

中等专业学校试用教材

煤矿、地质、石油、冶金类专业适用

普通电工学

抚顺煤矿学校张志明主编



人民教育出版社

前 言

为了适应教育革命发展的需要,在教育部的领导和支持下,由承德石油学校、北京钢铁学校、湖南冶金工业学校、大同煤矿学校、通化煤矿学校、包头煤矿学校、江西煤矿学校和抚顺煤矿学校等讨论并制订了《普通电工学教学大纲》。根据这个大纲,由抚顺煤矿学校张志明编写本书的1~4章;抚顺煤矿学校韩静宜编写5~7章;大同煤矿学校刘树栋编写8~13章。本书可作为煤矿、石油、地质、冶金类中等专业学校非电类专业的试用教材。

本书在总结经验的基础上,本着加强基础理论,精选教材内容的精神,加强了电工基础内容;为适应工业现代化的需要,适当增加了电子技术内容。而电机、变压器等力求做到精简。本书适用于90~120学时。为了在教学中适应不同专业和不同学时的需要,凡带有*号的内容,可供读者选用。书中每一章都附有小结,便于读者复习、巩固和提高。

本书由鸡西煤矿学校吴学胜和抚顺煤矿学校电工组的部分同志审阅。由抚顺煤矿学校李文侠协助插图,在此一并表示感谢。

由于水平和经验所限,加上时间紧迫,难免出现缺点和错误,诚恳希望读者提出宝贵意见。来信请寄北京沙滩后街人民教育出版社转。

编 者

目 录

前言

第一章 直流电路..... I

§1-1 电路.....	1
§1-2 电阻.....	3
§1-3 欧姆定律.....	4
§1-4 电功率与电能.....	12
§1-5 电路中各点电位计算举例.....	15
§1-6 克希荷夫定律.....	18
§1-7 复杂电路计算.....	21
§1-8 电桥器.....	27

第二章 电磁.....36

§2-1 电流的磁场.....	36
§2-2 电磁力及其应用.....	37
§2-3 磁感应强度和磁通.....	39
§2-4 导磁系数与磁场强度.....	41
*§2-5 全电流定律与磁路欧姆定律.....	43
§2-6 铁磁物质的磁性.....	43
§2-7 电磁感应.....	45
§2-8 自感与互感.....	45
§2-9 涡流.....	51

第三章 单相交流电路.....54

§3-1 交流电的产生.....	54
§3-2 交流电的相位与相位差.....	57
§3-3 正弦交流电的有效值.....	61
§3-4 正弦交流电的图示法.....	63
§3-5 纯电阻电路.....	67
§3-6 纯电感电路.....	70
§3-7 纯电容电路.....	74
§3-8 电阻和电感的串联电路.....	78
§3-9 电阻、电感和电容的串联电路.....	81
§3-10 电阻、电感和电容的并联电路.....	85

第四章 三相交流电路.....92

§4-1 三相交流电概述.....	92
§4-2 三相负载的星形连接.....	97
§4-3 三相负载的三角形连接.....	102

§4-4 三相电功率.....	104
-----------------	-----

§4-5 三相功率的测量.....	107
-------------------	-----

第五章 变压器.....113

§5-1 概述.....	113
§5-2 变压器的构造和原理.....	113
§5-3 三相变压器.....	118
§5-4 变压器的并联运行.....	122
§5-5 特殊变压器.....	123

第六章 异步电动机.....127

§6-1 异步电动机的结构.....	127
§6-2 异步电动机的工作原理.....	128
§6-3 异步电动机的转差率及其与转子各量的关系.....	133
§6-4 异步电动机的转矩和机械特性.....	134
§6-5 异步电动机的铭牌数据.....	136
§6-6 异步电动机的运行.....	138

第七章 直流电动机.....146

§7-1 直流电动机的构造和工作原理.....	146
§7-2 直流电动机.....	149
§7-3 直流电动机的励磁分类和技术数据.....	150
§7-4 直流电动机的启动和反转.....	153
§7-5 直流电动机的机械特性和调速.....	154

第八章 晶体管.....159

§8-1 半导体及其特性.....	159
§8-2 晶体二极管.....	162
§8-3 晶体三极管.....	163
§8-4 晶体三极管的特性曲线及参数.....	166

第九章 晶体管放大电路.....172

§9-1 放大电路的基本分析方法.....	172
§9-2 晶体管等效的概念及应用.....	183
§9-3 多级放大器.....	191
§9-4 功率放大器.....	194

