

(下)

大学物理基础

主 编 陈俊 皇甫泉生 严非男

副主编 姚兰芳 梁丽萍 许春燕 刘源

清华大学出版社

主 编 陈俊 皇甫泉生 严非男

副主编 姚兰芳 梁丽萍 许春燕 刘源

大学物理基础

(下)

一、
二、
三、
四、
五、
六、
七、
八、
九、
十、
十一、
十二、

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书以大学物理课程教学基本要求为指导,内容由电磁学、波动与波动光学、量子物理学等构成。为使理论与实践更密切地结合,各章均安排了适当的例题和习题。

本书可用作高等院校相关工科专业大学物理课程的教材或参考书,也可供非工科专业学生和其他读者阅读。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

大学物理基础.下/陈俊,皇甫泉生,严非男主编. —北京:清华大学出版社,2017
ISBN 978-7-302-45719-0

I. ①大… II. ①陈… ②皇… ③严… 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(2016)第 288791 号

责任编辑:佟丽霞

封面设计:常雪影

责任校对:赵丽敏

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市少明印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:19.5

字 数:470千字

版 次:2017年5月第1版

印 次:2017年5月第1次印刷

印 数:1~2800

定 价:39.90元

产品编号:067776-01

前言

FOREWORD

本书是编者在上海理工大学讲授大学物理的长期教学实践的基础上,借鉴国内外优秀教材,考虑现行的教学课时需求,编写而成的。

本书共 18 章,由力学、热学、电磁学、波动与波动光学、量子物理学简介组成。内容覆盖力学、相对论基础、热学、静电场、稳恒磁场、电磁感应、振动与波、波动光学、量子物理学简介,深广度适中,每章包括本章概要、基本内容、本章小结和习题,中间穿插各种阅读材料。带“*”小节为选讲内容。

本书力学部分由陈俊、严非男、皇甫泉生、刘源编写;热学部分由姚兰芳、皇甫泉生、童元伟编写;电磁学部分由皇甫泉生、李重要编写;波动部分由严非男、皇甫泉生编写;波动光学由梁丽萍、许春燕编写;量子力学简介由严非男、贾力源编写;陈俊、皇甫泉生、严非男对全书进行修改、统稿。

本书可用作高等院校相关工科专业大学物理课程的教材或参考书,也可供非工科专业学生和其他读者阅读。

在本书编写过程中,始终得到王祖源、顾铮先、刘廷禹、卜胜利老师的帮助和支持,在此向他们表示深深的谢意。同时感谢清华大学出版社的编辑和老师,感谢他们为本书出版所付出的艰辛劳动。

鉴于编者学识经验有限,书稿中疏漏之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编者

2016 年 10 月

目 录

CONTENTS

第 11 章 稳恒电流的磁场	2
11.1 稳恒电流	2
11.2 磁场 磁感应强度	8
11.3 毕奥-萨伐尔定律	11
11.4 磁场的高斯定理与安培环路定理	16
11.5 磁场对运动电荷的作用力	24
11.6 磁场对电流的作用	30
11.7 磁场中的磁介质	36
11.8 铁磁质	41
本章小结	45
习题	46
第 12 章 电磁感应 电磁场理论	54
12.1 电磁感应	54
12.2 动生电动势	60
12.3 感生电动势	64
12.4 自感与互感	69
12.5 磁场的能量	75
12.6 麦克斯韦方程组	79
本章小结	84
习题	85
第 13 章 振动	92
13.1 简谐振动的动力学及运动学特征	92
13.2 旋转矢量图示法	101
13.3 常见的简谐振动	103
13.4 阻尼振动	106
13.5 受迫振动 共振	108
13.6 简谐振动的合成	111
13.7 振动的分解 频谱分析	118

13.8	非线性振动与混沌简介	119
13.9	电磁振荡	121
	本章小结	125
	习题	127
第 14 章	波动	135
14.1	机械波的形成及描述	135
14.2	平面简谐波	139
14.3	弹性介质的应变与应力	144
14.4	波动方程 波速	145
14.5	波的能量 波的强度	148
14.6	惠更斯原理 波的衍射	152
14.7	波的叠加 波的干涉 驻波	153
14.8	机械波的多普勒效应	163
14.9	声波 超声波 次声波	167
14.10	电磁波	171
	本章小结	178
	习题	181
第 15 章	光的干涉	189
15.1	光源 单色光 光的相干性	189
15.2	光程 光程差	194
15.3	分波阵面干涉	196
15.4	分振幅干涉(I)——等倾干涉	200
15.5	分振幅干涉(II)——等厚干涉	204
15.6	迈克耳孙干涉仪	210
	本章小结	211
	习题	214
第 16 章	光的衍射	218
16.1	光的衍射现象及分类	218
16.2	惠更斯-菲涅耳原理	220
16.3	单缝夫琅禾费衍射	221
16.4	圆孔夫琅禾费衍射 光学仪器的分辨本领	226
16.5	光栅衍射	228
16.6	X射线的衍射	238
	本章小结	240
	习题	241

