

第一部分

电路基础

项目一

直流电路的分析与测量

项目二

单相交流电路的分析与测量



项目一 直流电路的分析与测量

任务一 电路的组成与工作状态

一、电路的组成

将不同的电子电气器件或设备按一定的方式连接起来,形成的电流通路,就是电路。电路由电源、负载和中间环节三部分组成。最简单的电路如图 1-1 所示,电源是一节干电池,负载是小灯泡,导线和开关是中间环节,将电池和小灯连接起来,形成一个简单的电流通路,完成照明功能。

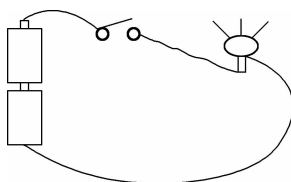


图 1-1 简单照明电路

电源是一种能发出电能的装置。在日常生产生活中,常用的电源有发电机、太阳能电板、蓄电池、干电池等,它们分别把机械能、光能、化学能等转换成电能。电源的符号如图 1-2 所示,图 1-2(a)为干电池或蓄电池符号,图 1-2(b)为干电池组或蓄电池组的符号。在电路分析中,电源设备一般用图 1-2(c)所示的电压源来表示,图中的 R_s 表示电压源的内阻。

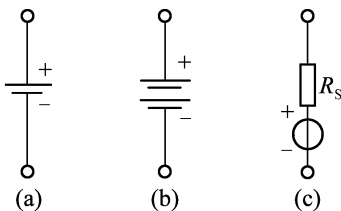


图 1-2 电源的符号

电路中的中间环节起着传输、分配和控制电能的作用。中间环节有的简单,也有的非常复杂。简单的可以只有一根导线,复杂的可以是超大规模集成电路或电力输送线路。而在一般的电路分析中,因为导线的电阻很小,所以常常把导线的电阻视为零。

负载可以是电灯、电话、计算机、电机等通过电能进行运作的电器设备,这些是消耗电能

的设备,其作用是将电能转换成其他形式的能量,如机械能、热能、光能、化学能等。

在人们的生产和生活实践中,电路应用于电力、电子通信、自动控制、计算机以及其他各类系统中,有着不同的功能和作用。电路的作用可以概括为以下两个方面。

(1)实现电能的传输和功能转换,例子如图 1-3 所示。

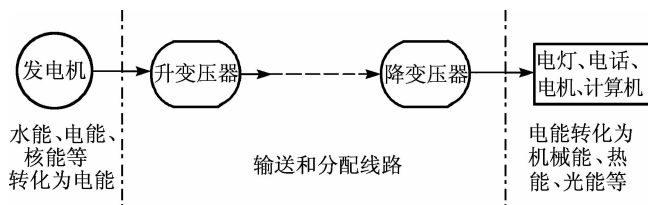


图 1-3 电路的电能传输和转换功能

(2)实现信号的传递和处理功能,例子如图 1-4 所示。

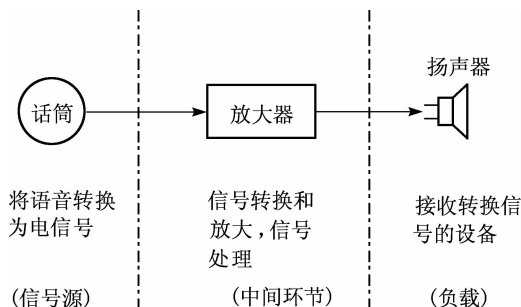


图 1-4 电路的信号传递和处理功能

在电路分析中,不管是传输和转换电能的电路,还是传递和变换信号的电路,都把来自电源或信号源的电压和电流的输入称为激励,电路中的激励可以理解为推动电路工作的动力;把激励在各部分所产生的电压和电流输出称为响应。电路分析的过程就是在已知电路结构和元件参数的情况下,分析激励和响应之间的关系。

实际的电器元件和设备的种类很多,如各种电源、电阻器、电感器、变压器、电子管、晶体管、固体组件等,它们发挥各自的作用,共同实现电路功能。这些电器元件和设备在工作运行中所发生的物理过程很复杂,因此,为了研究电路的特性和功能,必须对电路进行科学抽象,用一些模型来代替实际电器元件和设备的外部功能,这种模型称为电路模型。构成电路模型的元件称为理想电路元件,也称为电路元件或者模型元件。

理想电路元件分为两类:一类有实际的元件与它对应,如电阻器、电感器、电容器、电压源、电流源等;另一类没有直接与它相对应的实际电路元件,但是它们的某种组合却能反映出实际电器元件和设备的主要特性和外部功能,如受控源等。图 1-5 所示为电工电子技术中经常使用的几种理想元件的电路符号。

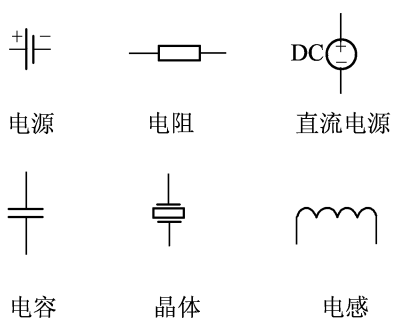


图 1-5 常用的几种理想元件的电路符号

在本书中,以后研究的电路均指模型电路。图 1-6 所示的电路图即为由图 1-1 简单照明电路抽象而成的电路模型,模型中电阻 R 代表负载(小灯泡),干电池用电压源 E 表示,开关为 S 。

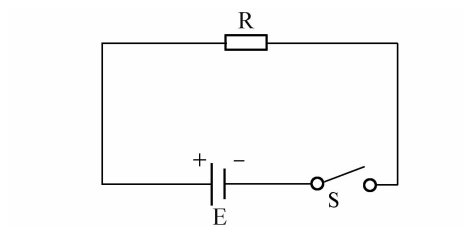


图 1-6 简单照明电路的电路模型

二、电路的工作状态

电路在不同的工作条件下会呈现不同的工作状态,也有不同的特点。充分了解电路不同的工作状态和特点对安全用电与正确使用各种类型的电气设备是十分必要的。直流电路的状态包括有载状态、开路状态和短路状态三种。

1. 有载状态

已知某电路如图 1-7 所示,ab 为电源支路,cd 为负载支路,通过开关 K 连接。

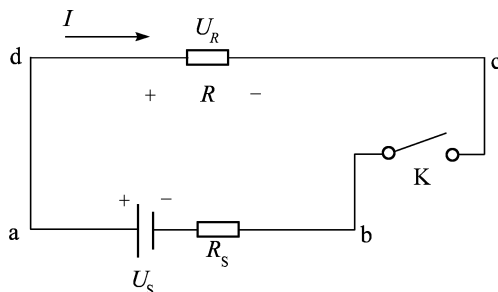


图 1-7 电路工作状态

将开关 K 闭合,接通电源与负载,这时电路为有载工作状态。

有载工作状态下的电路参数特征如下:

$$\begin{aligned} \text{负载电流为} & \quad I = \frac{U_s}{R + R_s} \\ \text{负载电压为} & \quad U_R = IR \\ \text{电源端电压为} & \quad U = U_s - IR_s \\ \text{电源产生功率为} & \quad P_s = U_s I \\ \text{电源输出功率为} & \quad P = UI \\ \text{内阻消耗功率为} & \quad \Delta P = I^2 R_s \\ \text{功率平衡关系为} & \quad P = P_s - \Delta P \end{aligned}$$

电源端电压 U 在 U_s 一定时,与 I 和 R_s 成反比关系;当 $R_s \ll R$ 时, $U \approx U_s$ 。在负载状态,电源产生的功率与内阻消耗的功率及输出功率间满足功率平衡关系。

一般电路在有载工作状态,负载的大小指负载电流的大小,不是指电阻 R 的大小,根据负载电流 I 与额定电流 I_N 之间的关系,又可分为以下三种运行情况:

