第 3 章　电阻电路的一般分析方法

本章重点

- 电路的图、树、树支、连支、单连支回路、独立回路的概念。
- 掌握网孔电流法、回路电流法、节点电压法等分析方法，求解较复杂电路。
- 含有受控源及无伴电源电路的分析计算。

本章难点

- 根据电路的图、树，用回路电流法列写方程。
- 支路电流法、网孔电流法、回路电流法在电路含有无伴电流源及无伴受控电流源的分析。
- 支路电流法、节点电压法在电路含有无伴电压源及无伴受控电压源的分析。

本章学习复杂电阻电路的分析计算。电阻电路的分析是以电路中电压或电流为未知量，根据元件的 VCR 关系（VCR 定律）和基尔霍夫电压定律（KVL 定律）、基尔霍夫电流定律（KCL 定律）为理论依据，建立方程组，求解未知量，从而得到电路中未知电压或电流，并求电路中元件的功率。方法有：支路电流法、网孔电流法、回路电流法、节点电压法等分析方法，其中后三种方法较简便，要重点掌握。

3.1　电路的图

本节介绍一些图论的初步知识。图论是数学领域中的一个重要分支，其在电路中的应用称为网络图论。在电路分析中，以图论为数学工具选择电路的独立变量，列出电路的独立方程进而求解。网络图论用于结构较复杂的电路分析，也为利用计算机设计、计算、分析大规模电路奠定了基础。

3.1.1　图的概念

在数学图论知识中，图是由点和边构成的。应用于电路上，对于任何一个电路，其电路图是由节点和支路构成的，如果不考虑元件本身的性质，只考虑元件之间的连接关系，而用线段和点表示，就组成了电路的“图”。将电路中每一元件或一些元件的某种简单组合（串、并联）用一条线段（长、短、曲、直均可）来代替，这条线段称为支路。每一条支路的端点称为节点，节点允许是孤立的。由支路和点构成的集合，或者说由线段和点组成的图形，称为该电路的拓扑图，简

称图。通过电路的结构及其连接性质对电路进行分析和研究称为网络图论。

电路的图中支路和节点与电路图中的支路和节点是有区别的。“图”中的支路是一个抽象线段，各支路端点为节点，它可以是两条及以上支路的交汇点，也可以是一个孤立的节点，任何一条支路必须终止在节点上，若支路移去，允许有孤立节点存在；反之移去一个节点，必将与该节点连接的全部支路同时移去，无节点则无支路。电路图中的支路由具体元件和导线连接而成，是一个实体，节点是两条或两条以上支路的交汇点，支路连于两节点之间，无支路则无节点。电路的图相同，但电路图未必相同，因为每个支路上元件的性质不同。

若图中的支路按电流（或电压）正方向标示在线段上，这样的图称为有向图，即赋予支路方向的图称为有向图，未赋予支路方向的图称为无向图。

图的画法如下：①激励源可作为一个支路处理，用一根线段（弧线或曲线）表示；②激励源与电阻串联（或并联）组成一个复合支路，可用一根线段表示；③受控源同独立源处理；④一个或若干个无源元件串（并）联构成一条支路；⑤支路用 1，2，3……表示，节点用①，②，③……表示。如图 3.1 所示，其中（a）为电路图，（b）、（c）、（d）为电路的图，（d）为有向图。

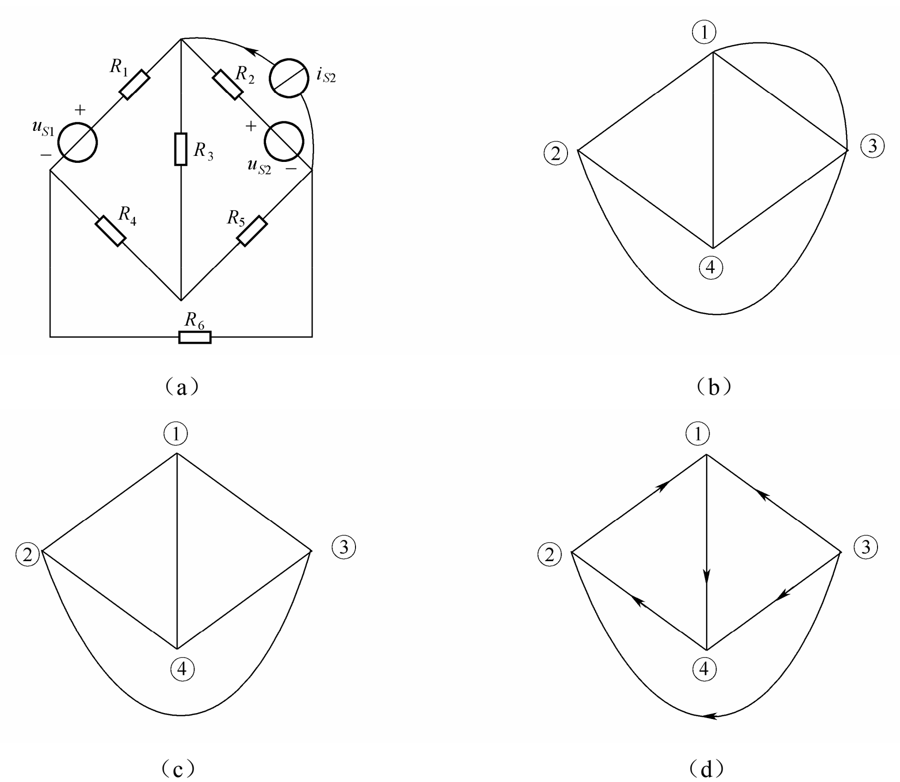


图 3.1　电路的图

3.1.2　KCL 和 KVL 方程的独立方程个数

由 KCL 定律和 KVL 定律列写方程时，与支路的元件性质无关。本节讨论如何利用电路的图列出 KCL 和 KVL 方程，并讨论方程的独立性。

（1）KCL 方程的独立性讨论

图 3.2 所示为一个电路的图，由 KCL 定律列出①、②、③、④等节点的 KCL 方程如下：

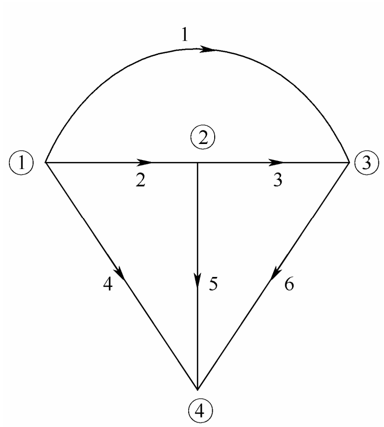


图 3.2　KCL 方程的独立方程数讨论

KCL 方程的独立方程数

$$\begin{cases} i_1 + i_2 + i_4 = 0 \\ -i_2 + i_3 + i_5 = 0 \\ -i_1 - i_3 + i_6 = 0 \\ -i_4 - i_5 - i_6 = 0 \end{cases}$$

将上述 4 个方程相加，等号两边均为零，说明 4 个方程并非都是独立方程，而将其中任何 3 个方程相加，必得第 4 个 KCL 方程，说明其中有三个方程是独立的，有一个是非独立的。

对于图 3.2，每个支路均连于两个节点之间，从一个节点流出为正，流入另一节点为负，4 个 KCL 方程列出后，每个支路电流均出现两次，一次为正，一次为负。所以将 4 个方程相加为零。任意前三个节点的 KCL 方程中（如节点①、②、④），除与第四个节点（如节点③）相连的电流只出现一次以外，其余电流均出现两次，一次为正，一次为负，将前三个方程相加，出现过一正一负的电流均相互抵消，只留下与第四个节点相连的支路电流，那么它即为第四个节点的电流方程，故它是非独立的，前三个方程是独立的。

推广到 n 个节点的电路，$n-1$ 个 KCL 方程是独立的，第 n 个方程为非独立的，对应独立 KCL 方程的节点称为独立节点，所以 n 个节点电路有 $n-1$ 个是独立节点，

可列写 $n-1$ 个独立的 KCL 方程。注意这 $n-1$ 个节点是任意选择的，独立与非独立都是相对而言的。

列写 KCL 独立方程的方法：①画出电路的有向图 G；②选择 $n-1$ 个独立节点；③列写 $n-1$ 个 KCL 方程。

（2）关于 KVL 方程的独立性讨论

对应独立的 KVL 方程的回路称为独立回路，它与支路的方向无关，故可由无向图来描述。为讨论独立性，将给出路径、连通图 G、回路、树、树支、单连支、单连支回路等概念。

