

963

TM-43

L62

教育部高职高专规划教材

电工电子技术

(少学时)

林平勇 高 嵩 主编

高等教育出版社

第 1 章

直 流 电 路

内 容 提 要

本章主要讨论电路模型、电路的基本物理量、电路的基本元件。引进了电流、电压的参考方向的概念。应用欧姆定律、基尔霍夫定律等电路的基本定律对直流电路进行分析计算。

1.1 电 路 模 型

1.1.1 电 路

电路是为实现和完成人们的某种需求,由电源、导线、开关、负载等电气设备或元器件组合起来,能使电流流通的整体。简单地说,就是电流的通路。电路的主要作用是:电路能实现电能的传输、分配和转换,其次能实现信号的传递和处理。如电炉在电流通过时将电能转换成热能,电视机可将接收到的信号经过处理,转换成图像和声音。

1.1.2 电 路 模 型

1. 实际电路

如图 1.1.1 所示。实际电路一般由三部分组成,由提供电能的设备(电池、发电机)、传输设备(连接导线)、使用电能的设备(负载如电灯等)组成。

2. 电路模型

在电路的分析计算中,用一个假定的二端元件如电阻元件(见图 1.1.2)来代替实际元件(如灯泡),二端元件的电和磁的性质反应了实际电路元件的电和磁的性质,称这个假定的二端元件

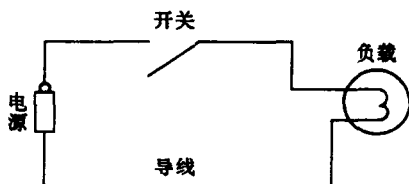


图 1.1.1 实际电路

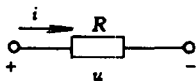


图 1.1.2

为理想电路元件。

由理想电路元件组成的电路称为理想电路模型,简称电路模型,如图 1.1.3 所示。

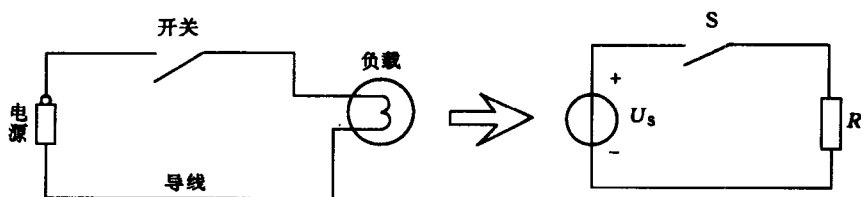


图 1.1.3

1.2 电路的基本物理量

1.2.1 电流

单位时间内流过导体截面积的电荷[量]定义为电流强度,用以衡量电流的大小。电工技术中,常把电流强度简称为电流,用 $i(I)$ 表示。随时间而变化的电流定义为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.1)$$

式中 q 为随时间 t 变化的电荷量。

在电场力的作用下,电荷有规则的定向移动,形成了电流。规定正电荷的方向为电流的实际方向。

当 $\frac{dq}{dt} = \text{常数}$, 则称这种电流为恒定电流,简称直流。今后大写字母如 U 、 I 表示电压、电流为恒定量,不随时间变化,一般称作直流电压、直流电流。小写字母 u 、 i 表示电压、电流随时间变化。

在国际单位制(SI)中,在 1 s 内通过导体横截面的电荷量为 1 C(库[仑])时,其电流为 1 A(安[培])。

电流的方向可用箭头表示,也可用字母顺序表示,见图 1.2.1。用双下标表示时为 i_{ab} 。

1.2.2 电压

电场力把单位正电荷从电场中的 a 点移到 b 点所作的功称为 a 、 b 间的电压,用 $u_{ab}(U_{ab})$ 表示。

$$u_{ab} = \frac{dW}{dq} \quad (1.2)$$

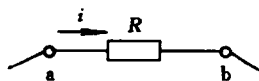


图 1.2.1

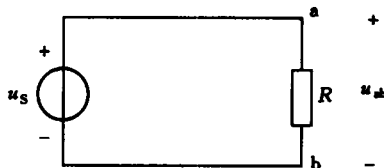


图 1.2.2

习惯上把电位降低的方向作为电压的实际方向,可用 +、- 号表示,也可用字母的双下标表示,有时也用箭头表示,见图 1.2.2。

在国际单位制中,当电场力把 1 C(库[仑])的正电荷[量]从一点移到另一点所做的功为 1 J(焦[耳]),则这两点间的电压为 1 V(伏[特])。

有时把电路中任一点与参考点(规定电位能为零的点)之间的电压,也叫做该点的电位。也就是该点对参考点所具有的电位能。参考点的电位为零可用符号“⊥”表示。电位的单位与电压相同,用 V(伏[特])表示。

