

第 3 章

CHAPTER 3



视频讲解

直流电路基本定律分析法

引子：基于等效原理的电路等效化简分析法对一些结构简单的电路或局部电路的分析是行之有效的。但在实际工作中,常常需要了解一些结构复杂的电路的全电路特性,也就是要求解的未知量(变量)比较多。此时,等效化简分析法就显得力不从心。那么,能否找到适合全电路或复杂电路的分析方法?

3.1 $2b$ 分析法

分析一个电路,其实就是要计算出其每条支路的电压和电流,从而全面了解电路特性。

对于任一个具有 n 个节点和 b 条支路的电路(网络),因为共有 $2b$ 个未知量(b 个支路电压和 b 个支路电流),所以需要列写 $2b$ 个独立的电路方程并求解,才能完成对该电路的分析工作。那么,如何列写所需的 $2b$ 个电路方程呢?

可以证明:

- (1) 电路必然有 $(n-1)$ 个独立节点,可列出 $(n-1)$ 个独立 KCL 方程。
- (2) 电路必然有 $(b-n+1)$ 个网孔或独立回路,可列出 $(b-n+1)$ 个独立 KVL 方程。
- (3) b 条支路必然有 b 个独立的支路伏安方程。

这样,以上总数为 $2b$ 个独立方程就构成了全面分析该电路的一个方程组。对该方程组求解就可得到 b 个支路电压和 b 个支路电流。因此,有如下结论:

$2b$ 分析法: 基于 KCL 和 KVL 列写 $2b$ 个多元一次方程组求解电路变量的方法。

虽然 $2b$ 分析法因方程数目较多、计算相对烦琐而很少采用,但它包含了电路分析的基本概念和思路,是其他基本定律分析法的基础,因此,具有重要的理论意义。

这里的“独立”指“线性无关”,即独立方程不能用其他方程的线性组合表示。

3.2 支路电流法

根据数学知识可知,要想简化方程组的计算,就必须减少变量或方程个数。因此,人们提出了支路电流分析法,简称“支路电流法”。

支路电流法: 先列出 b 个支路电流变量方程并求出 b 个支路电流,再利用伏安关系求出 b 个支路电压,进而完成 $2b$ 个电路变量求解的方法。

其中, b 个支路电流方程 $= (n-1)$ 个独立的 KCL 方程 $+ (b-n+1)$ 个独立的 KVL 方程。

相对于 $2b$ 法, 支路电流法的方程数减少一半, 故可称为“ $1b$ 法”。当然, 也可以先求出支路电压再求出支路电流, 相应的方法就是“支路电压法”。两种方法可统称为“支路分析法”。因为它们具有对偶性, 所以这里只介绍支路电流法。

用支路电流法分析电路的一般步骤如下。

- (1) 确定电路的节点数和网孔数, 以便确定独立的 KCL 和 KVL 方程数。
- (2) 设定各支路电流的符号及参考方向。
- (3) 选取参考点, 列写 $(n-1)$ 个 KCL 方程。
- (4) 选取 $(b-n+1)$ 个网孔并设定网孔方向, 列写各网孔的 KVL 方程。
- (5) 联立求解上述 b 个方程, 得到 b 条支路的电流。
- (6) 根据每条支路的伏安关系, 再求出 b 条支路的电压。
- (7) 根据已求得的支路电流和支路电压, 可再求得其他变量, 如功率、效率等。

【例题 3-1】 求如图 3-1(a) 所示电路中各支路电流、电压 U_{ab} 及 9V 电源发出的功率。

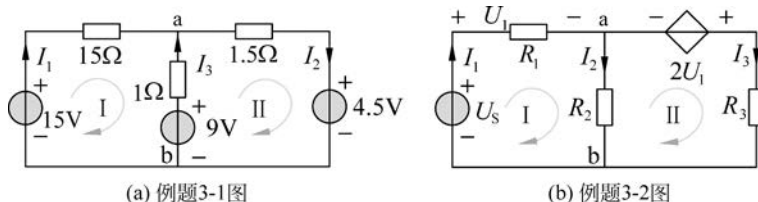


图 3-1 例题 3-1 和例题 3-2 图

解: (1) 电路共有 $n=2$ 个节点和 $b=3$ 条支路。

(2) 设各支路电流的符号和方向如图 3-1(a) 所示。

(3) 选取节点 b 为参考点, 可列出节点 a 的 KCL 方程

$$I_1 - I_2 + I_3 = 0 \quad (3.2-1)$$

(4) 电路的网孔数为 2。列出网孔 I 和网孔 II 的 KVL 方程分别为

$$15 \times I_1 - 1 \times I_3 = 15 - 9 \quad (3.2-2)$$

$$1.5 \times I_2 + 1 \times I_3 = 9 - 4.5 \quad (3.2-3)$$

(5) 联立上述 3 式, 可求得各支路电流

$$I_1 = 0.5\text{A}, \quad I_2 = 2\text{A}, \quad I_3 = 1.5\text{A}$$

(6) 支路电压为

$$U_{ab} = 9 - 1 \times I_3 = 9 - 1.5 = 7.5(\text{V})$$

当然, U_{ab} 也可由另外 2 条支路求出。

(7) 9V 电源发出的功率

$$P = 9 \times I_3 = 9 \times 1.5 = 13.5(\text{W})$$

如果电路中含有受控源, 可将受控源当作独立源处理, 先按上述方法列写电路方程, 再补充一个受控源的受控关系方程, 即可联立求解。请看下例。

【例题 3-2】 在如图 3-1(b) 所示的电路中, $R_1 = 1\Omega$, $R_2 = 2\Omega$, $R_3 = 4\Omega$, $U_s = 10\text{V}$, 试用支路电流法求 I_1 、 I_2 、 I_3 。

解: 选取节点 b 为参考点, 可列出节点 a 的 KCL 方程

$$I_1 = I_2 + I_3 \quad (3.2-4)$$

网孔 I 和网孔 II 的电压方程分别为

$$R_1 I_1 + R_2 I_2 = U_S \quad (3.2-5)$$

$$R_3 I_3 - R_2 I_2 = 2U_1 \quad (3.2-6)$$

再补充一个受控关系方程

$$U_1 = R_1 I_1 \quad (3.2-7)$$

联立以上 4 式,可解出

$$I_1 = 6\text{A}, \quad I_2 = 2\text{A}, \quad I_3 = 4\text{A}$$

3.3 网络的独立变量

对于一个需要求解多个未知量的电路,要想通过最少的变量个数或联立方程个数求得全部未知量,就必须选择一组完备的独立变量。

完备变量: 可以求得电路中所有未知量的一组变量,而这组变量如果少一个都不能完成求解任务。

独立变量: 不能被其他变量的线性组合所表示的变量。

比如,一个节点的全部支路电流就不独立,因为根据 KCL,其中任何一个支路电流都可由其他支路电流组合得到。又比如,一个回路全部元件的端电压也不独立,因为根据 KVL,其中任何一个元件的端电压都可由其他元件端电压组合得到。因此,找到一组完备独立变量既可保证联立方程个数不多余,又能够满足求得电路全部电流和电压未知量的需求。

那么,对于一个有 b 条支路和 n 个节点的网络,如何找到这样一组完备的独立变量呢?

