第二章

运用独立电流、电压变量的分析方法

2010年9月19日

§2-1网孔分析法

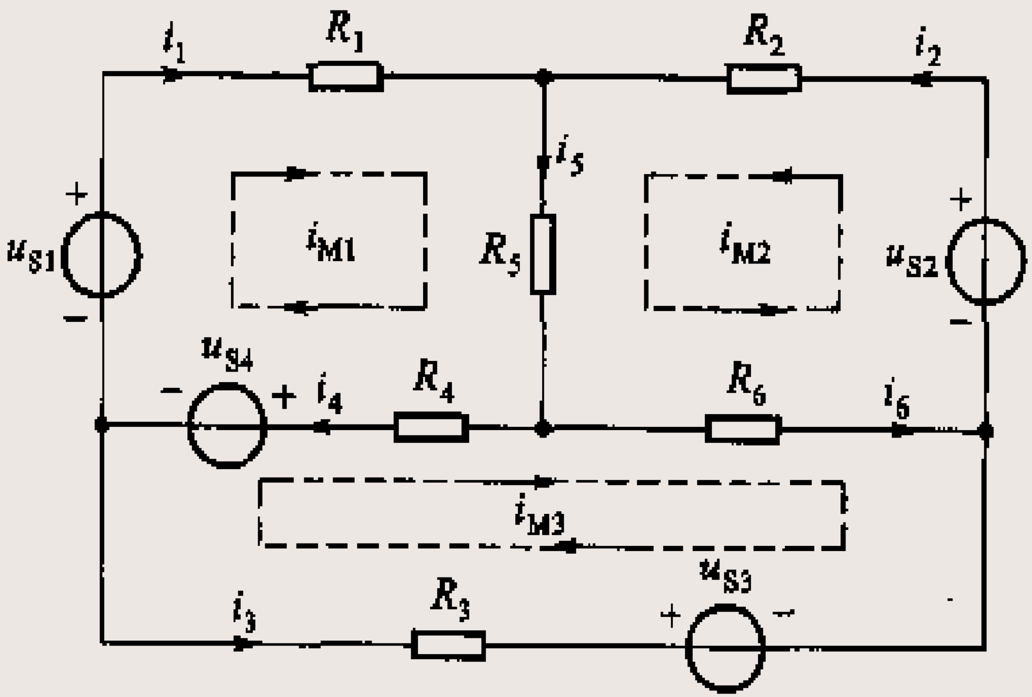
- 在n个节点的电路中, b个支路电流是用$(n-1)$个KCL方程联系的，因而给定$[b-(n-1)]$个电流即能确定余下的$(n-1)$个电流。
- 第一步求解的对象必须为$[b-(n-1)]$个独立电流变量。
- 第二步用KCL解决的$(n-1)$个电流，使问题得到完全解决。
- 使用的网孔电流可以得到一组完备的独立电流变量。

网孔电流

❖ 一个平面电路共有[*b*-(*n*-1)]个网孔，因而也有[*b*-(*n*-1)]个网孔电流。

❖ 网孔电流可作为电路的一组独立电流变量。

❖ 电路中所有的支路电流都可以用网孔电流线性表示。



网孔方程

- 网孔电流不能用KCL相联系，但能根据KVL及支路VAR为每一个网孔列写一个KVL方程，方程中的支路电压可以通过欧姆定律用网孔电流来表示。

$$\left.\begin{array}{c} R_1 i_{M1} + R_5 i_{M1} + R_5 i_{M2} + R_4 i_{M1} - R_4 i_{M3} + u_{S4} - u_{S1} = 0 \\ R_2 i_{M2} + R_5 i_{M2} + R_5 i_{M1} + R_6 i_{M2} + R_6 i_{M3} + u_{S2} = 0 \\ R_3 i_{M3} + R_4 i_{M3} - R_4 i_{M1} + R_6 i_{M3} + R_6 i_{M2} - u_{S4} - u_{S3} = 0 \end{array}\right\}$$

整理得

$$\left.\begin{array}{c} (R_1 + R_4 + R_5) i_{M1} + R_5 i_{M2} - R_4 i_{M3} = u_{S1} - u_{S4} \\ R_5 i_{M1} + (R_2 + R_5 + R_6) i_{M2} + R_6 i_{M3} = u_{S2} \\ -R_4 i_{M1} + R_6 i_{M2} + (R_3 + R_4 + R_6) i_{M3} = u_{S3} + u_{S4} \end{array}\right\}$$

网孔方程一般表达式

$$\left.\begin{aligned} R_{11}i_{M1}+R_{12}i_{M2}+R_{13}i_{M3}&=u_{S11}\\ R_{21}i_{M1}+R_{22}i_{M2}+R_{23}i_{M3}&=u_{S22}\\ R_{31}i_{M1}+R_{32}i_{M2}+R_{33}i_{M3}&=u_{S33}\end{aligned}\right\}$$

- ❖ R_{11}、R_{22}、R_{33}分别称为网孔1、网孔2和网孔3的自电阻。它们分别是各自网孔内所有电阻的总和。
- ❖ R_{12}称为网孔1与网孔2的互电阻。它是该两网孔的公有电阻，即$R_{12}=R_5$。
- ❖ R_{13}称为网孔1与网孔3的互电阻，它取负值，即$R_{13}=-R_4$。因为i_{M1}和i_{M3}以相反的方向流过公有电阻R_4。
- ❖ 其他电阻类推。
- ❖ u_{s11}、u_{s22}和u_{s33}分别为网孔1、网孔2、网孔3中各电压源电压升的代数和。

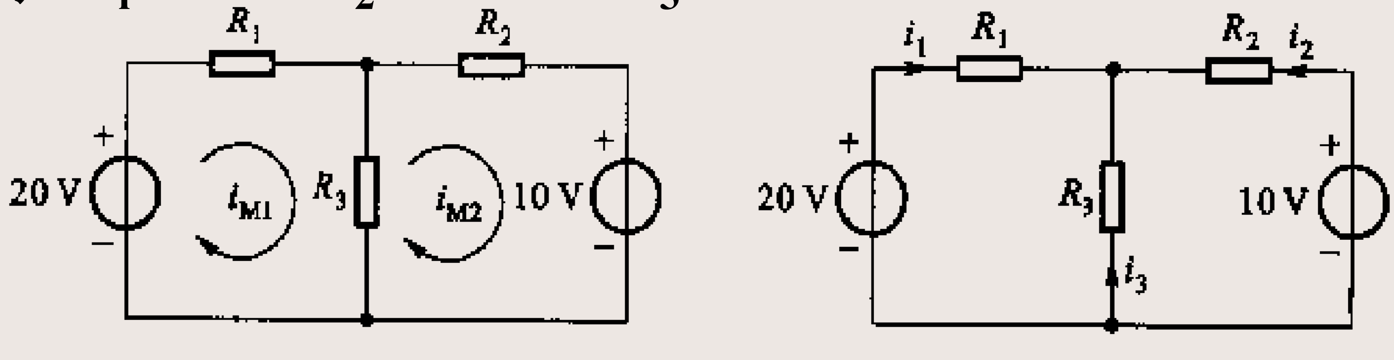
m个网孔的电路网孔方程

❖ 具有m个网孔的电路，网孔方程的形式应为：

$$\left.\begin{aligned}
&R_{11}i_{M1}+R_{12}i_{M2}+\ldots+R_{1m}i_{Mm}=u_{S11}\\
&R_{21}i_{M1}+R_{22}i_{M2}+\ldots+R_{2m}i_{Mm}=u_{S22}\\
&\ldots\ldots\\
&R_{m1}i_{M1}+R_{m2}i_{M2}+\ldots+R_{mm}i_{Mm}=u_{S33}
\end{aligned}\right\}$$

例

用网孔分析法求解电路的各支路电流。
已知R_1=5Ω、R_2 = 10Ω、R_3 = 20Ω。



(a) (b)

解 该电路有2个网孔，假设每一个网孔内网孔电流为i_{M1}和i_{M2}, 并假定它们都是顺时针方向。

第一网孔的自电阻；$R_{11} = R_1 + R_3 = 25\Omega$

第一和第二网孔的互电阻：$R_{12} = R_{21} = -R_3 = -20\Omega$

第二网孔的自电阻：$R_{22} = R_2 + R_3 = 20\Omega$

解答

电源（升压为正，降压为负）：

$$u_{S11} = 20V$$

$$u_{S22} = -10V$$

网孔方程为:

$$25i_{M1} - 20i_{M2} = 20$$

$$-20i_{M1} + 30i_{M2} = -10$$

各支路电流:

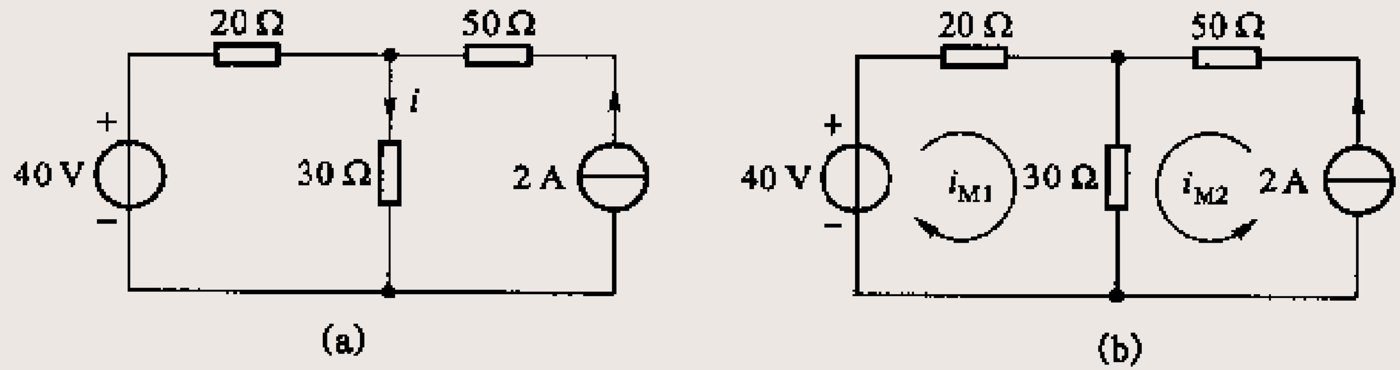
$$i_1 = i_{M1}$$

$$i_2 = -i_{M2}$$

$$i_3 = i_{M2} - i_{M1}$$

例 含电流源情况

试求流经30Ω电阻的电流i。



解 电路含有电流源，其支路电流即为电流源的电流值，因此，流经50Ω电阻的电流等于$2A$，i_{M2}按电流源的方向，$i_{M2}=2A$。只要列出网孔1的方程即可。

$$50\,i_{M1} + 30\,i_{M2} = 40$$

$$i = i_{M1} + i_{M2}$$

例含受控源情况

用网孔法求含受控源电路中的i_x(r=8Ω)。

解 先把受控源当作独立源，按照规则写出网孔方程，再把受控源的控制量用网孔电流表示：

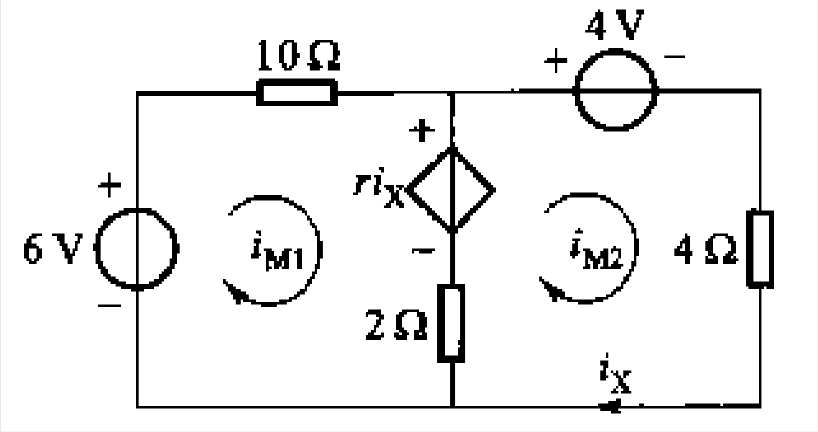
$$12i_{M1}-2i_{M2}=6-ri_X$$

$$-2i_{M1}+6i_{M2}=-4+ri_X$$

$$i_X=i_{M2}$$

$$12i_{M1}+6i_{M2}=6$$

$$-2i_{M1}-2i_{M2}=-4$$



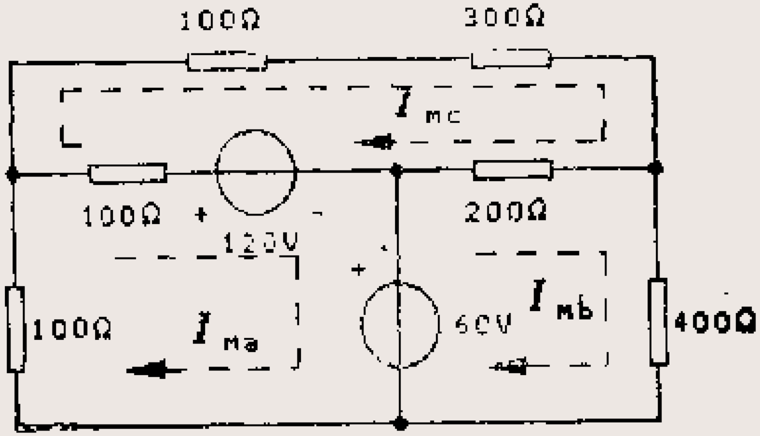
说明

- 网孔电流不是支路电流，网孔电流在网孔中所有支路上是一样的。
- 在含电流源的网孔中，电流源的电流值就是网孔电流，因此可以不再列此网孔方程。
- 对含有受控源的网孔，先将受控源看成独立电源带入网孔方程，再把受控源的控制量用网孔电流表示。

例

试用网孔法求电路中各电压源对电路提供的功率。

解：列方程如下



$$200I_{ma} - 100I_{mc} = -120 - 60$$
$$600I_{mb} - 200I_{mc} = 60$$
$$-100I_{ma} - 200I_{mb} + 700I_{mc} = 120$$

解得

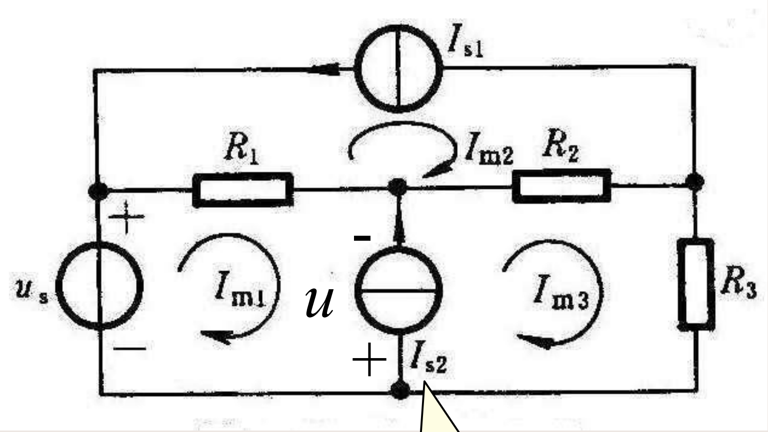
$$I_{ma} = -\frac{6}{7}A$$
$$I_{mb} = \frac{9}{70}A$$
$$I_{mc} = \frac{6}{70}A$$

各电压源提供的功率分别为：

$$P_{120} = 120\times\left(I_{mc} - I_{ma}\right) = 113.1W$$
$$P_{60} = 60\times\left(I_{mb} - I_{ma}\right) = 59.1W$$

练 习 题

电路中，若R_1=1Ω、R_2=3Ω、R_3=4Ω、I_{s1}=0、I_{s2}=8A、U_s=24V，试求各网孔电流。



解：因I_{m2}=-I_{s1}为已知，所以不必列出网控2方程。

$$R_1 I_{m1} - R_1 I_{m2} = u_S + u$$

$$(R_2 + R_3)I_{m3} - R_2 I_{m2} = -u$$

$$I_{m3} - I_{m1} = I_{S2}$$

这个电流源需要假定端电压

代入I_{m2}=0

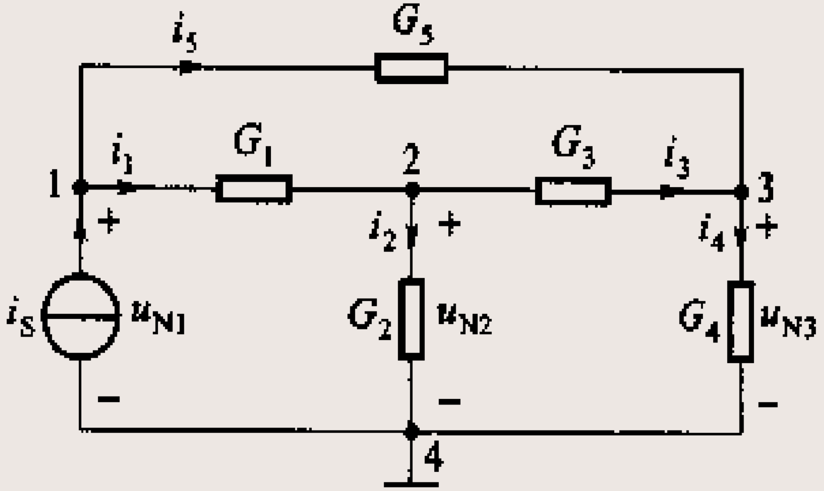
$$I_{m1} - u = 24$$

$$7I_{m3} + u = 0$$

$$I_{m3} - I_{m1} = 8$$

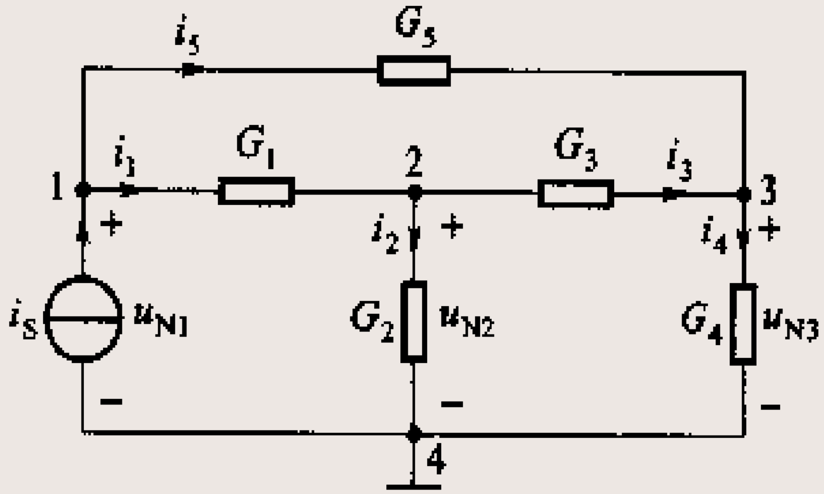
§2-2 节点分析法

- 在电路中任选一个节点为参考点，其余的每一节点到参考点的电压降，就称为这个节点的节点电压。
- 节点电压是一组完备的独立电压变量。一个具有n个节点的电路有$(n-1)$个节点电压。
- 下图所示电路有4个节点，若选节点4为参考节点，则其余3个节点分别对参考节点的电压为u_{N1}、u_{N2}和u_{N3}。



