

港口职工教育统编教材

电工基础

杨燕芳 主编



大连海事大学出版社

© 杨燕芳 2004

图书在版编目(CIP)数据

电工基础 / 杨燕芳主编. —大连: 大连海事大学出版社, 2004.3(2006.6 重印)
(港口职工教育统编教材)

ISBN 7-5632-1750-9

I. 电… II. 杨… III. 电工学 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 012614 号

大连海事大学出版社出版

地址: 大连市凌海路 1 号 邮编: 116026 电话: 0411-84728394 传真: 0411-84727996

<http://www.dmupress.com> E-mail: cbs@dmupress.com

大连交通大学印刷厂印装 大连海事大学出版社发行

2004 年 6 月第 1 版 2006 年 6 月第 2 次印刷

幅面尺寸: 185 mm × 260 mm 印张: 10.5

字数: 262 千字 印数: 3501 ~ 5000 册

责任编辑: 张 娴 版式设计: 张 娴

封面设计: 王 艳 责任校对: 陈景杰

定价: 18.00 元

前 言

根据港口生产的发展变化和技术工人职业技能培训的实际需要,经中国交通教育研究会批准,2002年港口教材编审委员会依据《交通行业技术工人等级标准》的要求,重新修订了《港口六个主体工种技术培训教学计划及配套教材的教学大纲》。

港口教材编审委员会按照《港口六个主体工种技术培训教学计划及配套教材的教学大纲》的要求,组织编写了《机械基础》、《电动装卸机械电气设备》、《电动装卸机械构造与修理》、《装卸机械使用与养护》、《装卸机械液压传动》、《装卸机械技术管理》、《内燃装卸机械电气设备》、《内燃装卸机械构造与修理》、《电工基础》、《装卸机械电气设备与维修》、《电工与电子技术》、《货物学》、《港口外贸货物管理》、《港口装卸工艺》、《港口库场业务》、《港口水运商务管理》、《港口理货英语》、《集装箱运输业务》等18种教材。

这套教材从港口技术工人职业技能培训的实际需要出发,采用了驾驶与修理合编教材,初级工、中级工、高级工三个技术等级合编教材的编写方法。教材在编写过程中,参考了各港口有关培训资料、教材,注重理论教学与港口生产实际相结合,引入了新知识、新技术、新工艺。因此本套教材具有较高的通用性、实用性和先进性。

《电工基础》一书根据《港口六个主体工种技术培训教学计划及配套教材的教学大纲》编写,书中着重讲述了电工的基础理论知识,包括交直流电路的基本概念及其性质、定理;磁场的特点;变压器的结构、原理;常用电工仪表的基本知识和使用方法;安全用电常识、急救方法;晶体管整流、放大、稳压电路的组成、原理及其应用等内容。

《电工基础》除用于初级和中级装卸机械电器修理工培训的教学外,还可用于维修电工培训或参考。

本书由广州港教育培训中心杨燕芳同志担任主编,其中第一、二、三、四、五章由杨燕芳同志编写,第六、七、八章由杨日超同志编写。湛江港赖杰同志担任主审,上海港陈祥生同志负责终审。

由于编者水平有限,书中不足之处在所难免,敬请各位老师和读者提出批评和修改意见。

中国交通教育研究会港口职工教育分会
教材编审委员会

目 录

第一章 直流电路.....	(1)
第一节 电路的基本概念.....	(1)
第二节 电阻和欧姆定律.....	(6)
第三节 电阻的连接	(10)
第四节 电功和电功率	(15)
第五节 电容	(16)
第六节 基尔霍夫定律	(20)
第七节 电压源和电流源及其等效变换	(23)
第八节 叠加原理	(25)
第九节 戴维南定理	(26)
第二章 磁与电磁	(29)
第一节 磁场的基本知识	(29)
第二节 磁场对载流导体的作用	(32)
第三节 磁路和磁路欧姆定律	(34)
第四节 电磁感应	(36)
第三章 正弦交流电路	(43)
第一节 交流电的基本概念	(43)
第二节 正弦交流电的表示方法	(47)
第三节 单相交流电路	(49)
第四节 三相交流电路	(60)
第四章 变压器	(66)
第一节 变压器的基本知识	(66)
第二节 电力变压器	(71)
第三节 互感器	(72)
第四节 特殊用途变压器	(74)
第五章 常用仪器仪表	(76)
第一节 电工仪表的基本知识	(76)
第二节 电流与电压的测量	(78)
第三节 万用表	(82)
第四节 电桥	(84)
第五节 其他常用仪表	(88)
第六章 安全用电	(95)
第一节 用电安全、急救知识.....	(95)
第二节 电气设备的安全防护	(98)

第三节	电气安全用具	(99)
第四节	电气防火和防爆	(100)
第五节	静电和防雷保护	(102)
第六节	电气安全措施	(105)
第七章	晶体二极管及整流滤波电路	(107)
第一节	半导体的基本知识	(107)
第二节	晶体二极管	(109)
第三节	整流与滤波电路	(112)
第八章	晶体三极管及基本电路	(121)
第一节	晶体三极管	(121)
第二节	晶体三极管放大电路	(131)
第三节	晶体三极管共发射极放大电路分析	(135)
第四节	晶体管放大电路中的负反馈	(144)
第五节	晶体管正弦波振荡电路	(149)
第六节	晶体管直流稳压电路	(152)
第七节	晶闸管及触发电路	(155)