电路中两点间的电压也可用两点间的电位差来表示。

$$u_{ab} = u_a - u_b \quad (1.3)$$

电场中两点间的电压是不变的,电位随参考点(零电位点)选择的不同而不同。

1.2.3 电动势

非电场力即局外力把单位正电荷在电源内部由低电位 b 端移到高电位 a 端所做的功,称为电动势,用字母 $e(E)$ 表示。

$$e(t) = \frac{dW}{dq} \quad (1.4)$$

电动势的实际方向在电源内部从低电位指向高电位,单位与电压相同用 V(伏[特])表示。

在图 1.2.3 中,电压 u_{ab} 是电场力把单位正电荷由外电路从 a 点移到 b 点所作的功,由高电位指向低电位。电动势是非电场力在电源内部把单位正电荷克服电场阻力,从 b 点移到 a 点所做的功。在图 1.2.4 中,所示的直流电源在没有与外电路连接的情况下,电动势与两端电压大小相等方向相反。

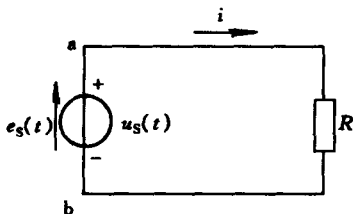


图 1.2.3

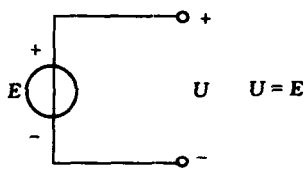


图 1.2.4

1.3 电流、电压的参考方向

在电路的分析计算中,流过某一段电路或某一元件的电流实际方向或两端电压的实际方向往往不知道,我们可以任意假定一个电流方向或电压方向,当假定的电流方向或电压方向与实际方向一致取正,相反取负。假定的电流、电压方向称作电流、电压的参考方向。

1.3.1 电流的参考方向

图 1.3.1(a)中电流的参考方向与实际方向一致, $i > 0$ 。图 1.3.1(b)中电流的参考方向与实际方向相反, $i < 0$ 。

实际方向用虚线表示,参考方向用实线表示,以下同。

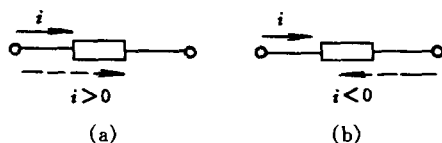


图 1.3.1

1.3.2 电压的参考方向

在图 1.3.2(a) 中电压参考方向与实际方向一致取正, $u > 0$ 。在图 1.3.2(b) 中电压参考方向与实际方向相反取负, $u < 0$ 。

可见电流、电压都是代数量。

当电流的方向与电压方向选取一致, 称为关联参考方向, 见图 1.3.3。

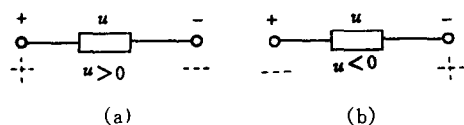


图 1.3.2

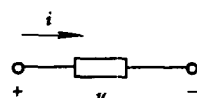


图 1.3.3

1.4 功 率

电能量对时间的变化率, 称为功率, 也就是电场力在单位时间内所做的功

$$p = \frac{dW}{dt} \quad (1.5)$$

在国际单位制中, 功率的单位是瓦特(W)。

在图 1.4.1 中电阻两端的电压是 U , 流过的电流是 I , 是关联参考方向, 则电阻吸收的功率为

$$P = UI$$

电阻在 t 时间内所消耗的电能为

$$W = Pt$$

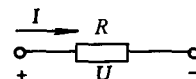


图 1.4.1

我们平时所说消耗 1 度电就是当一段电路功率为 1 kW 时在 1 个小时内消耗的电能, 即 1 kW·h。

元件两端电压和流过的电流在关联参考方向下时, 见图 1.4.2。

$P = UI > 0$, 元件吸收功率。

$P = UI < 0$, 元件发出功率。

如果元件两端的电压和流过的电流在非关联参考方向下时, 见图 1.4.3。

$P = UI > 0$, 元件发出功率。

$P = UI < 0$, 元件吸收功率。

对任一个电路元件, 当流经元件的电流实际方向与元件两端电压的实际方向一致, 元件吸收功率。电流电压实际方向相反, 元件发出功率。

例 1.1 试判断图 1.4.4(a)、(b) 中元件是发出功率还是吸收功率。

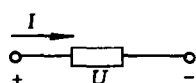


图 1.4.2

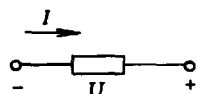
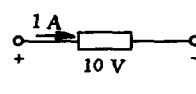
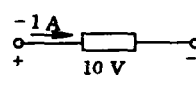


图 1.4.3



(a)



(b)

图 1.4.4

解: 在图 1.4.4(a) 中电压、电流是关联参考方向, 且 $P = UI = 10 \text{ W} > 0$, 元件吸收功率。

在图 1.4.4(b)中电压、电流是关联参考方向,且 $P = UI = -10 \text{ W} < 0$, 元件发出功率。

1.5 电阻元件

电阻元件一般反应实际电路中的耗能元件,如电炉、电灯等。图形符号见图 1.5.1 所示,字母用 R 表示。

当电阻两端的电压与流过电阻的电流是关联参考方向,见图 1.5.1,根据欧姆定律电压与电流成正比,有如下关系:

$$u = Ri \quad (1.6)$$

当电阻两端的电压与流过的电流为非关联参考方向时,见图 1.5.2,根据欧姆定律电压与电流有如下关系:

$$u = -Ri \quad (1.7)$$

在关联参考方向下,当 $R = \frac{u}{i}$ 是个常数,也称其为线性电阻。见图 1.5.3 伏安特性是过原点的直线。

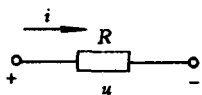


图 1.5.1

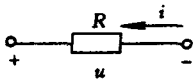


图 1.5.2

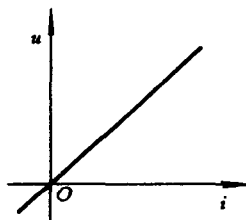


图 1.5.3

把式(1.6)两边乘以 i 得到

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} = Gu^2 \geq 0。$$

电阻总是消耗能量的。其中 $G = \frac{1}{R}$ 。 G 称电导。在国际单位制中当电阻两端的电压为 1 V (伏[特]), 流过电阻的电流为 1 A (安[培])时, 电阻为 1 Ω (欧[姆])。

电导 G 的单位是 S (西[门子])。

当电阻两端的电压与流过电阻的电流不成正比关系时, 伏安特性是曲线, 见图 1.5.4。电阻不是一个常数, 随电压电流变动, 也称作非线性电阻。

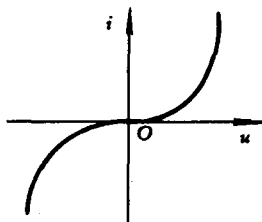


图 1.5.4

1.6 电感元件, 电容元件

1.6.1 电感元件

图 1.6.1 是实际的线圈, 假定绕制绕圈的导线无电阻, 线圈有 N 匝, 当线圈通以电流 i , 在线圈内部将产生磁通 Φ_L , 若磁通 Φ_L 与线圈 N 匝都交链, 则磁通链 $\Psi_L = N\Phi_L$ 。

在电路中一般用图 1.6.2 表示实际线圈, 并用字母 L 表示。 Φ_L 和 Ψ_L 都是线圈本身电流产生的, 叫做自感磁通和自感磁通链。

当磁通 Φ_L 和磁通链 Ψ_L 的参考方向与电流 i 参考方向之间满足右手螺旋定则时,

$$\text{有式} \quad \Psi_L = Li \quad (1.8)$$

式(1.8)中 L 称为线圈的自感或电感。

在国际单位制中, 磁通和磁通链的单位是 Wb(韦[伯]) 自感的单位是 H(亨[利])

当 $L = \frac{\Psi_L}{i}$ 是常数, 称其为线性电感, 见图 1.6.3, 韦安特性是通过原点的一条直线。

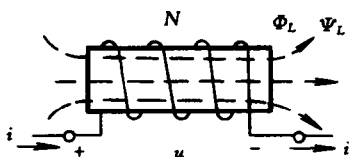


图 1.6.1

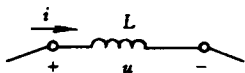


图 1.6.2

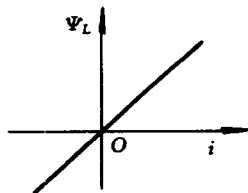


图 1.6.3

当电感元件两端电压和通过电感元件的电流在关联参考方向下根据楞次定律, 有

$$u = \frac{d\Psi_L}{dt}$$

把 $\Psi_L = Li$ 代入上式, 得

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1.9)$$

从式(1.9)可以看出, 任何时刻, 线性电感元件的电压与该时刻电流的变化率成正比。当电流不随时间变化(直流电流), 则电感电压为零。这时电感元件相当于短接。

电感元件两端电压和通过电感元件的电流在关联参考方向下, 从 0 到 τ 的时间内电感元件所吸收的电能为

$$\begin{aligned} W_L &= \int_0^\tau p dt = \int_0^\tau u i dt = L \int_0^\tau i \frac{di}{dt} dt = L \int_{i(0)}^{i(\tau)} i di \\ &= \frac{1}{2} Li^2(\tau) \end{aligned} \quad (1.10)$$

式(1.10)中可看出: L 一定时, 磁场能量 W_L 随着电流的增加而增加。假定 $i(0) = 0$

1.6.2 电容元件

见图 1.6.4 当电容元件上电压的参考方向由正极指向负极板,则正极板上的电荷 q 与其两端电压 u 有以下关系。

$$q = Cu \quad (1.11)$$

$$C = \frac{q}{u}$$

C 称为该元件的电容,当 C 是正实常数时,电容为线性电容见图 1.6.5,库伏特性是通过原点的一条直线。

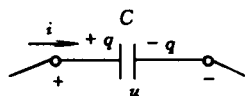


图 1.6.4

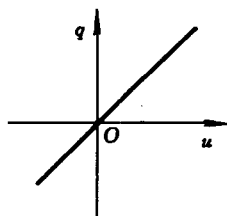


图 1.6.5

电容的单位在国际单位制中,用 F(法[拉])表示。当在电容两端的电压是 1 V,极板上电荷为 1 C(库[仑])时电容是 1 F(法[拉])。

$$1 \text{ F} = 10^6 \mu\text{F} = 10^{12} \text{ pF}$$

当电容两端的电压 u 与流进正极板电流参考方向一致为关联参考方向,见图 1.6.4。

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.12)$$

把式 $q = Cu$ 代入式 1.12,得

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (1.13)$$

当电容一定时,电流与电容两端电压的变化率成正比,当电压为直流电压时,电流为零,电容相当于开路。

电容元件两端电压与通过的电流在关联参考方向下,从 0 到 τ 的时间内,元件所吸收的电能为

$$W_C = \int_0^\tau p dt = \int_0^\tau u i dt = C \int_0^\tau u \frac{du}{dt} dt = C \int_{u(0)}^{u(\tau)} u du = \frac{1}{2} Cu^2(\tau) \quad (1.14)$$

