

# 简明大学物理

下 册

主编 黄祝明 吴锋



同济大学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

# 简明大学物理

(下册)

主编 黄祝明 吴 锋



同济大学出版社  
TONGJI UNIVERSITY PRESS

## 内 容 提 要

本书按照一般工科本科院校学生的实际情况,在改革旧的工科大学物理教材的体系和内容方面进行了大胆的探索.本书仍基本保持传统模式,适当更新了教学体系,内容简单明了,深度和广度较适当,同时吸取了近年来国内出版课程教材的一些先进的思想和出色的方法,力求做到“经典物理现代化,物理前沿普物化”,特别便于一般工科本科院校的学生自学和教学,具有可教性和可学性的双重特色.

全书分上、下两册,共4篇内容.第1篇力学;第2篇热学基础;第3篇电磁学;第4篇波动光学、近代物理.全书教学参考学时数为120学时左右,适用于一般工科本科院校.

本书可作为高等工科院校各工科专业大学物理课程的教科书,也可供其他专业选用和大学物理教师教学参考.

### 图书在版编目(CIP)数据

简明大学物理.下册/黄祝明,吴锋主编.--上海:同济大学出版社,2013.2

ISBN 978-7-5608-5095-5

I. ①简… II. ①黄…②吴… 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022379号

---

---

## 简明大学物理(下册)

主编 黄祝明 吴 锋

责任编辑 陈佳蔚 责任校对 徐春莲 封面设计 潘向秦

---

出版发行 同济大学出版社 [www.tongjipress.com.cn](http://www.tongjipress.com.cn)  
(地址:上海市四平路1239号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店  
印 刷 常熟市大宏印刷有限公司  
开 本 787 mm×1 092 mm 1/16  
印 张 16.5  
印 数 1—3 100  
字 数 436 000  
版 次 2013年2月第1版 2013年2月第1次印刷  
书 号 ISBN 978-7-5608-5095-5

---

定 价 32.00元

---

---

# 编 审 人 员

主 编	黄 祝 明	吴 锋	
副 主 编	余 仕 成	张 乐	
编写人员	黄 祝 明	吴 锋	胡 亚 联
	余 仕 成	李 端 勇	张 乐
	方 路 线		

# 前 言

物理学是整个自然科学的支柱,是人类文明、现代科技和工业的根基. 纵观世界科技发展史,物理学的每一次重大突破,都极大地促进了社会生产力的发展.

物理学是一切自然科学的基础. 物理学所研究的粒子和原子,构成了蛋白质、基因、器官、生物体、一切人造的和天然的物质、陆地、海洋和大气,等等. 在这个意义上,物理学构成了化学、生物学、材料科学和地球物理学等学科的基础,物理学的基本概念和技术被应用到了所有的自然科学. 在这些学科和物理学之间的边缘领域中,形成了一系列新的分支学科和交叉学科,从而促使自然科学更加迅速地发展.

物理学一直是自然科学的带头学科. 它与现代应用技术的广泛结合,为人类认识自然、改造自然、发展生产提供了强有力的武器. 一方面,物理学为所有的科学领域提供了理论基础、实验手段和研究方法. 现代物理学已发展到能够说明小到分子、原子、原子核、基本粒子、超弦,大到恒星、星系、宇宙的种种现象和规律. 它能够说明种种线性的和非线性的复杂问题. 物理学理论为自然科学和工程科学的大厦奠定了坚不可摧的基石;另一方面,物理学的重要作用还在于它利用其重要的理论框架,建立了许多相关学科或交叉学科,如生物物理、天体物理、化学物理、原子物理、量子化学、量子生物学、生物磁学等.

物理学决定着人们对物质世界的根本性看法. 物理学发现的关于物质运动遵循的“决定论法则”、“随机性法则”以及“混沌性法则”,是迄今为止人类对自然认识的最高境界. 物理学的研究方法和思维也是无与伦比的.“理想模型法”、“实验方法”、“类比方法”、“科学假说”、“思想实验”、“对称性思维”等,无一不闪耀着科学和智慧的光辉,对所有学科都有借鉴作用.

既然物理学对于自然科学的发展、社会生产力的进步起着如此巨大的带头和推动作用,大学物理学在高等教育中的地位就不言而喻了. 在人类所有的才能之中,最重要最神奇的就是思维能力和创新能力. 大学物理在人才的创新能力、思维能力的培养方面有着重要的不可替代的作用. 大学物理通过物理学的基本思维方法、基本观念、基本实验的设计思想、方法、技能等的教学来实现对人才科学素质的培养.

