

电路的基本概念和基本定律

1.1 电路和电路模型

1.1.1 电路

电路是由若干电气设备或元件按一定方式用导线连接而成的电流通路。简单地说,电路就是电流流通的路径。

电路通常由电源(或信号源)、负载及中间环节三部分组成。

电源是将其他形式的能转换为电能的装置,如发电机、干电池、蓄电池等将各种非电能(如热能、化学能、光能和原子能等)转换成电能。将各种物理量转变为电信号的装置称为信号源,信号源也是电源的一种。

负载是消耗电能的装置或元件,它将电能转换为其他形式的能,如电炉、电动机、电灯、扬声器等。

中间环节是把电源和负载连接起来的部分,起传输、分配和控制电能的作用,如导线、开关、放大器、变压器等。

图 1-1(a)所示为手电筒电路的实际电路。其中,干电池是电源,小灯泡是负载,开关和导线是中间环节。电路的作用是实现电能的输送和转换或对电信号进行传递和处理。

1.1.2 电路模型

由于实际电路元件的电磁关系比较复杂,为了便于对实际电路进行分析和计算,通常在一定条件下,忽略元件的次要特性,用一个或多个足以表征其主要特性的理想化元件代替实际元件,如白炽灯的功能是把电能转换成灯丝的热能,使灯丝的温度升高到白炽状态而发光,其主要电磁性质是消耗电能。因此,可以用一个代表消耗电能的理想电阻元件作为白炽灯的模型。由理想元件构成的电路称为实际电路的电路模型,也称为实际电路的电路原理图,简称电路图。任何实际电路都可以用电路图来表示。

图 1-1(b)所示为实际手电筒电路的电路模型。其中,小灯泡被等效为理想电阻元件,干电池(忽略其内阻)为理想电源 U_S ,导线和开关被认为是无电阻的理想导线。

电路理论研究的对象是电路模型而不是实际电路。只要电路模型建立得足够精确,通过对电路模型的研究所获得的结论就能足够正确地反映出实际电路的情况。人们习惯上也把电路模型简称为电路。

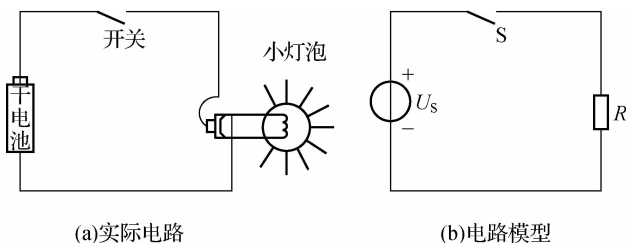


图 1-1 手电筒电路

1.2 电路的基本物理量

在电路理论中分析和研究的物理量很多,但主要是电流、电压和电功率,其中,电流、电压是电路中的基本物理量。在具体分析、讨论电路问题之前,首先建立并深刻理解一些重要物理量的有关基本概念是非常必要的。

1.2.1 电流

电流是由电荷(带电粒子)有规则的定向移动形成的,如导体中的自由电子、电解液和电离了的气体中的自由离子、半导体中的电子和空穴都属于带电粒子,或称载流子。规定正电荷移动的方向为电流方向。电流的大小用电流强度来衡量。电流强度是指在单位时间内通过导体某一横截面的电荷量。设在 dt 时间内通过导体某一横截面的电荷量为 dq ,则通过该横截面的电流强度为

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

式(1-1)表示电流是随时间变化的函数,用小写字母 i 表示。若电流不随时间变化,则 $\frac{dq}{dt}$ 等于常数,该电流称为恒定电流(简称直流),用大写字母 I 表示。它所通过的路径就是直流电路。

在直流电路中,单位时间内通过导体某一横截面的电荷量是恒定不变的,即

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

在国际单位制(SI)中,电荷量的单位为库仑(C);时间单位为秒(s);电流单位为安培,简称安(A),有时也会用到千安(kA)、毫安(mA)、微安(μA)等单位。它们的换算关系如下:

$$1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A} = 10^6 \text{ mA} = 10^9 \mu A \quad (1-3)$$

电流的方向是客观存在的。在简单电路情况下,人们很容易判断出电流的实际方向;而在复杂电路中,电流的实际方向有时很难确定。为了解决这一问题,需引入电流的参考方向这一概念。

参考方向即预先假定的方向。电流的参考方向可以任意选定,在电路中一般用箭头表示。

当然,所选的电流的参考方向不一定是电流的实际方向。若电流的实际方向与参考方向相同,电流取正值($I > 0$),如图 1-2(a)所示;若电流的实际方向与参考方向相反,电流取负

值($I < 0$),如图 1-2(b)所示。这样,在选定的参考方向下,根据电流的正负,就可以确定电流的实际方向。

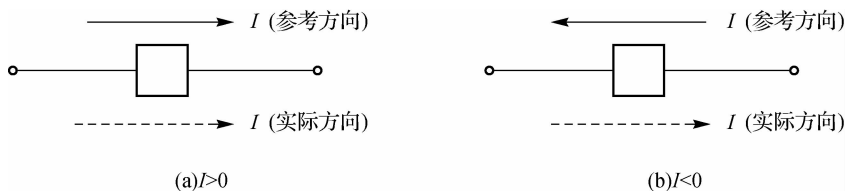


图 1-2 电流的参考方向与实际方向

综上,在分析电路时,首先要假定电流的参考方向,并以此进行分析计算,最后再从答案的正负来确定电流的实际方向。

注意:无论参考方向如何设定,都不会影响结果的准确性;离开参考方向谈电流的正负是没有意义的;电流的实际方向是客观存在的,它不因其参考方向选择的不同而改变。

1.2.2 电位

了解电路中某些点的电位(或电势),比较两点间电位的高低,对分析电路十分有用。

在电路中任选一点作为参考点,则某点的电位就是该点与参考点之间的电压。电位用字母 V 表示。参考点本身的电位,就是参考点与参考点之间的电压,显然为零,所以参考点又称为零电位点。