第 17 章 光的偏振	245
17.1 光的偏振性	245
17.2 马吕斯定律	248
17.3 反射和折射时光的偏振	250
17.4 光的双折射现象	252
本章小结	258
习题	260
第 18 章 量子物理学基础	264
18.1 黑体辐射 普朗克量子假设	264
18.2 光电效应 爱因斯坦光子理论	270
18.3 康普顿效应	274
18.4 氢原子光谱 玻尔的氢原子理论	278
18.5 德布罗意波 戴维孙-革末实验	285
18.6 不确定关系 物质波的统计解释	289
本章小结	292
习题	293
习题答案	298



极光

这是一张美丽的极光照片。极光有时被称为北极光或南极光，其实它们本质上是一回事，只不过在北极出现的极光被称为北极光，在南极出现的极光被称为南极光。我国在北半球，所以在我国只能看到北极光。

我国的黑龙省和新疆维吾尔自治区都曾经出现过极光，只是非常难得一见，甚至比海市蜃楼还不容易看到，但在南、北极的高纬度地区，极光则是司空见惯的事。极光是天空中一种奇特的自然光，是人们肉眼可见的唯一的超高层大气物理现象。在南、北极的高空，在漫长的极夜或极昼时，常会出现鲜艳的极光。

从物理上讲，地球像一块巨大的磁石，它的磁极在南北两极附近。从太阳射出的带电微粒流，也要受到地磁场的影响，以螺旋运动的方式趋近地磁的南北两极。所以极光大多在南北两极附近的上空出现。

极光是一种由太阳风引起的自然现象。太阳风是由太阳大气层中的带电粒子流组成的。当这些带电粒子流接近地球时，它们会受到地球磁场的偏转，并沿着磁力线向两极移动。在两极附近，这些粒子会与大气中的原子和分子发生碰撞，从而产生极光。极光通常出现在南北纬60度以上的地区。

极光的颜色取决于碰撞时释放的能量。最常见的颜色是绿色和红色。绿色极光通常出现在较低的高度，而红色极光则出现在较高的海拔。此外，有时还可以看到紫色和蓝色的极光。极光的强度和持续时间取决于太阳活动的强度。在太阳活动高峰期，极光可以在更低的纬度地区被观察到。

第11章

稳恒电流的磁场

本章概要 在运动电荷周围,不仅存在着电场而且还存在着磁场。磁场和电场一样也是物质的一种形态。本章在介绍稳恒定电流的描述和产生的条件之后,将讨论确定稳恒电流微元所激发的磁场的基本公式——毕奥-萨伐尔定律,以及描述磁场基本性质的磁场中的高斯定理与安培环路定理,并进一步讨论运动电荷和稳恒电流在电磁场中的受力和运动规律。之后根据物质的电结构,简要说明各类磁介质磁化的微观机制,并介绍有磁介质时磁场所遵循的普遍规律。

11.1 稳恒电流

一、电流 电流密度

我们知道,导体中存在着大量的自由电子,在静电平衡条件下,导体内部的场强为零,自由电子没有宏观的定向运动。若导体内的场强不为零,自由电子将会在电场力的作用下,逆着电场方向运动。我们把导体中电荷的定向运动称为电流。当导体内部的电场不随时间变化时,驱动电荷的电场力不随时间变化,因而导体中所形成的电流将不随时间变化,这种电流称为稳恒电流(或恒定电流)。

通常规定正电荷宏观定向运动的方向为电流的方向。电流的强弱用电流强度来描述,用符号 I 表示。设在时间 Δt 内,通过任一横截面的电量是 Δq ,则通过该截面的电流强度(简称电流)为

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (11-1)$$

式(11-1)表示电流强度等于单位时间内通过导体任一截面的电量。如果 I 不随时间变化,这种电流称为稳恒电流,又叫直流电。

如果加在导体两端的电势差随时间变化,电流强度也随时间变化,这时需用瞬时电流($\Delta t \rightarrow 0$ 时的电流强度)来表示:

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt} \quad (11-2)$$

对于稳恒电流,式(11-1)和式(11-2)是等价的。

电流强度是一个基本量,在国际单位制中的单位是安培(符号为 A), $1\text{A}=1\text{C/s}$ 。

电流强度是标量,所谓电流的方向只表示正电荷在导体内移动的流向。

在实际生活和工作中还常常遇到在液体、气体以及大块导体中流动的电流。例如在分线盒内不同半径导线中的电流,有些地质勘探中利用的大地中的电流,电解槽内电解液中的电流,气体放电时通过气体的电流等。在这种情况下电流在导体截面上各点的分布将是不均匀的,如图 11-1 所示。为了描述导体中各处电荷定向运动的情况,引入电流密度概念。

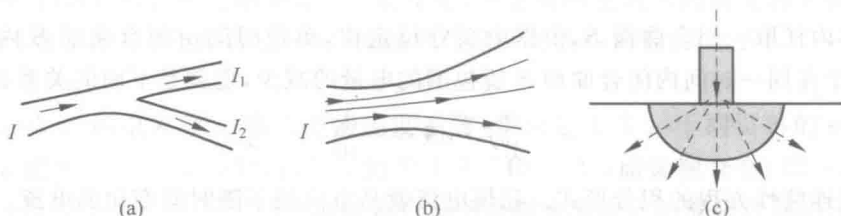


图 11-1 电流在导体截面上的分布

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,它们可以是电子、质子、正的或负的离子,在半导体中还可能是带正电的“空穴”。在无外加电场的情况下,载流子(金属中的电子)作无规则热运动,平均定向运动速度为零,所以不产生电流。在外加电场中,载流子(金属中的电子)将有一个平均定向运动速度,由此形成电流。这一平均定向速度叫漂移速度。

仅考虑一种最简单的、只有一种载流子的情况,如图 11-2 所示,设每个载流子带的电量都是 q ,在导体内都以同一种漂移速度 v 沿同一方向运动。设想在导体内有一小面积 dS ,它的正法线方向与 v 成 θ 。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 的电流强度为

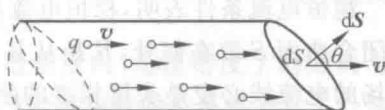


图 11-2 推导电流

$$dI = \frac{qnvd\cos\theta dS}{dt} = qnv\cos\theta dS$$

用矢量符号,上式可以写成

$$dI = qn\mathbf{v} \cdot d\mathbf{S}$$

引入矢量 \mathbf{j} ,并定义

$$\mathbf{j} = qn\mathbf{v} \quad (11-3)$$

则

$$dI = \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S}$$

如果 \mathbf{j} 与 $d\mathbf{S}$ 平行,则 $dI = j dS$,或者 $j = dI/dS$,即 \mathbf{j} 的大小等于单位时间内通过该点附近的垂直正电荷运动方向单位面积上的电量,显然这样定义的 \mathbf{j} 描述了 dS 处在导体截面上各点的电流分布情况,我们把它称为电流密度矢量。对于稳恒电流,导体内各处的电流密度矢量都不随时间变化。

有了电流密度矢量后,通过任意面积 S 的电流强度应为

$$I = \int_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} = \int_S j \cos\theta dS \quad (11-4)$$

式(11-4)表明,通过某一面积的电流强度,等于该面积上的电流密度的通量。

在国际单位制中,电流密度的单位为安培·米⁻²(符号 A·m⁻²)。

二、电流的连续性方程

在导体内任取一闭合曲面 S , 根据电荷守恒定律, 单位时间由闭合曲面 S 内流出的电量, 必定等于在同一时间内闭合曲面 S 所包围的电量的减少, 也就是下面的关系必须成立:

$$\oint_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} = -\frac{dq}{dt} \quad (11-5)$$

这就是电流连续性方程的积分形式。稳恒电流就是电流场不随时间变化的电流。电流场不随时间变化, 就要求电流场中的电荷分布也不随时间变化, 由分布不随时间变化的电荷所激发的电场, 称为稳恒电场。既然稳恒电场中电荷分布不随时间变化, 那么流入某区域的电荷一定等于流出该区域的电荷, 如图 11-3 所示, 电流连续性方程(11-5)必定具有下面的形式:



图 11-3 电流连续性

$$\oint_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (11-6)$$

稳恒电流条件表明, 稳恒电流场中通过任意闭合曲面的电流必定等于零。这也表示, 无论闭合曲面 S 取在何处, 凡是从某一处穿入的电流线都必定从另一处穿出。所以, 稳恒电流场的电流线必定是头尾相接的闭合曲线。

上面所说的稳恒电场, 是由运动的而分布不随时间变化的电荷所激发的。在遵从高斯定理和环路定理方面, 稳恒电场与静电场具有相同的性质, 如用 E 表示稳恒电场的电场强度, 同样满足环路定理 $\oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$, 所以两者统称为库仑电场。

三、电阻 欧姆定律

在电流恒定和温度一定的条件下, 通过一段导体的电流强度 I 和加在导体两端的电势差 $U_1 - U_2$ 成正比, 即

$$U_1 - U_2 = IR \quad (11-7)$$

这就是部分电路的欧姆定律, 或称一段均匀电路的欧姆定律。 R 是比例系数, 它的数值是由导体自身性质和尺寸决定的, 称为导体的电阻。电阻 R 的倒数称为电导, 即 $G = \frac{1}{R}$ 。

在国际单位制中, 电阻的单位为欧姆(符号 Ω), 电导的单位为西门子(符号 S)。

导体电阻的大小与导体的材料、几何尺寸和温度等因素有关。对于一定材料、横截面积均匀的导体, 实验证明, 它的电阻 R 与其长度 l 、横截面积 S 的关系为

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (11-8)$$

式(11-8)中,比例常数 ρ 称为电阻率。它是一个仅由导体材料性质和导体所处的条件(如温度)决定的物理量。电阻率的倒数称为电导率,即

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad (11-9)$$

在国际单位制中,电阻率的单位为欧姆·米(符号 $\Omega \cdot \text{m}$),电导率的单位为西门子·米 $^{-1}$ (符号 $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$)。

实验证明,各种材料的电阻率都随温度变化,纯金属的电阻率随温度的变化比较规律,在 0°C 附近,温度在较小范围内变化时,电阻率与温度有线性关系,表示为

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t) \quad (11-10)$$

式中, ρ_0 为 0°C 时的电阻率, α 称为电阻温度系数,单位是 $1/^\circ\text{C}$ 。不同材料的 α 值也不同。例如铜的 α 值为 $3.9 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$,铝的 α 值为 $4.3 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$,而锰铜合金(12%锰、84%铜、4%镍)的 α 值为 $1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。这说明锰铜合金的电阻率随温度的变化特别小,用它制作电阻受温度的影响就很小,因此,常用这种材料制作标准电阻。有些金属和化合物在温度降到接近绝对零度时,它们的电阻率突然减少到零,这种现象叫超导。超导现象的研究在理论上有很重要的意义,在技术上超导也获得了很重要的应用。

由于电场强度和电压有一定的关系,所以还可以根据欧姆定律(11-7)导出电场和电流的关系,如图11-4所示。以 Δl 和 ΔS 分别表示一段导体的长度和截面积,它的电阻率为 ρ ,其中有电流 I 沿它的长度方向流动。由于电压 $U_1 - U_2 = E\Delta l$,电流 $I = j \cdot \Delta S$,而电阻 $R = \rho\Delta l/\Delta S$,将这些量代入欧

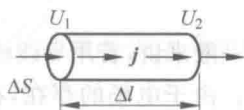


图11-4 推导电场和电流的关系

姆定律(11-7)可以得到 $j = E/\rho = \gamma E$ 。实际上,在金属或电解液内,电流密度 j 的方向与电场强度 E 的方向相同。因此又可写成 $j = \gamma E$ 。这一和欧姆定律等效的关系式表示了导体中各处电流密度与电场强度的关系,可以叫做欧姆定律的微分形式。

