

中学物理专题丛书



胡保祥

主编

程 嗣 丁庆红 编著

直流电路 分析

ZHONGXUE WULI ZHUANTI CONGSHU

湖北教育出版社

7



中学物理专题丛书

胡保祥 主编

直流电路 分析

程 嗣 丁庆红 编著

7

湖北教育出版社

(鄂)新登字 02 号

图书在版编目(CIP)数据

直流电路分析/丁庆红,程嗣编著. —武汉:湖北教育出版社,
2003

(中学物理专题丛书/胡保祥主编)

ISBN 7-5351-3727-X

I.直… II.①丁… ②程 III.直流电路—电路分析—中学
—教学参考资料 IV.G634.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 113361 号

出版 发行:湖北教育出版社
网址: <http://www.hbedup.com>

武汉市青年路 277 号
邮编:430015 电话:027-83619605
邮购电话:027-83669149

经 销:新 华 书 店

印 刷:文字六〇三厂印刷

(441021·湖北襄樊盛丰路 45 号)

开 本:787mm×1092mm 1/32

9 印张

版 次:2004 年 2 月第 1 版

2004 年 2 月第 1 次印刷

字 数:182 千字

印数:1—8 000

ISBN 7-5351-3727-X/G·3035

定价:11.50 元

如印刷、装订影响阅读,承印厂为你调换

目录

第一章 直流电路的基本概念 和基本规律

- | | |
|-----------------------|----|
| 1. 电流 电流产生的条件
恒定电流 | 1 |
| 2. 部分电路的欧姆定律 | 15 |
| 3. 电阻定律 电阻与温度的
关系 | 24 |
| 4. 电功 电功率 焦耳定律 | 46 |
| 5. 闭合电路的欧姆定律 | 56 |
| 6. 电路中各点电势的计算 | 79 |

第二章 直流电路归类分析

- | | |
|----------------------|-----|
| 1. 简单的串、并联电路 | 86 |
| 2. 电路等效变换分析 | 100 |
| 3. 电表问题分析 | 108 |
| 4. 含电容器电路分析 | 118 |
| 5. 讨论用电器能否正常工作
专题 | 130 |
| 6. 电路故障分析 | 141 |
| 7. 电学黑盒问题分析 | 154 |
| 8. 综合问题分析 | 167 |

第三章 直流电路中的实验分析 191

1. 电压表和电流表 191
2. 电阻的测量 197
3. 测量金属的电阻率 204
4. 用电流表和电压表测定电池的电动势和内阻 216
5. 练习使用多用电表测电阻 231
6. 研究电学元件的伏安特性 237
7. 两种电路的选择 249
8. 课外实验 256

第四章 能力测试 266

第一章

直流电路的基本概念和基本规律

1. 电流 电流产生的条件 恒定电流

【内容概述】

一、电流的形成和条件

1. 电流的形成

电荷的定向移动形成电流。电荷可以是正电荷,也可以是负电荷,还可以是两种电荷都存在;可以是电子,也可以是质子,还可以是离子等。

2. 形成电流的条件

(1) 物体中要有自由移动的电荷(内因)。

(2) 物体内部必须有外电场存在(外因)。

二、电流强度

1. 物理意义

表示电流强弱的物理量。

2. 定义

通过导体横截面的电量 q 跟通过这些电量所用时间 t 的

比值,叫做电流强度,简称电流。

3. 定义式 $I = \frac{q}{t}$

4. 微观表达式

在横截面积为 S 的导体中,若单位体积内有 n 个自由电子(电子电量为 e),它们以速度 v 定向移动,则电流强度为:

$$I = neSv$$

推导如下:如图 1-1-1 所示,设金属导体的横截面积为 S ,自由电子密度(单位体积内的自由电子数)为 n ,自由电子平均定向移动速率为 v ,那么时间 t 内通过某一横截面的