规定电路中某一点的电位就是该点与参考点之间的电压,电位的方向则从该点指向参考点。电位常用字母 V 加下角标表示,如电路中 a 点的电位表示为 V_a 。电位的单位为伏特(V)。

参考点可以任意选取。参考点的电位规定为零,因此,低于参考点的电位是负电位,高于参考点的电位是正电位。工程上常选择大地或机壳作为参考点。

电位与电压的关系可表示为

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

可见,电路中任意两点之间的电压等于这两点的电位之差。

参考点是可以任意选定的,一经选定,电路中的各点电位也就确定了。参考点选择不同,电路中各点的电位也不同,但任意两点间的电位差不变,即两点间的电压值与参考点的选择无关。

1.2.3 电压

电荷在电场力作用下定向移动而形成电流,在这一过程中,电场力推动电荷移动做功。电压就是用来度量电场力做功能力的物理量。电路中 a 、 b 两点间的电压 $u(t)$ 在数值上等于电场力将单位正电荷从 a 点移动到 b 点所做的功,即

$$u = \frac{dW}{dq} \quad (1-5)$$

式中, dq 为由 a 点移动到 b 点的电荷量; dW 为电荷移动过程中所获得或失去的能量; u 为两点间的电压。规定:若正电荷从 a 点移到 b 点,其电势能减少,电场力做正功,电压实际方向

从 a 到 b 。

在直流电路中,式(1-5)可表示为

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

在国际单位制(SI)中,功的单位为焦耳(J);电荷量的单位为库仑(C);电压的单位为伏特(V),也用千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μV)。它们的换算关系如下:

$$1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V} = 10^6 \text{ mV} = 10^9 \mu\text{V} \quad (1-7)$$

电路中电压的参考方向可用箭头表示,也可用“+”代表高电位,用“-”代表低电位,如图 1-3 所示。当电压的实际方向与参考方向相同时, U 为正;当电压的实际方向与参考方向相反时, U 为负。电压 U 的参考方向是 a 点为高电位, b 点为低电位,也可用双下标来表示该参考方向。

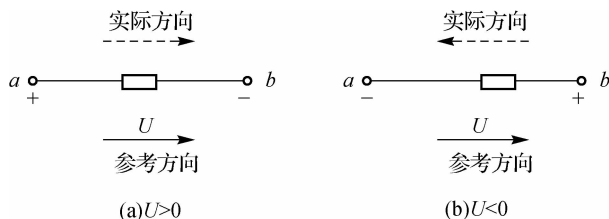


图 1-3 电压的参考方向与实际方向

在分析计算电路时,电流和电压的参考方向的选取原则上是任意的。但为了方便,元件上的电流和电压常取一致的参考方向,称为关联参考方向,如图 1-4(a)所示;若电流和电压选取的参考方向相反,则称为非关联参考方向,如图 1-4(b)所示。当采用关联参考方向时,在电路中只要标出电流或电压中的一个参考方向即可。本书在分析计算电路时,如未做特殊说明,均采用关联参考方向。

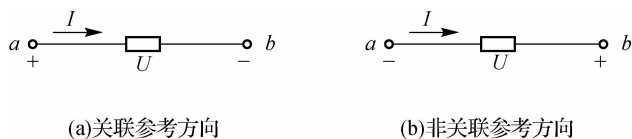


图 1-4 关联参考方向与非关联参考方向

需要特别指出的是,欧姆定律在关联参考方向下才可写为

$$U = RI$$

在非关联参考方向下,则写为

$$U = -RI$$

1.2.4 电动势

为了维持电路中的电流,必须有一种外力持续不断地把正电荷从低电位移到高电位。在各种电源内部,这种外力称为电源力。电源力可以由电池利用化学能产生,也可以由发电机利用机械能产生。

电源力将单位正电荷从电源的负极移到电源的正极所做的功,称为电源的电动势。在

直流电路中,电动势用字母 E (或 U_S) 表示, 交变电源则用小写字母 e 或 u_s 表示。电动势的单位与电压相同, 也是伏特(V)。电动势 E 可表示为

$$E = \frac{W}{Q} \quad (1-8)$$

电源电动势的正方向规定为从电源的负极指向正极。

在具有电动势的电路中, 能产生持续的电压, 若电路闭合, 则有电流产生。

电源的电动势可以用电压表测量。测量时, 电源不连接在电路中, 用电压表测量电源两端的电压所得的电压值就可以视为与电源的电动势相等。如果电源连接在电路中, 用电压表测得的电源两端的电压值就会小于电源的电动势。这是因为电源有内阻, 在构成闭合电路时内阻会分担部分电压, 造成输出电压小于电源的电动势。

严格来说, 即使电源不接入电路, 电压表测得的电压值也小于电源电动势。这是因为电压表也有内阻, 但电压表内阻很大, 而电源内阻很小, 故电源内阻可以忽略。因此, 电压表测得的电源两端的电压值即可视为与电源的电动势相等。

