 344
14.1.1 固体的量子理论 …… 344
14.1.2 自由电子按能量分布 …… 344
14.1.3 金属导电的量子论解释 …… 350
14.1.4 能带、导体和绝缘体 …… 352
14.1.5 半导体 …… 355
14.1.6 pn 结 …… 357
14.1.7 晶体管 …… 359
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 …… 367
14.2.5 穆斯堡尔效应 …… 373
14.2.6 核反应 …… 376
14.2.7 核裂变与核聚变 …… 378
本章提要 …… 379
习题 …… 381

习题参考答案 …… 383

第七章

恒定磁场

在上一章中,我们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:

$$I=\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t} \tag{7-1-1}$$

如果电流的大小和方向不随时间而变化,这种电流称为恒定电流(steady electric current). 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. $1\ \mathrm{A}=1\ \mathrm{C}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. 常用的电流单位还有 mA(毫安)和 μA(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

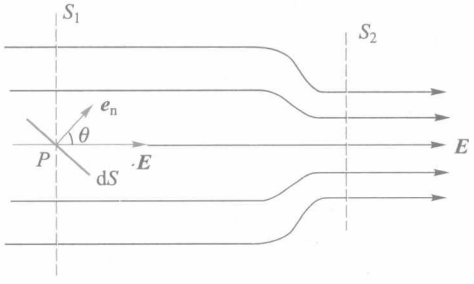


图 7-1-1

$$j=\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}S} \tag{7-1-2}$$

在国际单位制中,电流密度的单位是安培每平方米,符号为 $\mathrm{A\cdot m^{-2}}$. 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 $\mathrm{d}S$ 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 θ,如图 7-1-1 所示. 面积元矢量为 $\mathrm{d}\boldsymbol{S}=\mathrm{d}S\boldsymbol{e}_n$,此时通过任一截面电流为

$$I=\int \mathrm{d}I=\int_S \boldsymbol{j}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S}=\int_S j\mathrm{d}S\cos\theta \tag{7-1-3}$$

在导体中各点的电流密度 $\boldsymbol{j}$ 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 $\boldsymbol{j}$ 的方向,通过任一垂直截面的电流线数目与该点 $\boldsymbol{j}$ 的大小成正比. 通常所说的电流分布实际上是指电流密度 $\boldsymbol{j}$ 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.

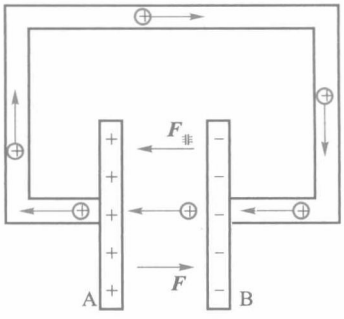


图 7-1-2

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为电源. 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 $\boldsymbol{F}_{非}$ 都要克服静电力 $\boldsymbol{F}$ 做功(如图 7-1-2 所示),因此,电源中非静电力 $\boldsymbol{F}_{非}$ 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 $\boldsymbol{E}$ 表示静电场强,$\boldsymbol{E}_{非}$ 表示非静电力场的场强,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

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

由于静电场是保守力场,故有

$$\oint_L \boldsymbol{E}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}=0$$

则

$$W=q\oint_L \boldsymbol{E}_{非}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} \tag{7-1-4}$$

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 $\mathscr{E}$ 表示,有

$$\mathscr{E}=\frac{W}{q}=\oint_L \boldsymbol{E}_{非}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} \tag{7-1-5}$$

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:

$$\int_{外电路}\boldsymbol{E}_{非}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}=0$$

这样,(7-1-5)式可改写为

$$\mathscr{E}=\oint_L \boldsymbol{E}_{非}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}=\int_B^A \boldsymbol{E}_{非}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} \tag{7-1-6}$$

(7-1-6)式表示电源电动势的大小,它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

需要全本请访问 www.ertongbook.com

极，所以(7-1-6)式也可以写成

$$\mathscr{E}=\int_{(-)}^{(+)}\boldsymbol{E}_{非}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{l} \tag{7-1-7}$$

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，称为电源的内阻，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 $\mathscr{E}$ 和内阻 R_i 表述为如图 7-1-3 所示.