第一章 直流电路

第一节 电路的基本概念

一、电路和电路图

在日常生活中,把一个灯泡、干电池、开关用导线连接起来,就成为一个简单的照明电路。图 1-1 所示为最简单的电路,图 1-1(a)为电路的实物接线图,它通常由电源、负载和中间环节(开关和连接导线)组成。当图中的开关合上时,形成闭合通路,灯泡发亮,说明电路中有电流流过。这种把某些电气设备和元件,按照一定的连接方式组合的电流通路称为电路,或者说电路就是电流经过的路径。

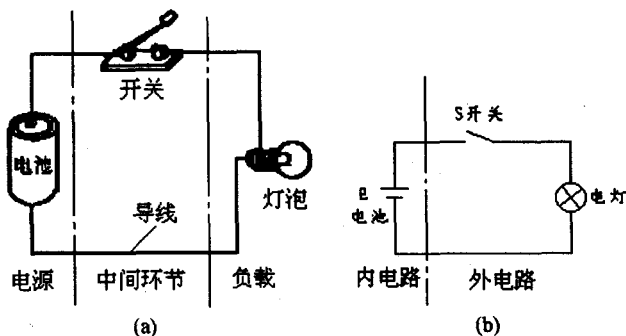


图 1-1 最简单的电路
(a)实物接线图;(b)电路图

电路可以用电路图来表示。图 1-1(a)的实物接线图,看起来直观易懂,但画起来复杂,而且没有突出电路的特征,不便于分析和研究。因此,在分析和研究中,通常将图 1-1(a)的实物接线图中的各实物用特定的图形符号来表示。国家规定了各种元件的图形符号,图 1-1(b)是用图形符号绘成的电原理图。这种用统一规定的图形符号画出的电原理图又称电路图。图中电源内部的电路称为内电路,电源外部的负载、开关和连接导线组成了外电路。

电路中常用的电工图形符号如表 1-1 所示。

电路中各部分的作用:

(1) 电源

电源是提供电能的设备,它将其他形式的能转换成电能,如发电机、电池等。发电机将机械能转换成电能,电池将化学能转换成电能。

(2) 负载

负载是用电设备,它将电能转换成其他形式的能,如电灯、电炉、电动机等。电灯将电能转换成光能,电动机将电能转换成机械能。

表 1-1 常用电工图形符号

图形符号	名称	图形符号	名称	图形符号	名称
	开关		电阻器		接机壳
	电池		电位器		接地
	发电机		电容器		端子
	线圈		电流表		连接导线
	铁心线圈		电压表		不连接导线
	抽头线圈		二极管		熔断器
					灯

(3) 中间环节

中间环节是连接电源和负载的部分,如图 1-1 中的开关和连接导线。开关起切断或接通电路的作用,连接导线的作用是传输和分配电能。

电路中根据需要还装配有其他辅助设备,如用于电路保护的熔断器,用来测量电路中电量的仪器仪表。

二、电路的基本物理量

1. 电流

(1) 电流的形成

我们知道,任何物质都由分子组成,分子由原子组成,而原子又由带正电的原子核和带负电的电子组成。通常状况下,原子核所带的正电荷数等于核外电子所带的负电荷数,所以原子是中性的,不显电性,物质也不显带电的性能。在一定外加条件下,如将导体接上电源,导体中电荷将产生有规则的运动。如图 1-2 中,a 是电源正极,b 是电源负极,电源在导体中产生由 a 极指向 b 极的电场,在电场力作用下,正电荷由 a 极经外电路移向 b 极,电荷产生定向运动。

我们把电荷有规则的定向运动称作电流。在金属导体中,电流是电子在外电场作用下有规则的运动形成的。在某些液体或气体中,电流则是由正离子或负离子在外电场作用下有规则的运动形成的。

(2) 电流的方向

在不同的导电物质中,形成电流的运动电荷可以是正电荷,也可以是负电荷,甚至两者都有。为了统一起见,电流的方向规定为正电荷运动的方向。所以,在外电路电流由电源正极流向负极,在内电路则由负极流向正极,形成闭合回路,如图 1-2 所示。

在分析或计算电路时,通常要求标出电流的方向。但当电路比较复杂时,某段电路中的电流的实际方向往往难以确定,这时,可以先假定电流的参考方向,然后列方程求解,当解出的电流值为正值时,就表示电流的实际方向与假设的参考方向一致。反之,当电流为负值时,就表示电流的实际方向与参考方向相反。

(3) 电流的大小

电流的大小取决于在一定时间内通过导体横截面的电荷量的多少。在相同的时间内通过导体横截面的电荷量越多,就表示流过该导体的电流越强,反之越弱。通常电流的大小用单位时间内通过导体横截面的电荷量来表示。若在 t 秒钟内通过导体横截面的电荷量为 Q 库仑,则电流 I 表示为