1.2.5 电功率和电能

将正电荷从一段电路的高电位端移到低电位端时, 电场力对正电荷做了功, 该段电路吸收了电能; 将正电荷从电路的低电位端移到高电位端时, 电源力克服电场力做了功, 这段电路将其他形式的能转换成电能释放了出来。电路单位时间内能量的变化或做功的多少称为电功率, 简称功率。若用字母 P 表示电功率, 则其计算公式为

$$P = \frac{dW}{dt} \quad (1-9)$$

式中, dW 为 dt 时间内电场力所做的功。在国际单位制(SI)中, 功率的单位为瓦特(W), 简称瓦。此外, 还常用到千瓦(kW)、毫瓦(mW)等单位。

对式(1-9)进一步推导可得

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-10)$$

即电路的功率等于该段电路电压与电流的乘积。直流时, 式(1-10)应写为

$$P = UI \quad (1-11)$$

由式(1-9)可得 $dW = Pdt$, 因此, 在 $t_0 \sim t_1$ 时间段, 电路消耗的电能应为

$$W = \int_{t_0}^{t_1} P dt \quad (1-12)$$

直流时, P 为常数, 则

$$W = P(t_1 - t_0) \quad (1-13)$$

在国际单位制中, 电能的单位是焦耳, 它表示 1 W 的用电设备在 1 s 内所消耗的电能。实际中还常用到千瓦时(kW·h)的电能单位, 即

$$1 \text{ 千瓦时} = 1 \text{ kW} \cdot \text{h} = (1 \times 10^3 \times 3600) \text{ J} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

需要强调的是, 在电压、电流的参考方向关联的条件下, 一段电路所吸收的电功率为该段电路两端电压、电流的乘积。此时, 电压和电流均为代数量, 有正负之分, 将 U 、 I 的数值代入式(1-11)计算, 若 $P > 0$, 说明这段电路上的电压与电流的实际方向一致, 正电荷在电场力作用下做了功, 该段电路吸收功率(消耗功率); 若 $P < 0$, 说明这段电路上电压与电流的实际

方向不一致,一定是电源力克服电场力做了功,该段电路吸收负功率,即该段电路向外供出功率,或者说产生功率。例如,计算出某段电路吸收功率为 -4 W ,那么说成该段电路产生 4 W 的功率也是正确的。如果遇到电路中电压、电流的参考方向非关联的情况,在计算吸收功率的公式中需要加负号,即 $P=-UI$ 。应特别注意根据电压、电流的参考方向是否关联来选用相应的吸收功率的计算公式。

有时要计算一段电路的产生功率(供出功率),无论 U 、 I 的参考方向是否关联,所用公式与计算吸收功率时的公式相反,即若 U 、 I 的参考方向关联,计算产生功率为 $-UI$;若 U 、 I 的参考方向非关联,计算产生功率为 UI 。

1.3 电阻元件及其伏安关系

电路是由元件连接而成的,元件两端的电压与电流之间的关系(伏安关系),简称为VAB。它反映了元件的基本性质,并和基尔霍夫定律构成了分析电路的基础。

电阻反映在电路中是消耗电能性质的元件,是在电路中所用得最多的元件之一。电阻的大小用电阻量表示,简称电阻,用符号 R 表示,欧姆(Ω)。

一段导体电阻的大小由电阻定律可知为

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1-14)$$

式中, ρ 为材料的电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; L 为导体的长度, m ; S 为导体的横截面积, m^2 ; R 为导体的电阻, Ω 。

工程上还常用千欧($\text{k}\Omega$)、兆欧($\text{M}\Omega$)做单位,它们之间的关系为

$$1\text{ M}\Omega = 10^3\text{ k}\Omega = 10^6\ \Omega \quad (1-15)$$

电阻的倒数称为电导,电导表示导体的导电能力,用字母 G 表示,即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-16)$$

在国际单位制中,电导的单位是西门子,简称西(S)。

电导是衡量材料导电能力的物理量。材料的电阻越大,电导越小,导电性能就越差;反之,材料的电阻越小,电导越大,导电性能就越好。有时(如在并联电路中)用电导来分析计算比较方便。

电阻元件的电路模型如图 1-5(a)所示。当线性电阻的电压 u 与电流 i 的参考方向关联时,伏安关系为

$$u = iR \quad (1-17)$$

当线性电阻的电压 u 与电流 i 的参考方向非关联时,伏安关系为

$$u = -iR \quad (1-18)$$

这个关系称为欧姆定律,表述为线性电阻元件的端电压与流过它的电流成正比。比例系数 R 称为电阻,是表示电阻特性的参数。图 1-5(b)所示曲线直观地反映了电阻的伏安关系,称为伏安特性曲线。若 R 为常数,则称该电阻为线性非时变电阻,简称为线性电阻。若电阻的伏安特性曲线不是一条直线,则称该电阻为非线性电阻。应当注意,非线性电阻不满足欧姆定律。

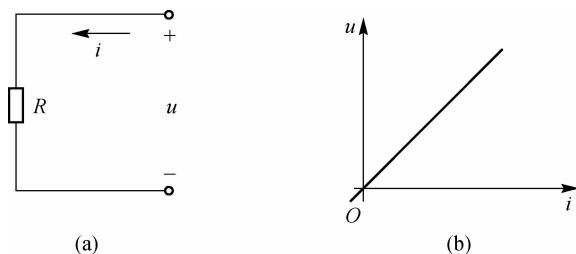


图 1-5 电阻元件的电路模型及伏安特性曲线

1.4 电容元件及其伏安关系

电容器由两个导体中间隔以绝缘介质构成。这两个导体就是电容器的两个极板，极板间由绝缘介质隔开。在电容器两个极板间加一定电压后，两个极板上会分别聚集起等量异性电荷，并在介质中形成电场。去掉电容器两个极板上的电压，电荷能长久储存，电场仍然存在。因此，电容器是一种能储存电场能的元件。

电容元件是实际电容器的理想化模型，简称电容。电容元件的特性由两个极板上所加的电压 u 和极板上储存的电荷 q 来表征。电容 C 的定义是升高单位电压极板所能容纳的电荷，即

$$C = \frac{q}{u} \quad (1-19)$$

电容的单位在国际单位制中是法拉，符号为 F。但在工程实践中，由于法拉这个单位太大，实际电容器的电容往往比 1 F 小得多。因此，电容常用微法(μF)和皮法(pF)为单位。它们的换算关系为

$$1 \text{ F} = 10^6 \mu\text{F} = 10^{12} \text{ pF} \quad (1-20)$$

如果电容元件的电容不随它所带电量的变化而变化，那么这样的电容元件称为线性电容元件。本书只涉及线性电容元件。

线性电容元件的电路连接如图 1-6(a)所示，其中标示出了电流和电容器两端电压的参考方向，先分析电压与电流之间的瞬时关系。当电压发生变化时，电容器极板上的电荷量也要随之发生变化，即

