第3章 线性网络的一般分析方法

电阻电路分析法：

一、等效变换 —求局部响应 （第2章）

二、一般分析方法—系统化求响应（第3章）

三、网络定理 （第4章）

线性电路：由<u>线性元件</u>、<u>独立电源</u>及<u>线性受控源</u>构成的电路。

一般分析方法：适用于任何<u>线性网络</u>的具有普遍性和系统化的分析方法。

特点：不改变电路结构；

VCR、KCL、KVL；

一般分析方法基本步骤：

1 选一组特定变量 (*i* , *u*)

2 列方程：两类约束(VCR, KCL & KVL)

3 求解变量

4 由所求变量求待求响应 (其它量)

一般分析方法包括：

1 支路法

2 网孔法

3 节点法

4 回路法

5 割集法

支路分析法

以支路电流（或支路电压）为未知量，直接运用**KCL、KVL**和**VCR**列出与支路数相等的独立方程，先解得支路电流（或支路电压），进而求得电路响应的电路分析方法。

选支路电流为电路变量，则称为支路电流法；
若选支路电压为电路变量，则称为支路电压法。

支路电流法

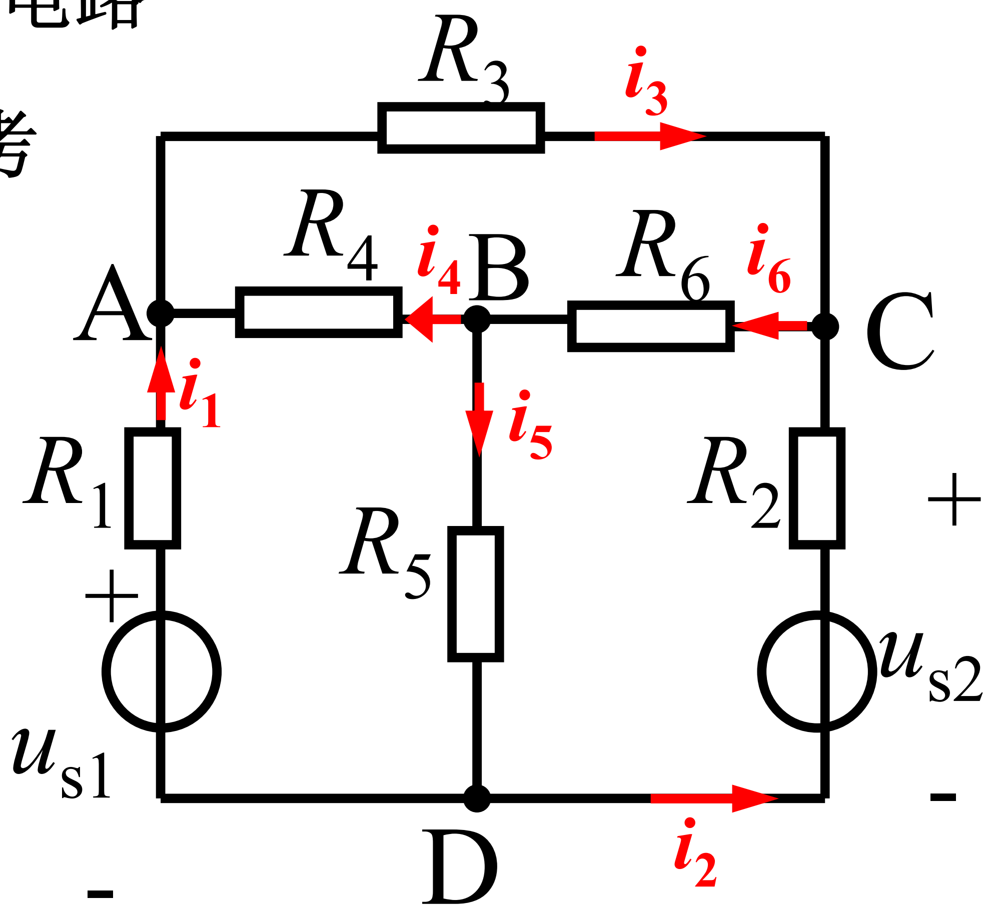
支路电流法：以支路电流为未知量，应用基尔霍夫定律（KCL、KVL）及元件的伏安关系（VCR）列出与支路数相等独立方程，解出各支路响应。

关键：列出与支路数相等的独立方程。

举例介绍支路电流法

6条支路，4个节点，7个回路的电路

(1) 以6个支路电流为变量；设参考方向如图所示



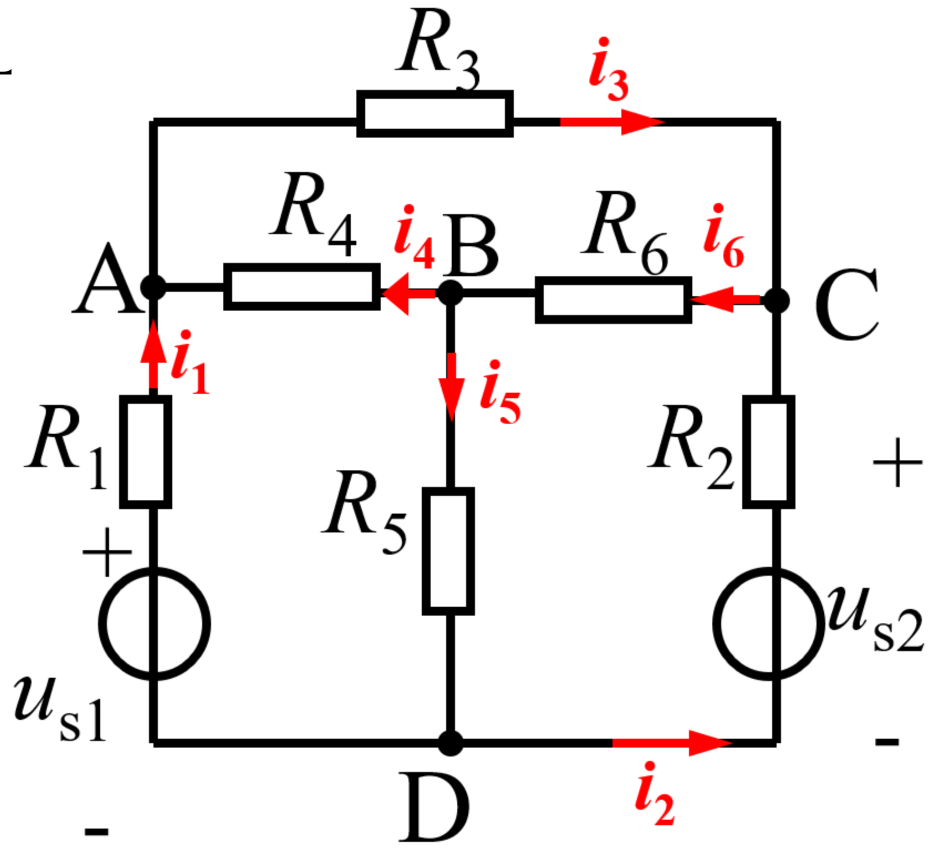
(2) 对节点A、B、C、D分别列KCL方程:

$$A: -i_1 + i_3 - i_4 = 0$$

$$B: i_4 + i_5 - i_6 = 0$$

$$C: -i_2 - i_3 + i_6 = 0$$

$$D: i_1 + i_2 - i_5 = 0$$



三个方程独立，另一方程可有其余三个得到。

结论：一般来讲，具有n个节点的电路，只能列出（n-1）个独立的KCL方程。

(3)对七个回路分别列KVL方程

网孔ABDA

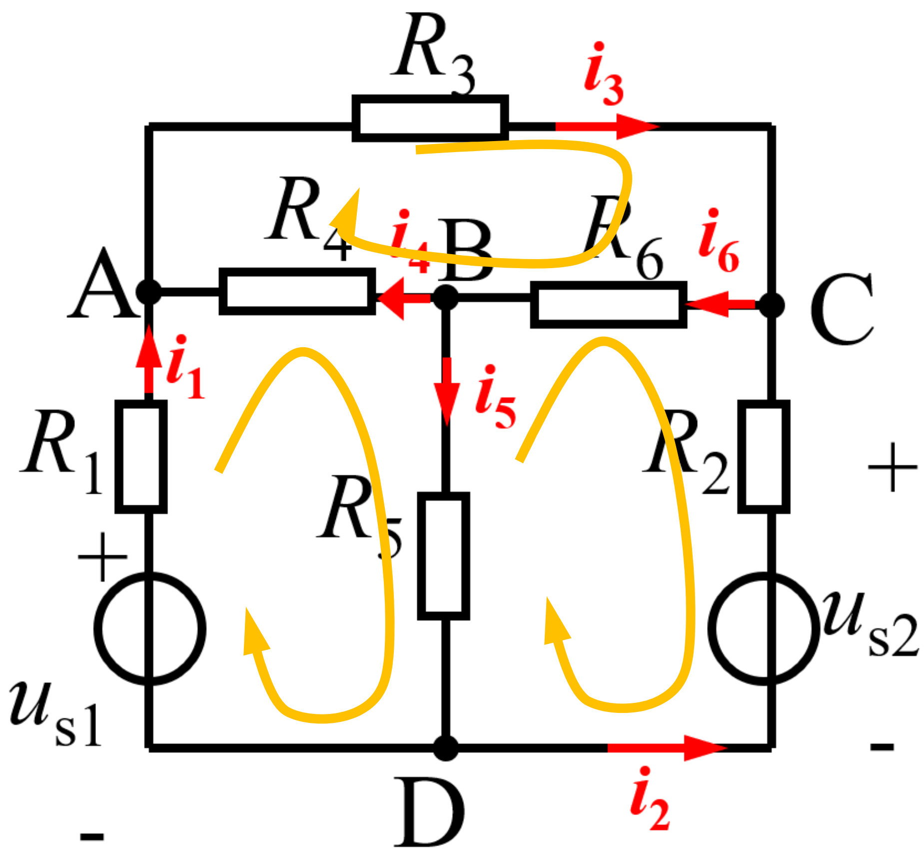
$$-R_4 i_4 + R_5 i_5 - u_{s1} + \underline{R_1 i_1} = 0 \quad (1)$$

网孔BCDB

$$-R_6 i_6 - \underline{R_2 i_2} + u_{s2} - R_5 i_5 = 0 \quad (2)$$

网孔ACBA

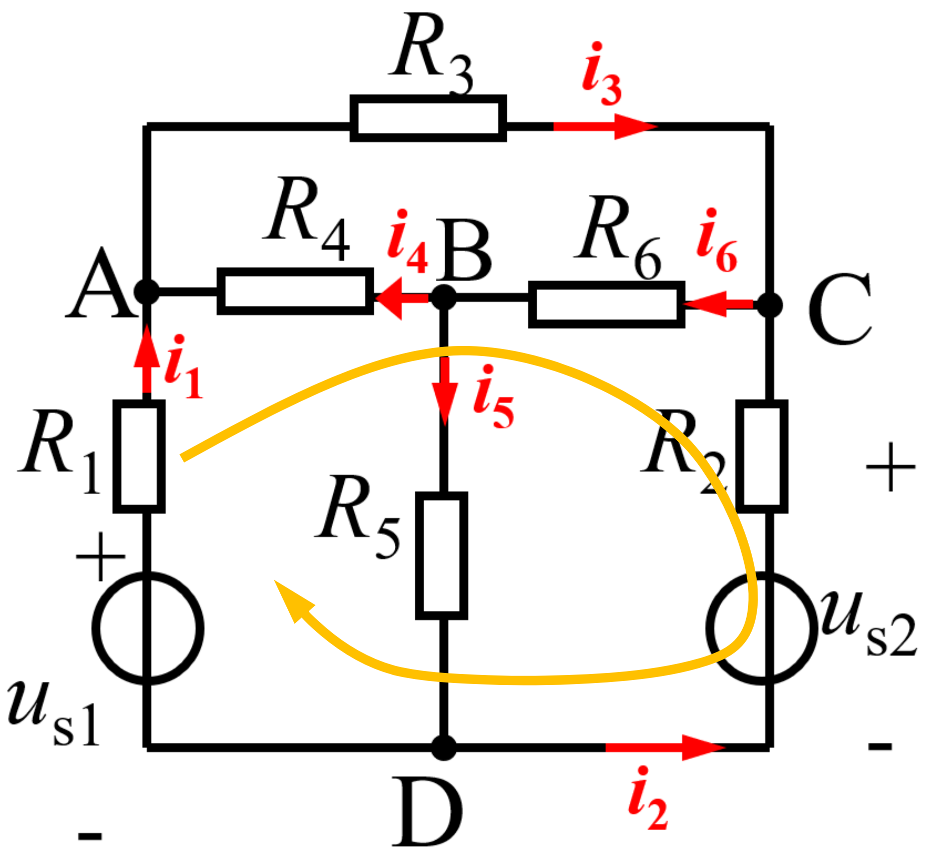
$$\underline{R_3 i_3} + R_6 i_6 + R_4 i_4 = 0 \quad (3)$$



