



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

- 国家精品课程配套教材
- 首届国家教学名师主编

大学物理 (下 册)

第二版

康 颖 主编



科学出版社
www.sciencep.com

04/247=2

:2

2010

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大学物理(下册)

(第二版)

主 编 康 颖

副主编 马轩文 朱 霞

刘长捷 刘家福

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,由首届国家级教学名师在军队级教学成果一等奖教材《大学物理》的基础上,根据教育部的理工科类大学物理课程教学基本要求,考虑国内外物理教材改革的动向以及我国当前大学物理教学实际,修订和改编而成。

全书分上、下两册。上册包括力学、振动与波动、热学和电学;下册包括恒定电流、磁学、光学、近代物理以及供选讲的现代技术的物理基础。另有陀螺与惯性导航、混沌简介、熵与信息、超导、液晶、核磁共振、次声武器、电磁炮等小篇幅阅读材料供学生选读,有利于激发学生学习的积极性,开拓视野,提高科学素质。书后还附有物理学词汇中英文对照表,便于师生查阅。

本书可作为高等学校工科各专业、理科非物理类专业、军队院校合训和非合训各专业的本科教材,也可作为工程技术人员的参考书,或供自学者使用。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理·下册/康颖主编. —2版. —北京:科学出版社,2010

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-03-026433-6

I. ①大… II. ①康… 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(2010)第 009939 号

责任编辑:胡云志 昌盛/责任校对:钟 洋

责任印制:张克忠/封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

随 主 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 1 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2010 年 1 月第 二 版 印张: 23 3/4 插页: 1

2010 年 1 月第四次印刷 字数: 479 000

印数: 43 801—49 800

定价: 31.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

目 录

第 12 章 恒定电流	1
12.1 电流 电流密度	1
12.2 电源 电动势	5
12.3 欧姆定律的微分形式	8
12.4 基尔霍夫定律	12
内容提要	14
习题	15
第 13 章 真空中的恒定磁场	18
13.1 磁场 磁感强度	18
13.2 毕奥-萨伐尔定律	20
13.3 磁通量 磁场的高斯定理	26
13.4 安培环路定理	28
13.5 磁场对电流的作用	33
13.6 磁场对运动电荷的作用	40
13.7 霍尔效应	45
内容提要	46
习题	48
阅读材料 7 磁流体发电	53
第 14 章 磁介质	55
14.1 磁介质 磁化强度	55
14.2 磁介质中的安培环路定理	59
14.3 铁磁质	62
内容提要	65
习题	65
阅读材料 8 粒子束武器	67
第 15 章 变化的电场和磁场	70
15.1 电磁感应定律	70
15.2 感应电动势	74
15.3 自感和互感	82
15.4 磁场能量	88

15.5 电磁感应的应用	90
15.6 麦克斯韦电磁场理论简介	92
内容提要	102
习题	104
阅读材料 9 电磁炮	107
阅读材料 10 超导电性	109
第 16 章 几何光学基础	114
16.1 几何光学基本定律	114
16.2 光在平面上的反射和折射	118
16.3 光在球面上的反射和折射	121
16.4 助视光学仪器	129
内容提要	131
习题	133
第 17 章 光的干涉	135
17.1 光矢量 光程	135
17.2 光的干涉现象 相干光	137
17.3 双缝干涉	140
17.4 薄膜的等倾干涉	143
17.5 薄膜的等厚干涉	148
17.6 迈克耳孙干涉仪	152
17.7 光源的相干性	154
内容提要	156
习题	157
阅读材料 11 激光陀螺	161
第 18 章 光的衍射	163
18.1 光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理	163
18.2 单缝的夫琅禾费衍射	165
18.3 圆孔衍射 光学仪器的分辨本领	171
18.4 衍射光栅	173
18.5 X 射线衍射	178
内容提要	180
习题	181
阅读材料 12 全息照相	183
第 19 章 光的偏振	187
19.1 自然光和偏振光	187