- (1) $I = I_N$, 满载运行。
- (2) $I > I_N$, 过载运行。
- (3) $I < I_N$, 欠载运行,也称轻载运行。

2. 开路状态

如图 1-7 所示的电路中,当开关打开时,电源与负载处于开路状态。此时,外电路的电阻对于电源来说是无穷大,根据欧姆定律,可知电路中的电流 I 为零,电源的端电压等于电源的电动势。

开路状态下的电路参数特征如下:

$$\begin{aligned} \text{电路中的电流为} & \quad I = 0 \\ \text{负载端电压为} & \quad U_R = 0 \\ \text{电源端电压为} & \quad U = U_s \\ \text{功率为} & \quad P_s = 0, P = 0, \Delta P = 0 \end{aligned}$$

因为电路中的电流 I 为零,故电路中不存在能量交换。

3. 短路状态

如图 1-7 所示的电路中,当电源的两端由于某种原因连接在一起时,就成了短路。此时,外电路的电阻可视为零,又由于电源内阻 R_s 很小,根据欧姆定律,可知电路中的电流 I 很大,如图 1-8 所示。

短路状态下的电路参数特征如下:

$$\begin{aligned} \text{电路中的电流为} & \quad I = I_s = \frac{U_s}{R_s} \\ \text{负载端电压为} & \quad U_R = 0 \end{aligned}$$

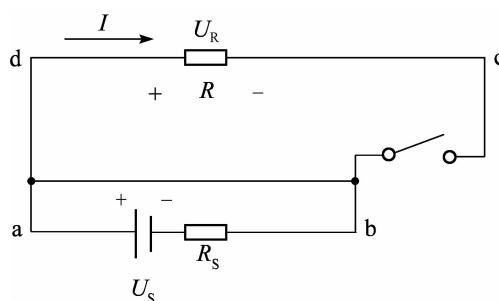


图 1-8 电路短路状态

功率为

$$P=0$$

因为电路中的电流不经过负载,所以输出功率 $P=0$,负载端电压为零。

产生短路的原因是由于绝缘部分损坏或接线不慎,因此应经常检查电气设备和线路的绝缘情况。通常在电路中接入熔断器或自动断路器,以便产生不良后果,有时出于某种需要,可以将电路中某一段短路或进行某种短路实验。

任务二 电路基本物理量的计算与测量

一、电路中的基本物理量

1. 电流

1) 电流的基本概念

用摩擦的方法使物体带上的正电和负电叫作静电。打一个形象的比方,就像静止的空气和河水不能推动风车与水轮机一样,静电不能用于电灯和开动机器。因为只有流动的空气和河水才能做功,同样,只有运动的电荷才能带动电器。物理学上把带电微粒的定向移动叫作电流。因此,要利用电来照明或者使电风扇转动,都需要有长时间持续存在的电流。

电流的大小为单位时间内通过某一导体横截面的电荷量。用 I 表示电流, q 表示电荷量, t 表示时间,则计算电流的公式为

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

式中, q 为时间 t 内通过导体横截面的电荷量。

电流不是恒定不变的,即不同的时刻,电流大小不一样,则计算电流的公式可表示为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-2)$$

式中, i 为某个时刻的电流大小; dq 为某一时刻通过导体横截面的电荷量; dt 为某一时刻时长。

电流的大小称为电流强度,在国际单位制(SI)中,电流强度的单位为安培,用大写字母 A 表示。当 1 秒(s)内通过导体横截面的电荷量为 1 库仑(用大写字母 C 表示,1 C 相当于 6.25×10^{18} 个电子的电量)时,电流强度为 1 安培(A)。在电力系统中,遇到的电流常常为几安(A)、几十安,甚至更大;而在电子设备中电流较小,一般为几毫安(mA)或微安(μA)。它们之间的换算关系为

$$\begin{aligned} 1 \text{ kA} &= 10^3 \text{ A} \\ 1 \text{ mA} &= 10^{-3} \text{ A} \\ 1 \mu\text{A} &= 10^{-6} \text{ A} \end{aligned} \quad (1-3)$$

2) 电流的参考方向

带电微粒的定向移动形成了电流,则电流是矢量(有方向的量)。通常规定正电荷运动的方向为电流的正方向,负电荷运动的方向为电流的负方向,如图 1-9 所示。

当然,电流的方向也不是一成不变的,如在分析电路时,有时电流的实际方向难以事先确定,特别是在交流电路中,电流的方向随时间不断反复变化。此时,为了分析电路方便,可以选定任一方向作为电流的参考方向,或称正方向。当电流的实际方向与参考方向一致时,则电流值为正值,如图 1-10(a)所示;反之,当电流的实际方向与其参考方向相反时,电流值

为负值,如图 1-10(b)所示。因此,在参考方向确定以后,就可以决定电流值的正与负并进行电路分析了。

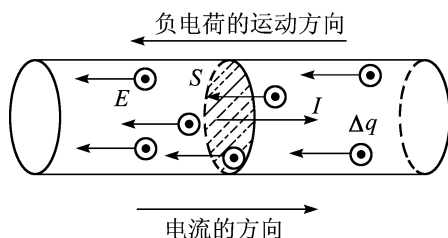


图 1-9 电流的方向

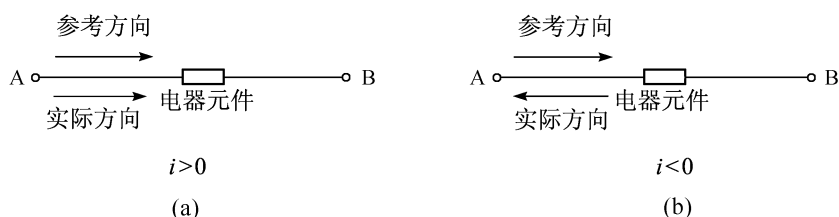


图 1-10 电流参考方向与实际方向的关系

在电路图中,用箭头表示电流的参考方向。在实际应用中,还可以使用双下标来表示电流方向,如 i_{AB} 表示电流的参考方向是由 A 流向 B。若选定参考方向由 B 流向 A,则用 i_{BA} 表示,两者相差一个负号,即 $i_{AB} = -i_{BA}$ 。

2. 电压

1) 电压的基本概念

电压就像水压,水压能使静止的水按一定的方向流动,那么电压就是能使导体中电子按一定方向运动的一个物理量。它用来衡量电场力推动正电荷运动,对电荷做功能力的大小。电路中 A、B 两点之间的电压在数值上等于电场力把单位正电荷从 A 点移动到 B 点所做的功。若电场力移动的电荷量为 Q ,所做的功为 W ,那么 A 与 B 点之间的电压则为

$$U_{AB} = \frac{W}{Q} \quad (1-4)$$

式中, W 为电场力把正电荷从 A 点移到 B 点所做的功(J); Q 为被移动的正电荷的电量(C); U_{AB} 为 A、B 两点的电压(V)。

在直流电路中,任意两点的电压一般不随时间变化而变化,其值恒定,称为恒定电压或直流电压,用大写字母 U 表示。在交流电路中,任意两点之间的电压随时间变化而变化,电压有瞬间值、峰值、平均值的概念。例如,照明电路用电为 220 V,是指电压的有效值为 220 V。

电力系统中,日常用的电压一般为几百伏,输送电线的电压为几千伏(kV)、几万伏甚至更大;电子设备中电压较小,一般为几伏(V)、几毫伏(mV)或几微伏(μ V)。它们之间的换算关系为

$$\begin{aligned}
 1 \text{ kV} &= 10^3 \text{ V} \\
 1 \text{ mV} &= 10^{-3} \text{ V} \\
 1 \mu\text{V} &= 10^{-6} \text{ V}
 \end{aligned}
 \tag{1-5}$$

