



乡镇企业 电工技术

闵有毅 主编

XIANGZHEN QIYE DIANGONG JISHU

上海科学技术文献出版社

前 言

为了适应乡镇企业迅速发展的需要,我们编写了“乡镇企业电工技术”这本书。

全书共分七章,包括电工基础知识,乡镇企业常用电工仪表,变压器,电动机,低压电气设备及继电-接触控制,供电与照明,电子基础知识及实用线路等。

从乡镇企业的实际出发,我们在写法上尽量做到通俗易懂、深入浅出,力求通过典型设备、典型线路、典型设计方法的介绍,使读者掌握乡镇企业常用电气设备的分析方法。书中所用的文字及图形符号基本符合国家标准,对产品型号注意新旧交替,既介绍目前尚在大量使用的旧产品、又介绍正在推广使用的新产品。

本书适合乡镇企业电气技术人员及农村电气工作人员使用,经适当选择,可作电工培训教材。也可作为一般企业电工的自学读物。

本书由闵有毅、刘式雍、张平官、薛汉辉四位同志编写,由闵有毅同志负责主编。在编写过程中还得到了高级工程师周行浩、赵乃勤同志的指导,在此表示感谢。

由于编者水平有限,实际经验不足,书中错误缺点在所难免,请广大读者批评指正。

编 者

1990年1月

目 录

第一章 电工基础知识概要.....	1
第一节 直流电路.....	1
一、电路及其基本物理量.....	1
二、电路的基本定律.....	4
三、电阻的连接方式.....	9
四、电能和电功率.....	12
五、电路的三种状态.....	13
第二节 电容器及其充电和放电.....	15
一、电容器和电容.....	15
二、电容器的连接.....	16
三、电容器的充电和放电.....	17
第三节 磁场和磁场对载流导体的作用.....	18
一、磁铁的磁现象.....	18
二、电流的磁效应.....	18
三、磁场的基本物理量.....	19
四、磁场对载流导体的作用.....	20
第四节 电磁感应.....	21
一、电磁感应现象.....	21
二、感应电动势的方向.....	22
三、感应电动势的大小.....	23
四、交流发电机的工作原理.....	23
五、自感和互感.....	24
六、涡流.....	25
第五节 正弦交流电的概念.....	26
一、什么是交流电.....	26
二、交流电的特征.....	26
三、交流电的有效值.....	29
四、正弦交流电的相量表示法.....	29
第六节 单相交流电路.....	33
一、电阻电路.....	33
二、电感电路.....	34
三、电容电路.....	37
四、电阻与电感串联的交流电路.....	39
五、电感性负载与电容器并联的交流电路.....	44

第七节 三相交流电路	47
一、三相交流电源	47
二、三相负载的接法	50
三、三相电路的功率	56
第二章 乡镇企业常用电工仪表及其使用	58
第一节 电工仪表的一般知识	58
一、电工仪表的分类	58
二、电工仪表的表面符号	58
三、直读式仪表的主要结构和作用原理	58
四、仪表的误差和准确度	60
第二节 电磁系电流表与电压表	60
一、电磁系仪表的结构和工作原理	61
二、电磁系电流表和电压表	61
第三节 万用表	63
一、磁电式万用表的结构和工作原理	63
二、磁电式万用表的面板介绍	65
三、磁电式万用表标度尺的正确阅读	66
四、万用表的正确使用	67
第四节 功率表及三相功率的测量	63
一、功率表的结构和工作原理	68
二、功率表的正确连接和读数	68
三、三相交流电路的功率测量	70
第五节 电度表及三相电能的测量	70
一、电度表的结构和工作原理	71
二、三相电路电能的测量	71
第六节 兆欧表	71
一、兆欧表的结构和工作原理	72
二、兆欧表的使用	72
第三章 变压器	74
第一节 变压器的作用和分类	74
第二节 变压器的结构和工作原理	74
一、变压器的结构	74
二、变压器的工作原理	76
第三节 电力变压器的型号及技术数据	79
第四节 电力变压器的常见故障及其处理方法	81
第五节 几种常用的变压器	82
一、小型单相电源变压器	82
二、自耦变压器	83
三、电焊变压器(用于交流弧焊机)	84

四、仪用互感器和钳形表·····	85
第六节 小型变压器的计算·····	87
第四章 乡镇企业常用电动机的使用与维修 ·····	90
第一节 概述·····	90
一、常用电动机的分类·····	90
二、常用电动机的型号·····	90
第二节 三相异步电动机的结构和工作原理·····	92
一、三相异步电动机的结构·····	92
二、旋转磁场·····	94
三、异步电动机的转动原理·····	96
四、异步电动机的运行特性·····	97
第三节 三相异步电动机的使用·····	99
一、异步电动机的起动·····	99
二、异步电动机的主要技术数据·····	104
三、异步电动机的选用·····	108
第四节 三相异步电动机常见故障的分析与检修·····	110
一、异步电动机的拆卸和装配·····	110
二、三相异步电动机常见故障的分析与检修·····	111
第五节 单相异步电动机·····	117
一、工作原理·····	118
二、单相异步电动机的分类·····	118
第六节 单相异步电动机的常见故障分析与检修·····	118
第五章 乡镇企业常用电气设备的继电-接触控制 ·····	121
第一节 乡镇企业常用低压电器·····	121
一、胶盖瓷底闸刀开关·····	121
二、铁壳开关·····	123
三、组合开关·····	124
四、倒顺开关·····	124
五、自动开关·····	126
六、按钮开关·····	127
七、行程开关·····	128
八、接触器·····	128
九、继电器·····	129
十、低压电器的常见故障及维修·····	134
第二节 典型控制环节·····	138
一、三相异步电动机的直接起动·····	139
二、限位和自动往返控制电路·····	143
三、三相异步电动机的降压起动·····	145
四、制动控制电路·····	147