如图 3.3 所示电路。对于图 3.3（a），从图 G 的某一点出发，沿着一个或一些支路移动，到达另一节点或回到原出发点，这样一条或多条支路构成了一条路径。

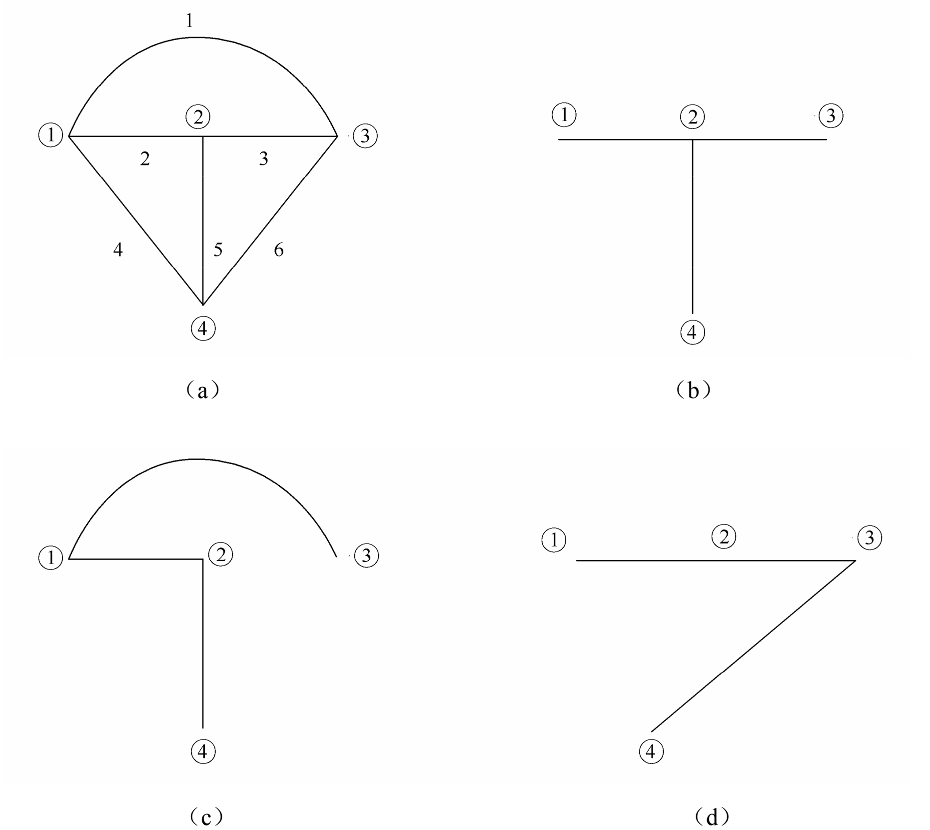


图 3.3　KVL 方程的独立方程数讨论

如果对于图 G 来说，任意两个节点之间至少有一条路径就称图 G 为连通图。从图 G 的某一节点出发，沿着一些支路和节点移动，最后又回到原出发点，形成闭合路径，该路径称为回路，回路中除起点和终点重合外，其他节点不出现重复，

如图 3.3（a）中支路（2，3，1），（1，4，6），（1，3，5，4），（2，3，6，4）等构成回路。n 个节点（n=4）总共有 2^n（16）个不同的回路，但独立回路数远少于总回路数。为确定一组独立回路，引入“树”的概念。

树 T 包含连通图 G 中的全部节点和部分支路，但不包含回路，而树 T 本身是连通的。对于图 3.3（a）的连通图，图 3.3（b）、（c）、（d）画出了几种树，一个连通图中共有树的种类 2^n 个。一个树 T 包含的支路称为这个树的树支，连通图 G 中不属于这个树 T 的支路称为连支。由一个连支和树 T 中的若干树支构成一个回路，称为单连支回路，又称基本回路，每个单连支回路仅含一个连支，且这一连支不会出现在其他单连支回路中，故单连支回路是独立回路，由 l 个连支分别与树 T 构成 l 个单连支回路。由全部连支和这个树 T 形成的基本回路构成单连支回路组，故基本回路数等于连支数，等于独立回路数。

可以证明，连支数 l =独立回路数=基本回路数=KVL 独立方程的个数。因为每个单连支回路中都包含一条也仅包含一条连支，是其他连支回路所没有的，故每出现一个新的基本回路，就出现一个新的连支电流，该连支电流就是独立的，因而由每个基本回路所建立的关于该连支电流的 KVL 方程也是独立的。

可以证明，树支数=独立节点数 $n-1$ =KCL 独立方程的个数。这是因为，对于 n 个节点的电路，除了第一个树支连于两节点之间，以后每增加一个节点均出现一个新的树支，且仅出现一个树支，因为凡接有支路（树支）的节点之间不能再有支路连接，否则构成回路，违背树的定义，增至第 n 个节点时，树支数为 $n-1$ 个，由于每增加一个新节点就出现一个新树支，因而该节点的 KCL 方程又出现了一个新的支路电流，是其他 KCL 方程中没有出现过的电流，故该节点是独立节点，对应的 KCL 方程也是独立的，如图 3.4 所示。

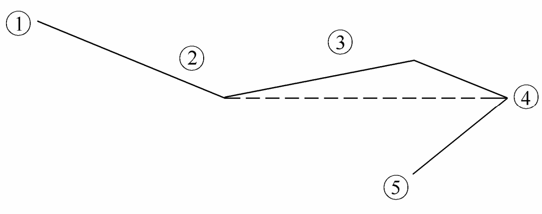


图 3.4　KCL 独立方程个数

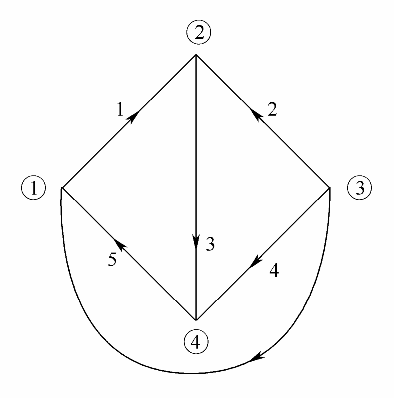
由上分析可知，一个具有 n 个节点、b 条支路的电路，其连通图 G 的树支数为 $n-1$ 个，等于 KCL 独立方程的个数。图 G 的连支数为 l 个，等于 KVL 独立方程的个数，故独立回路数 $l=b-(n-1)$ 。

电路图有平面图和立体图之分。若一个电路画在平面上，各条支路不会出现交叉但不相连的情况，这样的图称为平面图。平面电路任一不包含支路的闭合回路称为网孔，如图 3.3（a）所示共有 3 个网孔。网孔必定是回路，但回路不一定是网孔。

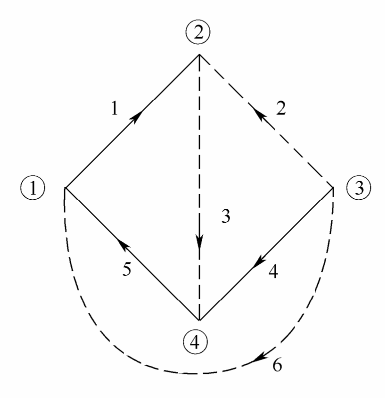
可以证明：网孔数=独立回路数 l = KVL 独立方程的个数。

列写 KVL 独立方程的方法：①画出电路的图 G；②任意选一种树 T；③确定单连支回路组 l；④由单连支回路组列写 KVL 方程。

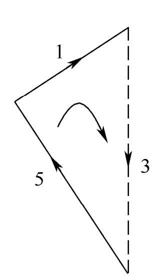
例如图 3.5，图（a）是某电路的图，图（b）实线部分是所选择的树 T（1，4，5），则 2，3，6 为连支，$l=3$，图（c）、（d）、（e）分别为各单连支回路，共 3 个，由此列写出 3 个独立 KVL 方程。



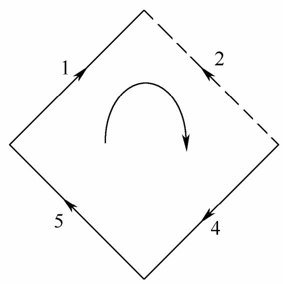
（a）



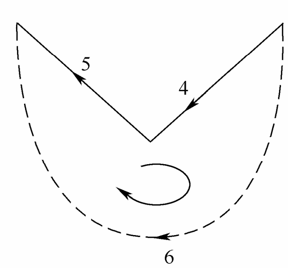
（b）



（c）



（d）



（e）

图 3.5　独立的 KVL 方程

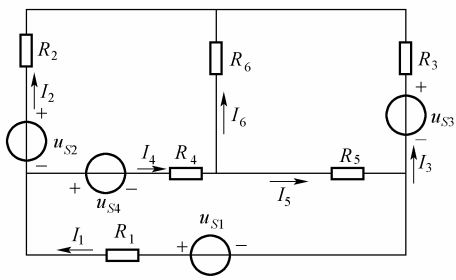
$$\begin{cases} u_1+u_3+u_5=0 \\ u_1-u_2+u_4+u_5=0 \\ -u_4-u_5+u_6=0 \end{cases}$$

3.2　支路电流法

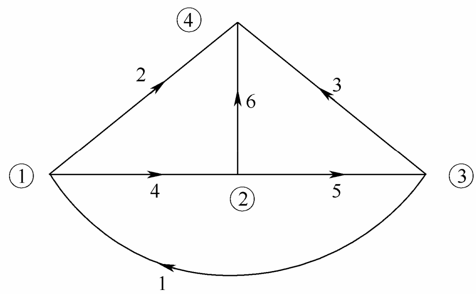
支路电流法以支路电流为未知量，通过元件 VCR 关系用支路电流表示支路电

压，列写 $n-1$ 个 KCL 独立电流方程及 $l=b-(n-1)$ 个 KVL 独立电压方程，然后联立求解。b 个支路电流共列 b 个方程，支路电流数与独立方程个数相等，故可求解各支路电流。支路电流法又称 1b 法。

已知元件参数及电源，求解各支路电流。以图 3.6（a）所示电路为例说明支路电流法。



（a）



（b）

图 3.6　支路电流法

步骤如下：（1）确定各支路电流 $I_1 \sim I_6$，参考方向如图所示。

（2）确定独立 KCL 方程个数。

独立节点数$(n-1)=4-1=3$ 个

确定独立 KVL 方程个数。

独立回路数为 $l=b-(n-1)=3$ 个

（3）选择独立节点①、②、③，由 KCL 定律$\sum I=0$，列写$(n-1)$个 KCL 方程如下：

$$-I_1+I_2+I_4=0 \quad ①$$

$$-I_4+I_5+I_6=0 \quad ②$$

$$I_1+I_3-I_5=0 \quad ③$$

（4）由 KVL 定律$\sum IR=\sum U_S$，选取回路绕行方向，列写 l 个 KVL 方程如下：

（本电路选取网孔为独立回路，且绕行方向均设为顺时针方向）

$$I_1R_1 + I_4R_4 + I_5R_5 = u_{S1} - u_{S4} \quad ④$$

$$I_2R_2 - I_4R_4 - I_6R_6 = u_{S2} + u_{S4} \quad ⑤$$

$$-I_3R_3 - I_5R_5 + I_6R_6 = -u_{S3} \quad ⑥$$

联立①~⑥求出支路电流 $I_1 \sim I_6$。

如果以支路电压为未知数，通过 VCR 关系以支路电压表示支路电流，列写(n−1)个 KCL 方程及 $l = b - (n-1)$个 KVL 方程，然后联立求解 b 个方程组的方法称为支路电压法（又称 1b 法）。

