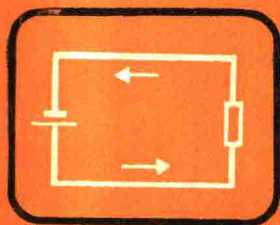


3.64
DM

中学物理教学参考丛书



直流电

上海教育出版社

直 流 电

许德明 汪宗锐 沈菁华

上海教育出版社

中学物理教学参考丛书

直 流 电

许德明 汪宗锐 沈菁华

上海教育出版社出版

(上海永福路 123 号)

新华书店上海发行所发行 上海崇明印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 6.5 字数 141,000

1980 年 7 月第 1 版 1980 年 7 月第 1 次印刷

印数 1—75,000 本

统一书号: 7150·2293 定价: 0.60 元

编 者 的 话

本书是中学物理教学参考丛书之一，主要供中学物理教师参考。全套丛书共有二十本左右，将陆续出版。

《直流电》的主要内容是讨论电流、电阻、电压和电动势等基本概念，以及欧姆定律、基尔霍夫定律的实际应用。全书共分五章：第一章论述了电学中的几个基本物理量，第二章讨论了欧姆定律，第三章和第四章分析了直流电路的解法，第五章综述教学中常见的几种解题步骤。

目 录

第一章 电流、电阻、电压和电动势	1
一、电流和电流密度	1
(一) 电流的概念	1
(二) 电流的大小	5
(三) 电流密度	7
二、物质的导电性能	9
(一) 电阻和电阻率	9
(二) 导体、绝缘体和半导体	13
(三) 电阻和温度的关系	18
三、电压和电动势	23
(一) 电压	23
(二) 电动势	25
(三) 电压源与电流源	33
第二章 欧姆定律	39
一、部分电路欧姆定律	39
二、全电路欧姆定律	41
三、不均匀电路的欧姆定律	45
四、多电源的单回路电路	47
五、线性原理和迭加原理	50
(一) 线性原理	50
(二) 迭加原理	52
第三章 简单直流电路	56
一、电路的连接	56

(一)串联电路·····	56
(二)并联电路·····	61
(三)混联电路·····	65
二、电路的变形和化简·····	67
三、电路中各点电势的计算·····	71
四、电能·····	75
(一)电功和电功率·····	75
(二)负载的最大功率·····	79
(三)能量的转换和守恒·····	81
(四)电路中的能量·····	87
五、电阻的测量·····	88
(一)伏安法测电阻·····	89
(二)惠斯登电桥测电阻·····	90
六、电源电动势及其内阻的测量·····	96
(一)用伏安法测电源电动势及其内阻·····	96
(二)用电势差计测电源电动势·····	99
第四章 复杂直流电路的分析方法 ·····	102
一、复杂电路·····	102
二、基尔霍夫定律·····	105
(一)节点电流定律·····	106
(二)回路电压定律·····	109
(三)复杂直流电路的一般解法·····	113
三、回路电流法·····	115
四、节点电势法·····	123
第五章 解题分析 ·····	132
一、简单直流电路的解题分析·····	132
(一)电路的变换·····	132
(二)部分电路欧姆定律·····	137

(三)全电路欧姆定律	138
(四)电表测量问题	145
(五)电功和电功率问题	150
(六)焦耳-楞次定律的应用	157
(七)电路杂例	159
二、复杂直流电路的解题分析	163
(一)电路的分析和解题方法的选择	163
(二)复杂电路的基本解题方法	167
习题	178
习题答案	200

第一章 电流、电阻、电压和电动势

在一个电路中，如果电源电动势不变，同时电流是稳定的，也就是它们都不随时间改变，则这种电路称为直流电路。在研究直流电路时，电流、电阻、电压和电动势是用得最多的几个重要概念。本章就这些概念展开讨论。

一、电流和电流密度

我们知道，带电粒子作定向移动形成电流。所有粒子都具有质量、动量等等的物理特性。带电粒子除这些特性外，还具有另一种重要的物理特性，这特性是用电荷这一概念来表征的，带电粒子就是带有电荷的粒子。带电粒子的定向移动，实际上也可看作电荷在作定向移动。