如果正电荷从 A 点移动到 B 点失去能量,则电位降低,即 A 点的电位高于 B 点;反之,若电荷从 A 点移动到 B 点获得能量,则电位升高,即 A 点的电位低于 B 点。因此,正电荷在电路中移动时,电能的增加和减少表现为电位的降低和升高。规定电压的实际方向为高电位点指向低电位点。如果电场力推动正电荷沿着电压的实际方向运动,电位逐点降低,此时,电场力对正电荷所做的功为正功。

2) 电压的参考方向

电压指电路中两点之间的电位差,由此可知,电压是矢量(有方向的量),需要指定参考方向。如同需要对电流选定参考方向一样,在分析、计算电路问题时,往往难以预知一段电路两端电压的实际方向,为此可事先选定一个方向作为电压的参考方向。如图 1-11 所示的一段电路,规定 A 为高电位点,用“+”表示,B 为低电位点,用“-”表示,即选取该段电路电压的参考方向从 A 指向 B。当电压的实际方向与参考方向一致时,电压为正值,如图 1-11(a)所示;当电压的实际方向与参考方向不一致时,电压为负值,如图 1-11(b)所示。

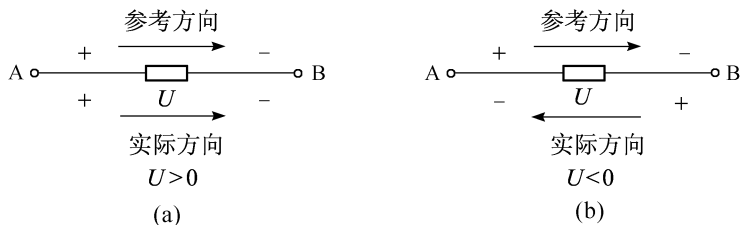


图 1-11 电压参考方向与实际方向的关系

这样,引入电压的参考方向之后,电压是一个代数量。借助电压的正、负值,并结合它的参考方向,就能够确定电压的实际方向。

电压的参考方向可以用以下两种方法来表示:

(1)用“+”“-”号分别表示假设的高位点和低位点。

(2)用双下标字母表示,如 U_{AB} ,第一个下标字母 A 表示假设的高位点,第二个下标字母 B 表示假设的低位点。

在实际应用中,电路两点间电压的实际方向常用一种表示极性的方法来表示:高电位点用“+”表示,称此点为“正”极;反之,低电位点用“-”表示,称此点为“负”极。

3) 电流、电压的关联参考方向

在电路分析中,电流和电压的参考方向都是人为指定的,彼此之间互不相关。但是为了分析方便起见,对于同一段电路的电流和电压往往采用彼此关联的参考方向。图 1-12(a)和图 1-12(b)分别表示关联参考方向和非关联参考方向。

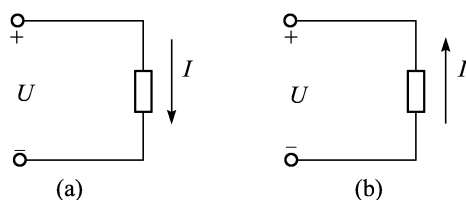


图 1-12 电流、电压关联参考方向与非关联参考方向

电流、电压的关联参考方向是指电流与电压的参考方向一致,即电流的流向是从电压的高位点流向电压的低位点。

4) 电流、电压参考方向的几点说明

(1) 电流、电压的实际方向是客观存在的,有时容易确定,有时难以确定。它们的参考方向是由计算需要人为确定的,在电路分析和计算过程中,以参考方向为基础。

(2) 同一段电路中,电流参考方向选择不同,其数值相等但符号相反,电压的情况也一样,因此,电流值、电压值的正负只有在选定参考方向的情况下才有意义。

(3) 在电路分析和计算中,必须先标出电流和电压的参考方向,才能进行分析和计算。

(4) 为了方便分析电路,电路上的电流和电压一般选择关联的参考方向。

例 1-1 某一电路如图 1-13 所示,各段电路的电流、电压的参考方向均已标注在图中。

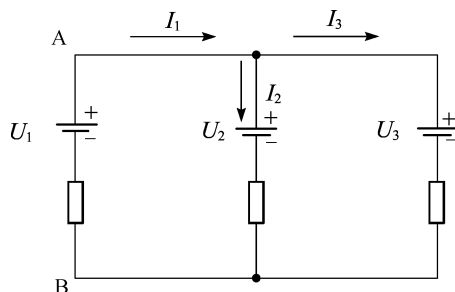


图 1-13 例 1-1 用图

(1) 指出哪一段电路的电流与电压是关联参考方向,哪一段是非关联参考方向。

(2) 已知 $I_1=4\text{ A}$, $I_2=-3\text{ A}$, $I_3=7\text{ A}$, $U_1=-20\text{ V}$ 。指出各段电路电流的实际方向是什么。

(3) 由(2)中的已知条件判断,AB 段电压的实际方向是什么?

解 (1) U_2 和 I_2 、 U_3 和 I_3 是非关联参考方向, U_1 和 I_1 是关联参考方向。

(2) 从已知条件可知,电流 I_1 、 I_3 为正值,表示它们的实际方向与参考方向相同; I_2 为负值,表示它的实际方向与参考方向相反。

(3) 从已知条件可知, U_1 为负值,表示它的实际方向与图示的参考方向相反,即 B 点是实际的高电位点, A 点是实际的低电位点,该段电压的实际方向是从 B 点到 A 点。

3. 电动势

1) 电动势的基本概念

电动势是描述电源性质的重要物理量。电源的电动势和非静电力的功密切联系。非静电力,主要是指化学力和磁力,如干电池内部化学作用产生的化学力。在电源内部,非静电力把正电荷从负极板移到正极板时要对电荷做功,这个做功的物理过程是产生电源电动势的本质。非静电力所做的功反映了其他形式的能量有多少变成了电能。因此在电源内部,非静电力做功的过程是能量相互转化的过程。电源的电动势正是由此定义的,即非静电力把正电荷从电源负极移到正极所做的功与该电荷电量的比值,称为电源的电动势。

电源的电动势用符号 E 表示,在数值上等于非静电力把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做的功,单位和电压一样,也是伏特(V),电动势的计算公式为

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

式中, E 为电动势; W 为非静电力所做的功(J); q 为电荷量。

不同的电源由于非静电力的来源不同,能量转换的形式也不同。化学电动势(干电池、纽扣电池、蓄电池等)的非静电力是一种化学作用,电动势的大小取决于化学作用的种类,与电源大小无关,如干电池无论是1号、2号、5号其电动势都是1.5 V。发电机的非静电力是磁场对运动电荷的作用力。光生电动势(光电池)的非静电力来源于光电效应。压电电动势(晶体压电点火、晶体话筒等)的非静电力来源于机械功造成的极化现象。

2) 电动势的参考方向

电动势的作用是把正电荷从低电位点移动到高电位点,使正电荷的电势能增加,所以规定电动势的实际方向是由低电位指向高电位,即从电源的负极指向电源的正极。在电路中,电源的极性和电动势的数值一般都是已知的,所以一般电动势的参考方向都取与实际方向相同的方向,即由电源的负极指向电源的正极。

3) 电源端电压与电动势的关系

(1) 电源端电压 U 反映的是电场力在外电路将正电荷由高电位点(正极)移向低电位点(负极)做功的能力。电动势 E 反映的是电源力将电源内部的正电荷从低电位点(负极)移向高电位点(正极)做功的能力。

(2) 若不考虑电源内损耗,则电源电动势在数值上与它的端电压相等,但实际方向相反,即 $E = -U_{AB}$,如图 1-14 所示。

电源对电路的作用效果可以用电动势来表示,也可以用电压来表示,电动势 E 和电压 U_{AB} 反映的是同一件事,所以,在很多情况下,常常不是用电动势 E 而是用电源正负极之间的电压来表示电源的作用效果。