电压源若没有串联电阻，该电压源称为无伴电压源；电流源若没有并联电阻，该电流源称为无伴电流源。若电路中含有无伴电流源，在列写 KVL 方程时，设该电流源电压为未知量，增加一个新未知量，则要增加一个新方程，即建立该支路电流等于电流源的关系式，未知量变为 b+1 个，方程也为 b+1 个，仍然可以求解。支路电流法简单，但求解方程组较麻烦，当电路复杂支路数多时，需采用其他简便方法。

例 3-1　电路如图 3.7 所示，$R_1 = R_2 = 10\Omega$，$R_3 = 4\Omega$，$R_4 = R_5 = 8\Omega$，$R_6 = 2\Omega$，$u_{S3} = 20\text{V}$，$u_{S6} = 40\text{V}$。用支路电流法求解电流 I_5。

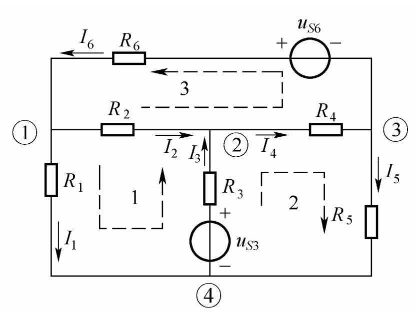


图 3.7　例 3-1 的图

解：各支路电流参考方向如图 3.7 所示。

支路 $b = 6$，独立节点 n−1=3 个，独立回路 l =6−3=3 个。

需列写 3 个 KCL 方程及 3 个 KVL 方程。

选取独立节点①、②、③，如图 3.8 所示，由 KCL 定律：

$$I_1 + I_2 - I_6 = 0 \quad ①$$

$$-I_2 - I_3 + I_4 = 0 \quad ②$$

$$-I_4 + I_5 + I_6 = 0 \quad ③$$

选取网孔 1、2、3 绕行方向，由 KVL 定律：

$$I_1R_1 - I_2R_2 + I_3R_3 = u_{S3} \quad ④$$

$$I_3R_3+I_4R_4+I_5R_5=u_{S3} \quad ⑤$$

$$I_2R_2+I_4R_4+I_6R_6=u_{S6} \quad ⑥$$

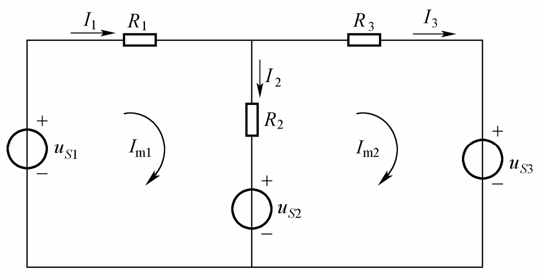
联立方程①～⑥，代入数据求解 $I_5=-0.96\text{A}$ 。

3.3 网孔电流法

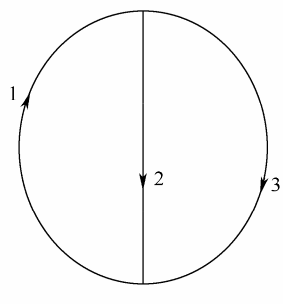
网孔电流法以网孔电流为未知数，由 KVL 定律列写 $l=b-(n-1)$个关于网孔电流的独立方程，然后联立求解网孔电流，并由此求出各支路电流的方法。比支路电流法少 n−1 个方程，从而简化分析计算。适用于平面电路节点多、网孔少的情况。

3.3.1 网孔电流的概念

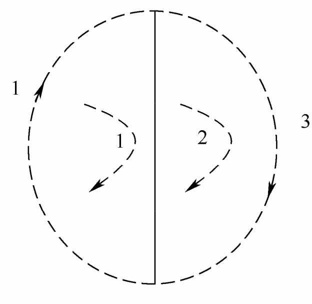
已知电路元件及参数，求解各支路电流或电压，电路如图 3.8（a）所示，如果用支路电流法求解，回路选顺时针绕向。



（a）



（b）



（c）

图 3.8 网孔电流法

由 KCL 定律对节点①：

$$-I_1+I_2+I_3=0 \tag{3-1}$$

由 KVL 定律对回路 1：

$$I_1R_1 + I_2R_2 = u_{S1} - u_{S2} \tag{3-2}$$

对回路 2：

$$-I_2R_2 + I_3R_3 = u_{S2} - u_{S3} \tag{3-3}$$

由（3-1）得：$I_2 = I_1 - I_3$，代入（3-2）、（3-3）得：

$$\left.\begin{aligned} I_1R_1 + (I_1 - I_3)R_2 = u_{S1} - u_{S2} \\ -(I_1 - I_3)R_2 + I_3R_3 = u_{S2} - u_{S3} \end{aligned}\right\}$$

整理：

$$\left.\begin{aligned} I_1(R_1 + R_2) - R_2I_3 = u_{S1} - u_{S2} \\ -I_1R_2 + (R_2 + R_3)I_3 = u_{S2} - u_{S3} \end{aligned}\right\} \tag{3-4}$$

（3-4）式可以这样考虑，假设网孔 1 流过电流 $I_{m1} = I_1$，网孔 2 流过电流 $I_{m2} = I_3$，则支路 1 流过电流 I_{m1}，支路 3 流过电流 I_{m2}，支路 2 流过电流为 $I_{m1} - I_{m2}$，式（3-4）由式（3-1）代入（3-2）、（3-3）得到，故（3-4）中 KCL 定律自行满足。

3.3.2　网孔电流方程独立性讨论

从图论的观点分析，如图 3.8 所示。由上面分析可知：①设连通图如图 3.8（b）所示，选 2 为树支，则 1、3 为连支，连支流过的电流即为网孔电流，而树支流过的电流为网孔电流的代数和，因而在列写 l 个 KVL 方程时 KCL 方程已自行满足；②网孔是独立的，是单连支回路，故网孔电流方程也为独立方程，网孔数=独立回路数 l，故可由网孔电流方程求解电路。

各支路电流为：非公共支路电流即为网孔电流（该支路设为连支电流），公共支路电流是相邻网孔电流在该支路上的代数和（该支路设为树支电流），所有支路电流均可由网孔电流求出。

3.3.3　网孔电流方程的一般形式

令 $I_1 = I_{m1}$，$I_3 = I_{m2}$，将 I_{m1}、I_{m2} 代入式（3-4）可写为：

$$\begin{cases} (R_1 + R_2)I_{m1} - R_2I_{m2} = u_{S1} - u_{S2} \\ -R_2I_{m1} + (R_2 + R_3)I_{m2} = u_{S2} - u_{S3} \end{cases} \tag{3-5}$$

从式（3-5）可以看出，在列写 l 个 KVL 方程时，KCL 方程已自行满足。联立求解 I_{m1}、I_{m2}，然后求出 I_1、I_2、I_3。

称 $R_{11} = R_1 + R_2$ 为网孔 1 的自电阻，$R_{12} = -R_2$ 为网孔 2 对网孔 1 的互电阻，$R_{21} = -R_2$ 为网孔 1 对网孔 2 的互电阻，$R_{22} = R_2 + R_3$ 为网孔 2 的自电阻，式（3-5）可写为：

$$\begin{cases} R_{11}I_{m1} + R_{12}I_{m2} = \sum u_{S11} \\ R_{21}I_{m1} + R_{22}I_{m2} = \sum u_{S22} \end{cases}$$

网孔电流方程的一般形式为：

$$\begin{cases} R_{11}I_{m1}+R_{12}I_{m2}+\cdots+R_{1m}I_{mm}=u_{S11} \\ R_{21}I_{m1}+R_{22}I_{m2}+\cdots+R_{2m}I_{mm}=u_{S22} \\ \cdots\cdots \\ R_{m1}I_{m1}+R_{m2}I_{m2}+\cdots+R_{mm}I_{mm}=u_{Smm} \end{cases} \tag{3-6}$$

共 m 个网孔电流方程。

式（3-6）可表述为：

本网孔电流×自电阻+相邻网孔电流×互电阻=本网孔中所有电源电压的代数和。

其中：当两个网孔电流在互电阻中流过的方向相同时，互电阻为正；反之为负。电源电压与绕行方向相反为正；相同为负。

自电阻均为正值，网孔电流方向即为电压绕行方向，所以自电阻均为正；互电阻是正还是负，要看相邻网孔电流在互电阻上流向与本网孔电流是否相同，若相同，则为正，因电压顺网孔电流方向为正；反之为负。若选网孔电流均为顺时针（或逆时针），则所有互电阻均为负值。

3.3.4　网孔法步骤

（1）确定各支路电流参考方向。设网孔电流方向，网孔数共为 $l=b-(n-1)$ 个。

（2）列写网孔电流方程。

（3）解方程求出网孔电流。

（4）由网孔电流求出各支路电流。

非公共支路（单连支）电流=网孔电流，公共支路（树支）电流为各网孔电流的代数和。其中与该支路电流方向一致的网孔电流取“+”，反之取“－”。

注意：①当电路中存在电流源与电阻的并联组合时，可以先将其等效变换为电压源与电阻的串联组合，然后再按上述方法写方程；②若电阻与电流源串联，该电流源为无伴电流源，处理方法见后；③平面电路一般选网孔为独立回路，无需再通过确定树来选择独立回路，可以简化分析；④以后列写回路电流方程时，无需再做上面推导，可按一般形式直接列写。

特别地，无伴电流源及无伴受控电流源，其端电压为未知量，列写方程时增加一个未知量，就需要建立一个新方程，即建立电流源所在支路电流与网孔电流的关系式，使方程数等于未知量个数，从而才能求解方程。电路中若不含无伴电流源及受控源，则网孔电流方程组的系数行列式是一个对称矩阵，由此可以检验方程是否正确。