节点电压

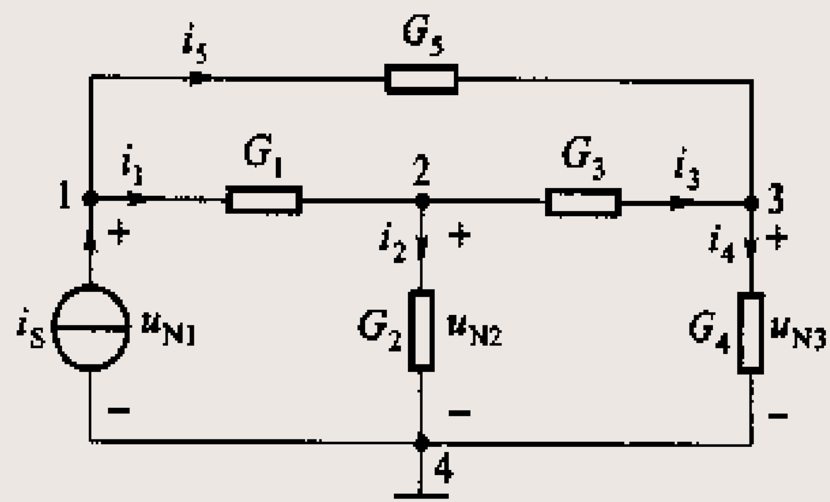
- 电路中所有支路电压都可以用节点电压线性表示。
- 电路中的支路或是接在节点与参考节点之间，或是接在两节点之间。
- 一旦求得了节点电压，所有支路电压就可根据KVL随之而定。
- 因此，节点电压是完备的。



节点方程组

在节点l、2、3运用KCL得:

$$\left.\begin{aligned} i_1 + i_5 - i_8 &= 0 \\ -i_1 + i_2 + i_3 &= 0 \\ -i_3 + i_4 - i_5 &= 0 \end{aligned}\right\}$$



由欧姆定律

$$\left.\begin{aligned} G_1(u_{N1} - u_{N2}) &= i_1 \\ G_2 u_{N2} &= i_2 \\ G_3(u_{N2} - u_{N3}) &= i_3 \\ G_4 u_{N3} &= i_4 \\ G_1(u_{N1} - u_{N3}) &= i_5 \end{aligned}\right\}$$

$$\left.\begin{aligned} (G_1 + G_5)u_{N1} - G_1 u_{N2} - G_5 u_{N3} &= i_S \\ -G_1 u_{N1} + (G_1 + G_2 + G_3)u_{N2} - G_3 u_{N3} &= 0 \\ -G_5 u_{N1} - G_3 u_{N2} + (G_3 + G_4 + G_5)u_{N3} &= 0 \end{aligned}\right\}$$

节点方程组一般形式

- 对于只含独立电源和电阻的电路

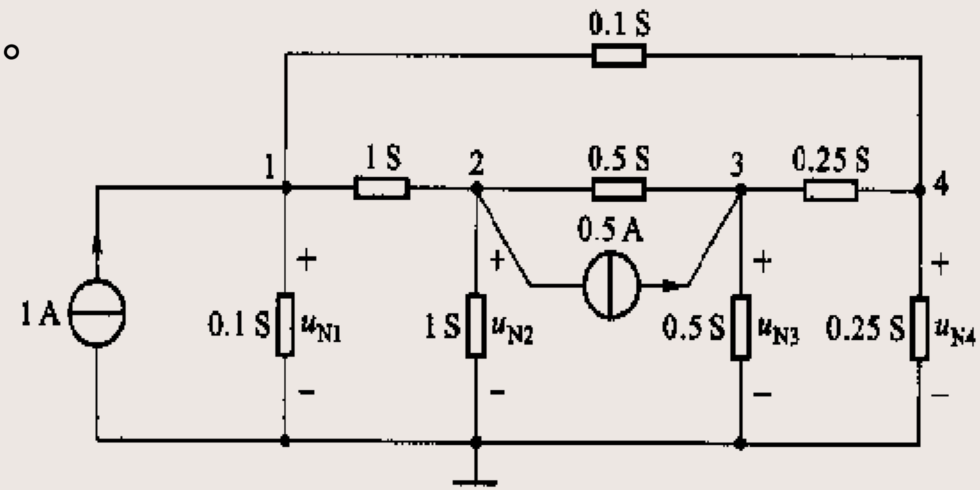
$$
\left.\begin{aligned}
G_{11}u_{N1} + G_{12}u_{N2} + \ldots + G_{1(n-1)}u_{N(n-1)} &= i_{S11} \\
G_{21}u_{N1} + G_{22}u_{N2} + \ldots + G_{2(n-1)}u_{N(n-1)} &= i_{S22} \\
&\cdots\cdots \\
G_{(n-1)1}u_{N1} + G_{(n-1)2}u_{N2} + \ldots + G_{(n-1)(n-1)}u_{N(n-1)} &= i_{S(n-1)(n-1)}
\end{aligned}\right\}
$$

- G_{ii}称为节点i的自电导，其为第i节点上所有电导的总和。
- G_{12}称为节点l和节点2的互电导，它是该两节点间的公有电导的负值，出现负号是由于u_{N1}及u_{N2}都假定为电压降的缘故。
- i_{sii}分别为电流源输送给节点1、2、3的电流的代数和。

例

列出电路的节点方程。

解　该电路共有5个节点，选其中的一个作为参考节点，设其余4个节点的电压分别为u_{N1}、u_{N2}、u_{N3}、u_{N4}。



节点1　$$1.2u_{N1} - u_{N2} - 0.1u_{N4} = 1$$

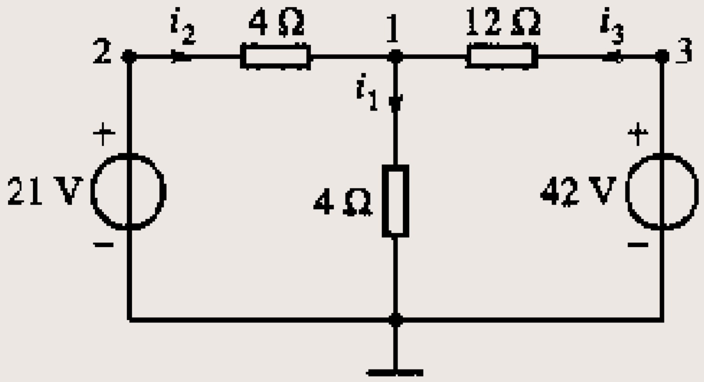
节点2　$$-u_{N1} + 2.5u_{N2} - 0.5u_{N3} = -0.5$$

节点3　$$-0.5u_{N2} + 1.25u_{N3} - 0.25u_{N4} = 0.5$$

节点4　$$-0.1u_{N1} - 0.25u_{N3} + 0.6u_{N4} = 0$$

例 电压源处理

试用节点分析法求电路的各电流。



解 电路中共有三个独立节点，且节点2、3分别与参考节点间接的都是已知的电压源，故节点电压u_{N2}和u_{N3}是已知的，其值分别为21*V*和42*V*。仅需对节点1列写节点方程：

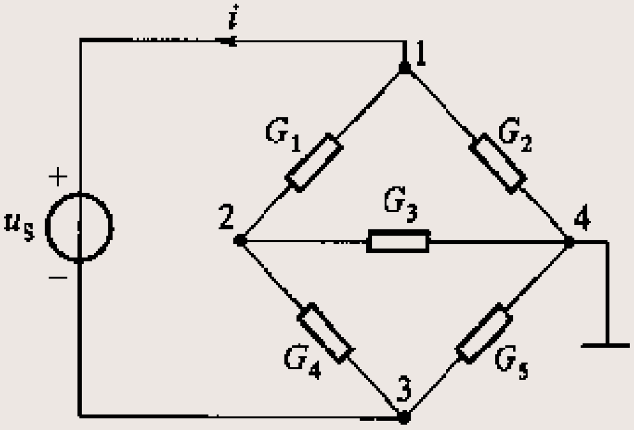
$$\left(\frac{1}{4}+\frac{1}{4}+\frac{1}{12}\right)u_{N1}-\frac{1}{4}u_{N2}-\frac{1}{12}u_{N3}=0$$

