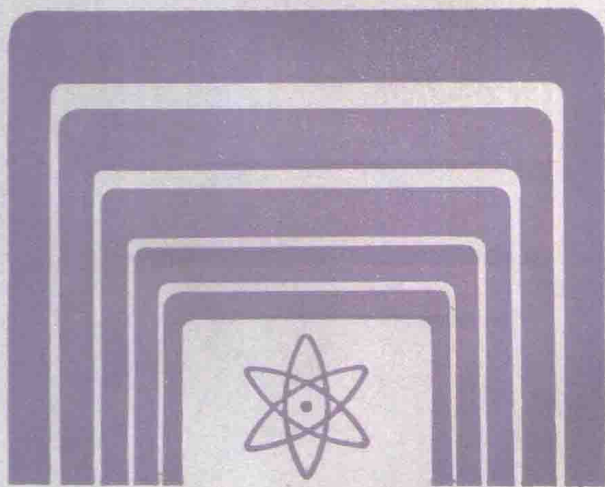


电视大学

普通物理学学习指导

(下)

王忠敏 编



黑龙江科学技术出版社

责任编辑：张宪臣
封面设计：吴庆升

电 视 大 学
普通物理学学习指导
上、下册

王 忠 敏 编

黑 龙 江 科 学 技 术 出 版 社 出 版

(哈尔滨市南岗区建设街35号)

哈尔滨印刷二厂印刷·黑龙江省新华书店发行
开本787×1092毫米1/32·印张24.625/·字数500千

1985年2月第一版·1985年2月第一次印刷

印 数：1—34,815

书号：7217·025 定价：3.90元(上下册)

目 录

第十一章 稳恒电流	1
一、内容概述	1
二、重点和难点	12
三、基本概念和定律小结	12
四、典型例题	14
五、解题方法小结	24
习题	25
小测验	27
第十二章 稳恒磁场	30
一、内容概述	30
二、重点和难点	37
三、基本概念和定律小结	38
四、典型例题	40
五、解题方法小结	57
习题	58
小测验	60
第十三章 磁场对运动电荷和电流的作用	62
一、内容概述	62
二、重点和难点	70
三、基本概念和定律小结	70
四、典型例题	71

五、解题方法小结	87
习题	88
小测验	91
第十四章 磁介质中的磁场	95
一、内容概述	95
二、重点和难点	104
三、基本概念和定律小结	105
四、典型例题	106
五、解题方法小结	115
习题	116
小测验	118
第十五章 电磁感应	119
一、内容概述	119
二、重点和难点	133
三、基本概念和定律小结	134
四、典型例题	135
五、解题方法小结	161
习题	163
小测验	166
第十六章 麦克斯韦方程组 电磁振荡和电磁波	169
一、内容概述	169
二、重点和难点	180
三、基本概念和定律小结	180
四、典型例题	181
五、解题方法小结	186

小测验	187
第十七章 机械波	188
一、内容概述	188
二、重点和难点	202
三、基本概念和定律小结	202
四、典型例题	205
五、解题方法小结	214
习题	215
小测验	216
第十八章 光的干涉	217
一、内容概述	217
二、重点和难点	227
三、基本概念和定律小结	227
四、典型例题	229
五、解题方法小结	237
习题	238
小测验	239
第十九章 光的衍射	241
一、内容概述	241
二、重点和难点	251
三、基本概念和定律小结	252
四、典型例题	253
五、解题方法小结	258
习题	259
小测验	260

第二十章 光的偏振	261
一、内容概述	261
二、重点和难点	273
三、基本概念和定律小结	273
四、典型例题	275
五、解题方法小结	282
习题	283
小测验	284
第二十一章 光的量子性	285
一、内容概述	285
二、重点和难点	297
三、基本概念和定律小结	298
四、典型例题	300
五、解题方法小结	309
习题	310
小测验	311
第二十二章 原子的量子理论	312
一、内容概述	312
二、重点和难点	354
三、基本概念和定律小结	354
四、典型例题	358
五、解题方法小结	374
习题	375
小测验	376
第二十三章 半导体	378