五、三角形-双星形双速电动机调速控制电路	151
第三节 乡镇企业常用机床和生产机械的电气控制	153
一、C620-1 型普通车床	153
二、B6050 型牛头刨床	154
三、Z35 型摇臂钻床	154
四、M7120 型平面磨床	156
五、T68 型卧式镗床	158
六、X62W 型万能铣床	162
七、5 吨桥式起重机	166
八、电气控制系统故障的检查方法	168
第六章 乡镇企业的供电和照明	170
第一节 农村电力网的组成与特点	170
一、农村电力网的组成	170
二、农村电力网的特点	171
第二节 乡镇企业的变配电所	172
一、负荷计算	172
二、变电所的主接线图	175
三、变配电所的主要电气设备	177
四、配电装置对建筑物的要求	179
五、变压器的安装方式	179
六、变电所的变压器容量和台数的确定	181
七、配电变压器的运行和维护	181
八、变压器的并联运行	183
第三节 低压配电线路	184
一、概述	184
二、架空线路的结构	185
三、车间和建筑设施低压线路的结构和敷设	187
四、导线的截面和熔断器的选择	190
五、架空线路的运行和维护	196
六、地埋线	196
第四节 接地与防雷	197
一、接地装置	197
二、防雷保护	201
第五节 电气照明	203
一、电光源	203
二、灯具	208
第七章 电子技术基础知识概要	210
第一节 二极管和整流电路	210
一、晶体二极管	211

二、单相整流滤波电路	213
三、应用举例	218
第二节 晶体三极管	219
一、晶体三极管的结构和电流放大作用	219
二、晶体三极管的特性曲线	222
三、晶体三极管的主要参数	223
第三节 晶体管放大电路	224
一、单管交流放大电路的组成及各元件的作用	224
二、交流放大电路的工作原理	226
三、放大电路的主要指标	229
四、常用稳定静态工作点的电路	231
五、多级放大电路	233
六、放大电路中的负反馈	234
第四节 晶体管放大电路的应用实例	239
一、晶体管延时控制电路	239
二、晶体管水位自动控制电路	239
三、黑光灯自动光控电路	240
四、晶体管接近开关	241
五、晶体管稳压电源	243
第五节 晶闸管及可控整流电路简介	245
一、晶闸管的外型及符号	246
二、晶闸管的工作特点	246
三、单相可控整流电路	246
四、晶闸管应用实例——CG1-30型半自动气割机电路	248
附录一 部分电力变压器的技术数据	250
附录二 常用三相异步电动机的技术数据(选录)	259
参考文献	264

第一章 电工基础知识概要

电能的生产、传输、转换、控制及使用, 各种不同结构、不同功能的电气设备, 都由基本电路所组成, 它反映了电的基本特性和规律。因此在第一章中, 首先介绍一些电的基本概念, 包括电路的组成、基本物理量、元件参数、基本定律和基本分析方法, 然后讨论直流电路、单相交流电路和三相电路。

第一节 直流电路

直流电路就是电压与电流都是恒定的电路。从直流电路开始分析电路的基本理论和方法, 不仅使问题得到简化, 便于理解和掌握, 而且只要将这些理论和方法稍加扩展, 同样适用于其它电路的分析和计算。