第十章 直流稳压电源.....206

§10-1 整流滤波电路.....	206
§10-2 稳压原理.....	213

§10-3 串联型稳压电路.....	216	§12-2 门电路.....	230
第十一章 晶体管振荡器	221	§12-3 双稳态触发器.....	233
§11-1 概述	221	§12-4 其它单元脉冲电路.....	236
§11-2 变压器耦合的 $L-C$ 振荡器	221	第十三章 可控硅及其应用	244
§11-3 自耦变压器耦合的 $L-C$ 振荡器	223	§13-1 可控硅元件.....	244
第十二章 脉冲技术	228	§13-2 可控整流电路.....	247
§12-1 预备知识.....	228	§13-3 可控硅的触发电路.....	261

第一章 直流电路

§ 1-1 电 路

一、电路和电路图

电路是电流流经的路径。它是由电源、负载和连接导线所组成。大至一个电力系统,小至日常用的手电筒,以及复杂的无线电电路,无不如此。

各种交流、直流发电机、蓄电池、不同规格的干电池等都是电源。它们是将其它形式的能量(机械能、热能、光能、原子能等)转换成电能的装置;电灯、电炉、电动机、扬声器等都是负载,它们是消耗电能的装置;而连接导线是电源和负载之间不可缺少的部分。通过导线等连接才使电源和负载构成电流的通路,以实现电能的转换和传输,如图 1-1。

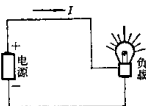


图 1-1

此外,在电路中还有其它装置,如控制电路开闭状态的开关,安全保护装置及各种检测仪表等。

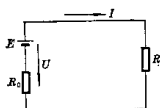


图 1-2

虽然电源和负载的种类很多,型式不一,但其本质都是相同的。因此,为了突出其本质,常采用一些规定的电工符号,将具体电路加以精炼和概括,这种图形称为电路图。如图 1-2 就是将图 1-1 用通用的电工符号表示的电路图。但是应指出,在电路图中,并不反映电源、负载等几何尺寸及其实际位置,仅仅突出地表现电路的本质及它

们之间电的关系,这样便于绘制和分析。

二、电路中基本物理量

为了深入地分析研究各种电气设备的工作和特点,有必要复习一下电学的基本物理量。

1. 电流

电路中电荷的定向运动就形成电流,如图 1-3。应该指出,在金属导体中形成电流的是自由电子;而在电解液中则是正、负离子。

为了表示电路中电流的大小,我们采用“电流强度”这个物理量。电流强度的意义是指单位时间内通过导体截面的电量,如在 Δt 时间内通过导体截面的电量为 ΔQ ,则电量与时间的比值

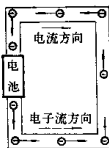


图 1-3

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

叫电流强度,简称电流。

若通过导体截面的电量不随时间而改变,则该电流值是恒定的,称为直流,用字母 I 表示

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-2)$$

本章只研究在恒定电流的作用下各种电路的特点和规律。

在实用单位制中,电流的单位为安培,简称安,用符号 A 表示。常用的辅助单位为千安 kA 及毫安 mA、微安 μA 等。它们之间的换算关系为

$$1[A] = 10^3[mA] = 10^6[\mu A] = 10^{-3}[kA]$$

习惯上,将正电荷移动的方向,定为电流的正方向,如图 1-3 所示。

在电路的分析和计算中,常常为了方便,我们任意假定电流的正方向,计算的结果若电流数值为正,则说明电流的实际流动方向与原假定的正方向相同;若电流数值为负,则说明电流的实际流动方向与原假定的正方向相反。

因此,电流值的正与负是针对任意选定的正方向而言的,离开所假定正方向而谈电流的正与负是没有意义的。

2. 电压

电压是度量电场力做功本领的物理量。在图 1-4 中, a 为电源正极, b 为电源负极。我们把电场力将单位正电荷(如 1 库仑)从 a 点移到 b 点所做的功,叫 a 、 b 两点间的电压,用符号 U_{ab} 表示,即

$$U_{ab} = \frac{A_{ab}}{Q} \quad (1-3)$$

式中 A_{ab} 是电场力将 Q 库仑电荷从 a 点移到 b 点所做的功。

习惯上,将正电荷受电场力的方向,定为电压的正方向,如图 1-4 所示。

在实际运算中,为了计算方便,与电流一样,也任选一个方向定为电压的正方向,一般用下标表示正方向,如 U_{ab} 表示正方向从 a 指向 b 。选定正方向后,若电压的实际方向与正方向相反,则取“-”;相同,则取“+”。