第十一章 稳恒电流

一、内 容 概 述

§1 电流强度 电流密度矢量

如果金属导体中的电场强度不等于零，在电场力的作用下，大量的自由电子将作宏观的定向运动，于是在导体内产生电流。显然，产生电流的条件有两个：(1) 存在自由电荷；(2) 存在电场（超导体例外）。

习惯上，我们规定正电荷的流动方向为电流的方向，把负电荷的运动等效于正电荷沿相反方向的运动。这样导体中电流的方向总是沿着电场的方向。

我们用电流强度 I 来描述电流的强弱。 I 为单位时间内通过已知导体任一横截面的电量。

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt} \quad (11.1)$$

电流强度只能描述通过导体某一截面电流的整体特征，为了准确地反映导体中各点的电流分布情况，需要引入电流密度矢量的概念。

电流密度矢量定义 它的数值为单位时间内流过垂直于电流的单位截面的电量，其方向为正电荷流动的方向。

$$\mathbf{j} = \frac{dI}{dS} \mathbf{n}_0 \quad (11.2)$$

式中 $\mathbf{n}_0$ 为面元 dS 的单位法线矢量。如果 $\mathbf{n}_0$ 不与 $\mathbf{j}$ 平行，设 $\mathbf{j}$ 和 $\mathbf{n}_0$ 的夹角为 α ，则 dS 在垂直 $\mathbf{j}$ 的方向上的投影为 $dS \cos \alpha$ ，所以

$$j = \frac{dI}{dS \cos \alpha}$$

$$\text{即 } dI = j dS \cos \alpha = \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} \quad (11.3)$$

通过导体中任一截面 s 的电流强度为

$$I = \int_s \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} = \int_s j \cos \theta dS \quad (11.4)$$

可见，电流强度为电流密度矢量的通量。

在国际单位制中电流强度的单位是安培(A)。

§2 欧姆定律及其微分形式

要在导体中产生电流，必须在导体的两端有电势差。实验表明，在温度不变的条件下，导体中的电流强度 I 与其两端的电势差 $U_1 - U_2$ 成正比，即

$$I = \frac{1}{R} (U_1 - U_2) \quad (11.5)$$

式(11.5)称为欧姆定律。其中 R 称为导体的电阻， R 与导体的材料、大小、形状及温度都有关。

对于由一定材料制成的横截面均匀的导体，其电阻 R 与导体长度 l 成正比，与导体横截面积 S 成反比，即

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (11.6)$$

ρ 由导体材料决定,称为电阻率。当 $l = 1$ 米, $S = 1$ 米²时, ρ 在数值上等于 R , 说明某种材料的电阻率就表示用这种材料制成的长 1 米, 横截面为 1 米²的导体所具有的电阻。当导体的横截面 S 或电阻率不均匀时, 有

$$R = \int_l \frac{\rho dl}{S} \quad (11.7)$$

在国际单位制中, 电阻的单位是欧姆 Ω , 电阻率的单位是欧姆·米 (ΩM)。

电荷的定向运动是电场造成的, 因此导体中某一点的电流密度矢量必然与该处的电场强度有关。

在导体中取一个极小的直圆柱体, 设其长为 dl , 横截面为 dS , 电流沿其轴线方向流动, 电流密度为 j , 场强为 E , 则导体小直圆柱两端电势差为 $E dl$, 电流强度为 $dI = j dS$, 由欧姆定律, 有

$$E dl = R j dS$$

$$j = \frac{dl}{R dS} \cdot E = \frac{1}{\rho} E = \sigma E \quad (11.8)$$

式中 σ 称为电导率, $\sigma = \frac{1}{\rho}$ 。

实验表明, 导体中各点电流密度矢量的方向总与该点场强方向一致, 所以

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} \quad (11.9)$$

式 (11.9) 为欧姆定律的微分形式。它表示了导体中某一点 $\mathbf{j}$, σ , $\mathbf{E}$ 这三个量之间的关系。式 (11.9) 在可变电场中仍然正确, 它是电磁理论中的一个重要方程。