21 世纪高等教育的观念正在发生转变,社会和市场需要高素质、有创新能力的“复合型”人才. 因此,大学物理的教学目的,应当是培养和提高学生的科学素质、科学思维方法和科学研究的能力. 人才培养是一个系统工程,大学物理教学必须为高等教育人才培养的总目标服务. 大学物理教学的任务除了使学生掌握基本的物理知识及实际实用,并得到有关技术技能、技巧的训练外,更重要的是发展学生智力,提高学生能力,培养学生的科学世界观和科学素质. 大学物理教学必须着重培养学生的观察和实验能力,科学思维能力,分析和解决实际问题的能力,自学能力,等等;另外,大学物理还应把发展学生的非智力因素纳入自己的教学任务. 主要是通过揭示物质运动规律培养学生辩证唯物主义的科学世界观,通过严格的实验训练培养学生实事求是的科学态度,通过物理学史的教学来激发学生的学习兴趣,通过物

理学理论体系的整体介绍,使学生能够鉴赏什么是和谐、对称、统一的科学美,培养学生的科学情趣.

工科专业的学生为什么要学物理?在我国以前的看法是为专业课服务.于是专业课需要的内容就讲,不需要的内容就不讲或少讲.这种陈旧的观点显然不能适应 21 世纪人才培养的需要.著名理论物理学家、诺贝尔奖得主理查德·费曼说:“科学是一种方法,它教导我们:一些事物是怎样被了解的,什么事情是已知的,现在了解到什么程度(因为没有事情是绝对已知的),如何对待疑问和不确定性,证据服从什么法则,如何去思考事物,做出判断,如何区别真伪和表面现象.”所以,大学物理课不仅仅是物理知识的教育,不仅仅是为专业课服务.大学物理学是学习一切工程技术知识、培养学生科学素质的最有效的基础课,是 21 世纪迎接新技术挑战的必修课,是科技和工程技术人员终身学习过程中必须在大学阶段学习的重要理论课.大学物理课应当把对学生的科学素质教育作为自己的首要任务,应当使学生对物理学的内容和方法,工作语言,概念和物理图像,其历史现状和前沿等方面,从整体上有一个全面的了解.

国家教育部非常重视 21 世纪工科物理教材编写工作.目前国内新编大学物理教材数十余种,其侧重点各有千秋.有的突出了理论物理学的内容,有的将计算机物理引入教材,有的增加了物理技术应用方面的篇幅.这些教材由于把一些理论物理的内容引入了普通物理,使得教材难度增大,不适合一般工科大学使用,特别是不适宜学生自学.

教学内容的核心就是教材.21 世纪大学物理教材一方面要在新内容、高起点、技术应用等方面有较大突破;另一方面也应具有易教易学的特点.一般工科大学的大学物理教学如何面向 21 世纪,教材又如何适应新世纪教学改革的需要?这些问题一直是我们教学研究和探讨的主题.本书仍基本保持传统模式,适当更新了教学体系,内容简单明了,深度和广度较适当,同时吸取了近年来国内出版的面向 21 世纪课程教材的一些先进的思想和出色的方法,力求做到“经典物理现代化,物理前沿普物化”,便于学生自学和教师教学.为适应不同的教学对象和不同专业类别的教学需要,还编入了一些打“\*”号的内容.

本书由黄祝明、吴锋主编,他们负责制定本教材的编写提纲,提出要求,并进行全书的修改和统稿工作以及组织在教学中试用.各篇章的具体执笔人如下:第 1 篇力学:黄祝明;第 2 篇热学基础:吴锋;第 3 篇电磁学第 9 章、第 10 章:胡亚联;第 11—14 章:余仕成;第 4 篇波动光学、近代物理第 15 章、第 19 章、第 20 章:李端勇;第 16—18 章:张乐.本书出版过程中,得到武汉工程大学邮电与信息工程学院和同济大学出版社的关心和支持,在此表示衷心的感谢.

由于编者水平所限,书中难免有缺点和错误,敬请老师和同学们在使用中提出宝贵的意见.