可以证明,在恒定电场中,任意两点间的电压只与这两个点(起点和终点)的位置有关,和移动电荷的路径无关。

在实用单位制中,功的单位是焦耳,电量的单位是库仑,于是电压的单位是伏特。简称伏,用符号 V 表示。常用的辅助单位还有毫伏 mV、微伏 μV 、千伏 kV 等,它们之间的关系为

$$1[V] = 10^3[mV] = 10^6[\mu V] = 10^{-3}[kV]$$

3. 电动势

在电路中,如仅仅存在电场力是不可能维持恒定电流的。这是由于电场力在推动正电荷做功的同时,电场力本身也在逐渐减少。

为了维持在电路中流过恒定的电流,就必须设法不断地向电路补充能量。只有使电路的两端维持恒定的电场力,通过负载的恒定电流才能实现。这种向电路补充能量的装置叫电源。

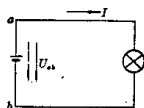


图 1-4

若将电源接于带负载的导线上, 在电源的内部借助于外力(或称电源力)将物体中的正、负电荷强行分开(这可通过导体在磁场中运动而获得, 详见第二章), 就在电源中形成了一个正、负电荷互相吸引的电场力, 因此, 在电源内部的正、负电荷除了受到电源力作用外, 还要受到一个电场力的作用。

如图 1-5, 设电场力为 F , 电源力为 F_y , 当电源力开始作用时, 电场力还很弱, 即 $F_y > F$; 随着正负电荷定向地逐渐积累, F 也逐渐增大。

当 $F_y = F$ 时, 则在电源的两端形成了稳定的电场力, 使“电荷的分离”的工作停止。

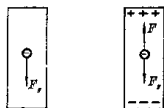


图 1-5

若将电源与负载接通, 则正电荷在电场力的推动下形成电路中的电流。随着电流的移动, 电场力逐渐减少。这时 $F_y > F$, 电源力又不断分离电荷, 使电场力增大。

所以, 整个电路就是在这种动态平衡的情况下进行工作的。

为了定量地表示电源力 F_y 分离电荷做功的本领, 我们引入了电动势这个物理量。如果在电源力的作用下, 分离的电荷量为 Q , 而所消耗的功为 A , 则功 A 与电量 Q 的比值, 称为电源的电动势, 并用符号 E 表示。

$$E = \frac{A}{Q} \quad (1-4)$$

因此, 电源电动势在数值上等于在电源力的作用下, 移动单位正电荷所做的功。

综上所述可知, 电动势是衡量电源力作功的物理量。习惯上, 将正电荷所受电源力的方向定为电动势的正方向。它的单位和电压的相同, 亦为伏。

§ 1-2 电 阻

金属导体中的自由电子在定向移动时, 将遇到一定的阻碍, 称为电阻, 常用符号 R 或 r 表示。

实验证明, 金属导体电阻 R 的大小与导体的长度 l 成正比, 与导体的断面积 S 成反比, 即写成等式

$$R \propto \frac{l}{S} \quad R = \rho \frac{l}{S} \quad (1-5)$$

式中 ρ ——导体的电阻率(或称电阻系数), 它是由材料的导电性能所确定的常数。其单位为欧·毫米²/米;

l ——导体的长度, 单位为米;

S ——导体截面积, 单位为毫米²。

电阻的单位是欧姆, 简称欧, 用符号 Ω 表示。其辅助单位为千欧 $k\Omega$ 或兆欧 $M\Omega$ 。其换算关系为

$$1[\Omega] = 10^{-3}[k\Omega] = 10^{-6}[M\Omega].$$

由式(1-5)可以看出, ρ 在数值上等于长度为 1 米、断面积为 1 毫米² 的导体的电阻值。在

表 1-1 中列举了一些常用导电材料的电阻率。

表 1-1 常用导电材料的主要性能*

材 料 名 称	20°C时的电阻率 (欧·毫米 ² /米)	电阻温度系数 (1/°C)
银	0.016	0.00361
铜	0.0172	0.0041
铝	0.029	0.00423
钨	0.049	0.0044
锌	0.059	0.0039
镍	0.073	0.00621
铁	0.0978	0.00625
铂	0.106	0.00398
康铜(54%铜, 46%镍)	0.50	0.00004
锰铜(86%铜, 12%锰, 2%镍)	0.43	0.00002

* 表 1-1 给出的是近似值。这些值随着材料的纯度和成份的不同而有所变化。

从表中可见,除了贵金属外,铜、铝的电阻率比较小,所以是较好的导电材料。因此,广泛地用它们来绕制电动机、变压器的线圈,制做各种导线等。

从表中还可看出,锰铜、康铜等合金材料的电阻率比铜要大几十倍,它们是做电阻丝的好材料,应用这些电阻丝可制成不同阻值的线绕电阻、电阻炉、电烙铁芯、变阻器、电阻箱等元件。

导体电阻不是固定不变的,实践表明,它与温度有关,可用公式表示如下

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha(t_2 - t_1)] \quad (1-6)$$

式中 R_2 与 R_1 分别表示温度在 t_2 和 t_1 时的电阻,单位是欧姆; α 表示导体的电阻温度系数,即温度升高 1°C 时导体电阻的相对增量,见表 1-1。

例 1-1 电机制造厂制造大型电机时,就在内部放上铂丝电阻元件。电机运行时,可随时测得其内部温度。若已知 20°C 时测得电阻 $R_1 = 49.5$ 欧,电机运行中,测得电阻 $R_2 = 60.9$ 欧,求电机内部的温度为多少度?