(一) 电流的概念

电荷的定向移动形成了电流。在金属导体中，携带电荷的是电子，电子在离子和分子之间定向移动时，离子和分子本身并不和电子一起移动，所以电流在金属中通过时，并没有使金属的化学性质发生任何变化。在导电的液体（如酸、碱、盐的溶液）里，电荷的携带者是正离子和负离子。在气体导电时，携带电荷的是电子和正、负离子。

电流的产生和存在是有条件的。自由电荷在导体中的热运动是漫无方向的，因此不能形成电流。要使电荷向一定方

向移动，不是在电场力的作用下就是在非静电力的作用下进行。如果我们所讨论的电流不是由非静电力引起的，则导体中产生电流的条件必定是自由电荷在导体中受到了电场力的作用，这时导体中的电场强度不能为零，因而在导体两端要存在电压。

正负电荷的定向移动都能形成电流。我们怎样定电流的方向呢？物理学上规定：把正电荷移动的方向作为电流的方向。按照这一规定可以知道，金属导体中的电子移动方向与电流的方向相反；在酸、碱、盐溶液中的正离子移动方向就是电流的方向，而负离子移动的方向与电流的方向相反；当气体在一定的外界条件激发下导电时，电子和负离子移动的方向与电流方向相反，正离子移动的方向就是电流的方向。

常见的电流分直流电和交流电两种。电流的方向固定不变叫做直流电。当电流的方向不变，大小也不变时，这种直流电叫做稳定直流电；当方向不变，而大小随时间改变的直流电叫做脉动直流电。电流的方向和大小随时间作周期性变化的叫做交流电(图 1—1)。

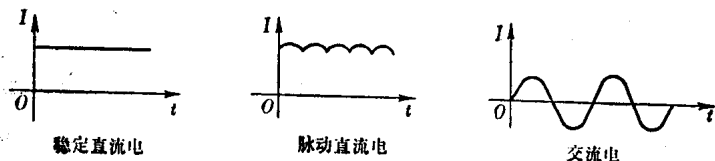


图 1—1

周期和频率、最大值和有效值、相位和相位差是交流电的三个特性。这三个特性从不同的侧面来描述交流电。周期和频率表明交流电的变化速度；最大值和有效值表明了交流电的变化大小；相位表明在某一瞬时交流电所处的进程，而相位

差表明两个同频率的交流电所处进程的先后。

不论是直流电还是交流电只要电路一接通,整个电路“立刻”就有电流通过。例如照明电路里,开关一接通,所有的灯不论离电源的远近如何,总是“立刻”、“同时”都亮了起来,这一事实说明“电流的速度”是极大的。那末,电流既然是电荷的定向移动,是不是说导体中的自由电荷(例如电子)在导体中以十分巨大的速度作定向移动呢?事实并非如此。设有一个直流电路当开关未接通以前,导体内部电场为零,电路中没有电流。一旦接通开关,导体内部的电场不再为零,在电场力的作用下,原来作无规则热运动的自由电子就立即作定向移动。这就是说导体中各处的电子几乎同时受到电场力的作用而同时移动,这样,导体中各处几乎同时都有了电流。所以电流在导体中传输得很快,并不是由于电子在导体中的移动速度很大(例如当100安培的电流通过截面为1平方厘米的铜导线时,铜中的自由电子的平均定向移动速度的数量级不过是 10^{-2} 厘米/秒),而是电场在导体中传播速度很大的缘故。我们知道电场的传播速度是每秒300000千米,所以平常说的电流速度是指电场的传播速度,并不是电荷的移动速度。

自由电荷的定向移动形成了电流,我们能不能说自由电荷是电能的传输者呢?不能,因为自由电荷的定向运动是在电场力的作用下进行的,对于每个自由电荷来说,除了热运动动能外,还附加有定向运动动能。这个附加动能是靠电场力作功消耗电场能得来的。电荷的定向移动动能在与原子、分子的相互作用过程中又将其能量转变成热、光等形式的能。可见,在导体里传送电能是电场的作用,场才是电能的传输者。当电场能转变成其他形式的能的过程中,电场能将减小。要保持场能不变,消耗的场能可依靠电源将非电场能转变成电