例 3-2　电路如图 3.9 所示，$R_1=R_2=10\Omega$，$R_3=4\Omega$，$R_4=R_5=8\Omega$，$R_6=2\Omega$，$u_{S3}=20\text{V}$，$u_{S6}=40\text{V}$，用网孔法求解电流 I_5。

解：选网孔电流为 I_{m1}、I_{m2}、I_{m3}，方向如图 3.9 所示。

由网孔电流法列方程如下：

$$\begin{cases}(R_1+R_2+R_3)I_{m1}-R_2I_{m2}-R_3I_{m3}=u_{S3}\\-R_2I_{m1}+(R_2+R_4+R_6)I_{m2}-R_4I_{m3}=u_{S6}\\-R_3I_{m1}-R_4I_{m2}+(R_3+R_4+R_5)I_{m3}=-u_{S3}\end{cases}$$

代入数据，解得：$I_{m3}=0.96\text{A}$

则 $I_5=-I_{m3}=-0.96\text{A}$

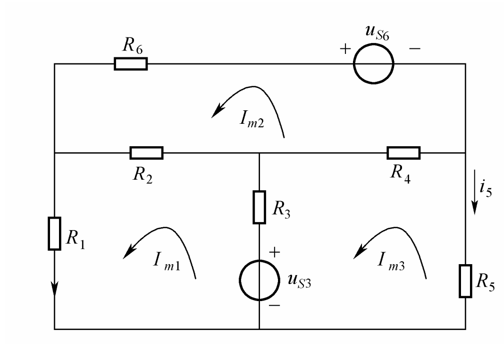


图 3.9　例 3-2 的图

3.4　回路电流法

回路电流法是以回路电流为未知数，列写一组 $l=b-(n-1)$ 个独立的 KVL 方程，然后求解电路的方法。适用于平面或非平面电路，比支路电流法少列 n−1 个 KCL 方程。

3.4.1　回路电流的概念

上节网孔电流法假设网孔流过电流列写关于网孔电流的 KVL 方程，由于网孔是独立回路，所以网孔电流是独立变量，列写的网孔电流方程也是独立的，从而可以求解网孔电流。本节假设每个回路中流过电流，为使方程是独立方程，所选回路为单连支回路，假设该回路中流过的电流为回路电流，则连支电流即为回路电流。

3.4.2　关于回路电流方程独立性的讨论

由于单连支回路是独立回路，每个连支电流也是独立变量，不受其他回路电流即单连支回路电流制约，由连支回路组列写的关于连支电流即回路电流的 KVL 方程组也是独立方程组。

由图论知，对于 n 个节点 b 条支路的电路其连支数 l =独立回路数=$b-(n-1)$ 个，连支流过回路电流，树支电流是流过该树支的所有回路电流即单连支电流的代数和，可由连支电流求出，故体现了 KCL 定律的制约关系，是非独立电流，共

有 $n-1$ 个。由此所有支路电流可由 l 个回路电流表示，列回路电流方程时，因可以用回路电流表示树支电流，已满足 KCL 方程，故只需列 l 个 KVL 方程即可。

3.4.3 回路电流方程的一般形式

电路如图 3.10（a）所示，3.10（b）为该电路的图，选 2、3、4 为树支，1、5、6 为连支，i_{l1}、i_{l2}、i_{l3} 为连支电流，如图 3.10（c）、（d）、（e）、（f）所示。

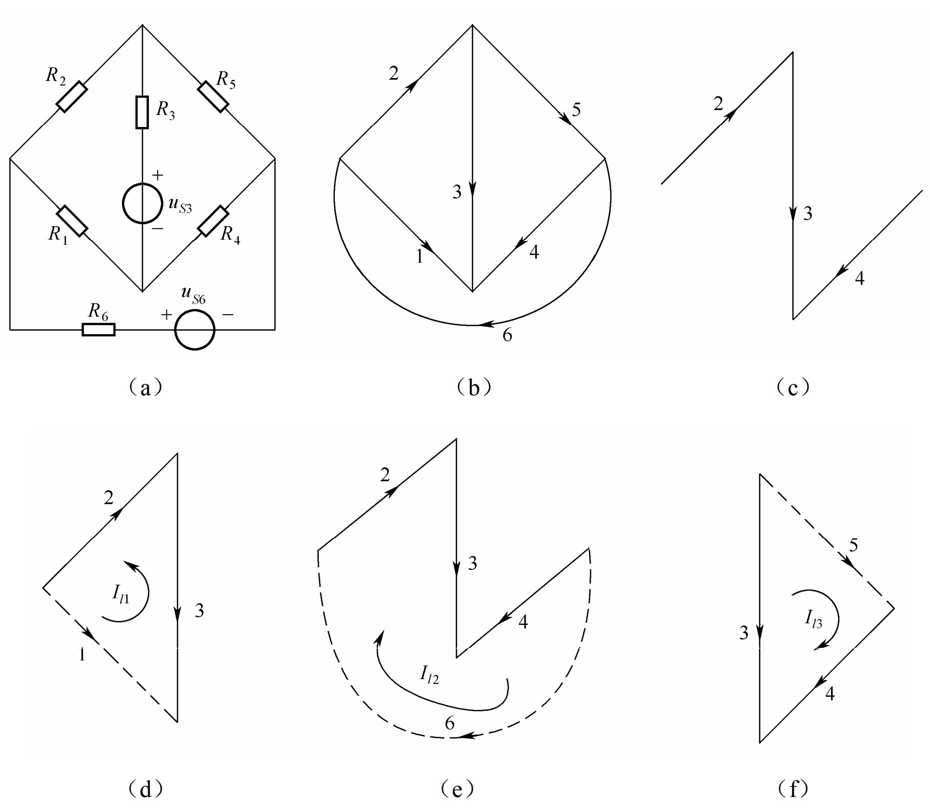


图 3.10 回路电流法

则连支电流 $I_1=I_{l1}$，$I_5=I_{l3}$，$I_6=I_{l2}$，树支电流 $I_2=-I_{l1}+I_{l2}$，$I_3=-I_{l1}+I_{l2}-I_{l3}$，$I_4=-I_{l2}+I_{l3}$。树选择的不同，则树支数和连支数也各不相同，而计算结果树支电流和连支电流也不一定相同，但各支路电流是一样的。

由 KVL 定律，对于回路 1、回路 2、回路 3 列写方程如下：

$$\begin{cases}(R_1+R_2+R_3)I_{l1}-(R_2+R_3)I_{l2}+R_3I_{l3}=u_{S3}\\-(R_2+R_3)I_{l1}+(R_2+R_3+R_4+R_6)I_{l2}-(R_3+R_4)I_{l3}=u_{S6}-u_{S3}\\R_3I_{l1}-(R_3+R_4)I_{l2}+(R_3+R_4+R_5)I_{l3}=u_{S3}\end{cases}\tag{3-7}$$

求解 I_{l1}、I_{l2}、I_{l3}，即可求出 $I_1\sim I_6$ 支路电流。

设 $R_{11}=R_1+R_2+R_3$， $R_{12}=R_{21}=-(R_2+R_3)$， $R_{13}=R_{31}=R_3$， $R_{22}=R_2+R_3+R_4+R_6$， $R_{23}=R_{32}=-(R_3+R_4)$， $R_{33}=R_3+R_4+R_5$，其中 R_{11}、 R_{22}、 R_{33} 称为自电阻，其余为互电阻，如 $R_{21}=-(R_2+R_3)$，是相邻回路 1 的电流流过回路 2 的互电阻 R_2+R_3 时产生的电压，与回路 2 电流方向即 KVL 方程的绕行方向相反，故为“−”号。

自电阻均为正的，互电阻的正或负要看相邻回路电流在公共支路的电阻上产生的电压，是否与本回路电流方向一致，若一致则为“+”，反之为“−”。说明回路电流方向代表了 KVL 方程的绕行方向。

从上式（3-7）可以看出 KCL 定律在其内自行满足。对回路 2 有：

$$R_2(-I_{l1}+I_{l2})+R_3(I_{l2}-I_{l3}-I_{l1})+R_4(I_{l2}-I_{l3})+R_6I_{l2}=u_{S6}-u_{S3}$$

用支路电流法列写方程为：

$$R_2I_2+R_3I_3+R_4I_4+R_6I_6=u_{S6}-u_{S3}$$

与支路电流法比较，在列写回路 2 的 KVL 方程时，用到了 KCL 定律。$I_2=-I_{l1}+I_{l2}$， $I_3=-I_{l1}+I_{l2}-I_{l3}$， $I_4=I_{l2}-I_{l3}$，故 KCL 方程在其中自行满足，比支路电流法少列 n－1 个 KCL 方程。

回路电流方程的一般形式为：

$$\begin{cases}R_{11}I_{l1}+R_{12}I_{l2}+\cdots+R_{1l}I_{ll}=u_{S11}\\R_{21}I_{l1}+R_{22}I_{l2}+\cdots+R_{2l}I_{ll}=u_{S22}\\\cdots\\R_{l1}I_{l1}+R_{l2}I_{l2}+\cdots+R_{ll}I_{ll}=u_{Sll}\end{cases}\qquad(3\text{-}8)$$

其中 R_{11}，R_{22}，$\cdots R_{ll}$ 为自电阻，分别为各回路所有电阻之和，R_{12}，R_{13}，$\cdots R_{l(l-1)}$ 为互电阻，是该回路与相邻回路的公共支路上所有电阻之和， $us_{11},us_{22},\cdots us_{ll}$ 为回路 1，2，… l 中所有电压源的代数和，其中与回路电流方向相同的电压源电压取“—”，反之取“+”。