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

如果 1 s 内通过导体横截面的电荷量为 1 库仑,则导体中的电流为 1 安培,简称安,用符号 A 表示。常用的电流单位还有千安(kA)、毫安(mA)、微安(μA)。它们之间的换算关系是

$$1\text{ kA} = 10^3\text{ A}$$

$$1\text{ mA} = 10^{-3}\text{ A}$$

$$1\text{ }\mu\text{A} = 10^{-3}\text{ mA} = 10^{-6}\text{ A}$$

电流的大小可用电流表来测量,使用时一方面应将电流表串接在被测电路中,电流从表的“+”端流入,从“-”端流出。同时要选择好电流表的测量范围,使其大于实际电流的数值,否则可能损坏电流表。

2. 电流密度

实际应用中,有时需要选择导线的粗细(截面),这就要用到电流密度(J)这一概念。电流密度是指当电流在导体的截面上均匀分布时,该电流与导体横截面积的比值,即

$$J = \frac{I}{S} \quad (1-2)$$

上式中,当电流的单位为 A 、面积的单位为 mm^2 时,电流密度的单位为 A/mm^2 。导线允许通过的电流随导体截面不同而不同。例如: 1 mm^2 的铜导线允许通过 6 A 的电流, 3.5 mm^2 的铜导线允许通过 21 A 的电流。当导体中通过的电流超过允许电流时,导线将会发热,甚至造成事故。

例 1-1 某照明电路需要通过 15 A 的电流,问应选用多粗的铜导线(设 $J = 6\text{ A}/\text{mm}^2$)?

$$\text{解: } S = \frac{I}{J} = \frac{15}{6} = 2.5\text{ mm}^2$$

3. 电动势

(1) 电动势的产生过程

如图 1-2 所示,在电场力的作用下,极板 a 上的正电荷由 a 极沿导线到达 b 极,极板 b 上的负电荷由 b 极经导线到达 a 极,正负电荷中和。正极和负极上的正负电荷都将逐渐减少,电流也渐渐减少,直至中断。电路中要有持续电流,极板之间就必须有一种非电场力将正电荷从负极源源不断地移到正极,这需要电源来完成。在电源内部,由于其他形式能量的作用,产生一种对电荷的作用力,叫做电源力。利用电源内部的电源力,将正电荷不断地从负极移到正极,如图 1-3 所示。不同的电源,电源力的来源不同。如电池中的电源力是通过化学作用产生的,发电机的电源力则是电磁作用产生的。

如果将电源经导线和负载接通,如图 1-3(b)所示,整个电路处于动态平衡状态。在电源外部,正电荷在电场力的作用下,从电源的正极经过负载流向负极;在电源内部,正电荷在电源力的作用下,克服电场力从电源负极流向正极。这样,在电路中就形成了持续不断的电流。

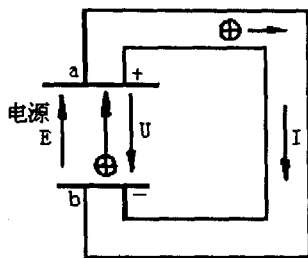


图 1-2 电流的形成

(2) 电动势

一般把衡量电源力移动电荷做功能力的物理量称为电源的电动势。电动势等于电源力将单位正电荷 Q 从负极移到正极所做的功 W_{ba} , 用符号 E 表示, 即

$$E = \frac{W_{ba}}{Q} \quad (1-3)$$

电动势的单位为伏特, 简称伏, 用符号 V 表示。

电动势的方向规定为由电源的负极指向正极, 如图 1-3 所示。

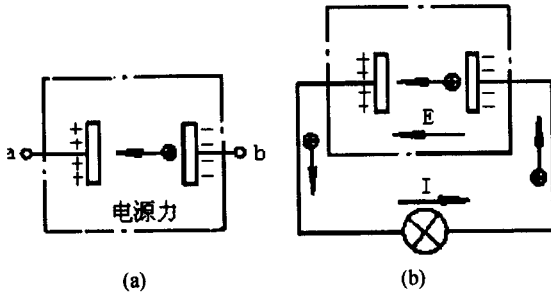


图 1-3 电源的电动势
(a) 电源力; (b) 电动势

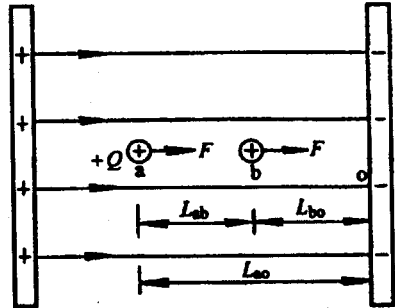


图 1-4 电场力做功

4. 电压和电位

(1) 电压

从物理学中知道, 带电体的周围存在着电场, 电场对处在电场内的电荷有力的作用, 当电场力使电荷移动时, 电场力就对电荷做了功。如图 1-4 所示, 如果电场力 F 把正电荷 Q 从 a 点移到 b 点, 则电场力所做的功 $W_{ab} = FL_{ab}$ 。如果电荷的电荷量增加, 那么作用在电荷上的电场力也增加。为了衡量电场力移动电荷做功的能力, 引入电压这个物理量, 并规定: 电场力把单位正电荷从电场中 a 点移到 b 点所做的功称为 a 、 b 两点间的电压, 用 U_{ab} 表示, 即

$$U_{ab} = \frac{W_{ab}}{Q} \quad (1-4)$$

电压的单位也是伏特(V)。如果电场力把 1 库仑的正电荷从 a 点移到 b 点, 所做的功为 1 J, 则 a 、 b 两点间的电压就是 1 V。常用的电压单位还有千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μV), 它们之间的换算关系是

$$\begin{aligned} 1 \text{ kV} &= 10^3 \text{ V} \\ 1 \text{ mV} &= 10^{-3} \text{ V} \\ 1 \mu\text{V} &= 10^{-3} \text{ mV} = 10^{-6} \text{ V} \end{aligned}$$