场能来供给。交流电与直流电不同之处是当导体中有交流电通过时,电能除了转变成自由电荷作定向移动(周期性变化的运动)的动能以外,还同时以电磁波的形式向外辐射能量。

在导体中,电子或离子相对于导体的移动所形成的电流叫做传导电流。带电体的运动或空间里带电粒子(电子或离子)的运动同样也可以形成电流,这种电流叫做徒动电流。如图 1—2 所示,灯丝由电源 E_a 供给电流来加热,因而发射电子。阳极接到另一电源 E_b 的正极,阴极则接到这电源的负

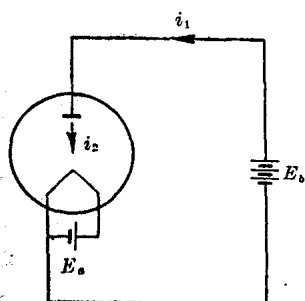


图 1—2

极,在阳极与阴极之间产生电场,由灯丝发射出来的电子在真空中受电场力作用而形成由阴极射向阳极的电子流,这就是由阳极向阴极的徒动电流。管内的徒动电流 i_2 与管外电路中的传导电流 i_1 相互“继续”,这样就保持了电流的连续性。

传导电流和徒动电流都是自由电荷的运动,但两者有所不同,这两种电流的区别是传导电流遵守欧姆定律,而徒动电流在一般情况下不遵循这一定律。

现在我们来讨论不是由自由电荷定向移动所形成的另一种电流。图 1—3 所示是一只带电的电容器 C 通过电阻 R 放电。在 K 未合上时, C 的两个极板上的电荷是 $+q$ 与 $-q$ 。当 K 合上时,电容器放电。在电路的导电部分中出现传导电流,同时电容器极板上电荷逐渐减少,

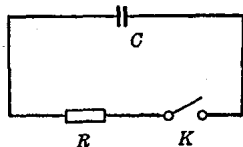


图 1—3

传导电流也逐渐减小，直到电容器放电完毕为止。我们可以用同样的方法来讨论电容器充电时的情况。从这里可以看到，尽管电容器的极板之间是相互绝缘的，也即该处电路是断开的，但在电容器充放电的过程中，仍然有电流在电路的导电部分中通过，而在电容器里却没有移动的电荷。那末，交流电是怎样通过电容器的呢？1861年麦克斯韦提出假设，变化的电场可以看作是一种电流，这种电流叫做位移电流。电容器在充、放电的过程中，电容器极板上的电荷发生变化，电容器里的电场也随之变化，电容器里虽然没有移动的电荷，但却存在着变化的电场，即存在着位移电流。也就是说，传导电流在电容器里的中断是由位移电流来继续，从而保持了电流的连续性。位移电流虽不同于传导电流，但是位移电流在产生磁场的效应上（也只在这效应上）完全与传导电流等效，即位移电流周围空间也产生磁场。我们已经知道，变化的电场会产生位移电流，位移电流周围空间会产生磁场，从而我们可以得出结论：在变化的电场周围空间能够产生磁场。麦克斯韦这一假设，已经被理论与实验所证实。我们应注意，仅仅就产生磁场方面来说，位移电流与传导电流是等效的；在其他方面，两者不能相提并论，例如位移电流通过介质时没有热效应产生。

（二）电流的大小

当电路中有电流通过时，会产生各种各样的效应（如热效应、化学效应等）。根据各种效应的强弱，使我们对电流形成了强弱的概念。

电流（也称为电流强度）就是用来描述电流强弱的一个物理量，并规定电流等于流过导体中任一横截面的电量和所用

的时间之比。如果在时间 t 内，流过导体中某一横截面的电量为 Q ，那末电流 I 可表达为

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-1)$$

电流的单位是安培。在 SI 单位制中，安培的单位是这样规定的：在真空中的两根相距 1 米的无限长而圆截面积可以忽略的平行直导线中，通以恒定电流，当它们的相互作用力为 2×10^{-7} 牛顿/米时，导线中的电流即为 1 安培。小电流可以用毫安或微安来表示，它们与安培的关系：