式（3-8）表述为：

本回路自电阻×本回路电流+互电阻×相邻回路电流=本回路上所有电压源的代数和。

注意：①若电路中有电流源和电阻的并联组合，可经过等效变换为电压源和电阻的串联组合；②若电阻与电流源串联，该电流源为无伴电流源，处理方法见后；③以后列写回路电流方程时，无需再做上面推导，可按一般形式直接列写；④电路中若不含受控源及无伴电流源，则回路电流方程组的系数行列式是一个对称矩阵，由此可以检验方程是否正确。

回路电流法步骤：

（1）确定各支路电流方向，作电路的有向图。

（2）选择一种树，确定连支、树支及单连支回路组，标示回路电流方向（即连支电流方向）。

（3）列写 $l = b-(n-1)$ 个回路电流方程。

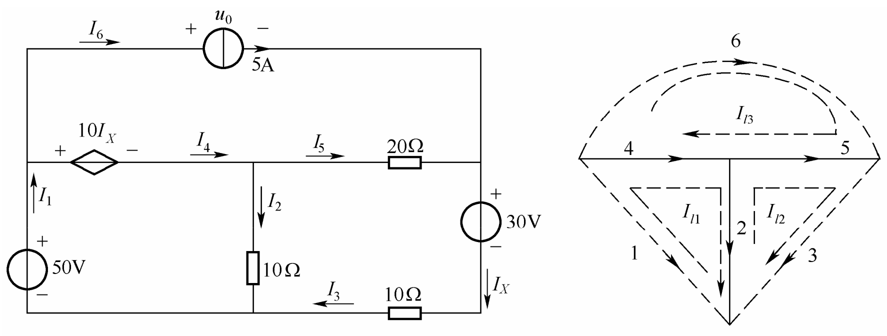
（4）解方程，求出 l 个回路电流。

（5）求各支路电流。连支所在的支路电流等于该连支回路电流；树支所在的支路电流等于流过该树支的所有回路电流代数和，其中与树支方向一致者，回路电流取“+”，反之取“－”。

特别地，对于无伴电流源因其不能转换为电压源的形式处理，可设其端电压作为一个变量列入方程，并增加一个方程，建立无伴电流源所在支路与回路电流的关系式。也可采用简便方法：选无伴电流源所在支路为一连支，尽量避免列写该连支所在回路的回路电流方程。对于无伴受控电流源，建立 CCCS 的控制量电流（或 VCCS 的控制量电压）与回路电流的关系式。对于受控电压源用回路电流表示受控源电压，将其作为电源列于 KVL 方程右边，经整理后将回路电流写于方程左边。

对于平面电路尽量选取网孔作为回路。要注意的是列写回路电流方程，尽管未知量是电流，但方程是以电压为量纲的。

例 3-3 电路如图 3.11（a）所示，$I_S = 5\text{A}$，为无伴电流源，试用回路电流法列出电路的方程。



（a）　　　　　　　　　　　（b）

图 3.11　例 3-3 的图

解：各支路电流如图所示。

选 4、5、2 为树支，则 1、3、6 为连支，各回路电流方向如图 3.12（b）所示。

由回路电流法：

对回路 1　　$10I_{l1} - 10I_{l2} = 50 - 10I_X$　　（1）

对回路 2　　$-10I_{l1} + (10+20+10)I_{l2} - 20I_{l3} = -30$　　（2）

$$I_{l2} = I_X \tag{3}$$

$$I_{l3} = 5 \tag{4}$$

联立（1）（2）（3）（4）求解 I_{l1}、I_{l2}、I_{l3}。

各支路电流 $I_1 = I_{l1}$，$I_2 = I_{l1} - I_{l2}$，$I_3 = I_{l2}$，$I_4 = I_{l1} - I_{l3}$，$I_5 = I_{l2} - I_{l3}$，

$I_6 = I_{l3} = 5\text{A}$ 。

上面分析中，把元件电流源 $I_S = 5\text{A}$ 所在支路选为一个连支，避开列写连支 6 所在回路 3 的回路电流方程，而受控电压源$10I_X$用回路电流表示，其作为电压源列于等式右边。

另一解法：也可设 5A 无伴电流源的电压为 u_0 ，如图 3.11（a）所示，树支和连支选择与上面相同。

列写方程如下：

$$\begin{cases} 10I_{l1} - 10I_{l2} = 50 - 10I_X \\ -10I_{l1} + (10+20+10)I_{l2} - 20I_{l3} = -30 \\ -20I_{l2} + 20I_{l3} = -u_0 + 10I_X \\ I_{l2} = I_X \\ I_{l3} = 5 \end{cases}$$

3.5　节点电压法

节点电压法是以节点电压为未知量，列写 $n-1$ 个独立节点的 KCL 方程，然后求解电路的方法。适用于平面及非平面电路节点少、回路多的情况，比支路电流法少列 l 个方程。

3.5.1　节点电压的概念

我们知道电压与电位参考点的选取无关。每一支路连于两个节点之间，而支路电压即两节点电位之差，若选其中某一节点电位为参考电位，设为零电位，则另一节点到该点的电位即为节点电位，该节点电位也即支路电压大小。故节点电位也称为节点电压。所谓节点电压是指独立节点与参考点的电位之差。所有支路电压均可通过 KVL 方程建立与节点电位的关系，用节点电压表示，进而可表示所有支路电流。节点用①，②，③……等表示，节点电压用 u_{n1}、u_{n2}、u_{n3}、u_{n4}……等表示。

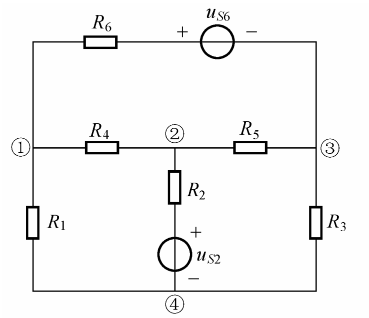
电路如图 3.12 所示，设节点④为参考节点，$u_{n4} = 0$ ，则节点①，②，③为独立节点，则有：

$$u_1 = u_{n1} - u_{n4} = u_{n1}，\ u_2 = u_{n2} - u_{n4} = u_{n2}，\ u_3 = u_{n3} - u_{n4} = u_{n3}$$

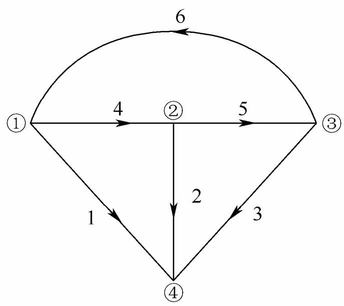
由 KVL 方程：

$$\begin{aligned} u_4 + u_2 - u_1 = 0 &\qquad u_4 = u_1 - u_2 = u_{n1} - u_{n2} \\ -u_2 + u_3 + u_5 = 0 &\qquad u_5 = u_2 - u_3 = u_{n2} - u_{n3} \\ -u_1 + u_3 + u_6 = 0 &\qquad u_6 = u_1 - u_3 = u_{n1} - u_{n3} \end{aligned}$$

由上可知，各支路电压 $u_1 \sim u_6$ 均可由节点电压表示，在此过程中，KVL 定律自行满足，所有支路电压由节点电压表示。列写 $n-1$ 个 KCL 方程时均用节点电压表示，无需再列写 KVL 方程，因此比支路电流法少列 $l=b-(n-1)$ 个方程。



（a）



（b）

图 3.12 节点电压法

3.5.2 n – 1 个节点电压方程独立性讨论

前面已分析对于 b 条支路 n 个节点的电路，n−1 个 KCL 方程是独立的，由 n−1 个节点电压根据 VCR 关系表示各支路电流，所列 KCL 方程也是独立的，而 $l=b-(n-1)$个支路电压是非独立的，可由 n−1 个节点电压（支路电压）求得，而独立节点数恰好是 n−1 个，故可用独立的节点电压（电位）作为独立变量表示 $b-(n-1)$ 个支路电压。

3.5.3 节点电压方程的一般形式

用 $n-1$个 KCL 方程求解电流，通过元件 VCR 关系式（有源支路欧姆定律或无源支路欧姆定律），用节点电压表示各支路电流，然后代入 $n-1$个 KCL 方程中，则 $n-1$个 KCL 方程就成为关于节点电压的方程。

由 VCR 关系可用节点电压表示各支路电流。

$$
\begin{aligned}
I_1 &= \frac{U_{n1}}{R_1} \\
I_2 &= \frac{U_2}{R_2} = \frac{U_{n2}-U_{S2}}{R_2} \\
I_3 &= \frac{U_{n3}}{R_3} \\
I_4 &= \frac{U_4}{R_4} = \frac{U_{n1}-U_{n2}}{R_4} \\
I_5 &= \frac{U_5}{R_5} = \frac{U_{n2}-U_{n3}}{R_5} \\
I_6 &= \frac{U_6+U_{S6}}{R_6} = \frac{U_{n3}-U_{n1}+U_{S6}}{R_6}
\end{aligned}
\tag{3-9}
$$

由 KCL 定律，对节点①、节点②、节点③列写方程如下：

$$
\begin{cases}
I_1 + I_4 - I_6 = 0 \\
I_2 - I_4 + I_5 = 0 \\
I_3 - I_5 + I_6 = 0
\end{cases}
\tag{3-10}
$$

将式（3-9）代入式（3-10）中，得：

$$
\begin{cases}
\dfrac{U_{n1}}{R_1} + \dfrac{U_{n1} - U_{n2}}{R_4} - \dfrac{U_{n3} - U_{n1} + U_{S6}}{R_6} = 0 \\
\dfrac{U_{n2} - U_{S2}}{R_2} - \dfrac{U_{n1} - U_{n2}}{R_4} + \dfrac{U_{n2} - U_{n3}}{R_5} = 0 \\
\dfrac{U_{n3}}{R_3} - \dfrac{U_{n2} - U_{n3}}{R_5} + \dfrac{U_{n3} - U_{n1} + U_{S6}}{R_6} = 0
\end{cases}
\tag{3-11}
$$