四、电流的功和功率 焦耳定律

电流通过一段电路时,电场力移动电荷要做功。在稳恒电流的情况下,所做的功 A 可表示为

$$A = q(U_1 - U_2) = It(U_1 - U_2) \quad (11-11)$$

式中, q 为在时间 t 内通过电路的电量, U_1, U_2 分别为电路两端的电势, I 为电路中的电流强度。这个功称为电流 I 的功,简称电功,其相应的功率为

$$P = \frac{A}{t} = I(U_1 - U_2) \quad (11-12)$$

称为电流的功率,简称电功率。

在国际单位制中,电流功的单位为焦耳(符号 J),电功率的单位为瓦特(符号 W)。

应该指出,若电路中是一阻值为 R 的纯电阻,根据欧姆定律,式(11-12)可改写为

$$P = I^2 R = \frac{(U_1 - U_2)^2}{R} \quad (11-13)$$

此处的电功率又称为热功率。当电路是纯电阻时,式(11-12)和式(11-13)是等效的,当电路中除有电阻外,还有电动机、充电的蓄电池等转换能量的电器时,式(11-12)和式(11-13)

所表示的意义就各不相同了。式(11-12)适应于计算任何电路的电功率,它具有更普遍的意义。

在某一电路中,用电器是一纯电阻 R ,由能量转换与守恒定律可知,从电源输给电路的电能将全部转化为热能。因此,电流流过这段电路时所产生的热量(通常称为焦耳热)应等于电流的功。用 Q 表示电流产生的热量,则有

$$Q = I^2 R t = \frac{(U_1 - U_2)^2}{R} t \quad (11-14)$$

这一关系称为焦耳定律。它表明,当电流通过导体时,所产生的热量等于导体内电流的平方、导体的电阻以及通电时间三者的乘积。

焦耳热产生的原因,从微观上可以这样理解:自由电子在金属导体内运动时,电场力对它做功,使之动能增加,当电子与金属原子点阵相碰时,电子不断地把这部分能量传给点阵。致使原子点阵的热运动加剧,引起导体的温度升高,点阵将得到的这部分能量以热的形式释放出来。

五、电源的电动势

一般来讲,若用导线将一个带正电的导体与另一个带负电的导体连接起来,如图 11-5(a)所示。由于电场的存在,在静电力的作用下,正电荷从高电势流向低电势,负电荷从低电势流向高电势,形成电流。随着两导体上正负电荷的逐渐中和,导线内的电场强度逐渐减弱,两导体的电势将趋于平衡,电荷的定向流动也随之停止。由此可见,仅有静电力的作用,不可能长时间维持电荷的定向流动。要在导体中维持稳恒电流,必须在导体的两端保持恒定的电势差。为此,必须在电路中接上一种装置,把正电荷由低电势移向高电势,使电路两端保持一定电势差,这种装置称为电源。电源的种类很多,如各种电池、发电机等。

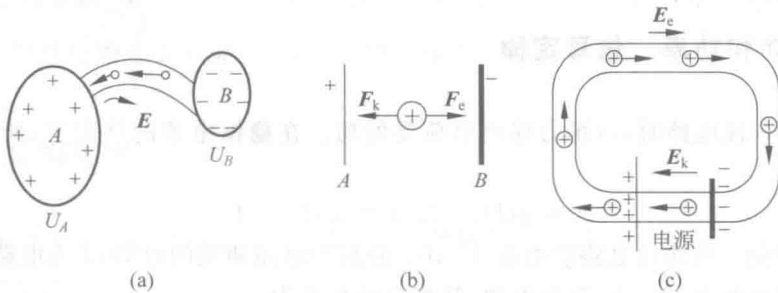


图 11-5 电源原理

电源为什么能保持电路两端的电势差呢?电源本身具有与静电力本质上不同的非静电力,如化学力(如电池)、电磁力(如发电机)等。

图 11-5(b)表示一电源内部的电路,称为内电路。假设在电源内部非静电力 F_k 使正电荷由 B 向 A 运动,于是 A 端带正电, B 端带负电,随之电源内产生一方向从 A 到 B 的静电场,因此电源内的正电荷除受到非静电力 F_k 的作用外,还受到静电力 F_e 的作用,两者方向相反。开始时 A, B 两端电荷积累不多, $F_k > F_e$, 正电荷继续由 B 向 A 迁移,随着 A, B 两端正负电荷的积累增加, F_e 逐渐增大,直到 $F_k = F_e$ 时, A, B 两端的正负电荷不再增加, A, B

间的电势差达到了一定值,这就是电源的开路电压。

用导线将电源 A, B 两端接通,形成外电路,内、外电路构成闭合电路,如图 11-5(c) 所示。 A, B 两端的电势差在外电路的导体中产生电场,于是在外电路中出现了从 A 到 B 的电流。随着电荷在外电路中的流动, A, B 两端积累的电荷减少,电源内部的电荷受到的 F_e 又小于 F_k ,于是电源内重新出现正电荷从 B 向 A 的运动。可见外电路接通后,电源内部也出现了电流,但方向是从低电势流向高电势,这正是非静电力不同于静电力的特殊作用。