$$1 \text{ 毫安} = 10^{-3} \text{ 安培},$$

$$1 \text{ 微安} = 10^{-6} \text{ 安培}.$$

在 SI 制中的电量单位是库仑，它和电流的单位安培之间的关系从(1-1)式可知：

$$1 \text{ 库仑} = 1 \text{ 安培} \cdot 1 \text{ 秒}.$$

即导体中的电流为 1 安培时，在 1 秒内通过导体中任一横截面的电量为 1 库仑。

这里有必要指出，电流的大小不随电荷在电路中流动距离的增大而变小，电荷移动所损耗的是电能。

〔例〕 在 10 秒钟里通过导体的电量是 100 库仑，求(1)通过导体的电流；(2) 1 秒钟里流过导体任一横截面的电子数？

【解】 (1) $I = \frac{Q}{t} = \frac{100}{10} = 10 \text{ (安培)},$

(2) 设 1 秒钟通过导体任一横截面的电量为 Q_1

$$Q_1 = \frac{Q}{t} = \frac{100}{10} = 10 \text{ (库仑)},$$

又设 1 秒钟里通过导体任一横截面的电子数为 n ，

则 $n = \frac{Q_1}{e} = \frac{10}{1.6 \times 10^{-19}} = 6.25 \times 10^{19} \text{ (个)}.$

式中 e 是表示一个电子所带的电量。比较(1)与(2)的解答可以看出, 电流实际上就是电荷流量, 而且是一个标量。

由于电流有各种各样的效应, 效应的强弱与电流具有一定的比例关系, 所以电流是可以被测量的。我们可以利用任何一种效应, 无论是热效应, 磁效应或者化学效应来测定电流的强弱。这种用来测定电流的仪器叫做电流计, 通常应用最广泛的是根据电流的磁效应设计的电流计, 当它的标度直接用安培数来标出时就叫做安培表。

(三) 电流密度

上面我们所讨论的电流是个标量, 因此它不能反映导体内各点的电荷流动情况, 即不能定量地描述导体中电流的分布情况。而在有些情况中, 电流是在粗细不均匀的导体甚至是大块的导体中流动, 这时电流的分布是不均匀的。因此, 除了了解导体中电流的强弱外, 有时还有必要更具体地了解导体中电流的分布情况。电流密度矢量就是用来定量地描述导体中电流分布的情况。

在导体中电荷的运动可能是正电荷的运动, 也可能是负电荷的运动, 还可能是正电荷和负电荷同时作相反方向的运动。实验已经证明, 在一般的情况下, 符号相反的电荷沿相反方向的运动, 所形成的电流是等效的。因此我们可以只讨论一种电荷的运动。

这里以正电荷为例进行讨论。设这些电荷都以相同的速度沿同一方向移动, 而且这些电荷在空间中的分布是稳定的。我们假定在导体中垂直于电荷移动的方向划出一个微小的面积 ΔS , 在时间 Δt 内通过它的电量为 ΔQ , 那末电流密度为

$$j = \frac{\Delta Q}{\Delta t \cdot \Delta S} = \frac{\Delta I}{\Delta S} \quad (1-2)$$

当 ΔS 缩小到一点时, (1-2) 表示为该点电流密度矢量的值, 正电荷在经过该点时移动的方向为电流密度矢量的方向 (图1-4)。从式(1-2)可知电流密度的单位是安培/米²。电

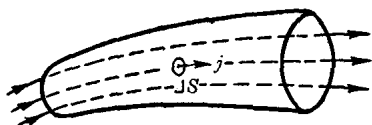


图 1-4

流密度还可以用另一个式子来表示。假设在导体中某一位置上单位体积内含有 n 个电荷, 每个电荷的电量为 q , 它们的定向移动速度为 v , 在 Δt 时间内通过 ΔS 面积的电量 ΔQ 应等于:

$$\Delta Q = v \cdot \Delta t \cdot \Delta S \cdot nq,$$

$$\text{则 } j = \frac{\Delta Q}{\Delta t \cdot \Delta S} = \frac{v \cdot \Delta t \cdot \Delta S \cdot nq}{\Delta t \cdot \Delta S} = nqv \quad (1-3)$$