1. 完备独立电压变量

从第 1 章的拓扑图知识中可知,若选一个电网络的树支电压为变量,则它们一定是一组完备独立变量。因为树支不包含回路,任何一个树支电压都不可能由其他树支电压组合得到;同时,所有连支电压却均可由树支电压组合得到。因此,可以得到如下结论:

对于一个给定的网络,任何一个树的全部树支电压都是一组完备独立的方程变量。其个数等于树支个数,即 $n-1$ 。

也就是说,用完备独立电压变量求解,需要列写 $n-1$ 个联立方程式。

另外,需要注意的是,由于所有节点被树支连接,若设其中一个的电压为零,即设为参考点,则 $n-1$ 个树支电压变量可以用 $n-1$ 个节点电压变量取代。换句话说, $n-1$ 个节点电压也是一组完备独立的方程变量。

2. 完备独立电流变量

因为每个节点至少有一个树支,也就是说,任何一个连支电流都不能由其他连支电流组合表示,而所有树支电流却都可由连支电流的组合求出,所以,可以得到如下结论:

对于一个给定的网络,任何一个树的全部连支电流都是一组完备独立的方程变量。其个数等于连支个数,即 $b-n+1$ 。

也就是说,用完备独立电流变量求解,需要列写 $b-n+1$ 个联立方程式。

由基本回路的概念可知,若选定一个树,则基本回路也就确定了。若设每个基本回路有一个虚拟的回路电流,则该电流与该基本回路的连支电流相同,也就是说,基本回路电流是一组可以取代连支电流的完备独立变量。而网孔也是基本回路,因此,

$b-n+1$ 个网孔电流也是一组完备独立的方程变量。

显然,上述结论并不涉及构成网络的具体元件,具有普遍意义,而这正是研究电路拓扑图的奥秘所在。

3.4 节点电压法

与 $2b$ 法相比,支路分析法已经减少了一半的方程数,但人们仍不满足,提出了能否进一步减少方程数的疑问。节点电压法和网孔电流法回答了这个问题。

3.4.1 节点电压法步骤

如图 3-2 所示的电路由 6 个电导和 4 个电流源组成,有 a、b、c、d 共 4 个节点和 6 条支路(因电流源的电流已知,故可不作为待求支路考虑)。由于 $n=4, b=6$,若要计算 6 条电导支路的支路电流,就需要列出 3 个独立的 KCL 方程和 3 个独立的 KVL 方程。仔细分析该电路可以发现,只要求得 4 个节点两两之间的电压,即可利用伏安关系(欧姆定律)求得各支路电流。若设一个节点为参考点,则只需解出另外 3 个节点与参考点的电压(也就是电位),再利用伏安关系求得支路电流即可完成分析任务。

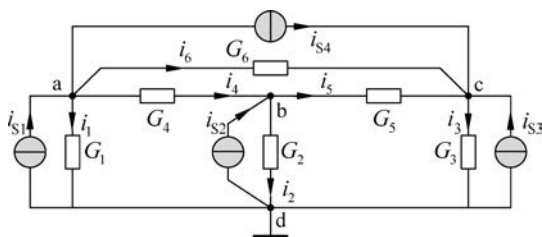


图 3-2 节点电压法原理例图

由于一个电路的节点个数通常小于支路个数,这就为人们在支路分析法基础上进一步减少方程个数提供了一个新思路——用较少的节点电压代替较多的支路电压作未知量建立方程,从而达到减少方程数的目的。这就是“节点电压法”的基本概念。

节点电压法: 基于 KCL 列写 $(n-1)$ 个以节点电压为未知量的节点电流方程,然后求得 $(n-1)$ 个节点电压,进而完成对电路全面分析的方法。

显然,要列写节点电压方程,先要确定节点电压。

节点电压: 电路中除参考节点外的其他节点电位。

在图 3-2 中,选取节点 d 为参考点,即 $u_d=0V$,则支路电压 u_{ad} 、 u_{bd} 和 u_{cd} 就是节点电压 u_a 、 u_b 和 u_c 。根据欧姆定律,各电导支路的电流可用节点电压表示,有

$$\begin{cases} i_1 = G_1 u_a \\ i_2 = G_2 u_b \\ i_3 = G_3 u_c \\ i_4 = G_4 u_{ab} = G_4 (u_a - u_b) \\ i_5 = G_5 u_{bc} = G_5 (u_b - u_c) \\ i_6 = G_6 u_{ac} = G_6 (u_a - u_c) \end{cases} \quad (3.4-1)$$



视频讲解

由式(3.4-1)可知,只需求得 3 个未知量 u_a 、 u_b 和 u_c ,即可得到 i_1 、 i_2 、 i_3 、 i_4 、 i_5 和 i_6 。显然,用节点电压法分析电路,只需列写 $(n-1)$ 个 KCL 方程即可,比支路分析法减少了 $(b-n+1)$ 个回路 KVL 方程。

下面根据图 3-2 推导出列写节点电压方程的具体步骤。

(1) 列出 6 条支路电流与 3 个节点电压的关系,如式(3.4-1)所示。

(2) 利用 KCL 列出 3 个节点的电流方程。

对节点 a,有

$$i_1 + i_4 + i_6 = i_{S1} - i_{S4}$$

对节点 b,有

$$i_2 - i_4 + i_5 = i_{S2}$$

对节点 c,有

$$i_3 - i_5 - i_6 = i_{S3} + i_{S4}$$

(3) 将式(3.4-1)代入上述 3 式,得到

$$\begin{cases} G_1 u_a + G_4 (u_a - u_b) + G_6 (u_a - u_c) = i_{S1} - i_{S4} \\ G_2 u_b - G_4 (u_a - u_b) + G_5 (u_b - u_c) = i_{S2} \\ G_3 u_c - G_5 (u_b - u_c) - G_6 (u_a - u_c) = i_{S3} + i_{S4} \end{cases}$$

整理后,得到

$$\begin{cases} (G_1 + G_4 + G_6) u_a - G_4 u_b - G_6 u_c = i_{S1} - i_{S4} \\ (G_2 + G_4 + G_5) u_b - G_4 u_a - G_5 u_c = i_{S2} \\ (G_3 + G_5 + G_6) u_c - G_6 u_a - G_5 u_b = i_{S3} + i_{S4} \end{cases} \quad (3.4-2)$$

(4) 将连接于一个节点的电导之和称为“自电导”,则节点 a、b、c 的自电导分别为

$$G_{aa} = G_1 + G_4 + G_6$$

$$G_{bb} = G_2 + G_4 + G_5$$

$$G_{cc} = G_3 + G_5 + G_6$$

(5) 将连接于两个节点的电导之和称为“互电导”,则节点 a、b、c 的互电导分别为

$$G_{ab} = G_{ba} = G_4$$

$$G_{ac} = G_{ca} = G_6$$

$$G_{bc} = G_{cb} = G_5$$

(6) 再设 $i_{Sa} = i_{S1} - i_{S4}$ 、 $i_{Sb} = i_{S2}$ 、 $i_{Sc} = i_{S3} + i_{S4}$ 是指流入各节点所有电流源的代数和,并规定流入节点的电流源取正值,流出节点的电流源取负值。

(7) 这样,式(3.4-2)就可写成

$$\begin{cases} G_{aa} u_a - (G_{ab} u_b + G_{ac} u_c) = i_{Sa} \\ G_{bb} u_b - (G_{ba} u_a + G_{bc} u_c) = i_{Sb} \\ G_{cc} u_c - (G_{ca} u_a + G_{cb} u_b) = i_{Sc} \end{cases} \quad (3.4-3)$$

式(3.4-3)就是如图 3-2 所示电路的节点电压方程。为便于记忆,将其写为一般形式:

$$\text{自电导} \times \text{本节点电压} - \sum (\text{互电导} \times \text{相邻节点电压}) = \text{本节点所有电流源的代数和} \quad (3.4-4)$$

对上述内容进行概括、提炼,可以给出利用节点电压法分析电路的一般步骤。

- (1) 选取参考节点,给其他独立节点编号。
- (2) 确定自电导和互电导,按式(3.4-4)列写各节点电压方程的左端。
- (3) 设流入节点的电流源为正,流出为负,列出各节点电压方程的右端。
- (4) 求解节点电压方程组,得到各节点电压。
- (5) 根据各节点电压,再求其他电路未知量,如支路电流、功率、元件参数等。

综上所述,可得如下结论:

(1) 通过节点电压(未知量)分析(求解)电路是以 KVL 为依据的。即回路中各支路电压的代数和为零,而所有支路电压均可用节点电压表示。

(2) 以节点电压为未知量的方程是基于 KCL 列写的。即一个节点的电流代数和为零。

(3) “节点电压方程”强调的是方程未知量为“节点电压”,但方程的实质是基于 KCL 的“节点电流方程”。

【例题 3-3】 在图 3-2 所示电路中,若 $G_1=G_2=G_3=2\text{S}$, $G_4=G_5=G_6=1\text{S}$, $i_{S1}=1\text{A}$, $i_{S2}=4\text{A}$, $i_{S3}=7\text{A}$, $i_{S4}=2\text{A}$,求各支路电流。

解:将已知量代入式(3.4-2),有

$$\begin{cases} 4u_a - u_b - u_c = -1 \\ -u_a + 4u_b - u_c = 4 \\ -u_a - u_b + 4u_c = 9 \end{cases}$$

可解得

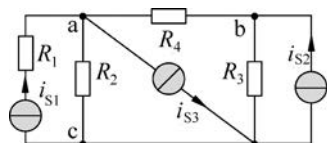
$$u_a = 1\text{V}, \quad u_b = 2\text{V}, \quad u_c = 3\text{V}$$

各支路电流为

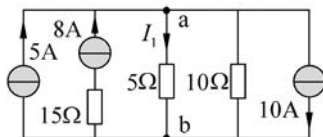
$$\begin{aligned} i_1 &= G_1 u_a = 2 \times 1 = 2(\text{A}), & i_2 &= G_2 u_b = 2 \times 2 = 4(\text{A}), & i_3 &= G_3 u_c = 2 \times 3 = 6(\text{A}) \\ i_4 &= G_4 (u_a - u_b) = -1\text{A}, & i_5 &= G_5 (u_b - u_c) = -1\text{A}, & i_6 &= G_6 (u_a - u_c) = -2\text{A} \end{aligned}$$

因为节点电压方程的本质是基尔霍夫电流定律,即 $\sum i_{\text{出}} = \sum i_{\text{入}}$,所以,在节点电压方程中,方程的左边是与节点相连的电导上流出该节点的电流之和,方程的右边则是与节点相连的电流源流入该节点的电流之和。若某个电流源上串有电导,则该电导就不能再计入自电导和互电导之中,因为该电导上的电流就是与它串联的电流源电流,而该电流已经计入方程右边了,换句话说,忽略与电流源串联的电导,对该电导之外的电路分析没有影响。这也与前面“对外电路而言,与电流源串联的元件可以去掉”的结论相吻合。

【例题 3-4】 试列出如图 3-3(a)所示电路的节点电压方程。



(a) 例题3-4图



(b) 例题3-5图

图 3-3 例题 3-4 和例题 3-5 图

解: 忽略电阻 R_1 , 则节点 a 和节点 b 的节点电压方程分别为

$$\left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4}\right) u_a - \frac{1}{R_4} u_b = i_{S1} - i_{S3}$$

$$\left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}\right) u_b - \frac{1}{R_4} u_a = i_{S2}$$

为便于分析, 可把只有两个节点的电路称为“单节偶电路”。在列写节点电压方程时, 任取一个节点为参考点, 则另一个节点(独立节点)的电压方程为

$$(\sum G) u = \sum i_s \quad (3.4-5)$$

式中, $\sum G$ 是独立节点的自电导; u 是独立节点的节点电压, 即与参考点之间的电压, 可称为“节偶电压”, $\sum i_s$ 是流入独立节点的所有电流源电流的代数和。由该式可得

弥尔曼定理: 对于只有两个节点的单节偶电路, 节偶电压等于流入独立节点的所有电流源电流的代数和除以节偶中所有电导之和。

$$u = \frac{\sum i_s}{\sum G} \quad (3.4-6)$$

【例题 3-5】 有如图 3-3(b) 所示电路, 求电流 I_1 。

解: 电路只有两个节点, 是单节偶电路。由弥尔曼定理可得节偶电压

$$U_a = \frac{\sum I_s}{\sum G} = \frac{5 + 8 - 10}{\frac{1}{5} + \frac{1}{10}} = 10(\text{V})$$

则电流 I_1 为

$$I_1 = \frac{U_a}{5} = \frac{10}{5} = 2(\text{A})$$

3.4.2 特殊情况的处理

节点电压法是在电路中只含有电流源的前提下推导得出的。那么, 当电路中出现以下情况时, 节点电压方程又该如何列写呢?

1. 电路中包含有伴电压源

若电路中包含有伴电压源, 则直接将有伴电压源等效成有伴电流源即可。

2. 电路中包含无伴电压源

如果电路中包含无伴电压源, 则要根据无伴电压源在电路中的不同位置分别处理。

(1) 电压源的一端与参考点相连。在这种情况下, 另一端的节点电压就是电压源电压。这样, 电路的节点电压方程就会减少一个, 电路的计算更简单了。

(2) 电压源的两端都不与参考点相连。此时电压源的两端跨接两个独立节点, 可以把电压源当作电流源看待, 然后设定电压源的电流, 按式(3.4-4)列写节点电压方程。这时, 所列方程中必然多出一个未知量, 即电压源的电流值。为了能解出方程, 应利用“电压源的电压等于其跨接的两个独立节点的节点电压之差”的结论, 再补充一个方程式, 然后联立求解。

3. 电路中包含受控源

若电路中包含受控源, 则将受控源当作独立源看待列写节点电压方程。若受控源的控

制量不是某个节点电压时,则需补充一个反映控制量与节点电压之间关系的方程式。

【例题 3-6】 有如图 3-4(a)所示电路,求出电流 I_3 。

解: 选 b 节点为参考点。列出 a 节点的节点电压方程为

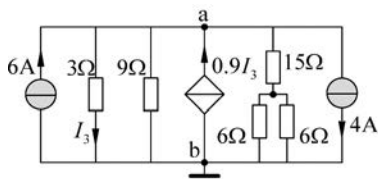
$$\left(\frac{1}{3} + \frac{1}{9} + \frac{1}{15 + 6//6}\right)U_a = 6 - 4 + 0.9I_3 \quad (3.4-7)$$

根据欧姆定律,补充受控参数方程为

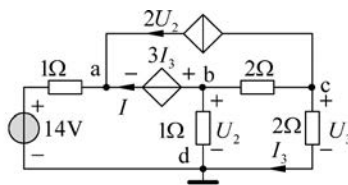
$$I_3 = \frac{U_a}{3} \quad (3.4-8)$$

联立式(3.4-7)和式(3.4-8),解得

$$U_a = 10\text{V}, \quad I_3 \approx 3.3\text{A}$$



(a) 例题3-6图



(b) 例题3-7图

图 3-4 例题 3-6 和例题 3-7 图

【例题 3-7】 有如图 3-4(b)所示电路,试用节点电压法求出电压 U_3 。

解: 设 d 点为参考点, a、b、c 三点电压为 U_1 、 U_2 、 U_3 , 受控电压源用电流 I 替代。

节点 a 电压方程为

$$U_1 = \frac{14}{1} + 2U_2 + I \quad (3.4-9)$$

节点 b 电压方程为

$$\left(\frac{1}{2} + 1\right)U_2 - \frac{1}{2}U_3 = -I \quad (3.4-10)$$

节点 c 电压方程为

$$\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\right)U_3 - \frac{1}{2}U_2 = -2U_2 \quad (3.4-11)$$

根据 KVL, 补充受控电压源方程

$$3I_3 = U_2 - U_1 \quad (3.4-12)$$

由欧姆定律得

$$I_3 = \frac{U_3}{2} \quad (3.4-13)$$

利用式(3.4-9)和式(3.4-10)消去 I , 利用式(3.4-12)和式(3.4-13)消去 I_3 , 结合式(3.4-11)可解得

$$U_1 = 13\text{V}, \quad U_2 = 4\text{V}, \quad U_3 = -6\text{V}$$

【例题 3-8】 写出如图 3-5 所示电路的节点电压方程。

解: 特别注意电路中含有受控电流源 βi , 无伴电压源 u_{S1} , 与电流源 i_{S1} 串联的电阻 R_2 以及有伴电压源 u_{S2} 。对 u_{S1} 支路用电流 i_0 替代, 去掉 R_2 , 则有