编者

2013 年 1 月于武汉工程大学邮电与信息工程学院

# 目 录

## 前言

第 11 章 真空中的稳恒磁场 .....	1
11.1 磁的基本现象 .....	1
11.1.1 早期磁现象 .....	1
11.1.2 近期磁现象 .....	2
11.2 恒定电流 .....	3
11.2.1 恒定电流 电流密度矢量 .....	3
11.2.2 电流的连续性原理 恒定电流的条件 .....	6
11.2.3 电源的电动势 .....	7
* 11.2.4 基尔霍夫定律 焦耳-楞次定律 .....	9
11.3 稳恒磁场的描述 .....	11
11.3.1 磁场和磁感应强度 .....	11
11.3.2 毕奥-萨伐尔定律 .....	13
11.3.3 运动电荷的磁场 .....	19
11.4 磁场的高斯定理 .....	20
11.4.1 磁感应线 磁通量 .....	20
11.4.2 磁场的高斯定理 .....	21
11.5 磁场的安培环路定理 .....	22
11.5.1 磁场的安培环路定理 .....	22
11.5.2 利用安培环路定理求磁场的分布 .....	25
11.6 磁场对运动电荷的作用 .....	28
11.6.1 洛伦兹力 .....	28
11.6.2 带电粒子在磁场中的运动 .....	31
11.6.3 霍尔效应 .....	35
* 11.6.4 量子霍尔效应 .....	38
11.7 磁场对电流的作用 .....	38
11.7.1 安培力及安培定律 .....	38
11.7.2 平行无限长载流直导线的相互作用力 .....	42
11.7.3 载流线圈在均匀磁场中所受的力矩 .....	45
11.7.4 磁力的功 .....	47
本章提要 .....	49
思考题 11 .....	50
习题 11 .....	51

<b>第 12 章 有磁介质时的磁场</b> .....	53
12.1 磁场中的磁介质 .....	53
12.1.1 磁介质及其磁化机制 .....	53
12.1.2 磁介质的磁化规律 .....	55
12.1.3 有磁介质时的安培环路定理 磁场强度 .....	58
12.2 铁磁质 .....	61
12.2.1 磁化曲线 .....	61
12.2.2 软磁材料和硬磁材料 .....	62
12.2.3 磁畴理论 .....	63
本章提要 .....	64
思考题 12 .....	64
习题 12 .....	65
<b>第 13 章 电磁感应</b> .....	66
13.1 电磁感应定律 .....	66
13.1.1 电磁感应现象 .....	66
13.1.2 电磁感应规律 .....	67
13.2 动生电动势 .....	69
13.2.1 动生电动势产生的原因 .....	69
13.2.2 动生电动势的计算 .....	71
13.3 感生电动势 感生电场 .....	73
13.3.1 感生电动势产生的原因 .....	73
13.3.2 感生电场及感生电动势的计算 .....	74
13.4 自感 互感 .....	78
13.4.1 自感 .....	78
13.4.2 互感 .....	79
13.5 磁场的能量 .....	81
13.5.1 线圈的自感磁能 .....	81
13.5.2 磁场的能量 .....	82
本章提要 .....	84
思考题 13 .....	85
习题 13 .....	85
<b>第 14 章 电磁场和麦克斯韦方程组</b> .....	88
14.1 位移电流 .....	88
14.1.1 稳恒电磁场的基本规律 .....	88
14.1.2 位移电流 .....	89
14.1.3 安培环路定理的普遍形式 .....	90
14.2 麦克斯韦方程组 .....	92
14.2.1 积分形式 .....	92
14.2.2 微分形式 .....	93



14.2.3 物性方程 .....	94
14.3 电磁波 .....	94
14.3.1 电磁波的产生 .....	95
14.3.2 电磁波的基本性质 .....	95
14.3.3 电磁场的物质性 .....	97
本章提要 .....	98
思考题 14 .....	99
习题 14 .....	100

## 第 4 篇 波动光学 近代物理

第 15 章 振动和波动 .....	105
15.1 线性振动 .....	105
15.1.1 简谐振动 .....	105
15.1.2 阻尼振动 .....	114
15.1.3 受迫振动和共振 .....	117
15.2 振动的合成与分解 .....	119
15.2.1 振动的合成 .....	119
* 15.2.2 振动的分解 .....	124
15.3 机械波的产生和传播 .....	125
15.3.1 波的基本概念 .....	125
15.3.2 平面简谐波 .....	128
15.3.3 波的能量 .....	131
* 15.3.4 声波 .....	133
15.4 波的叠加 .....	135
15.4.1 惠更斯原理 .....	135
15.4.2 波的干涉 .....	136
15.4.3 驻波的形成和特点 .....	138
* 15.5 多普勒效应 .....	142
15.5.1 波源静止而观察者运动 .....	142
15.5.2 观察者静止而波源运动的情况 .....	143
15.5.3 观察者和波源在同一条直线上运动 .....	144
15.5.4 冲击波 .....	144
本章提要 .....	145
思考题 15 .....	147
习题 15 .....	147
第 16 章 光的干涉 .....	150
16.1 相干光 .....	150