式(1.14)中当 C 一定时,电场能量随电压的增加而增加。假定 $u(0)=0$

1.7 电压源、电流源及其等效变换

1.7.1 电压源

电压源,见图 1.7.1。具有以下特点:电压源两端的电压 $u_s(t)$ 为确定的时间函数,与流过的

电流无关。当 u_s 为直流电压源时,两端的电压 $u_s(t)$ 不变, $u_s(t) = U$ 。

直流电压源伏安特性见图 1.7.2。

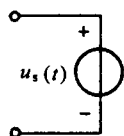


图 1.7.1

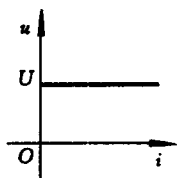


图 1.7.2

在图 1.7.3 中看出电压源两端电压不随外电路的改变而改变。

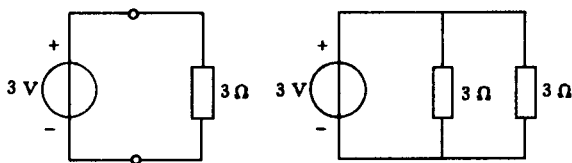


图 1.7.3

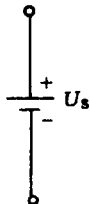


图 1.7.4

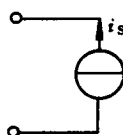


图 1.7.5

直流电压源也可用图 1.7.4 中的符号表示。长线表示正极(高电位),短线表示负极(低电位)。

当电流流过电压源时从低电位流向高电位,则电压源向外提供电能。当电流流过电压源时从高电位流向低电位,则电压源吸收电能。如电池充电的情况。

1.7.2 电流源

电流源,见图 1.7.5。电流 $i_s(t)$ 是确定的时间函数。与电流源两端的电压无关。在直流电流源的情况下,发出的电流是恒值, $i_s(t) = I$ 。伏安特性见图 1.7.6。