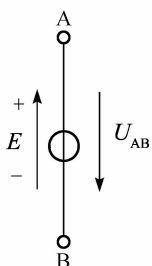


图 1-14 电源电动势和电压之间的关系

4. 电功与电功率

电功,简单地讲就是电流所做的功。电流在经过电器设备时会发生能量的转换,能量转换的大小就是电流所做功的大小,用符号 W 表示,单位为焦耳(J)。能量转换的速率就是电功率,即单位时间内电器设备能量转换的大小,简称为功率。

电功率的符号用 P 表示,单位为瓦(W),在电流、电压关联参考方向下,电功率的计算公式为

$$P = \frac{dW}{dt} = ui \quad (1-7)$$

$P > 0$ 时表示元件消耗电功率, $P < 0$ 时表示元件发出电功率,即当 u 与 i 的实际方向相同时,表明该元件消耗电功率。反之,当 u 与 i 的实际方向相反时,表明该元件发出电功率。

例 1-2 某个直流电路如图 1-15 所示,取参考方向与实际方向相同,已知电路的电流 $I = 0.8 \text{ A}$,元件 1 两端的电压 $U_1 = 3 \text{ V}$,元件 2 两端的电压 $U_2 = -1 \text{ V}$,元件 3 两端的电压 $U_3 = -2 \text{ V}$,求各元件的电功率,并指出是消耗电功率还是发出电功率。

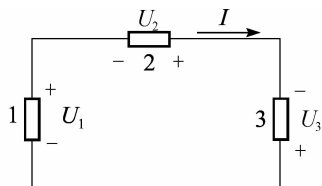


图 1-15 例 1-2 图

解 元件 1: $P_1 = U_1 \times I_1 = 0.8 \text{ A} \times 3 \text{ V} = 2.4 \text{ W}$

$P_1 > 0$, 元件 1 消耗电功率;

元件 2: $P_2 = U_2 \times I_2 = 0.8 \text{ A} \times (-1) \text{ V} = -0.8 \text{ W}$

$P_2 < 0$, 元件 2 发出电功率;

元件 3: $P_3 = U_3 \times I_3 = 0.8 \text{ A} \times (-2) \text{ V} = -1.6 \text{ W}$

$P_3 < 0$, 元件 3 发出电功率。

二、欧姆定律

伏安特性就是大家所熟悉的欧姆定律。欧姆定律是电学中的一个基本定律,表明电路中电流、电压和电阻三者之间的基本关系,表述为:在同一电路中,导体中的电流跟导体两端的电压成正比,跟导体的电阻成反比。其公式为

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-8)$$

式中, R 为电阻器的电阻大小,国际单位制中,单位为欧姆(Ω); U 为电阻器两端的电压; I 为流过电阻器的电流。

实际应用中,欧姆定律有以下两种。

(1)部分电路欧姆定律,也称作外电路欧姆定律,它忽略电源内阻,把电源看成一个理想的电动势提供者,如图 1-16 所示。

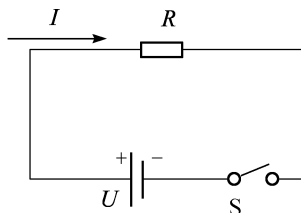


图 1-16 部分电路欧姆定律

当电流、电压为关联参考方向时,部分电路欧姆定律可表示为

$$\text{电流} = \text{电压} / \text{电阻} \quad I = U / R \quad (1-9)$$

上述公式还可以推导出如下公式:

$$\begin{aligned} \text{电压} &= \text{电流} \times \text{电阻} & U &= I \times R \\ \text{电阻} &= \text{电压} / \text{电流} & R &= U / I \end{aligned} \quad (1-10)$$

(2)全电路欧姆定律,也称闭合电路欧姆定律,它不忽略电源中的内阻,电源不再是一个理想的电动势提供者,而是一个具有内阻的电源,如图 1-17 所示。

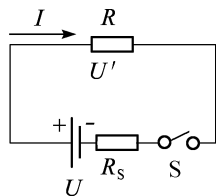


图 1-17 全电路欧姆定律

图 1-17 中,电源的内阻用 R_s 表示,当电流、电压为关联参考方向时,全电路欧姆定律表示为

$$\text{电源的电动势} = \text{外电路的电压} + \text{电流} \times \text{电源的内阻}$$

即

$$U = U' + I \times R_s \quad (1-11)$$

也可表示为

电源的电动势=总电阻×电流

$$\text{即} \quad U = I \times (R + R_s) \quad (1-12)$$

式(1-11)和式(1-12)中的电流含义相同。

例 1-3 如图 1-17 所示,电源两端的电压为 3 V,内阻为 0.2 Ω ,电阻器的电阻为 6 Ω 。

(1)忽略电源内阻,求电路中的电流;

(2)不忽略电源内阻,求电路中的电流。

解 (1)忽略电源内阻,即 $R_s = 0$,运用部分电路欧姆定律进行求解。

$$I = \frac{U}{R} = \frac{3 \text{ V}}{6 \Omega} = 0.5 \text{ A}$$

(2)不忽略电源内阻,即 $R_s = 0.2 \Omega$,运用全电路欧姆定律进行求解。

$$I = \frac{U}{R + R_s} = \frac{3 \text{ V}}{(6 + 0.2) \Omega} \approx 0.484 \text{ A}$$

技能训练 常用电路测量仪器的使用

一、实验目的

- (1) 熟悉实验台上各类电源及各类测量仪表的布局和使用方法。
- (2) 掌握指针式电压表、电流表内阻的测量方法。
- (3) 熟悉电工仪表测量误差的计算方法。

二、原理说明

(1) 为了准确地测量电路中实际的电压和电流,必须保证仪表接入电路后不会改变被测电路的工作状态。这就要求电压表的内阻为无穷大,电流表的内阻为零。而实际使用的指针式电工仪表都不能满足上述要求。因此,测量仪表一旦接入电路,就会改变电路原有的工作状态,这就导致仪表的读数值与电路原有的实际值之间出现误差。误差的大小与仪表本身内阻的大小密切相关。只要测出仪表的内阻,即可计算出由其产生的测量误差。以下介绍几种测量指针式仪表内阻的方法。

(2) 用“分流法”测量电流表的内阻如图 1-18 所示。A 为被测内阻(R_A)的直流电流表。测量时先断开开关 S,调节直流电流源的输出电流 I 使 A 表指针满偏转。然后合上开关 S,并保持 I 值不变,调节电阻箱 R_B 的阻值,使电流表的指针指在 1/2 满偏转位置,此时有

$$I_A = I_S = I/2$$

$$\therefore R_A = R_B // R_1$$

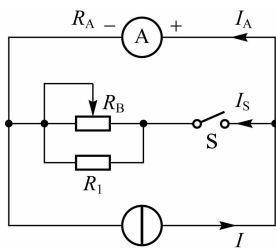


图 1-18 可调直流电流源

R_1 为固定电阻器之值, R_B 可由电阻箱的刻度盘上读得。

(3) 用“分压法”测量电压表的内阻。如图 1-19 所示, V 为被测内阻(R_V)的直流电压表。测量时先将开关 S 闭合,调节直流稳压电源的输出电压,使电压表 V 的指针为满偏转。然后断开开关 S,调节 R_B 使电压表 V 的指示值减半。

此时有

$$R_V = R_B + R_1$$

电压表的灵敏度为

$$S=R_V/U (\Omega/V)$$

式中, U 为电压表满偏时的电压值。

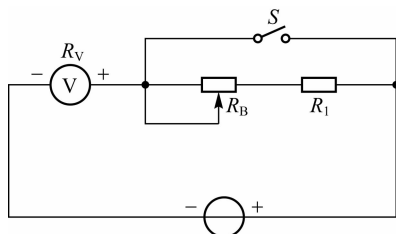


图 1-19 可调直流稳压源

(4) 仪表内阻引起的测量误差(通常称为方法误差, 而仪表本身结构引起的误差则称为仪表基本误差)的计算。

以图 1-20 所示电路为例, R_1 上的电压为 $U_{R_1} = \frac{R_1}{R_1+R_2} U$, 若 $R_1=R_2$, 则 $U_{R_1} = \frac{1}{2}U$ 。