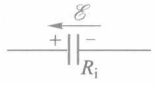


图 7-1-3

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 $\mathrm{d}l$、截面积为 $\mathrm{d}S$ 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 $V+\mathrm{d}V$. 根据欧姆定律，通过截面 $\mathrm{d}S$ 的电流为

$$\mathrm{d}I=\frac{V-(V+\mathrm{d}V)}{R}=-\frac{\mathrm{d}V}{R} \tag{7-1-8}$$

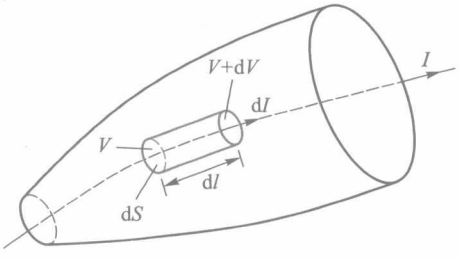


图 7-1-4

式中 R 为小圆柱体的电阻，有 $R=\rho\mathrm{d}l/\mathrm{d}S$. 于是上式可以表示为

$$\mathrm{d}I=-\frac{1}{\rho}\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}l}\mathrm{d}S$$

即

$$\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}S}=-\frac{1}{\rho}\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}l}=j \tag{7-1-9}$$

根据电场强度与电势的关系：

$$-\mathrm{d}V=\boldsymbol{E}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{l}$$

(7-1-9)式可写成

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

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

$$\boldsymbol{j}=\frac{1}{\rho}\boldsymbol{E}=\gamma\boldsymbol{E} \tag{7-1-10}$$

这就是欧姆定律的微分形式，其中

$$\gamma=\frac{1}{\rho} \tag{7-1-11}$$

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 $\boldsymbol{j}$ 等于该点的场强 $\boldsymbol{E}$ 与导体的电阻率 ρ 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 $\boldsymbol{E}=0$，所以 $\boldsymbol{j}=0$.

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），具有磁性的物质称为磁体. 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”被公认是最早的磁性指南器具，后来人们将其发展成为指南针用于航海，并用其发现了地球的地磁偏角.

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，这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. 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°.

(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,而电性质是物体通过摩擦而具有的普遍性质等,从而认为电和磁是两种截然无关的现象. 这对后来电磁学的发展产生了深刻的影响. 但是,在 1731 年有一个英国商人诉说,一场雷雨之后他的一箱刀叉带上了磁性. 1751 年富兰克林发现莱顿瓶放电后,家里的缝纫机针有了磁性. 电能产生磁吗? 1774 年德国一家研究所悬奖征解题为"电力和磁力是否存在实际的和物理的相似性?",促使许多人竞相研究和实验. 但是,直到 1819 年以后,才有奥斯特和安培通过实验将电和磁的联系揭示出来.

丹麦物理学家奥斯特(H.C.Oersted,1777—1851)是一个深受德国古典哲学影响的物理学家. 自 1812 年后,他一直在思考"电是否以其隐蔽的方式对磁体有类似的作用?"的问题. 1819 年,他在哥本哈根大学做关于电和磁的演讲时,把导线和磁针平行放置来观察所受作用力的情况. 当他把磁针移到导线的下方,在通电的瞬间,看到磁针有轻微的晃动,如图 7-2-1 所示. 后来,奥斯特对此做了反复、深入的实验研究. 1820 年 7 月 21 日,奥斯特报告了他 60 次实验的结果——电流使小磁针偏转,轰动了整个欧洲.