在电源内部和电源外部,形成稳恒电流的起因是不同的。在电源内部,正电荷在非静电力作用下从负极流向正极形成电流,在外电路,正电荷在静电力作用下从正极流向负极形成电流。电源中的非静电力是在闭合电路中形成稳恒电流的根本原因。在电源内部、非静电力移送正电荷的过程中要克服静电力做功,从而将电源本身所具有的能量(化学能、机械能、热能等)转换为电能;因此,从能量观点看,电源就是将其他形式的能量转变成电能的装置。

为了表述不同电源转化能量的能力,人们引入了电动势这一物理量。我们用电动势来描述电源内部非静电力做功的特性。

我们定义把单位正电荷绕闭合回路一周时,非静电力所做的功为电源的电动势。若以 E_k 表示非静电场的电场强度(仿照静电场的方法,将电荷 q 在电源内所受到的非静电力 F_k 和 q 的比定义为电场强度,用 E_k 来表示,即 $E_k = \frac{F_k}{q}$), W 为非静电力所做的功, ϵ 表示电源电动势,那么由上述电动势的定义,有

$$\epsilon = \frac{W}{q} = \oint E_k \cdot dl \quad (11-15)$$

考虑到在闭合回路中,外电路的导线中只存在静电场,没有非静电场;非静电场强度 E_k 只存在于电源内部,故在外电路上有 $\int_{\text{外}} E_k \cdot dl = 0$ 。

这样,式(11-15)可改写为

$$\epsilon = \oint_l E_k \cdot dl = \int_{\text{内}} E_k \cdot dl \quad (11-16)$$

式(11-16)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。

电动势虽不是矢量,但为了便于判断在电流流过时非静电力是做正功还是做负功(也就是电源是放电,还是被充电),通常把电源内部电势升高的方向,即从负极经电源内部到正极的方向,规定为电动势的方向。电动势的单位和电势的单位相同。

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,电源内部也有电阻,叫做电源的内阻,一般用符号 R_i 表示。为简明起见,在作电路图时常将电源的电动势 ϵ 和内阻 R_i 表述为如图 11-6 所示的形式。

一般家用铜导线的电阻,每米约为 0.03Ω ,而常用的电池,内阻约为 1Ω 。所以,一般电路中导线的电阻常常是略去不计的。但是对远距离的电力

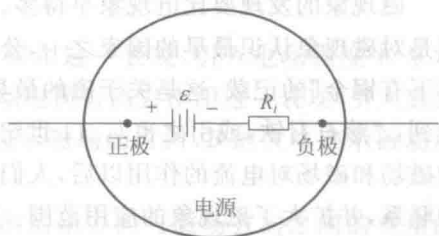


图 11-6 电源的电动势和内阻

传输线来说,其导线的电阻则是要计算的。

【例题 11-1】 (1) 设每一个铜原子贡献一个自由电子,问铜导线中自由电子的数密度为多少? (2) 在民用供电线路中,半径为 0.81mm 的铜导线,容许通过的电流最大值为 15A,试问在这种情况下,电子漂移速率是多少? (3) 假设铜导线中电流均匀分布,此时电流密度的大小为多少?

解: (1) 铜的质量密度 $\rho = 8.95 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 铜的摩尔质量 $M = 63.5 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$, 铜导体内自由电子的数密度为

$$n = \frac{N}{V} = \frac{N_A \rho}{M} = 8.48 \times 10^{28} (\text{m}^{-3})$$

(2) 由式(9-4)可得自由电子漂移速率为

$$v_d = \frac{I}{enS} = 5.36 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 2 (\text{m} \cdot \text{h}^{-1})$$

自由电子的漂移速率比蜗牛的爬行速率还要略慢一些。

(3) 电流密度则为

$$j = \frac{I}{S} = 7.28 \times 10^6 (\text{A} \cdot \text{m}^{-2})$$

延伸阅读——物理学家

奥 斯 特

奥斯特(Hans Christian Oersted, 1777—1851), 丹麦物理学家, 1777年8月14日生于兰格朗岛鲁德乔宾的一个药剂师家庭。1794年以优异的成绩考入哥本哈根大学, 1799年获博士学位。1801年至1803年去德、法等国访问, 结识了许多物理学家及化学家。1806年起任哥本哈根大学物理学教授, 1815年起任丹麦皇家学会常务秘书。1829年起任哥本哈根工学院院长。1851年3月9日在哥本哈根逝世。奥斯特的主要科学成就为1820年发现了电流的磁效应, 并凭借这一杰出发现获英国皇家学会科普利奖章, 还成就了一句名言: 一切机遇只偏爱那些有准备的头脑。奥斯特曾经对化学亲和力等作了研究。1822年他精密地测定了水的压缩系数值, 论证了水的可压缩性。1823年他还对温差电进行了成功的研究。他对库仑扭秤也作了一些重要的改进。