$$-R_4 i_4 + R_5 i_5 - u_{s1} + R_1 i_1 = 0 \quad (1)$$

$$-R_6 i_6 - R_2 i_2 + u_{s2} - R_5 i_5 = 0 \quad (2)$$

$$R_3 i_3 + R_6 i_6 + R_4 i_4 = 0 \quad (3)$$



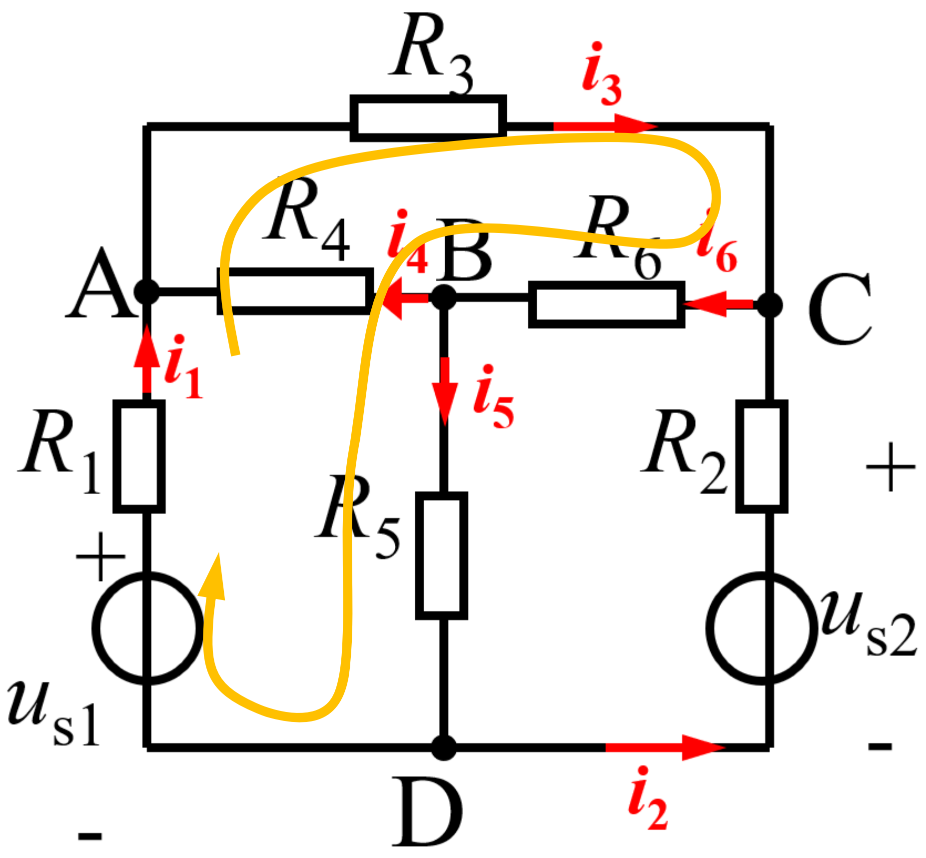
回路ABCDA：

$$-R_4 i_4 - R_6 i_6 - R_2 i_2 + u_{s2} - u_{s1} + R_1 i_1 = 0 \quad (1)+(2)$$

$$-R_4 i_4 + R_5 i_5 - u_{s1} + R_1 i_1 = 0 \quad (1)$$

$$-R_6 i_6 - R_2 i_2 + u_{s2} - R_5 i_5 = 0 \quad (2)$$

$$R_3 i_3 + R_6 i_6 + R_4 i_4 = 0 \quad (3)$$



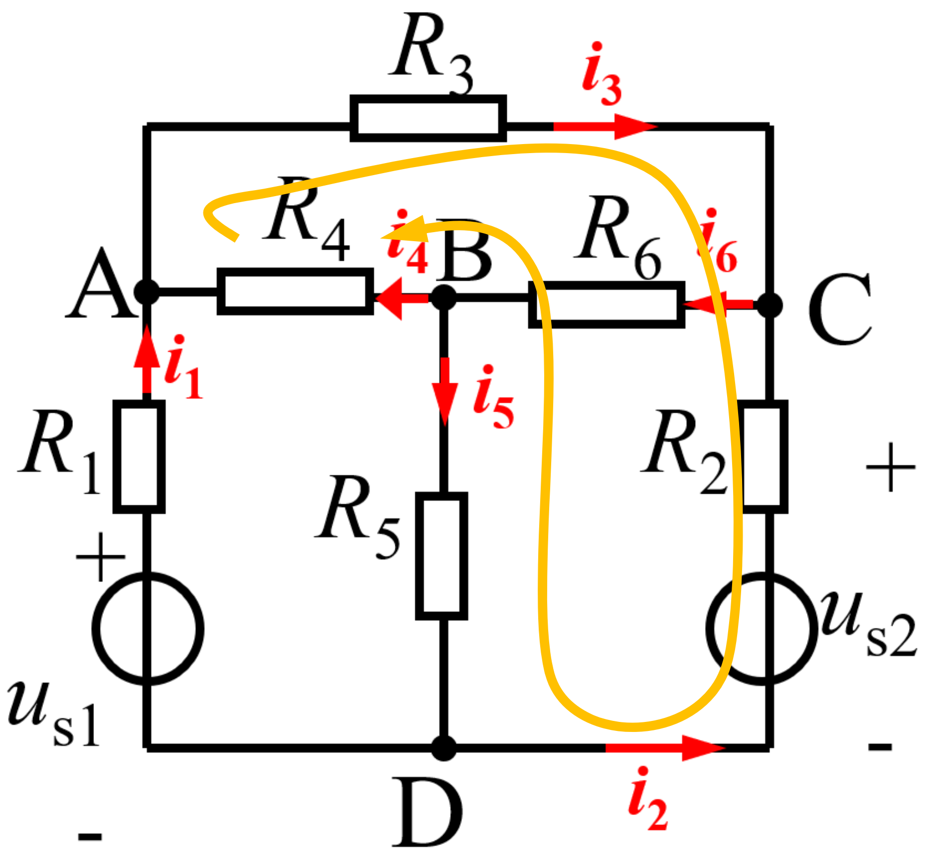
回路ACBDA

$$R_3 i_3 + R_6 i_6 + R_5 i_5 - u_{s1} + R_1 i_1 = 0 \qquad (1)+(3)$$

$$-R_4 i_4 + R_5 i_5 - u_{s1} + R_1 i_1 = 0 \quad (1)$$

$$-R_6 i_6 - R_2 i_2 + u_{s2} - R_5 i_5 = 0 \quad (2)$$

$$R_3 i_3 + R_6 i_6 + R_4 i_4 = 0 \quad (3)$$



回路ACDBA

$$R_3 i_3 - R_2 i_2 + u_{s2} - R_5 i_5 + R_4 i_4 = 0$$

$$(2)+(3)$$

$$-R_4 i_4 + R_5 i_5 - u_{s1} + R_1 i_1 = 0 \quad (1)$$

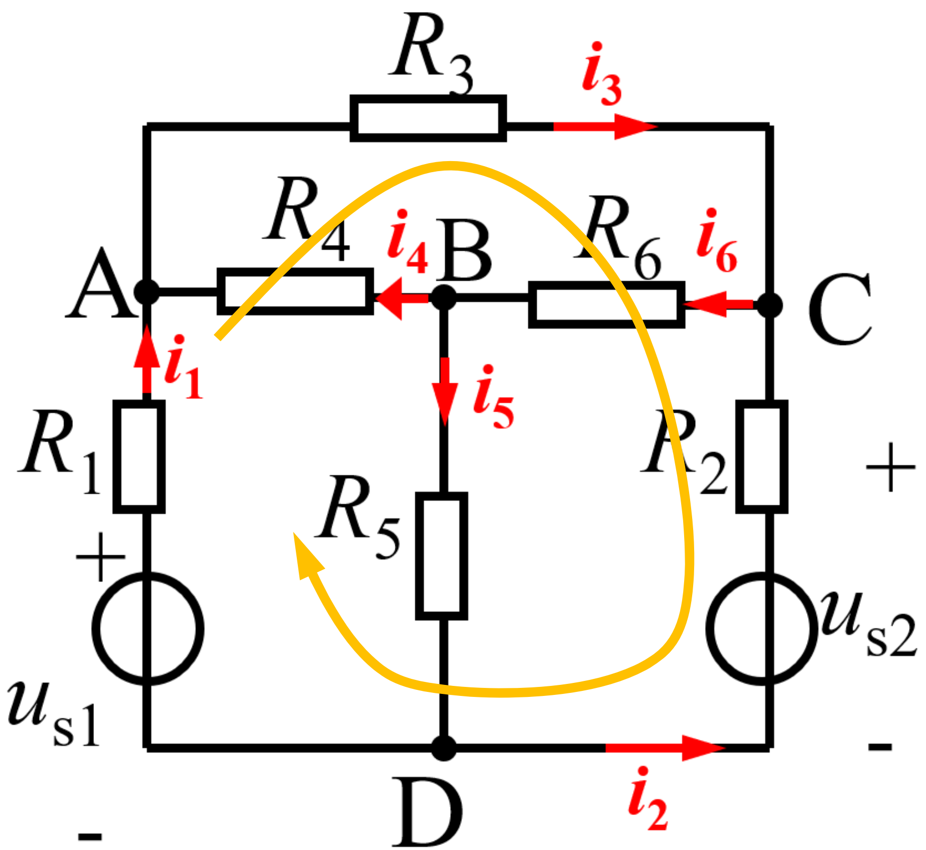
$$-R_6 i_6 - R_2 i_2 + u_{s2} - R_5 i_5 = 0 \quad (2)$$

$$R_3 i_3 + R_6 i_6 + R_4 i_4 = 0 \quad (3)$$

回路ACDA

$$R_3 i_3 - R_2 i_2 + u_{s2} - u_{s1} + R_1 i_1 = 0$$

$$(1)+(2)+(3)$$



4个节点，6条支路的电路。可列3个独立KVL方程。

结论：一般来讲，具有*n*个节点，**b条支路**的电路，只能列出**b-(n-1)**个独立的**KVL**方程。

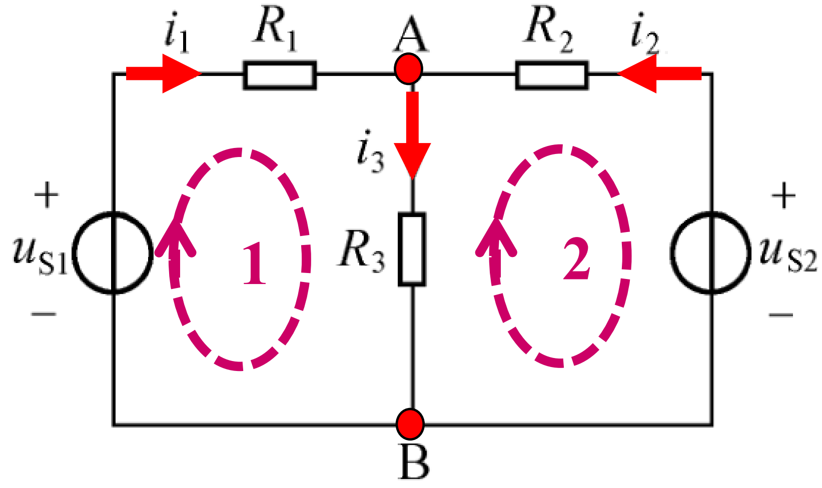
综上所述： n个节点，b条支路的电路。只有(n-1)个独立节点，可列(n-1)个独立KCL方程；独立回路数l=b-(n-1)个，可列l 个独立KVL方程。