一、电路及其基本物理量

1. 电路的组成

电流流通的途径叫做电路, 它由电源、负载和中间环节三部分组成。图 1-1 就是一个最简单的电路。

电源: 是产生电能的设备, 即产生电流的源泉。例如蓄电池、发电机、整流电源、太阳能电池、热电偶等。它们是把其它形式的能量转换为电能的设备。

负载: 是消耗电能的设备。例如电灯、电加热器、电动机、电镀槽、扬声器等。它们是把电能转换为其它形式能量的设备。

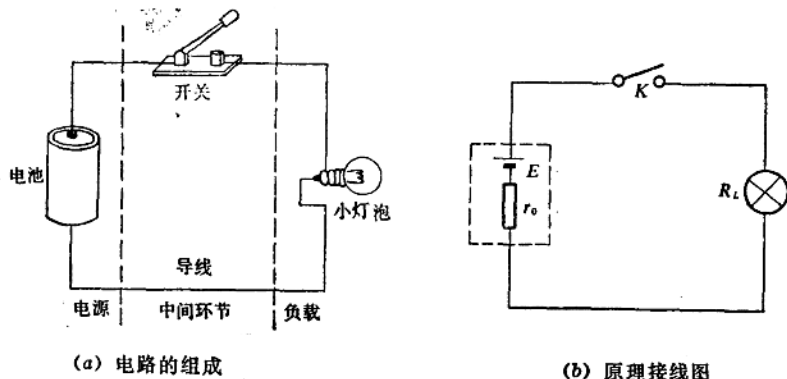


图 1-1 电路图

中间环节: 包括将电源与负载连接成闭合回路的导线、开关、熔断丝等。它的作用是把电能安全而可靠地传送给负载。

实际工作中遇到的电路要比图 1-1 的电路复杂得多, 但它们的基本组成部分都是相同

的。一般把电路内部的通路称为内电路，由负载和中间环节构成的电路称为外电路，如图 1-1(a) 所示。

由此看来，电路是指包括电能的产生、传送和运用的各种电气部件组合的总体。各种电路都可以用图形，即电路图表示出来。电路图分为装配图和原理接线图两种。装配图除了表示电路的实际接法外，还要画出有关电气设备的装置与结构，供安装时使用。原理图只表示线路的接法，并不反映电路的几何尺寸和各元件的实际形状，所有电气设备都用规定的符号来表示，并按各个电气设备的实际运行状态，把它们用线条连接起来，例如图 1-1(b) 就是图 1-1(a) 的原理接线图。我们用符号 $\mathcal{E}$ 表示电池的电动势；用 r_0 表示电池的内阻；用 R_L 表示小灯泡的电阻；用 K 表示开关。金属导线的电阻与负载电阻相比很小，一般可以忽略不计。

2. 电路的基本物理量

(1) 电流

电流是一种物理现象，即电荷有规则的定向运动。例如，金属导线中自由电子的定向运动，电解液中正负离子沿着相反方向的运动，阴极射线管中的电子流等，都是电流。

习惯上规定正电荷定向运动的方向为电流的方向。在金属导体中，电流的方向与电子运动的方向相反。在电解液中，电流的方向与正离子运动的方向相同，与负离子运动的方向相反。

电流的强弱用电流强度来表示，简称电流。电流强度在数值上等于单位时间内通过导体某截面的电量。如果在时间 t 内通过导体横截面的电量为 Q ，则电流强度为

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

在国际单位制中，电流的基本单位是安培，简称安，用符号 A 表示。如果每秒钟有 1 库仑（即 6.24×10^{18} 个电子的带电量）的电量通过导线的某一截面，这时的电流就是 1 安培。为了使用上的方便，常用的扩大和缩小单位，列写如下

$$\left. \begin{aligned} 1 \text{ 千安 (kA)} &= 10^3 \text{ 安 (A)} \\ 1 \text{ 毫安 (mA)} &= 10^{-3} \text{ 安 (A)} \\ 1 \text{ 微安 (}\mu\text{A)} &= 10^{-6} \text{ 安 (A)} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

(2) 电压和电位

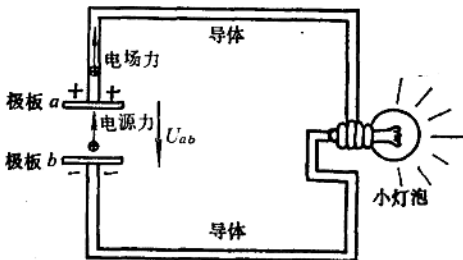


图 1-2 电荷在电场力作用下做功

我们知道，电荷在电场中会受到电场力的作用而做功，在图 1-2 中，极板 a 带正电，极板 b 带负电，因而 ab 间存在电场，如果用导线将两块极板与灯泡相连，则 a 极板上的正电荷在电场力的作用下从 a 经过灯泡移到 b ，于是形成了电流，灯泡发光，这说明电场力做了功。

为了衡量电场做功的能力，引入电压这个物理量，其定义如下：

a, b 两点间的电压 U_{ab} 在数值上等于电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功，用

公式表示为:

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

式中 Q 为由 a 点移到 b 点的电量, W 为电场力移动电荷过程中所做的功。

在图 1-2 中, 因为正电荷在电场力的推动下从 a 经过负载(灯泡)移到 b 时, 就把电能转换成其它形式的能量, 所以正电荷在 a 点具有比 b 点更大的能量, 我们把单位正电荷在电路中某点所具有的能量称为该点的电位, 电位在数值上等于电场力将单位正电荷从该点沿任意路径移到参考点所作的功, 用符号 V 表示, 例如 a 点电位用 V_a 表示, b 点电位用 V_b 表示, 显然 $V_a > V_b$ 。由此可见, 电场力对正电荷做功的方向就是电位降落的方向, 因而电压的方向(极性)由高电位端指向低电位端。在图 1-2 中, 高电位 a 端用“+”表示, 低电位 b 端用“-”表示, 图中用箭头表示电压的方向从 a 指向 b 。上述分析说明, 电压和电流的方向是一致的(都与正电荷运动方向一致)。

在电路中某两点间的电压也称为电位差, 即

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1-4)$$

就象以海平面作为计算物体所处高度的参考点一样, 计算电位时也要先指定电路中某一点为参考点, 参考点的电位规定为零, 这样, 电路中其它各点的电位才可用数值来表示。比参考点高的电位为正, 比参考点低电位为负。不指定参考点来讨论电位是没有意义的。因为电压的定义就是电位差, 所以以零电位为基准的某点电压就称为该点的电位。原则上参考点(零电位点)可以任意选定, 但习惯上认为大地的电位为零, 这是因为大地容纳电荷的能力极大, 它的电位很稳定。有些用电设备的机壳是需要接地的(在电路图中用符号“⏏”表示), 这时凡与机壳连接的各点均为零电位; 有些设备的机壳虽然不一定和大地连接, 但有很多元件都要汇集到一个公共点(在电路图中用符号“⏏”表示), 为了分析方便起见, 可规定这一点为参考点。