法国物理学家安培(A.M.Ampère,1775—1836)对奥斯特的实验和发现作出了积极的反应. 他重复了奥斯特的实验,并把实验扩展到电流与电流的相互作用,发现两通电导线在电流同向时相互吸引[如图 7-2-2(a)所示],电流反向时相互排斥[如图 7-2-2(b)所示]. 他为了定量研究电流的相互作用,设计了 4 个灵巧的实验. 1822 年左右,安培 3 次向法国科学院宣读论文,为确定电流方向与磁针偏转方向的关系,提出了安培定则;认为通电线圈与磁铁等效,提出了圆电流产生磁的可能性.

从奥斯特和安培的实验可见,磁起源于电流或运动电荷.

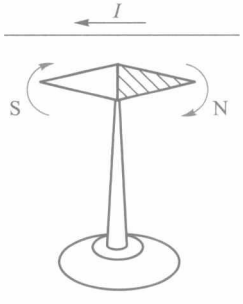


图 7-2-1

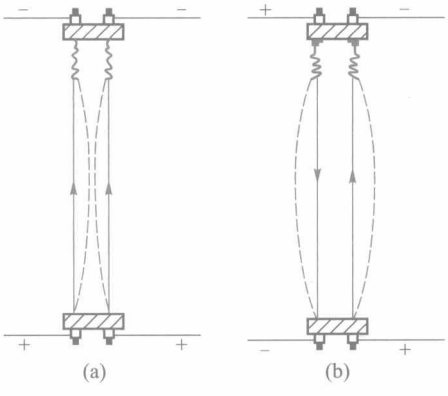


图 7-2-2

7.2.3 磁场

物质磁性的本源是电流，无论导线中的电流（传导电流）还是磁铁，它们的本源都是一个，即电荷的运动. 也就是说，一切磁现象都可以归结为运动着的电荷（即电流）之间的相互作用，这种相互作用是通过磁场（magnetic field）来传递的，可表示为

$$\boxed{\text{运动电荷}} \underset{\text{作用}}{\overset{\text{激发}}{\rightleftharpoons}} \boxed{\text{磁　　场}} \underset{\text{激发}}{\overset{\text{作用}}{\rightleftharpoons}} \boxed{\text{运动电荷}}$$

应该注意到电场与磁场的区别：从场源上看，无论是静止电荷还是运动电荷都产生电场，但是只有运动电荷才产生磁场，静止电荷不产生磁场；从作用力来看，电场对静止电荷与运动电荷都有作用力，而磁场只对运动电荷有作用力，对静止电荷无作用力.

7.2.4 磁感应强度

在前一章中，利用电场对试验电荷的作用来定义电场强度 $\boldsymbol{E}$，现在也可用磁场对运动电荷的作用来定义磁感应强度（magnetic induction）. 需要指出的是，$\boldsymbol{E}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 在物理地位上是一样重要的两个物理量，但是由于历史原因，将 $\boldsymbol{B}$ 称为磁感应强度.

从实验中发现，作用在运动电荷上的磁场力不仅与运动电荷的电荷有关，而且还与运动电荷的速度大小、速度方向有关. 实验表明：

（1）对磁场中任一场点 P，若正电荷的运动方向与该点处小磁针北极的指向一致，它所受磁场力为零，定义此方向为 P 点的磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 的方向.

（2）当运动电荷以同一速率 v 沿不同方向通过 P 点时，电荷所受的磁力的大小是不同的. 但磁力的方向却总是垂直于磁场的方向，即 $\boldsymbol{F}\perp\boldsymbol{B}$，又垂直于电荷运动的方向，即 $\boldsymbol{F}\perp\boldsymbol{v}$（见图 7-2-3）.

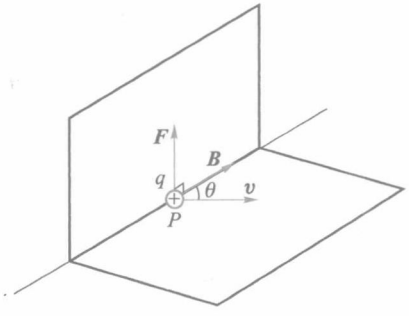


图 7-2-3

（3）当运动电荷的速度 $\boldsymbol{v}$ 垂直于磁场方向（$\boldsymbol{v}\perp\boldsymbol{B}$）时，运动电荷所受的磁力最大，用 $F_{\perp}$ 表示.