19.2 起偏和检偏 马吕斯定律·····	189
19.3 反射和折射时的偏振 布儒斯特定律·····	191
19.4 双折射现象·····	192
* 19.5 偏振光的干涉 ·····	197
* 19.6 人工双折射 旋光现象 ·····	202
内容提要·····	206
习题·····	207
阅读材料 13 液晶 ·····	210
第 20 章 狭义相对论基础 ·····	214
20.1 伽利略变换 经典时空观·····	214
20.2 洛伦兹变换·····	218
20.3 狭义相对论时空观·····	222
20.4 狭义相对论动力学基础·····	230
内容提要·····	235
习题·····	236
第 21 章 量子物理基础 ·····	238
21.1 热辐射 普朗克量子假设·····	238
21.2 光电效应 爱因斯坦光子假说·····	243
21.3 康普顿效应·····	247
21.4 玻尔的氢原子理论·····	249
21.5 德布罗意物质波假设·····	254
21.6 不确定关系·····	259
21.7 薛定谔方程·····	262
21.8 氢原子·····	266
21.9 原子中电子的分布·····	270
21.10 固体的能带 ·····	272
内容提要·····	277
习题·····	279
阅读材料 14 核磁共振 ·····	281
第 22 章 现代技术的物理基础专题 ·····	284
22.1 激光技术·····	284
22.2 红外技术·····	299
22.3 传感器技术·····	315
22.4 纳米技术·····	331
22.5 新能源技术·····	341

习题参考答案·····	356
附录·····	363
附录 1 物理量的名称、符号和单位(SI)一览表 ·····	363
附录 2 基本物理常量表 ·····	365
附录 3 有关地球和太阳的一些常用数据表 ·····	365
物理学词汇中英文对照表·····	366

第 12 章 恒定电流

前两章讨论的静电场是相对观察者静止的电荷激发的,即使在静电场中放入导体,达到静电平衡时,也没有电荷作定向运动.如果在导体内的任意两点间维持恒定的电势差,使得导体内有一个稳定的电场,那么导体内的电荷就要作定向运动而形成电流.本章讨论在这种情况下产生的电现象和遵循的基本规律.

我们将从两个方面进行研究.一方面从“场”的角度研究恒定电流,引入电流密度的概念,并由此得到欧姆定律的微分形式,把恒定电流与恒定电场联系起来,然后在电源内部引入非静电力和非静电性场强的概念,把电源电动势与非静电性场强联系起来.另一方面从“路”的角度研究直流电问题,讨论电路中电流、电压、能量转换以及基尔霍夫定律等内容.重点研究恒定电场的性质和规律.

12.1 电流 电流密度

12.1.1 电流的形成

电流是电荷的定向运动形成的.形成电流的带电粒子统称为载流子,它们可以是自由电子、离子或带电物体等.金属导体中的载流子是自由电子,流体(如电解液和电离气体)的载流子是正离子或负离子,半导体的载流子则为其中存在着的一些自由电子或空穴.由自由电子或离子定向运动形成的电流叫**传导电流**,由带电物体作机械运动形成的电流叫**运流电流**.本章讨论传导电流.

从导电机构来看,金属中存在着大量的自由电子和正离子.正离子构成金属的晶格点阵,而自由电子则在晶格间作无规则的热运动,并不断地与晶格碰撞.当不存在外电场时,电子向各方向运动的概率相等,所以,电子热运动的平均速度为零,不能形成宏观的电荷运动,也就不能形成电流.

当导体两端存在电势差时,在导体内部就有电场存在.这时自由电子都受到与电场方向相反的电场力作用,因此,每个电子除了原来不规则的热运动外,在电场的反方向上还有一个附加的运动.图 12.1 中实线是某电子在无电场作用时热运动的轨迹,由于电子与晶体点阵上的正离子频繁碰撞,其轨迹是一条无规则的折线.图中的

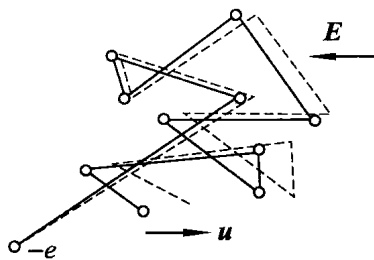


图 12.1

虚线表示有外电场时电子的运动轨迹. 此时电子在两次碰撞之间的运动总要逆着电场方向偏离, 这种偏离叫做漂移. 每个电子都要发生这样的漂移, 大量电子的漂移则表现为电子的定向运动. 电子定向运动的平均速度称为**漂移速度**, 其方向与导体内的电场方向相反. 电子作有规则定向漂移的速度大小只有 $10^{-4} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的量级, 较之热运动的速度要小得多. 但是, 当我们接通电路时因电场传播速度等于光速, 所以整个电路中的电场实际上几乎是同时建立起来的, 导体中全部自由电子几乎同时沿着电场的反方向作有规则的定向运动, 于是在导体中形成了电流.