16.2 杨氏双缝干涉实验、双面镜、劳埃镜	151
16.2.1 杨氏双缝干涉实验	152
16.2.2 菲涅耳双面镜和劳埃镜实验	154
16.3 薄膜干涉	155
16.3.1 光程和光程差	155
16.3.2 薄膜干涉公式	156
16.3.3 半波损失	157
16.4 劈尖膜和牛顿环	159
16.4.1 劈尖膜干涉	160
16.4.2 牛顿环	163
16.4.3 增透膜与增反膜	164
16.5 迈克尔逊干涉仪	165
* 16.6 多光束的干涉	167
本章提要	168
思考题 16	169
习题 16	169
<b>第 17 章 光的衍射</b>	<b>171</b>
17.1 惠更斯-菲涅耳原理	171
17.1.1 光的衍射现象	171
17.1.2 惠更斯-菲涅耳原理	171
17.1.3 两类衍射	172
17.2 单缝夫琅和费衍射	173
17.3 衍射光栅	176
17.3.1 光栅的构成	176
17.3.2 光栅衍射条纹的形成	177
17.3.3 光栅方程	178
17.3.4 光栅衍射图样的几点讨论	179
17.4 圆孔衍射 光学仪器分辨本领	182
17.5 X 射线衍射	184
本章提要	185
思考题 17	186
习题 17	186
<b>第 18 章 光的偏振</b>	<b>188</b>
18.1 自然光和偏振光	188
18.2 反射和折射时光的偏振	190
18.3 晶体的双折射和偏振棱镜	191
18.4 偏振片的起偏和检偏 马吕斯定律	194
* 18.5 偏振光的干涉	197
本章提要	198

思考题 18 .....	199
习题 18 .....	199
<b>第 19 章 量子力学基础 .....</b>	<b>200</b>
19.1 量子论的提出 .....	200
19.1.1 黑体辐射 普朗克的能量子假说 .....	200
19.1.2 光电效应 爱因斯坦的光量子假说 .....	203
19.1.3 康普顿效应 .....	206
19.1.4 光的波粒二象性 .....	209
19.2 量子力学的建立 .....	210
19.2.1 氢原子的玻尔理论 .....	210
19.2.2 德布罗意波 .....	213
19.2.3 概率波 .....	215
19.2.4 运动方程 .....	217
* 19.2.5 算符与力学量 .....	218
* 19.2.6 力学量的对易关系 不确定关系 .....	220
本章提要 .....	222
思考题 19 .....	224
习题 19 .....	224
<b>第 20 章 定态薛定谔方程 .....</b>	<b>226</b>
20.1 一维定态问题 .....	226
20.1.1 一维无限深势阱 .....	226
20.1.2 一维方势垒、隧道效应 .....	229
20.1.3 线性谐振子 .....	230
* 20.1.4 周期场中的粒子运动 .....	231
20.2 氢原子 .....	233
20.2.1 氢原子波函数及概率的分布 .....	233
20.2.2 电子的自旋 .....	237
20.2.3 多电子原子的壳层结构 .....	239
* 20.3 固体的能带结构 .....	241
20.3.1 固体中的电子 .....	241
20.3.2 固体的能带 .....	242
20.3.3 导体、半导体和绝缘体 .....	243
20.3.4 半导体 .....	244
本章提要 .....	246
习题 20 .....	246
<b>附录 课程内容的学时分配建议 .....</b>	<b>248</b>

# 第 11 章 真空中的稳恒磁场

前面我们研究了静电场的一些相关概念、性质和规律. 本章我们将研究磁场: 首先在介绍恒定电流和电流密度矢量的相关概念和性质; 进而重点研究由恒定电流产生的稳恒磁场的性质和规律; 描述磁场性质的磁感应强度、毕奥萨伐尔; 反映磁场性质的高斯定理和安培环路定理以及磁场对运动电荷和电流的作用.

本章对磁场的研究方法与静电场类似, 基本内容也有一定的对应关系, 所以学习时要注意类比.

## 11.1 磁的基本现象

磁现象的发现要比电现象早得多, 据历史记载, 约在公元前 600 年人们就发现天然磁石吸铁的现象, 它的化学成分是  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . 另外的“天然磁石”是地球本身, 它对罗盘的磁针有取向作用. 尽人皆知, 我国古代的四大发明就有磁性指南器——指南针. 现在所用的磁铁多半是人工制成, 如用铁、钴、镍等合金制成条形、马蹄形或针形, 再放到通有电流的线圈中去磁化就得到暂时或永久磁铁. 无论是天然磁石, 还是人造磁铁都具有吸引铁、钴、镍等物质的特性, 这种性质称为磁性(magnetism).

### 11.1.1 早期磁现象

早期人们利用磁铁进行实验, 发现以下一些基本的磁现象.