带入u_{N2}和u_{N3}

$$\frac{7}{12}u_{N1}-\frac{21}{4}-\frac{42}{12}=0$$

电源跨接在两个节点的情况

- 选节点4为参考点，使之出现电压源接于节点间的情况。
- 在这种情况下，三个节点电压均属未知，故必须对这三个节点都列方程，得：



$$(G_1+G_2)u_{N1}-G_1u_{N2}=-i$$

$$-G_1u_{N1}+(G_1+G_3+G_4)u_{N2}-G_4u_{N3}=0$$

$$-G_4u_{N2}+(G_4+G_5)u_{N3}=i$$

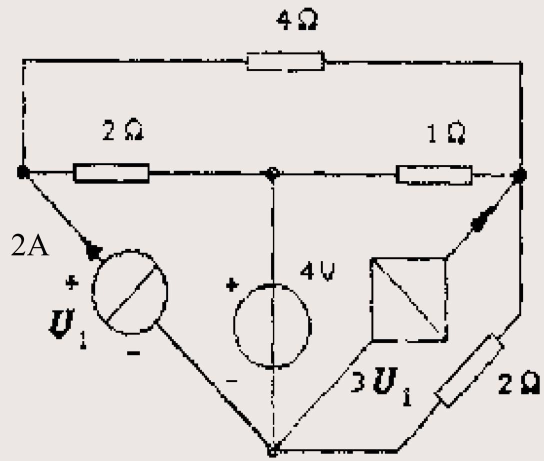
其中i为电压源支路的电流，注意不要忽略。再增加一个方程

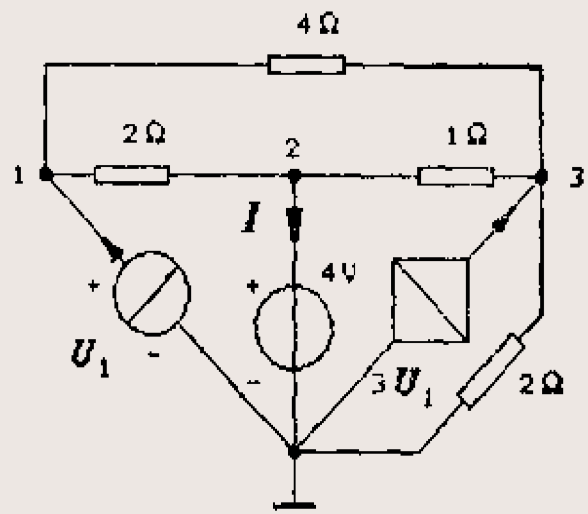
$$u_{N1}-u_{N3}=u_S$$

例 受控源处理

用节点分析法求4Ω电阻的功率。

解：选择参考节点及独立节点如右图，用观察法列出节点分析方程：





节点1
$$\left(\frac{1}{4}+\frac{1}{2}\right)U_1-\frac{1}{2}\times 4-\frac{1}{4}U_3=2$$

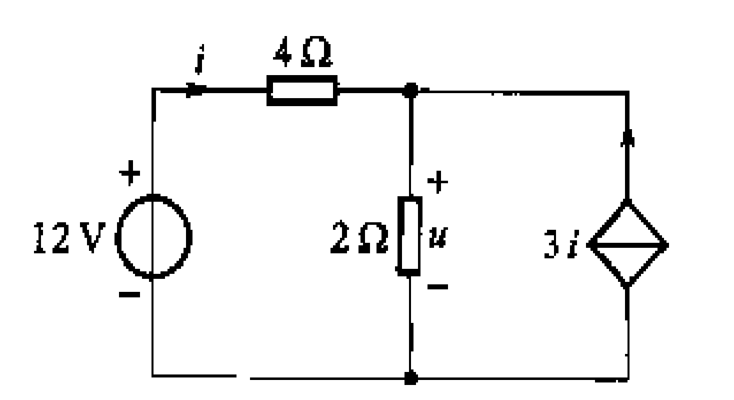
节点3
$$-\frac{1}{4}U_1-1\times 4+\left(1+\frac{1}{4}+\frac{1}{2}\right)U_3=3U_1$$

说明

- 由于各节点电压都一律假定为电压降，因而各互电导都是负值。
- 如果电路的独立节点数少于网孔数，和网孔法相比，节点法联立方程数就少些。
- 如果已知的电源是电流源，则节点分析法更为方便；如果电源为电压源，则网孔分析法较方便。
- 网孔分析法只适用于平面网络，节点分析法则无此限制，因此，节点法更具有普遍意义。
- 把受控电流源暂时看作独立电流源列出方程，再设法把受控源的控制量用节点电压表示。

练 习 题

用节点分析法求电路的u和i。



解：把受控电流源暂时看作独立电流源列出方程：

$$\left(\frac{1}{2}+\frac{1}{4}\right)u-\frac{1}{4}u_s=3i$$

求出i

$$u_s-u=4\times i$$

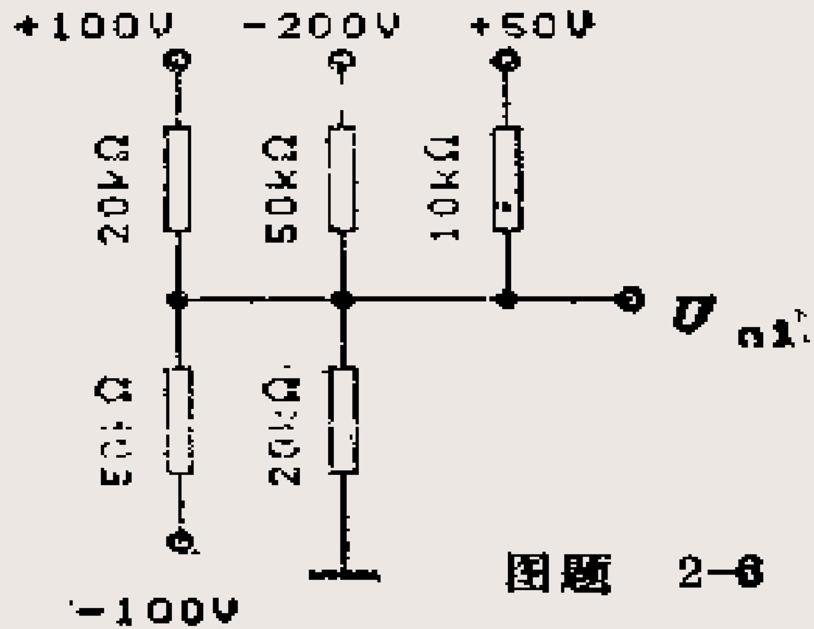
$$\left(\frac{1}{2}+\frac{1}{4}\right)u-\frac{1}{4}u_s=\frac{3}{4}u_s-\frac{3}{4}u$$

$$u=8V$$
$$i=1A$$

习题2-9

求电路的U_{n1}。

解：这个电路共有5个独立节点，但其中4个节点电压力已知量，若求U_{n1}只需列一个节点方程。



图题 2-6

$$U_{n1}\left(\frac{1}{50}+\frac{1}{20}+\frac{1}{50}+\frac{1}{10}+\frac{1}{20}\right)-\frac{100}{20}-\frac{50}{10}+\frac{200}{50}+\frac{100}{50}=0$$

$$U_{n1}=16.67V$$

节点电压定义为电压降

§2-3 电路的对偶性

$$\left.\begin{aligned} R_{11}i_{M1}+R_{12}i_{M2}+\dots+R_{1m}i_{Mm} &= u_{S11} \\ R_{21}i_{M1}+R_{22}i_{M2}+\dots+R_{2m}i_{Mm} &= u_{S22} \\ \dots\dots & \\ R_{m1}i_{M1}+R_{m2}i_{M2}+\dots+R_{mm}i_{Mm} &= u_{Smm} \end{aligned}\right\} \text{网孔方程}$$

$$\left.\begin{aligned} G_{11}u_{N1}-G_{12}u_{N2}-\dots-G_{1(n-1)}u_{N(n-1)} &= i_{S11} \\ G_{21}u_{N1}-G_{22}u_{N2}-\dots-G_{2(n-1)}u_{N(n-1)} &= i_{S22} \\ \dots\dots & \\ G_{(n-1)1}u_{N1}-G_{(n-1)2}u_{N2}-\dots-G_{(n-1)(n-1)}u_{N(n-1)} &= i_{S(n-1)(n-1)} \end{aligned}\right\} \text{节点方程}$$

比较两式，将式中的网孔电流换以节点电压，电阻换以电导，电压源换以电流源就可得到节点方程式。反之，也可由后者得到前者。

电路的一些对偶量

❖ 串联电阻电路的等效电阻公式、分压公式和并联电导电路的等效电导公式、分流公式之间也存着这种对等关系式，作适当的更换，就可得出另一相对应关系式。

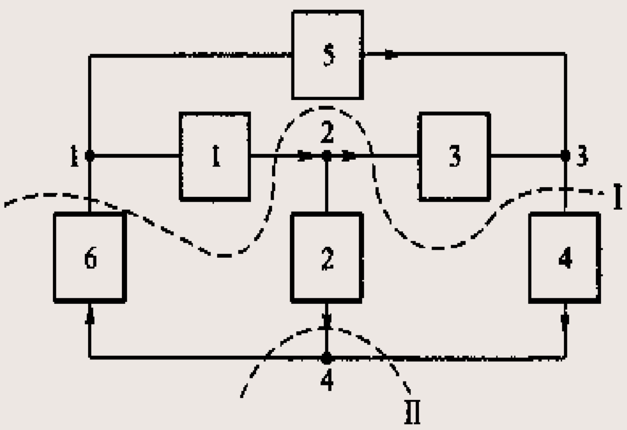
电压	电流	网孔电流	节点电压
电阻	电导	电压源	电流源
短路	开路	电荷	磁链
KCL	KVL	电感	电容
串联	并联		