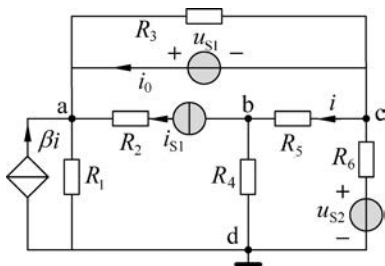


图 3-5 例题 3-8 图

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3}\right)u_a - \frac{1}{R_3}u_c = \beta i + i_0 + i_{S1} \\ \left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}\right)u_b - \frac{1}{R_5}u_c = -i_{S1} \\ -\frac{1}{R_3}u_a - \frac{1}{R_5}u_b + \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6}\right)u_c = -i_0 + \frac{u_{S2}}{R_6} \end{cases} \quad (3.4-14)$$

而

$$\begin{cases} i = \frac{u_c - u_b}{R_5} \\ u_a - u_c = u_{S1} \end{cases} \quad (3.4-15)$$

在式(3.4-14)中,利用第1和第3个方程消去电流 i_0 ,再将式(3.4-15)中的 i 代入,消去 i 。然后,与式(3.4-14)中的第2个方程及式(3.4-15)中的第2个方程联立,得到

$$\begin{cases} \frac{1}{R_1}u_a + \frac{\beta-1}{R_5}u_b + \left(\frac{1-\beta}{R_5} + \frac{1}{R_6}\right)u_c = i_{S1} + \frac{u_{S2}}{R_6} \\ \left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}\right)u_b - \frac{1}{R_5}u_c = -i_{S1} \\ u_a - u_c = u_{S1} \end{cases}$$

3.5 网孔电流法

节点电压法告诉我们,基于KCL列写节点电压方程可以减少分析电路的难度。那么根据对偶原理,基于KVL列写网孔电流方程是否具有同样的效果呢?回答是肯定的。

3.5.1 网孔电流法步骤

对于一个具有 n 个节点 b 条支路的待解电路,若选择网孔作为回路,就能列写出 $(b-n+1)$ 个回路电流方程用于电路求解,这就是“网孔电流法”的基本思路。

网孔电流法: 基于KVL列写 $(b-n+1)$ 个以网孔电流为未知量的回路电压方程,然后求得 $(b-n+1)$ 个网孔电流,进而完成对电路全面分析的方法。

显然,要列写网孔电流方程,先要确定网孔电流及其正方向。

网孔电流: 假设在网孔中沿着构成该网孔各条支路流动的电流。

在图 3-6 所示电路中,共有 $n=4$ 个节点, $b=6$ 条支路,网孔数为 $b-n+1=3$ 个。其中 i_a 、 i_b 和 i_c 就分别是网孔 a、b、c 的网孔电流。

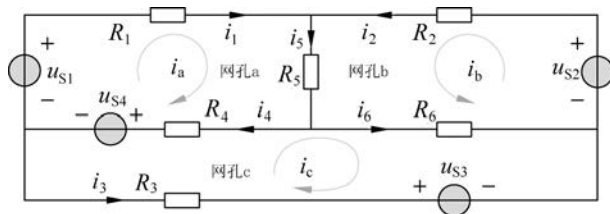


图 3-6 网孔电流法原理例图

有了网孔电流,电路中任何一个支路电流就都可用它们表示。相邻两网孔间的公共支路电流可用两个网孔电流的代数和表示(网孔电流方向与支路电流的相同取正值;反之,取负值)。因此,有

$$i_1 = i_a, \quad i_2 = i_b, \quad i_3 = -i_c, \quad i_4 = i_a - i_c, \quad i_5 = i_a + i_b, \quad i_6 = i_b + i_c$$

显然,原来 6 个支路电流未知量就变成 3 个网孔电流未知量,只需列写 3 个 KVL 方程。

网孔 a 电流方程为

$$R_1 i_a + R_5 (i_a + i_b) + R_4 (i_a - i_c) + u_{S4} - u_{S1} = 0$$

网孔 b 电流方程为

$$R_2 i_b + R_5 (i_a + i_b) + R_6 (i_b + i_c) - u_{S2} = 0$$

网孔 c 电流方程为

$$R_3 i_c + R_4 (i_c - i_a) + R_6 (i_b + i_c) - u_{S4} - u_{S3} = 0$$

整理得

$$\begin{cases} (R_1 + R_4 + R_5) i_a + R_5 i_b - R_4 i_c = u_{S1} - u_{S4} \\ R_5 i_a + (R_2 + R_5 + R_6) i_b + R_6 i_c = u_{S2} \\ -R_4 i_a + R_6 i_b + (R_3 + R_4 + R_6) i_c = u_{S3} + u_{S4} \end{cases} \quad (3.5-1)$$

根据式(3.5-1),可以解出 3 个网孔电流 i_a 、 i_b 和 i_c 。再根据网孔电流与支路电流的关系,即可求得所有支路电流。

若把一个网孔所包含的全部电阻称为该网孔的“自电阻”并用 R_{xx} 表示,把相邻两个网孔间的公共电阻称为“互电阻”并用 R_{xy} 表示,把一个网孔内所有电压源的代数和用 u_{Sx} 表示,则有 $R_{aa} = R_1 + R_4 + R_5$, $R_{bb} = R_2 + R_5 + R_6$, $R_{cc} = R_3 + R_4 + R_6$, $R_{ab} = R_{ba} = R_5$, $R_{bc} = R_{cb} = R_6$, $R_{ac} = R_{ca} = -R_4$, $u_{Sa} = u_{S1} - u_{S4}$, $u_{Sb} = u_{S2}$, $u_{Sc} = u_{S3} + u_{S4}$ 。

那么,式(3.5-1)可写为

$$\begin{cases} R_{aa} i_a + R_{ab} i_b + R_{ac} i_c = u_{Sa} \\ R_{ba} i_a + R_{bb} i_b + R_{bc} i_c = u_{Sb} \\ R_{ca} i_a + R_{cb} i_b + R_{cc} i_c = u_{Sc} \end{cases} \quad (3.5-2)$$

根据式(3.5-2)可以得到网孔电流方程的一般形式:

$$\text{自电阻} \times \text{本网孔电流} \pm \sum (\text{互电阻} \times \text{相邻网孔电流}) = \text{本网孔电压源沿电位升方向的代数和} \quad (3.5-3)$$

说明:

- (1) 自电阻全为正值。
- (2) 相邻两网孔电流方向一致时,互电阻为正;反之,互电阻为负。
- (3) 电压源的电位升方向与网孔电流方向一致时,该电压源取正值;反之,取负值。

全电路欧姆定律: 若电路只有一个回路,其中有若干个电阻和电压源,则回路电流等于沿回路电流方向所有电压源电位升的代数和(反方向电位降的代数和)除以所有电阻之和。

$$i = \frac{\sum e_s}{\sum R} = \frac{\sum u_s}{\sum R} \quad (3.5-4)$$

至此,可以给出网孔电流法的分析步骤如下。

- (1) 确定网孔数并编号,同时标出网孔电流及其方向。通常,为方便计,所有网孔电流取向一致,或顺时针或逆时针。
- (2) 确定自电阻和互电阻,按式(3.5-3)列写各网孔电流方程的左端。
- (3) 确定电压源的正负号,列写各网孔电流方程的右端。
- (4) 求解网孔电流方程组,得到各网孔电流。
- (5) 根据各网孔电流,再求其他电路未知量,如支路电流、电压、功率、元件参数等。

仔细观察式(3.4-4)和式(3.5-3),可以发现节点电压与网孔电流是对偶的,节点电压方程与网孔电流方程是对偶的,弥尔曼定理与全电路欧姆定律是对偶的。这也验证了第2章“对偶定理”的结论。

综上所述,可得如下结论:

- (1) 通过网孔电流(未知量)分析(求解)电路是以 KCL 为依据的。即节点上各支路电流的代数和为零,而所有支路电流均可用网孔电流示。
- (2) 以网孔电流为未知量的方程是基于 KVL 列写的。即一个回路的电压代数和为零。
- (3) “网孔电流方程”强调的是方程未知量为“网孔电流”,但方程的实质是基于 KVL 的“回路电压方程”。

【例题 3-9】 求如图 3-7(a)所示电路中的各支路电流。已知 $R_1=20\Omega$, $R_2=10\Omega$, $R_3=20\Omega$, $U_{S1}=30\text{V}$, $U_{S2}=10\text{V}$ 。

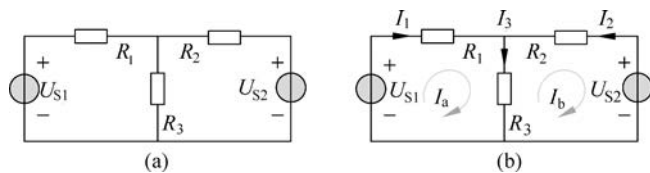


图 3-7 例题 3-9 图

解: 设回路电流和支路电流如图 3-7(b)所示。

自电阻和互电阻为

$$R_{aa} = R_1 + R_3 = 40\Omega, \quad R_{bb} = R_2 + R_3 = 30\Omega, \quad R_{ab} = -R_3 = -20\Omega$$

网孔方程为

$$\begin{cases} 40I_a - 20I_b = 30 \\ -20I_a + 30I_b = -10 \end{cases}$$

可解出

$$I_a = I_1 = 0.875\text{A}, \quad I_b = I_2 = 0.25\text{A}, \quad I_3 = I_a + I_b = 1.125\text{A}$$

3.5.2 特殊情况的处理

网孔电流法是在电路中只包含电压源的前提下推导而成的。那么,当电路中出现以下情况时,网孔电流方程又该如何列写呢?

1. 电路中包含有伴电流源

若电路中包含有伴电流源,则直接将有伴电流源等效成有伴电压源即可。

2. 电路中包含无伴电流源

如果电路中包含无伴电流源,则应视无伴电压源在电路中的不同位置分别处理。

(1) 电流源处于电路的边界支路上。这时电流源所在网孔的网孔电流就是电流源电流,因此,可以少列一个网孔方程。显然,这种情况反而使问题更简单了。

(2) 电流源处于电路中两个相邻网孔的公共支路上。通常是设电流源两端的电压为变量,把电流源当作电压源处理,列写网孔方程。这样,所列的方程中必然多出一个未知量,即电流源的电压。这时可利用电流源电流与网孔电流之间的 KCL 关系再补充一个方程。

3. 电路中包含受控源

若电路中包含受控源,则将受控源当作独立源看待列写网孔电流方程。若受控源的控制量不是某个网孔电流,则需补充一个反映控制量与网孔电流之间关系的方程式。

【例题 3-10】 在如图 3-8 所示电路中,求电流源的端电压 U 。

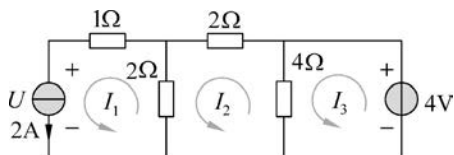


图 3-8 例题 3-10 图

解: 设 3 个网孔电流如图 3-8 所示。网孔电流 I_1 等于电流源 2A,则网孔电流方程为

$$\begin{cases} I_1 = 2 \\ -2I_1 + (2 + 2 + 4)I_2 - 4I_3 = 0 \\ -4I_2 + 4I_3 = 4 \end{cases} \quad (3.5-5)$$

网孔 1 中 1Ω 和 2Ω 电阻的电压分别为 $1 \times (-I_1) = -I_1$ 和 $2(I_2 - I_1)$,则电流源端电压为

$$U = -I_1 + 2(I_2 - I_1) \quad (3.5-6)$$

联立式(3.5-5)和式(3.5-6),可解得

$$I_2 = 2\text{A}, \quad I_3 = 3\text{A}, \quad U = -2\text{V}$$

【例题 3-11】 在如图 3-9 所示电路中,求各支路电流。

解: 该电路有 2 个受控源,控制量均为 2Ω 电阻上的电压 U 。因为存在无伴受控电流源

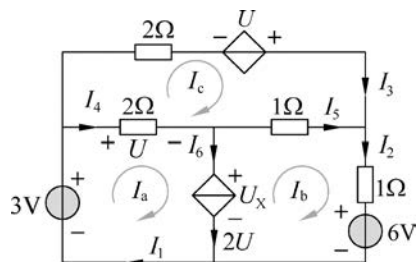


图 3-9 例题 3-11 图

$2U$, 所以设其端电压为 U_x , 则网孔方程为

$$\begin{cases} 2I_a - 2I_c = 3 - U_x \\ 2I_b - I_c = -6 + U_x \\ 5I_c - 2I_a - I_b = U \end{cases} \quad (3.5-7)$$

根据欧姆定律和 KVL, 可得控制量与受控源的关系方程

$$\begin{cases} 2U = I_a - I_b \\ U_x - 3 + U = 0 \end{cases} \quad (3.5-8)$$

将式(3.5-8)代入式(3.5-7), 整理后得

$$\begin{cases} 3I_a + I_b - 4I_c = 0 \\ I_a + 3I_b - 2I_c = -6 \\ -5I_a - I_b + 10I_c = 0 \end{cases}$$

解出

$$I_a = I_1 = \frac{9}{7} \text{ A}, \quad I_b = I_2 = -\frac{15}{7} \text{ A}, \quad I_c = I_3 = \frac{3}{7} \text{ A}$$

再由 KCL 可得

$$I_4 = I_a - I_c = \frac{6}{7} \text{ A}, \quad I_5 = I_c - I_b = -\frac{18}{7} \text{ A}, \quad I_6 = I_a - I_b = \frac{24}{7} \text{ A}$$

【例题 3-12】 在如图 3-10(a)所示电路中, 利用网孔电流法求电流 i_0 。

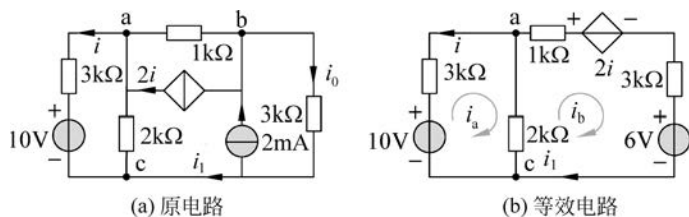


图 3-10 例题 3-12 图

解: 将受控、独立电流源均等效为电压源并给出网孔电流及其方向, 见图 3-10(b)。

列出两个网孔的电流方程

$$\begin{cases} 5i_a - 2i_b = 10 \\ -2i_a + 6i_b = -2i - 6 \end{cases} \quad (3.5-9)$$

补充受控电源方程

$$i = -i_a \quad (3.5-10)$$

将式(3.5-10)代入式(3.5-9),消去 i ,再消去 i_a ,解得

$$i_b = \frac{5}{11} \text{mA}$$

求 i_0 必须回到原电路中,因为 $i_1 = i_b$,所以,根据 KCL 得

$$i_0 = 2 + i_1 = 2 + \frac{5}{11} = \frac{27}{11} \approx 2.45(\text{mA})$$

该题的关键是要记住电源等效不适用于内部,即 2mA 电流源和 $3\text{k}\Omega$ 电阻等效为 6V 有伴电压源后, i_0 不等于流过该电压源的电流。

本题也可用节点电压法求解。设 c 点为参考点,将电压源转化为电流源,可得方程

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{2} + 1\right) u_a - u_b = \frac{10}{3} + 2i \\ -u_a + \left(\frac{1}{3} + 1\right) u_b = 2 - 2i \end{cases} \quad (3.5-11)$$