在国际单位制中, 电压、电位的基本单位是伏特, 简称伏, 用符号 V 表示。为了使用上的方便, 常用的电压大小单位表示如下:

$$\left. \begin{aligned} 1 \text{ 千伏(kV)} &= 10^3 \text{ 伏(V)} \\ 1 \text{ 毫伏(mV)} &= 10^{-3} \text{ 伏(V)} \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

(3) 电源电动势

在电场力的作用下, 正电荷总是从高电位端经过负载向低电位端移动形成电流, 如图 1-2 所示。但当正电荷从 a 移到 b 时, 就要与 b 极板上的负电荷中和, 使极板间的电场逐渐消失, 电流就要中断。要使电流不断地维持下去, 就必须在 a 、 b 极板之间有一种力(非电场力), 它能源源不断地把正电荷从低电位端 b 搬到高电位端 a , 电流才不会中断, 电源就能完成这个任务, 在图 1-2 中, 其电源是一个电池, 由于电池内部的化学反应产生一种外力, 能把正电荷从电池内部的负极 b 移到正极 a , 我们把这种力称为电源力。

电源源源不断地把正电荷在电源内部从低电位端搬到高电位端, 必须克服电场的阻力而做功, 这和我们把重物从低处搬到高处需克服重力场的阻力而做功是相似的。为了衡量电源做功的能力, 我们引入电动势这个物理量, 其定义如下:

电源力(非电场力)推动单位正电荷从电源的低电位端经电源内部移到高电位端所作的功, 称作电源电动势。电动势 E 用下式表达:

$$E = \frac{W}{Q} \quad (1-6)$$

式中 Q 是在电源内部被电源力移动的电量, W 是电源力所做的功。将式(1-6)与式(1-3)比较, 可以看出电动势与电压具有相同的单位。电动势与电压虽然单位相同, 但它们的物理概念是不同的。

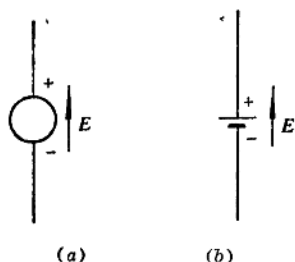


图 1-3 恒定电源电动势的符号

我们规定电动势的方向在电源内部由低电位端指向高电位端, 这一方向亦为电位升高的方向。在一个电源中, 非电能将正电荷从电源的负极送到正极作了功, 使正电荷获得了电能, 电位升高了, 因此电动势的方向是从电源的负极指向电源的正极。在电路图中用图 1-3 所示的符号表示电源。图 1-3(a) 表示一般的电源, 图 1-3(b) 表示干电池或蓄电池之类的直流电源, 其中“+”、“-”表示电源的正、负极, 箭头表示电动势的方向。

电动势与电压的大小, 可用电压表来测量。

二、电路的基本定律

1. 欧姆定律

欧姆定律是电路的基本定律之一, 它阐述流过电阻的电流与该电阻两端的电压之间的关系, 表明了电阻元件的特性。

(1) 电阻

一切导体都有电阻, 它具有将电能转换为热能(消耗电能)的作用。

导体一方面具有导电能力, 另一方面又具有阻碍电流通过的作用, 这种阻碍作用是由于电子在导体中移动时受到导体中其它不带电质点的碰撞和原子核对它的吸引力而形成的, 我们把这种阻力称为电阻, 用字母“ R ”表示。电阻大的导体, 其导电能力差。电流通过电阻会发热, 将电能转换成非电能。

我们把加在导体两端电压和流过导体的电流的比值称做电阻。衡量电阻大小的单位是欧姆, 简称欧, 用符号 Ω 表示。如果在导体两端加上 1 V(伏) 电压, 流过导体的电流是 1 A(安), 则该导体的电阻为 1 Ω (欧)。

电阻常用的扩大单位, 表示如下:

$$\left. \begin{aligned} 1 \text{ 千欧}(\text{k}\Omega) &= 10^3 \text{ 欧}(\Omega) \\ 1 \text{ 兆欧}(\text{M}\Omega) &= 10^6 \text{ 欧}(\Omega) \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

导体的电阻不仅和导体的材料有关, 而且还和导体的尺寸有关。实验证明, 在温度不变时, 导体的电阻与它的长度成正比, 与它的截面积成反比。也就是说, 导体的长度愈长, 电阻就愈大; 导体的截面积愈大, 电阻就愈小。上面的关系可以写成:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1-8)$$

式中 ρ 由导体的材料决定, 叫做导体的电阻率。在国际单位制中, R 、 l 、 S 的单位分别是欧(Ω)、米(m)、毫米²(mm²), 因此电阻率的单位是欧·毫米²/米($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)。几种常用材料在 20℃ 时的电阻率, 列在表 1-1 中。