(2) 电位

水总是从高水位处流向低水位处; 和水位相似, 电路中各点也有一定的电位, 外电路的电流从高电位流向低电位。计算某处水位的高度, 要有一个水位高度的基准点(称参考点); 同样, 电路中某点电位的大小, 也需有一个参考点。

那么, 电位的含义是什么呢?

如果在电路中任选一点为参考点, 那么电路中某点的电位就是该点到参考点之间的电压。也就是说某点的电位等于电场力将单位正电荷从该点移到参考点所做的功。电位用字母 V

表示。如图 1-4 所示,以 o 点为参考点,则 a 点的电位为

$$V_a = \frac{W_{ao}}{Q} = U_{ao} \quad (1-5)$$

参考点的电位等于零,即 $V_o = 0$,所以,参考点又称为零电位点。人们通常以大地、金属机壳或某公共点作为参考点,用符号“ $\perp$ ”表示。高于参考点的电位是正电位,低于参考点的电位是负电位。

电位的单位与电压的单位相同,也是伏特(V)。

应该注意的是:电路中选择参考点不同,各点的电位也不同。

如图 1-5 中,若以 B 点为参考点($V_B = 0$),因为电源的正极电位高,负极电位低,所以, $V_A = 3\text{ V}$, $V_C = 9\text{ V}$;如果以 A 点为参考点($V_A = 0$),则 $V_B = -3\text{ V}$, $V_C = 6\text{ V}$ 。

(3) 电压与电位的关系

如图 1-4 所示,以 o 点为参考点,则 a 点与 b 点的电位分别是

$$V_a = U_{ao}$$

$$V_b = U_{bo}$$

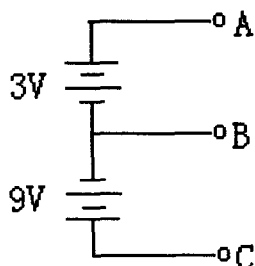


图 1-5 电位参考点的选择

U_{ao} 表示电场力把单位正电荷从 a 点移到 o 点所做的功,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 U_{ab} ,加上从 b 点移到 o 点所做的功 U_{bo} ,即

$$U_{ao} = U_{ab} + U_{bo}$$

移项得

$$U_{ab} = U_{ao} - U_{bo}$$

所以

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1-6)$$

可见电路中任意两点间的电压等于这两点间的电位之差,所以电压又称为电位差。

电位具有相对性,即电路中某点的电位值随参考点位置的改变而改变;而电位差具有绝对性,即任意两点之间的电位差与电路中参考点的位置选取无关。还是以图 1-5 为例,若以 A 点为参考点, C 、 A 两点间的电压 $U_{CA} = V_C - V_A = 9 - 0 = 9\text{ V}$;若以 B 点为参考点, C 、 A 两点间的电压 $U_{CA} = V_C - V_A = 9 - 3 = 6\text{ V}$ 。即 U_{CA} 为 6 V 。

电压的方向规定为由高电位指向低电位。如图 1-6 所示, A 、 B 两点间的电压的方向,可用箭头表示,也可用电压 U 加双下标字母或用从“+”到“-”表示。

电压的大小可用电压表来测量,使用时应将电压表并接在被测电压两端,表的“+”端接高电位,“-”端接低电位。电路中某点电位的高低,也用电压表来测量:将电压表的“-”端接参考点,“+”端接被测量点,其读数就是该点的电位;若指针反偏,则将“+”端接参考点,“-”端接被测量点即可。同时要选择好电压表的测量范围,使其大于实际电压值,以防止损坏电压表。

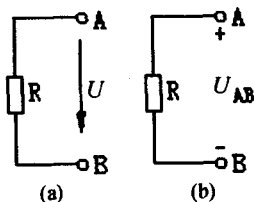


图 1-6 电压的方向表示

第二节 电阻和欧姆定律

一、电阻

1. 电阻

当电流通过金属导体时,导体中自由电子作定向移动,常与其他原子或电子碰撞而受到阻碍,这种导体对电流的阻碍作用,称为电阻,用字母 R 表示。电阻的单位为欧姆,简称欧,用符号 Ω 表示。

当导体两端所加的电压为 1 V ,导体内通过的电流为 1 A 时,这段导体的电阻就是 $1\ \Omega$ 。常用的电阻单位还有千欧($\text{k}\Omega$)、兆欧($\text{M}\Omega$)。它们之间的换算关系是:

$$1\text{ k}\Omega = 10^3\ \Omega \quad 1\text{ M}\Omega = 10^3\text{ k}\Omega = 10^6\ \Omega$$

