

孙庆元 主编

高等专科学校教学用书

# 普通物理学简明教程

(下册)

天津教育出版社

# 普通物理学简明教程

主 编 孙庆元

副主编 卓振堂 张学龙 杨殿中

王宏义 樊西汉 朱文熙

天津教育出版社

## 内 容 提 要

本书是根据非物理专业的普通物理学教学大纲(综合各专业的教学计划)编写的,内容包括力学、热学、电磁学、光学和近代物理学基础共五篇。

该书精选普通物理学内容,适应非物理各专业的要求,并把狭义相对论单列一章,具有内容简明,概念、定律叙述严谨,例题和习题适量,易教易学等优点。

此书可作为师专、教育学院、电大、职大、夜大、函授的数学、化学等理科专业和机械、电力、电子、化工等工业专科的普通物理学教材或参考书。

## 普 通 物 理 学 简 明 教 程 (下册)

天津教育出版社  
(天津市湖北路27号)  
太安师专印刷厂印刷

850×1168毫米 32开8.25印张 206千字

1989年7月第1版

1989年7月第1次印刷

印数1—9500

ISBN7-5309-0796-4/O·3

定价:3.30元

# 目 录

(下册)

## 第七章 稳恒电流与电路

§ 7·1 稳恒电流与稳恒电场	251
§ 7·2 欧姆定律及其微分形式	255
§ 7·3 电动势 含源电路的欧姆定律	260
※ § 7·4 基尔霍夫定律及其应用	267
习题	271

## 第八章 稳恒磁场

§ 8·1 磁场 磁感应强度	273
§ 8·2 毕奥-萨伐尔定律及其应用	277
§ 8·3 磁场的“高斯定理”和安培环路定理	283
§ 8·4 安培定律	290
§ 8·5 洛仑兹公式	295
§ 8·6 稳恒磁场中的磁介质	300
习题	312

## 第九章 电磁感应

§ 9·1 电磁感应定律	314
§ 9·2 动生电动势	319
§ 9·3 感生电动势与感生电场	322
§ 9·4 自感和互感	326
§ 9·5 磁场的能量	331

习题	334
<b>*第十章 电磁场与电磁波</b>	
§ 10·1 位移电流	336
§ 10·2 麦克斯韦方程组的积分形式	341
§ 10·3 电磁波	344
习题	354
<b>第四篇 光学</b>	
<b>*第十一章 几何光学基础</b>	
§ 11·1 几何光学的基本定律	356
§ 11·2 棱镜的折射和色散	362
§ 11·3 薄透镜成象公式	365
习题	372
<b>第十二章 波动光学</b>	
§ 12·1 相干光	373
§ 12·2 介质薄膜的反射干涉	376
§ 12·3 光的衍射 惠更斯-菲涅耳原理	382
§ 12·4 单缝衍射 平面光栅衍射	384
§ 12·5 X射线的反射衍射	389
§ 12·6 自然光与偏振光	391
※ § 12·7 偏振面的旋转 旋光原理	395
习题	397
<b>第十三章 量子光学</b>	
§ 13·1 黑体辐射 普朗克公式	400

§ 13·2	光电效应	406
§ 13·3	光的波粒二象性	412
	习题	415

## 第五篇 近代物理学基础

### 第十四章 狭义相对论基础

§ 14·1	伽利略变换与绝对时空观	416
§ 14·2	狭义相对论的两个基本原理	421
§ 14·3	洛仑兹变换	424
§ 14·4	相对论时空观	428
§ 14·5	相对论动力学	432
	习题	437

### 第十五章 原子结构

§ 15·1	原子有核模型	439
§ 15·2	原子光谱的规律性	445
§ 15·3	玻尔的氢原子模型	450
§ 15·4	实物微粒的波粒二象性	458
§ 15·5	波函数与薛定谔方程	463
§ 15·6	氢原子问题的量子力学处理	473
	习题	481

### \*第十六章 原子核

§ 16·1	原子核的组成和核力	483
§ 16·2	原子核的结合能	486
§ 16·3	不稳定原子核的放射性衰变	491
§ 16·4	原子核反应	497

§ 16·5 基本粒子简介.....	501
习题.....	505
下册习题答案.....	406

## 第七章 稳恒电流与电路

在前一章中，讨论了导体在静电场中处于静电平衡时，导体内场强为零，导体中的电荷不作宏观迁移。本章进一步研究导体处于非静电平衡，即导体两端有一定的电势差时，导体中发生的现象以及维持电势差的原因。从场的观点来阐述稳恒电流的原理，由此导出一些读者所熟知的公式。最后讲述基尔霍夫定律和应用。若电路中的电流是稳恒的，此电路称为稳恒电路，本章只讨论稳恒电路。