实验表明：这个最大磁力 $F_{\perp}$ 正比于运动电荷的电荷 q，也正比于电荷垂直于磁场方向的速率 $v_{\perp}$，但比值 $\dfrac{F_{\perp}}{qv_{\perp}}$ 在确定的场点具有确定的量值，与运动电荷 q、$v_{\perp}$ 值的大小无关. 由此可见，比值 $\dfrac{F_{\perp}}{qv_{\perp}}$ 反映了该点磁场强弱的性质. 所以把磁感应强度的大小定义为

$$B=\frac{F_{\perp}}{qv_{\perp}} \tag{7-2-1}$$

即单位速率的单位电荷所受的最大磁力，显然，这个值反映了该点磁场的强弱.

在国际单位制中，磁感应强度的单位是 $N \cdot A^{-1} \cdot m^{-1}$，称为特斯拉，简称特，以符号 T 表示. 特斯拉这个单位较大，例如地球磁场只有 0.5×10^{-4} T，一般永久磁铁的磁场约为 10^{-2} T，而传统大型磁铁也只能产生约 2 T 的磁场. 要产生更强的磁场需要用超导的强磁体. 如图 7-2-4 所示，该图是普林斯顿等离子体物理实验室的托卡马克聚变实验反应堆的照片. 利用核聚变反应堆来发电是人们梦寐以求的彻底解决能源危机的远大目标，这样的反应堆就需要强磁场.

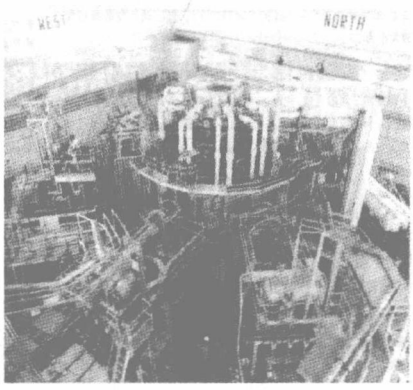


图 7-2-4

在实际工作中，有时磁感应强度的单位也用 G(高斯)表示，且 $1\ T=10^{4}\ G$.

表 7-2-1 列出了某些典型磁场的磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 的大小.

表 7-2-1　某些典型磁场的 B 值

磁场源	B/T	磁场源	B/T
电磁屏蔽室最小值	约 10^{-14}	小磁针	约 10^{-2}
人体心脏	约 3×10^{-10}	大型电磁铁	约 2
星际空间	约 10^{-10}	实验室磁场	$10^{-2}\sim10^{4}$
无线电波	约 10^{-9}	太阳黑子	约 0.3
地球表面磁场	约 5×10^{-5}	脉冲星表面磁场	约 10^{8}
室内电线周围	约 10^{-4}	原子核表面	约 10^{12}

7.2.5　磁场的叠加原理

对于磁场，和电场一样，也满足叠加原理. 实验表明：在若干个运动电荷共同激发的磁场中，某一个运动电荷 q 所受的磁场力等于各个场源运动电荷单独激发的磁场对 q 的磁场力的矢量和. 所以，由若干个运动电荷共同激发的磁场中，某点的总的磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 等于各场源电荷单独激发的磁场在该点的磁感应强度的矢量和，即

$$\boldsymbol{B}=\sum_{i}\boldsymbol{B}_{i} \tag{7-2-2}$$

这就是磁场的叠加原理.

和电场一样，磁场也是物质的一种形态. 它同样具有能量、动量和质量等实物物质所具有的属性；不同于实物之处是磁场具有叠加性，两个实物不能同时占据一个空间，几个磁场却可以共存于一个空间. 所以，磁场是一种特殊物质.

7.3 毕奥-萨伐尔定律及其应用

本节将定量研究真空中电流和它在空间任一点所激发的磁场间的关系.