从表 1-1 可以看出, 铝的导电能力比铜稍差些。可是, 由于铝比铜轻, 价格便宜, 我国铝

表 1-1 几种常用材料的电阻率和电阻温度系数

材 料 名 称	电阻率 $\rho(20^{\circ}\text{C})$ ($\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$)	平均电阻温度系数 α [$0\sim 100^{\circ}\text{C}$]($1/^{\circ}\text{C}$)
碳	10.0	-0.0005
银	0.0165	0.0036
铜	0.0175	0.004
铝	0.0283	0.004
低碳钢	0.13	0.006
锰 铜	0.42	0.000005
康 铜	0.44	0.000005
镍 铬 铁	1.0	0.00013
铂	0.106	0.00389

的储量丰富,因而广泛采用铝线代替铜线作为导线。

导电材料的电阻值还和温度有很大关系。为了计算导电材料在不同温度下的电阻值,我把导体温度每增高 1°C 时电阻所变动的数值与原来电阻值的比叫做电阻的温度系数,用符号 α 表示。几种常用材料的平均电阻温度系数列于表 1-1 中。从表 1-1 中可以看出,康铜、锰铜的温度系数很小,常用来制成标准电阻、变阻器等。铂的电阻温度系数较大,可用来制成电阻温度计,通过测量铂的电阻值变化,就可以知道环境温度的变化。

在实际应用中,有两种用电设备可看作是理想电阻元件,一种本身就是电阻器,如电子

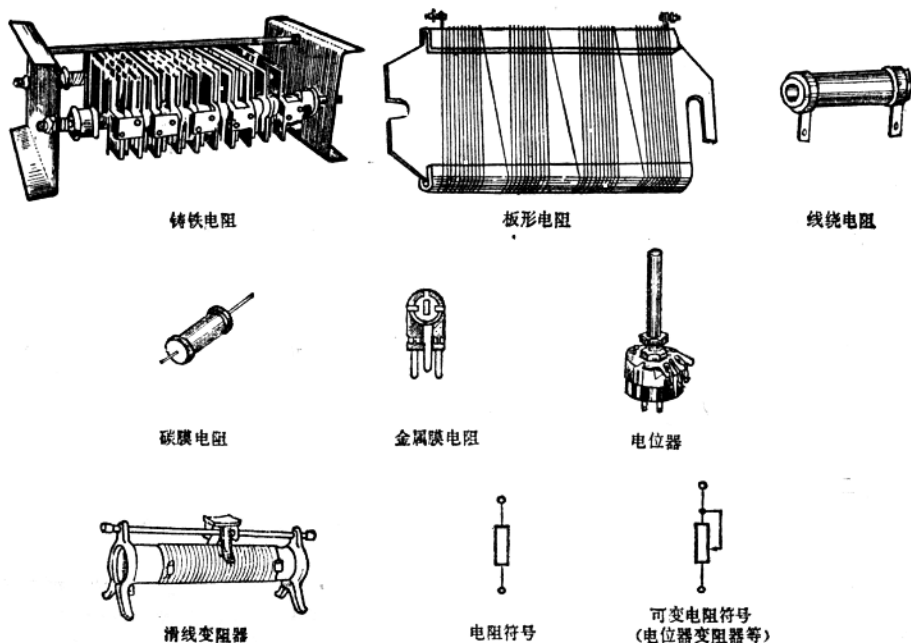


图 1-4 常用的电阻器及符号

电路中的各种电阻元件,实验室中的各种标准电阻、滑线变阻器,电动机的起动电阻等(参看图 1-4);另一种从理论上可抽象为电阻元件的设备,它们借用电阻发热而达到其应用目的,例如白炽灯、电炉、电烙铁、电烘箱等。

各种导线都具有一定的电阻,不过在一般的计算中,导线的电阻很小,常被忽略,只有当它的存在对计算结果产生一定的影响时,才去考虑它。

【例题 1-1】 一条长 100m、截面积为 10mm^2 的铝导线,电阻为多少?

【解】 查表 1-1,铝的电阻率 $\rho = 0.0283\Omega\text{mm}^2/\text{m}$,将 $l = 100\text{m}$, $S = 10\text{mm}^2$ 代入式(1-8)得

$$R = \rho \frac{l}{S} = 0.0283 \frac{100}{10} = 0.283\Omega \quad [\text{答案}]$$

【例题 1-2】 在发电机内常常装有用铂丝制成的电阻温度计,在 $t_1 = 20^\circ\text{C}$ 时,测得它的电阻 $R_1 = 49.5\Omega$,在发电机运行后,测得电阻 $R_2 = 64.5\Omega$,求这时发电机的温度是多少?