现象一: 条形磁铁或磁针的两端磁性特别强, 称为磁极(magnetic pole). 如图 11-1 所示, 磁极吸引的铁屑特别多, 而中部几乎无磁性.

现象二: 如果把条形磁铁或磁针悬挂或支撑起来, 使之能够在水平面内自由转动, 磁铁最终会自动转向南北方向, 指北的一极称北极(用 N 表示), 指南的一极称为南极(用 S 表示), 磁铁的这种特性称为指向性, 如图 11-2 所示.

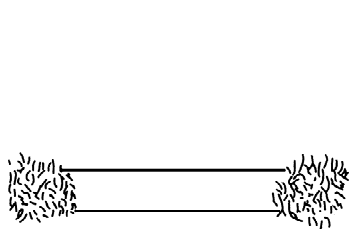


图 11-1 磁极

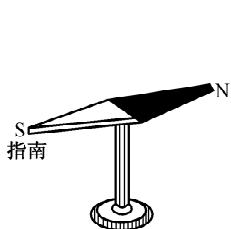


图 11-2 指南针

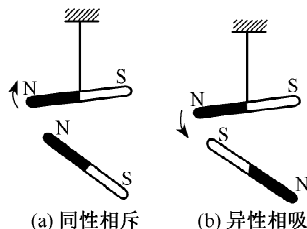


图 11-3 磁极与磁极之间的相互作用

现象三: 磁极与磁极之间有相互作用, 同性磁极互相排斥, 异性磁极互相吸引, 如图 11-3

所示.由此可以推想,地球本身是一个大磁铁,它的 N 极位于地理南极的附近,它的 S 极位于地理北极附近.1750 年,米歇尔(J. Michell)用扭秤实验证得两磁极之间的相互作用力与两磁极间距离平方成反比.虽然两磁极之间的相互作用力的规律与两个点电荷之间的相互作用力相似,但两者有一个重要的区别,那就是自然界中正负电荷可以独立存在,如电子、质子,但却不存在独立的 N 极和 S 极.任一磁铁,不管把它分割得多小,每一小块磁铁仍然具有 N 极和 S 两极(近代理论认为,可能有单独磁极存在,这种具有磁南极或磁北极的粒子,叫做磁单极子,但至今尚未有重复实验观察到这种粒子).

在历史上很长一段时期里,磁学和电学的研究一直彼此独立地发展着,人们曾认为磁与电是两类截然分开的现象.直到 19 世纪初,一系列重要的发现才打破了这个界限.电流的磁效应的发现,使人们认识到磁现象起源于电荷的运动,电与磁之间存在不可分割的联系.

### 11.1.2 近期磁现象

#### 1. 电流(运动电荷)对磁极有相互作用

1819—1820 年间,丹麦科学家奥斯特发表了自己多年研究的成果,这便是著名的奥斯特实验.他的实验装置如图 11-4 所示,小磁针用支架支撑起来后可在水平面内自由旋转,如果周围没有其他磁性物质,小磁针仅受到地磁场的作用,一头指北,一头指南,若在小磁针附近放置一根通有电流的导线,小磁针将不再指南北,而发生偏转,最后达到一个新的平衡位置.这一实验事实说明,电流对磁极有相互作用.

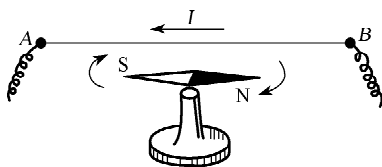


图 11-4 奥斯特实验图

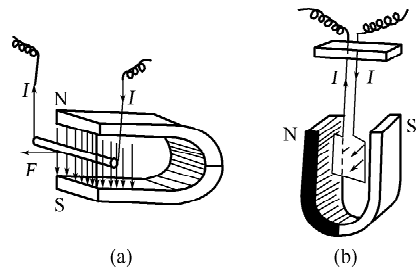


图 11-5 磁铁对载流导线的作用

#### 2. 磁铁对电流也有相互作用

1820 年,安培发现一段水平的载流直导线悬挂在马蹄形磁铁两极间,通电流后,导线就会移动;载流的线圈在马蹄形磁铁之间会发生旋转,这都表明,磁铁可以对载流导线施加作用力,如图 11-5 所示.

#### 3. 电流与电流之间有相互作用

两根细直导线平行地悬挂起来,当电流通过导线时,便可发现它们之间有相互作用,当电流方向相同时,它们相互吸引,当电流方向相反时,它们互相排斥,如图 11-6 所示.