导体的电阻是客观存在的,它不随导体两端电压大小而变化。即使没有外加电压,导体依然有电阻。实验证明,金属导体的电阻大小与导体的长度成正比,与导体的横截面积成反比,并与材料性质有关。对于长度为 l 、横截面积为 S 的导体,其电阻可按下式计算

$$R = \frac{\rho l}{S} \quad (1-7)$$

式中, ρ 是反映材料导电性能的物理量,称为电阻率或电阻系数。电阻率通常是指在 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时,长 1 m 而横截面积为 1 m^2 的某种材料的电阻值。当 l 、 S 、 R 的单位分别为 m 、 m^2 、 Ω 时, ρ 的单位为欧姆·米,用符号 $\Omega\cdot\text{m}$ 表示。不同金属材料电阻率的大小,可由电阻率表得知。表 1-2 为几种常用导体材料在 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时的电阻率。银、铜、铝的电阻率很小,表示其导电性能良好。银是最好的导体,但因价格贵一般很少使用,所以,常用铜或铝来制造导线和电器设备的线圈。

表 1-2 几种材料的电阻率($20\text{ }^\circ\text{C}$)

材料	电阻率 ρ / $(\Omega\cdot\text{m})$	电阻温度系数 α / $(1/^\circ\text{C})$	材料	电阻率 ρ / $(\Omega\cdot\text{m})$	电阻温度系数 α / $(1/^\circ\text{C})$
银	1.6×10^{-8}	0.003 6	铁	9.8×10^{-8}	0.006 2
铜	1.7×10^{-8}	0.004	碳	1.0×10^{-5}	-0.000 5
铝	2.8×10^{-8}	0.004 2	锰铜	4.4×10^{-7}	0.000 006
钨	5.5×10^{-8}	0.004 4	康铜	4.8×10^{-7}	0.000 005

例 1-2 有一个线圈,用直径为 1 mm 的铜漆包线绕成,在 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时测得电阻为 $0.5\ \Omega$,问该线圈的导线长度是多少?

解:导线的横截面积为

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3.14 \times (1 \times 10^{-3})^2}{4} = 7.85 \times 10^{-7}\text{ m}^2$$

查表 1-2 可知, $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时铜的电阻率 ρ 为 $1.7 \times 10^{-8}\ \Omega\cdot\text{m}$

由式(1-7)可得导线的长度为

$$l = \frac{RS}{\rho} = \frac{0.5 \times 7.85 \times 10^{-7}}{1.7 \times 10^{-8}} = 23.1\text{ m}$$

2. 电阻与温度的关系

实践证明,导体的电阻除了与导体本身的长度、横截面积、材料有关外,还与温度有关。温

度对电阻有两方面的影响:一方面是温度升高使导体中的带电粒子的热运动加剧,自由电子在导体中碰撞的机会增多,导致电阻增大;另一方面是有些材料在温度升高时,会使单位面积内的自由电子或离子的数目增加,电流随之增大,相当于电阻值下降。实验发现,导体的温度变化,它的电阻也随着变化,一般的金属导体的电阻随温度升高而增加,它们的关系为

$$R_2 = [1 + \alpha(t_2 - t_1)]R_1 \tag{1-8}$$

式中, t_2 为导体所处的温度,℃; t_1 为参考温度,通常为 20 ℃; R_1 为 t_1 时的电阻,Ω; R_2 为 t_2 时的电阻,Ω; α 为电阻温度系数,1/℃。

电阻温度系数 α 反映材料的电阻受温度影响的程度,单位为 1/℃。一般金属材料的电阻温度系数如表 1-2 所示。 α 的数值很小,但当导体工作温度很高时,电阻的变化很明显,不能忽视。碳的电阻温度系数是负值,表明当温度升高时,碳的电阻反而减小。

例 1-3 有一台电动机,其绕组用铜漆包线绕成,在室温 20 ℃时测得电阻为 1.45 Ω,运转 3 h 后,测得电阻为 1.8 Ω,问此时电动机绕组的温度。

解:由题目可知 $t_1 = 20\text{ ℃}$, $R_1 = 1.45\text{ Ω}$, $R_2 = 1.8\text{ Ω}$, $\alpha = 0.004(1/\text{℃})$,根据式(1-8)可得

$$t_2 = \frac{R_2 - R_1}{R_1 \times \alpha} + t_1 = \frac{1.8 - 1.45}{1.45 \times 0.004} + 20 = 80.3\text{ ℃}$$

3. 电阻器

在实际应用中,利用导体的电阻可以制成各种电阻器。电阻器又简称为电阻。电阻器的种类很多。按结构不同,可分为固定电阻器和可变电阻器;按导电材料不同,可分为碳膜、金属膜、金属氧化膜、绕线和有机合成电阻器等。

(1) 电阻器的主要指标

电阻器的指标有标称阻值、允许偏差、额定功率、最高工作电压、稳定性和温度特性等,其中主要指标为标称阻值、允许偏差、额定功率。

①标称阻值 为了便于生产和满足实际使用的需要,国家规定了一系列数值作为产品的标准,这一系列值叫做电阻的标称系列值。表 1-3 是几个系列的标称系列值。电阻器的标称阻值应为表中所列数值的 10^n 倍,其中 n 为正整数、负整数或零。