综上所述, 产生电流有两个条件: (1) 存在可以自由移动的电荷; (2) 存在电场(超导体除外).

习惯上, 规定正电荷运动的方向为电流的方向. 按此规定, 导体中电流的方向总是沿着电场方向, 从高电势处指向低电势处.

12.1.2 电流强度 电流密度

1. 电流强度

电流的强弱用电流强度 I 来描述. 单位时间内通过导体任一横截面的电量叫做通过该截面的**电流强度**, 简称**电流**. 若在 Δt 时间内通过某一截面的电量为 Δq , 则通过该截面的电流强度定义为

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

电流强度的单位名称是安培, 符号为 A. $1 \text{ A} = 1 \text{ C}\cdot\text{s}^{-1}$.

若导体中通过某一截面的电流强度的大小和方向都不随时间改变, 则称这种电流为**恒定电流**, 也叫**直流电**. 若 I 的量值随时间变化(如电容器充放电时的电流), 则用瞬时电流强度描述电流的强弱, 即

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt} \quad (12.1)$$

电流强度是标量, 但有方向. 通常所说的电流强度的方向是指正电荷在导线内移动的方向.

2. 电流密度

电流强度只能描述通过导体中某一截面电流的整体特征. 实际上有时会遇到电流在大块导体中流动, 而且在导体中分布不均匀的情形, 这时导体不同部分电流的大小和方向都不一样. 为了定量描述导体中各点的电流分布, 引入一个新的物理量——**电流密度矢量** $\boldsymbol{j}$. 它的大小和方向规定如下: 导体中任意一点电流密度 $\boldsymbol{j}$ 的方向为该点正电荷运动的方向; $\boldsymbol{j}$ 的大小等于单位时间内通过该点附近垂直于正电荷运动方向的单位面积的电量. 设想在导体中某点取一与该点正电荷运动方向垂直的面积元 $dS_{\perp}$, 该面积元法线方向的单位矢量 $\boldsymbol{n}$ 与正电荷运动方向相同, 亦即

n 与该点场强 E 的方向相同,如图 12.2 所示.由上述规定可知,电流密度矢量为

$$\mathbf{j} = \frac{dQ}{dt dS_{\perp}} \mathbf{n} = \frac{dI}{dS_{\perp}} \mathbf{n} \quad (12.2)$$

式中 dQ 为 dt 时间内通过 $dS_{\perp}$ 的电量, dI 为通过 $dS_{\perp}$ 的电流.

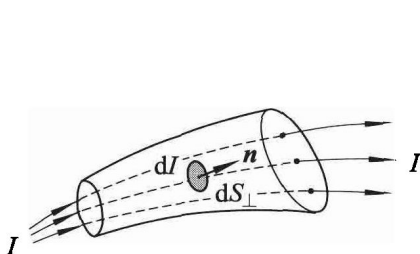


图 12.2

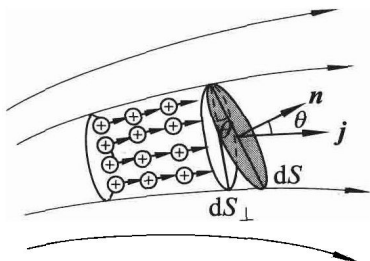


图 12.3

若面积元 dS 的法线方向与该点电场强度方向不一致,它们的夹角为 θ ,如图 12.3 所示,则 j 的大小为

$$j = \frac{dI}{dS \cos \theta} \quad (12.3)$$

电流密度的单位名称是安培每二次方米,符号为 $A \cdot m^{-2}$. $1 A \cdot m^{-2} = 1 C \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$.

引入电流密度以后,对于一个电流分布不均匀的有限面积 S ,通过它的电流强度可以写成

$$I = \int_S dI = \int_S j dS \cos \theta = \int_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} \quad (12.4)$$

由此可见,电流强度是通过某一面积的电流密度通量.

为了形象地描述某一区域内电流的分布情况,可在该区域内画一系列曲线,曲线上每一点的切线方向与该点电流密度矢量的方向相同,而任一点的曲线数密度则与该点电流密度的大小成正比.这样的曲线叫**电流线**,它类似于电场中的电场线.电流线分布的空间称为**电流场**.图 12.4 表示某一导体内部的电流场.