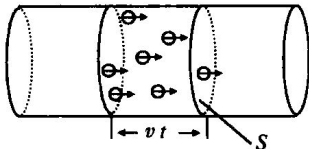


图 1-1-1

自由电子数为 $nSvt$ 。如果电子的电量为 e ,那么时间 t 内通过该横截面的电量 $q = neSvt$ 。根据电流强度的定义式 $I = q/t$,就可以得到电流强度和自由电子平均定向移动速率的关系式:

$$I = neSv$$

5. 单位

国际单位制:安(A), $1A = 1C/s$ 。

常用单位:毫安(mA)、微安(μA)。

单位换算: $1A = 10^3 mA = 10^6 \mu A$ 。

三、电流的方向

规定正电荷定向移动的方向为电流的方向。

1. 金属导体中,电流方向与自由电子定向移动的方向相反。带正电的金属离子是金属导体的“骨架”,不能移动。电

解液中,电流的方向与正离子定向移动的方向相同,与负离子定向移动的方向相反。

2. 电流有方向,也有大小,但它不是矢量而是标量,因为其运算遵守标量运算规则。

3. 电流是一种现象,电流强度是一个物理量。二者内涵不同,但通常可将电流强度简称为电流。

四、恒定电流

1. 直流电

方向不随时间改变的电流。

2. 交流电

方向随时间改变的电流。

3. 恒定电流

大小和方向都不随时间而改变的电流。通常所说的直流电常常指恒定电流。

4. 脉动直流电

方向不变,而大小随时间改变的直流电叫做脉动直流电(如图1-1-2所示)。

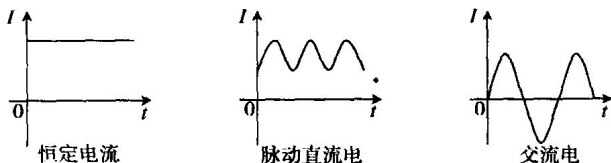


图 1-1-2

五、电流的传导速率与电荷定向移动的速率

前者是电场的传播速率,后者是电荷机械运动的速率,前

者远大于后者。自由电子在金属内部自由地做无规则热运动,并不形成电流。在室温时, $T \approx 300\text{K}$, 电子的平均热运动速度约为 10^5m/s 。自由电子在金属内部定向移动速度是很小的,其数量级为 $10^{-5} \sim 10^{-4}\text{m/s}$ 。

电流的传导速率 = 电场的传播速率 = 光速。即当电路接通时,电场几乎立即在整个电路中建立起来,导体中的全部自由电子也几乎同时在电场的作用下,沿电场的方向做定向移动而形成电流。(光在真空中的传播速度 $c = 3.00 \times 10^8\text{m/s}$)。

六、自由电荷的定向移动

自由电荷的定向移动形成了电流,但不能说自由电荷是电能的传输者。

因为自由电荷的定向移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做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做定向移动(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。

【经典例析】

例1 氢原子的电子绕核做匀速圆周运动的轨道半径为

r , 电子电量为 e , 质量为 m , 静电力常量为 k , 则可以计算出电子绕核运动的等效环形电流的电流强度 I 为多少?

思路点拨 1. 电子绕核做匀速圆周运动, 库仑力提供向心力, 可求电子绕行速率。

2. 根据电流强度的定义式 $I = q/t$ 求解。

详解示范 电子绕核做匀速圆周运动, 库仑力提供向心力, 则有 $\frac{ke^2}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$

则电子绕核运动的周期为 $T = \frac{2\pi r}{v}$

在电子运动的路径上任取一截面, 则每经历一个周期, 通过该截面的电量为 e , 由电流强度的定义知:

$$I = \frac{e}{T} = \frac{e^2}{2\pi m r^2} \sqrt{k m r}$$

故电子绕核运动的等效环形电流的电流强度 I 为

$$\frac{e^2}{2\pi m r^2} \sqrt{k m r}。$$

点评 用电流强度的定义式计算电流强度时, 关键是正确选定截面, 从而确定通过截面的电量 q 及所用的时间 t 。

例2 在电解液中: (1) 若 5 秒内沿相反方向通过面积为 0.5m^2 的横截面积的正、负离子的电量均为 5C , 则电解液中的电流强度为多少 A? (2) 若 5 秒内到达阳极的负离子和到达阴极的正离子均为 5C , 则电流强度为多少 A?