表 1-3 电阻的标称系列值

系列	偏差	标称系列值					
E_{24}	Ⅰ级 $\pm 5\% (J)$	1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6
		1.8	2.0	2.2	2.4	2.7	3.0
		3.3	3.6	3.9	4.3	4.7	5.1
		5.6	6.2	6.8	7.5	8.2	9.1
E_{12}	Ⅱ级 $\pm 10\% (K)$	1.0	1.2	1.5	1.8	2.2	2.7
		3.3	3.9	4.7	5.6	6.8	8.2
E_6	Ⅲ级 $\pm 20\% (M)$	1.0	1.5	2.2	3.3	4.7	6.8

②允许偏差 电阻器的标称阻值与实际阻值不完全相等,存在着误差(偏差)。当 R 为实际阻值、 R_H 为标称阻值时,允许偏差为: $(R - R_H)/R_H$ 。允许偏差表示电阻器阻值的准确程度,用百分数表示。例如Ⅰ级为 $\pm 5\%$,Ⅱ级为 $\pm 10\%$,Ⅲ级为 $\pm 20\%$ 。

③额定功率 指在一定的条件下,电阻器长期连续工作所允许消耗的最大功率。也称为标称功率。

(2)电阻器的标志方法

电阻器的主要指标一般用数字和文字符号直接标志在电阻器的表面上,有时也采用色环标志法。

采用色环标志法的电阻器,颜色醒目、标志清晰、不易褪色,且从各个方向都能看清阻值和偏差,有利于电气设备的装配、调试和检修,因此在国际上广泛采用色环标志法。

各种电阻器色标符号如表 1-4 所示,辨认时要从左至右进行,最左边为第一环。

表 1-4 电阻值的色标符号

颜色	有效数字	乘数	允许偏差/%	颜色	有效数字	乘数	允许偏差/%
银色	—	10^{-2}	± 10	黄色	4	10^4	—
金色	—	10^{-1}	± 5	绿色	5	10^5	± 0.5
黑色	0	10^0	—	蓝色	6	10^6	± 0.2
棕色	1	10^1	± 1	紫色	7	10^7	± 0.1
红色	2	10^2	± 2	灰色	8	10^8	—
橙色	3	10^3	—	白色	9	10^9	+50 -20

色标法的运用如图 1-7 所示。图 1-7(a)表示电阻值为 26 k Ω 、允许偏差为 $\pm 5\%$ 的电阻器;图 1-7(b)表示电阻值为 17.4 Ω 、允许偏差为 $\pm 1\%$ 的电阻器。

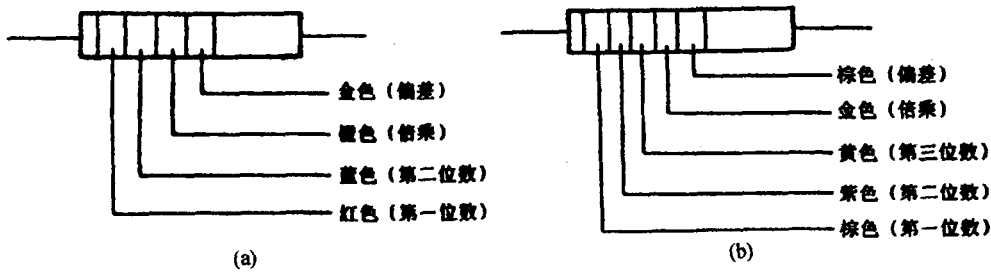


图 1-7 电阻器的色标法表示

二、欧姆定律

欧姆定律是反映电路中电动势、电压、电流和电阻之间关系的定律,应用十分广泛。

1. 部分电路欧姆定律

图 1-8 所示为一段不含电源,只有电阻的部分电路。当在电阻 R 两端加上电压 U 时,电阻中就有电流流过。1827 年德国物理学家欧姆在实验中发现:电路中电流 I 的大小与电阻两端电压 U 成正比,而与电阻 R 成反比,这个结论叫做部分电路欧姆定律。其数学表达式为

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

从图 1-8 可以看出,电阻两端的电压方向是从高电位指向低电位。

例 1-4 某电阻炉接到 220 V 的电压上,流过的电流为 405 mA,问电阻炉的电阻为多少?

解:电阻炉的电阻 $R = \frac{U}{I} = \frac{220}{405 \times 10^{-3}} = 543.2 \, \Omega$

2. 全电路欧姆定律

含有电源和负载的闭合电路称为全电路,如图 1-9 所示。图中的点划线框内代表一个实际的电源。电源的内部一般都有电阻,这个电阻称为电源的内电阻,简称内阻,用符号 R_0 表示。为了分析方便,通常在电路图上把 R_0 单独画出。实际上,内电阻是在电源内部,可以不单独画出,而在电源符号的旁边标注内电阻值即可。

当开关 S 闭合时,负载 R 上有电流流过,这是由于电阻两端有电压 U 的原因。当我们用电压表测量负载 R 两端电压时,会发现所测得的数值小于电动势 E ,也就是说,电流流过电源内部时,在内阻上产生了电压降。