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d(Cu)}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-21)$$

当电压升高时， $\frac{du}{dt} > 0$ ，则 $\frac{dq}{dt} > 0$ ， $i > 0$ ，这时，电流的真实方向是流向电容器的正极板，极板上的电荷增多，对电容器充电；当电压降低时， $\frac{du}{dt} < 0$ ，则 $\frac{dq}{dt} < 0$ ， $i < 0$ ，这时，电流的真实方向是从电容器正极板流出，极板上的电荷减少，电容器放电；当电压不变时， $\frac{du}{dt} = 0$ ，则 $\frac{dq}{dt} = 0$ ， $i = 0$ ，这时，电容器极板上的电荷量不变，电容器相当于开路。因此，电容器有隔断直流的作用。图 1-6(b)所示为线性电容元件的库伏特性曲线。另外，电容器上的电压必须是连续的。

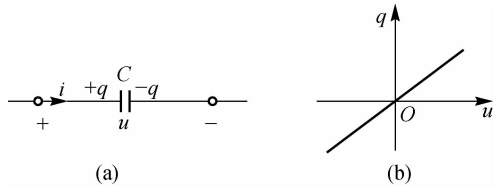


图 1-6 线性电容元件的电路连接及伏库特性曲线

1.5 电感元件及其伏安关系

把金属导线绕在一个骨架上,就构成一个实际的电感器。当电感器中有电流通过时,就会在其周围产生磁场,并储存磁场能量。电感元件是理想化的电路元件,它是实际电路中储存磁场能量这一物理性质的科学抽象。当忽略电感器的导线电阻时,电感器就成为理想化的电感元件,简称电感。它是表征材料(或元件)储存磁场能量的一种参数。如图 1-7 所示为一个电感线圈。

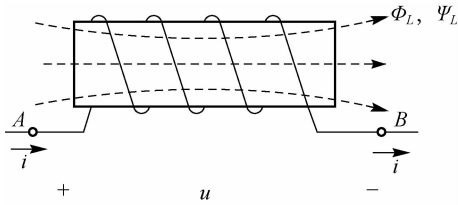


图 1-7 电感线圈

当电流 i 通过后,会产生磁通 Φ_L ,若磁通 Φ_L 与 N 匝线圈相交链,则线圈的磁链为

$$\Psi_L = N\Phi_L \quad (1-22)$$

对于线性电感元件而言,磁链与线圈中电流的比值是一个常数,用 L 来表示,即

$$L = \frac{\Psi_L}{i} \quad (1-23)$$

电感的符号用大写字母 L 表示。电感也称为自感系数,是电感元件的参数。电感只与线圈自身有关,而与线圈的电流无关。如果电感元件的电感为常量,则称为线性电感元件。电感的单位是亨利(H),常用单位是毫亨(mH)和微亨(μH)。它们之间的换算关系为

$$1 \text{ H} = 10^3 \text{ mH} = 10^6 \mu\text{H} \quad (1-24)$$

当电感元件中的磁通 Φ 发生变化时,线圈中将产生感应电动势 e_L ,当电压、电流和电动势均采用如图 1-8(a)所示的参考方向时,有如下关系:

$$e_L = -N \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt} = -L \frac{di}{dt} \quad (1-25)$$

$$u = -e_L = L \frac{di}{dt} \quad (1-26)$$

当电感元件中流过稳定的直流电流时,其端电压 $u=0$,故在直流电路中电感元件可视为短路。

在关联参考方向下,电感元件两端的电压与线圈电流的关系可表示为

$$i = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u dt = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^0 u dt + \frac{1}{L} \int_0^t u dt = i_0 + \frac{1}{L} \int_0^t u dt \quad (1-27)$$

式中, i_0 为电流的初始值, 即 $t=0$ 时通过电感元件的电流。该式表明电感的电流具有记忆功能, 它是一种记忆元件。

当通过电感元件的电流变化时, 磁链也相应变化, 根据电磁感应定律, 电感元件两端会出现感应电压, 这个电压等于磁链的变化率。只有当电流变化时, 磁链才会变化, 电感元件两端才会有电压; 电流变化越快, 电压就越大。当电感元件通过直流时, 电压 $u=0$, 所以在直流稳态电路中, 电感元件相当于短路。电感元件中的电流是连续的, 不能跃变。

按照 $\Psi-i$ 平面上的韦安特性曲线的不同情况, 电感元件可以分为线性时不变、线性时变、非线性时变、非线性时不变 4 类。以下讨论线性时不变电感元件, 简称电感元件。此类元件在 $\Psi-i$ 平面上的韦安特性曲线为过原点的直线, 如图 1-8(b) 所示。

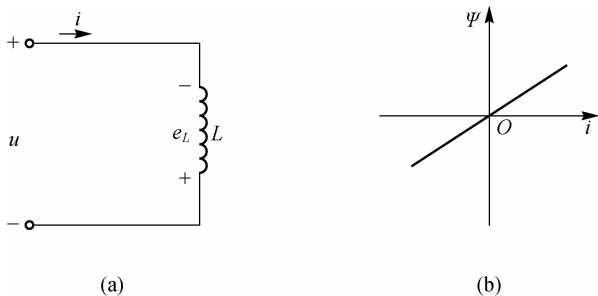


图 1-8 电感元件的符号及韦安特性曲线

1.6 电路的工作状态

电路在工作时, 会出现几种不同的工作状态, 本节主要讨论电路在开路、短路和额定状态工作时的特征。

1.6.1 开路状态

当某一部分电路对外连接端断开时, 这部分电路外接端没有电流流过, 则这部分电路所处的状态称为开路。也就是说电源与负载未构成闭合路径, 此时电流 $I=0$, 断开处的电压称为开路电压, 用 U_{OC} 表示。开路有时也称为断路。