§3 电功率 焦耳—楞次定律及其微分形式

设导线两端的电压为 $U_1 - U_2 = V$, 流过的电流强度为 I , 则在时间 t 内通过导线某个横截面的电量为 $Q = It$. 电量 Q 从导线一端移到另一端的过程中, 电场力做功为

$$A = QV = VIt \quad (11.10)$$

由欧姆定律, 有

$$A = I^2 R t = \frac{V^2}{R} t \quad (11.11)$$

电功率为

$$P = \frac{A}{t} = VI \quad (11.12)$$

$$P = I^2 R = \frac{V^2}{R} \quad (11.13)$$

公式 (11.10)、(11.12) 是普遍适用的, 公式 (11.11), (11.13) 仅适用于纯电阻电路。

电流会使导线发热, 这些热量是通过电流做功由电能转化来的。如以焦耳为热量单位, 则热量 Q 为

$$Q = I^2 R t \quad (11.14)$$

式 (11.14) 称为焦耳——楞次定律。

设一个微小的导体直圆柱的电阻率为 ρ , 体积为 $dS \cdot dl$, 则其电阻为 $R = \rho \frac{dl}{dS}$. 单位时间内, 导体单位体积中所产生的热量叫做热功率密度, 用 w 表示, 则有

$$w = \frac{Q}{dS \cdot dl \cdot t} = \frac{I^2 R t}{dS \cdot dl \cdot t} = \frac{I^2 R}{dS \cdot dl}$$

因 $R = \rho \frac{dl}{dS}$, $I = jdS$, 把这两式代入上式, 有

$$w = \rho j^2$$

将 $j = \sigma E$, $\rho = \frac{1}{\sigma}$ 代入上式, 得

$$w = \sigma E^2 \quad (11.15)$$

式 (11.15) 是焦耳——楞次定律的微分形式。

§4 金属导电的经典微观解释

金属导电的宏观规律是由它的微观导电机制决定的。下面我们根据经典理论来说明金属导电时为什么会遵从欧姆定律, 并建立金属的宏观量电导率和它的各微观量的平均值之间的联系。

金属内的自由电子象气体中的分子一样, 总是在不停地作无规则的热运动。在没有外电场或其它原因 (如电子数密度或温度梯度) 的情况下, 它们沿任何方向运动的机会都相同, 因此不会形成电流。

如果在金属中加了电场, 则每个自由电子都将受到一个与电场方向相反的力, 从而产生逆着电场方向的加速度, 其大小为

$$a = \frac{eE}{m}$$

式中 m , e 为电子的质量和电量。这时自由电子除了以热运动速率 u 作热运动外, 还集体作逆着电场方向的定向运动。正是自由电子的集体定向运动, 才在金属内产生了电流。

由于自由电子还不断地与晶体点阵碰撞, 每次碰撞后电

子沿什么方向散射,具有很大的偶然性。对大量的电子平均而言,可以认为碰撞以后它们完全丧失了定向运动的特征,即其定向运动的初速度 $\overline{v_0} = 0$, 每次碰撞后,电子在电场力作用下从零开始作匀加速运动,在两次碰撞的平均时间间隔之内,电子获得的定向运动速度为

$$\overline{v_1} = a \overline{\tau} = \frac{eE}{m} \overline{\tau}$$

在两次碰撞之间的平均速率为

$$\overline{v} = \frac{\overline{v_0} + \overline{v_1}}{2} = \frac{1}{2} \frac{eE}{m} \overline{\tau}$$

在一般情况下, $\overline{u} \gg \overline{v}$, 所以电子作两次碰撞的平均时间间隔 $\overline{\tau}$, 应等于电子的平均自由程 $\overline{\lambda}$ 与它的平均速率 $\overline{u}$ 之比, 即

$$\overline{\tau} = \frac{\overline{\lambda}}{\overline{u}}$$

所以

$$\overline{v} = \frac{1}{2} \frac{eE}{m} \frac{\overline{\lambda}}{\overline{u}}$$