### §7.1 稳恒电流与稳恒电场

#### 一、电流强度

电荷作定向运动形成电流。在金属中形成电流的带电粒子是自由电子，而在酸、碱、盐溶液中是正、负离子，导电气体中则是正、负离子及电子。电子或离子等带电粒子在导体中作定向运动形成的电流，称为传导电流。本章讨论的电流就是传导电流。

实验表明，正电荷定向运动形成的电流与负电荷沿反向定向运动形成的电流是等效的。由于历史上的原因，规定正电荷定向运动的方向为电流的方向，这样，负电荷作定向运动形成电流的方向与实际定向运动方向相反。

导体中电流的强弱，用电流强度来描写。单位时间内通过导体某一截面的电量，叫做通过该截面的电流强度，简称电流。设在时间 $\Delta t$ 内，通过导体某一截面的电量是 $\Delta q$ ，那么电流强度



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

取  $\Delta t \rightarrow 0$  的极限

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

在国际单位制中，电流强度的单位是安培 (A)。常用单位还有毫安 (mA) 和微安 ( $\mu\text{A}$ )，它们与安培之间的换算关系为

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

获得电流的条件是：(1) 导体内有可作定向运动的电荷；(2) 导体中存在电场。这两个条件缺一不可。根据电场的性质，在导体中电荷的定向运动是在电场力作用下的运动。按照电流方向的规定，在导体中电流的方向总是指向场强的方向。

应当指出，电流强度是标量，通常所说的电流方向只表示正电荷在导体内定向移动的方向。

## 二、电流密度矢量

电流强度虽然能表征电流的强弱，但它只能反映通过导体截面的整体电流的特征，而不能描述导体中每一点的电流分布情况。如图 7-1 所示，有一电流  $I$  通过一段粗细不均匀的导体时，假设通过各截面的电流强度相等，但由于导体粗细不均匀，导体内部不同点的电流分布却存在着差异。例如，在粗部与细部的过渡区中同一横截面上  $A$ 、 $B$  两点处的电流方向不同；在导体粗、细两部分的截面  $S_1$  及  $S_2$  上，单位面积上的电流强度的大小也不相同。因此，为了更细致地描述

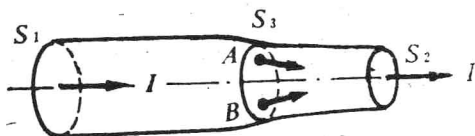


图 7-1

导体内各点的电流分布情况，需要引入一个新的物理量——

**电流密度**。设在通电导体内的某一点  $P$  处取一微小面积元  $\Delta S$ ，并使面积元法向单位矢量  $\mathbf{n}$  与通过它上面电流  $\Delta I$  的方向相同（见图 7-2a），我们定义该点电流密度的大小为

$$j = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta I}{\Delta S} = \frac{dI}{dS}, \quad (2)$$

**电流密度是个矢量**，其方向定为该点的电流方向。由于正电荷在  $P$  点的运动方向与该点的场强方向一致，因此电流密度的方向就是该点场强  $\mathbf{E}$  的方向。

在国际单位制中，电流密度的单位是安培/米<sup>2</sup> ( $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ )。由 (2) 式可得

$$dI = j dS.$$

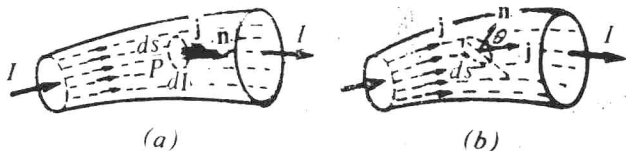


图 7-2

如果面积元的法向单位矢量  $\mathbf{n}$  与电流密度矢量  $\mathbf{j}$  的方向成  $\theta$  角（见图 7-2b），则

$$dI = j \cos \theta dS,$$

或写成矢量形式

$$dI = \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S}. \quad (3)$$

### 三、电流场的连续性方程

在导体中各点的  $\mathbf{j}$  有不同的数值和方向， $\mathbf{j}$  在导体中的空间分布称为**电流场**。象电场分布用电力线形象地描绘一样，电流场也可用**电流线**来描绘。电流线上各点的切线方向都和该点的电流密度矢量方向相同，如图 7-2 中所示。