整理得：

$$
\begin{cases}
\left(\dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_4} + \dfrac{1}{R_6}\right) U_{n1} - \dfrac{1}{R_4} U_{n2} - \dfrac{1}{R_6} U_{n3} = \dfrac{U_{S6}}{R_6} \\
-\dfrac{1}{R_4} U_{n1} + \left(\dfrac{1}{R_2} + \dfrac{1}{R_4} + \dfrac{1}{R_5}\right) U_{n2} - \dfrac{1}{R_5} U_{n3} = \dfrac{U_{S2}}{R_2} \\
-\dfrac{1}{R_6} U_{n1} - \dfrac{1}{R_5} U_{n2} + \left(\dfrac{1}{R_3} + \dfrac{1}{R_5} + \dfrac{1}{R_6}\right) U_{n3} = -\dfrac{U_{S6}}{R_6}
\end{cases}
\tag{3-12}
$$

写成电导形式：

$$
\begin{cases}
(G_1 + G_4 + G_6) U_{n1} - G_4 U_{n2} - G_6 U_{n3} = G_6 U_{S6} \\
-G_4 U_{n1} + (G_2 + G_4 + G_5) U_{n2} - G_5 U_{n3} = G_2 U_{S2} \\
-G_6 U_{n1} - G_5 U_{n2} + (G_3 + G_5 + G_6) U_{n3} = -G_6 U_{S6}
\end{cases}
\tag{3-13}
$$

令 $G_{11} = G_1 + G_4 + G_6 \qquad G_{12} = -G_4 = G_{21} \qquad G_{13} = -G_6 = G_{31}$

$G_{22} = G_2 + G_4 + G_5 \qquad G_{23} = -G_5 = G_{32} \qquad G_{33} = G_3 + G_5 + G_6$

其中G_{11}、G_{22}、G_{33}称为自电导，等于连于本节点上所有电阻倒数之和；其余为互电导，是本节点与相邻节点的公共支路上电阻倒数之和。自电导都是正的，因为本节点对参考点为正电位，连于本节点所有支路电流均向外流出，互电导均是负的，因为相邻节点对本节点的电位差使该支路电流流向本节点。

节点电压方程的一般形式为：

$$
\begin{cases}
G_{11} U_{n1} + G_{12} U_{n2} + \cdots + G_{1(n-1)} U_{n\ (n-1)} = I_{S11} \\
\cdots\cdots \\
G_{(n-1)} U_{n1} + G_{(n-2)2} U_{n2} + \cdots + G_{(n-1)\ (n-1)} U_{n\ (n-1)} = I_{S\ (n-1)\ (n-1)}
\end{cases}
\tag{3-14}
$$

共列写$n-1$个节点电压方程。

式（3-14）表述为：

本节点电压×自电导+相邻节点电压×互电导=汇于本节点所有电流源的代数和

其中指向本节点的电流源为“+”，反之为“－”。有伴电压源电压方向背离本

节点者为“+”，反之为“－”。

注意：①若电路中有电压源和电阻的串联组合，可经过等效变换为电流源与电阻的并联组合；②若电阻与电压源并联，该电压源为无伴电压源，处理方法见后；③以后列写节点电压方程时，无需再推导，可按一般形式直接写出。④尽管节点电压是未知量，节点电压方程中方程式各量纲为电流；⑤电路中不含受控源和无伴电压源，则上述方程的系数行列式为对称矩阵。

弥尔曼定律：对于两个节点多个回路的电路（如图 3.13 所示）。

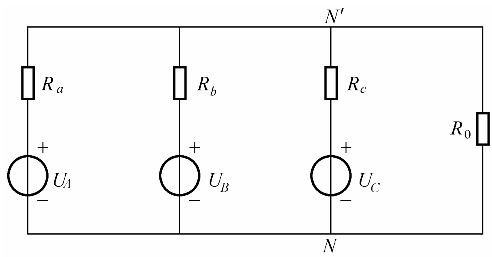


图 3.13　弥尔曼定律

用节点电压法写出方程：

$$U_{N'N}=\frac{G_aU_A+G_bU_B+G_cU_C}{G_a+G_b+G_c+G_0} \tag{3-15}$$

式（3-15）称为弥尔曼定律。

其中 $G_0=\frac{1}{R_0}$，$G_a=\frac{1}{R_a}$，$G_b=\frac{1}{R_b}$，$G_c=\frac{1}{R_c}$。

节点电压法的步骤：

（1）确定各支路电流的参考方向。

（2）选取参考节点和 $(n-1)$ 个独立节点，并标号①，②……。

（3）列写 $n-1$ 个节点电压方程。

（4）解方程求出节点电压。

（5）求各支路电压。

最后可由 KCL 定律验证结果的正确性。

参考节点的选取是任意的，余下的 $n-1$ 个节点则是独立节点，独立与非独立是相对而言的，一般选公共支路交叉多的节点作为参考点，可简化分析。

特别地，无伴电压源因电压源支路没有串联电阻，不能转换为电流源并联形式，因此对于无伴电压源及无伴受控电压源的处理，可增设一个新的未知电流变量，同时增加一个新方程，建立节点电压与无伴（受控）电压源的关系。使方程数与未知量个数相同，才能解出方程。也可采用简便方法，对于无伴电压源及无伴受控电压源，尽量避免列写其所连节点的节点电压方程，并增加一个新方程，建立节点电压与无伴电压源的关系，或建立节点电压与无伴受控电压源电压的关

系式。对于无伴受控电流源则要建立节点电压与受控电流源电流的关系式。

例 3-4 用节点电压法求图 3.14 电路中的电流 I_2、I_3。

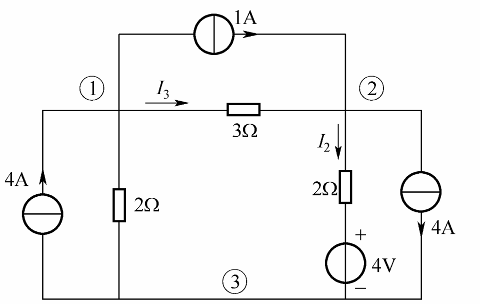


图 3.14 例 3-4 的图

解：电路如图 3.14 所示。选节点③为参考节点，①、②为独立节点，设U_{n1}、U_{n2}为节点电压。

由节点电压法，写出节点电压方程如下：

$$\begin{cases}\left(\frac{1}{2}+\frac{1}{3}\right)U_{n1}-\frac{1}{3}U_{n2}=3\\-\frac{1}{3}U_{n1}+\left(\frac{1}{3}+\frac{1}{2}\right)U_{n2}=-1\end{cases}$$

整理得$\begin{cases}5U_{n1}-2U_{n2}=18\\-5U_{n1}+5U_{n2}=-6\end{cases}$

解方程得$U_{n1}=\frac{78}{21}\text{V}$ $\quad U_{n2}=\frac{6}{21}\text{V}$ $\quad I_3=\frac{U_{n1}-U_{n2}}{3}=\frac{24}{21}\text{A}$

$$I_2=\frac{U_{n2}-4}{2}=\frac{\frac{6}{21}-4}{2}=-\frac{39}{21}\text{A}$$

经验证满足①、②节点 KCL 定律。

例 3-5 用节点电压法列写图 3.15 所示电路的方程。

解：电路如图 3.15 所示。设$U_{n4}=0$，选①、②、③为独立节点。

由节点电压法，列写②、③节点方程如下：

$$\begin{cases}-\frac{1}{24}U_{n1}+\left(\frac{1}{24}+\frac{1}{32}+\frac{1}{8}\right)U_{n2}-\frac{1}{8}U_{n3}=0\\-\frac{1}{8}U_{n2}+\frac{1}{8}U_{n3}=0.15-0.5U_X\\U_X=U_{n2}\\U_{n1}=20\end{cases}$$

电压源 20V 为无伴电压源，避开列写节点①的 KVL 方程。

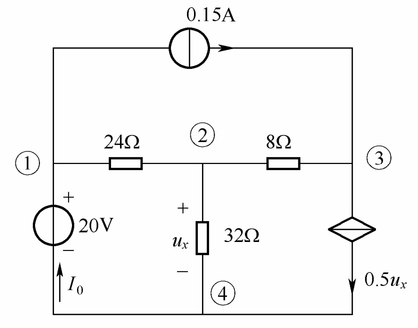


图 3.15　例 3-5 的图

方法二：设 20V 电压源流过电流为 I_0，列写①，②，③节点方程。

$$\begin{cases}\dfrac{1}{24}U_{n1}-\dfrac{1}{24}U_{n2}=I_0-0.15\\ -\dfrac{1}{24}U_{n1}+\left(\dfrac{1}{24}+\dfrac{1}{32}+\dfrac{1}{8}\right)U_{n2}-\dfrac{1}{8}U_{n3}=0\\ -\dfrac{1}{8}U_{n2}+\dfrac{1}{8}U_{n3}=0.15-0.5U_X\\ U_X=U_{n2}\\ U_{n1}=20\end{cases}$$

例 3-6　用节点电压法求图 3.16 所示电路的电压比值 $\dfrac{u_0}{u_1}$。

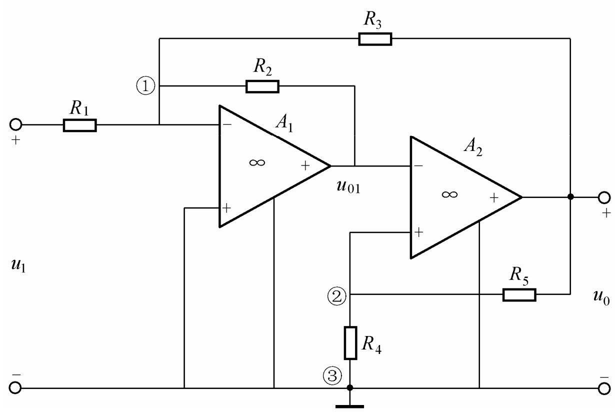


图 3.16　例 3-6 的图

解：用节点电压法。设 $U_{n3}=0$，对节点①列写节点电压方程。

$$\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}\right)u^- - \frac{1}{R_2}u_{01} - \frac{1}{R_3}u_0 = \frac{u_1}{R_1} \tag{1}$$