如图 1-9 所示, 当开关 S 未接通时, 电路中的负载不工作, 此时电流 $I=0$, 电源的端电压即为开路电压 U_{OC} 。

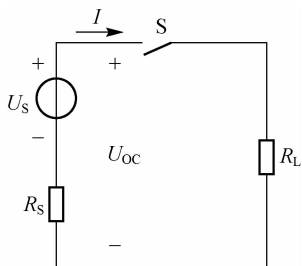


图 1-9 电路开路图

在实际生活中,用开关控制电灯的亮与灭,当合上开关后灯泡不亮,说明电路中有开路(断路),即电路中某一处断开了,没有电流通过。

开路状态的特点为:电流为零,负载不工作, $U=IR=0$,而开路处的端电压 $U_{OC}=U_S$ 。

1.6.2 短路状态

当用导线(电阻为 0)将某一部分电路的两个外接端直接连接起来时,称这部分电路短路(或短接)。短路时,短路部分电路的电压为零。此导线称为短路线,流过短路线的电流称为短路电流,用 I_{SC} 表示。

短路可分为有用短路和故障短路两种。例如,在测量电路中的电流时常将电流表串联到电路中,为了保护电流表,在不需要用电流表测量时,用闭合开关将电流表两端短路,这种做法称为有用短路;由于接线不当或线路绝缘老化、损坏等情况,使电路中本不应该连接的两点相连,造成电路故障的情况称为故障短路,如图 1-10 所示,其中最为严重的是电源短路。例如,在实际生活中用开关控制电灯的亮与灭,合上开关时,电源保险丝很快就被烧坏,这是因为电路中有短路,造成电流急剧增大,从而烧毁了保险丝。

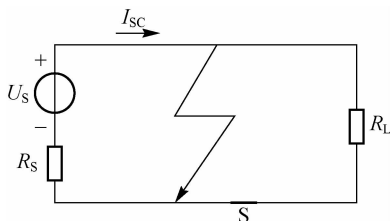


图 1-10 电路故障短路图

一般电源的内阻 R_S 都很小,电路在短路时,电流 $I_{SC}=\frac{U_S}{R_S}$ 将很大,其瞬间放热量很大,很容易烧毁电源,引起事故。产生短路的原因往往是绝缘损坏或接线不慎。短路事故是非常严重的,在工作中应尽量避免。此外,还必须在电路中接入熔断器等短路保护装置,以便发生短路时,过大的电流将熔断器烧断,从而迅速将电源与短路部分电路切断,确保电路安全。

1.6.3 额定工作状态

电路元件和电气设备所能承受的电压和电流都有一定的限度,其工作电压、电流、功率都有一个规定的正常使用的数值,这一数值称为设备的额定值,电气设备在额定值工作时的状态称为额定工作状态。

例如,一盏电灯上标注的电压为 220 V,功率为 100 W 就都是它的额定值。大多数电气设备(如电灯、电炉等)的寿命与其绝缘材料的耐热性能及绝缘强度有关。当电流超过额定值过多时,由于电气设备的发热速度远大于散热速度,设备的温度将很快上升,使绝缘层迅速老化、损坏;而当所加电压超过额定值过多时,绝缘材料可能被击穿。对电灯、电炉和电阻器来说,电压过高或电流过大,其灯丝或电阻丝也将被烧毁;反之,如果电压或电流远低于其额定值,电气设备将无法在正常的情况下工作,就不能发挥其自身潜力。一般来说,电气设备在额定工作状态时是最经济合理和安全可靠的,并能保证电气设备有一定的使用寿命。

电气设备的额定值常标在铭牌上或写在说明书中。额定电压、额定电流、额定功率和额定

电阻分别用 U_N 、 I_N 、 P_N 和 R_N 表示。习惯上,电气开关标注 U_N 和 I_N ;电烙铁、电炉等标注 U_N 和 P_N ;一般金属膜电阻和线绕电阻标注 P_N 和 R_N ;电机专用的铸铁调速电阻标注 I_N 和 R_N 。

1.7 基尔霍夫定律

欧姆定律、基尔霍夫定律和焦耳定律是电路的三个基本定律,这三个定律揭示了电路中各物理量之间的关系,是分析电路的依据。前面几节研究了几种基本电路元件的电压和电流的关系,这都属于元件约束关系。而当若干电路元件构成一个整体电路后,各元件还要受到电路结构的约束关系。这就是本节要介绍的基尔霍夫定律,它包含两个定律,即基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律,它们是分析和计算电路的理论基础。

1.7.1 几个有关的电路名词

1. 支路

电路中通过同一电流的每一个分支或连接于两个节点之间的一段电路称为支路。支路是电路的基石。在图 1-11 所示的电路中有三条支路: adc 支路、 ac 支路和 abc 支路。