独立节点的选取：任选一个为参考节点，其余即为独立节点。

独立回路的选取： 每选一个新回路，应含一条特有的新支路。

对平面网络而言， l=b-(n-1)个网孔即为一组独立回路。

三、支路电流法的解题步骤：



1. 设定***b*条支路**电流参考方向。

2. 对*n*个节点列出***n*-1**个独立**KCL**方程。

3. 选独立回路列出***b*-（*n*-1）**个独立**KVL**方程。

4. 联立求解***b*个**方程，求出各支路电流及其它响应。

【例】已知电路如图所示，试用支路电流法分析各支路电流和支路电压u_{AB}。

由图已知：I_1=2A

(1)对A 节点个KCL方程：$I_1+I_2+I_3=0$

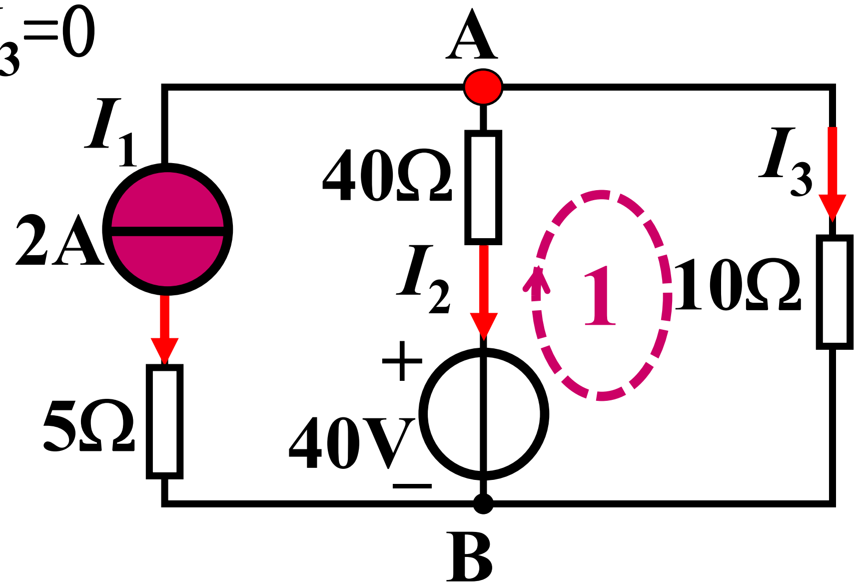
(2) 对网孔1KVL方程

$$40I_2+40-10I_3=0$$

解得：

$$I_2=-1.2\text{A},\ I_3=-0.8\text{A}$$

$$u_{AB}=10I_3=-8\text{V}$$



支路法优点及不足：

优点：直接。直接对支路电流（电压）列方程。

不足：需要同时列写**KCL**，**KVL**方程，方程数多（为支路数）且无规律。

各支路电压（电流）不独立，且线性相关。

能否找到一种方法，使方程数最少，且规律性较强的方法？

后面要讲的网孔分析法，节点分析法，回路分析法，割集分析法就具有这样特点。它们选择一组数目最少的独立完备的电路变量作为待求变量，使得方程数目最少。

独立性——彼此不能相互表示，不受KCL,KVL约束。

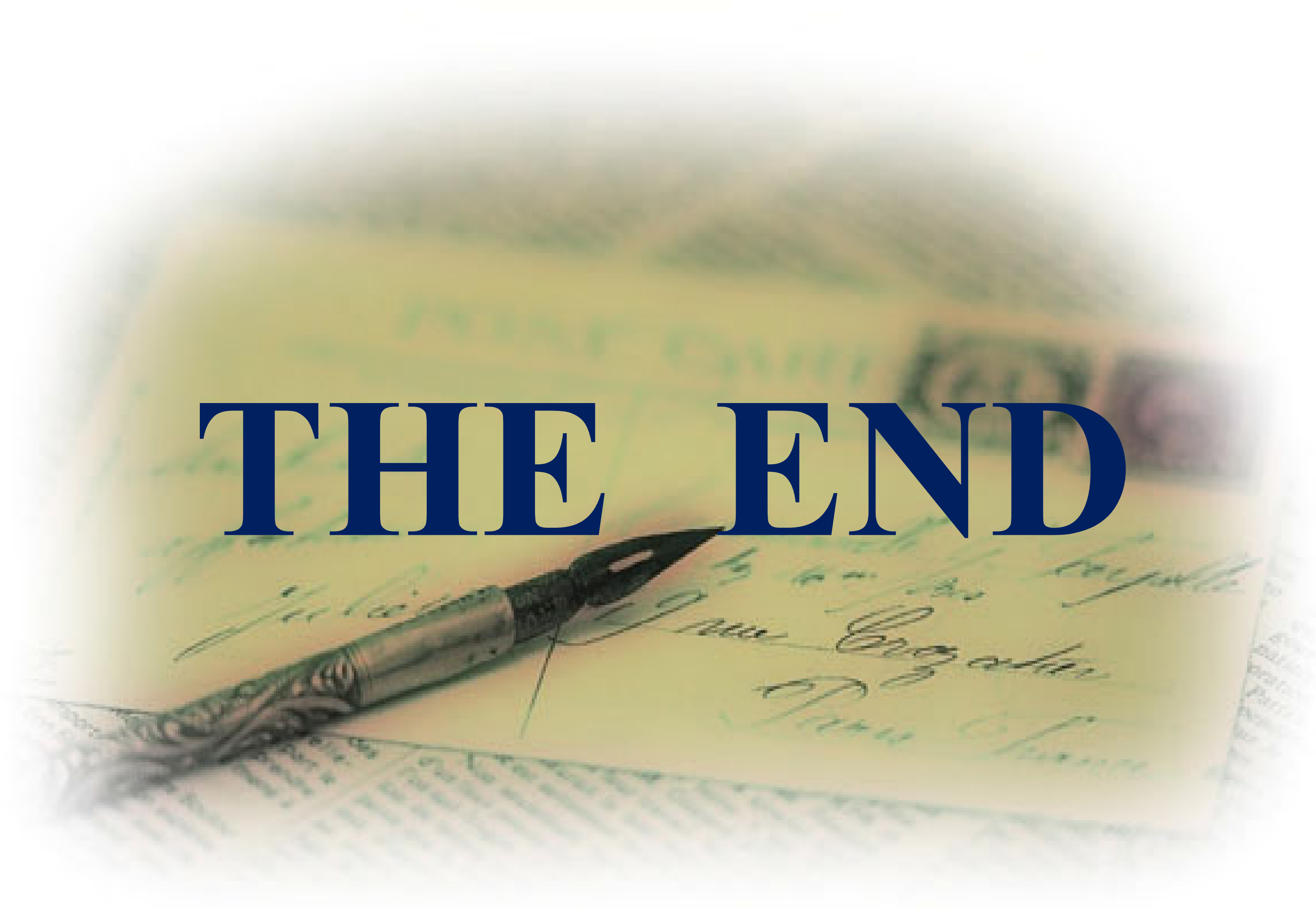
完备性——其他量都可用它们表示。

完备和独立的变量数:

n个节点，b条支路。只有l=b-(n-1)个电流变量

或 (n-1)个电压变量。

独立完备变量	独立方程	分析方法
电流变量 l=b-(n-1)	网孔的KVL方程 l=b-(n-1)	网孔法
电压变量 n-1	独立节点KCL方程 n-1	节点法



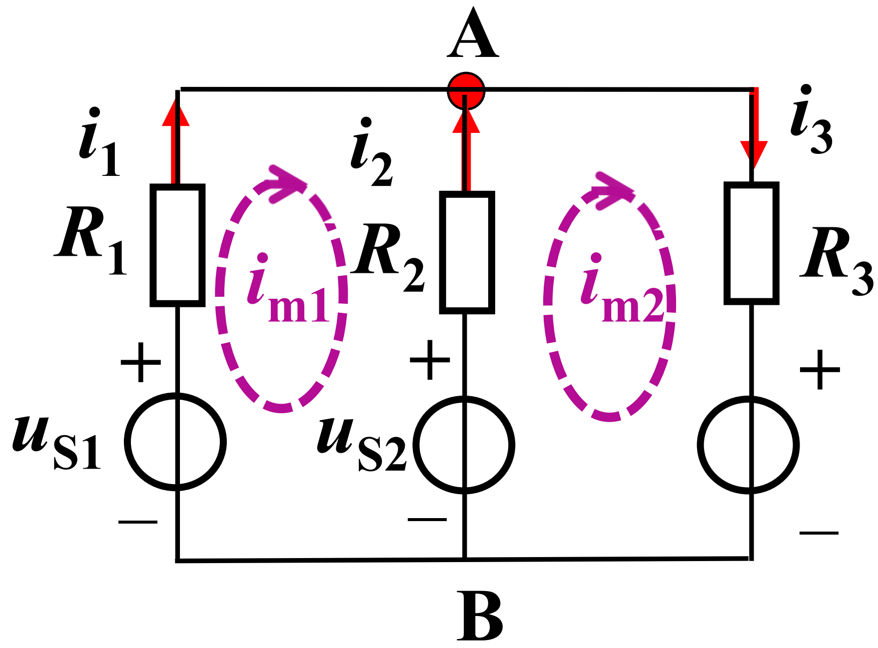
THE END

网孔分析法

网孔分析法：以网孔电流为独立的电路变量，直接列出网孔KVL方程，求出网孔电流进而求得响应的一种平面网络分析方法。

网孔电流：沿网孔边界流动的假想电流。

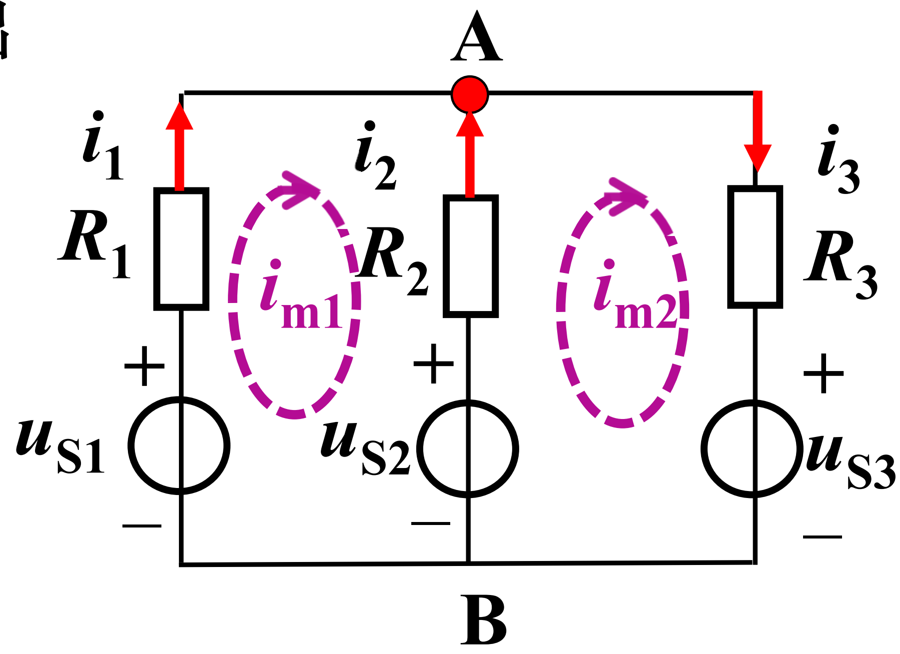
网孔电流方向**通常设为一致**



1、网孔电流的性质：完备性与独立性

完备性： 支路电流可由网孔电流求出

$$\begin{cases} i_1 = i_{m1} \\ i_2 = i_{m2} - i_{m1} \\ i_3 = i_{m2} \end{cases}$$



独立性：对于节点A列KCL

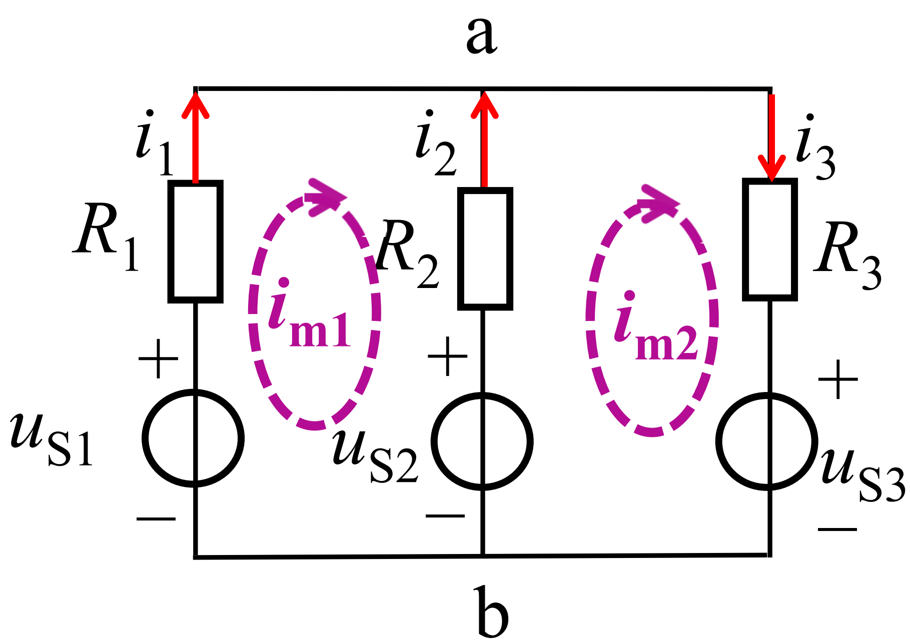
$$i_1 + i_2 - i_3 = 0 \Rightarrow \cancel{i_{m1}} + \cancel{i_{m2}} - \cancel{i_{m1}} - \cancel{i_{m2}} = 0$$

因此，网孔电流相互间不受KCL约束，具有独立性

2、按网孔电流的方向列各网孔KVL

网孔1：　$R_1 i_1 - R_2 i_2 + u_{S2} - u_{S1} = 0$

网孔2：　$R_3 i_{m2} + u_{S3} - u_{S2} + R_2 i_2 = 0$



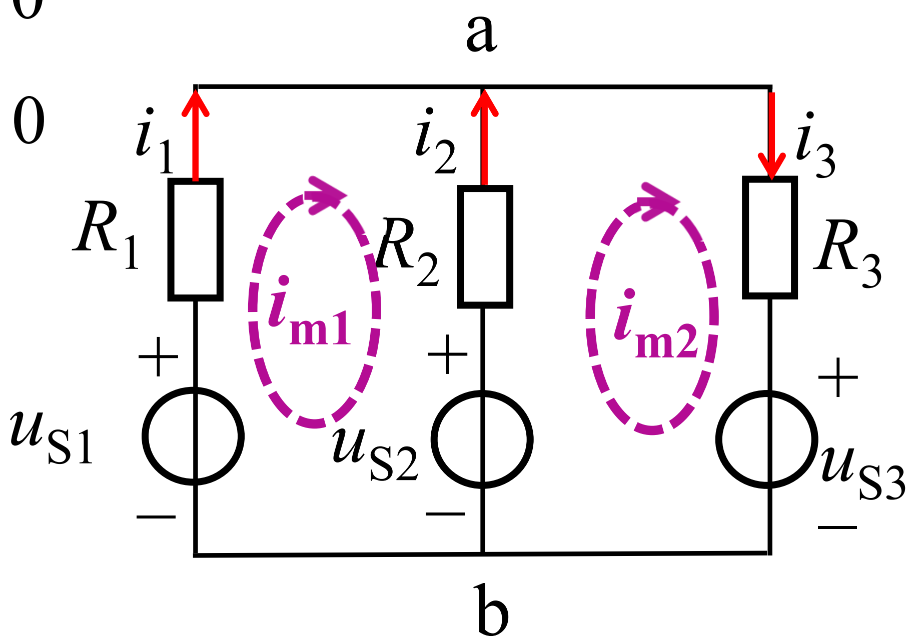
$$\begin{cases} i_1 = i_{m1} \\ i_2 = i_{m2} - i_{m1} \\ i_3 = i_{m2} \end{cases}$$