在通电导体中任取一曲面，那么通过该曲面的电流强度  $I$  与电流密度矢量的关系为

$$I = \iint_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S}, \quad (4)$$

积分遍及整个曲面。由此可见，电流密度  $j$  与电流强度  $I$  的关系如同场强  $E$  与电通量  $\Phi_E$  的关系一样。通过曲面  $S$  的电流强度是电流密度  $j$  通过该曲面的通量。

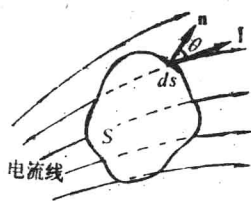


图 7-3

在通电导体中任取一闭合曲面  $S$ ，如图 7-3 所示，闭合曲面的法线方向总规定向外，所以通过此闭合曲面的  $j$  通量就是由此闭合曲面内流出的电流强度，亦即是在单位时间闭合曲面内减少的电量。设闭合曲面内电荷的减少率为  $-dq/dt$ ，由以上所述可得

$$\oiint_S j \cdot dS = -\frac{dq}{dt} \quad (5)$$

这就是电流场的连续性方程。

#### 四. 稳恒电流与稳恒电场

一般情况下，导体电流场中的电流密度  $j$  既是空间位置又是时间  $t$  的矢函数。若电流场中各点的  $j$  不随时间变化，则电流强度也不随时间变化，这种电流叫做稳恒电流，通常又叫直流。要维持导体中的电流稳恒，导体上各处的电荷分布必须是稳恒的。因为导体中的电流场总是伴随着一个电场，这个电场是导体各处分布的电荷激发的，如果各处的电荷分布改变，则必引起电场分布改变，因而电流场的分布也要改变，这时电流是非稳恒的。因此，导体各处的电荷分布不随时间而变是维持稳恒电流的必要条件，简称电流的稳恒条件。

在稳恒电流的场中任取一个闭合曲面  $S$ （注意曲面可在导体内部，也可跨越导体表面，见图 7-4），设曲面包围的电荷为  $q$ ，根据电流的稳恒条件， $dq/dt=0$ ，由（5）式得稳恒条件的数学表达式为

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



图 7-4

上式表示，在稳恒电流的情况下，从闭合曲面流出的电流强度等于流进曲面的电流强度，与通过一段导体上任一截面的电流强度相等等价。

应当指出，在电流稳恒的情况下，“电荷的分布不随时间而变”并不意味着电荷不作定向运动。实际的物理图象是，导体中各处的电荷都在作定向运动，但它们的位置瞬时被后续的其他电荷所占据，因此宏观上对外表现为电荷的空间分布稳定。

在稳恒电流场中，必然满足(6)式，由此可推得电流线的一个重要性质：在稳恒电流场中，每一条电流线都是连续闭合曲线。这个性质叫稳恒电流的闭合性。根据这一性质可以判断稳恒电流的电路必然是闭合电路。

电流是电荷在电场力作用下作定向运动而形成的，有电流必然伴随有电场，与稳恒电流相伴存在的电场必然是稳恒电场。稳恒电场与静电场相比较，它们有共同特点，即两者的场强 $\mathbf{E}$ 和电荷的空间分布都不随时间而变。但激发两者的原因不同，静电场是静止电荷激发的，而稳恒电场是由运动电荷激发的。由于它们的场源电荷分布都不随时间而变，稳恒电场与静电场的性质完全相同，因此在静电场中得到的结论可直接运用于稳恒电场。

## §7.2 欧姆定律及其微分形式

### 一、欧姆定律

在一段稳恒电路的导体中，必有稳恒电场存在，稳恒电场和静电场一样，满足环路定理

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0,$$

由此引入电势差(电压)的概念。导体内有电流,必然有电场,因此导体两端一定有电压。精确的实验证明,通过一段导体的电流强度 $I$ 与导体两端的电压 $U$ 成正比,即