2. 节点

我们把三条和三条以上支路的连接点称为节点。在图 1-11 所示的电路中有 a 点和 c 点两个节点。

3. 回路

由支路构成的闭合路径称为回路。

4. 网孔

回路内不含有其他支路的回路称为网孔。在图 1-11 所示的电路中有两个网孔: $adca$ 网孔和 $acba$ 网孔。回路 $adcba$ 不是网孔。

5. 网络

网络就是电路,但一般把较复杂的电路称为网络。

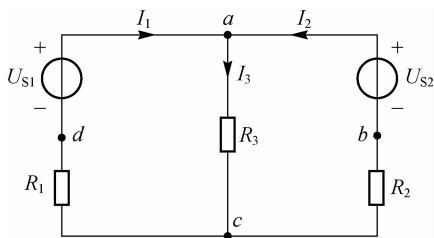


图 1-11 电路名词定义图

1.7.2 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫定律由电流定律和电压定律组成。基尔霍夫电流定律简称 KCL,叙述如下:任一时刻在电路的任一节点上,所有支路电流的代数和恒等于零。规定流出节点的电流取“+”,流入节点的电流取“-”。而电流是流入节点还是流出节点,均按其参考方向来判断。如图 1-12 所示,对节点 A,有

$$-I_1 + I_2 - I_3 + I_4 + I_5 = 0 \quad (1-28)$$

写成一般形式,即

$$\sum i = 0 \text{ 或 } \sum I = 0 \text{ (直流时)} \quad (1-29)$$

式(1-29)是 KCL 的一般表达式,可以将其整理为

$$I_2 + I_4 + I_5 = I_1 + I_3 \quad (1-30)$$

基尔霍夫电流定律表明,在任一时刻,流入任一节点的电流之和等于流出该节点的电流之和。

基尔霍夫电流定律是对电流连续性这一物理现象的数学描述,其实质是电荷守恒原理,即任一时刻注入支路横截面的电荷量必定等于该时刻从支路横截面流出的电荷量。这也符合在电路的同一条支路中各处电流都相等的原理。

KCL 通常用于节点,但把它加以推广,也可适用于包含许多节点的闭合曲面。例如,在图 1-13 所示电路中,闭合曲面 S 内部有 3 个节点 A 、 B 、 C ,当按图中所示设定各支路电流的大小和参考方向时,对此 3 个节点可写出 KCL 方程为

节点 A : $I_3 + I_5 - I_6 = 0$

节点 B : $-I_2 + I_4 - I_5 = 0$

节点 C : $I_1 + I_6 - I_4 = 0$

将上述三式相加得

$$I_1 - I_2 + I_3 = 0$$

写成一般形式为

$$\sum I = 0 \quad (1-31)$$

即流入(或流出)一个闭合曲面 S 的所有支路电流的代数和恒等于零,此即为广义的 KCL。在写此方程时,若把流入闭合曲面 S 的电流设为“+”,则流出闭合曲面 S 的电流即为“-”;反之,则相反。

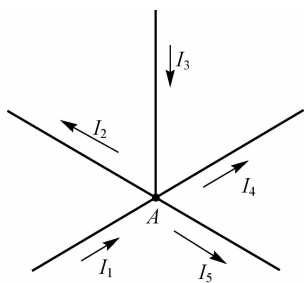


图 1-12 KCL 说明

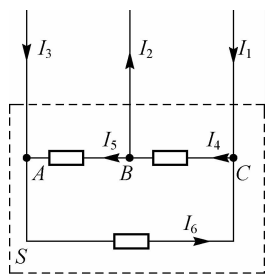


图 1-13 KCL 推广闭合曲面

例 1-1 在图 1-13 中,已知 $I_1 = 1 \text{ A}$, $I_2 = -3 \text{ A}$,求 I_3 。

解 根据图 1-13 中各点电流的参考方向,可得 $I_3 = I_2 - I_1 = -3 - 1 = -4 \text{ A}$,负号表明 I_3 的实际方向与参考方向相反。

1.7.3 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律简称 KVL,又称回路电压定律,是用来确定回路中各段电压间关系的定律。叙述为:在任一时刻,沿任一回路各段电压的代数和恒等于零,即

$$\sum u = 0 \text{ 或 } \sum U = 0 \text{ (直流时)} \quad (1-32)$$

根据式(1-32)列方程,首先需要选定回路的绕行方向。只要元件或支路的电压参考方向与绕行方向一致,该电压就取“+”,反之取“-”。图 1-14 给出某电路的一个回路,先选定绕行方向如图中所示,即从 A 点出发绕行一周,有

$$U_{AB} + U_{BC} + U_{CD} + U_{DA} = 0 \quad (1-33)$$

又因为

$$\begin{aligned} U_{AB} &= U_{S1} + I_1 R_1 \\ U_{BC} &= -I_2 R_2 \\ U_{CD} &= -I_3 R_3 - U_{S3} \\ U_{DA} &= I_4 R_4 \end{aligned}$$

代入式(1-33)中,整理得

$$I_1 R_1 - I_2 R_2 - I_3 R_3 + I_4 R_4 = -U_{S1} + U_{S3}$$

写成一般形式为

$$\sum IR = \sum U_s \quad (1-34)$$

式(1-34)表明,对于电阻电路,KVL 的另一种表述为:任一时刻,在任一闭合回路中,所有电阻电压的代数和等于所有电压源电压的代数和。采用式(1-34)列方程时,若流过电阻的电流的参考方向与绕行方向一致,则该电阻电压取“+”,反之取“-”;若电压源方向与绕行方向相反,则该电压源取“+”,反之取“-”。

KVL 不仅适用于闭合回路,还可以推广到广义回路。如图 1-15 所示电路,在 AD 处开路,如果将开路电压 U_{AD} 添加上,就形成一个回路。

沿 ABCDA 绕行一周,列出回路电压方程如下:

$$U_1 - U_2 + U_3 - U_{AD} = 0$$

整理得

$$U_{AD} = U_1 - U_2 + U_3$$

有了这个推论就可以很方便地求出电路中任意两点间的电压。

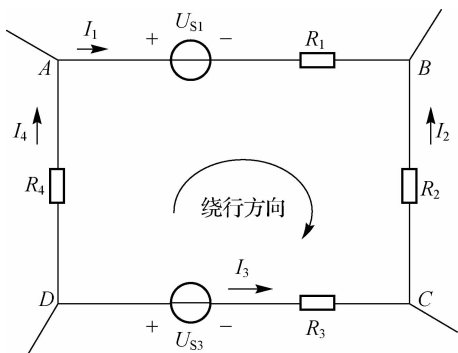


图 1-14 KVL 图示与应用

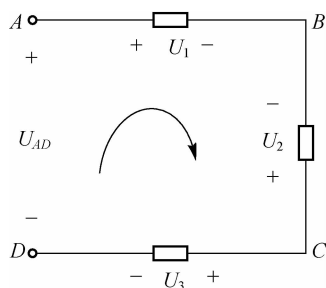


图 1-15 KVL 的推广与应用

例 1-2 在图 1-16 所示闭合回路中,各支路元件是任意的,已知 $U_{AB} = 5 \text{ V}$, $U_{BC} = -4 \text{ V}$, $U_{DA} = -3 \text{ V}$ 。试求(1) U_{CD} ; (2) U_{CA} 。