现用一内阻为 R_V 的电压表来测量 U_{R_1} 值, 当 $R_V R_1 R_V$ 与 R_1 并联后, $R_{AB} = \frac{R_V R_1}{R_V + R_1}$, 以此来

替代 $R_V + R_1 \frac{R_V R_1}{R_V + R_1}$

上式中的 R_1 , 则得 $U'_{R_1} = \frac{U}{\frac{R_V R_1}{R_V + R_1} + R_2}$

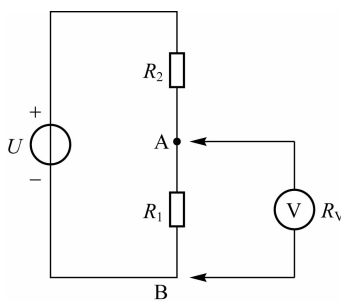


图 1-20 示例电路

$$\text{绝对误差为 } \Delta U = U'_{R_1} - U_{R_1} = U \left(\frac{\frac{R_V R_1}{R_V + R_1}}{\frac{R_V R_1}{R_V + R_1} + R_2} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)$$

$$\text{化简后得 } \Delta U = \frac{-R_2 R_1 R_2 U}{R_V (R_2 + 2R_1 R_2 + R_2) + R_1 R_2 (R_1 + R_2)}$$

$$\text{若 } R_1 = R_2 = R_V, \text{ 则得 } \Delta U = \frac{U}{6}$$

$$\text{相对误差 } \Delta U \% = \frac{U'_{R_1} - U_{R_1}}{U_{R_1}} \times 100 \% = \frac{-U/6}{U/2} \times 100 \% = -33.3 \%$$

由此可见,当电压表的内阻与被测电路的电阻相近时,测量的误差是非常大的。

三、实验设备

实验设备见表 1-1。

表 1-1 实验设备

| 序 号 | 名 称 | 型号与规格 | 数 量 | 备 注 |
|-----|----------|-----------|-----|---------|
| 1 | 可调直流稳压电源 | 0~30 V | 1 | |
| 2 | 可调直流恒流源 | 0~500 mA | 1 | |
| 3 | 指针式万用表 | MF-47 或其他 | 1 | 自备 |
| 4 | 元件箱 | | 1 | TKDG-05 |

四、实验内容

(1)根据“分流法”原理测定指针式万用表(MF-47 型或其他型号)直流毫安 0.5 mA 和 5 mA 挡量限的内阻。线路见图 1-18,数据记入表 1-2。

表 1-2 根据“分流法”原理测定数据记录表

| 被测电流表量限 | S 断开时表读数(mA) | S 闭合时表读数(mA) | $R_B(\Omega)$ | $R_1(\Omega)$ | 计算内阻 $R_A(\Omega)$ |
|---------|--------------|--------------|---------------|---------------|--------------------|
| 0.5 mA | | | | | |
| 5 mA | | | | | |

(2)根据“分压法”原理按图 1-19 接线,测定指针式万用表直流电压 2.5 V 和 10 V 挡量限的内阻,数据记入表 1-3。

表 1-3 根据“分压法”原理测定数据记录表

| 被测电压表量限 | S 闭合时表读数(V) | S 断开时表读数(V) | $R_B(k\Omega)$ | $R_1(k\Omega)$ | 计算内阻 $R_V(k\Omega)$ | $S(\Omega/V)$ |
|---------|-------------|-------------|----------------|----------------|---------------------|---------------|
| 2.5 V | | | | | | |
| 10 V | | | | | | |

(3)用指针式万用表直流电压 10 V 挡量限测量图 1-20 电路中 R_1 上的电压 U'_{R1} 之值,并计算测量的绝对误差与相对误差,数据记入表 1-4。

表 1-4 用指针式万用表测量数据记录表

| U | R_2 | R_1 | $R_{10V}(k\Omega)$ | 计算值 $U_{R1}(V)$ | 实测值 $U'_{R1}(V)$ | 绝对误差(V) | 相对误差% |
|-----|---------------|---------------|--------------------|-----------------|------------------|---------|-------|
| 10V | 10 k Ω | 50 k Ω | | | | | |

五、实验注意事项

(1) 在开启 DG04 挂箱的电源开关前, 应将两路直流稳压电源的输出调节旋钮调至最小(逆时针旋到底), 并将恒流源的输出粗调旋钮拨到 2 mA 挡, 输出细调旋钮应调至最小。接通电源后, 再根据实验需要缓慢调节。

(2) 当恒流源输出端接有负载时, 如果需要将其粗调旋钮由低挡位向高档位切换, 必须先将其细调旋钮调至最小。否则输出电流会突增, 可能会损坏外接器件。

(3) 电压表应与被测电路并联, 电流表应与被测电路串联, 并且都要注意正、负极性与量程的合理选择。

(4) 实验内容(1)、(2)中, R_1 与 R_B 并联, 可使阻值调节比单只电阻容易。 R_1 的取值应与 R_B 相近。

(5) 本实验仅测试指针式仪表的内阻。由于所选指针表的型号不同, 实验中所列的电流、电压量程及选用的 R_B 、 R_1 等都会不同。实验时应按选定的表型自行确定。

六、思考题

(1) 根据实验内容(1)和(2), 若已求出 0.5 mA 挡和 2.5 V 挡的内阻, 可否直接计算得出 5 mA 挡和 10 V 挡的内阻?

(2) 用量程为 10 A 的电流表测实际值为 8 A 的电流时, 实际读数为 8.1 A, 求测量的绝对误差和相对误差。

(3) 所示图 1-21(a)、(b) 所示为伏安法测量电阻的两种电路, 被测电阻的实际阻值为 R_x , 电压表的内阻为 R_V , 电流表的内阻为 R_A , 求两种电路测量电阻 R_x 的相对误差。

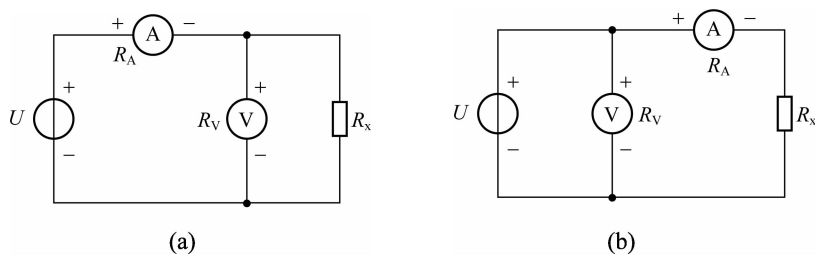


图 1-21

七、实验报告

- (1) 列表记录实验数据, 并计算各被测仪表的内阻值。
- (2) 分析实验结果, 总结应用场合。
- (3) 对思考题的计算。

任务三 电压源与电流源的等效变换

电源是电路中一个非常重要的装置,它的作用是将非电能转换为元件的电能为或电信号,为电路提供电能。生活中常见的电源有干电池、蓄电池、太阳能电池、发电机和电子稳压、稳流装置等。

电源可以用两种不同的电路模型来表示:一种是用电压的形式来表示,称为电压源;一种是用电流的形式来表示,称为电流源。

一、电压源

电压源是实际电源的一种抽象,它向外电路提供较为稳定的电压,其输出电压不随负载变化而变化,即伏安特性 $U=f(I)$ 是一条平行于 I 轴的直线,可以这样向外电路提供稳定电压的电源称为电压源。