在图 1.7.7 中看出电流源发出的电流不随外电路的改变而改变。

对电流源的电流和电压取非关联参考方向,见图 1.7.8。在这种情况下,如果 $p > 0$,则表示电流源发出功率, $p < 0$,则表示电流源吸收功率。

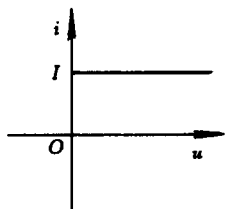


图 1.7.6

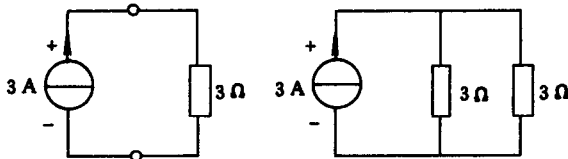


图 1.7.7

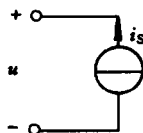


图 1.7.8

1.7.3 实际电源两种模型的等效变换

实际电源可用两种电路模型来表示,一种为电压源和一电阻(内阻 R_0)的串联模型来表示,

还有一种为电流源和电阻(内阻 R_0) 的并联模型来表示, 见图 1.7.9。

两种模型的特点是: 电阻相同, 电流源电流为

$$i_s = \frac{u_s}{R_0}.$$

电流 i_s 的方向为由电压源的低电位指向高电位, 注意是对外电路等效。

证明: 在图 1.7.10 中

$$u = u_s - R_0 i$$

$$i = \frac{u_s}{R_0} - \frac{u}{R_0} \quad (1.15)$$

在图 1.7.11 中

$$i = i_s - \frac{u}{R_0'} \quad (1.16)$$

在图 1.7.10、图 1.7.11 中对外电路等效, 即 u 、 i 相同, 比较式(1.15)、式(1.16)可得

$$i_s = \frac{u_s}{R_0}, \quad R_0' = R_0 \quad \text{证毕。}$$

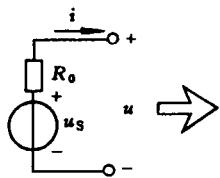


图 1.7.9

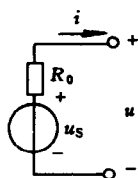


图 1.7.10

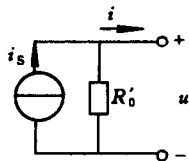


图 1.7.11

1.7.4 电路的短路和开路

在图 1.7.12 中有

$$RI = U_s - R_0 I$$

$$I = \frac{U_s}{R + R_0}$$

当 $R=0$ 时, $U=0$, $I = \frac{U_s}{R_0}$, 称电路 ab 间短路。

当 $R=\infty$ 时(断开)时, $I=0$, $U=U_s$, 称电路 ab 间开路。

当有载情况下, $I = \frac{U_s}{R + R_0}$, 在 ab 间短路时, $U=0$, $I = \frac{U_s}{R_0}$, 在 ab

间开路时 $I=0$, $U=U_s$ 。

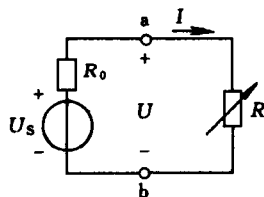


图 1.7.12

为了使电气设备能安全可靠, 经济运行, 引入了电气设备额定值, 就是电气设备在电路的正常运行状态下, 能承受的电压, 允许通过的电流, 以及它们吸收和产生功率的限额。如额定电压 U_N 、额定电流 I_N 、额定功率 P_N 。如一个灯泡上标明 220 V、60 W, 这说明额定电压 220 V, 在此额定电压下消耗功率 60 W。

当电气设备的电流等于额定电流时, 称为满载工作状态。电流小于额定电流时, 称为轻载工

作状态,超过额定电流时,称为过载工作状态。

1.8 基尔霍夫定律

1.8.1 支路、结点、回路

支路 通常情况下,通以相同的电流无分支的一段电路称为支路。图 1.8.1 中有三条支路。其中两条含电源的支路称为有源支路。不含电源的支路称无源支路。

结点 三条或三条以上支路的连接点称为结点,图 1.8.1 中有两个结点 a、b。

回路 电路中任一闭合路径称为回路,不含交叉支路的回路称为网孔,在图 1.8.1 中,回路有三个,网孔只有两个。

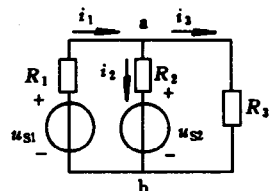


图 1.8.1

1.8.2 基尔霍夫电流定律(KCL)

在电路中,任何时刻,对任一结点所有支路电流的代数和等于零。即在电路中对任一结点,在任一时刻流进该结点的电流等于流出该结点的电流。

$$\sum i = 0 \quad (1.17)$$

在图 1.8.2 中,假定流入 a 结点电流取负,流出 a 结点电流取正,有: $-i_1 - i_2 + i_3 = 0$

在图 1.8.1 中,对结点 a 有:

$$-i_1 + i_2 + i_3 = 0 \quad (1.18)$$

对结点 b 有:

$$-i_3 - i_2 + i_1 = 0 \quad (1.19)$$

将式(1.19)两边乘以 (-1) , 所得方程与式(1.18)完全相同,故在图 1.8.1 中只要对其中一个结点列电流方程。此结点称为独立结点,当有 n 个结点, $n-1$ 个结点是独立的。

在图 1.8.3 中:

$$\text{对结点 a:} \quad -i_1 - i_{ca} + i_{ab} = 0$$

$$\text{对结点 b:} \quad -i_2 - i_{ab} + i_{bc} = 0$$

$$\text{对结点 c:} \quad -i_3 - i_{bc} + i_{ca} = 0$$

把上面 3 个方程式相加,得

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

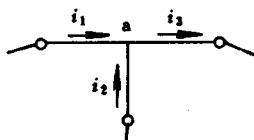


图 1.8.2

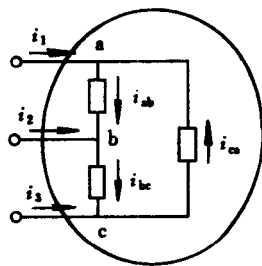


图 1.8.3

得出在电路中对任一闭合面电流的代数和为零,即流进闭合面的电流等于流出闭合面的电流。这是电流连续性的体现。

1.8.3 基尔霍夫电压定律(KVL)

在电路中任何时刻,沿任一回路内所有支路电压的代数和等于零。

$$\sum u = 0 \quad (1.20)$$

在图 1.8.4 中假定回路绕行方向顺时针有:

$$u_{R1} + u_{R2} + u_{R3} + u_{s2} - u_{s1} = 0 \quad (1.21)$$

元件上的电压方向与绕行方向一致取正,相反取负。把欧姆定律公式代入式(1.21)有:

$$R_1 i + R_2 i + R_3 i + u_{s2} - u_{s1} = 0$$

$$R_1 i + R_2 i + R_3 i = u_{s1} - u_{s2}$$

$$\sum R_k i = \sum u_{sk} \quad (1.22)$$

式(1.22)中流过电阻的电流与绕行方向一致 $R_k i$ 前取正,否则取负。电压源电压方向与绕行方向一致 u_{sk} 前取负(移到等号右边变号),否则取正。