由运放器的性质：$i^+ = i^- = 0$

$u^+ = u^-$

对运放器 A_1 还有：$u^+ = u^- = 0$

式（1）可写为：

$$-\frac{1}{R_2}u_{01} - \frac{1}{R_3}u_0 = \frac{u_1}{R_1} \tag{2}$$

对运放器 A_2 有：

$$u^+ = u^- = u_{01} = u_{R4} = \frac{R_4}{R_4+R_5}u_0 \tag{3}$$

将式（3）代入（2），整理得：

$$\frac{u_0}{u_1} = -\frac{R_2R_3(R_4+R_5)}{R_1(R_2R_4+R_3R_4+R_2R_5)}$$

方法二：此题还可以用前面（1.7 节）所学的方法求解。

根据运放器的性质：$i^+ = i^- = 0$

$u^+ = u^-$

对运放器 A_1 还有：$u^+ = u^- = 0$ （1）

由 KCL 定律对节点①列写方程：

$$\frac{u_1 - u^-}{R_1} = \frac{u^- - u_{01}}{R_2} + \frac{u^- - u_0}{R_3} \tag{2}$$

对运放器 A_2 有：

$$u^+ = u^- = u_{01} = u_{R4} = \frac{R_4}{R_4+R_5}u_0 \tag{3}$$

将式（1）、（3）代入（2），整理得：

$$\frac{u_0}{u_1} = -\frac{R_2R_3(R_4+R_5)}{R_1(R_2R_4+R_3R_4+R_2R_5)}$$

章节回顾

本章讨论线性时不变电阻电路的分析计算方法，在列方程求解电路时，知道如何列方程和列几个 KCL 方程及 KVL 方程合适。

1．本章学习有关图的知识。为了求解电路中的电流和电压等未知量，在列写电路方程时，应用图的概念选择独立变量，确定列写独立的 KCL 方程及 KVL 方程的个数。若不考虑元件本身的特性，只考虑电路的连接关系即拓扑关系，用一些线段和点组成的图形称为图，它反映了电路的结构及连接性质，应用拓扑约束特性即 KVL 定律、KCL 定律，建立方程组，从而求解未知量，要掌握支路、节点、图与电路中的支路、节点、电路图的区别，掌握有向图、连通图、回路、树、树支、连支、单连支回路、网孔、平面电路的概念。

电路中支路和节点与电路的图中的树支与连支关系：

b 条支路中，树支数$(n-1)$个，从而确定独立 KCL 方程的个数；连支 l 个，确定独立 KVL 方程个数。

支路数 $b=$ 树支数$(n-1)$+连支数 l

树支数=节点数 $n-1$

连支数 l =独立回路数=网孔数=$b-(n-1)$

2．支路电流法和支路电压法是分析电路的基本方法，设电路中支路数 b 为未知量个数，根据 $n-1$ 个 KCL 方程组及 $l=b-(n-1)$个方程组联立求解电路，是本章最简单的方法，但当电路含多个支路时电路方程个数较多，求解过程较麻烦，因而不是最简便的方法。

3．网孔法需要列写 $l=b-(n-1)$个网孔电流方程，比支路电流法少列$(n-1)$个方程，此方法在列方程时 KCL 定律自行满足，因所有支路电流均可用网孔电流表示，适用于回路少、节点多的情况。网孔法适用于平面电路，采用网孔法求解电路时无需作电路的图，直接用网孔法列 m 个网孔电流方程，解方程后再用网孔电流求解各支路电流。

4．回路电流法适用于非平面或平面等任一种电路。需要列写 $l=b-(n-1)$个回路电流方程，比支路电流法少列 $n-1$ 个方程，此方法在列回路电流方程时 KCL 定律自行满足。因所有支路电流均可以用回路电流表示。回路法在分析平面电路及非平面电路时，要作出电路的图，确定树、树支，由若干个树支和一个连支构成单连支回路，从而确定单连支回路组，由此列写 l 个方程求解电路，要注意无伴电流源、无伴受控电流源及受控电压源的处理方法。

5．节点电压法需列写 $n-1$ 个节点电压方程，比支路电流法少列 $l=b-(n-1)$个方程，因在用节点电压表示所有支路电流时 KVL 定律自行满足。适用于节点少、回路多的情况，采用节点电压法时无需作电路的图，解出节点电压后再求出各支路电压及电流。

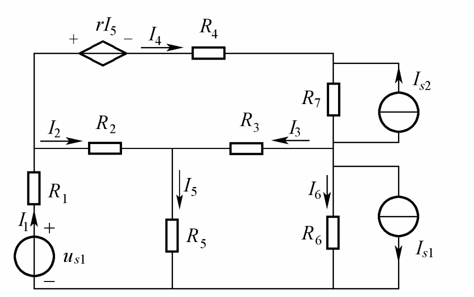
6．无伴电源及无伴受控源的处理方法：

用支路电流法、网孔法及回路法分析电路时，以 KVL 定律为基础列写，当电路中含有无伴电流源及无伴受控电流源时，因不能等效变换为电压源和电阻的串联形式，需增设一个新的未知量电压表示其两端电压，同时增加一个新的方程，即建立该电流源电流与网孔电流或回路电流未知量的关系式；或者设该支路为一连支，避免列写该连支回路方程，同时添加一个新的方程，建立无伴受控电流源或无伴电流源与未知量网孔电流（回路电流）的关系式。

支路电流法、节点电压法以 KCL 方程为基础列写，当电路中含有无伴电压源及无伴受控电压源时，因不能等效变换为电流源和电阻的并联形式，需增设一个新的未知量电流表示通过其电源的电流，同时增加一个新的方程，即建立该电流与节点电压的关系式；或者避免列写该电源所连节点的节点电压方程，并添加一个新方程，即建立无伴电压源或无伴受控电压源与未知量节点电压的关系。

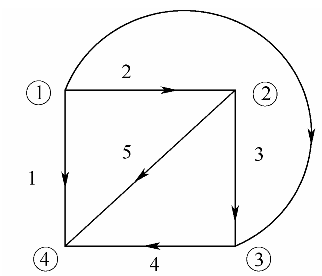
习题

3-1　题 3-1 图示电路标示了电流（电压）的参考方向，画出该电路的图，并求出支路数 b、节点数 n 和基本回路数 l，指出 KCL、KVL 独立方程数为多少？



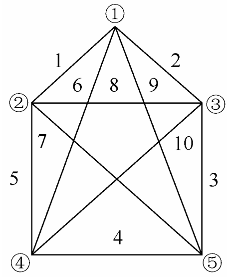
题 3-1 图

3-2　对题 3-2 图示电路画出 4 个不同的树，树支数分别为多少？



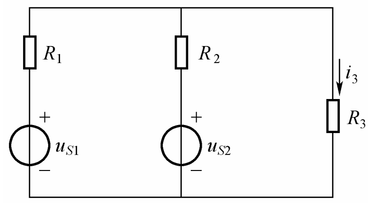
题 3-2 图

3-3　对题 3-3 图示的非平面图，设（1）选择支路（1，2，3，4）为树；（2）选择（5，6，7，8）为树，问独立回路各为多少？求其（独立）基本回路组。



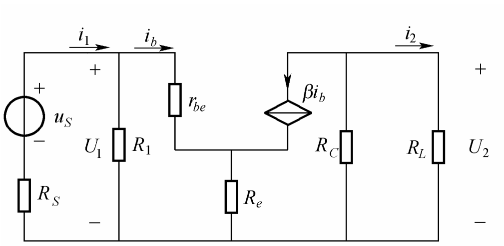
题 3-3 图

3-4　题 3-4 图示电路中，已知 $R_1 = 2\Omega$， $R_2 = 4\Omega$， $R_3 = 20\Omega$， $U_{S1} = 10\text{V}$， $U_{S2} = 20\text{V}$，求电流 i_3，并计算 R_3 的电压和其吸收的功率。



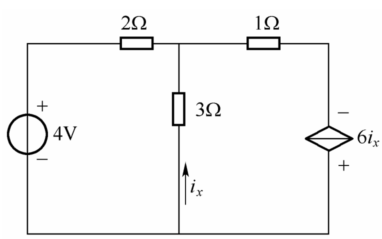
题 3-4 图

3-5　题 3-5 图示电路为晶体管放大器等效电路，各电阻及 β 均为已知，求电流放大倍数 $A_i\left(\dfrac{i_2}{i_1}\right)$ 和电压放大倍数 $A_u\left(\dfrac{u_2}{u_1}\right)$。



题 3-5 图

3-6　用支路电流法求题 3-6 图示电路中的电流 i_x。

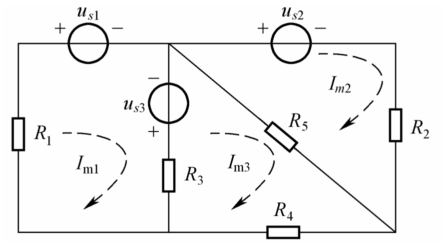


题 3-6 图

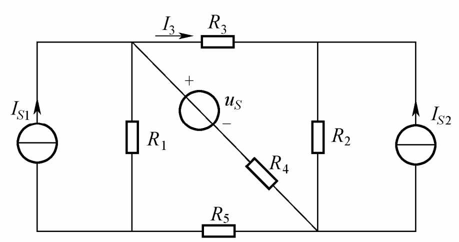
3-7　用网孔法求题 3-4 电路。

3-8　用网孔法列写题 3-8 图示电路中网孔电流方程。

3-9　已知题 3-9 图示电路中， $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 1\Omega$， $u_S = 20\text{V}$， $I_{S1} = 10\text{A}$， $I_{S2} = 5\text{A}$，用网孔法求流过 R_3 的电流 I_3。