理想的电压源具有如下两个基本性质:

- (1) 理想的电压源的输出电压值是一个恒定值。
- (2) 流过理想电压源的电流不由电压源本身决定,而由与它连接的外电路来确定。

理想电压源的几点说明:

(1) 在实际生活中,理想电压源是不存在的,但有些实际电源在一定条件下可近似地看作理想电压源。例如,在一定条件下,电源的内阻很小,其输出电压几乎不随负载变化而变化,这样的电源可以看成理想电压源。

(2) 实际电源可以用一个理想电压源 E 和一个小电阻串联 R_0 的模型来表示。当电压源中有电流流过时,必然在内阻上产生电压降,因此,实际电压源的端电压 U 可表示为

$$U = E - IR_0 \quad (1-13)$$

理想电压源和实际电压源的对照如图 1-22 所示。

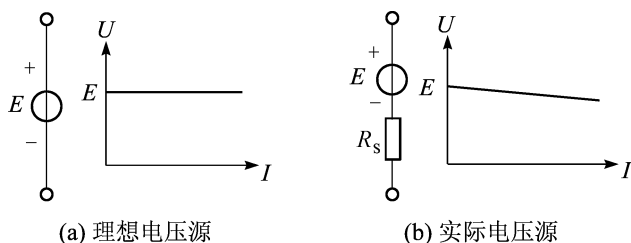


图 1-22 理想电压源与实际电压源的对照

(3) 电源内阻 R_s 越小,输出电压变化越小,也就越稳定,当内阻 R_s 为零(相当于电源的内阻 R_s 短路)时,端电压 U 等于电源输出 E ,此时,可看成理想电压源。

二、电流源

电流源是实际电源的一种抽象,它向外电路提供较为稳定的电流,其输出电流不随负载变化而变化,即伏安特性 $U=f(I)$ 是一条垂直于 I 轴的直线,可以这样向外电路提供稳定电流的电源,称为电流源。

理想的电流源具有如下两个基本性质:

- (1)理想电流源的输出电流值是一个恒定值。
- (2)理想电流源两端的端电压不由电流源本身决定,而由与它连接的外电路来确定。

理想电流源的几点说明:

(1)与理想电压源一样,在实际生活中,理想电流源也是不存在的,但有些实际电源在一定条件下可近似地看作理想电流源。例如,在一定条件下,电源的内阻很大,其输出电流几乎不随负载变化而变化,这样的电源就可以看成理想电流源。

(2)实际电源可以用一个理想电流源 I_S 和一个大电阻 R_S 并联的模型来表示。当有电流流过大电阻 R_S 时,必然会产生分流作用,因此,实际流过电流源的电流 I 与电流源产生的电流 I_S 之间的关系可表示为

$$I = I_S - \frac{U}{R_S} \quad (1-14)$$

理想电流源和实际电流源的对照,如图 1-23 所示。

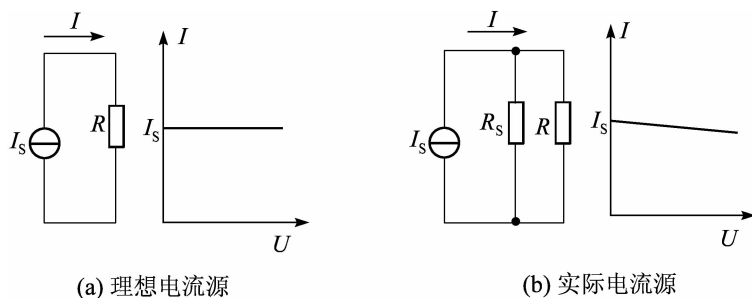


图 1-23 理想电流源与实际电流源的对照

(3)电源内阻 R_S 越大,输出电流变化越小,也就越稳定,当内阻 R_S 为无穷大 ∞ (相当于电源的内阻 R_S 短路)时,流过电流源的电流 I 等于电流源产生的电流 I_S ,可看成理想电流源。

三、电压源和电流源的等效变换

在电路分析当中,有些复杂的电路网络中含有多个电源(电压源和电流源),常常需要将电源进行合并,成为一个等效电源,这种从复杂到简化等效电路的分析方法称为电源等效变换法。

一个实际电源可以用电压源模型来等效,也可以用电流源模型来等效。在电路分析时,

为了方便,当两个电源模型满足一定条件时,就可以等效互换,对负载和外电路效果都是一样的,这种方法称为电压源和电流源等效变换。

已知一个电压源电路模型和一个电流源电路模型,如图 1-24 示。

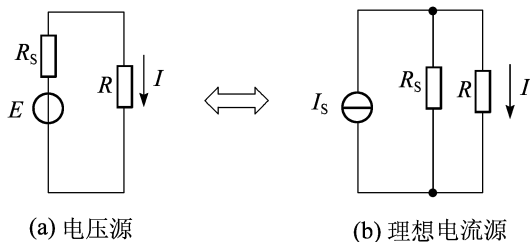


图 1-24 理想电压源和理想电流源的等效变换

图 1-24(a)中,根据基尔霍夫电压定律,可列出如下方程:

$$I = \frac{E}{R + R_s} \quad (1-15)$$

图 1-24(b)中,根据基尔霍夫电压定律,可列出如下方程:

$$I = I_s - I_s \frac{R}{R + R_s}$$

$$I = \frac{I_s R_s}{R + R_s} \quad (1-16)$$

从式(1-15)和式(1-16)可以得出,电压源与电流源等效变换的条件是它们的内阻 R_s 相等。它们之间的变换公式为

$$E = I_s R_s \quad (1-17)$$

说明:

(1)因为理想电压源的电压恒定不变,所以任何与理想电压源并联的元件对外电路不起作用,等效变换或电路分析时可以省掉。

(2)同理,因为理想电流源的电流也是恒定不变的,所以与理想电流源串联的任何元件对外电路不起作用,等效变换或电路分析时可以省掉。

(3)因为理想电压源的内阻等于零,理想电流源的内阻等于无穷大,所以理想电压源与理想电流源之间不存在等效变换,本节讲的是电压源与电流源的等效变换。

(4)电压源与电流源进行等效变换时,要注意电压源 E 与电流源 I_s 的参考方向。

例 1-4 已知某一多电源电路如图 1-25 所示,请用电源等效变换分别把它们简化成电压源和电流源。

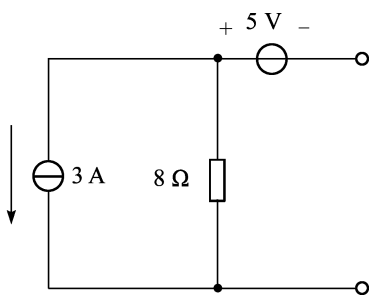


图 1-25 例 1-4 图

解 (1) 简化为电压源。

根据电压源与电流源的转换公式, 可将 3 A 的电流源和 8Ω 的电阻等效为 24 V 的电压源和 8Ω 的内阻, 根据图中电流源的参考方向, 可得等效后的电压源的方向如图 1-26 所示。