下面一个实验表明,一个载流线圈的行为很像一块磁铁,如图 11-7 所示,将一个螺线管通过一对浸在小水银杯 A、B 中的支点悬挂起来,这样,既可通过支

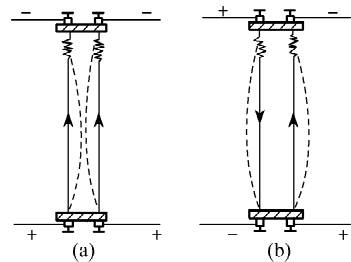


图 11-6 平行电流之间相互作用的演示

柱将电流通过螺线管,螺线管又可在水平面内自由偏转.接通电流后,用一根磁棒的某个极分别去接近螺线管的两端,会发现,螺线管一端受到吸引,另一端受到排斥.如果把磁棒的极性换一下,则螺线管原来受吸引的一端变为受排斥,原来受排斥的一端变为受吸引.这表明:螺线管本身就像一条磁棒那样,一端相当于 N 极,另一端相当于 S 极.螺线管的极性和电流方向的关系,可用图 11-8 所示的右手定则来描述,用右手握住螺线管,弯曲的四指沿电流环绕方向,将拇指伸直,这时拇指便指向螺线管的 N 极.

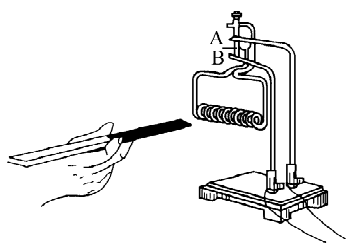


图 11-7 螺线管与磁铁相互作用时显示出 N、S 极



图 11-8 确定载流螺线管极性的右手定则

根据这一系列类似的实验可总结出两电流之间的作用力和两磁铁之间的作用力,磁铁与电流之间的作用力遵从相似的规律,启发人们提出这样的问题:磁铁和电流在磁现象中作用相似,它们之间哪一个是根本的?是否在本源上一致?

#### 4. 物质磁性的电本质

杰出的法国科学家安培在 1822 年根据以上实验事实提出了有关物质磁性本质的假说:组成磁铁的最小单元(磁分子)就是环形电流,若这样一些分子环流定向排列起来,在宏观上就会显示出 N、S 极来(图 11-9),这就是安培分子电流

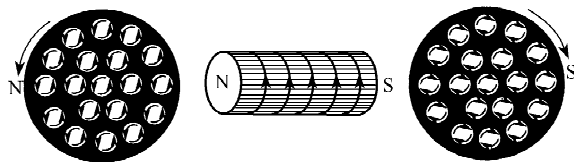


图 11-9 安培分子环流假说

假设.在那个时代,人们还不了解原子的结构,因此不能解释物质内部的分子环流是怎样形成的.现在,近代物理学告诉我们:一切物质都是由分子、原子组成的,原子又是由带正电的原子核和绕核旋转的带负电的电子组成的,电子不仅绕核旋转,而且还有自旋.原子、分子等微观粒子内电子的这些运动形成了等效的“分子环流”(也称分子电流),这便是物质磁性的基本来源.

这样,无论是导线中的电流(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,上面讲到的各个实验中出现的磁现象都可归为运动着的电荷(即电流)之间的相互作用.

## 11.2 恒定电流

### 11.2.1 恒定电流 电流密度矢量

电荷的定向运动形成电流(electric current),从微观上看,电流实际上是带电粒子的定向运动,形成电流的带电粒子统称为**载流子**(carrier).在金属导体(第一类导体)中,载流子

是自由电子(free electron),电流是自由电子相对于晶体点阵做定向流动形成的;在电解质溶液(第二类导体)中,电流是由正、负离子做定向流动形成的,这些电流都称为**传导电流**.此外,带电物体整体在空间的机械运动也可以形成电流,称为**运流电流**,本书只讨论传导电流.它产生的条件一是存在可以自由移动的电荷(自由电荷),二是存在电场(超导例外).

由于在一定电场中,正负电荷总是沿着相反方向运动,而且,在电流的一些效应(如磁效应、热效应)中,正电荷沿某一方向的运动和等量的负电荷反方向运动所产生的效果大部分相同(11.6.3节中要讲的霍尔效应除外).为了分析问题方便起见,习惯上总是把电流看做是正电荷的定向流动形成的,从而规定正电荷流动的方向为电流的方向,这样,在导体中电流的方向总是沿着电场的方向.

为了描述电流的强弱,引进**电流强度**的概念,单位时间内通过导体任一横截面的电量,叫做电流强度  $I$ ,即

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}.$$

式中,  $\Delta q$  是在时间间隔  $\Delta t$  内通过任一横截面的电量.上式定义的是在  $\Delta t$  时间内的平均电流强度,当  $\Delta t \rightarrow 0$  时

$$E = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}. \quad (11-1)$$

表示某一时刻的瞬时电流强度,它是一个标量.