网孔1：$R_1 i_{m1} + R_2 (i_{m1} - i_{m2}) - u_{S1} + u_{S2} = 0$

网孔2：$R_3 i_{m2} + R_2 (i_{m2} - i_{m1}) - u_{S2} + u_{S3} = 0$

网孔1：$R_1 i_{m1} + R_2(i_{m1} - i_{m2}) - u_{S1} + u_{S2} = 0$

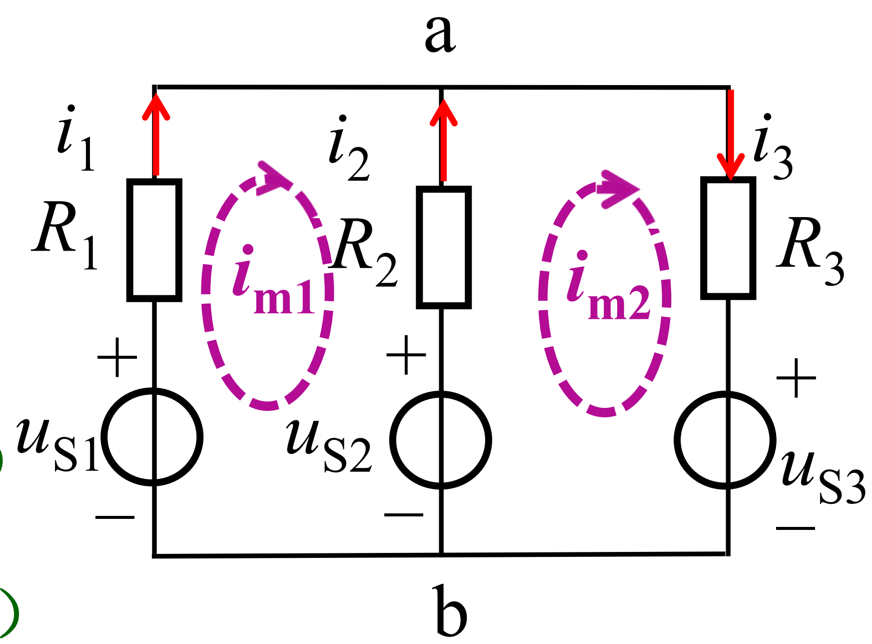
网孔2：$R_3 i_{m2} + R_2(i_{m2} - i_{m1}) - u_{S2} + u_{S3} = 0$



整理如下：

$$\begin{cases} (R_1 + R_2) i_{m1} - R_2 i_{m2} = u_{S1} - u_{S2} \\ -R_2 i_{m1} + (R_2 + R_3) i_{m2} = u_{S2} - u_{S3} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \boxed{(R_1+R_2)}i_{m1} - R_2 i_{m2} = u_{S1} - u_{S2} \\ -R_2 i_{m1} + \boxed{(R_2+R_3)}i_{m2} = u_{S2} - u_{S3} \end{cases}$$



标准形式方程：

$$\begin{cases} \boxed{R_{11}}i_{m1} + R_{12} i_{m2} = u_{Sm1} & \text{（网孔I）} \\ R_{21} i_{m1} + \boxed{R_{22}}i_{m2} = u_{Sm2} & \text{（网孔II）} \end{cases}$$

主对角线系数：

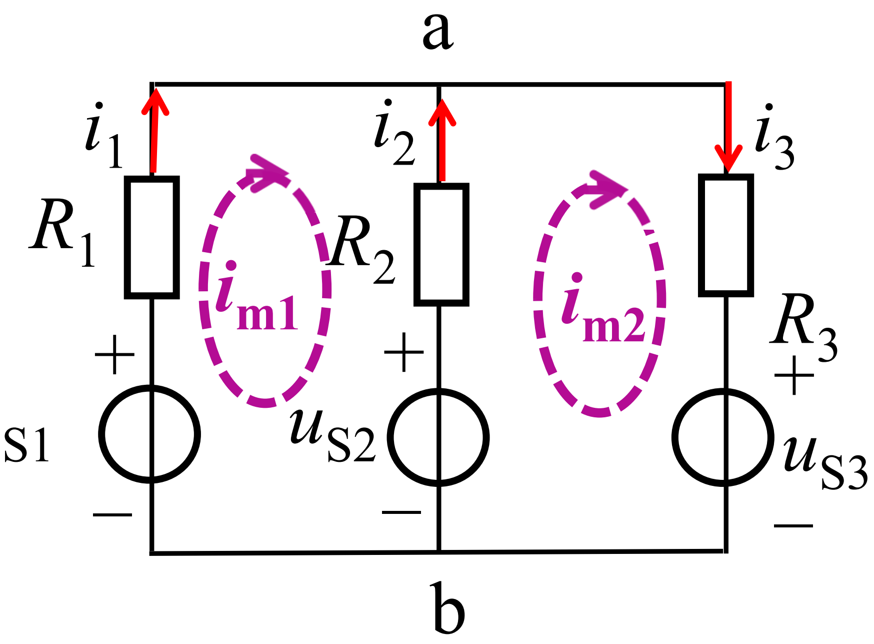
$$\begin{cases} R_{11} = R_1 + R_2 \\ R_{22} = R_2 + R_3 \end{cases}$$

自电阻：网孔中所有电阻之和，自电阻恒为正。

$$\begin{cases}(R_1+R_2)i_{m1} \boxed{-R_2} i_{m2}=u_{S1}-u_{S2}\\ \boxed{-R_2} i_{m1}+(R_2+R_3)i_{m2}=u_{S2}-u_{S3}\end{cases}$$

标准形式方程：

$$\begin{cases}R_{11}i_{m1}+\boxed{R_{12}} i_{m2}=u_{Sm1}\ \text{（网孔I）}\\ \boxed{R_{21}} i_{m1}+R_{22}i_{m2}=u_{Sm2}\ \text{（网孔II）}\end{cases}$$

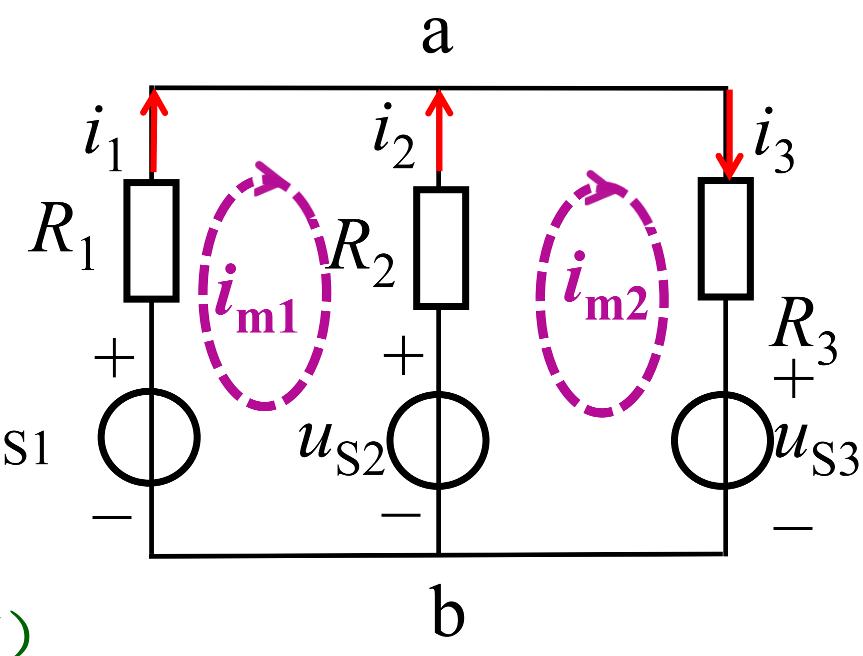


非主对角线系数：

$$\begin{cases}R_{12}=-R_2\\ R_{21}=-R_2\end{cases}$$ ⇒ **网孔1、网孔2之间的电阻——互电阻。**

网孔电流方向一致时，互电阻为负。

$$\begin{cases}(R_1+R_2)i_{m1}-R_2 i_{m2}=\boxed{u_{S1}-u_{S2}}\\(R_2+R_3)i_{m2}-R_2 i_{m1}=\boxed{u_{S2}-u_{S3}}\end{cases}$$



标准形式方程：

$$\begin{cases}R_{11}i_{m1}+R_{12}i_{m2}=\boxed{u_{Sm1}} & \text{(网孔I)}\\R_{21}i_{m1}+R_{22}i_{m2}=\boxed{u_{Sm2}} & \text{(网孔II)}\end{cases}$$

方程右边系数：

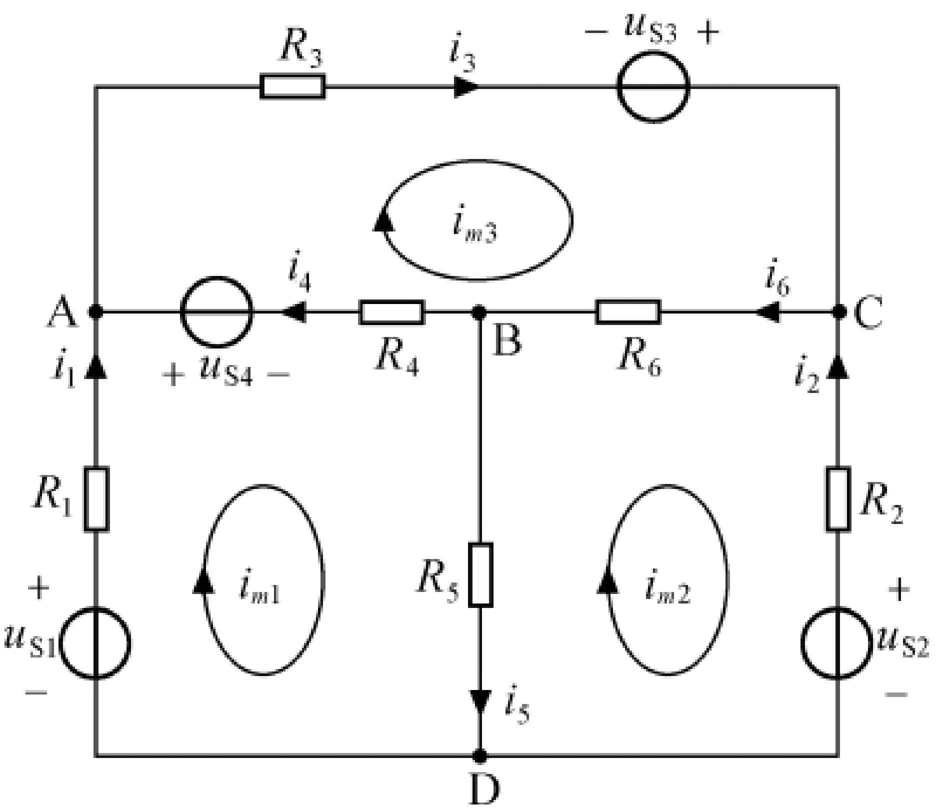
$$\begin{cases}u_{sm1}=u_{s1}-u_{s2}\\u_{sm2}=u_{s2}-u_{s3}\end{cases}$$

电压源沿着网孔电流方向电压升为正，降为负

标准形式方程：
$$\begin{cases} R_{11}i_{m1}+R_{12}i_{m2}=u_{sm1} \\ R_{21}i_{m1}+R_{22}i_{m2}=u_{sm2} \end{cases}$$

网孔法方程的规则：

自电阻×本网孔的网孔电流+∑(互电阻×相邻网孔的网孔电流)=本网孔中沿网孔电流方向所含电压源电压升的代数和。



$i_1 = i_{m1}$， $i_2 = -i_{m2}$， $i_3 = i_{m3}$

$i_4 = i_{m3} - i_{m1}$， $i_5 = i_{m1} - i_{m2}$， $i_6 = i_{m3} - i_{m2}$

网孔 Ⅰ：$(R_1 + R_4 + R_5)i_{m1} - R_5 i_{m2} - R_4 i_{m3} = u_{S1} - u_{S4}$

网孔 Ⅱ：$-R_5 i_{m1} + (R_2 + R_5 + R_6)i_{m2} - R_6 i_{m3} = -u_{S2}$

网孔 Ⅲ：$-R_4 i_{m1} - R_6 i_{m2} + (R_3 + R_4 + R_6)i_{m3} = u_{S3} + u_{S4}$

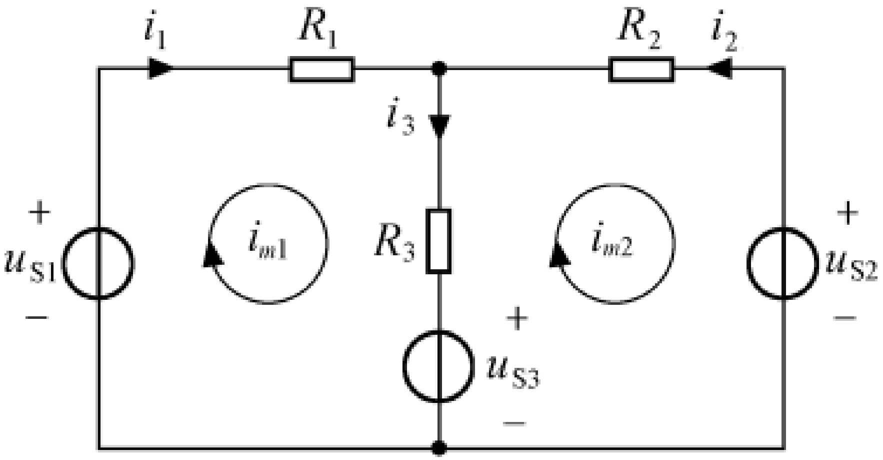
3、网孔分析法的解题步骤：

1）设定网孔电流的参考方向；

2）根据网孔方程的规则直接列写网孔方程，求取网孔电流；

3）求支路电流或其它响应。

例1 u_{s1}=20V,u_{s2}=30V,u_{s3}=10V，R_1=1 Ω，R_2=6 Ω，R_3=2Ω，用网孔法求各支路电流.