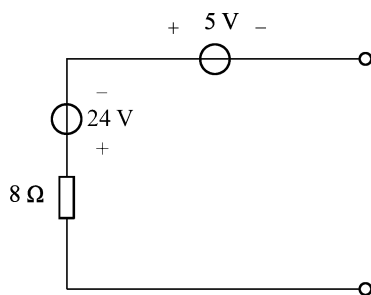


图 1-26 示例图

再根据基尔霍夫电压定律, 可得最后的电压源如图 1-27 所示。

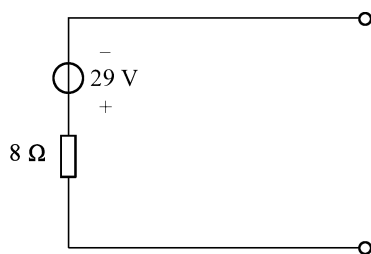


图 1-27 例 1-4 简化后的电压源

(2) 简化为电流源。

将 29 V 的电压源和 8Ω 的电阻等效为一个电流为 3.625 A、内阻为 8Ω 的电流源, 如图 1-28 所示。

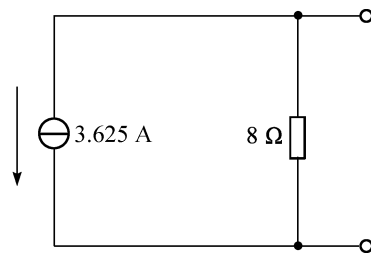


图 1-28 例 1-4 简化后的电流源

任务四 基尔霍夫定律的应用

在学习电路时,经常会用欧姆定律、并联和串联等知识去解决一些电路的计算问题。这些知识在解决一些简单的电路问题时没有问题,但如果遇到一些复杂的电路问题,如图 1-29 所示的电桥电路时,就非常困难了。本任务通过介绍基尔霍夫定律来解决这些问题。

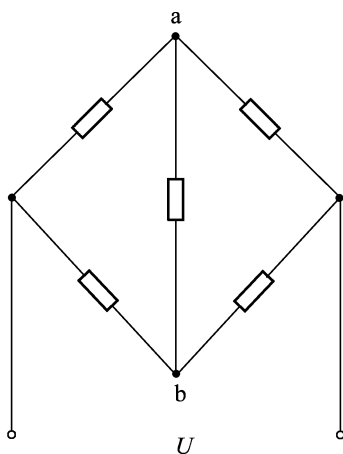


图 1-29 电桥电路

在一个电路的内部,各段的电流、电压之间相互影响、相互制约,成为一个具有内在规律的统一系统。基尔霍夫定律就是从电路的整体揭示电路各段之间电流、电压之间的必然联系的。

在学习基尔霍夫定律之前,先学习几个相关的电路名词和术语。

支路:电路中的每一分支均称为支路。

结点:电路中三条或三条以上的支路相连接的点称为结点,如图 1-29 中的 a 点和 b 点。

回路:一条或多条支路所组成的闭合回路。

网孔:中间没有支路穿过的独立回路。

无论一个电路有多复杂,它都是由一些结点、支路和闭合回路组成的。基尔霍夫定律规定了电路中任一结点电流和任一闭合回路各段电压所必须服从的约束关系,是电路分析的基本理论依据。

基尔霍夫定律包括两个部分:基尔霍夫电流定律(KCL)和基尔霍夫电压定律(KVL)。基尔霍夫电流定律应用于结点,基尔霍夫电压定律应用于回路。

一、基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律的英文缩写为 KCL。

1. 基尔霍夫电流定律及其应用

基尔霍夫电流定律是如何表述的呢?下面根据一个相关的例子来介绍。日常生活中的

水管,往往在主干水管接了很多的分支,分支的一端会连接到居民家里,居民的用水量可以由安装在家里的水表读出来。有时候我们想知道在这条主干上的水流量,是不是就要把所有居民的水表读出来然后加起来呢?当然不是,只要读出安装在主干上水表的读数就知道了居民的总用水量,同理对于电路也是如此。

基尔霍夫电流定律是有关结点电流的定律,文字描述及方程式为:

(1)电路中任一瞬间,流出任一结点的电流之和恒等于流入结点的电流之和。流入、流出指参考方向是指向还是背向结点。指向为流入,背向为流出。

$$\sum i_{\text{出}} = \sum i_{\text{入}} \quad \text{或} \quad \sum i_{\text{入}} = \sum i_{\text{出}} \quad (1-18)$$

(2)电路中任一瞬间,任意结点上电流代数和恒等于零。正、负由参考方向决定,一般流入为正,流出为负。

$$\sum i = 0 \quad (1-19)$$

以图 1-30 电路中的 A 点为例,本点处的基尔霍夫电流公式为

$$i_1 = i_2 + i_3$$

或

$$i_1 - i_2 - i_3 = 0 \quad (1-20)$$

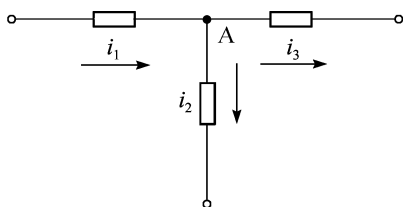


图 1-30 A 点的基尔霍夫电流定律

列写基尔霍夫电流方程的步骤为:

- (1)选定结点。
- (2)标出各支路电流的参考方向。
- (3)针对结点应用基尔霍夫电流定律(KCL)列出方程。

2. 基尔霍夫电流定律的扩展应用

根据电流连续性原理,基尔霍夫定律不仅适用于结点,还可以应用于电路的某一部分。基尔霍夫定律扩展应用表示为电路中任意假设的封闭面(广义结点),其电流代数和等于零,如图 1-31 所示。

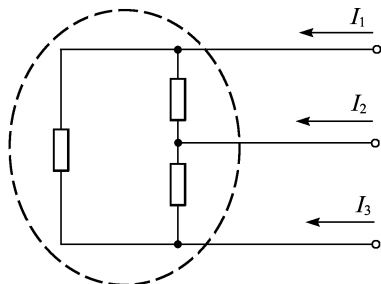


图 1-31 基尔霍夫电流定律扩展应用

例 1-5 如图 1-32 所示,在给定电流参考方向 $I_1=4\text{ A}$, $I_2=2\text{ A}$, $I_3=-5\text{ A}$, $I_4=3\text{ A}$, $I_5=-3\text{ A}$,求 I_6 的大小。

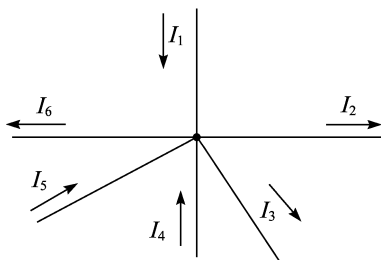


图 1-32 例 1-5 图

解 根据 KCL,得

$$\begin{aligned} I_1 - I_2 - I_3 + I_4 + I_5 - I_6 &= 0 \\ I_6 &= I_1 - I_2 - I_3 + I_4 + I_5 \\ &= 4\text{ A} - 2\text{ A} - (-5)\text{ A} + 3\text{ A} + (-3)\text{ A} \\ &= 7\text{ A} \end{aligned}$$

二、基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律的英文缩写为 KVL。

1. 基尔霍夫电压定律及其应用

基尔霍夫电压定律是确定一个回路内部各段电压之间关系的定律,文字描述为:

- (1) 电路中任一瞬间,沿任一回路各段电压的代数和恒等于零。
- (2) 在任意闭合回路中,电动势代数和等于电阻压降的代数和。

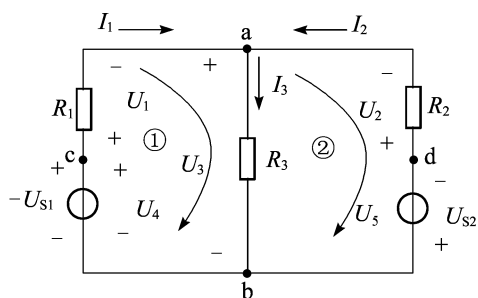


图 1-33 基尔霍夫电压定律

如图 1-33 所示,回路①中的 KVL 为

依据文字描述(1)可得表达式为

$$I_1 R_1 - U_{S1} + I_3 R_3 = 0, \text{即} \sum U = 0 \quad (1-21)$$

依据文字描述(2)可得表达式为

$$U_{S1} = I_1 R_1 + I_3 R_3, \text{即} \sum E = \sum IR \quad (1-22)$$

列写基尔霍夫电压方程的步骤为：

(1) 选定回路, 标出回路绕行的方向, 绕行方向标注方法有两种, 即顺时针法和逆时针法。

(2) 标出各支路电流、电压的参考方向。

(3) 对回路应用 KVL 定律列出方程。

2. 基尔霍夫电压定律的扩展应用

基尔霍夫电压定律不仅适用于实在的闭合回路, 而且适用于闭合的假想回路, 可推广应用到任何一个开口电路。例如图 1-34 所示中 A、C 两点之间的电压 U_{AC} , 可假想 A、C 之间是连通的, 构成闭合回路 A-B-C-A。条件是 A、C 两点之间的电压 U_{AC} 保持不变。