补充受控源方程

$$i = \frac{u_a - 10}{3} \quad (3.5-12)$$

将式(3.5-12)代入式(3.5-11),消去 i ,再消去 u_a ,可得

$$u_b = \frac{81}{11} \text{V}$$

根据欧姆定律有

$$i_0 = \frac{u_b}{3} = \frac{81}{3 \times 11} = \frac{27}{11} \approx 2.45(\text{A})$$

通常,要对一个电路的求解,节点电压法和网孔电流法均可采用。若网孔数大于或等于节点数,则应优先采用节点电压法。

3.6 回路电流法

若选择的基本回路不是网孔而是回路,则“网孔电流法”就变成了“回路电流法”。

比如在图 3-11 中,除了网孔 a、b 和 c,还有回路 d、e、f 和 g。显然,只要在其中任选 3 个基本回路,就可以按照“网孔电流法”的步骤分析电路。

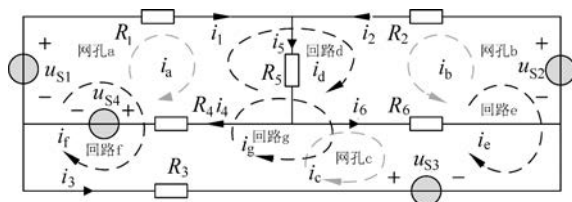


图 3-11 回路电流法原理例图

那么,回路电流法与网孔电流法有何异同点呢? 答案是这样的:

(1) 在电路中“网孔”比“回路”更容易识别。因此,通常直接选用“网孔”作为独立回路

并列写其电流方程。

(2) 网孔法只适合平面电路,对于非平面电路就必须采用回路法。

(3) 网孔法中的公共支路(互电阻)只涉及两个网孔电流,而回路法中的公共支路可能涉及大于两个的回路电流。

(4) 一个给定的平面电路的网孔是确定的,所列写的网孔电流方程是唯一的。但因为确定的树不同,基本回路就不同,所以,可列写的基本回路电流方程组就不唯一。这一特点虽然给列写方程带来了一定困难,但也为分析电路提供了选择空间,增加了解题的灵活性。比如,若两个网孔的公共支路上含有无伴电流源,那么,按网孔电流法,就有两个网孔电流为未知量;但是在回路电流法中,可以另选一个回路避开无伴电流源,让无伴电流源只属于一个网孔或回路方程,这样,该网孔(回路)的网孔(回路)电流就是电流源的大小,从而减少了一个电路变量。

(5) 回路法的特殊情况处理方法与网孔法一样,但回路法有可能通过选择不同的回路减少一些特殊情况的影响,从而简化求解过程。

(6) 网孔法可以解决的问题,回路法也一定胜任;但回路法可以解决的问题,网孔法却不一定能够解决。

(7) 因为当选择的基本回路都是网孔时,回路法就是网孔法,所以有些教材不区分它们,统一称为“回路法”。

显然,回路法比网孔法适用面更广,使用更灵活,但方程列写难度也较大。可以认为网孔法是回路法的特例,而回路法是网孔法的推广和延伸。两种方法的实质是一样的,都是利用 KVL 列写回路电流方程。

回路法的分析步骤与网孔法一样。为便于记忆,我们依然给出其分析步骤如下:

(1) 根据具体情况,选择相应的基本回路并标出回路电流及其方向。通常,为方便计,所有回路电流取向一致,或顺时针或逆时针。

(2) 确定自电阻和互电阻,按式(3.5-3)列写各回路电流方程。

(3) 根据回路电流方程求解出各回路电流。

(4) 根据回路电流求解出各支路电流及其他未知量。

下面通过例题说明回路法的应用。

【例题 3-13】 求如图 3-12(a)所示电路中的各支路电流。

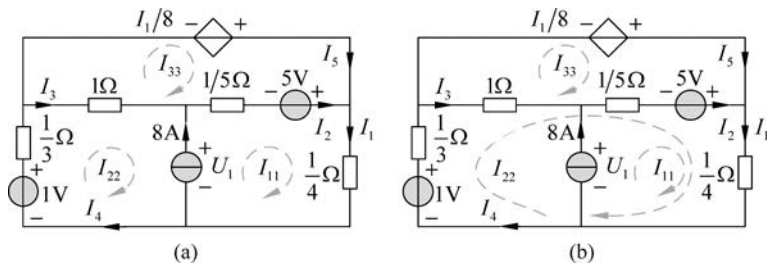


图 3-12 例题 3-13 图

解: 若采用网孔法,因 8A 电流源属于两个网孔,所以两个网孔电流 I_{11} 和 I_{22} 均为未知量,可得网孔电流方程

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{5}\right) I_{11} - \frac{1}{5} I_{33} = 5 + U_1 \\ \left(1 + \frac{1}{3}\right) I_{11} - I_{33} = 1 - U_1 \\ -\frac{1}{5} I_{11} - I_{22} + \left(1 + \frac{1}{5}\right) I_{33} = -5 + \frac{I_1}{8} \\ I_1 = I_{11}, \quad I_{11} - I_{22} = 8 \end{cases}$$

解得

$$I_{11} = 8\text{A}; \quad I_{22} = 0\text{A}; \quad I_{33} = -2\text{A}; \quad U_1 = -1\text{V}$$

各支路电流为

$$I_1 = I_{11} = 8\text{A}; \quad I_2 = I_{11} - I_{33} = 10\text{A}; \quad I_3 = I_{22} - I_{33} = 2\text{A};$$

$$I_4 = I_{22} = 0\text{A}; \quad I_5 = I_{33} = -2\text{A}$$

若采用回路法,另外选择一个回路2列方程如图3-12(b)所示。因8A电流源只属于回路1,即回路电流 $I_{11} = 8\text{A}$ 是已知的,只有 I_{22} 和 I_{33} 为未知量,所以回路电流方程为

$$\begin{cases} I_{11} = 8 \\ \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{5}\right) I_{11} + \left(\frac{1}{3} + 1 + \frac{1}{4} + \frac{1}{5}\right) I_{22} - \left(1 + \frac{1}{5}\right) I_{33} = 1 + 5 \\ -\frac{1}{5} I_{11} - \left(1 + \frac{1}{5}\right) I_{22} + \left(1 + \frac{1}{5}\right) I_{33} = -5 + \frac{I_1}{8} \\ I_1 = I_{11} + I_{22} \end{cases}$$

解得

$$I_{22} = 0\text{A}; \quad I_{33} = -2\text{A}$$

可见,该题应用回路电流法比网孔电流法简单。

【例题 3-14】 求如图3-13所示电路中的电流 I 及受控电流源的功率 P 。

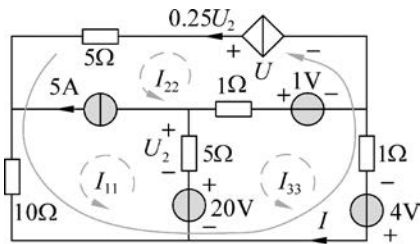


图 3-13 例题 3-14 图

解: 观察电路可知,网孔1和网孔2之间有5A电流源,若按网孔法列方程,比较麻烦。现选回路2如图3-13中实线所示,则回路1的回路电流 $I_{11} = 5\text{A}$ 为已知。回路2的回路电流也可认为与受控电流源相等,即

$$I_{22} = 0.25U_2$$

回路3的回路电流方程为

$$7I_{33} - 5I_{11} + I_{22} = -23$$

再补写一个受控参数方程(5Ω 电阻的端电压)

$$U_2 = (I_{33} - I_{11}) \times 5$$

联立上述 3 式并将 $I_{11} = 5\text{A}$ 代入, 可求得

$$I_{22} = -5\text{A}, \quad I_{33} = 1\text{A}, \quad U_2 = -20\text{V}$$

$$I = -(I_{22} + I_{33}) = -(-5 + 1) = 4(\text{A})$$

设受控源端电压 U 如图 3-13 所示, 则在回路 2 中, 根据 KVL 可得

$$-U + 5I_{22} + 10(I_{11} + I_{22}) + 4 + (I_{22} + I_{33}) \times 1 = 0$$

解得

$$U = -25\text{V}$$

则受控源发出的功率为

$$P = UI_{22} = -25 \times (-5) = 125(\text{W})$$

【例题 3-15】 求如图 3-14 所示电路中的电压 U_0 。

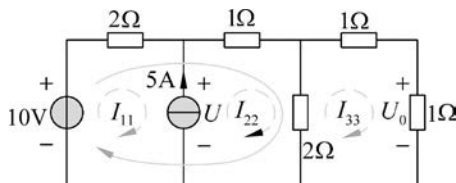


图 3-14 例题 3-15 图

解: 若按网孔法求解, 可列写出 3 个网孔电流方程和 1 个辅助方程

$$\begin{cases} 2I_{11} + U = 10 \\ 3I_{22} - 2I_{33} - U = 0 \\ -2I_{22} + 4I_{33} = 0 \\ I_{22} - I_{11} = 5 \end{cases}$$