在国际单位制中,规定电流强度为基本量,单位为安培(A),简称安,其定义在后面介绍,在电磁测量中和电子学中,还有毫安(mA)和微安( $\mu\text{A}$ ),它们之间的关系为

$$1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}, \quad 1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}.$$

用电流强度的概念描述的是通过导体某个横截面的电流的整体特征,这种描述是笼统的.在解决一般电路问题时利用  $I$  的概念就可以了,但实际上还常常遇到大块导体中产生的电流,如在有些地质勘探中利用的大地中的电流.在这种情况下,为了描述导体中各处电荷定向运动的情况以及电流的分布情况,引入**电流密度矢量**(current density)的概念.

先考虑一种最简单的情况,即只有一种载流子,它们带的电量都是  $q$ ,都以同一种速度  $v$  沿同一方向运动.设想在导体内有一小面积  $dS$ (它是矢量,大小为  $dS$ ,方向用它的法线方向表示),它的正法线方向  $e_n$  与  $v$  成  $\theta$  角(图 11-10).在  $dt$  时间内通过  $dS$  面的载流子应是在底面积为  $dS$ ,斜长为  $vdt$  的斜柱体内的所有载流子.此斜柱体的体积为  $vdt \cos \theta dS$ ,以  $n$  表示单位体积内这种载流子的数目,则单位时间内通过  $dS$  的电量,也就是通过  $dS$  的电流强度  $dI$  为

$$dI = \frac{q \cdot n \cdot v dt \cos \theta dS}{dt} = qnvcos \theta dS.$$

令  $dS = dS e_n$ ,上式可写成

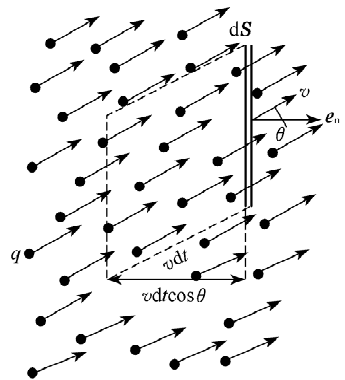


图 11-10 电流密度

$$dI = qnv \cdot d\mathbf{S}.$$

引入矢量  $\mathbf{J}$ , 并定义

$$\mathbf{J} = qnv, \quad (11-2)$$

则上式可写成

$$dI = \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S}. \quad (11-3)$$

这样定义的  $\mathbf{J}$  就叫小面积  $d\mathbf{S}$  处的 **电流密度矢量**. 由此定义可知, 对于正载流子, 电流密度矢量的方向与载流子运动的方向相同, 亦即该处电流的方向; 对于负载流子, 电流密度矢量的方向与载流子的运动方向相反.

实际的导体中可能有几种载流子, 以  $n_i$ 、 $q_i$  和  $\mathbf{v}_i$  分别表示第  $i$  种载流子的数密度、电量和速度, 以  $\mathbf{J}_i$  表示这种载流子形成的电流密度矢量, 则通过  $d\mathbf{S}$  面的电流强度应为

$$dI = \sum q_i n_i \mathbf{v}_i \cdot d\mathbf{S} = \sum \mathbf{J}_i \cdot d\mathbf{S}.$$

以  $\mathbf{J}$  表示总电流密度矢量, 它是各种载流子的电流密度的矢量和, 即  $\mathbf{J} = \sum \mathbf{J}_i$ , 则上式可写成

$$dI = \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S}.$$

这一公式和只有一种载流子时的式(11-3)一样.

金属中只有一种载流子, 即自由电子, 但各自由电子的速度不同, 设电子的电量为  $-e$ , 单位体积内以速度  $\mathbf{v}_i$  运动的电子的数目为  $n_i$ , 则

$$\mathbf{J} = \sum \mathbf{J}_i = - \sum n_i e \mathbf{v}_i = -e \sum n_i \mathbf{v}_i.$$

以  $\langle \mathbf{v} \rangle$  表示平均速度, 则由平均值的定义可得

$$\langle \mathbf{v} \rangle = \frac{\sum n_i \mathbf{v}_i}{\sum n_i} = \frac{\sum n_i \mathbf{v}_i}{n}.$$

式中,  $n$  为单位体积内的总电子数, 利用平均速度, 则金属中的电流密度矢量可表示为

$$\mathbf{J} = -ne \langle \mathbf{v} \rangle. \quad (11-4)$$

在无外加电场的情况下, 金属中的电子做无规则热运动,  $\langle \mathbf{v} \rangle = 0$ , 所以不产生电流; 在外加电场中, 金属中的电子将有一个平均定向速度  $\langle \mathbf{v} \rangle$ , 由此形成了电流, 这就是形成电流需要电场的微观解释. 这一平均定向速度叫做**漂移速度**.