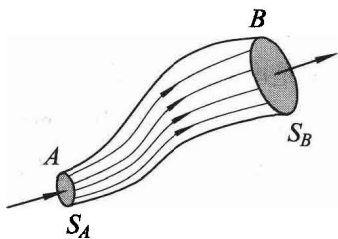


图 12.4

例 12.1 设导体单位体积内自由电子数为 n , 每个电子所带电量为 $-e$, 电子漂移速度的平均值为 $\bar{u}$. 试证电流密度矢量的大小为 $j = ne\bar{u}$.

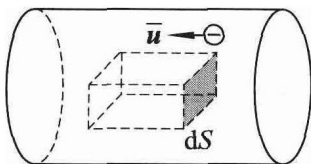


图 12.5

解 在图 12.5 所示的导体中取截面 dS , 其法线方向与 $\bar{u}$ 的方向平行, 通过 dS 的电流强度为 dI , 它等于 1 秒内通过截面 dS 的电量. 以 dS 为底面积, 以 $\bar{u}$ 的大小为高作一柱体, 显然, 柱体内自由电子数为

$\bar{u}dSn$, 则 1 秒内流过 dS 的电量为 $\bar{u}dSne$, 故该点的电流密度大小为

$$j = \frac{dI}{dS} = ne\bar{u}$$

若导体为金属铜, 其自由电子数密度 $n = 8.4 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$, 设电流密度 $j = 5 \times 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$, 代入上式得

$$\bar{u} = \frac{j}{ne} = \frac{5 \times 10^6 \text{ C} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}}{8.4 \times 10^{28} \text{ m}^{-3} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}} = 3.7 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

金属中自由电子热运动速率平均值的量级为 $10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 相比之下自由电子漂移速度是十分微小的。

12.1.3 电流的连续性方程 恒定条件

1. 电流的连续性方程

电流场的一个重要的基本性质是它的连续性方程, 其实质是电荷守恒. 设想在导体内任取一闭合曲面 S , 如图 12.6 所示. 根据电荷守恒定律, 在 dt 时间内, 由 S 面流出的电量应等于同一时间内 S 面内电量的减少. 与计算电通量类似, 在 S 面上取外法线方向为正方向, 则在单位时间内由

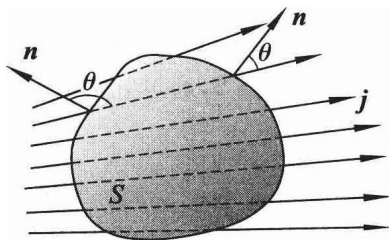


图 12.6

S 面流出的电量等于 $\oint_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S}$. 设 dt 时间内 S 面内电量由 q 变化到 $q + dq$. 如果电量减少, 则 $dq < 0$. 在单位时间内, S 面内电量减少的量值为 $-dq/dt$. 如上所述, 这一量值应与单位时间内由 S 面流出的电量相等, 即

$$\oint_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} = -\frac{dq}{dt} \quad (12.5)$$

这就是电流的连续性方程.

2. 电流的恒定条件和恒定电场

在恒定条件下, 电流不随时间变化, 即电流场中各点的电流密度 $\mathbf{j}$ 不随时间变化. 这就要求电荷的分布不随时间变化, 从而电荷产生的电场也不随时间变化. 因此, 对于任意闭合曲面 S , 面内的电量不随时间变化, 即 $dq/dt = 0$. 于是有

$$\oint_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (12.6)$$

上式称为电流的恒定条件. 即通过闭合曲面 S 一侧流入的电量等于从另一侧流出的电量, 因而电流线连续地穿过 S 面包围的体积. 由 S 面的任意性, 可以得出如下结论: **恒定电流的电流线不可能在任何地方中断, 它们永远是闭合曲线.**

对于在一根导线中通过的恒定电流, 利用式(12.6)可以得出: 通过导线各个横截面的电流强度都相等. 在图 12.7(a)中, 对于包围任一段导线的闭合曲面, 只有

流进的电流 I_1 和流出的电流 I_2 相等, 才能使通过此闭合曲面的电流为零. 在图 12.7 (b) 中, 对于恒定电流电路中几根导线汇合的节点 P 来说, 任取一包围该节点的闭合曲面, 由式(12.6)给出

$$\sum_i I_i = 0 \quad (12.7)$$

即汇于节点的电流的代数和为零. 以流出节点的电流为正, 流入节点的电流为负, 则对图 12.7(b) 中的节点 P , 应有

$$-I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

式(12.7)称为节点电流方程.