解：（1）设网孔电流i_{m1}，i_{m2}

（2）直接列写网孔方程：

$$(R_1+R_3)i_{m1}-R_3 i_{m2}=u_{S1}-u_{S3}$$

$$-R_3 i_{m1}+(R_2+R_3)i_{m2}=u_{S3}-u_{S2}$$

（3）代入数据求解：

$$3i_{m1}-2i_{m2}=10$$

$$-2i_{m1}+8i_{m2}=-20$$

$$i_{m1}=2A$$

$$i_{m2}=2A$$

（4）求各支路电流：

$$i_1=i_{m1}=2A$$

$$i_2=-i_{m2}=2A$$

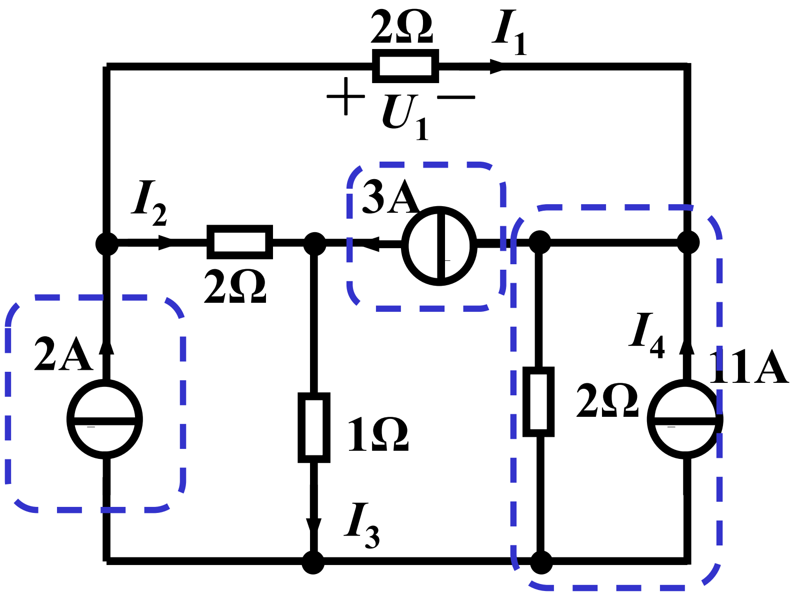
$$i_3=i_{m1}-i_{m2}=4A$$

1、含有电流源网络的网孔方程

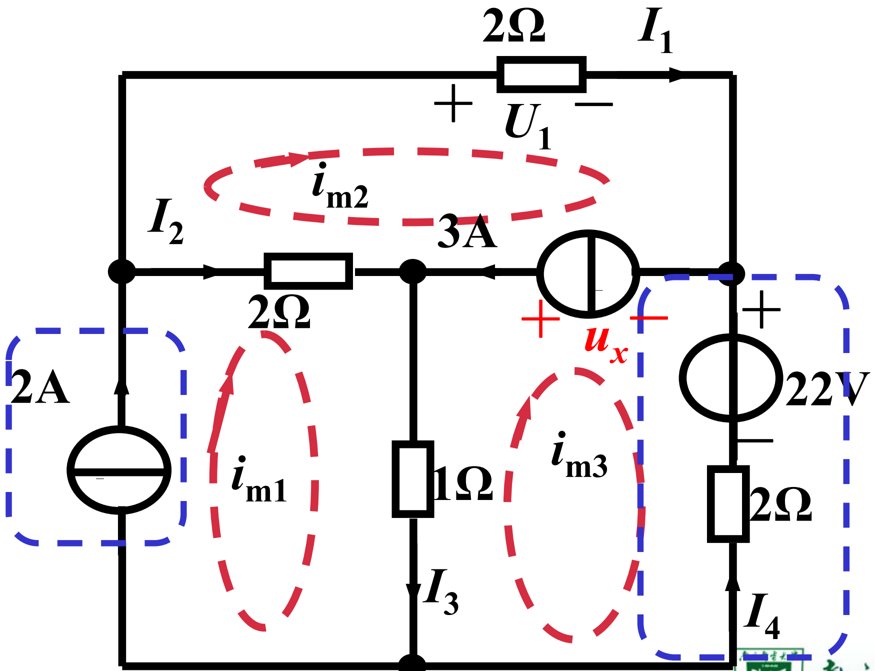
方法：1）有伴时：化为戴维南模型；

2）无伴时：a.为单一网孔独有，依关联方向，该网孔电流为电流源电流或其负值。网孔方程可略。

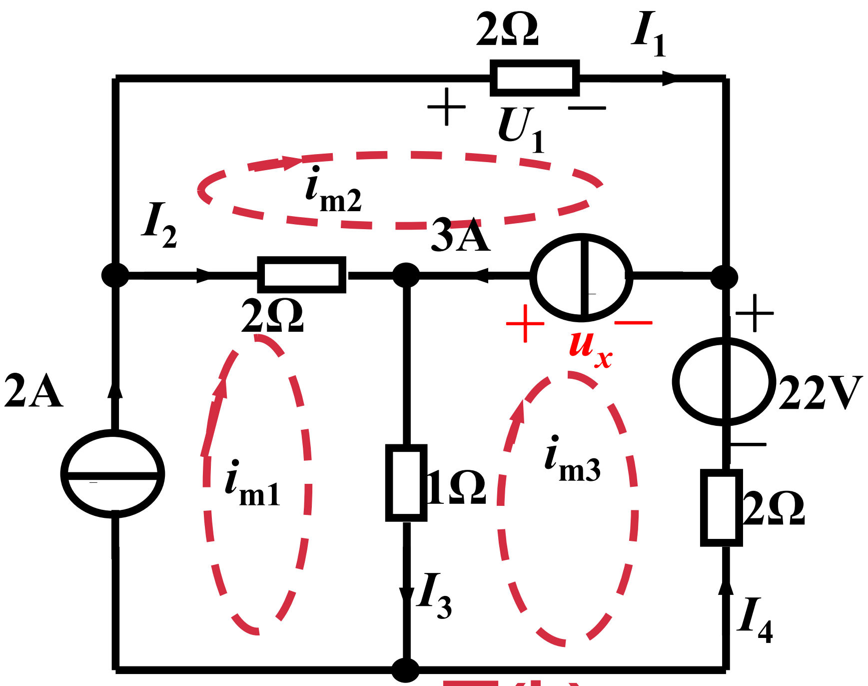
b.为两网孔共有，则可将电流源两端电压设为未知量u_x，电流源当做u_x的电压源处理，加辅助方程（**此电流源电流用网孔电流表示）。



图(a)



图(b)



图(b)

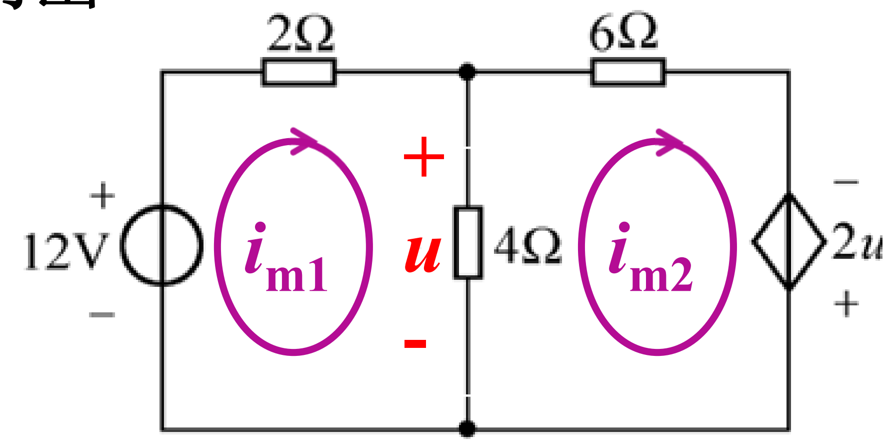
2、含受控源网络的网孔方程

（1）列网孔方程：受控源按独立源处理；

（2）列辅助方程：控制量用网孔电流表示。

【例3】列网孔方程

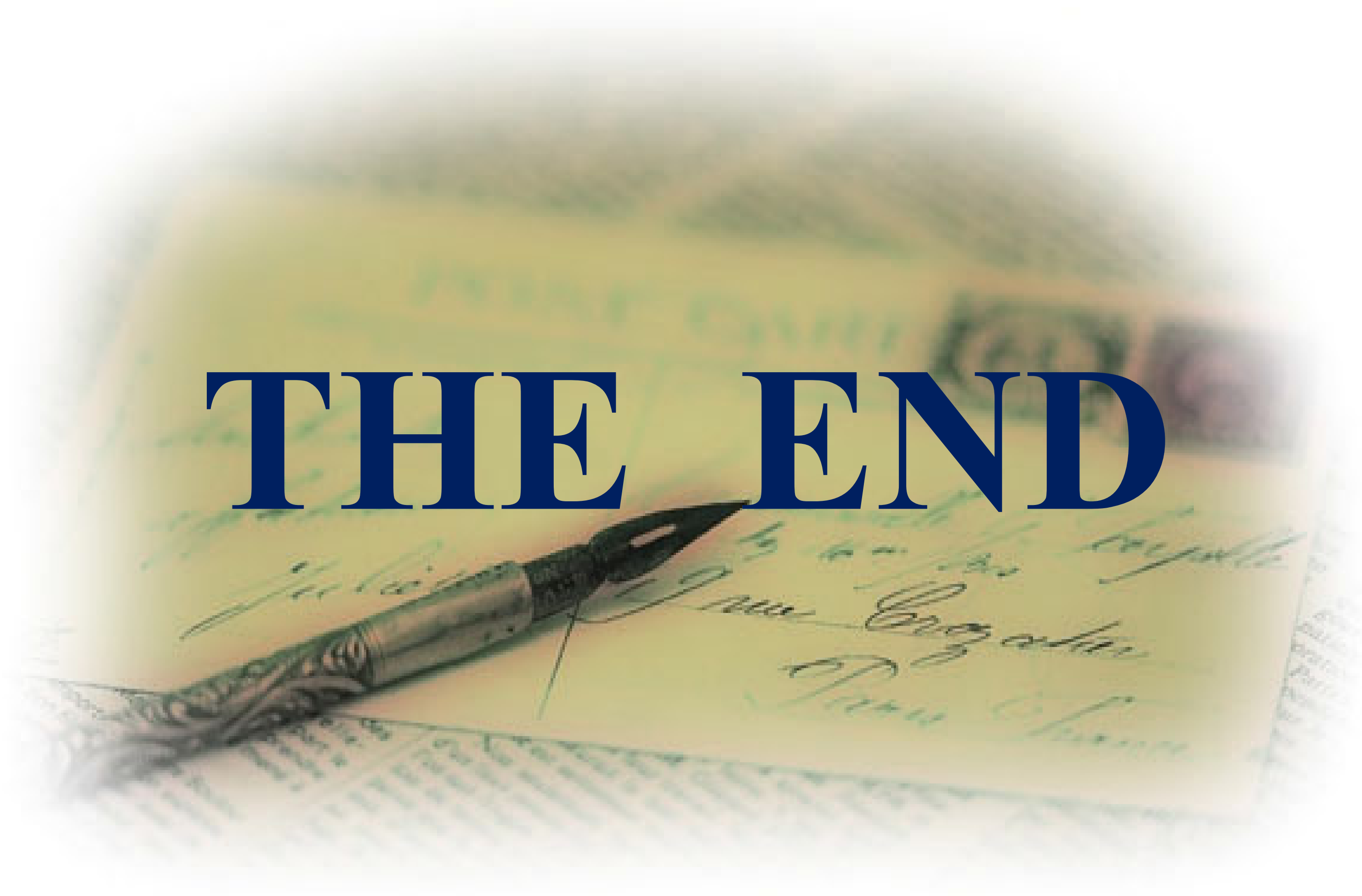
解：设个网孔电流如图所示，则可列出网孔方程：



网孔1：
网孔2：

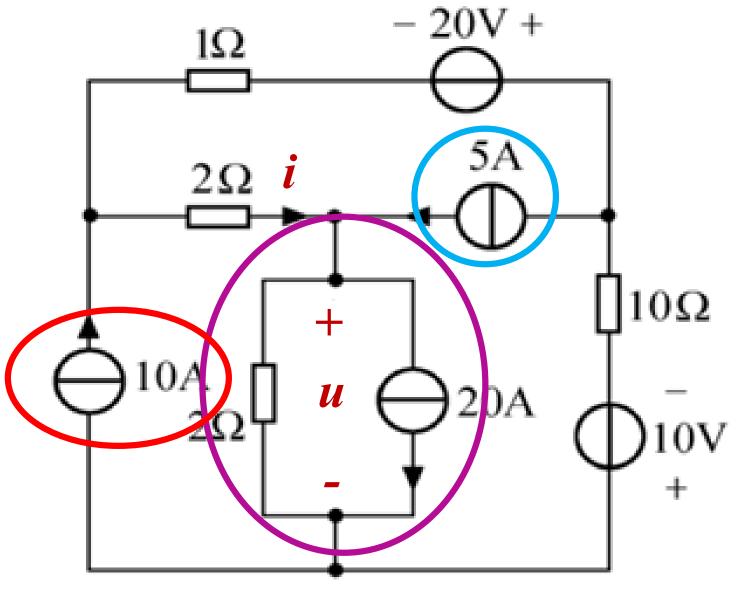
$$\begin{cases}(2+4)i_{m1}-4i_{m2}=12\\ -4i_{m1}+(4+6)i_{m2}=2u\end{cases}$$