解 由式(1-6)得

$$t_2 = t_1 + \frac{R_2 - R_1}{\alpha R_1}$$

由表 1-1 查得铂丝的 $\alpha = 0.00398$ 代入上式,得

$$t_2 = 20 + \frac{60.9 - 49.5}{0.00398 \times 49.5} = 20 + 58 = 78^\circ\text{C}$$

电机内部温度为 78°C,而电机允许最高温度为 105°C,可以安全运行。

§ 1-3 欧姆定律

一、欧姆定律

电阻 R 两端在电压 U 的作用下,会有电流通过,如图 1-6。实践证明:流过电阻 R 的电

流 I ，与电阻两端的电压 U 成正比，与电阻成反比。这个结论叫做欧姆定律，可表示为

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-7)$$

式中 U 以伏为单位， I 以安为单位， R 以欧为单位。

从式(1-7)可以看出，如果电压 U 一定，那么电阻 R 越小时，则通过电阻的电流 I 越大；反之，当电阻 R 越大时，通过电阻的电流 I 越小。

欧姆定律还可写成 $U = IR$ 这样的形式。从公式可以看出，当通过电阻 R 中的电流 I 一定时，若电阻值 R 越大则加于电阻两端的电压越大；反之，在一定的电流下，电阻越小则加于电阻两端的电压也越小。换言之，通过 R 的电流为一定时， R 越大则在电阻 R 上所产生的电压降越大；反之， R 越小，则在电阻 R 上的电压降也越小。

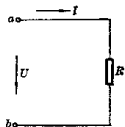


图 1-6

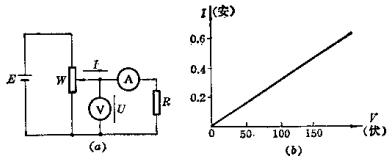


图 1-7

一段电阻中的电压和电流的关系亦可通过图 1-7(a) 的方法直接测出。

在图(a)中， W 为可变电阻器(或称为电位器)，通过其滑动端可改变加于电阻 R 上的电压值。这样每改变一个位置，加于电阻 R 上的电压值 U 与通过电阻 R 的电流值 I ，可直接由仪表读出。若逐渐改变滑动端的位置，就可得出一系列的加于 R 上的电压数值和相应的电流数值，将电压与电流之值用图描绘出来，即可得到电阻 R 的伏安特性曲线，如图 1-7(b)。若描绘出来的是一直线，则说明该电阻的阻值不变，具有这种性质的电阻称为线性电阻。若描绘出来是一曲线则说明该电阻的阻值是变化的，这种电阻称为非线性电阻。

在此，我们仅针对线性电阻应用欧姆定律。以后除非特别说明，一般电阻均视为线性电阻。

二、电阻的连接

1. 电阻的串联

把几个电阻首、尾相连，构成无分支的电路，称串联电路。如图 1-8(a) 所示。

串联电路具有如下特点：

① 串联电路的等效电阻 R ，等于各串联电阻之和，即

$$R = R_1 + R_2 \quad (1-8)$$

② 串联电路的总电压 U ，等于加在各串联电阻两端的电压之和，即

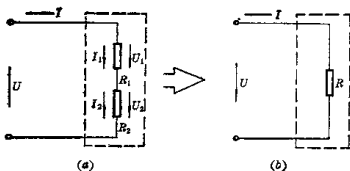


图 1-8

$$U = U_1 + U_2 \quad (1-9)$$

③ 串联电路的电流等于通过各串联电阻的电流,即

$$I = I_1 = I_2 \quad (1-10)$$

④ 串联电路中,每个电阻上分得的电压和各串联电阻的大小成正比,即

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad (1-11)$$

即电阻大的,分得电压大;电阻小的,分得电压小。将式(1-11)改写成

$$U_1 = \frac{R_1}{R_2} U_2 = \frac{R_1}{R_2} (U - U_1)$$

若各段电阻上的电压用总电压和总电阻来表示,则上式可写成以下形式

$$U_1 = \frac{R_1}{R} U \quad \text{及} \quad U_2 = \frac{R_2}{R} U \quad (1-12)$$

式(1-12)说明,每个串联电阻上分得的电压,决定于这个电阻和总电阻的比值。若适当选择 R_1 和 R_2 的数值,就可以在每个电阻上获得相应的电压。

串联电路在生产实践中应用很广。如电压表量程的扩大,电动机串入起动电阻来限制起动电流等,都是串联电路的具体应用。

例 1-2 今有一只内阻为 27 欧的 0~1 毫安的表头,与 1473 欧的电阻串联,构成一只电压表。问这只电压表最大量程是多大?