如前所述, 在恒定电流的情况下, 导体内的电荷分布不随时间变化. 不随时间变化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.

导体内稳定的不随时间变化的电荷分布就像固定的静止电荷分布一样, 由它们产生的恒定电场和静电场亦有许多相似之处. 例如, 它们都服从高斯定理和场强的环路定理. 以 E 表示恒定电场的电场强度, 则有

$$\oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0 \quad (12.8)$$

这说明恒定电场也是保守场. 根据恒定电场的这一性质, 可以引进电势的概念. 由于 $\mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$ 是通过线元 $d\mathbf{l}$ 发生的电势降落, 所以上式也常说成是: 在恒定电流电路中, 沿任何闭合回路一周, 电势降落的代数和等于零. 在分析解决直流电路问题时, 常根据这一规律列出方程, 这些方程称为回路电压方程.

尽管恒定电场和静电场有许多相似之处, 但它们还是有重要区别的. 产生恒定电场的电荷分布虽然不随时间改变, 但这种分布总伴随着电荷的运动, 因此是一种动态平衡分布, 而产生静电场的电荷始终固定不动; 在恒定电场中, 导体内部场强可以不等于零, 而在静电场中的导体达到静电平衡时, 其内部场强必为零; 电荷运动时恒定电场力要做功, 因此恒定电场的存在总要伴随着能量的转换, 但是静电场是由固定电荷产生的, 所以维持静电场不需要外界提供能量.

12.2 电源 电动势

如前所述, 产生恒定电流的条件是电荷分布不随时间变化, 因而电荷产生的电场是恒定电场, 导体两端将维持恒定的电势差. 现在我们研究如何实现这一条件.

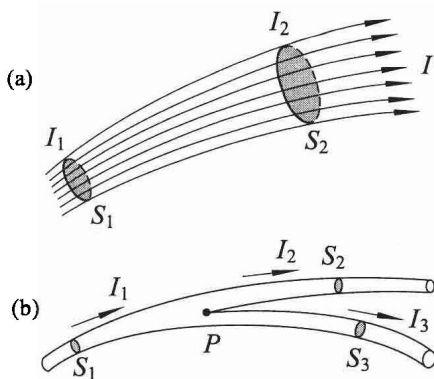


图 12.7

12.2.1 电源

一般说来,把两个电势不等的导体用导线连接起来,导线中立刻会有电流产生. 电容器的放电过程就是这样. 但在静电力作用下,正电荷从高电势一端经导线向低电势一端移动,随着时间的推移,正负电荷逐渐中和,导体两端的电势差逐渐减小,从而破坏恒定条件. 假如我们能够沿另一途径把正电荷送回高电势的一端,以维持导体两端电势差不变,这样就可以在导体中维持恒定电流. 显然靠静电力是不可能完成上述过程的,必须有非静电力的力使正电荷逆着静电场方向,从低电势处返回高电势处,使导体两端的电势差保持恒定,从而形成恒定电流.

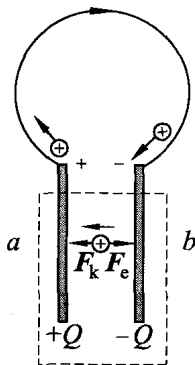


图 12.8

提供非静电力的装置称为**电源**. 图 12.8 是电源装置的原理图. 电源有两个电极,电势高的为正极,电势低的为负极. 在电路中,电源以外的部分叫外电路,电源以内的部分叫内电路. 当电源与外电路断开时,在电源内部作用于正电荷的非静电力 F_k 由负极板 b 指向正极板 a ,因此正电荷由 b 向 a 运动,于是 a 板上就有正电荷的累积,而 b 板则带有等量负电荷. a 、 b 两极板上积累的正负电荷在电源内部产生静电场,其方向由 a 指向 b . 因此,电源内部的每一个正电荷除受到非静电力 F_k 作用外,同时还受到静电力 F_e 的作用,方向与 F_k 相反. 开始时, a 、 b 两板上积累的正负电荷不多,电源内部的静电场比较弱,因此 $F_k > F_e$,正电荷继续由 b 向 a 迁移. 随着 a 、 b 上电荷的增加, F_e 逐渐增大. 当 $F_k = F_e$ 时,电源内部不再有电荷的迁移, a 、 b 上正负电荷不再变化,两极板间的电势差亦保持恒定.