【解】 从表 1-1 中查得铂的平均温度系数 $\alpha = 0.00389\text{ }1/^\circ\text{C}$ 。将 R_1 、 R_2 、 t_1 值代入下式得

$$\alpha = \frac{\Delta R / \Delta t}{R_1} = \frac{(R_2 - R_1) / (t_2 - t_1)}{R_1}$$

$$0.00389 = \frac{(64.5 - 49.5) / (t_2 - 20)}{49.5}$$

$$t_2 = 97.9^\circ\text{C} \quad [\text{答案}]$$

即发电机这时温度为 97.9°C 。

(2) 欧姆定律

既然要在导体两端加上电压,导体中才有持续的电流,那么所加的电压跟导体中的电流有什么关系呢?德国物理学家欧姆(1787 年~1854 年)用实验研究了这个问题,得到了下述结论:导体中电流的大小与导体两端的电压成正比,跟它的电阻成反比。图 1-5 是一段仅存在电阻的电路,设 R 是一个线性电阻(指电阻值不随其所通过的电流或其两端电压而改变的一类电阻),当有电流通过电阻时,电阻两端电压为 U ,欧姆定律可写成如下形式:

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-9)$$

或

$$U = IR \quad (1-10)$$

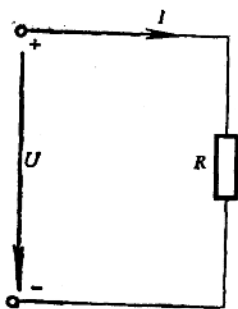


图 1-5 欧姆定律

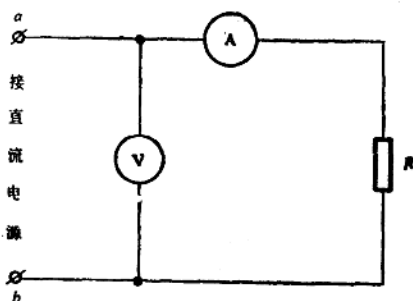


图 1-6 例题 1-3 的电路

【例题 1-3】 图 1-6 是用一只直流电压表和一只直流电流表来测量电阻器 R 阻值的电路。因为电压是指电阻两端的压降,所以电压表要跨接在电阻器上;电流表则要与电阻串联接成一条通路(电流表内电阻很小,忽略不计),让流过电阻器的电流全部流过电流表。现在 a 、 b 两点接一个直流电源,测得电压表读数为 25V ,电流表读数为 100mA ,求这个电阻器的电阻值是多少?

【解】 根据欧姆定律, $U = IR$, 只要用电压表测出电阻两端的电压, 用电流表测出通过电阻的电流, 就可以求出电阻值, 这就是测量电阻的伏安法。电阻值为

$$R = \frac{U}{I} = \frac{25(\text{V})}{0.1(\text{A})} = 250 \Omega \quad \text{【答案】}$$

2. 基尔霍夫定律

对于简单的电路, 应用欧姆定律和电阻串并联方法就可以进行分析和计算, 而对于图 1-7 所示的复杂电路就必须用更普遍的电路定律——基尔霍夫定律, 才能更好地进行分析和计算。

在复杂电路中的每条分支叫做支路, 一条支路流过一个电流, 在图 1-7 中有三条支路(E_1 和 R_1 支路, E_2 和 R_2 支路, R_3 支路)。而三条或三条以上支路的连接点称为节点, 图 1-7 中有两个节点 a 和 b 。电路中的任何一个闭合电路, 称为回路, 在图 1-7 中, $a2b1a$ 、 $a2b3a$ 、 $a1b3a$ 都是回路。

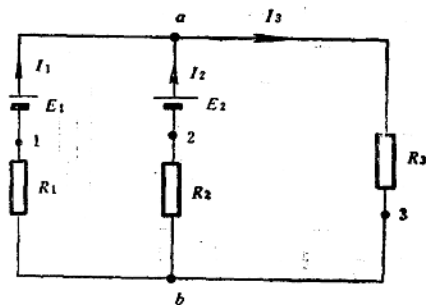


图 1-7 电路图示例

(1) 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律是确定节点上各支路电流间关系的定律, 其内容是:

在任一瞬间, 流向任一节点的电流之和等于流出该节点的电流。在图 1-7 所示的节点 a 上汇集三条支路, 则有下列关系式:

$$I_1 + I_2 = I_3$$

应用基尔霍夫电流定律时, 要根据电流的方向列出电流方程, 但在实际电路中往往难以事先判断电流的实际方向, 因此常常任意假定某一方向为电流的参考方向, 并用箭头标在电路图上(例如图 1-7 中的 I_1 、 I_2 、 I_3 方向)。这里所选的电流参考方向不一定与电流的实际方向相符, 经过分析计算, 若电流为正值, 则表示电流的实际方向与参考方向一致; 若电流为负值, 则表示电流的实际方向与参考方向相反。本书电路图中所标的电流方向箭头是参考方向, 不一定是电流的实际方向。

(2) 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律是确定一个闭合回路中各电压和电动势平衡关系的定律, 其内容是: 在任一瞬间, 沿任一回路绕行方向(顺时针或逆时针方向), 回路内各段电压降的代数和等于各电动势(电位升)的代数和。列写电压平衡方程时要分两步来进行。

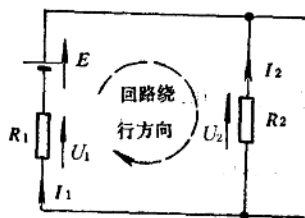


图 1-8 回路的电压与电动势的关系

① 先假定各支路电流的参考方向(任意假定), 各支路中电阻上的电压降参考方向应与所流过电流的参考方向一致, 如图 1-8 中 U_1 和 U_2 所示; 而电动势的方向是从电源的负极指向正极, 也用箭头标在电源旁边。

② 在回路中任选一个“回路绕行方向”, 如图 1-8 中的虚线环形箭头所示, 图 1-8 中假定的是顺时针方向, 当电压降的方向和电动势的方向与“回路绕行方向”一致时, 该量