注意:一般对独立回路列电压方程,网孔一般是独立回路。在电路中,设有 b 条支路, n 个结点,独立回路数为 $b - (n - 1)$ 。

例 1.2 求图示电路的开口电压 U_{ab} 。

解: 先把图 1.8.5 改画成图 1.8.6,求电流 I 。

在回路 1 中,有

$$6I = 12 - 6$$

$$I = 1 \text{ A}$$

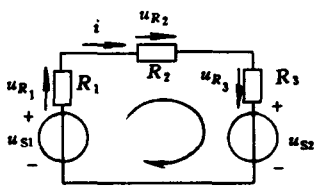


图 1.8.4

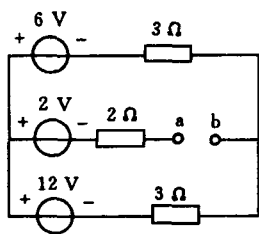


图 1.8.5

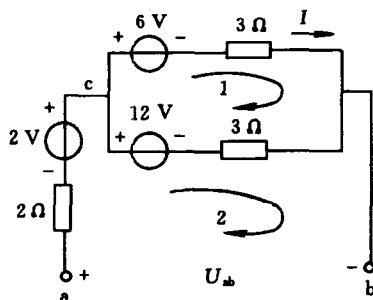


图 1.8.6

根据基尔霍夫电压定律,在回路 2 中,得

$$U_{ac} + U_{cb} - U_{ab} = 0$$

$$-2 + 12 - 3 \times 1 - U_{ab} = 0$$

$$U_{ab} = 7 \text{ V}$$

从上面的例子可看出,基尔霍夫电压定律不但适用于闭合回路,对开口回路同样适用,但需在开口处假设电压(例中 U_{ab})。在列电压方程时,要注意开口处电压方向。

1.8.4 电阻的串联、并联

① 电阻的串联

在图 1.8.7 中,假定有 n 个电阻 $R_1, R_2, \dots, R_n$, 顺序相接, 其中没有分岔, 称为 n 个电阻串联, u 代表总电压, i 代表电流。此电路具有如下特点: 通过每个电阻的电流相同。根据基尔霍夫电压定律

$$\begin{aligned} u &= u_1 + u_2 + \dots + u_n \\ &= R_1 i + R_2 i + \dots + R_n i \\ &= (R_1 + R_2 + \dots + R_n) \cdot i \\ &= R \cdot i \end{aligned}$$

其中等效电阻 $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{k=1}^n R_k$

各串联电阻的电压与电阻值成正比, $u_k = R_k i = \frac{R_k}{R} u$

功率 $p = ui = (R_1 + R_2 + \dots + R_n) i^2 = R i^2$

n 个串联电阻吸收的总功率等于它们的等效电阻所吸收的功率。

② 电阻的并联

在图 1.8.8 中假定有 n 个电阻 $R_1, R_2, \dots, R_n$ 并排联结, 承受相同的电压, 称为 n 个电阻并联, i 代表总电流, u 代表电压。此电路具有以下特点: 加在每个电阻两端的电压相同。根据基尔霍夫电流定律

$$\begin{aligned} i &= i_1 + i_2 + \dots + i_n \\ &= \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \right) u = \frac{1}{R} u \end{aligned}$$

得 $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}$

$R < R_k$, 等效电阻小于任一个并联电阻。

功率 $p = ui = \frac{u^2}{R_1} + \frac{u^2}{R_2} + \dots + \frac{u^2}{R_n} = \frac{u^2}{R}$

n 个并联电阻吸收的总功率等于它们的等效电阻所吸收的功率。

并联电阻中, 各电阻流过的电流与电阻值成反比, $i_k = \frac{u}{R_k}$

两个电阻的并联见图 1.8.9, 有关系式

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

$$i_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} i$$

$$i_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} i$$

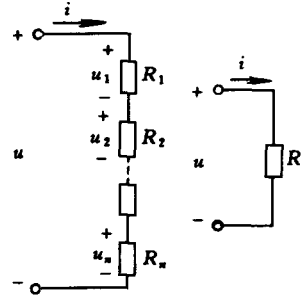


图 1.8.7

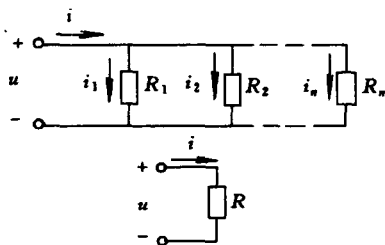


图 1.8.8

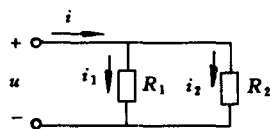


图 1.8.9

1.9 支路电流法

在图 1.9.1 中, 设每条支路电流 i_1, i_2, i_3 的参考方向, 网孔为顺时针绕行方向。

在图中有两个结点, 独立结点只有一个, 故只要对其中一个结点列电流方程。独立回路有两个, 故只要对网孔列电压方程即可。

对 a 结点有

$$-i_1 - i_2 + i_3 = 0$$

对回路 1

$$R_1 i_1 - R_2 i_2 = u_{S1}$$

对回路 2

$$R_2 i_2 + R_3 i_3 = -u_{S3}$$

得方程组

$$\begin{cases} -i_1 - i_2 + i_3 = 0 \\ R_1 i_1 - R_2 i_2 = u_{S1} \\ R_2 i_2 + R_3 i_3 = -u_{S3} \end{cases}$$