在式(11-3)中, 如果  $\mathbf{J}$  与  $d\mathbf{S}$  垂直[图 11-11(a)], 则

$$\begin{aligned} dI &= J dS, \\ \mathbf{J} &= \frac{dI}{dS} \mathbf{e}_{n_0}. \end{aligned} \quad (11-5a)$$

如果  $\mathbf{J}$  与  $d\mathbf{S}$  不垂直, 与  $d\mathbf{S}$  的法线方向  $\mathbf{e}_n$  成  $\theta$  角[图 11-11(b)], 则

$$dI = J dS \cos \theta = J dS_{\perp},$$



$$\mathbf{J} = \frac{dI}{dS \cos \theta} \mathbf{e}_{n_0} = \frac{dI}{dS_{\perp}} \mathbf{e}_{n_0} \quad (11-5b)$$

式中,  $\mathbf{e}_{n_0}$  为  $dS_{\perp} = dS \cos \theta$  的法向单位矢量, 即该处电流的方向.

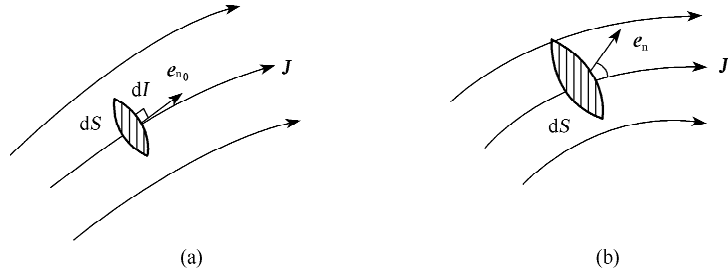


图 11-11 电流密度矢量

从上面的讨论, 式(11-5)给出电流密度矢量  $\mathbf{J}$  的宏观定义[式(11-2)是  $\mathbf{J}$  的一种微观定义]: 即电流密度  $\mathbf{J}$  是一个矢量, 这矢量在导体中各点的方向代表该点电流的方向, 其数值等于通过该点单位垂直截面的电流强度, 即单位时间里通过单位垂直截面上的电量. 这样, 电流密度矢量的国际单位为安培/米<sup>2</sup> ( $A/m^2$ ).

有了电流密度矢量的概念, 就可以描述大块导体中的电流分布情况, 在大块导体中每一点都有一个确定的电流密度矢量, 不同点的  $\mathbf{J}$  可能各不相同, 所有各点的  $\mathbf{J}$  的集合构成一个矢量场(与静电场类似), 称为电流场, 电流场可以用电流线来描绘. 所谓电流线是人为画出一组曲线, 线上各点的切线方向都与该点的电流密度矢量方向一致, 并且线的疏密与电流密度矢量的大小成正比(类似中学讲过的电力线、磁力线).

式(11-3)给出通过小面积  $dS$  上的电流强度. 通过导体中任意一个有限曲面  $S$  上的电流应为通过它的各面积的电流的代数和(图 11-12), 即

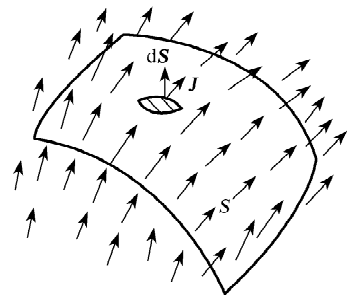


图 11-12 通过任一曲面的电流

$$I = \int_S dI = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = \int J \cos \theta dS. \quad (11-6)$$

由此可见, 在电流场中, 通过某一面积的电流强度就是通过该面积的电流密度矢量的通量(这是用数学语言对矢量场  $\mathbf{J}$  和它的通量  $I$  的描述),  $I$  的直观意义就是通过导体截面的电流线的根数. 所以  $I$  是一个代数量, 不是矢量.

### 11.2.2 电流的连续性原理 恒定电流的条件

设想在导体内任取一封闭曲面  $S$ (图 11-13), 并规定曲面的外法线方向为正, 根据式(11-6), 通过这个封闭曲面  $S$  的总电流为

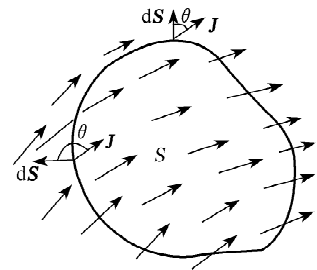


图 11-13 通过封闭曲面的电流, 电流的连续性原理