在平衡方程中为正值,相反时为负值。在图 1-8 中,可得 U_1 为正, U_2 为负, E 为正。则可列出如下方程

$$U_1 - U_2 = E$$

即

$$I_1 R_1 - I_2 R_2 = E$$

【例 1-4】在图 1-9 所示电路中,已知 $E_1 = 12\text{V}$, $E_2 = 15\text{V}$, $E_3 = 8\text{V}$, $R_1 = 20\text{k}\Omega$, $R_2 = 10\text{k}\Omega$, $R_3 = 5\text{k}\Omega$ 。

求电路中的电流。

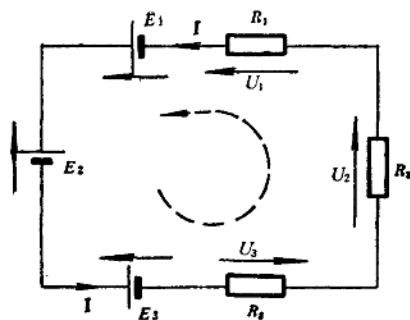


图 1-9 例 1-4 的电路

【解】(1) 先假定电路中电流的参考方向如图 1-9 所示。由于只有一个支路,因而有一个电流流过。

(2) 电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 上电压降 U_1 、 U_2 、 U_3 的参考方向与电流的参考方向一致,如图 1-9 所示。

(3) 标出电动势 E_1 、 E_2 、 E_3 的方向,从电源的负极指向正极,如图 1-9 所示。

(4) 取回路绕行方向为逆时针方向,判得 U_1 、 U_3 、 U_2 为正, E_1 为正, E_2 、 E_3 为负,则可得电压平衡方程为

$$U_1 + U_2 + U_3 = E_1 - E_2 - E_3$$

即

$$I R_1 + I R_2 + I R_3 = E_1 - E_2 - E_3$$

电流为

$$I = \frac{E_1 - E_2 - E_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{(12 - 15 - 8)}{(20 + 10 + 5)} = -0.31 \text{ mA} \quad [\text{答案}]$$

求得电流为负值,表示电流的实际方向与图 1-9 中所标参考方向相反。

【例 1-5】图 1-10 是一个具有两个电源、三条支路的电路,已知 $E_1 = 115\text{V}$, $E_2 = 50\text{V}$, $R_1 = R_2 = R_3 = 5\Omega$,试求各支路电流和电阻元件上的电压。

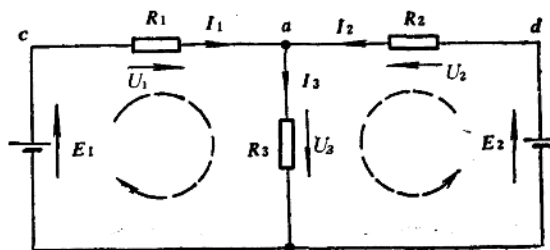


图 1-10 例 1-5 的电路

【解】(1) 假定各支路电流的参考方向,如图 1-10 所示 I_1 、 I_2 、 I_3 。电阻上电压的参考方向与电流参考方向一致。 E_1 和 E_2 的方向从负极指向正极。

(2) 对节点 a 列基尔霍夫电流方程

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad (1-11)$$

对节点 b 所列出的电流方程与上式相同,所以不能作为解电路的独立方程。可以证明,对于电路中各节点所能列出的独立方程式,总比节点数少一个。

(3) 应用基尔霍夫电压定律,对于 $abca$ 回路(取顺时针的回路绕行方向)可列出

$$I_1 R_1 + I_3 R_3 = E_1 \quad (1-12)$$

对于 $abda$ 回路(取逆时针的回路绕行方向)可列出

$$I_2 R_2 + I_3 R_3 = E_2 \quad (1-13)$$

对 $cadbc$ 回路(取顺时针的回路绕行方向)可列出

$$I_1 E_1 - I_2 R_2 = E_1 - E_2 \quad (1-14)$$

对比(1-12)、(1-13)、(1-14)三式,可见只有两个方程是独立的,因为其中任意两式相减或相加都可得出第三式。由此可见,三个方程在解未知数时只有两个有用,我们舍去式(1-14)。

(4) 将已知数据代入式(1-11)、(1-12)、(1-13)中,即得一组三元联立方程组

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0 \\ 5I_1 + 5I_3 = 115 \\ 5I_2 + 5I_3 = 50 \end{cases}$$

解方程组得

$$I_1 = 12\text{A} \quad [\text{答案}]$$

$$I_2 = -1\text{A} \quad [\text{答案}]$$

$$I_3 = 11\text{A} \quad [\text{答案}]$$

I_1 与 I_3 为正值,表示电流实际方向与参考方向一致; I_2 为负值,表明其实际方向与参考方向相反。

(5) 电阻上电压分别为

$$U_1 = I_1 R_1 = 12 \times 5 = 60\text{V} \quad [\text{答案}]$$

$$U_2 = I_2 R_2 = (-1) \times 5 = -5\text{V} \quad [\text{答案}]$$

$$U_3 = I_3 R_3 = 11 \times 5 = 55\text{V} \quad [\text{答案}]$$

U_2 为负值,表明 U_2 的实际方向与参考方向相反。

下面我们从本例的结果来讨论一下电源 E_2 的工作状态。经过 E_2 的电流实际上是由正极流入,负极流出,这与电源正常工作情况相反,这是因为正常的电动势电流是从负极流入,正极流出,这时在电源中发生了把非电能转换为电能的过程。但现在 E_2 的情况恰恰相反,因为电动势的方向与正电荷移动的方向不一致,所以 E_2 不是处于把非电能转换成电能的状态,而是处于消耗电能的负载状态,在实际应用中,这相当于蓄电池在充电。