$$I \propto U,$$

这个关系称为欧姆定律。写成等式为

$$I = GU, \quad (7)$$

式中 $G$ 为比例系数,叫做电导,它反映了导体对电流的导通能力。习惯上用 $R$ 的倒数表示 $G$ ,故上式变为

$$I = \frac{U}{R} \quad (8)$$

$R$ 叫做这段导体的电阻,它反映了导体对电流的阻碍作用。 $R$ (或 $G$ )的数值取决于导体的材料、形状及温度等。

在国际单位制中,电阻的单位是欧姆( $\Omega$ )。常用的电阻单位还有千欧( $k\Omega$ )和兆欧( $M\Omega$ )等,其换算关系为

$$1 k\Omega = 10^3 \Omega; \quad 1 M\Omega = 10^6 \Omega.$$

电导的单位是西( $S$ )或 $1/\text{欧姆}(\Omega^{-1})$ 。

欧姆定律阐明了导体中的电流与两端电压成线性关系。遵守欧姆定律的电学元件叫做线性元件。由线性元件组成的电路称为线性电路。除了线性元件外,还有不遵守欧姆定律的电学元件,如电子管、晶体管等,称它们为非线性元件。含有非线性元件的电路叫做非线性电路。

实验表明,欧姆定律对金属导体是十分准确的,当电流密度大到每平方厘米几百安培时,与按欧姆定律计算的结果比较,才有很小的偏差(1%)。另外,欧姆定律对于电解质溶液也是适用的。

实验又表明,对于粗细均匀同一种材料的导体,当温度一定时,导体的电阻与它的长度 $l$ 成正比,与横截面 $S$ 成反比,即

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

式中 $\rho$ 叫做导体的电阻率，它与导体的材料性质有关。电阻率的倒数 $1/\rho=\sigma$ 称为电导率。电阻率或电导率都是描述导电特性的物理量。

电阻率的单位是欧姆·米 ( $\Omega \cdot \text{m}$ )，而电导率的单位是西/米 ( $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ )。

对于均匀材料做成的导体，电阻率 $\rho$ 为一常数；对于非均匀材料，电阻率 $\rho$ 为一点函数。一粗细不均匀的长条形导体，其电阻可用下列沿电流线的积分进行计算

$$R = \int \rho \frac{dl}{S}.$$

当温度改变时，导体的电阻率也要改变。实验表明，在通常温度下，几乎所有金属导体的电阻率 $\rho$ 与温度 $t$ 之间都有以下近似关系

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t).$$

式中 $\rho_0$ 是 $0^\circ\text{C}$ 时的电阻率， $\alpha$ 称为电阻温度系数，其单位是 $1/^\circ\text{C}$ 。不同材料的电阻温度系数不同，表7-1中列出了几种材料在 $0^\circ\text{C}$ 时的电阻率 $\rho_0$ 及它们的温度系数 $\alpha$ 。

表7-1

材 料	$\rho_0$ (欧·米)	$\alpha$ ( $1/^\circ\text{C}$ )
银	$1.5 \times 10^{-8}$	$4.0 \times 10^{-3}$
铜	$1.6 \times 10^{-8}$	$4.3 \times 10^{-3}$
铝	$2.5 \times 10^{-8}$	$4.7 \times 10^{-3}$
钨	$5.5 \times 10^{-8}$	$4.6 \times 10^{-3}$
镍铬合金 (60%Ni, 15%Cr, 25%Fe)	$110 \times 10^{-8}$	$1.6 \times 10^{-4}$
锰铜合金 (84%Cu, 12%Mn, 4%Ni)	$48 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-5}$

从表7-1可以看出，银、铜、铝等金属的电阻率很小，而镍铬合金等电阻率较大。因此，一般用电阻率小的铜和铝制作导线，用镍铬合金制作电炉、电阻器等电阻丝。锰铜合金的温度系

数很小，适于制作标准电阻。

## 二、欧姆定律的微分形式

如图 7-5 所示，在导体内部任一点  $P$  附近，取一长为  $dl$ ，截面积为  $dS$  的小圆柱体  $AB$ ，且使小圆柱体的轴线与  $P$  点的电流密度  $j$  的方向平行。  $A, B$  两端的电压为  $-dU$ （这里  $U$  表示电势），根据欧姆定律，通过截面  $dS$  的电流为