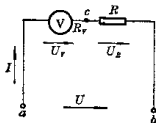


图 1-9

解 当表头指针指到满刻度时(本例中,即通过表头的电流为 1 毫安时),电压表两端的电压值,叫这只电压表的最大量程,于是上述问题可归结为

已知线路电流 $I=1$ 毫安,两个串联负载的电阻为 $R_r=27$ 欧; $R=1473$ 欧。求总电压 $U=?$

根据串联电路特点 $U=I(R+R_r)$

$$U=1 \times 10^{-3} \times (27+1473)=1.5 \text{ 伏}$$

故这只电压表的最大量程为 1.5 伏。

由于串联电阻在此起到了承担多余部分电压的作用,故称该电阻为倍压电阻。

例 1-3 一个 $W=270$ 欧的电位器,两边分别与 $R_1=360$ 欧, $R_2=560$ 欧的电阻串联组成一分压电路,如图 1-10。该电路的输入电压 $U_1=12$ 伏,试求输出电压 U_2 的变化范围。

解 当电位器 W 的滑动端移到最下边时,270 欧与 360 欧电阻串联时,输出电压 U_2 为

$$\begin{aligned}
 U_2 &= U_1 \frac{R_2}{R_1 + W + R_2} \\
 &= 12 \times \frac{560}{360 + 270 + 560} \\
 &= 12 \times \frac{560}{1190} \approx 5.6 \text{ 伏}
 \end{aligned}$$

把电位器的滑动端移到最上边时,使 270 欧电阻全部与 560 欧电阻串联时,这时的输出电压是

$$\begin{aligned}
 U_2 &= U_1 \frac{W + R_2}{R_1 + W + R_2} \\
 &= 12 \times \frac{270 + 560}{360 + 270 + 560} = 8.4 \text{ 伏}
 \end{aligned}$$

计算结果表明,这个分压电路当调节 270 欧的电位器时,可使输出电压在 5.6~8.4 伏的范围内变化。

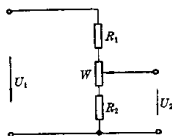


图 1-10

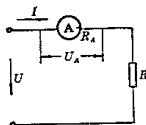


图 1-11

例 1-4 用内阻 $R_A = 0.0075$ 欧的电流表测量一个电炉电流,如图 1-11 所示。电流表的读数为 9.1 安,问电流表两端的电压降 U_A 为多少?

解 电流表两端的电压降为

$$U_A = IR_A = 9.1 \times 0.0075 = 0.068 \text{ 伏}$$

由于串联电路的电流处处相等的道理,要测出一个电路的电流,电流表必须串联在待测电路中。但由于电流表有内阻 R_A ,串联后就相当于在原电路中,增加了一个串联电阻 R_A ,如图 1-11。这时线路电流由原来的 $\frac{U}{R}$ 减少到 $\frac{U}{R_A + R}$ 。因此,为了测量线路电流而串入电流表后,必然会改变电路原来的状态,引起测量误差。若电流表的内阻越小,则对线路电流影响越小,测量误差也就越小。

2. 电阻的并联

将几个电阻联接在相同的两点之间,称为电阻的并联,如图 1-12(a)。

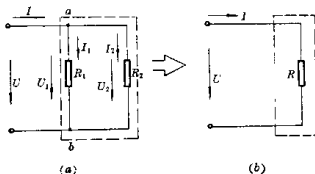


图 1-12

并联电路具有如下特点:

① 并联电路的等效电阻的倒数等于各个并联电阻的倒数和,即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (1-13)$$

或

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

② 并联电路的总电压等于各个并联电阻两端的电压,即

$$U = U_1 = U_2 \quad (1-14)$$

③ 并联电路的总电流等于通过各个并联电阻的电流之和,即

$$I = I_1 + I_2 \quad (1-15)$$

④ 并联电路中,每个支路的电流和支路电阻成反比,即

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad (1-16)$$

可见,通过大电阻的电流小,通过小电阻的电流大。将式(1-16)改写成

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1} I_2 = \frac{R_2}{R_1} (I - I_1)$$

整理得: 通过并联支路的电流用总电流 I 来表达

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I$$

及

$$I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I \quad (1-17)$$

例 1-5 如图 1-13 有一只内阻 $R_A = 2000$ 欧, $0 \sim 50$ 微安的表头, 要求扩大量程 100 倍, 以便测量 $0 \sim 5$ 毫安的电流。试问应与表头并联一只多大的分流电阻?