解得

$$I_{33} = 2.5\text{A}, \quad U_0 = 2.5\text{V}$$

若按回路法求解, 可列写出 3 个回路(见实线回路)电流方程

$$\begin{cases} 5I_{11} + 3I_{22} - 2I_{33} = 10 \\ I_{22} = 5 \\ -2I_{11} - 2I_{22} + 4I_{33} = 0 \end{cases}$$

同样, 可解得

$$I_{33} = 2.5\text{A}, \quad U_0 = 2.5\text{V}$$

显然, 用回路法更简单。注意: 此题中回路 3 的 2Ω 电阻支路就是 3 个回路的公共支路。

3.7 结语

综上所述, 可以得到如下结论:

(1) 无论是 1b 法、节点电压法、网孔电流法还是回路电流法都可有效减少一次求解未知量的个数, 从而大大降低了电路分析的复杂度和难度。但必须认识到, 分析电路的工作量

并没有减少,仍然需要求解 $2b$ 个未知量。

(2) 上述四种方法相对于 $2b$ 法只不过是將 $2b$ 个未知量分为两步求解而已,也就是说,先求解以支路电流或电压、节点电压或网孔电流为未知量的方程(方程数小于 $2b$),然后再根据 KCL 和 KVL 列写剩余未知量的方程,最后求得全部 $2b$ 个未知量。

(3) $1b$ 法、节点电压法、网孔电流法和回路电流法能够简化求解过程的实质就是“化整为零,分而治之”。

本章主要概念和内容框图及思维导图

本章主要概念和内容框图及思维导图如图 3-15 所示。

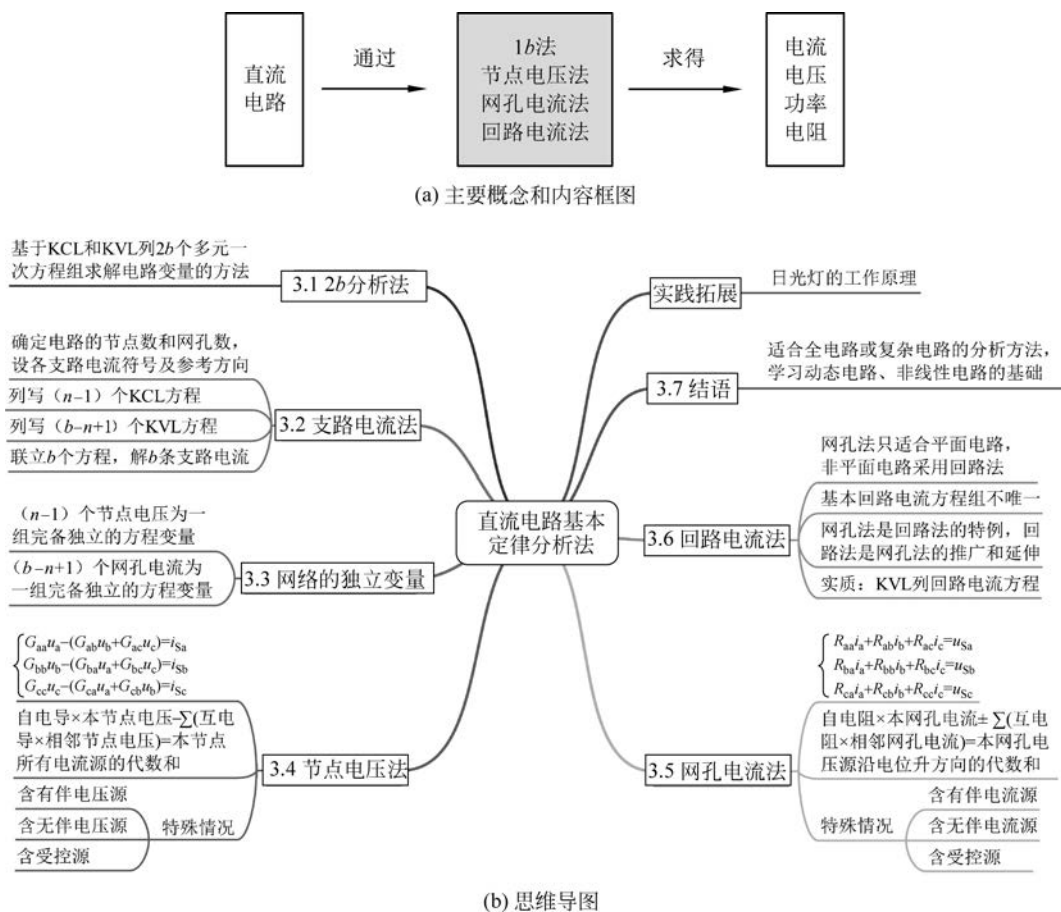


图 3-15 第 3 章主要概念和内容框图及思维导图

实践拓展——日光灯的工作原理

日光灯是一种常见的照明设备,由灯管、启辉器和镇流器 3 个部分组成,如图 3-16 所示。灯管是一个内壁涂有一层荧光物质、两端装有灯丝电极(灯丝上涂有受热后易发射电子的氧化物)、内部充有稀薄惰性气体及水银蒸气的玻璃管。启辉器由一个小氖泡和一个小容量电容组成。氖泡内有一个静触片电极和一个由两个膨胀系数不同的金属制成的 U 形动触片电极。当温度升高时,U 形电极的两个金属片因膨胀系数不同,导致其向膨胀系数低的一侧弯曲,从而与静触片接触,接通两个电极;温度降低后,又可以离开静触片恢复原来

的位置,断开两个电极。镇流器是一个带有铁芯的电感线圈。

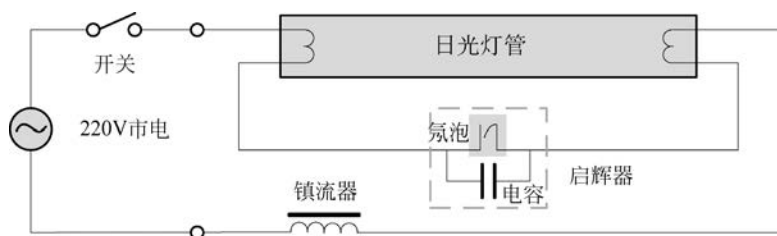


图 3-16 日光灯原理图

当打开电源开关接通 220V 市电时,由于灯管没有点亮(无电流),启辉器的氖泡(固定触头与倒 U 形双金属片之间)就会因承受 220V 电压而放电,使倒 U 形双金属片受热弯曲与固定触头接触,接通了镇流器、灯丝及启辉器的电流回路,形成“启动电流”。

灯丝在启动电流的作用下被加热而发射电子。同时,氖泡的倒 U 形双金属片由于辉光放电结束而冷却,与固定触头分离,使电路突然断开。在此瞬间,镇流器产生的高感应电压与电源电压叠加为高于电源电压的启动电压(400~600V)就会加在灯管两端,迫使管内发生弧光放电而导通,使灯管被点亮。灯管点亮后,由于镇流器的限流作用,灯管两端的电压会变低(30W 的灯管约为 100V)。此时,启辉器因电压较低而不工作,相当于开路。