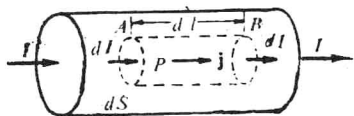


图 7-5

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

式中  $R$  为小圆柱导体的电阻，由 (5) 式， $R = \rho dl / dS$ ，代入上式后，得

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

或

$$\frac{dI}{dS} = -\frac{1}{\rho} \frac{dU}{dl}.$$

因为  $dI/dS = j$ ， $\rho = 1/\sigma$ ，而圆柱体内的稳恒电场与静电场一样，场强与电势的关系  $E = -dU/dl$ ，所以，上式可写成

$$j = \sigma E.$$

由于电流密度和场强的方向相同，故上式又可写成矢量形式

$$j = \sigma E. \quad (10)$$

这就是欧姆定律的微分形式，它表明导体中任一点的电流密度  $j$  与该点场强  $E$  的方向相同，数值上成比例。由此可知，在有稳恒电流时，导体中的电流线与电力线的分布情况相同。

$$(8) \text{ 式即 } I = U/R \text{ 中，由于 } U = \int_l E \cdot dl, \quad I = \iint_S j \cdot dS,$$

$R = \int_l \rho dl / S$ ，都是积分量，因此，(8) 式称为欧姆定律的积分形式。

### 三、电流的功和功率 焦耳定律

若一段电路有电流时，电场力移动电荷定向运动要作功。根据稳恒电场性质，电场力作功，电势能减少，转化为其他形式的能量，如热能、机械能和化学能等。下面来讨论稳恒电流通过一段电路时电场力所作的功。

设电路两端的电压为 $U$ ，则电场力移动电量 $q$ 所作的功为

$$A = qU,$$

在 $t$ 时间内通过电路的电量 $q = It$ ，代入上式，得

$$A = IUt. \quad (11)$$

通常把电场力定向移动电荷作的功叫做电流作功，简称电功。电功的单位是焦耳(J)。

单位时间内电流所作的功叫做电功率，用符号 $P$ 表示，即

$$P = \frac{A}{t} = IU. \quad (12)$$

上式是计算电功率的普遍公式，即表示稳恒电流通过电路作功的全部功率。

在国际单位制中，电功率的单位是瓦特(W)。在电力工程中通常用千瓦(kW)作为电功率的单位。

若电路是由纯电阻导体组成，电流通过这段电路时电势能全部转化为热能，将欧姆定律代入(12)式，得发热功率

$$P_Q = I^2 R, \quad (13)$$

或 
$$P_Q = \frac{U^2}{R}. \quad (14)$$

在 $t$ 时间内，电流通过这段电路发出的热量称为焦耳热，即

$$Q = P_Q t = I^2 R t, \quad (15)$$

此式为焦耳定律。由(14)式，它又可表示为

$$Q = \frac{U^2}{R} t. \quad (16)$$



应当指出，在非纯电阻电路（如包含电动机、电解槽等其他转换能量装置的电路）中，总功率并不等于发热功率。电流的总功率仍按（12）式计算，而电热功率只能按（13）式计算。

**例1** 有一台起重用的直流发电机，需要电压为110V，电流为5A，电动机的内阻为 $0.6\Omega$ 。求：（1）电流的总功率是多大？（2）在电动机中的发热功率是多大？（3）电动机工作1小时产生的热量是多少？

**解** （1）由题意知，电压 $U=110\text{V}$ ，电流 $I=5\text{A}$ ，据（12）式，电流的总功率为

$$P=IU=5\times 110=550\text{W}.$$

（2）由于电动机的内阻 $r=0.6\Omega$ ，所以电动机的发热功率，由（13）式得

$$P_Q=I^2r=5^2\times 0.6=15\text{W}.$$

（3）电动机工作1小时放出的焦耳热为

$$Q=P_Qt=15\times 3600=5.4\times 10^4\text{J}.$$

## §7.3 电动势 含源电路的欧姆定律

### 一、非静电力

在§7.1中分析得出，稳恒电流线是闭合曲线，维持稳恒电流存在的电路必须是闭合电路。由环路定理 $\oint \mathbf{E}\cdot d\mathbf{l}=0$ ，得 $\oint q\mathbf{E}\cdot d\mathbf{l}=0$ ，即电场力沿闭合电路移动电荷所作的功为零，也就是说，电场力将电荷从高电势点移到低电势点作正功，电场力再将电荷从低电势点移到高电势点作负功，总功为零，电荷回到原来高电势的位置。在有电阻导体的电路中，电流通过电阻导体做功转变为热能，这是有热现象发生的过程，据热力学第二定律可知，这是一个不可逆过程。因此在闭合电路中，仅电场力不可