列辅助方程，将受控源的控制量u用网孔电流表示　$u=4(i_{m1}-i_{m2})$

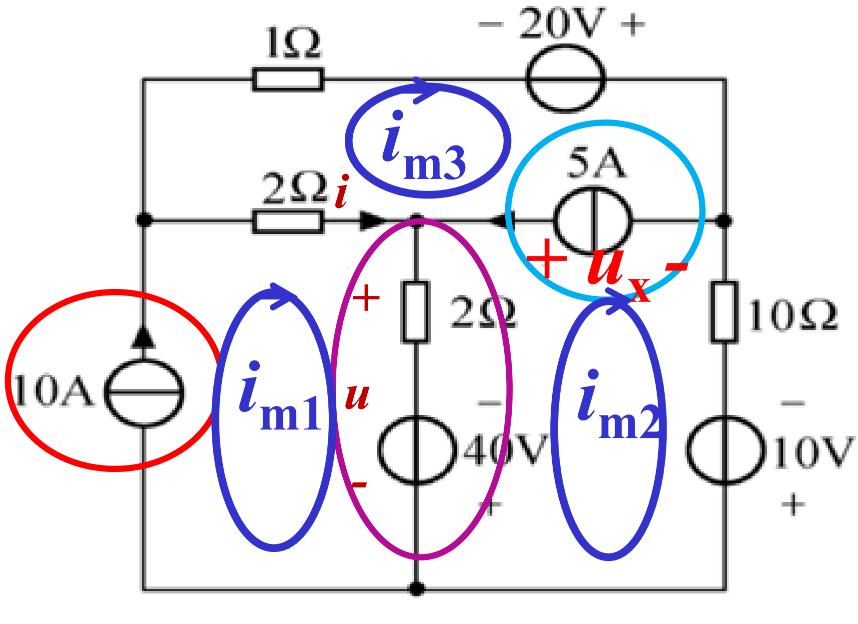


THE END

【例2】电路如图a所示，用网孔分析法求电流$\boldsymbol{i}$和电压$\boldsymbol{u}$。



(a)



(b)

解：i_{m1}的方向与该10A电流源方向相同。

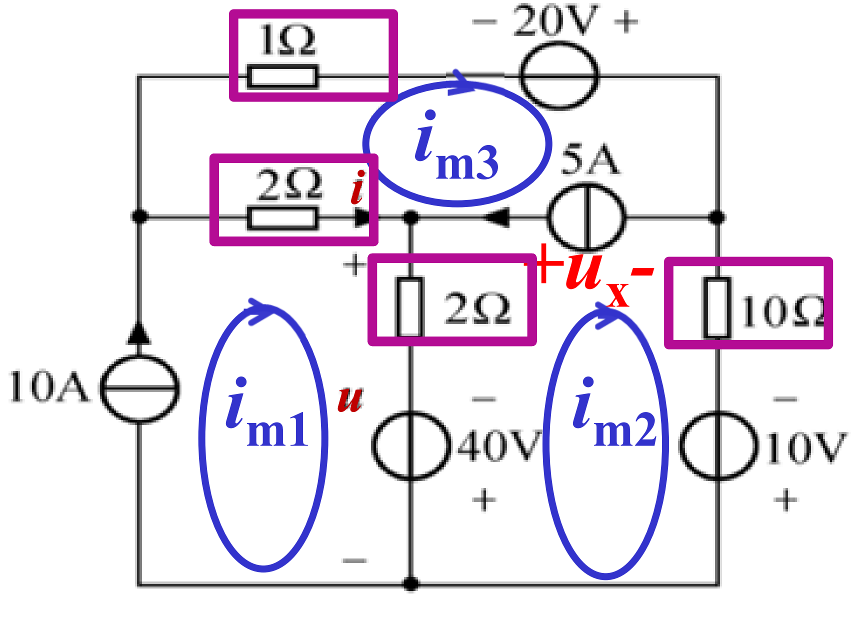
$$i_{m1}=10\text{A}$$

网孔1： $i_{m1}=10A$

网孔2： $-2i_{m1}+(2+10)i_{m2}=-40-u_x+10$

网孔3： $-2i_{m1}+(1+2)i_{m3}=20+u_x$

辅助方程： $i_{m3}-i_{m2}=5$



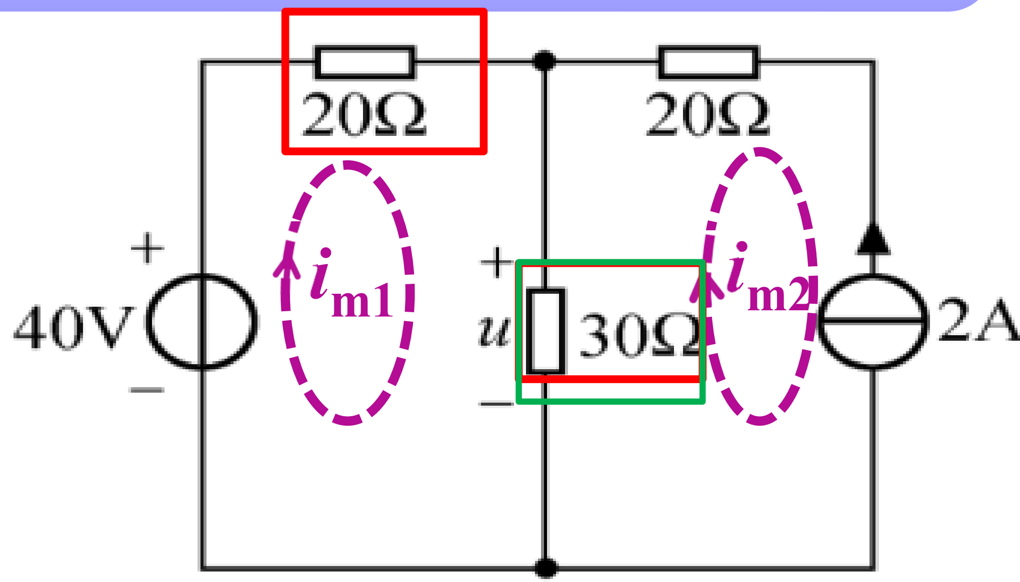
(b)

$i_{m2}=1A$	$i_{m3}=6A$

$i=i_{m1}-i_{m3}=10-6=4A$

$u=2\times(i_{m1}-i_{m2})-40=2\times(10-1)-40=-22V$

【例1】电路如图所示，试用网孔分析法求电压u。



解：（1）设网孔电流i_{m1}和i_{m2}

（2）直接列写网孔方程：

$$\begin{cases} i_{m2} = -2\text{A} \\ (20+30)\, i_{m1} - 30 i_{m2} = 40 \end{cases}$$

联立解得

$$i_{m1} = -0.4\text{A}$$

则

$$u = 30(i_{m1} - i_{m2}) = 30 \times 1.6 = 48\text{V}$$

节点分析法

一、节点分析法内容

n个节点，b条支路的电路：任选一个节点为参考节点(零电位)