可见,启辉器就是一个自动开关,可自动瞬间切断电路,使得镇流器产生感应电动势,为灯管的点燃提供高电压。实际中,为节约用电,可用一个人工按钮开关代替启辉器,当断电后再通电,日光灯不会自动点亮,除非有人按一下按钮。

哲言智语

因为懂得了全局性的东西,就更会使用局部性的东西,因为局部性的东西是隶属于全局性的东西的。

——《中国革命战争的战略问题》

大家明白,不论做什么事,不懂得那件事的情形,它的性质,它和它以外的事情的关联,就不知道那件事的规律,就不知道如何去做,就不能做好那件事。

——《中国革命战争的战略问题》



视频讲解

本章习题

- 3-1 为什么说节点电压法的实质是 KCL,而网孔电流法的实质是 KVL?
- 3-2 网孔电流法的互电阻为何有正负之分,而节点电压法的互电导却总取负值?
- 3-3 怎样做可以使网孔电流法的互电阻始终取负值?
- 3-4 用节点电压法求图 3-17 所示电路的各支路电流。(1.8A,2.2A,0.8A)
- 3-5 用节点电压法求图 3-18 所示电路中的 U 和 I 。(8V,1A)

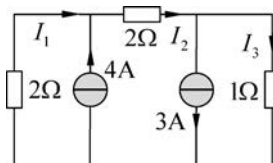


图 3-17 习题 3-4 图

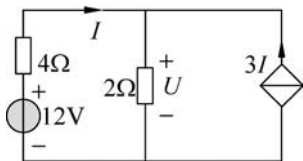


图 3-18 习题 3-5 图

3-6 如图 3-19 所示电路,用节点电压法求电压 U 。(-1V)

3-7 如图 3-20 所示电路,问 R 为何值时, $I=0$? (3Ω)

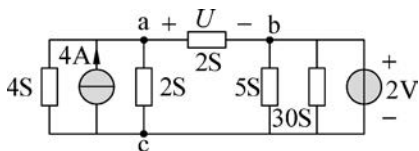


图 3-19 习题 3-6 图

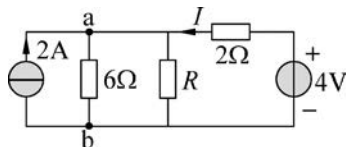


图 3-20 习题 3-7 图

3-8 用节点电压法求如图 3-21 所示电路的各支路电流。($2\text{V}, 1/3, 2, 1, 2/3\text{A}; U_a = 12/7\text{V}, U_b = 20/7\text{V}$)

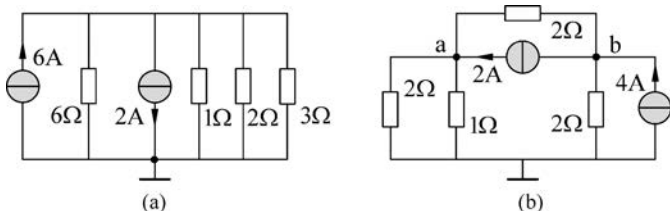


图 3-21 习题 3-8 图

3-9 如图 3-22 所示电路,网络 N 的端口特性为 $I = -3U + 6$ 。用戴维南定理或诺顿定理和节点电压法求电流 I_1 。(3A)

3-10 如图 3-23 所示电路,用节点电压法求各支路电流。($0.8, 4, 8, -2, 2, 2/3, -2, 13\text{A}$)

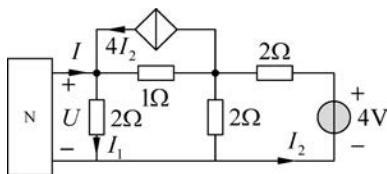


图 3-22 习题 3-9 图

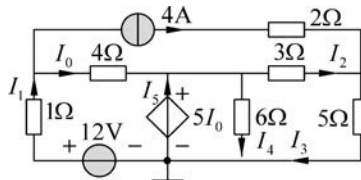


图 3-23 习题 3-10 图

3-11 用网孔电流法求如图 3-24 所示电路中的 I 和 U_{ab} 。($3\text{A}, -3\text{V}$)

3-12 用网孔电流法求如图 3-25 所示电路中的各支路电流。($-4\text{A}, 0, 4\text{A}$)

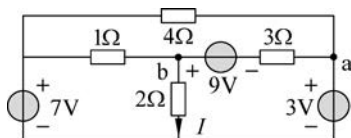


图 3-24 习题 3-11 图

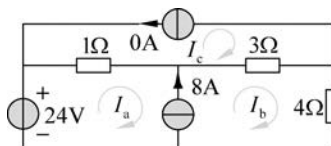


图 3-25 习题 3-12 图

3-13 如图 3-26 所示电路,用网孔电流法求流过 8Ω 电阻的电流。(-3.83A)

3-14 如图 3-27 所示电路,用网孔电流法求电压 U 。(3.75V)

3-15 如图 3-28 所示电路,用网孔电流法求电路中的电流 I 。(5A)

3-16 如图 3-29 所示电路,用网孔电流法求电路中的电压 U 。(7V)

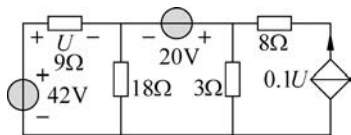


图 3-26 习题 3-13 图

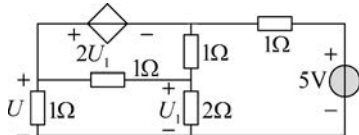


图 3-27 习题 3-14 图

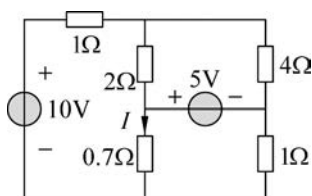


图 3-28 习题 3-15 图

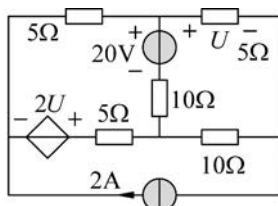


图 3-29 习题 3-16 图

3-17 已知某电路的网孔电流方程为

$$\begin{cases} 3I_{11} - I_{22} - 2I_{33} = 1 \\ -I_{11} + 6I_{22} - 3I_{33} = 0 \\ -2I_{11} - 3I_{22} + 6I_{33} = 6 \end{cases}$$

试画出相应的电路图。

3-18 如图 3-30 所示电路,用回路法求 4Ω 电阻的功率。(64W)

3-19 如图 3-31 所示电路,用回路法求电流 I 。(−0.25A)

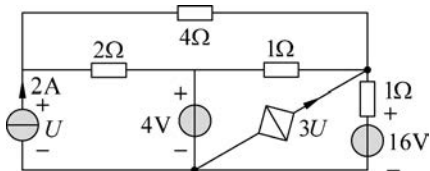


图 3-30 习题 3-18 图

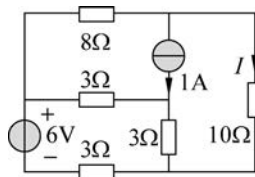


图 3-31 习题 3-19 图

3-20 求如图 3-32 所示电路中的电流 I 。(4/3A)

3-21 如图 3-33 所示电路,若要 $U_{ba} = 1V$,请确定 I_S 的大小。(5A)

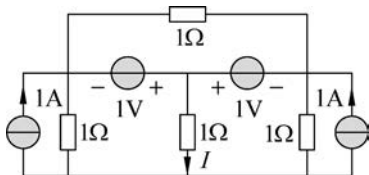


图 3-32 习题 3-20 图

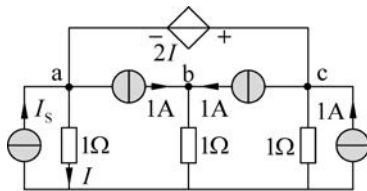


图 3-33 习题 3-21 图