如果单位体积中有 n 个自由电子, 它们都以平均定向速率 $\overline{v}$ 运动, 单位时间内通过单位面积的电量, 即电流密度为

$$j = en \overline{v}$$

将 $\overline{v}$ 代入上式, 则有

$$j = \frac{1}{2} \frac{e^2 n \overline{\lambda}}{m \overline{u}} E$$

即

$$\mathbf{j} = \frac{1}{2} \frac{e^2 n \overline{\lambda}}{m u} \mathbf{E} \quad (11.16)$$

式 (11.16) 就是根据经典理论导出的欧姆定律。显然电导率为

$$\sigma = \frac{1}{2} \frac{e^2 n \overline{\lambda}}{m u} \quad (11.17)$$

式 (11.17) 表示了电导率与微观量平均值之间的关系。可以看出, 金属中单位体积内的自由电子数及其平均自由程愈大, 电阻就愈小; 当温度升高时, 热运动速率增大, 碰撞次数增多, 因此电阻增大, 这便是金属电阻随温度变化的经典解释。式 (11.17) 只能定性的说明金属导电的规律, 要对金属导电的规律作出定量解释需要使用量子理论。

§5 电 动 势

在导体中有电流通过时, 最简单的情况是通过导体各个截面的电流强度的大小和方向不随时间而变化, 我们把这种电流叫做稳恒电流。

怎样才能产生稳恒电流呢? 设在金属导体 A 、 B 之间存在电势差 $U_B - U_A$, 在电场力作用下, 电子将从导体 A 不断地移向导体 B , 使 $U_B - U_A$ 逐渐下降以至最后为零。为了使电子能不断地从导体 A 运动到导体 B , 并且能保持稳恒的流动, 必须有一个装置

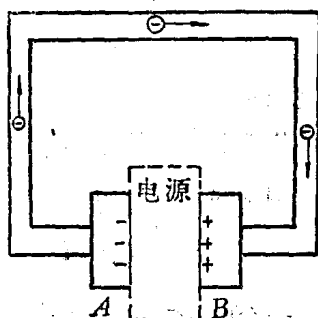


图 11-1

能把电子不断地从导体 B 送回到导体 A 上，即这个装置应能保持使导体 A 和 B 之间有一个恒定的电势差。我们把这种装置叫做电源(如图(11—1)中的虚线部分)。静电场通过对电子作功只能把电子从低电势处送到高电势处。电源应当提供一种新型的电场——非静电场，通过非静电场对电子作功把电子从高电势处再送到低电势处，这样对电子具有相反作用的两种电场结合起来，就会使电子在导体中维持稳恒的流动，以产生稳恒电流。这与太阳和引力相互配合实现了地球和大气中水的循环一样，静电场和非静电场的相互配合就会实现电荷在导体中的稳定的循环流动。

正象我们为了描写静电场的作功能力曾引出电势差的概念那样，为了描写非静电场在搬运电荷中的作功能力，我们也需要引入一个新概念，称做电源的电动势。

电动势：把单位正电荷从负极（低电势处）通过电源内部移到正极（高电势处），非静电力所作的功，即

$$\varepsilon = \int_{-}^{+} E_i \cdot d\mathbf{l} \quad (11.18)$$

电源内

E_i 表示非静电场的场强，与静电场场强相似， E_i 表示作用在单位正电荷上的非静电力的大小和方向。

如果在整个回路中都有非静电力，则电动势为

$$\varepsilon = \oint E_i \cdot d\mathbf{l} \quad (11.19)$$

一个电源的电动势具有一定的数值，它与外电路的性质和电路是否接通无关。从能量的观点来看，电动势是电源将

其它形式的能量转变为电能的本领。电动势是标量，为了计算的方便，我们规定它有方向，其方向与非静电场的方向一致。

在图11—1所示的闭合电路中，设电源电动势为 ε ，内电阻为 r ，外电阻为 R 。电路接通时，电流与电动势方向一致，非静电场作正功，电源供给的功率为 εI 。电流在电阻上转变为热能，其功率为 $I^2 R + I^2 r$ 。据能量守恒定律，有