解得支路电流 i_1, i_2, i_3 。

小结: ① 假定各支路电流的参考方向, 网孔绕行方向。

② 根据基尔霍夫电流定律对独立结点列电流方程 (如有 n 个结点, 则 $n-1$ 个结点是独立的)。

③ 根据基尔霍夫电压定律对独立回路列电压方程 (一般选取网孔, 网孔是独立回路)。

④ 解出支路电流。

例 1.3 电路如图 1.9.2 所示, 用支路法求各支路电流。

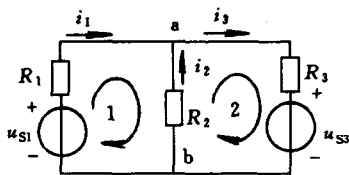


图 1.9.1

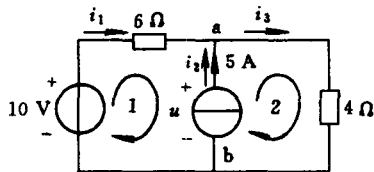


图 1.9.2

解: 在图 1.9.2 中, 设支路电流 i_1, i_2, i_3 的参考方向。

根据电流源的性质, 得 $i_2 = 5 \text{ A}$ 。设网孔绕行方向按顺时针方向。

对结点 a $-i_1 - i_2 + i_3 = 0$

对回路 1 假定电流源两端电压 u 参考方向见图。

$$6i_1 + u = 10$$

对回路 2

$$-u + 4i_3 = 0$$

得方程组

$$\begin{cases} -i_1 + i_3 = 5 \\ 6i_1 + u = 10 \\ 4i_3 = u \end{cases}$$

解得: $i_1 = -1 \text{ A}$, $i_2 = 5 \text{ A}$, $i_3 = 4 \text{ A}$, $u = 16 \text{ V}$ 。

注意对电流源在列回路电压方程时,要假设电流源两端的电压。

* 1.10 结点电压法

设参考点 0(零电位点)对独立结点设结点电压 u_{n1}, u_{n2} , 电压方向指向参考点。设支路电流 i_1, i_2, i_3 的参考方向见图 1.10.1。

对结点 1 $-i_{S1} + i_1 + i_2 + i_{S2} = 0$

$$-i_{S1} + \frac{u_{n1}}{R_1} + \frac{u_{n1} - u_{n2}}{R_2} + i_{S2} = 0$$

整理为 $\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)u_{n1} - \frac{1}{R_2}u_{n2} = i_{S1} - i_{S2}$

可写为 $(G_1 + G_2)u_{n1} - G_2u_{n2} = i_{S1} - i_{S2}$

在以上式中:等号左边第一项中, $\frac{1}{R_1}, \frac{1}{R_2}$ 是联结结点 1 的电阻倒数。 G_1, G_2 称为自导。

等号左边第二项中, $\frac{1}{R_2}$ 是联结结点 1 和结点 2 之间的电阻倒数。 G_2 称为互导。

对结点 2

$$-i_{S2} - i_2 + i_3 = 0$$

$$-i_{S2} - \frac{u_{n1} - u_{n2}}{R_2} + \frac{u_{n2}}{R_3} = 0$$

整理为 $-\frac{u_{n1}}{R_2} + \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right)u_{n2} = i_{S2}$

可写为 $-G_2u_{n1} + (G_2 + G_3)u_{n2} = i_{S2}$

在以上式中: $\frac{1}{R_2}, \frac{1}{R_3}$ 是联结结点 2 的电阻倒数,可用 G_2, G_3 表示,称自导。 $\frac{1}{R_2}$ 是联结结点

1 和结点 2 之间的电阻倒数称为互导。

得到如下方程组:

$$\begin{cases} (G_1 + G_2)u_{n1} - G_2u_{n2} = i_{S1} - i_{S2} \\ -G_2u_{n1} + (G_2 + G_3)u_{n2} = i_{S2} \end{cases}$$

求出结点电压,再求支路电流。从上面方程组可得出对任一结点列结点电压方程。其中,自导总是正的,互导总是负的,指向该结点的电流源电流取正,背离取负。

小结: ① 设参考点(零电位点,对独立结点设结点电压,方向指向参考点)。

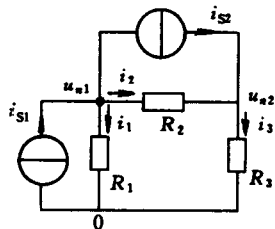


图 1.10.1

② 对任一结点列结点电压方程,其中自导总是正的,互导总是负的。指向该结点的电流源电流取正,背离取负。

③ 求出结点电压,再求支路电流。

例 1.4 对图 1.10.2 列结点电压方程。

解: 把电阻与电压源的串联等效变换为电阻与电流源的并联,电路图 1.10.2 即变换成图 1.10.3。

设参考点 0, 结点电压 u_{n1} , 得: $\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right) u_{n1} = \frac{u_{S1}}{R_1} - \frac{u_{S2}}{R_2} + \frac{u_{S3}}{R_3}$