实验证明,全电路中的电流 I 与电动势 E 成正比,与整个电路的内、外电阻之和 $(R + R_0)$ 成反比,这就是全电路欧姆定律,即

$$I = \frac{E}{R + R_0} \quad (1-10)$$

由式(1-10)可得

$$E = IR + IR_0 = U + U_0$$

所以

$$U = E - U_0 \quad (1-11)$$

式(1-11)中 U_0 是电源内阻的电压降, U 是电源向外电路的输出电压,也称为电源的端电压。因此,全电路欧姆定律又可表述为:电源的端电压 U 等于电动势 E 与内阻 R_0 上的电压降 U_0 之差。

下面利用全电路欧姆定律,分析电路三种不同的状态。

(1) 通路

图 1-9 所示为有负载的电路。当开关 S 闭合时,负载有电流流过,这种有载工作状态称为通路状态。在这种状态下,通常电源的电动势和内阻可认为不变,从式(1-10)可知电源输出电流 I 的大小只决定于负载电阻 R 。当负载增加时,输出电流 I 减少,内阻 R_0 上电压 U_0 减少,由式(1-11)可知,端电压 U 上升。内阻越小,则在负载变化时端电压越稳定。

例 1-5 在图 1-9 电路中,电源的电动势 $E = 220 \, \text{V}$,内阻 $R_0 = 1 \, \Omega$,负载电阻 $R = 21 \, \Omega$,试求电源输出电压 U 和电流 I 。若负载电阻 R 减小,试分析输出电压 U 和输出电流 I 怎样变化?

解: $I = \frac{E}{R + R_0} = \frac{220}{21 + 1} = 10 \, \text{A}$

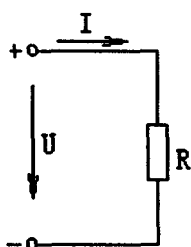


图 1-8 部分电路

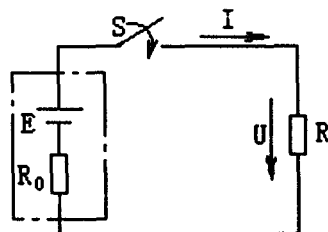


图 1-9 全电路

$$U = E - U_0 = E - IR_0 = 220 - 10 \times 1 = 210 \text{ V}$$

若负载电阻 R 减小, 则输出电流 I 增加, 根据 $U = E - IR_0$ 可知, 输出电压 U 减少。

(2) 开路(断路)

外电路断开(外电阻为无穷大)时称为开路。如图1-10所示, 开关 S 处于状态2时, 电路中没有电流通过, 电源不向负载输送电能。由式(1-11)可知 $U = E$, 即开路时, 电源端电压等于电源电动势。因此, 可用电压表并接在开路的电源两端来测量电动势, 电压表的读数就是电动势。

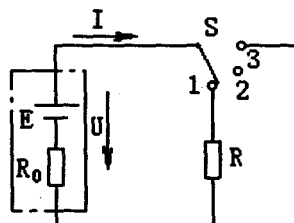


图 1-10 电路状态转换

(3) 短路

电源两端被导线短接(负载电阻 $R = 0$)时称为短路。如图1-10所示, 开关 S 处于状态3时, 电源短路, 电源端电压 U 为零,

电路中的短路电流为 $I_s = \frac{E}{R_0}$, 由于内阻很小, 所以 I_s 很大, 可超过正常工作电流的几十倍至几百倍, 从而损坏电源和导线, 并造成火灾、爆炸等严重事故。

在例1-5的电路中, 若不慎将负载电阻 R 短路, 则短路电流 $I_s = \frac{E}{R_0} = \frac{220}{1} = 220 \text{ A}$, 是正常工作电流的22倍。

为了防止短路事故, 一般在电路中串接熔断器 FU , 或其他保护电器。熔断器内的熔丝是用低熔点的铅锡合金制成的, 当电路中电流为额定值时, 熔断器使电路构成通路, 电路正常工作; 当电路发生短路或严重过载时, 很大的电流流经熔断器, 熔丝发热很快熔断, 从而迅速切断电路, 达到保护电气设备的目的。

第三节 电阻的连接

一、电阻的串联

两个或两个以上的电阻器依次相连, 使电流只有一条通路的连接方式称为电阻的串联, 如图1-11(a)所示。

电阻串联电路的特点有:

(1) 电路中流过每个电阻的电流相同, 即

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (1-12)$$

式中, 脚标 $1, 2, \dots, n$ 分别表示第 $1, 2, \dots$, 第 n 个电阻。

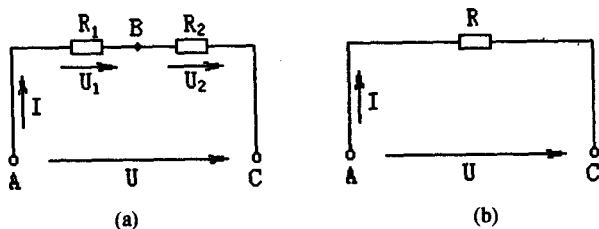


图 1-11 电阻的串联

由于串联电路只有一条通路, 而且电荷不会在电路中任一地方积累或消失, 所以在相同时间内通过电路导线任一截面的电荷量一定相等, 即串联电路各电阻中流过的电流相同。

(2) 电路两端的总电压等于各电阻两端的电压之和, 即

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n \quad (1-13)$$

如图 1-11(a)所示,根据电压与电位的关系有

$$U_{AB} = V_A - V_B$$

$$U_{BC} = V_B - V_C$$

将上面两式相加得

$$U_{AB} + U_{BC} = V_A - V_B + V_B - V_C = V_A - V_C$$

因为

$$U_{AC} = V_A - V_C$$

所以

$$U_{AB} + U_{BC} = U_{AC}$$

即

$$U_1 + U_2 = U$$

(3)电路的等效电阻(即总电阻)等于各串联电阻之和。图 1-11(b)中的电阻 R 就是图 1-11(a)中 R_1 、 R_2 两个电阻串联电路的等效电阻。将式(1-13)两边同时除以 I ,有