如果将电源与外电路接通,形成闭合电路,则在两极板电荷产生的电场的作用下,导线中形成了从 a 到 b 的电流. 随着电荷在外电路中的定向移动, a 、 b 板上积累的正负电荷减少,使得电源内部的正电荷受到的静电力 F_e 又小于非静电力 F_k ,于是电源内部又出现由 b 向 a 运动的正电荷. 可见,外电路接通后,在电源内部也出现电流,方向是从低电势处流向高电势处. 综上所述,在内电路,正电荷受非静电力作用从负极 b 移向正极 a ;在外电路,正电荷受静电力作用从正极 a 移向负极 b ,从而使电源正负极板上的电荷分布维持稳定,形成恒定电流. 显然,电源中非静电力的存在是形成恒定电流的根本原因.

从能量观点看,非静电力移动电荷时必须反抗电场力做功. 在这一过程中,被移动电荷的电势能增大,是由电能以外的其他形式的能量转换而来的. 因此,电源是一种能够不断地把其他形式的能量转换为电能的装置.

电源的类型很多. 不同类型电源中形成非静电力的过程不同,所以能量转换形式也不同. 如在发电机中,非静电力是一种电磁作用,是将机械能转化为电能;在化学电源中,非静电力是一种化学作用,是将化学能转化为电能;在温差电源中,非静

电力是与温差和浓度差相联系的扩散作用,是将热能转化为电能;太阳能电池则是直接把光能转变成电能的一种装置,等等.

12.2.2 电源的电动势

从上面的讨论可知,电源在电路中的作用是把其他形式的能量转换为电能.衡量电源转换能量能力大小的物理量称为电源的**电动势**,它反映了电源中非静电力移动电荷做功本领的大小.

在电源内部,单位正电荷从负极移到正极的过程中,非静电力所做的功叫做电源的电动势,用 $\mathcal{E}$ 表示.若 A_k 表示在电源内部将电量为 q 的正电荷从负极移到正极时非静电力所做的功,则电源的电动势定义为

$$\mathcal{E} = \frac{A_k}{q} \quad (12.9)$$

从场的观点看,可以把非静电力的作用等效为一种非静电性场的作用,这种场统称为外来场.以 $\mathbf{E}_k$ 表示外来场的场强,则电荷 q 所受的非静电力 $\mathbf{F}_k = q\mathbf{E}_k$. 在电源内部,正电荷 q 由负极移到正极时非静电力做的功为

$$A_k = \int_{-}^{+} \mathbf{F}_k \cdot d\mathbf{l} = \int_{-}^{+} q\mathbf{E}_k \cdot d\mathbf{l}$$

(电源内) (电源内)

将上式代入式(12.9),可得

$$\mathcal{E} = \int_{-}^{+} \mathbf{E}_k \cdot d\mathbf{l} \quad (12.10)$$

(电源内)

上式就是非静电力集中在一段电路内(如电池内)作用时电动势的表达式.

在有些情况下,非静电力存在于整个回路之中,这时整个回路的总电动势应为

$$\mathcal{E} = \oint_L \mathbf{E}_k \cdot d\mathbf{l} \quad (12.11)$$

式中线积分遍及整个回路 L .

事实上,式(12.10)也可以表示成式(12.11)的形式.因为在图 12.8 所示的回路中,外电路没有非静电力,所以单位正电荷绕回路一周,只有在电源内部才有非静电力做功.由此可见,式(12.11)比式(12.10)具有更为普遍的意义.

电动势是标量,但它和电流强度一样规定有方向.通常规定从负极经电源内部指向正极的方向为电动势的方向.沿电动势方向,非静电力做正功,使正电荷的电势能增加.

电动势的单位名称是伏特,符号为 V.