解 这个问题归结为, 已知线路总电流 $I = 5$ 毫安, $I_A = 50$ 微安, $R_A = 2000$ 欧, 而求并联支路 R 的数值。

由于通过表头电流的最大值为 50 微安, 故加于表头两端的电压值是固定的, 即

$$U_A = I_A R_A = 50 \times 10^{-6} \times 2 \times 10^3 = 0.1 \text{ 伏}$$

又根据并联电路, 电路总电流和支路电流的关系

$$I = I_1 + I_A, \text{ 可求得}$$

$$I_1 = I - I_A = 5 \times 10^{-3} - 50 \times 10^{-6} = 4.95 \times 10^{-3} \text{ 安}$$

根据欧姆定律便有

$$R = \frac{U}{I_1} = \frac{0.1}{4.95 \times 10^{-3}} \approx 20 \text{ 欧}$$

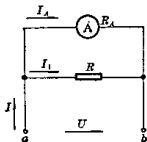


图 1-13

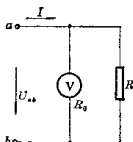


图 1-14

由上面计算可见：电阻 R 比表头内阻低得很多，绝大部分电流都由 R 中通过，我们将 R 称为分流电阻。

例 1-6 如图 1-14，今有一只量程为 400 伏的电压表，它的内阻为 $R_0=50$ 千欧，用它测量 400 伏电压时，流经电压表的电流是多少？如果用这只电压表测量 300 伏电压时，流经电压表的电流又是多少？

解 当被测电压为 400 伏时，通过电压表的电流为

$$I = \frac{U_{ab}}{R_0} = \frac{400}{50 \times 10^3} = 8 \text{ 毫安}$$

当被测电压为 300 伏时，则

$$I = \frac{U_{ab}}{R_0} = \frac{300}{50 \times 10^3} = 6 \text{ 毫安}$$

可见，电压表内阻一定，加在电压表两端的电压越大，流经电压表的电流也越大，即电流与所加电压成正比。

应注意，由于并联电路各支路电压相等的道理，测量电压时，电压表必须并联于待测电路。但由于电压表有内阻，故电压表与待测电路并联后，必然会使电路电阻发生变化，从而使电路电压重新分配（如图 1-14，在电压表并联前，电路中的电阻是负载电阻 R ，而并联电压表后，线路等效电阻是 $\frac{R_0 R}{R_0 + R}$ ），引起测量误差。从理论分析可知，电压表内阻比待测负载电阻大的倍数越多，误差越小。

3. 电阻的复联

在电路中，其电阻既有串联连接又有并联连接，这种由电阻串、并联组合的电路称为复联电路。

对复联电路亦不外乎用欧姆定律求每个电阻的电压降或通过每个电阻的电流。求解复联电路的步骤，以图 1-15 为例说明如下：

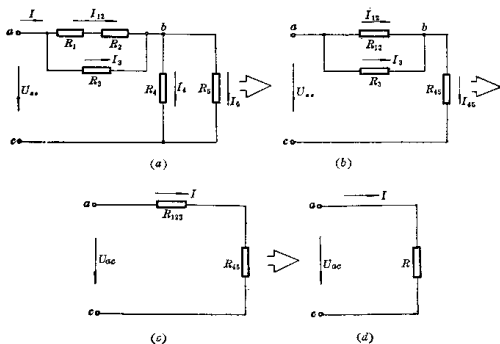


图 1-15

1. 首先结合图 1-15 计算电路的等效电阻 R

① 求 bc 段的等效电阻

$$R_{45} = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5}$$

② 求 ab 段的等效电阻

$$R_{123} = \frac{(R_1 + R_2) R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

③ 电路的等效电阻

$$R = R_{123} + R_{45}$$

2. 用欧姆定律计算电路的总电流

$$I = \frac{U_{ac}}{R} = \frac{U_{ac}}{R_{123} + R_{45}}$$

3. 求 ab 段、 bc 段的电压降及各支路的电流

① bc 段的电压降

$$U_{bc} = IR_{45}$$

② ab 段的电压降

$$U_{ab} = IR_{123} \quad \text{或}$$

$$U_{ab} = U_{ac} - U_{bc}$$

③ 通过支路 R_4 的电流

$$I_4 = \frac{R_5}{R_4 + R_5} I$$

④ 通过支路 R_5 的电流

$$I_5 = \frac{R_4}{R_4 + R_5} I$$

⑤ 通过支路 R_{12} 的电流

$$I_{12} = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} I$$

⑥ 通过支路 R_3 的电流

$$I_3 = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R_3} I$$

⑦ 电阻 R_1 上的电压降

$$U_{R1} = I_{12} R_1$$

⑧ 电阻 R_2 上的电压降

$$U_{R2} = I_{12} R_2$$

例 1-7 在图 1-16 中, $R_1=12$ 欧, $R_2=8$ 欧, $R_3=20$ 欧, $R_4=10$ 欧, $R_5=20$ 欧, $U_{ab}=10$ 伏。试求:

① 电路总电流为多少?