注意:互导为 0。

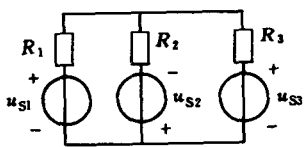


图 1.10.2

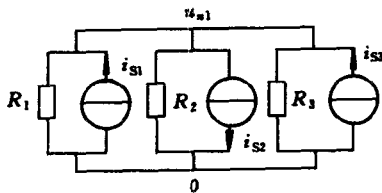


图 1.10.3

1.11 叠加定理

叠加定理叙述为:在线性电路中,如果有多个独立源同时作用时,任何一条支路的电流或电压,等于电路中各个独立源单独作用时对该支路所产生的电流或电压的代数和。

当某独立源单独作用于电路时,其他独立源应该除去,称为“除源”。即对电压源来说,令其电源电压 u_S 为零,相当于“短路”;对电流源来说,令其电源电流 i_S 为零,相当于“开路”。见图 1.11.1。

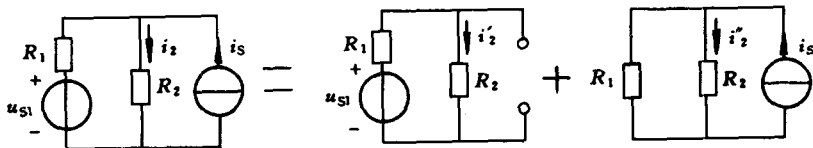


图 1.11.1

$$i_2 = i'_2 + i''_2$$

在图 1.11.1 中,用叠加定理求流过 R_2 的电流 i_2 , 等于电压源、电流源单独对 R_2 支路作用产生电流的叠加。

注意:不作用的电压源短接,不作用的电流源断开,电阻不动。

例 1.5 用叠加定理求电路图 1.11.2 中流过电阻 (4Ω) 的电流。

解: 见图 1.11.3

$$i' = \frac{10}{10} \text{ A} = 1 \text{ A} \quad i'' = \frac{6}{10} \times 5 \text{ A} = 3 \text{ A}$$

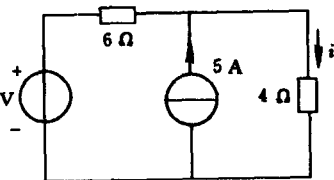


图 1.11.2

$$i = i' + i'' = (1 + 3) \text{ A} = 4 \text{ A}$$

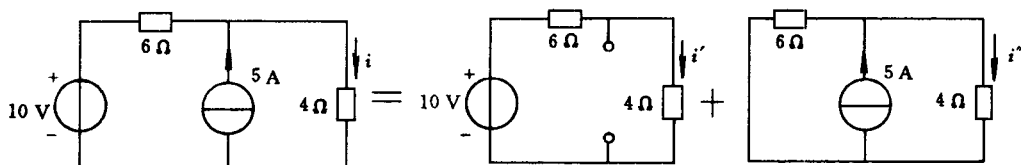


图 1.11.3

1.12 戴维宁定理

具有二个端的网络称为二端网络。见图 1.12.1 含有电源的二端线性网络称为有源二端线性网络。不含电源的二端线性网络,称为无源二端线性网络,图 1.12.1 所示电路为有源二端线性网络。

戴维宁定理叙述为:任何有源二端线性网络,都可以用一条含源支路即电压源和电阻的串联组合来等效替代(对外电路),其中电阻等于二端网络化成无源(电压源短接,电流源断开)后,从两个端看进去的电阻,电压源的电压等于二端网络两个端之间的开路电压,见图 1.12.2。

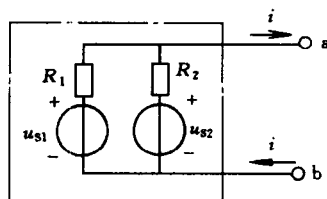


图 1.12.1

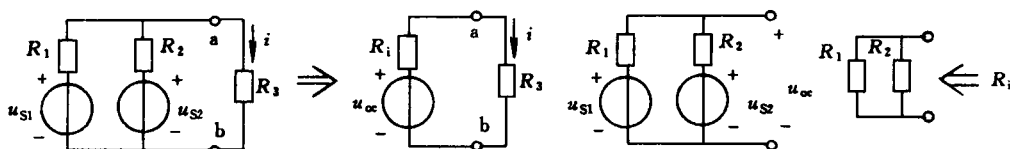


图 1.12.2

例 1.6 用戴维宁定理,求图 1.12.3 中流过 4Ω 电阻的电流 i 。

解: 求入端电阻 R_i (电压源短接,电流源断开,从 a、b 二端看进去的电阻)

$$R_i = 6\Omega \quad (\text{见图 1.12.4})$$

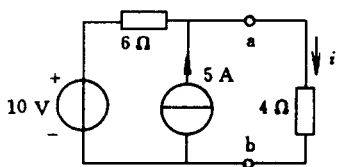


图 1.12.3

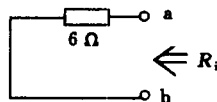


图 1.12.4

求开路电压(a、b 二端之间断开的电压) u_∞

$$u_\infty = (5 \times 6 + 10) \text{ V} = 40 \text{ V} \quad (\text{见图 1.12.5})$$

$$i = \frac{40}{10} \text{ A} = 4 \text{ A} \quad (\text{见图 1.12.6})$$