其他节点与参考节点间的电压称为节点电压

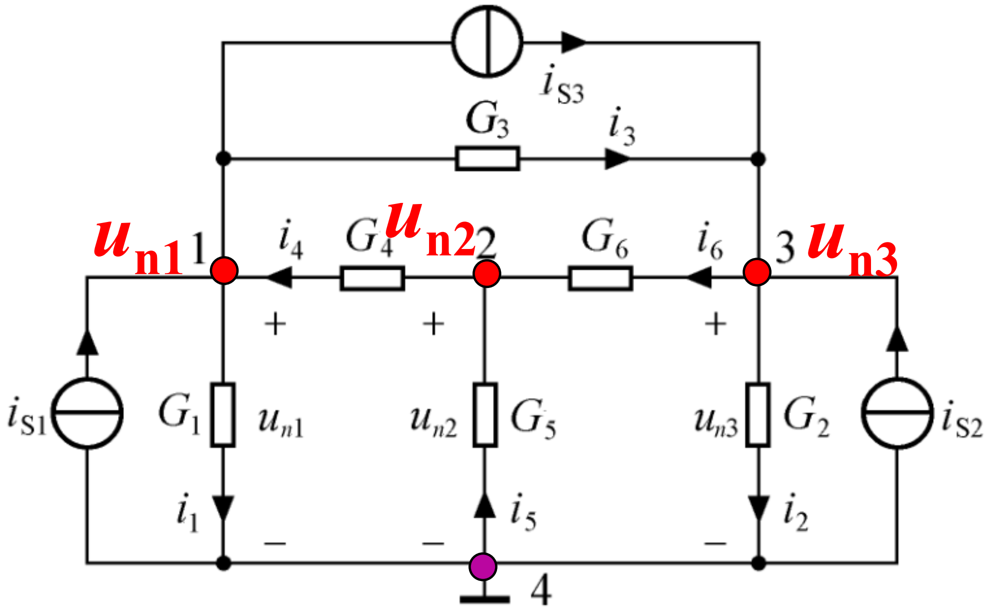
为了和支路电压区别，节点电压常用符号：u_{n1}, u_{n2}…表示

节点分析法：节点电压作为电路变量，直接列写独立节点的KCL方程，先解出节点电压进而求出响应的一种电路网络分析方法。

1、节点电压的性质：完备性与独立性

完备性：支路电压用节点电压表示出来。

设4为参考节点，各支路电压与电流取关联参考方向



$$u_1 = u_{n1}$$

$$u_2 = u_{n3}$$

$$u_3 = u_{n1} - u_{n3}$$

$$u_4 = u_{n2} - u_{n1}$$

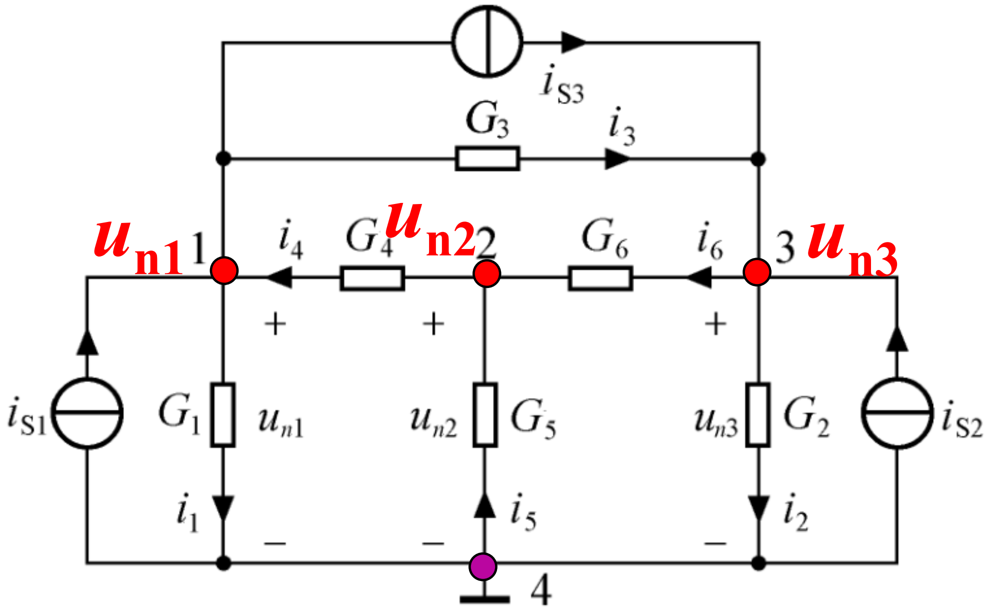
$$u_5 = -u_{n2}$$

$$u_6 = u_{n3} - u_{n2}$$

1、节点电压的性质：

独立性：

与参考节点相连的各支路不能构成闭合回路



各节点电压不受**KVL**的约束

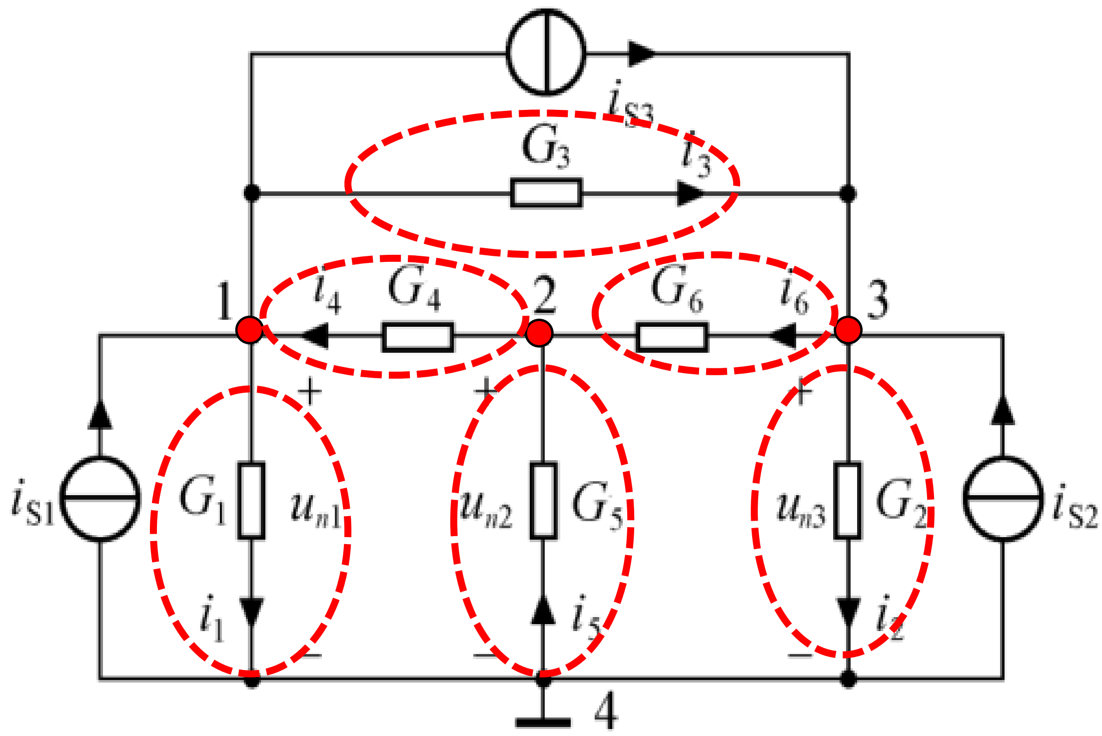
节点电压是一组独立的变量

2、节点电压的列写

将支路电流用节点电压表示：

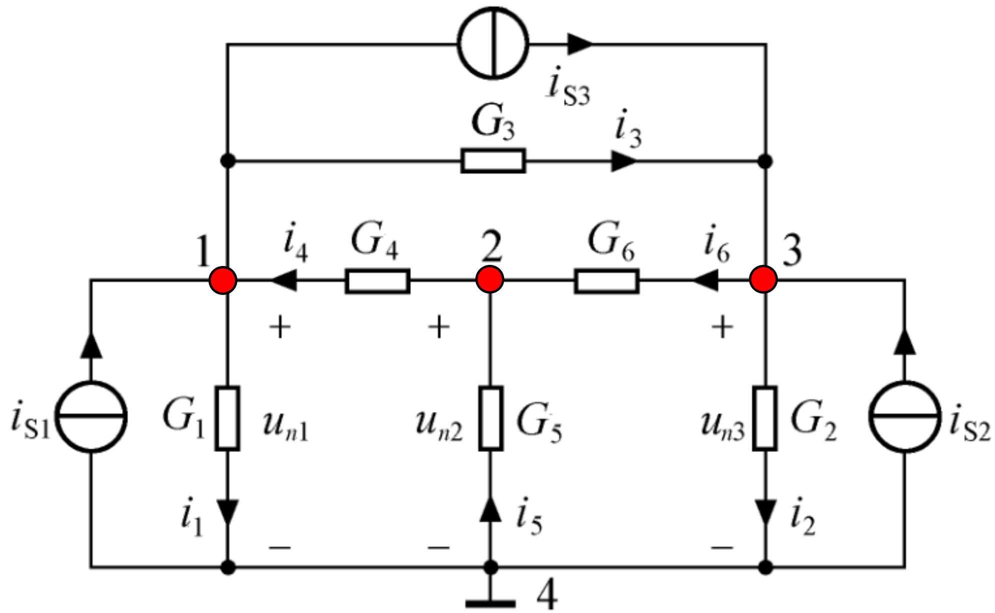
$$u_2 = u_{n3}$$
$$u_3 = u_{n1} - u_{n3}$$
$$u_4 = u_{n2} - u_{n1}$$
$$u_5 = -u_{n2}$$
$$u_6 = u_{n3} - u_{n2}$$

$$\begin{cases} i_1 = G_1 u_{n1} \\ i_2 = G_2 u_{n3} \\ i_3 = G_3(u_{n1} - u_{n3}) \\ i_4 = G_4(u_{n2} - u_{n1}) \\ i_5 = -G_5 u_{n2} \\ i_6 = G_6(u_{n3} - u_{n2}) \end{cases}$$



节点1,2,3的KCL方程

$$\begin{cases} -i_{S1}+i_1+i_3+i_{S3}-i_4=0 & \text{节点1} \\ i_4-i_5-i_6=0 & \text{节点2} \\ -i_{S2}+i_2-i_3-i_{S3}+i_6=0 & \text{节点3} \end{cases}$$



$i_1=G_1u_{n1}$， $i_2=G_2u_{n3}$， $i_3=G_3(u_{n1}-u_{n3})$

$i_4=G_4(u_{n2}-u_{n1})$， $i_5=-G_5u_{n2}$， $i_6=G_6(u_{n3}-u_{n2})$

整理如下：

$$\begin{cases} (G_1+G_3+G_4)u_{n1}-G_4u_{n2}-G_3u_{n3}=i_{S1}-i_{S3} \\ -G_4u_{n1}+(G_4+G_5+G_6)u_{n2}-G_6u_{n3}=0 \\ -G_3u_{n1}-G_6u_{n2}+(G_2+G_3+G_6)u_{n3}=i_{S2}+i_{S3} \end{cases}$$

$$\begin{cases}\boxed{(G_1+G_3+G_4)}u_{\mathrm{n1}}-G_4u_{\mathrm{n2}}-G_3u_{\mathrm{n3}}=i_{\mathrm{S1}}-i_{\mathrm{S3}}\\-G_4u_{\mathrm{n1}}+\boxed{(G_4+G_5+G_6)}u_{\mathrm{n2}}-G_6u_{\mathrm{n3}}=0\\-G_3u_{\mathrm{n1}}-G_6u_{\mathrm{n2}}+\boxed{(G_2+G_3+G_6)}u_{\mathrm{n3}}=i_{\mathrm{S2}}+i_{\mathrm{S3}}\end{cases}$$

主对角线系数：

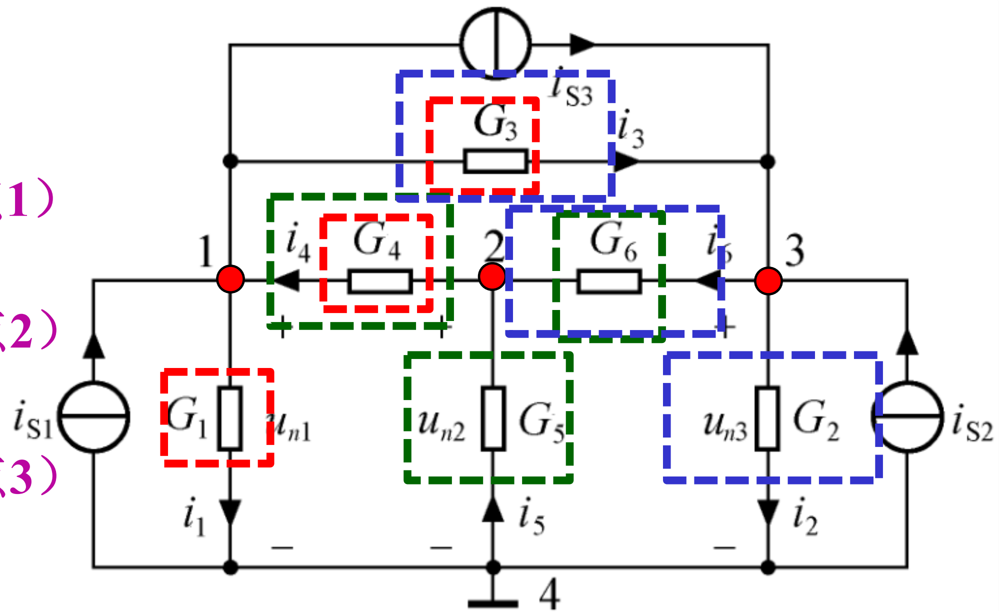
$$G_{11}=G_1+G_3+G_4$$

$$G_{22}=G_4+G_5+G_6$$

$$G_{33}=G_2+G_3+G_6$$

节点方程标准形式：

$$\begin{cases}\boxed{G_{11}}u_{\mathrm{n1}}+G_{12}u_{\mathrm{n2}}+G_{13}u_{\mathrm{n3}}=i_{\mathrm{Sn1}} & \text{（节点1）}\\G_{21}u_{\mathrm{n1}}+\boxed{G_{22}}u_{\mathrm{n2}}+G_{23}u_{\mathrm{n3}}=i_{\mathrm{Sn2}} & \text{（节点2）}\\G_{31}u_{\mathrm{n1}}+G_{32}u_{\mathrm{n2}}+\boxed{G_{33}}u_{\mathrm{n3}}=i_{\mathrm{Sn3}} & \text{（节点3）}\end{cases}$$



G_{ii}—自电导，等于连接在对应节点上所有支路的电导之和，取正号。

$$\begin{cases}(G_1+G_3+G_4)u_{n1}-G_4u_{n2}-G_3u_{n3}=i_{S1}-i_{S3}\\-G_4u_{n1}+(G_4+G_5+G_6)u_{n2}-G_6u_{n3}=0\\-G_3u_{n1}-G_6u_{n2}+(G_2+G_3+G_6)u_{n3}=i_{S2}+i_{S3}\end{cases}$$

非主对角线系数：

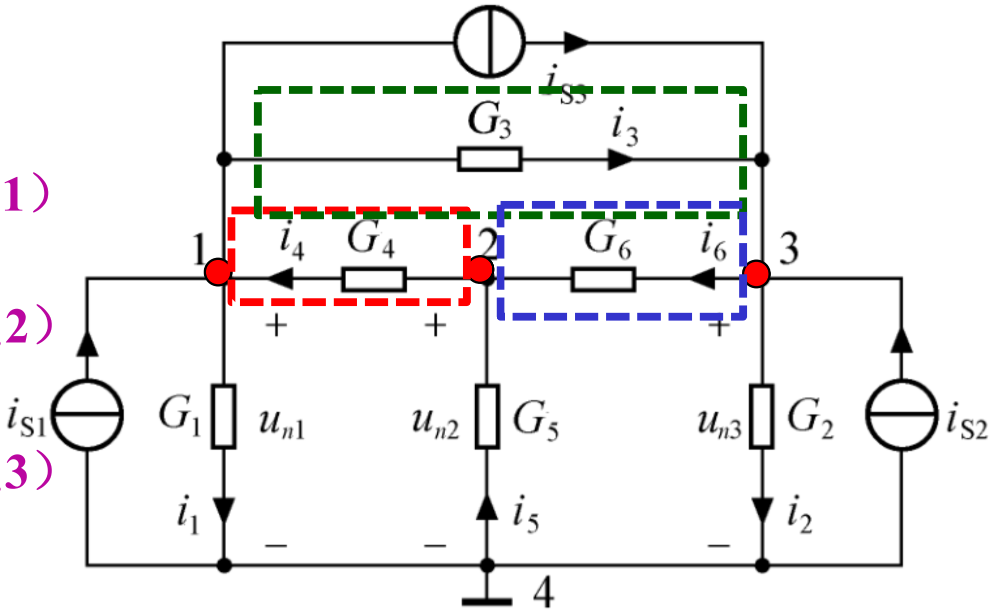
$$G_{12}=G_{21}=-G_4$$

$$G_{13}=G_{31}=-G_3$$

$$G_{23}=G_{32}=-G_6$$

节点方程标准形式：

$$\begin{cases}G_{11}u_{n1}+G_{12}u_{n2}+G_{13}u_{n3}=i_{Sn1} & \text{（节点1）}\\G_{21}u_{n1}+G_{22}u_{n2}+G_{23}u_{n3}=i_{Sn2} & \text{（节点2）}\\G_{31}u_{n1}+G_{32}u_{n2}+G_{33}u_{n3}=i_{Sn3} & \text{（节点3）}\end{cases}$$



G_{ij}—互电导，对应两节点相连的所有支路的电导之和，取负号。

$$\begin{cases}(G_1+G_3+G_4)u_{n1}-G_4u_{n2}-G_3u_{n3}=\boxed{i_{S1}-i_{S3}}\\ -G_4u_{n1}+(G_4+G_5+G_6)u_{n2}-G_6u_{n3}=\boxed{0}\\ -G_3u_{n1}-G_6u_{n2}+(G_2+G_3+G_6)u_{n3}=\boxed{i_{S2}+i_{S3}}\end{cases}$$

方程右边系数：

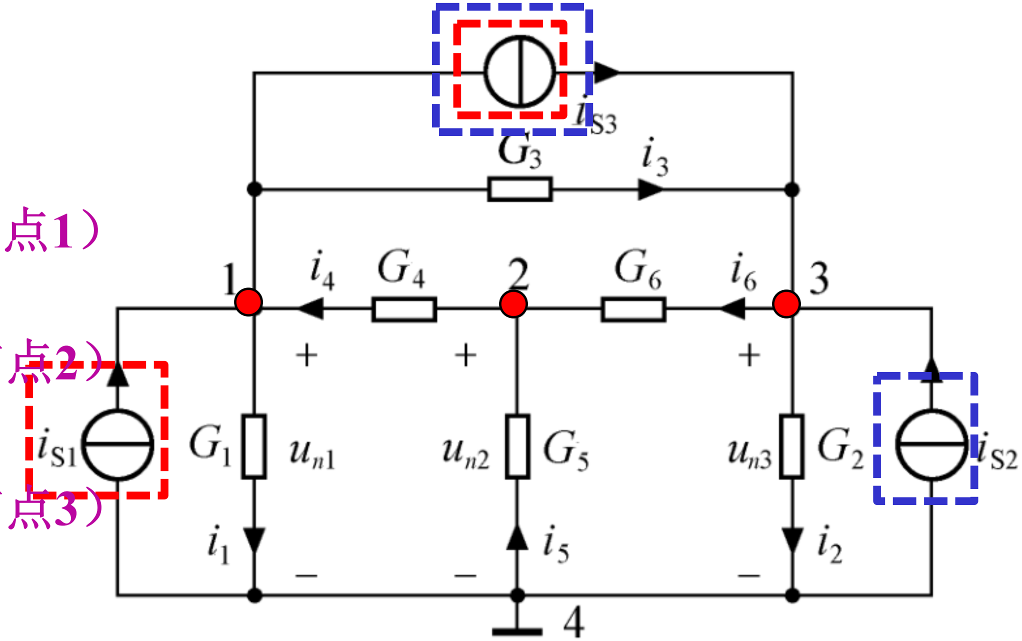
$$i_{Sn1}=i_{S1}-i_{S3}$$

$$i_{Sn2}=0$$

$$i_{Sn3}=i_{S2}+i_{S3}$$

节点方程标准形式：

$$\begin{cases}G_{11}u_{n1}+G_{12}u_{n2}+G_{13}u_{n3}=\boxed{i_{Sn1}} & \text{（节点1）}\\ G_{21}u_{n1}+G_{22}u_{n2}+G_{23}u_{n3}=\boxed{i_{Sn2}} & \text{（节点2）}\\ G_{31}u_{n1}+G_{32}u_{n2}+G_{33}u_{n3}=\boxed{i_{Sn3}} & \text{（节点3）}\end{cases}$$



i_{Sn}—流入对应节点电流源的代数和， 流入为正，流出为负。

标准形式的方程：

$$\begin{cases} G_{11}u_{n1}+G_{12}u_{n2}+G_{13}u_{n3}=i_{Sn1} \\ G_{21}u_{n1}+G_{22}u_{n2}+G_{23}u_{n3}=i_{Sn2} \\ G_{31}u_{n1}+G_{32}u_{n2}+G_{33}u_{n3}=i_{Sn3} \end{cases}$$