② R_2 、 R_4 及 R_5 各电阻两端电压多大?

解 将图 1-16(a) 改成图 1-16(b) 的等效电路。

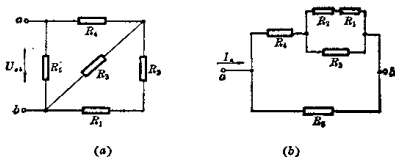


图 1-16

$$R_{12} = R_1 + R_2 = 12 + 8 = 20 \text{ 欧}$$

$$R_{123} = \frac{R_{12} R_3}{R_{12} + R_3} = \frac{20 \times 20}{20 + 20} = 10 \text{ 欧}$$

$$R_{1234} = R_{123} + R_4 = 10 + 10 = 20 \text{ 欧}$$

$$R_{ab} = \frac{R_{1234} R_5}{R_{1234} + R_5} = \frac{20 \times 20}{20 + 20} = 10 \text{ 欧}$$

$$I_a = \frac{U_{ab}}{R_{ab}} = \frac{10}{10} = 1 \text{ 安}$$

$$U_4 = I_a R_4 = (I_a - I_b) R_4 = \left(I_a - \frac{U_{ab}}{R_5} \right) R_4$$

$$= \left(1 - \frac{10}{20} \right) \times 10 = 5 \text{ 伏}$$

$$U_3 = U_{ab} - U_4 = 10 - 5 = 5 \text{ 伏}$$

$$U_5 = U_{ab} = 10 \text{ 伏}$$

即电路总电流为 1 安; R_3 、 R_4 和 R_5 各电阻两端电压分别为 5 伏、5 伏和 10 伏。

三、欧姆定律在全电路中的应用

图 1-6 是一段电路。式(1-7)所表达的关系通常叫做一段电路的欧姆定律。图 1-17 是一个简单的闭合电路。 R_0 是电源内阻, 为了便于计算, 把它画在电源电动势 E 的外边; R 为外接负载电阻。这样, 电源内阻 R_0 与负载电阻 R 就形成了串联电路, 根据式(1-9)的电压关系, 电源电动势 E 应等于负载上的电压 U 和内阻 R_0 两端电压降之和, 即

$$E = U + IR_0 = I(R + R_0)$$

亦即

$$I = \frac{E}{R + R_0} \quad (1-18)$$

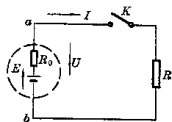


图 1-17

式(1-18)表明, 在只有一个电源的闭合电路中, 通过电路的电流与电动势成正比, 与全电路的电阻(外电路负载电阻和电源内阻之和)成反比。通常把式(1-18)表达的关系叫闭合回路的欧姆定律。式(1-18)还可以改写成

$$U = E - IR_0 \quad (1-19)$$

从上式可以看出, 当电源电动势 E 为定值时, 通过负载的电流 I 越大, 负载两端电压越低, 只有当内阻 R_0 或负载电流 I 很小时, 以致在内阻上的电压降 IR_0 与电源电动势 E 相比可以忽略时, 才能近似地认为负载两端的电压 U 等于电源电动势 E 。

电源两端的电压称为端电压。显然,当忽略连接导线上的电压降时,电源的端电压等于负载两端的电压 U 。因此,式(1-19)同时也表示了端电压 U 与电源电动势 E 的关系。

电源两端断开不接负载时,称为空载,也称电源开路。开路时,电路中无电流通过,即 $I=0$ 。因此,在内阻 R_0 上的电压降 IR_0 也为零。这时电源端电压 $U_0=E$, 亦即电源电动势就是电源开路时的端电压。

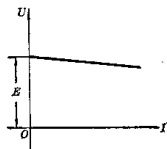


图 1-18

如果将式(1-19)这一关系用图形表示出来,则此关系称为电源的外特性曲线。当 R_0 为线性电阻时,其外特性曲线为一向下倾斜的直线,如图 1-18 所示。当 $I=0$ 时,即电源空载,此时 $U_0=E$; 随着输出电流 I 的增加,电源端电压按图示直线规律下降;当电源内阻 R_0 越大时,则曲线向下倾斜得越厉害。

电源两端负载很小时($R \rightarrow 0$),称为短路。此时电路中短路电流 $I = \frac{E}{R_0}$, 因为内阻 R_0 很小,导致短路电流 I 很大,特别是强电系统,发生短路是严重事故! 为了防止短路事故,常在电路中串联低熔点的保险丝。当电流超过一定值时,就迅速烧断,切断电路。

例 1-8 一个电池给一个电阻负载供电,如图 1-19。当电位器电阻 $R_1=1$ 欧时,电流表指示值是 $I_1=1$ 安;当电位器电阻 $R_2=25$ 欧时,电流表指示值是 $I_2=0.5$ 安。试求电源电动势 E 和内阻 R_0 各为多少?