7.3.1 毕奥-萨伐尔定律

在上一节中已经指出,导体中的电流(或者运动电荷)将在其周围产生磁场,但磁感应强度 B 如何计算呢?

早在 1820 年,法国物理学家毕奥(J. B. Biot,1774—1862)和萨伐尔(F. Savart,1791—1841)就从实验现象中总结出电流元产生磁场的规律,这个规律就称为毕奥-萨伐尔定律(Biot-Savart law),以下简称为毕-萨定律.

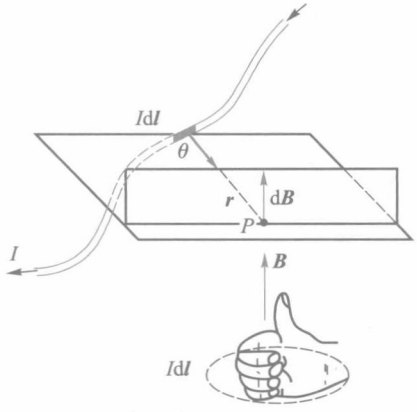


图 7-3-1

有一个电流为 I 的线状电流,如图 7-3-1 所示,在其上任意处取长为 $\mathrm{d}l$ 的有向线元 $\mathrm{d}\boldsymbol{l}$,规定 $\mathrm{d}\boldsymbol{l}$ 的方向为线元处电流的方向,并将乘积 $I\mathrm{d}\boldsymbol{l}$ 称为电流元. 实验发现,电流元 $I\mathrm{d}\boldsymbol{l}$ 在任意一个场点 P 产生的磁场的磁感应强度 $\mathrm{d}\boldsymbol{B}$ 为

$$\mathrm{d}\boldsymbol{B}=\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\mathrm{d}\boldsymbol{l}\times\boldsymbol{e}_r}{r^2}=\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\mathrm{d}\boldsymbol{l}\times\boldsymbol{r}}{r^3} \tag{7-3-1}$$

这就是毕-萨定律的数学表达形式. 其中,$\boldsymbol{r}$ 为电流元 $I\mathrm{d}\boldsymbol{l}$ 到场点 P 的径矢(径矢的大小为 r,单位矢量为 $\boldsymbol{e}_r$),μ_0 为真空磁导率(permeability of vacuum),其值为

$$\mu_0=4\pi\times10^{-7}\mathrm{N/A^2}$$

(7-3-1)式中,$\mathrm{d}\boldsymbol{B}$ 的大小为

$$\mathrm{d}B=\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\mathrm{d}l\sin\theta}{r^2} \tag{7-3-2}$$

$\mathrm{d}\boldsymbol{B}$ 的方向为 $I\mathrm{d}\boldsymbol{l}\times\boldsymbol{r}$ 的方向,即垂于 $\mathrm{d}\boldsymbol{l}$ 和 $\boldsymbol{r}$ 所决定的平面,指向为由 $I\mathrm{d}\boldsymbol{l}$ 经小于 180° 角转向 $\boldsymbol{r}$ 的右螺旋前进的方向.

按照磁场的叠加原理,由任一线电流激发的磁场在其场点 P 的磁感应强度 $\boldsymbol{B}$,等于线电流上各电流元在 P 点的磁感应强度 $\mathrm{d}\boldsymbol{B}$ 的矢量和,用积分表示为

$$\boldsymbol{B}=\int\mathrm{d}\boldsymbol{B}=\frac{\mu_0}{4\pi}\int\frac{I\mathrm{d}\boldsymbol{l}\times\boldsymbol{r}}{r^3} \tag{7-3-3}$$

如果磁场源是面电流或体电流,则可以把它们看作是许多线电流的集合,再作进一步的计算.

需要指出,毕-萨定律是分析大量实验结果并经过科学抽象得出来的,由于不存在单独的线电流元,所以毕-萨定律不能用实验直接加以验证. 但是,由这个定律出发得出的一系列结果都与实验符合得很好.

需要全本请访问 www.ertongbook.com