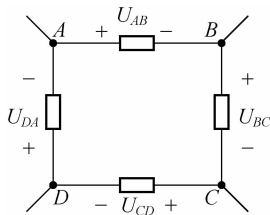


图 1-16 例 1-2 图

解 (1)首先选定回路绕行方向为 ABCDA,由基尔霍夫电压定律可列出

$$U_{AB} + U_{BC} + U_{CD} + U_{DA} = 0$$

即 $5 + (-4) + U_{CD} + (-3) = 0$,最后得 $U_{CD} = 2 \text{ V}$ 。

(2)同理可列出

$$U_{AB} + U_{BC} + U_{CA} = 0$$

即 $5 + (-4) + U_{CA} = 0$,最后得 $U_{CA} = -1 \text{ V}$ 。

基尔霍夫电压定律也可推广应用于局部电路。

1.8 电路中电位的分析和计算

1.8.1 电位的概念

在电路分析中除广泛使用电压这个物理量外,还经常使用电位的概念。

电压表示的是电路中两点间电位的相对高低和差值,却无法给出任一点电位的确切数值,从而难以对电路中各点的电位进行比较。如果选择电路中的某点作为所有电压的公共参考点,就可以大大简化对电压的分析。这个公共参考点称为零电位点。零电位点可以任意选择。电路中某点的电位就是该点与参考点之间的电压,如 a 点电位,即 a 点与参考点之间的电压可以用符号 V_a 表示。

在工程上,为了工作安全,常以大地为参考点,即认为大地的电位为零。这时,电路的接地点就是电位等于零的参考点。在电子电气设备中常选一条特定的公共线作为参考点,这条公共线与机壳相连,称为地线(实际上这条线与大地并没有真正相连)。在电子电路中,地线用符号“⊥”表示。

在图 1-17 所示的电路中,若要求各点的电位值,必须先选定一个参考点,参考点的选择不同,电路中各点电位也不同。若选 D 点为参考点,并标上接地符号,则 $V_A = -30 \text{ V}$, $V_C = 60 \text{ V}$ 。

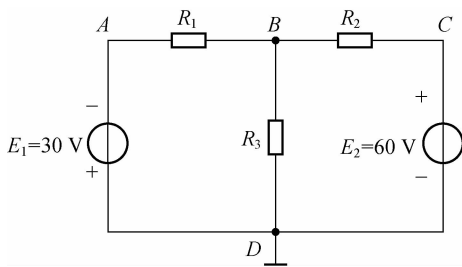


图 1-17 电位的应用图示

1.8.2 电路中各点电位的分析

电路中某点的电位,就是从该点出发,沿任选的一条路径“走”到参考点的电压。因此,计算电位的方法与计算两点间电压的方法完全相同。

计算电位的方法和步骤如下:

(1) 选择一个参考点, 假设参考点为 O 。

(2) 求 A 点电位时, 选定一条从 A 点到参考点 O 的路径, 标出各电压的参考方向。

(3) 从 A 点出发沿此路径“走”到参考点 O , 不论经过的是电源还是负载, 只要是从正极到负极, 就取该电压为正, 反之就取负值, 然后, 求各电压的代数和。

例 1-3 在图 1-18 所示电路中, 分别求开关 S 断开和闭合时 A 点的电位 V_A 。

解 (1) 当开关 S 断开时, 可将图 1-18 改画成图 1-19(a) 所示电路。

$$I = \frac{12+18}{20+10+30} = 0.5 \text{ A}$$

$$V_A = U_{AD} + U_{DC} = 30 \times 0.5 - 18 = -3 \text{ V}$$

(2) 当开关 S 闭合时, 可将图 1-18 改画成图 1-19(b) 所示电路。

$$I_1 = \frac{18}{10+30} = 0.45 \text{ A}$$

$$V_A = U_{AD} + U_{DC} = 30 \times 0.45 - 18 = -4.5 \text{ V}$$

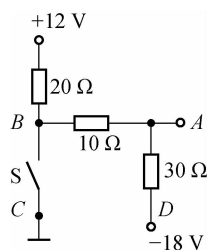


图 1-18 例 1-3 图

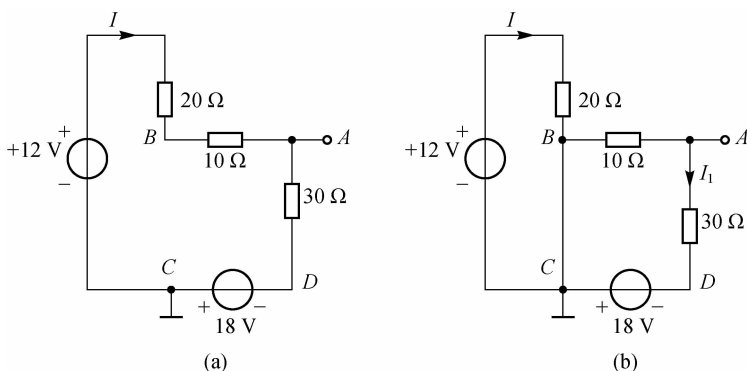


图 1-19 例 1-3 图的等效电路图

1.8.3 等电位点

所谓等电位点是指电路中电位相同的点。例如, 图 1-20 中 A 、 B 两点的电位分别如下:

$$V_A = \frac{12}{6+2} \times 2 = 3 \text{ V}, V_B = \frac{12}{9+3} \times 3 = 3 \text{ V}$$