解 由于电源电动势 E 及其内阻 R_0 不变,故根据题意可列出下列等式

$$E = I_1(R_0 + R_1) = I_2(R_0 + R_2)$$

$$\begin{aligned} \text{解得} \quad R_0 &= \frac{I_2 R_2 - I_1 R_1}{I_1 - I_2} = \frac{0.5 \times 25 - 1 \times 1}{1 - 0.5} \\ &= 0.5 \text{ 欧} \end{aligned}$$

将 R_0 代入原式

$$E = I_1(R_0 + R_1) = 1 \times (0.5 + 1) = 1.5 \text{ 伏}$$

可得,该电源电动势 $E=1.5$ 伏;内阻 $R_0=0.5$ 欧。

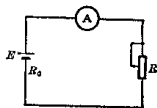


图 1-19

§ 1-4 电功率与电能

一、电功率

如图 1-20,在外加电压 U_{ab} 作用下,通过电阻 R 的电流为 I 。则根据式(1-3)知,电场力推动 Q 库仑电荷由 a 点移到 b 点所做的功为

$$A_{ab} = U_{ab} Q$$

我们把单位时间内,电场力做的功,叫电功率,简称功率,用符号 P 表示,即

$$P = \frac{A_{ab}}{t} = \frac{U_{ab} Q}{t} = U_{ab} I$$

$$P = UI$$

$$(1-20)$$

式(1-20)说明,电阻消耗的功率等于电阻两端电压与电流的乘积。

对于线性电阻电路,运用欧姆定律,上式还可改写成

$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (1-21)$$

在实用单位制中,功率的单位是瓦,并用符号W表示。还常用千瓦kW、毫瓦mW等。它们的换算关系为

$$1[W] = 10^{-3}[kW] = 10^3[mW]$$

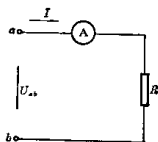


图 1-20

例 1-9 一个标有 220 伏、100 瓦的灯泡和另一个标有 220 伏、60 瓦的灯泡并联在 220 伏的电源上,问哪一个比较亮? 假若把它们串联在 220 伏电源上,它们消耗的实际电功率各是多少? 哪一个比较亮(假设灯丝电阻不变)?

解 两个灯泡并联时,每个灯泡上的电压都是 220 伏,因此,它们的实际电功率分别为 100 瓦和 60 瓦,因为 100 瓦灯泡的实际功率大,所以它比 60 瓦灯泡亮。

如果把两个灯泡串联在 220 伏电源上,它们发出的实际功率不再是 100 瓦和 60 瓦了。

要计算两个灯泡串联时的实际功率,必须先知道,灯泡的电阻和串联时通过它们的电流。

因为,当电压为 220 伏时,它们的功率分别为 100 瓦和 60 瓦,所以根据 $P = \frac{U^2}{R}$ 可求出

100 瓦灯泡电阻

$$R_1 = \frac{U^2}{P_1} = \frac{220^2}{100} = 484 \text{ 欧}$$

60 瓦灯泡电阻

$$R_2 = \frac{U^2}{P_2} = \frac{220^2}{60} = 807 \text{ 欧}$$

当两个灯泡串联时,电流相等,其值为

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2} = \frac{220}{484 + 807} = 0.17 \text{ 安}$$

这时根据 $P = I^2 R$ 可以求出它们的实际电功率分别为

100 瓦灯泡实消耗电功率

$$P'_1 = I^2 R_1 = 0.17^2 \times 484 = 14 \text{ 瓦}$$

60 瓦灯泡实消耗电功率

$$P'_2 = I^2 R_2 = 0.17^2 \times 807 = 23 \text{ 瓦}$$

可见,在这种情况下,60 瓦灯泡消耗的电功率大,所以它比 100 瓦灯泡亮。

从上面计算结果,给我们以启示:一个灯泡必须在一定的条件下,才能获得最大功率;任一个负载也是如此。

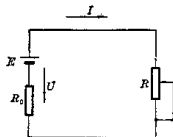


图 1-21

如果一个负载,接在没有内阻的电源上,这时 $U = E$, 则根据

$P = \frac{U^2}{R}$ 这一公式可以看出,当负载电阻 R 越小时,则负载的功率

越大。如果电源内部有内阻 R_0 , 情况就不同了。如图 1-21, 这时,负载电阻 R 太大或太小都不能获得最大功率。当负载电阻很大时,电路接近于开路状态, $I \rightarrow 0$; 而当负载电阻很小时,电路接近于短路状态, $U \rightarrow 0$ 。显然,负载在开路和短路状态下都不会获得