11.2 磁场 磁感应强度

磁现象的发现要比电现象早得多。早在公元前人们就知道磁石(Fe_3O_4)能吸引铁。我国是对磁现象认识最早的国家之一, 公元前4世纪左右成书的《管子》中就有“上有慈石者, 其下有铜金”的记载, 这是关于磁的最早记载。类似的记载, 在其后的《吕氏春秋》中也可以找到: “慈石召铁, 或引之也”。11世纪我国发明了指南针。但是, 直到19世纪, 发现了电流的磁场和磁场对电流的作用以后, 人们才逐渐认识到磁现象和电现象的本质以及它们之间的联系, 并扩大了磁现象的应用范围。到20世纪初, 由于科学技术的进步和原子结构理论的建立和发展, 人们进一步认识到磁现象起源于运动电荷, 磁场也是物质的一种形式, 磁力是运动电荷之间除静电力以外的相互作用力。

一、基本磁现象 磁场

无论是天然磁石或是人工磁铁都有吸引铁、钴、镍等物质的性质,这种性质叫做磁性。条形磁铁及其他任何形状的磁铁都有两个磁性最强的区域,叫做磁极。将一条形磁铁悬挂起来,其中指北的一极是北极(用N表示),指南的一极是南极(用S表示)。实验指出,极性相同的磁极相互排斥,极性相反的磁极相互吸引。与正负电荷可以独立存在不同,在自然界中不存在独立的N极和S极,任意一块磁铁,不管把它分割得多小,每一小块磁铁仍然具有N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(magnetic monopole)。但至今尚未观察到这种粒子。

在相当长的一段时间内,人们一直把磁现象和电现象看成彼此独立无关的两类现象。直到1820年,奥斯特首先发现了电流的磁效应。后来安培发现放在磁铁附近的载流导线或载流线圈,也要受到力的作用而发生运动。进一步的实验还发现,磁铁与磁铁之间,电流与磁铁之间,以及电流与电流之间都有磁相互作用。上述实验现象促进了人们对“磁性本源”的研究,使人们进一步认识到磁现象起源于电荷的运动,磁现象和电现象之间有着密切的联系。一切磁现象的根源是电流。1822年,安培由此提出了有关物质磁性本质的假说,他认为任何物质中的分子都存在回路电流,称为分子电流(molecular current),分子电流相当于一个基元磁体;物质对外显示出的磁性,就是分子电流在外界作用下趋于同一方向排列的结果。安培的假说与现代对物质磁性的理解是符合的。近代理论说明,原子核外电子绕核的运动和电子自旋等运动就构成了等效的分子电流,一切磁现象起源于电荷的运动。电荷(不论静止或运动)在其周围空间激发电场,而运动电荷在周围空间还要激发磁场;在电磁场中,静止的电荷只受到电场力的作用,而运动电荷除受到电场力作用外,还受到磁力的作用。电流或运动电荷之间相互作用的磁力是通过磁场而作用的,故磁力也称为磁场力。运动电荷或电流之间通过磁场作用的关系可以表达为

$$\text{电流(运动电荷)} \longleftrightarrow \text{磁场} \longleftrightarrow \text{电流(运动电荷)}$$

最后必须指明,这里所说的运动和静止都是相对观察者而言的,同一客观存在的场,它在某一参考系中表现为电场,而在另一参考系中却可能同时表现为电场和磁场。

磁场不仅对运动电荷或载流导线有力的作用,它和电场一样,也具有能量。这正是磁场物质性的表现。

二、磁感应强度

在静电学中,我们利用电场对静止电荷有电场力作用这一表现,引入电场强度 E 来定量地描述电场的性质。与此类似,我们利用磁场对运动电荷有磁力作用这一表现,引入磁感应强度 B 来定量地描述磁场的性质。其中 B 的方向表示磁场的方向, B 的大小表示磁场的强弱。