三、电阻的连接方式

1. 电阻的串联

如果把几个电阻首尾相接地连接起来,在这几个电阻中通过同一电流,这种连接方式叫做串联,如图 1-11(a) 所示。电阻串联时有如下特性:

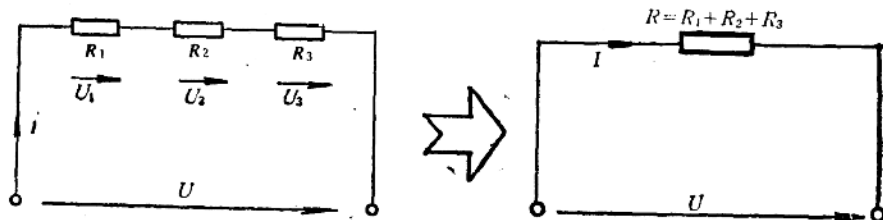


图 1-11 电阻的串联

(1) 通过各串联电阻的电流相等。

(2) 电路两端的总电压等于串联电阻上各电压之和。在图 1-11(a) 所示电路中,设电源电压为 U ,根据基尔霍夫电压定律可得

$$U = U_1 + U_2 + U_3 \quad (1-15)$$

(3) 串联电阻可用一个等效电阻来代替[图 1-11(b)]。等效的条件是在同一电压 U 作用下的电流 I 保持不变,即用等效电阻代替实际电阻后,电路中其余部分的电压和电流并不

发生变化。在图 1-11(a) 中, 根据欧姆定律, 对各电阻有

$$U_1 = IR_1$$

$$U_2 = IR_2$$

$$U_3 = IR_3$$

将以上关系代入式 (1-15), 得

$$U = IR_1 + IR_2 + IR_3 = I(R_1 + R_2 + R_3)$$

设

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

于是

$$U = IR$$

即串联等效电阻等于各个串联电阻之和。若串联电阻有 n 个, 则串联等效电阻为

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n$$

(4) 串联电阻的电压分配与各电阻成正比, 电阻越大, 分电压占总电压的比例越大。在图 1-11(a) 中, 每个串联电阻上的分电压为

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= IR_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot U \\ U_2 &= IR_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot U \\ U_3 &= IR_3 = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot U \end{aligned} \right\} \quad (1-16)$$

式中 $R_1/(R_1 + R_2 + R_3)$, $R_2/(R_1 + R_2 + R_3)$, $R_3/(R_1 + R_2 + R_3)$ 称为分压比。

上式说明, 在电阻串联电路里, 在总电压不变的条件下, 各电阻端电压的大小与它的电阻值成正比, 电阻大的分压大; 电阻小的分压小。

【例题 1-6】 图 1-12 是电阻 R_1 和 R_2 相串联的电路, 在电路两端加输入电压 U_i , 在 R_2 两端可以得到一个比 U_i 低的输出电压 U_o , U_o 是 U_i 的一部分, 故称此电路为分压电路, 设 $U_i = 50\text{mV}$, $R_1 = 24\text{k}\Omega$, 欲使输出电压 $U_o = 2\text{mV}$, 求 $R_2 = ?$

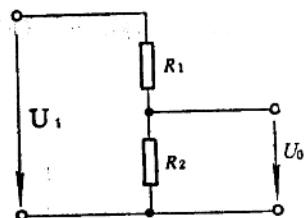


图 1-12 例题 1-6 的电路

【解】 根据分压公式(1-16)得:

$$U_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_i$$

则

$$R_2 = \frac{U_o R_1}{U_i - U_o}$$

将 U_i 、 U_o 、 R_1 数值代入(注意各个量的单位要化为基本单位)得

$$R_2 = \frac{2 \times 10^{-3} \times 24 \times 10^3}{(50 - 2) \times 10^{-3}} = 1000\Omega = 1\text{k}\Omega \quad \text{[答案]}$$

2. 电阻的并联

如果电路中有几个电阻连接在两个节点之间, 每个电阻两端承受的是同一电压, 则这种连接方式称为电阻的并联, 如图 1-13(a) 所示。电阻并联时有如下特性:

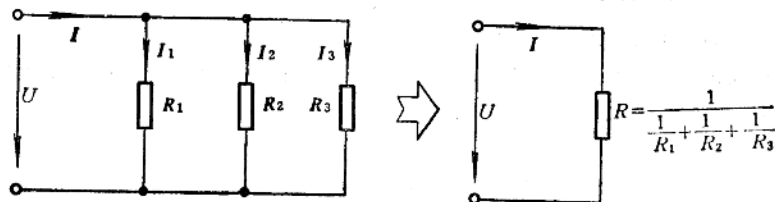


图 1-13 电阻的并联