$$I\varepsilon = I^2 R + I^2 r \quad (11.20)$$

即
$$I = \frac{\varepsilon}{R + r} \quad (11.21)$$

式(11.21)称为闭合电路欧姆定律。

§6 基尔霍夫定律

在稳恒电路中，任取一个闭合面，由电荷守恒定律可知，在单位时间内流进的电量必等于流出的电量，否则在该闭合面内造成的电荷积累或电荷短缺必然使电荷的分布随时间变化，因而使电路中的电流不再恒定不变。在三个或三个以上支路的交点处（称为分支点或节点）取一闭合面，则流入的电流强度之和必等于流出的电流强度之和。设流出的电流强度为正，流入的电流强度为负，对任意一个分支点都有

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0 \quad (11.22)$$

式中 n 表示会合在该分支点的电流数目。(11.22)式称为基尔霍夫第一定律。

将式(11.20)改写一下，有

$$IR + Ir - \varepsilon = 0$$

这说明，由于电路中给定点的电势的量值只有一个。如果我们从闭合电路上任一点出发，沿电路的任一方向环绕一周，其电势降落的代数和必定为零。一般地有

$$\sum IR + \sum \varepsilon = 0 \quad (11.23)$$

实际上，我们常把电势降落取作正的，把电势升高取作负的。为了计算任一回路的电势升降，我们规定，先取任一绕行方向，凡是支路中电流方向（为题目中已给出的电流方向或所设的电流方向）与绕行方向相同的，取其 RI 为正，否则为负。电动势方向与绕行方向相同的取为负值，反之为正。

对于有 n 个节点的稳恒电路，可列 $n - 1$ 个独立的电流方程。

对于每一个闭合回路可列一个回路电压方程，但要注意，一般地，每一回路方程中至少要有有一个支路是其它方程没有用过的，否则这个回路方程一般是不独立的。

应用电势升降的概念和上面谈到的符号规则，对于任意一段含源电路，可知其电势差为

$$U_A - U_B = \sum IR + \sum \varepsilon \quad (11.24)$$

式(11.24)称为一段含源电路的欧姆定律。

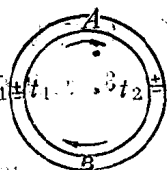
§7 接触电势差和温差电现象

金属中的自由电子虽然在不断地作热运动，但在室温下，我们看不见由于自由电子跑出金属表面而使金属带正电的现象，这表明在金属表面层内存在一种阻碍电子飞出金属的作用。要使电子能从金属中挣脱出来，必须抵抗这种作用

而作一定数量的功，这种功称为脱出功。~~不同的金属有不同的~~脱出功。

当两种不同金属接触时，在接触处将进行自由电子的相互扩散。由于脱出功不同以及两种接触金属中的自由电子浓度不同，相互扩散的结果使通过界面由金属 A 进入金属 B 的电子数少于由金属 B 进入金属 A 的电子数。因此金属 A 带负电，而金属 B 带正电，于是产生一个由 B 指向 A 的附加电场，这个附加电场将阻止电子继续向 A 转移，达到动态平衡时，接触层两边有一个电势差，称为接触电势差。由逸出功不同引起的接触电势差的数量级约为几伏，由电子密度不同引起的接触电势差的数量级约为 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 伏。摩擦起电实际是由于接触电效应造成的。

在温度相同的情况下，由两种金属 A 、 B 接成的闭合回路中，不会产生合电动势（即接触电势差之和为零）。但是，当 $V_1(t_1) \neq V_2(t_2)$ 使两接头处保持不同的温度 t_1 和 t_2 时（如图11—2），回路中有电流通过。这表示由于两种金属接头处有温度差就产生了电动势，图 11—2



势，这种电动势称为温差电动势，这个电路称为温差电偶或热电偶，该现象称为赛贝克效应，它是一种温差电现象。

概略地说，温差电动势是由于两接触点的接触电势差 V_1 和 V_2 不等造成的，而 V_1 和 V_2 不等又是由于两接触点的温度不同引起的。

实验表明，两种不同的金属相互接触，当其中有电流通过时，接触处将放出或吸收热量。而放出或吸收的热量值只