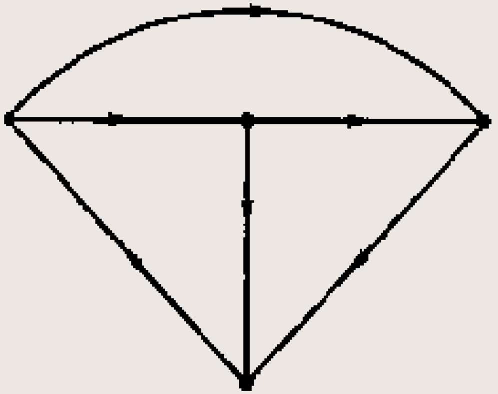
§2-4 图和树

- 网孔电流、节点电压都是电路的一组完备的独立变量。除此以外，电路还有其他的完备独立变量可供选用。
- 由于KCL和KVL约束关系与构成电路的元件性质无关，因此，在研究这些约束关系时可以直接用一线段来代替电路中的每一个元件，这线段称为支路，线段的端点称为节点。
- 先介绍“图” (graph)和“树”(tree)的概念。

图

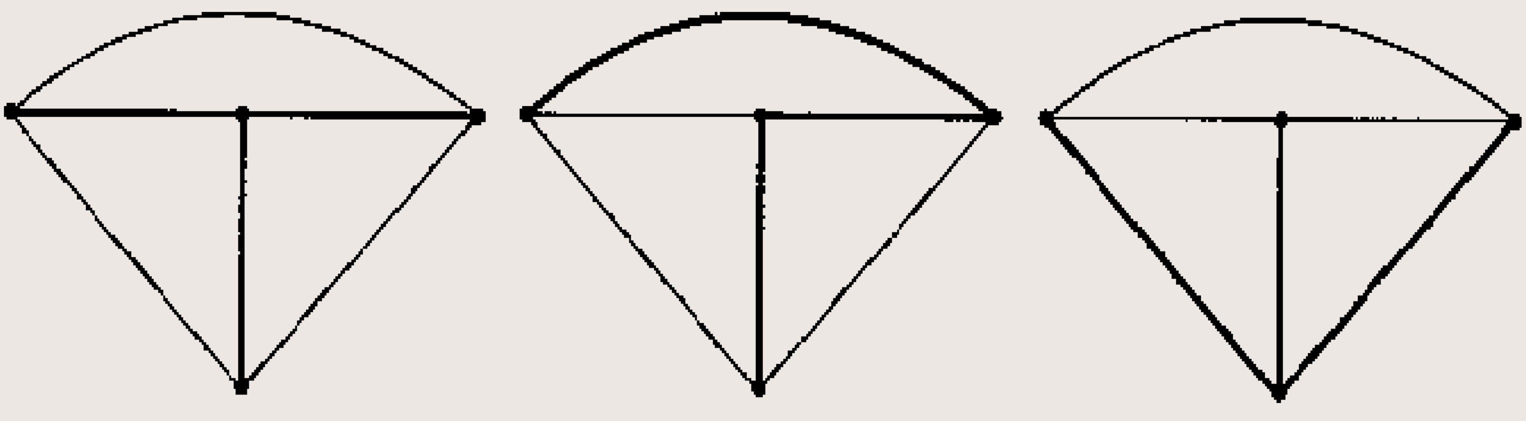
- 用一线段来代替电路中的每一个元件，线段称为支路，线段的端点称为节点，得到的几何结构图称为“图形”或“图”，用G表示。
- 图是一组节点和一组支路的集合，支路只在节点处相交。
- 如果对图中的每一支路规定一个方向，则所得的图就称为定向图(有向图）。
- 如果在图G的任意两节点之间至少存在着一条由支路构成的路径，则图G称为连通图，否则，称为非连通图。





树

- 重绘图G如下图，图中支路用粗线或细线表示。在图(a)、(b)或(c)中，若移去细线所示的支路，剩下的图(如粗线所示)中不存在任何闭合回路，但所有节点仍互相连通，这样的图称为“树”。
- 构成树的各支路称为“树支”，其余的支路(细线所示)称为“连支”连支的集合称为“补树”或“余树”



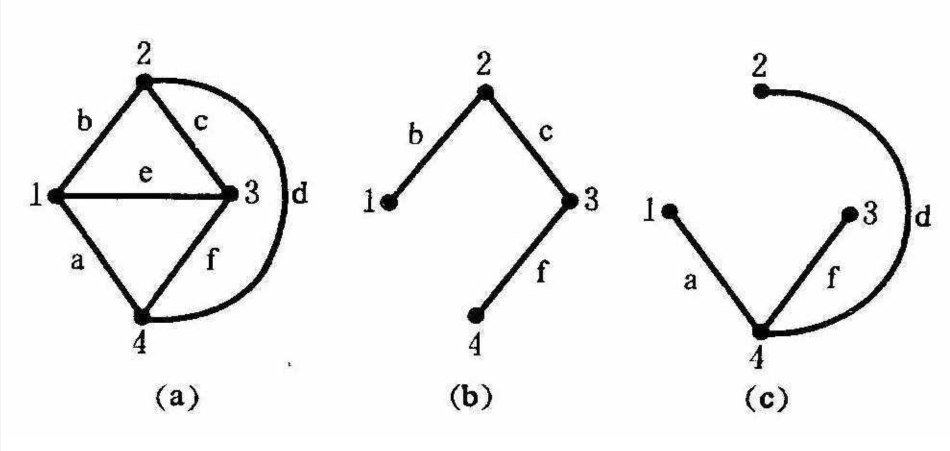
(a) (b) (c)

树的性质

- 前图是图G的三种可能的树，这个图共有16种树。
- 在选定树后，一个网络的支路属于树支或连支这两类。对某一图来说，树是很多的，但树支的数目却是一定的。若图的节点数为n，则树支数必为$(n-1)$。
- 可论证如下：设有一个n=2的图，则这图的树只能包含一条支路。因为树支必须连上所有的节点。即，这两个节点间要有支路相连，但又不允许组成闭合回路，因此，只可能有一条支路相连。如果，图的节点增为3个，即n=3，则应增添一条支路且只能增添一条，理由同上。因此，n=3，则树支数为2。依此类推n个节点的图，其树支数必为$(n-1)$。
- 由于树支数和连支数的总和为支路数b，因此，连支数为$[b-(n-1)]$。

§2-5 割集分析法

- 树支电压是一组完备的独立电压变量，有（n-1）个。
- 树不能包含回路，因此树支电压不能用KVL相联系。
- 树连通所有节点，因此，任何两点间的电压可以用树支电压表示为沿这路径各树支电压的代数和。
- a为图，b和c为树。



对于(b)，树支电压为u_{12}，u_{23}，u_{34}。

支路a：$u_{14}=u_{12}+u_{23}+u_{34}$

支路d：$u_{24}=u_{23}+u_{34}$

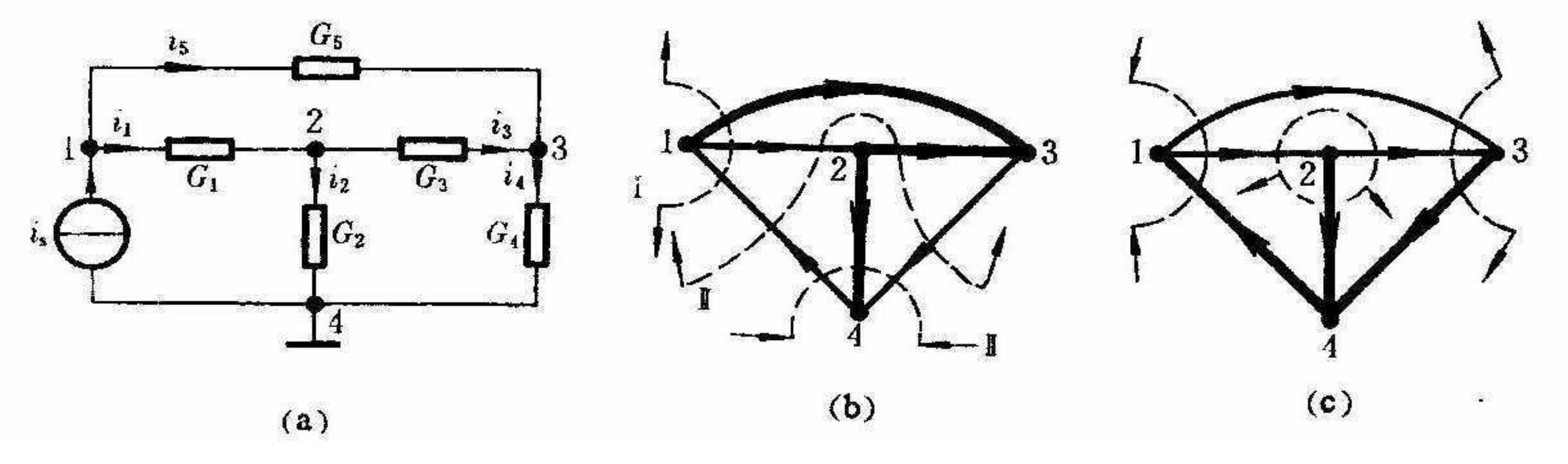
支路e：$u_{13}=u_{12}+u_{23}$

基本割集

❖ 定义：若对某些支路进行切割，就会使图形分为两部分，但只要少切割一条支路图形仍然连通，这些支路的集合叫割集。

❖ 对网络中的任何一个割集，流过割集支路的电流代数和为零。

❖ 包含一条且只包含一条树支的割集，叫基本割集。$(n\text{-}1)$个树支就有$(n\text{-}1)$个基本割集



割集方程

- 根据(b)所选的树,割集的电流方程为:

割集I $\quad i_5 + i_1 - i_s = 0$

割集II $\quad i_3 - i_4 - i_1 + i_s = 0$

割集III $\quad -i_s + i_2 + i_4 = 0$

- 有一条树支，就会有一个割集，相应的就有一个方程，选树的树支电压表示各式:

$$G_5 u_{t5} + G_1(u_{t5} - u_{t3}) = i_s$$

$$G_3 u_{t3} - G_4(u_{t2} - u_{t3}) - G_1(u_{t5} - u_{t3}) = -i_s$$

$$G_2 u_{t2} + G_4(u_{t2} - u_{t3}) = i_s$$

整理得:

$$(G_5 + G_1)u_{t5} - G_1 u_{t3} = i_s$$

$$-G_1 u_{t5} + (G_3 + G_4 + G_1)u_{t3} - G_4 u_{t2} = -i_s$$

$$(G_2 + G_4)u_{t2} - G_4 u_{t3} = i_s$$

说明

- 割集的参考方向应与该割集中树支的关联参考方向一致。
- 割集I的树支是G_5，树支电压为u_{t5}，式中第1项为割集I所有电导的总和与u_{t5}的乘积。
- 第2项为割集I与割集II公共电导的总和与割集II的树支u_{t3}的乘积。根据两个割集的参考方向选择正负号，相同为正，相反为负。
- 电流源写在方程的右边，电流方向与割集方向相反时取正。

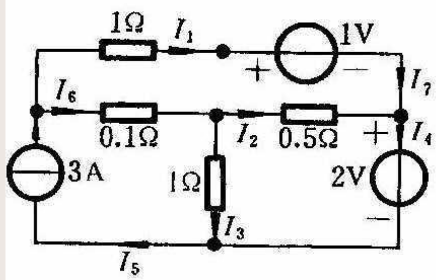
例

列出电路的割集方程，求出各支路电流。

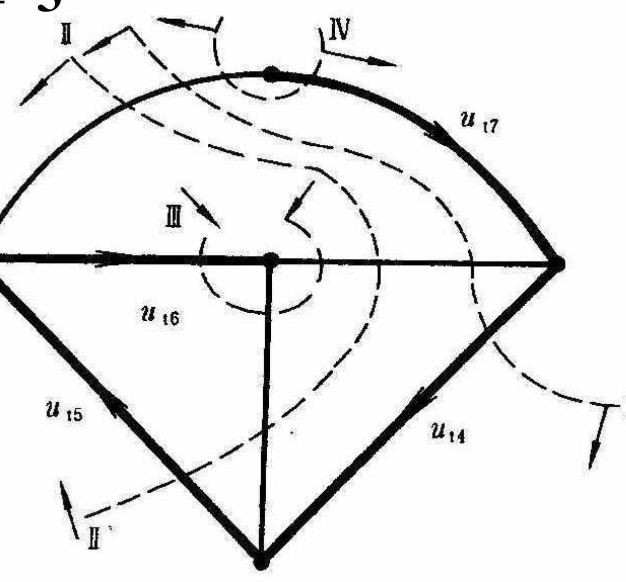
解：选(b)中粗线为树，其中包含2V和1V电压源，故只需求解u_{t5}和u_{t6}。割集II、III的方程为：

$$\left(1+\frac{1}{0.5}+1\right)u_{t5}+\left(1+\frac{1}{0.5}\right)u_{t6}+\left(1+\frac{1}{0.5}\right)u_{t4}+u_{t7}=-3$$

$$\left(1+\frac{1}{0.5}\right)u_{t5}+\left(\frac{1}{0.1}+1+\frac{1}{0.5}\right)u_{t6}+\frac{1}{0.5}u_{t4}=0$$



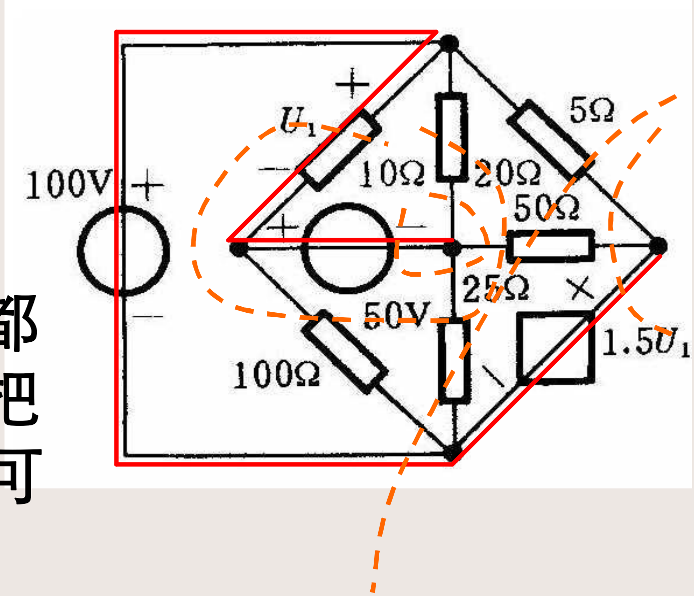
(a)



(b)

习题2-25

试选择一树，使能用一个方程即能解出U_1，U_1是多少?



解：割据分析法的变量是树支电压，如果把含已知的电压源支路都选为树支便可减少求解量，同时把U_1和$1.5U_1$两个支路选为树支，即可用一个方程解出U_1，选树如图

根据要求列出割集U_1的方程：

$$\left(\frac{1}{50}+\frac{1}{100}+\frac{1}{25}+\frac{1}{20}+\frac{1}{50}\right)U_1+\left(\frac{1}{25}+\frac{1}{20}+\frac{1}{50}\right)\times 50$$

$$-\left(\frac{1}{100}+\frac{1}{25}+\frac{1}{50}\right)\times 100+\frac{1}{50}\times 1.5U_1=0$$

§2-6 回路分析法

❖ 根据树的定义，树连通所有的节点，因此，在连通图中，若仅切割所有连支，将会剩下树而不可能成为两个分离部分。割集不可能只由连支组成，因而连支电流不能用KCL相联系，连支电流线性无关，连支电流是独立电流变量。

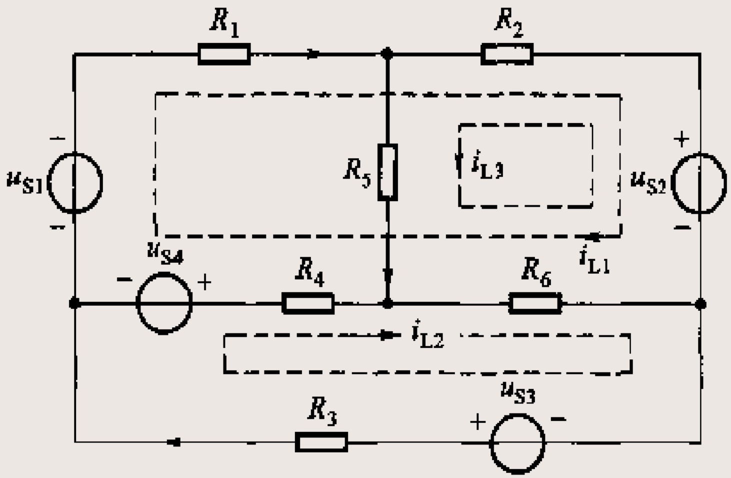
❖ 如果在切割支路时，每次都包含一树支，则这一树支与有关的连支就可构成一个割集，这个割集称为基本割集，共$(n\text{-}1)$个，而对任一割集来说，KCL是成立的，这就表明，割集中唯一的树支电流可以用有关的连支电流线性表示，因此，连支电流是完备的。

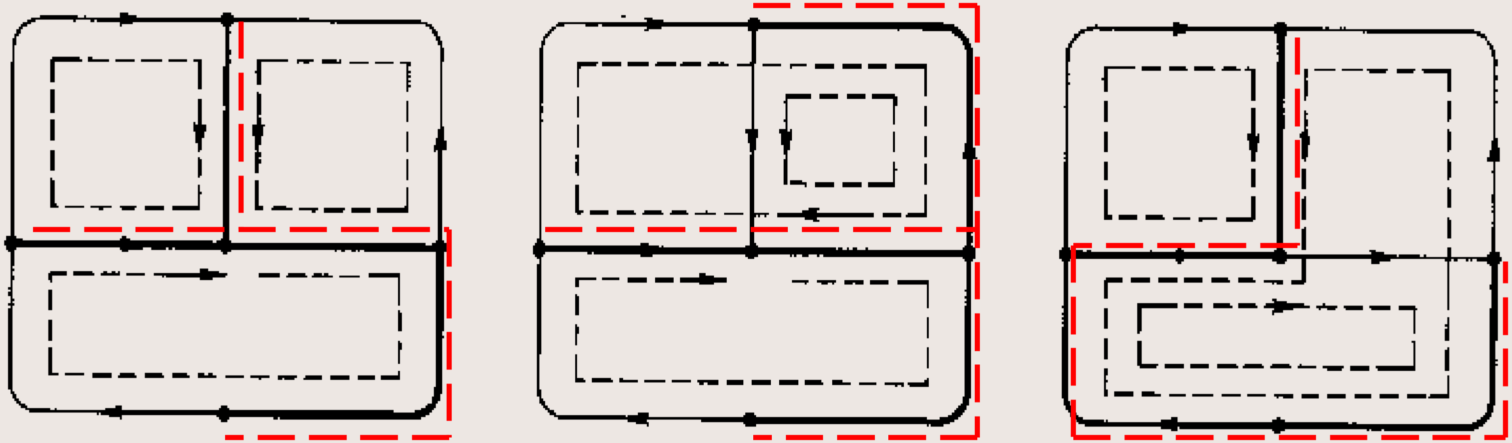
基本回路

- 若网络有b条支路、n个节点，连支数为$[b-(n-1)]$。
- 在选定树后，如果每次只接上一条连支，就可以形成一个闭合回路。这个回路由一条连支与其他有关的树支组成，称为“基本回路”。
- 连支电流在基本回路中连续流动，形成一个回路电流，称为“基本回路电流”。基本回路电流当然是独立电流变量。
- 电路有$[b-(n-1)]$条连支，就会有$[b-(n-1)]$个基本回路及基本回路电流。如果对这些基本回路写KVL方程就会得到$[b-(n-1)]$个方程。
- 这些方程必然是独立的，因为每个方程中都会包含一项不会出现在其他方程中的连支电压。