12.2.3 电源的路端电压

电源两极之间的电势差称为电源的**路端电压**,简称端电压.若端电压不随通过电源的电流而变化,这样的电源被定义为理想电压源,也称为恒压源.因为所有实

实际电源都具有内电阻,所以理想电压源就是忽略电源内电阻的电源,实际上是不存在的. 实际电源的端电压与通过它的电流有关,因为内电阻上的电势降总是随电流的变化而变化的,因此电源的端电压不是常量. 尽管如此,在电源的内电阻远小于外电路总电阻的情况下,可以近似地把实际电源看成恒压源. 恒压源在讨论电路问题中是非常有用的理想模型. 所有实际电源都可等效为一个恒压源 $\mathcal{E}$ 和一个电阻 r (电源的内电阻) 串联的组合. 电源放电时,电流从负极经电源内部到正极;电源充电时,则电流的流向相反.

应当注意的是,电源的电动势和端电压的实质是不同的. 电动势是把单位正电荷从负极经电源内部移到正极时非静电力所做的功,它只取决于电源本身的性质,一定的电源具有一定的电动势,与外电路的性质以及是否接通外电路无关. 而端电压则是把单位正电荷从正极沿任意路径移到负极时静电力所做的功,其量值与外电路的情况有关. 显然在外电路断开(即开路)时,由于非静电力与静电力平衡,因而电动势与端电压量值相等.

12.3 欧姆定律的微分形式

12.3.1 电阻

我们知道,对于给定材料并且粗细均匀的导体,其电阻 R 与导体的横截面积 S 成反比,与导体的长度 l 成正比. 即

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (12.12a)$$

比例系数 ρ 只与导体的材料有关,称为该材料的电阻率. 有时也用 ρ 的倒数 $\gamma = 1/\rho$ 代替 ρ , 写入上式,得

$$R = \frac{l}{\gamma S} \quad (12.12b)$$

γ 称为导体材料的电导率.

电阻率(或电导率)不但与材料的种类有关,而且还与温度有关. 在温度不太低时,几乎所有金属导体的电阻率 ρ 与温度 $t(^{\circ}\text{C})$ 近似地有如下关系:

$$\rho_t = \rho_0 (1 + \alpha t)$$

式中 ρ_t 和 ρ_0 分别是 $t^{\circ}\text{C}$ 和 0°C 时的电阻率, α 叫做电阻温度系数,它随材料的不同而不同. 表 12.1 给出了几种常用材料的电阻率和电阻温度系数. 其中锰铜合金的 α 值只有 $1 \times 10^{-5}^{\circ}\text{C}^{-1}$, 这说明锰铜合金的电阻率随温度的变化特别小,用它制作的电阻受温度的影响很小,因此常用这种材料作标准电阻.

表 12.1 几种常用材料的电阻率和电阻温度系数

材 料	$\rho_0/\Omega\cdot\text{m}$	$\alpha/^\circ\text{C}^{-1}$
银	1.5×10^{-8}	4.0×10^{-3}
铜	1.6×10^{-8}	4.3×10^{-3}
铝	2.5×10^{-8}	4.7×10^{-3}
钨	5.5×10^{-8}	4.6×10^{-3}
铁	8.7×10^{-8}	5×10^{-3}
铂	9.8×10^{-8}	3.9×10^{-3}
汞	94×10^{-8}	8.8×10^{-4}
碳	$3\,500\times 10^{-8}$	-5×10^{-4}
镍铬合金(60%Ni,15%Cr,25%Fe)	110×10^{-8}	1.6×10^{-4}
铁铬铝合金(60%Fe,30%Cr,5%Al)	140×10^{-8}	4×10^{-5}
镍铜合金(54%Cu,46%Ni)	50×10^{-8}	4×10^{-5}
锰铜合金(84%Cu,12%Mn,4%Ni)	48×10^{-8}	1×10^{-5}

用匀质材料制成的粗细均匀导体的电阻可以直接用式(12.12)进行计算,但对于截面积 S 或电阻率 ρ 不均匀的导体来说,其电阻的计算应采用以下积分形式,即

$$R = \int_L \rho \frac{dl}{S} \quad (12.13)$$

电阻的倒数称为电导,用 G 表示,即 $G=1/R$.

电阻的单位名称是欧姆,符号为 Ω ;电导的单位名称是西门子,符号为 S , $1S=1\Omega^{-1}$;电阻率的单位名称是欧姆米,符号为 $\Omega\cdot\text{m}$;电导率的单位名称是西门子每米,符号为 $S\cdot\text{m}^{-1}$.