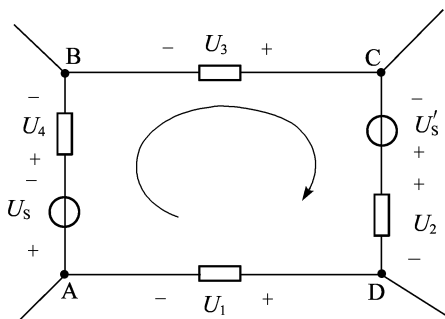


图 1-34 基尔霍夫电压定律的扩展应用

列出的 KVL 方程为

$$U_S + U_4 - U_3 - U_{AC} = 0$$

式中, U_{AC} 为 KVL 扩展的一个替代电压。

例 1-6 已知某电路如图 1-35 所示, $U_S = 21 \text{ V}$, $I_S = 2 \text{ A}$, $R_1 = 2 \Omega$, $R_2 = 4 \Omega$, 求:

(1) 电流源的端电压 U ;

(2) A、B 两点之间的电压 U_{AB} 。

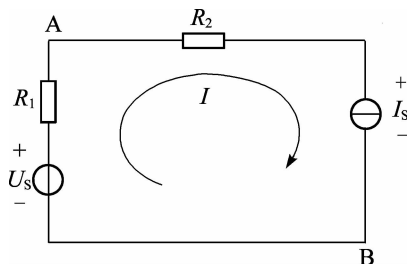


图 1-35 例 1-6 图

解 (1) 电流源是向外提供恒定电流的, 电流源两端也有电压, 取其电压为 U , 根据 KVL, 列出方程为

$$U_S - I_S R_1 - I_S R_2 - U = 0$$

代入数据计算得

$$21 \text{ V} - 2 \text{ A} \times 2 \text{ } \Omega - 2 \text{ A} \times 4 \text{ } \Omega - U = 0$$

$$U = 9 \text{ V}$$

(2) 根据 KVL 的扩展应用可得

$$U_S - I_S R_1 - U_{AB} = 0$$

代入数据计算得

$$U_{AB} = U_S - I_S R_1 = 21 \text{ V} - 2 \text{ A} \times 2 \text{ } \Omega = 17 \text{ V}$$

基尔霍夫的两个定律是电路分析中最重要的基本定律之一,应该深入理解,认真掌握其应用。

技能训练 基尔霍夫定律的验证

一、实验目的

- (1) 验证基尔霍夫定律的正确性,加深对基尔霍夫定律的理解。
- (2) 学会用电流表连接电流插头、插座测量各支路电流。
- (3) 学会用电压表测量各元件两端电压。

二、实验原理

基尔霍夫定律是电路的基本定律。测量某电路的各支路电流及每个元件两端的电压,应能分别满足基尔霍夫电流定律(KCL)和电压定律(KVL)。

基尔霍夫电流定律(KCL):对电路中的任一个节点而言,应有 $\sum I=0$ 。

基尔霍夫电压定律(KVL):对任何一个闭合回路而言,应有 $\sum U=0$ 。

运用上述定律时必须注意各支路或闭合回路中电流的正方向,此方向可预先任意设定。

三、实验设备

实验设备见表 1-5。

表 1-5 实验设备

| 序 号 | 名 称 | 型号与规格 | 数 量 | 备 注 |
|-----|-------------|-----------|-----|--------|
| 1 | 可调直流稳压电源 | 0~30 V | 二路 | |
| 2 | 万用表 | MF-47 或其他 | 1 | 自备 |
| 3 | 直流数字电压表 | 0-200 V | 1 | |
| 4 | 基尔霍夫定律实验电路板 | | | DGJ-03 |

四、实验内容

用 DGJ-03 挂箱的“基尔霍夫定律”线路,连接线路,如图 1-36 所示。

(1) 实验前先任意设定三条支路和三个闭合回路的电流正方向。图 1-36 中的 I_1 、 I_2 、 I_3 的方向已设定。三个闭合回路的电流正方向可设为 $ADEFA$ 、 $BADCB$ 和 $FBCEF$ 。

(2) 分别将两路直流稳压电源接入电路,令 $U_1=6\text{ V}$, $U_2=12\text{ V}$ 。

(3) 熟悉电流插头的结构,如图 1-37 所示,将电流插头的两端接至数字毫安表的“+”“—”两端。

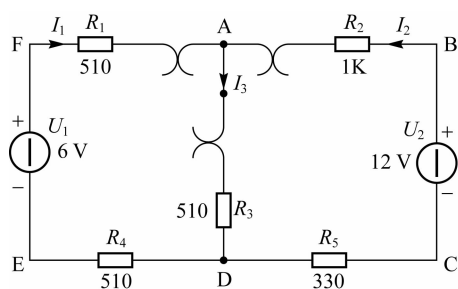


图 1-36 DGJ-03 挂箱电路

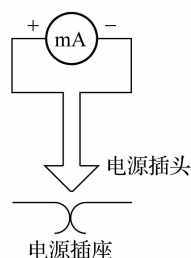


图 1-37 电流插头

- (4) 将电流插头分别插入三条支路的三个电流插座中, 读出电流值并记入表 1-6。
 (5) 用直流数字电压表分别测量两路电源及电阻元件上的电压值, 记入表 1-6。

表 1-6 电流值与电压值测量

| 被测量 | I_1 (mA) | I_2 (mA) | I_3 (mA) | U_1 (V) | U_2 (V) | U_{FA} (V) | U_{AB} (V) | U_{AD} (V) | U_{CD} (V) | U_{DE} (V) |
|------|------------|------------|------------|-----------|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 计算值 | | | | | | | | | | |
| 测量值 | | | | | | | | | | |
| 相对误差 | | | | | | | | | | |

五、实验注意事项

- (1) 本实验电路板系多个实验通用, 本次实验需用到电流插座。
 (2) 所有需要测量的电压值, 均以电压表测量的读数为准。 U_1 、 U_2 也需测量, 不应取电源本身的显示值。
 (3) 防止稳压电源两个输出端碰线短路。
 (4) 用指针式电压表或电流表测量电压或电流时, 如果仪表指针反偏, 则必须调换仪表极性, 重新测量。此时指针正偏, 可读得电压或电流值。若用数显电压表或电流表测量, 则可直接读出电压或电流值。但应注意: 所读得的电压或电流值的正确的正、负号应根据设定的电流参考方向来判断。

六、预习思考题

- (1) 根据图 1-36 的电路参数, 计算出待测的电流 I_1 、 I_2 、 I_3 和各电阻上的电压值, 记入表中, 以便实验测量时, 可正确地选定毫安表和电压表的量程。
 (2) 实验中, 若用指针式万用表直流毫安挡测各支路电流, 在什么情况下可能出现指针反偏, 应如何处理? 在记录数据时应注意什么? 若用直流数字毫安表进行测量, 则会有什么显示?

七、实验报告

- (1) 实验名称。

- (2)实验目的。
- (3)实验原理:简单说明原理,并附上实验电路图。
- (4)根据实验数据,选定节点 A,验证 KCL 的正确性。
- (5)根据实验数据,选定实验电路中的任一个闭合回路,验证 KVL 的正确性。