思路点拨 根据电流强度的定义式 $I = q/t$ 求解, 要深刻理解 q 的物理含义, 弄清电流的形成。

详解示范 (1)因 $I = q/t$ 中 q 是通过整个截面的电量,并非单位面积通过的电量,且因正、负离子沿相反方向定向移动形成的电流方向是相同的,所以 q 应为正、负离子电量绝对值之和,故 $I = q/t = 2 \times 5/5 = 2(\text{A})$

(2)对阳极进行讨论:根据电解液导电原理得知到达阳极的电荷只有负离子,则: $I = q/t = 5/5 = 1(\text{A})$

另解:对阴阳两极正中间的液体截面讨论:既有正离子通过也有负离子通过,但正、负离子的电量 q 都只是 $(5/2)\text{C}$

$$\text{则: } I = \frac{2q}{t} = \frac{2 \times \frac{5}{2}}{5} = 1(\text{A})$$

点评 1. 电流有方向:规定正电荷定向移动的方向为电流的方向。电流间的运算不符合平行四边形法则,故属于标量。2. 运用 $I = q/t$ 时要注意:① q 是通过导体整个截面的电量,并不是单位面积的电量;②如果电流是正负电荷同时反向运动形成时, q 应为两种电荷电量的绝对值之和;如果电流是正负电荷同时同向运动形成时, q 应为两种电荷电量的绝对值之差;③ q 和 t 有相互对应的关系。④要选定截面。

例 3 如图1-1-3所示横截面积是 1.5mm^2 的铜导线中,电流强度为 0.8A 。已知铜的单位体积自由电子数约为 10^{29} 个/ m^3 ,求自由电子定向移动的速度?

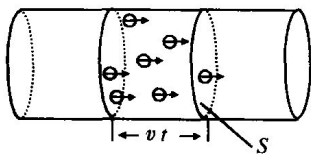


图 1-1-3

详解示范 设 $\bar{v}$ 为自由电子平均定向移动速度,导线横

截面积为 S , 单位体积内的自由电子数为 n , 则 1 秒内通过横截面积 S 的自由电子的电量, 即电流强度 $I = neSv$

将 $S = 1.5\text{mm}^2$ 、 $I = 0.8\text{A}$ 、 $n = 10^{29}\text{个/m}^3$ 代入上式

$$\text{得 } \bar{v} = \frac{I}{neS} = \frac{0.8}{10^{29} \times 1.60 \times 10^{-19} \times 1.5 \times 10^{-6}} \approx 3.33 \times 10^{-5} (\text{m/s})$$

例 4 来自质子源的质子(初速度为零), 经一加速电压为 800kV 的直线加速器加速, 形成电流为 1mA 的细柱形质子流, 已知质子电荷 $e = 1.60 \times 10^{-19}\text{C}$, 这束质子流每秒打到靶上的质子数为____。假定分布在质子源到靶之间的加速电场是均匀的, 在质子束中与质子源相距 l 和 $4l$ 的两处, 各取一段极短的相等长度的质子流, 其中的质子数分别为 n_1 和 n_2 , 则 $n_1/n_2 =$ _____。

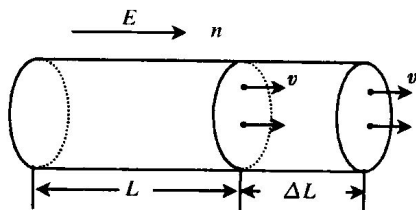


图 1-1-4

方法一 思路点拨 根据 $I = q/t$ 可求出每秒打到靶上的电量, 然后求出质子数, 由电流强度的微观表达式 $I = nesv$ 知, 电流强度处处相等, 而 e 与 s 相同, 故 nv 值相等, 由功能关系求出 v 的关系, 则可求出 n_1/n_2 的比值。

详解示范 [解法一] 由 $I = q/t$ 知每秒打到靶上的质子

的电量为 $q = It = 1 \times 10^{-3} \times 1 = 1 \times 10^{-3} (\text{C})$, 则质子的数目

$$\text{为 } n = \frac{q}{e} = \frac{1 \times 10^{-3}}{1.60 \times 10^{-19}} = 6.25 \times 10^{15} (\text{个})$$

详解示范 [解法二] 图 1-1-4 中, 设细柱形质子流的截面积为 S , 设质子流柱体微元中单位体积中的质子数为 n , 又设在时间 Δt 内通过与质子源相距 L 处的截面的电量为 Δq , 由于微元中的质子流运动速度可视为相等, 则 $\Delta q = neSv\Delta t$, 故电流强度 $I = \Delta q / \Delta t = neSv$, 则 I 仅与 n, v 相关。若设质子束中与质子源相距 L 和 $4L$ 两处的质子速度分别为 v_1, v_2 , 由于两处电流强度相等, 故 $n_1 v_1 = n_2 v_2$ 。又由动能定理知: 在 L 处的质子: $eEL = mv_1^2/2$, 在 $4L$ 处的质子: $eE4L = mV_2^2/2$, 故 $v_2 = 2v_1, \therefore \frac{n_1}{n_2} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{2}{1}$ 。由于在两处所取质子流体积相等, 此比值即为质子数之比。