金属导电的经典电子论可以解释为什么导体有电阻. 由于电子在导体中运动时要与晶格碰撞,碰撞时电子的定向运动被破坏,碰撞后电子的定向运动又从头开始,因此,碰撞是阻止电子定向运动速度增加的原因,其宏观反映就是导体有电阻.

12.3.2 欧姆定律的微分形式

实验表明,当导体的温度一定时,通过导体的电流强度与导体两端的电势差成正比,即

$$I = \frac{U_1 - U_2}{R} \quad (12.14)$$

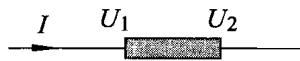


图 12.9

这是大家熟知的欧姆定律. R 是导体的电阻; $U_1 - U_2$

是电阻两端的电势差,如图 12.9 所示. 可见,经过一个电阻,沿电流方向的电势降落等于电流与电阻的乘积.

需要指出的是,欧姆定律对于金属导体或电解液,在相当大的电压范围内都是适用的. 但对半导体二极管、真空二极管以及许多气体导电管等元(器)件都不成立,对于一段含电源的电路也不成立. 因此,式(12.14)又称为一段均匀电路的欧姆定律.

我们知道,导体中存在电场是形成电流的必要条件.因此,导体中的电流和电场必然密切相关.为了定量讨论导体中某点的电流密度与该点场强的关系,不妨在导体中某点附近取一个小圆柱体,如图 12.10 所示,其电阻率为 ρ ,长为 dl ,底面积为 dS ,轴线与电流方向平行,两端的电势分别为 U 和 $U+dU$.根据式(12.14),通过 dS 的电流应为

$$dI = -\frac{dU}{R}$$

式中 $R = \rho \frac{dl}{dS}$ 为小圆柱体的电阻.于是

$$dI = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dU}{dl} \cdot dS, \quad \frac{dI}{dS} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dU}{dl}$$

将 $j = \frac{dI}{dS}$, $E = -\frac{dU}{dl}$ 代入上式,考虑到金属和电

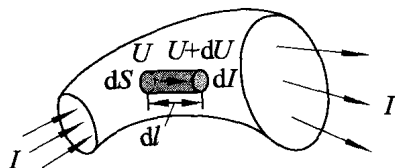


图 12.10

解液中 j 与 E 方向相同,故有

$$j = \frac{E}{\rho} = \gamma E \quad (12.15)$$

式(12.15)称为欧姆定律的微分形式.它表明了导体中某点的电流密度与该点场强和材料特性的点点对应关系.应当指出,欧姆定律的微分形式对于非恒定电场或非恒定电流的情况也是适用的,因此它比一段均匀电路的欧姆定律具有更深刻、更普遍的意义.

例 12.2 如图 12.11 所示,两个长度 $l=1.00$ m 的同轴金属圆筒,内外筒的半径分别为 $r_A=5.00 \times 10^{-2}$ m, $r_B=1.00 \times 10^{-1}$ m,其间充满电阻率 $\rho=1.00 \times 10^9 \Omega \cdot \text{m}$ 的非理想电介质.设两筒间的电势差 $U_A - U_B = 1000$ V,求电介质内各点的场强 E 、漏电流的电流密度 j 以及该电介质的漏电阻 R .

解 设两个圆筒之间的总漏电流为 I ,由于漏电流(从内筒流向外筒)沿径向对称分布,而且在距离圆筒轴线 r 处,总漏电流 I 通过的截面积 $S=2\pi rl$,所以该面漏电流密度的大小为

$$j = \frac{I}{2\pi rl} \quad (1)$$

对于 $r \rightarrow r+dr$ 的圆柱形薄层介质来说,相应的漏电阻为

$$dR = \rho \frac{dr}{S} = \frac{\rho dr}{2\pi rl}$$

于是,电介质的总漏电阻为

$$\begin{aligned} R &= \int dR = \int_{r_A}^{r_B} \frac{\rho dr}{2\pi rl} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{r_B}{r_A} \\ &= \frac{1.00 \times 10^9 \Omega \cdot \text{m}}{2\pi \times 1.00 \text{ m}} \ln 2 = 1.10 \times 10^8 \Omega \end{aligned}$$

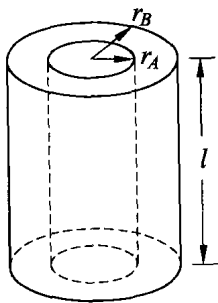


图 12.11