$$\frac{U}{I} = \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I} + \cdots + \frac{U_n}{I}$$

即

$$R = R_1 + R_2 + \cdots + R_n \quad (1-14)$$

(4)电路中各电阻两端的电压与各电阻的电阻值成正比,即

$$U_n = \frac{R_n}{R} U \quad (1-15)$$

式(1-15)中 R_n 越大,它所分配的电压 U_n 也越大。式(1-15)常称为分压公式, $\frac{R_n}{R}$ 称为分压比。

对于两个电阻的串联电路, R_1 、 R_2 两端的电压分别为

$$U_1 = \frac{R_1 U}{R_1 + R_2}$$

$$U_2 = \frac{R_2 U}{R_1 + R_2}$$

电阻串联的应用很广泛。在生产实践中,通常采用几个电阻串联构成分压器,使同一电源能供给几种不同的电压;用串联电阻的方法,限制或调节电路的电流大小;在电工测量中,用串联电阻的方法来扩大仪表测量量程,如图 1-12 所示。

例 1-6 某表头内阻 $R_G = 2 \text{ k}\Omega$,满量程偏转电流(以下简称满偏电流) $I_G = 50 \text{ }\mu\text{A}$,现要改装成量程为 10 V 的电压表,如图 1-12 所示,试求与表头串联的分压电阻。

解:表头满量程电压 $U_G = I_G R_G = 50 \times 10^{-6} \times 2 \times 10^3 = 0.1 \text{ V}$

显然,用此表头测量大于 0.1 V 的电压会使表头烧坏,因此需要串联分压电阻,以扩大测量范围。若量程扩大到 10 V 需串入的电阻为 R_x ,则

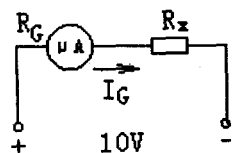


图 1-12 电阻串联的应用

$$R_x = \frac{U_x}{I_G} = \frac{U - U_G}{I_G} = \frac{10 - 0.1}{50 \times 10^{-6}} = 198 \text{ k}\Omega$$

由此可见,电压表的内阻很大。电压表并联在被测电路作测量时,电压表内阻越大,对电路影响越小,测量结果越准确。

二、电阻的并联

两个或两个以上电阻器的一端连在一点,另一端也连在一点,使电阻承受相同电压的连接方式称为电阻的并联,如图 1-13(a)所示。

电阻并联电路的特点有:

(1) 电路中各电阻两端的电压相等,并且等于电路两端的电压,即

$$U = U_1 = U_2 = \cdots = U_n \quad (1-16)$$

由图 1-13(a)可知,每个电阻两端的电压都等于 A、B 两点的电位差,也就是各电阻的端电压相等。

(2) 电路的总电流等于各电阻中的电流之和。若有 n 个电阻并联,则

$$I = I_1 + I_2 + \cdots + I_n \quad (1-17)$$

从图 1-13(a)可看出,电流 I 分两条支路 I_1 、 I_2 继续流动。由于形成电流的运动电荷不会在中途积累或消失,所以流入分支的电流等于流出分支的电流。

(3) 电路的等效电阻(即总电阻)的倒数等于各电阻的倒数之和,即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n} \quad (1-18)$$

证明如下:

在图 1-13(a)中有

$$I = \frac{U}{R}, I_1 = \frac{U}{R_1}, I_2 = \frac{U}{R_2}$$

由式(1-17)得

$$I = I_1 + I_2$$

即

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

所以

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

计算出总电阻后,图 1-13(a)就可等效为图 1-13(b)。

对于两个电阻的并联电路的等效电阻还可写成 $R = R_1 // R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ (公式中的 $//$ 是并联符号)。

(4) 在电阻并联电路中,各支路的电流与其电阻值成反比,即

$$I_n = \frac{R}{R_n} I \quad (1-19)$$

式中, $R = R_1 // R_2 // \cdots // R_n$ 。

式(1-19)中电阻 R_n 越大,通过它的电流越小;相反,电阻 R_n 越小,通过它的电流越大。

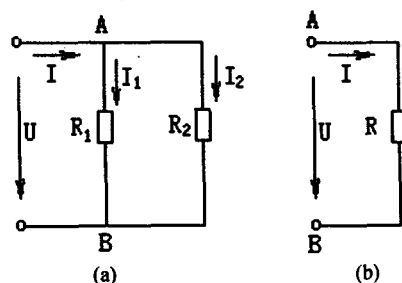


图 1-13 电阻的并联