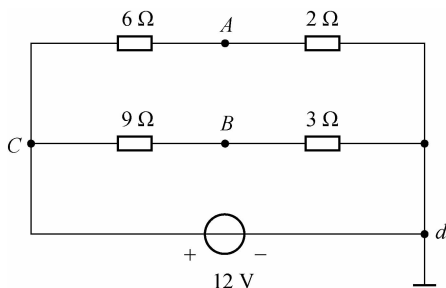


图 1-20 等电位点

由上式可知 A、B 两点的电位相等,因此称它们为等电位点。

等电位点具有以下特点:虽然各点之间没有直接相连,但电压等于零;若用导线或电阻元件将等电位点连接起来,因为其中没有电流通过,所以不影响电路原有的工作状态。

1.8.4 电子电路的习惯画法

电位概念的引入给电路分析带来了方便,因此,在电子电路中往往不再画出电源,而改用电位标出。例如,图 1-21 所示电路是图 1-18 所示电路的习惯画法。在图 1-21 中,A 点的电位为 +9 V,表示 A 点接电源的正极,而电源的负极接地,电源的电压为 9 V;B 点的电位为 +14 V,表示 B 点也是接电源的正极,电源的负极接地,电源电压的大小为 14 V。如果 B 点接电源的负极,那么 B 点的电位为 -14 V。

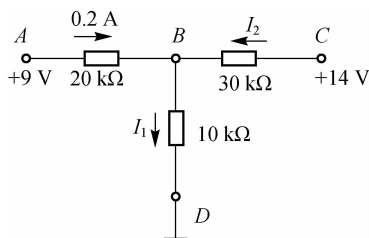


图 1-21 电子电路的习惯画法

例 1-4 在图 1-22 所示电路中,求 S 断开和闭合两种情况下 A 点的电位 V_A 。

解 (1)当 S 断开时,电路为单一支路,三个电阻上流过同一电流 I ,因此可得

$$\frac{-12 - V_A}{(6 + 4) \times 10^3} = \frac{V_A - 12}{20 \times 10^3}$$

计算得 $V_A = -4 \text{ V}$ 。

(2)当 S 闭合时,则 $V_B = 0$, $4 \text{ k}\Omega$ 和 $20 \text{ k}\Omega$ 电阻上流过同一电流,因此

$$\frac{V_B - V_A}{4 \times 10^3} = \frac{V_A - 12}{20 \times 10^3}$$

计算得 $V_A = 2 \text{ V}$ 。

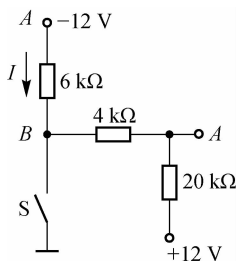


图 1-22 例 1-4 图

本章小结

本章主要讲述了电路的基本概念和基本定律的相关内容,主要知识点如下:

(1)分析电路的一般方法。理想电路元件是指实际元件的理想化模型,由理想元件构成的电路称为电路模型。在电路分析中,都是用电路模型来代替实际电路进行分析与研究的。

(2)电流、电压和电功率。电路中的主要物理量是指电流、电压和电功率。

①在计算电流时,首先要设定电流的参考方向,一般用实线箭头表示。如果计算结果 I 为正值,表示实际方向与参考方向相同,若为负值表示相反。

②电压的参考方向一般用“+”“-”极性表示 U ,如果计算结果 U 为正值,表示实际方向与参考方向相同,若为负值表示相反。

③在 U 与 I 为关联参考方向时,电功率 $P=UI$,并且 $P>0$ 表示元件吸收(或消耗)功率, $P<0$ 表示元件输出(或提供)功率。

(3)理想电路元件和欧姆定律。组成电路的理想电路元件通常有电阻元件、电感元件、电容元件等。电阻元件为耗能元件,电感和电容元件为储能元件,分别储存磁场能量和电场能量。

①电阻 R 是反映元件对电流有一定阻碍作用的一个参数,线性电阻在电压 u 与电流 i 为关联参考方向时有 $u=iR$,即欧姆定律。电阻的功率为

$$p=ui=i^2R=Gu^2$$

②电容具有储存电荷、释放电荷、阻止直流电流通过、允许交流电流通过的特性。由电压-电流关系定义为

$$i=C \frac{du}{dt}$$

③电感元件的特点是对直流呈现很小的电阻,对交流呈现较大的阻抗,且阻抗的大小与所通过的信号频率有关。由电压-电流关系定义为

$$u=L \frac{di}{dt}$$

(4)基尔霍夫定律。基尔霍夫定律是分析电路的最基本定律之一。

①KCL 是对电路中任一节点而言的,运用 KCL 方程 $\sum I=0$ 时,应事先选定各支路电流的参考方向,规定流入节点的电流为正(或为负),流出节点的电流为负(或为正)。

②KVL 是对电路中任一回路来讲的,运用 KVL 方程 $\sum U=0$ 时,应事先选定各元件上电压的参考方向及回路绕行方向,规定当电压方向与绕行方向一致时取正号,否则取负号。

(5)电路中电位的分析。电路中各点电位的分析是欧姆定律、KCL、KVL 的一种应用。在电子电路中经常用到,是一种十分有用的分析方法。电路中某点的电位是指该点到电路中参考点之间的电压,所以,电位是相对概念。参考点选择不同,电路中各点的电位值也随之而变。计算某点的电位,实际上是计算该点到参考点的电压。