方法二 思路点拨 根据物理规律, 寻找 n 与 L 的数学关系, 即建立描述粒子数 n 的数学模型, 从而求出 n_1/n_2 。

详解示范 设质子源到靶之间的匀强电场场强为 E , 又设在质子流中与质子源相距 L 处的质子的速度为 V , 如图 1-1-4 所示。若在此处取长度为 ΔL (极短) 的柱体微元, 设微元中含有质子数为 n , 质子通过这段微元所需时间为 Δt , 由于长度极短, 质子的运动可以看做是匀速的, 则有: 由动能定理知: $EeL = mV^2/2$ ①

由电流强度的定义式知 $I = ne / \Delta t$ ②

又 $\Delta L = V\Delta t$ ③

联立①②③得 $n = \frac{I\Delta L}{e} \sqrt{\frac{m}{2EeL}}$ 这就是描述粒子数 n 的数学模

型。可见粒子数 n 与 L 的平方根成反比,故 $\frac{n_1}{n_2} = \sqrt{\frac{4L}{L}} = \frac{2}{1}$ 。

点评 首先要读懂题意,把实际问题抽象为物理问题,构建一幅质子在匀强电场中做初速为零的匀加速直线运动,形成电流强度恒定的质子流的图景;然后弄清因电流强度恒定,而质子在各地的速度大小不同,所以在不同位置的相等长度内含有质子数不同;最后确定相等长度的质子数和速度的关系。

【阅读材料】

传导电流、徒动电流与位移电流

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 1-1-5 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,阴极则接到该电源的负极,在阳极与阴极之间产生电场,由灯丝发射出来的

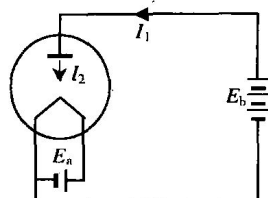
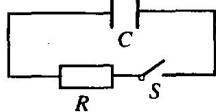


图 1-1-5

的电子在真空电场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循欧姆定律，而徒动电流在一般情况下不遵循这一定律。

下面讨论不是由自由电荷定向移动所形成的另一种电流。图 1-1-6 所示是一只带电的电容器 C 通过电阻 R 放电。



在 S 未合上时， C 的两个极板上的电荷是 $+q$ 与 $-q$ ；当 S 合上时，电

图 1-1-6

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，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。尽管电容器的极板之间是互相绝缘的，亦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。那么，交流电是怎样通过电容器的呢？1861 年麦克斯韦提出假设，变化的电场可以看做是一种电流，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（也仅在这个效应上）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。

【知识拓展】

电 流 密 度

上面所讨论的电流是标量,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做相反方向的运动。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。因此可以只讨论一种电荷的运动。

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运动,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 , 那么电流密度为

$$j = \frac{\Delta Q}{\Delta t \cdot \Delta S} = \frac{\Delta I}{\Delta S}$$

当 ΔS 缩小到一点时, 上式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 1-1-7)。

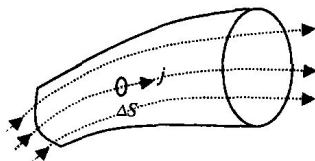


图 1-1-7

从上式可知电流密度的单位是 A/m^2 。

电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: $\Delta Q = v \cdot \Delta t \cdot \Delta S \cdot nq$

$$\text{则 } j = \frac{\Delta Q}{\Delta t \cdot \Delta S} = \frac{v \cdot \Delta t \cdot \Delta S \cdot nq}{\Delta t \cdot \Delta S} = nqv$$

如果在上式中, 所取的面积 ΔS 的方位是任意的, 则公式

$$\text{应改作 } j = \frac{\Delta Q}{\Delta t \cdot \Delta S \cdot \cos \alpha}$$

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。

例 5 $1cm^3$ 的铜含有自由电子 8.5×10^{22} 个。室内装用的截面积为 $25mm^2$ 的铜导线的容许电流密度为 $5 \times 10^6 A/m^2$, 电子的电量 $q = 1.60 \times 10^{-19} C$, 求铜导线中电子移动的速度。

详解示范 由于 $j = nqv$

$$\text{则 } v = \frac{j}{nq} = \frac{5 \times 10^6}{8.5 \times 10^{22} \times 1.60 \times 10^{-19}}$$