基本回路

- 电路三种可能的树(以粗线表示)及对应的基本回路。箭头表示基本回路的参考方向这方向与连支的关联参考方向一致。
- 对 (a)所选的树来说，基本回路恰好就是网孔。

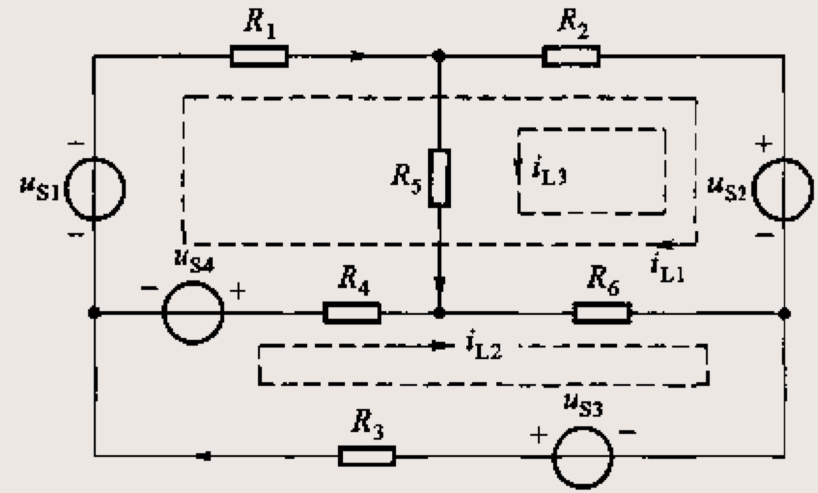




(a) (b) (c)

图(b)基本回路的电压方程

❖ 把三个基本回路电流用i_{L1}、 i_{L2}和 i_{L3}表示，方程的写法与写网孔方程完全类似。



$$\left(R_1+R_2+R_4+R_6\right)i_{L1}-\left(R_4+R_6\right)i_{L2}-\left(R_2+R_6\right)i_{L3}$$
$$=u_{S1}-u_{S2}-u_{S4}$$
$$-\left(R_4+R_6\right)i_{L1}+\left(R_3+R_4+R_6\right)i_{L2}+R_6 i_{L3}=u_{S3}+u_{S4}$$
$$\left(R_2+R_6\right)i_{L1}+R_6 i_{L2}+\left(R_2+R_5+R_6\right)i_{L3}=u_{S2}$$

例

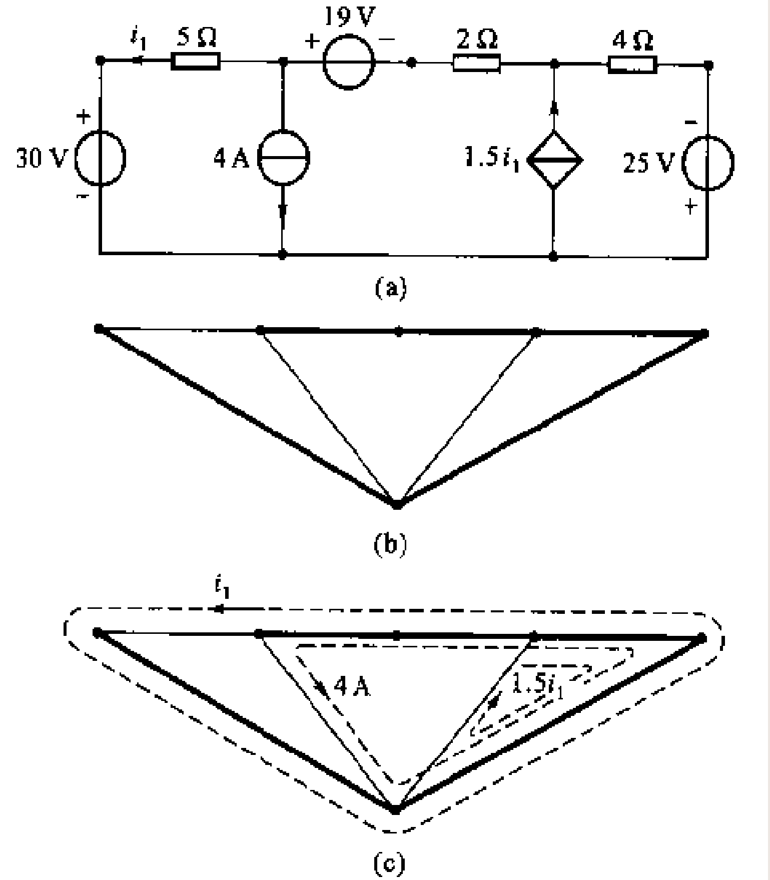
电路如图所示，试求电流i_1。

解 本电路有6个节点，故树支数为5，连支数为3。

在选择树时，应把三个电压源置于树中，而使电流源、受控电流源以及受控源的控制电流支路均位于连支中，所得到的树如图(b)中所示。

三个基本回路电流为$4A$，$1.5i_1$以及i_1，因此，实际上只有一个未知电流i_1。对i_1所流经的回路列写KVL方程，得

$$(5+2+4)i_1+(2+4)\times 4-4\times 1.5i_1$$
$$=-30-25+19$$



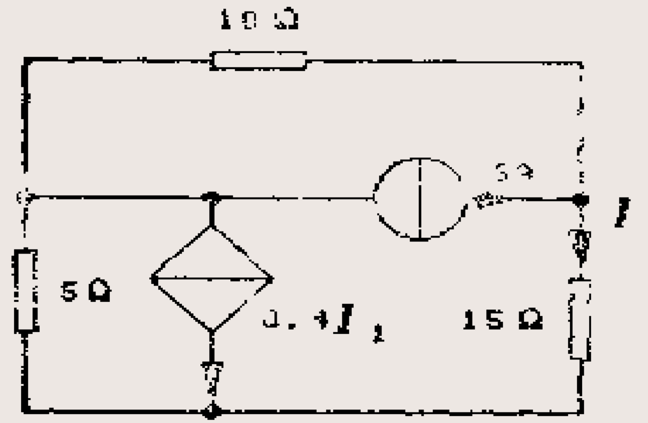
(a)

(b)

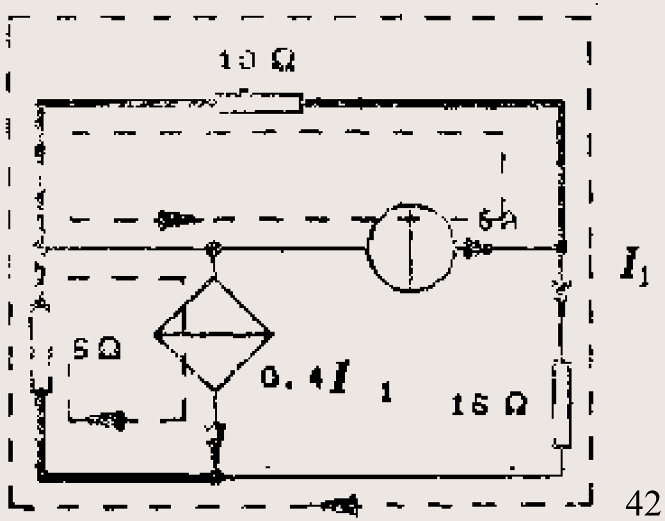
(c)