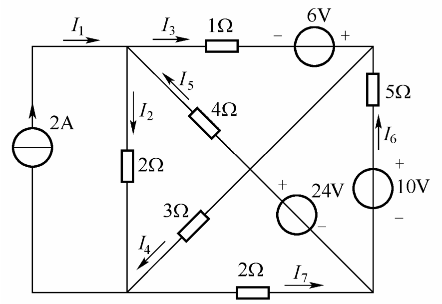


题 3-8 图



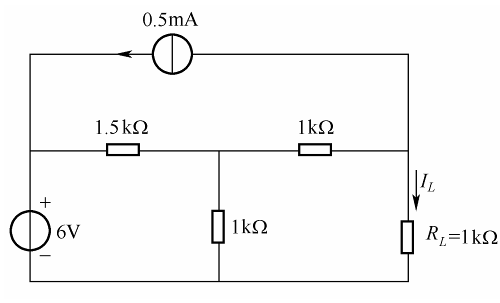
题 3-9 图

3-10　用网孔法列写题 3-10 图示电路的网孔电流方程。



题 3-10 图

3-11　用网孔法求题 3-11 图示电路电阻 R_L 上的电流 I_L。



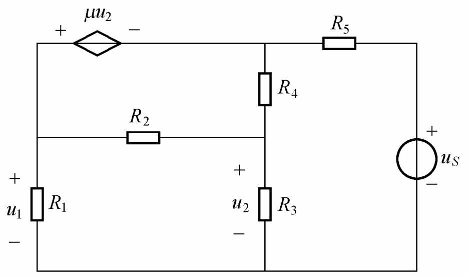
题 3-11 图

3-12　已知 $u_S = 5\text{V}$，$R_1 = R_2 = R_4 = R_5 = 1\Omega$，$R_3 = 2\Omega$，$\mu = 2$。用网孔法求题 3-12 图示电路中 u_1。

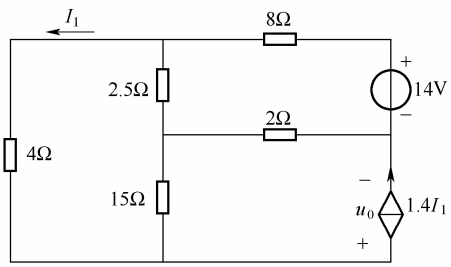
3-13　用回路电流法求题 3-11。

3-14　用回路电流法求解题 3-14 图电路中的电流 I_1 与电压 u_0。

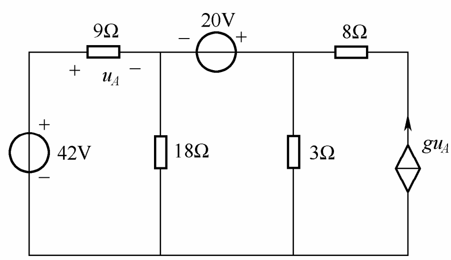
3-15　题 3-15 图示电路，其中 $g = 0.1\text{s}$，用网孔法求流过 8Ω 电阻的电流。



题 3-12 图



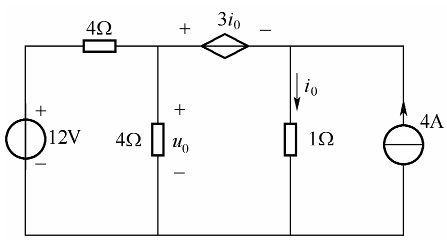
题 3-14 图



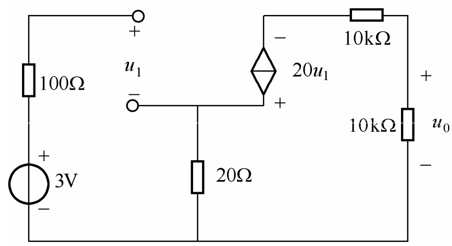
题 3-15 图

3-16　用回路电流法求解题 3-16 图示电路中电压 u_0 和电流 i_0。

3-17　用回路电流法求题 3-17 图示电路中电压 u_0。

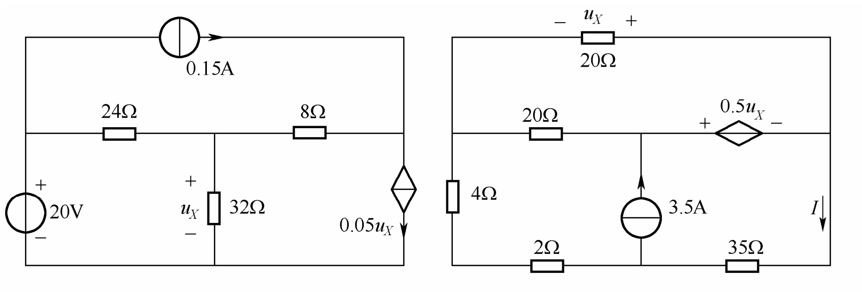


题 3-16 图



题 3-17 图

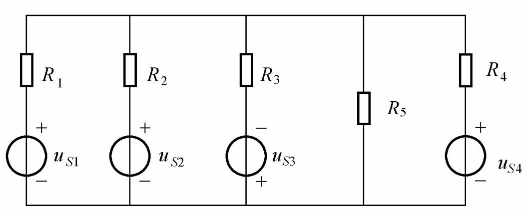
3-18　用回路法求题 3-18 图示电路（a）中 u_X 及（b）中 I。



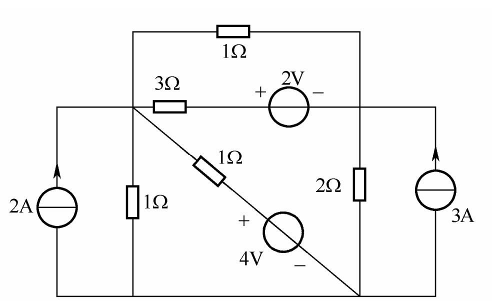
（a）　　　　　　　　　（b）

题 3-18 图

3-19　列出题 3-19 图示电路（a）、（b）的节点电压方程。



（a）



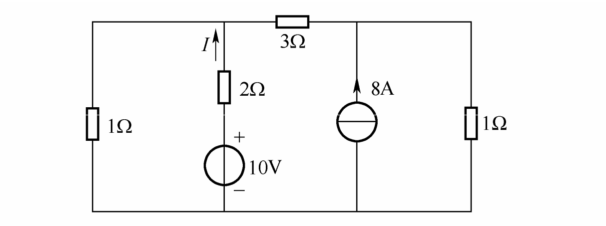
（b）

题 3-19 图

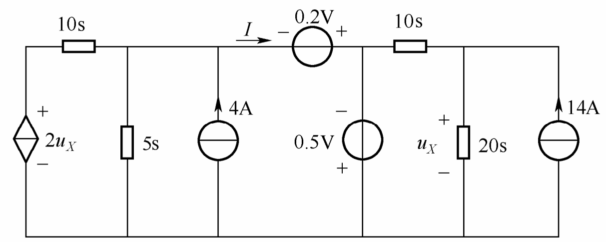
3-20　用节点电压法求题 3-16。

3-21　用节点电压法求题 3-18。

3-22　求题 3-22 图示（a）、（b）电路中电流 I。



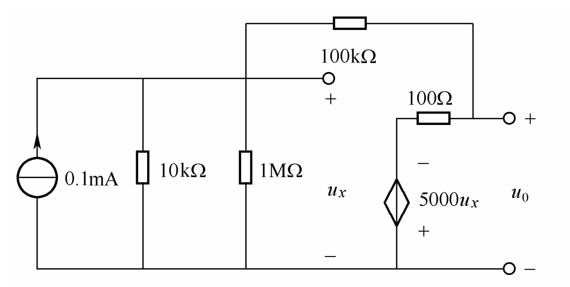
（a）



（b）

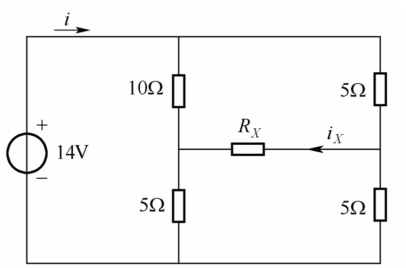
题 3-22 图

3-23　求题 3-23 图示电路中的电压 u_0。



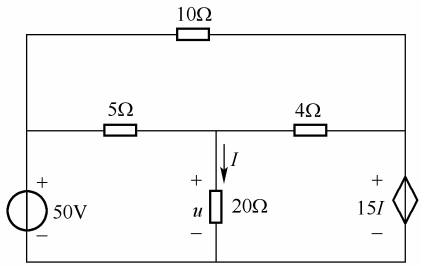
题 3-23 图

3-24　题 3-24 图示电路中，若 $i_X = \dfrac{1}{8}i$，求电阻 R_X 的值。



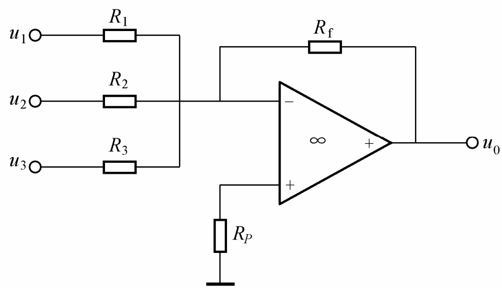
题 3-24 图

3-25　用节点法求题 3-25 图示电路中的电压 u。



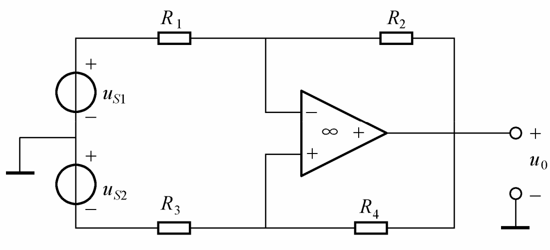
题 3-25 图

3-26　求题 3-26 图示电路 u_0 与 u_1、u_2、u_3 的关系。



题 3-26 图

3-27　求题 3-27 图示电路 u_0 与 u_{S1}、u_{S2} 的关系。



题 3-27 图