实验表明,运动电荷在磁场中所受的磁力随电荷的运动方向与磁场方向之间的夹角的变化而变化。当电荷运动方向与磁场方向一致时,它不受磁力作用。而当电荷运动方向与磁场方向垂直时,它所受磁力最大,磁力的大小正比于运动电荷的电量,正比于运动电荷的

速率,而且,作用在运动电荷上的磁力 \boldsymbol{F} 的方向总是与电荷的运动方向垂直,即 $\boldsymbol{F} \perp \boldsymbol{v}$ 。

实验还表明,当正电荷的运动方向与磁场方向垂直时,它所受的最大磁力 \boldsymbol{F}_m 与电荷的电 q 和速度 \boldsymbol{v} 的大小的乘积成正比,但对磁场中某一定点来说,比值 \boldsymbol{F}_m/qv 是一定的。对于磁场中不同位置,这个比值有不同的确定值。因此我们把这个比值规定为磁场中某点的磁感应强度 \boldsymbol{B} 的大小,即

$$B = \frac{F_m}{qv} \quad (11-17)$$

实验同时发现,磁场力 \boldsymbol{F} 总是垂直于 \boldsymbol{B} 和 \boldsymbol{v} 所组成的平面,这样就可以根据最大磁场力 \boldsymbol{F}_m 和 \boldsymbol{v} 的方向确定 \boldsymbol{B} 的方向,方法如下:由正电荷所受力 \boldsymbol{F}_m 的方向,按右手螺旋法则,沿小于 π 的角度转向正电荷运动速度 \boldsymbol{v} 的方向,这里螺旋前进的方向便是该点 \boldsymbol{B} 的方向。这就是说,对正电荷而言,矢积 $\boldsymbol{F} \times \boldsymbol{v}$ 的方向就是矢量 \boldsymbol{B} 的方向。

磁感应强度 \boldsymbol{B} 在国际单位制中的单位是特斯拉(符号 T), $1\text{T} = 1\text{N} \cdot \text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s} = 1\text{N} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

应当指出,如果磁场中某一区域内各点 \boldsymbol{B} 的方向一致、大小相等,那么,该区域内的磁场就叫均匀磁场。不符合上述情况的磁场就是非均匀磁场。长直螺线管内中部的磁场是常见的均匀磁场。

地球的磁场只有 10^{-5}T ,一般永磁体的磁场约为 10^{-2}T 。而大型电磁铁能产生 2T 的磁场,目前已获得的最强磁场是 31T 。超导磁体能激发高达 25T 的磁场,某些原子核附近的磁场可达 10^4T ,而脉冲星表面的磁场更是高达 10^8T 。人体内的生物电流也可以激发出微弱的磁场,例如心电激发的磁场约为 $3 \times 10^{-10}\text{T}$,测量身体内的磁场发布已成为医学中的高级诊断技术。

延伸阅读——科学发现

电流的磁效应

奥斯特早在读大学时就深受康德哲学思想的影响,认为各种自然力都来自同一根源,可以相互转化。富兰克林发现的莱顿瓶放电使钢针磁化的现象,对奥斯特启发很大,他认识到电向磁的转化不是不可能的,关键是要找出转化的具体条件。他根据电流流经直径较小的导线会发热,推测如果通电导线的直径逐步缩小,那么导线就会发光、会产生磁效应。他指出:“我们应该检验电是否以其最隐蔽的方式对磁体有所影响。”寻找这两大自然力之间联系的思想,经常盘绕在他的头脑中。1819年冬,奥斯特分析了前人在电流方向上寻找磁效应都未成功的事实,想到磁效应可能像电流通过导线产生热和光那样是向四周散射的,即是一种横向力,而不是纵向的,他让电流通过一根很细的铂丝,把一个带玻璃罩的指南针放在铂丝下面,实验并没有取得明显的效果。1820年4月的一天晚上,奥斯特在讲课中突然出现了一个想法,讲课快结束时,他说:让我把导线与磁针平行放置来试试看。当他接通电源时,发现小磁针微微动了一下。这一现象使奥斯特又惊又喜,他紧紧抓住这一现象,连续进行了3个月的实验研究,终于在1820年7月21日发表了题为《关于磁针上的电流碰撞的实验》的论文。电流磁效应的发现揭开了物理学史上的一个新纪元,还成就了一句名言:一切机遇只偏爱那些有准备的头脑。