习题2-28

试选一树，使之只需要一个回路方程即能解出I_1，I_1是多少？



解：因为回路方程的变量是连支电流，所以尽量把已知电流源选为连支以减少求解量，再把I_1作为连支，所得图形下图。



根据题目要求只列出I_1回路方程：

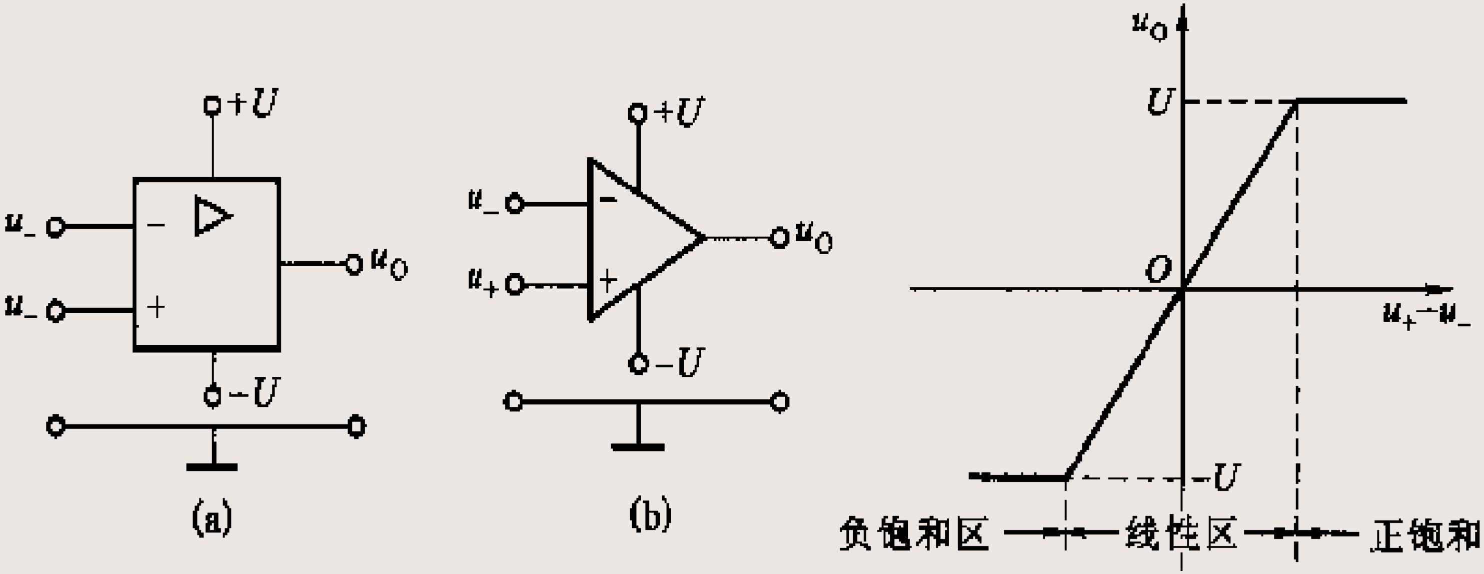
$$30I_1 - 10\times 6 + 5\times 0.4I_1 = 0$$

$$I_1 = 1.875A$$

§2-7 含运算放大器的电阻电路

❖ 运算放大器，简称运放，是现代电子技术中应用广泛的一种器件。运放的内部结构虽然复杂，但其端钮上的VAR却是简单的。

❖ 下图分别是电气图符号、模型符号、输出-输入特性曲线。

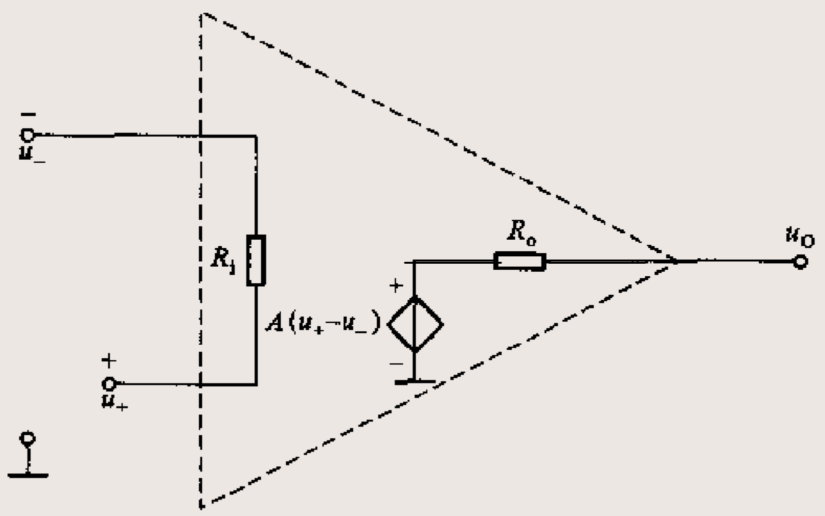


线性运放的模型

- R_i为运放的输入电阻，R_o为输出电阻。
- 受控源则表明运放的电压放大作用，A为运放的电压放大倍数(电压增益)。
- u_+和u_-分别为施加同相输入端和反相输入端的输入电压。
- 当u_+与u_-同时作用时，受控源的电压为：

$$A(u_+ - u_-) = Au_D$$

$$u_D = u_+ - u_-$$ 差动电压



- 当u_-接公共端，受控源的电压为Au_+
- 当u_+接公共端，受控源的电压为$-Au_-$

运放的三个参数的典型数据

参数	名称	典型数值	理想值
A	放大倍数	10^5—10^7	∞
R_i	输入电阻	10^6—$10^{13}\ \Omega$	∞
R_o	输出电阻	10—100 Ω	0

- 符合理想值条件的运放称为理想运放。对理想运放，由于A为无限大，且输出电压u_o为有限值，
  因此，$u_D=u_+-u_-=0$， 即 $u_+=u_-$
- 不论是反相端还是同相端接地，都有$u_+=u_-=0$
- 由于输入电阻为无限大，因此，不论是同相端还是反相端，输入电流为零，以i_+和i_-分别表示这两个输入端的电流，则 $i_+=i_-=0$

用节点分析法分析含运放电路

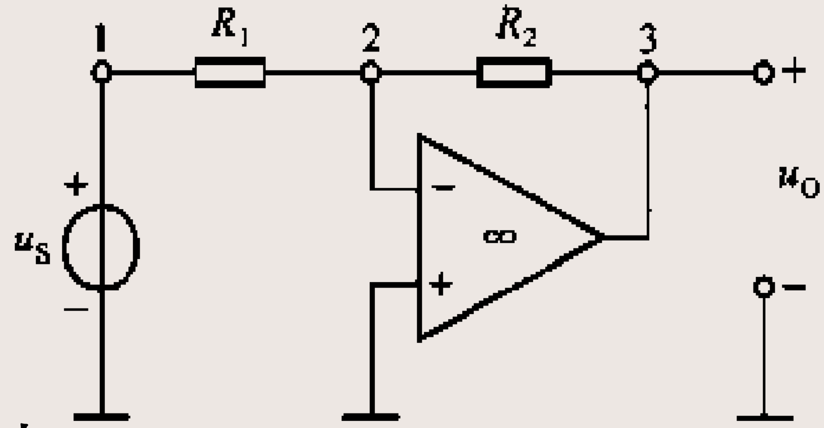
- 在理想运放的情况下，请注意以下的规则：

(1)在运放的输出端应假设一个节点电压，但不必为该节点列写节点方程(求输出电流是很困难的！)

(2)在列写节点方程时，注意运用$u_+=u_-$式及$i_+=i_-=0$式，以减少未知量的数目。

例

比例器为反相放大器，试求图中运放电路输出u_o与输入u_s的关系。



解 电路有三个独立节点1、2、3。因节点l与电压源相接，毋需列写节点方程，对节点3也不必列写节点方程，节点2的方程为：

$$(G_1+G_2)u_2-G_1u_1-G_2u_3=0$$

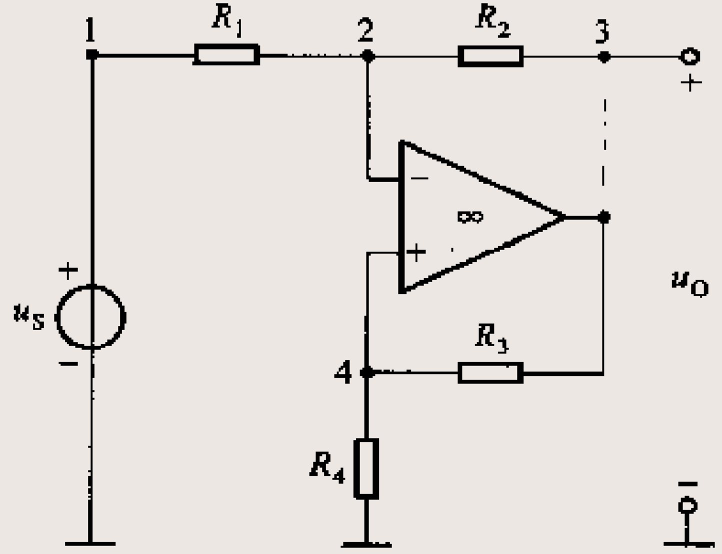
$$u_2=0$$

$$u_O=u_3=-\frac{R_2}{R_1}u_1=-\frac{R_2}{R_1}u_S$$

由于$u_+=u_-$，可知反相端相当于接地。

例

运放电路输入端无一接地，试求输出电压u_o与输入电压u_s之间的关系。



解　电路共有4个独立节点，节点2和4的节点方程分别为

$$\left(G_1+G_2\right)u_2-G_1u_1-G_2u_3=0$$

$$\left(G_3+G_4\right)u_4-G_3u_3=0$$

$$u_2=u_4$$

$$u_1=u_S$$

$$\left(G_1+G_2\right)u_2-G_2u_3=G_1u_S$$

$$\left(G_3+G_4\right)u_4-G_3u_3=0$$

$$u_O=u_3=\frac{G_1G_4+G_1G_3}{G_1G_3-G_2G_4}u_S$$

作业

习题二

2、3、6、10、14、16、23

预习第四章