[例] 每立方厘米的铜含有自由电子 8.5×10^{22} 个。室内装用的截面积为 25 毫米² 的铜导线的容许电流密度为 5×10^6 安培/米², 电子的电量 $q = -1.601 \times 10^{-19}$ 库仑, 求铜导线中电子移动的速度。

【解】 $\because j = nqv,$

$$\therefore v = \frac{j}{nq} = \frac{5 \times 10^6}{8.5 \times 10^{22} \times 1.601 \times 10^{-19}}$$

$$\approx 3.7 \times 10^{-4} (\text{米/秒}).$$

这就是说铜导线中电子移动的速度还不到 0.04 厘米/秒, 而金属中电子热运动的有效速度的数量级是 10^5 米/秒, 可见形成电流的电子定向移动速度与它的热运动速度相比是极小的。

如果在导体中(例如在导电溶液中)电流是两种异号电荷移动所形成,则电流密度的大小为

$$j = n_+ q_+ v_+ + n_- q_- v_- \quad (1-4)$$

〔例〕 在盐的水溶液中,假设每立方厘米含有钠离子(Na^+)与氯离子(Cl^-)各 9×10^{18} 个。钠离子与氯离子带有异号的基本电荷(1.601×10^{-19} 库仑)。如果在某种条件下,钠离子以 5×10^{-4} 厘米/秒的速度朝着一个方向漂移,氯离子以 7×10^{-4} 厘米/秒的速度朝着反方向移动,问电流密度应为多大?

【解】 应用公式(1-4)即有

$$\begin{aligned} j &= 9 \times 10^{18} \times 10^6 \times 1.601 \times 10^{-19} (5 \times 10^{-4} + 7 \times 10^{-4}) \times 10^{-2} \\ &= 17.3 (\text{安/米}^2). \end{aligned}$$

如果我们在讨论公式(1-3)时,所取的面积 ΔS 的方位是任意的,那么公式应改作

$$j = \frac{\Delta Q}{\Delta t \cdot \Delta S \cdot \cos \alpha} \quad (1-5)$$

式中的 α 是正电荷运动方向与 ΔS 的法线之间的夹角, $\Delta S \cdot \cos \alpha$ 是指 ΔS 在垂直于正电荷运动方向的平面上的投影。

二、物质的导电性能

(一) 电阻和电阻率

我们知道,把同样的电压加在不同的导体上,导体中的电流强弱不一样。这个事实说明不同的导体它的导电本领不一样,或者说不同的导体对通过它的电流的阻碍作用不一样。实验指出,对一个导体来讲,导体两端的电压和通过导体中的电

流的比 $\left(\frac{U}{I}\right)$ 是一个恒量。不同的导体, 这个恒量的数值不同。

可见, 这个比值反映了导体的一种导电特性, 我们把它叫做电阻。

导体的电阻这个物理量是用来表示导体对电流的一种阻碍作用。在金属导体中, 这种阻碍作用是由于作定向移动的电子跟作热运动的原子、离子发生碰撞而产生的。

在 SI 制中, 电阻的单位是欧姆。

$$1 \text{ 欧姆} = \frac{1 \text{ 伏特}}{1 \text{ 安培}}$$

这就是说当加在导体两端的电压为 1 伏特, 通过它的电流是 1 安培时, 则这个导体的电阻为 1 欧姆。

电阻是表示导体本身导电性能的物理量, 在一定的外界条件下, 它的大小应该由导体本身的条件来决定。实验证明, 在一定的温度、压力下, 同样材料的金属导体的电阻跟它的长度成正比, 跟它的横截面积成反比, 这个结论叫做导体的电阻定律。它对于组织均匀、浓度一致的导电溶液来讲也是同样适用的。用公式表示:

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1-6)$$

式中的比例常数 ρ 称作电阻率。它与导体的形状、大小无关, 仅与该导体材料本身的导电性能和导体所处的外界条件 (温度、压力等) 有关。

在 SI 制中, 电阻率的单位是欧姆·米。用这种单位时, L 的长度应取米, S 的单位应取平方米, 这时材料的电阻率的大小在数值上等于用该材料制成的一块 1 米长, 1 平方米横截面的导体所具有的电阻值。为了实用的方便, L 的单位用米,