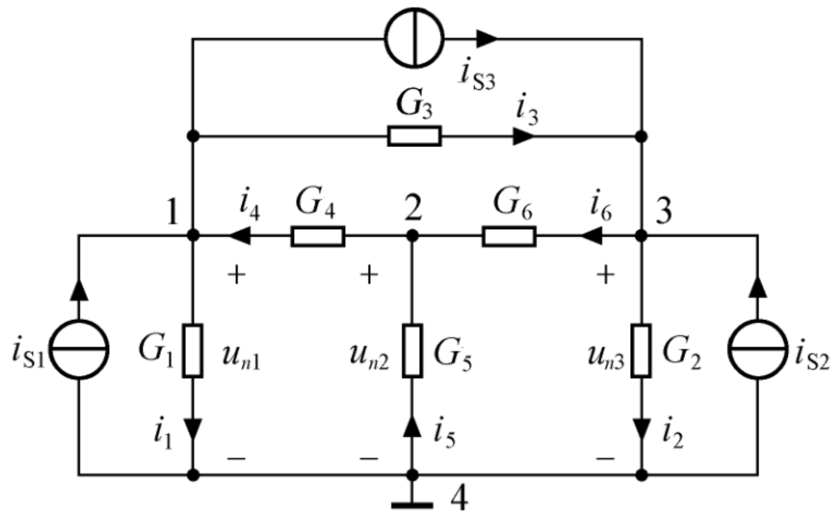
节点法方程的规则：

自电导 × 本节点的节点电压 +∑ (互电导 × 相邻节点的节点电压) =流入本节点电流源电流的代数和。

注意：

1.自电导，互电导指支路的电导，如果给的是电阻，需要求倒数。

2.与电流源（受控电流源）相串联的电导不能计入自电导或者互电导。



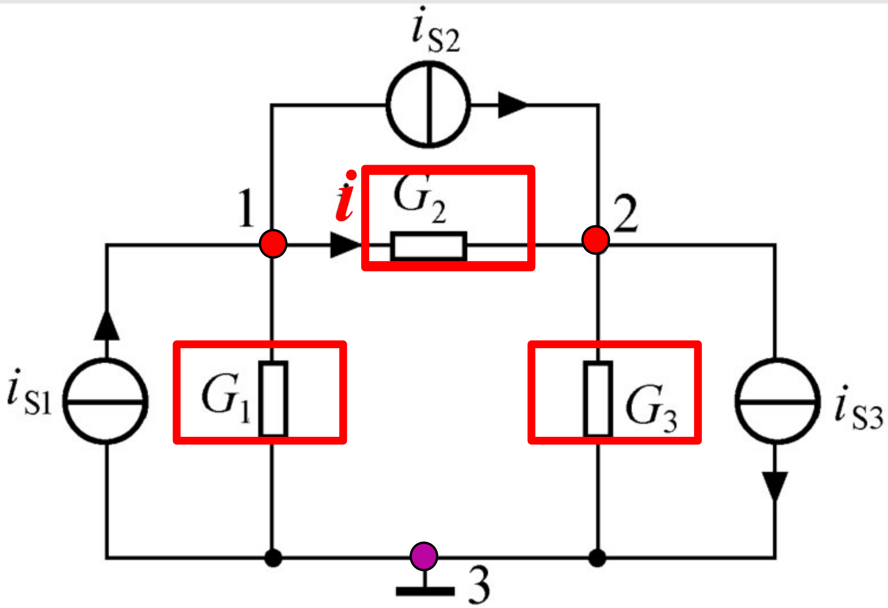
2、节点分析法主要步骤：

1、选定参考节点（零电位），以节点电压作为未知变量；

2、直接列节点方程，求取节点电压；

3、求支路电压或其它响应；

【例1】i_{s1}=9A，i_{s2}=5A，i_{s3}=6A，G_1=1S,G_2 =2S，G_3=1S，用节点分析法求电路中的电流i。



解：（1）选3为参考节点

（2）直接列写节点方程：

$$\begin{cases}(G_1+G_2)u_{n1}-G_2u_{n2}=i_{S1}-i_{S2}\\-G_2u_{n1}+(G_2+G_3)u_{n2}=i_{S2}-i_{S3}\end{cases}$$

$$\begin{cases}3u_{n1}-2u_{n2}=4\\-2u_{n1}+3u_{n2}=-1\end{cases}\qquad\begin{cases}u_{n1}=2\text{V}\\u_{n2}=1\text{V}\end{cases}$$

3）求电流 i

$$i=G_2(u_{n1}-u_{n2})=2\times(2-1)=2\text{A}$$

3、含有电压源网络的节点方程：

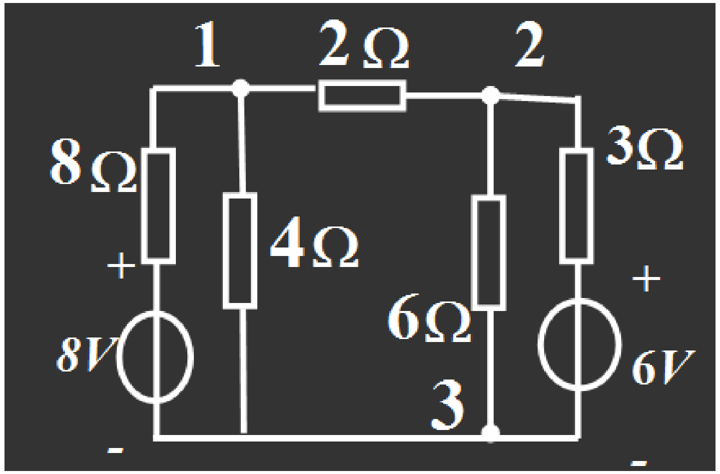
电压源处理方法：

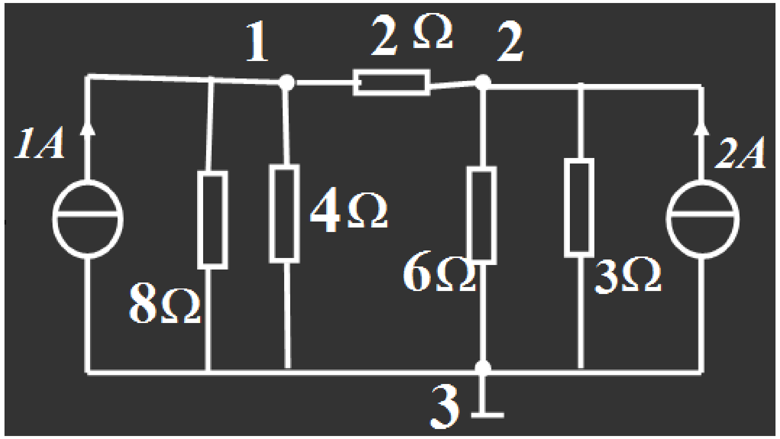
（1）有伴时：化为诺顿电路；

（2）无伴时：（a）如可令其一端为参考节点，则另一端的节点电压可由电压源直接得到；

（b）如不能令其一端为参考节点，则可设电压源上的电流为i_x，电压源当做i_x的电流源处理，加列辅助方程(**此电压源电压用节点电压表示）；

例2 列含有伴电压源网络的节点方程



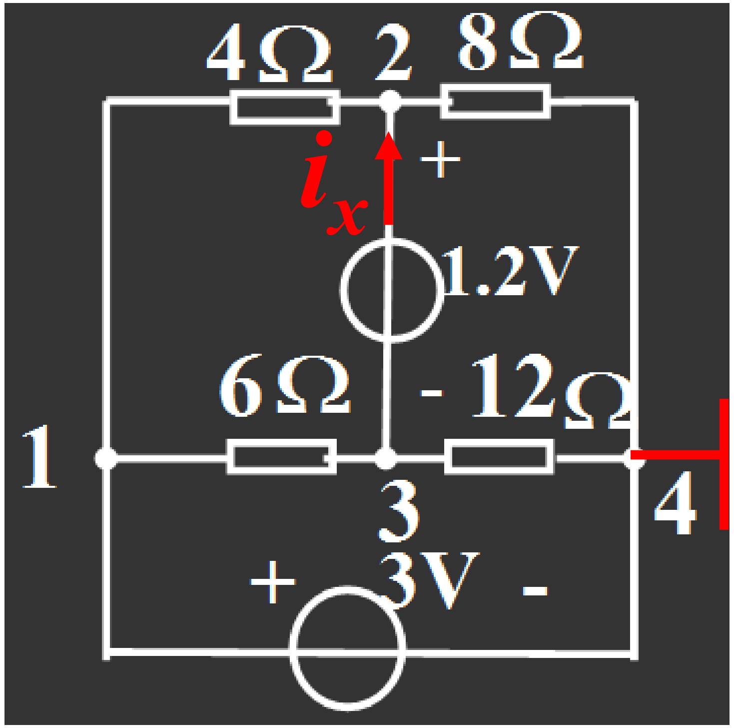


解：设3为参考节点，戴维南电路化为诺顿电路

节点1： $$(\frac{1}{8}+\frac{1}{4}+\frac{1}{2})u_{n1}-\frac{1}{2}u_{n2}=1$$

节点2： $$-\frac{1}{2}u_{n1}+(\frac{1}{2}+\frac{1}{6}+\frac{1}{3})u_{n2}=2$$

例3列写节点电压



含2个无伴电压源；

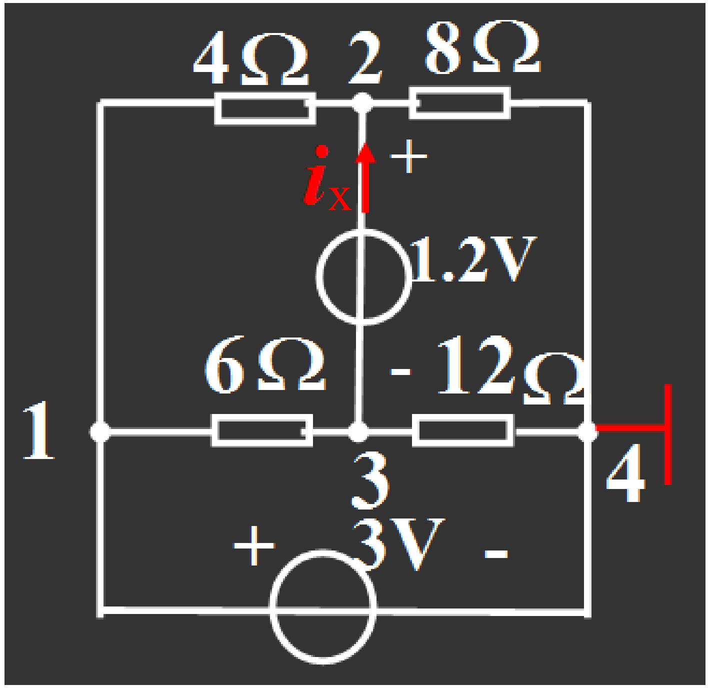
电压源处理方法：

（1）有伴时：化为诺顿电路(上例)；

（2）无伴时：（a）如可令其一端为参考节点，则另一端的节点电压可由电压源直接得到；

（b）如不能令其一端为参考节点，则可设电压源上的电流为i_x，电压源当做i_x的电流源处理，加列辅助方程（**此电压源电压用节点电压表示）；

解：选3V负端节点4为参考节点，设1.2V上电流为i_x



列节点方程

节点1 $u_{n1}=3V$

节点2 $-\frac{1}{4}u_{n1}+(\frac{1}{4}+\frac{1}{8})u_{n2}=i_x$

节点3 $-\frac{1}{6}u_{n1}+(\frac{1}{6}+\frac{1}{12})u_{n3}=-i_x$

辅助方程 $u_{n2}-u_{n3}=1.2$

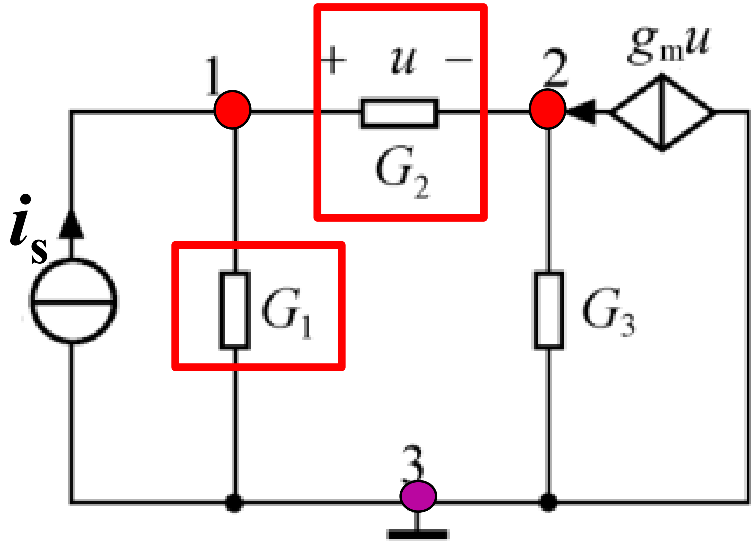
2、含受控源网络的节点方程

（1）列节点方程：受控源按独立源处理；

（2）列辅助方程：控制量用节点电压表示。

【例3】试列出下图所示电路的节点方程。

解：（1）选3为参考节点，则节点电压方程为



节点1：$(G_1+G_2)u_{n1}-G_2u_{n2}=i_S$

节点2：$-G_2u_{n1}-(G_2+G_3)u_{n2}=g_m u$

（2）辅助方程：

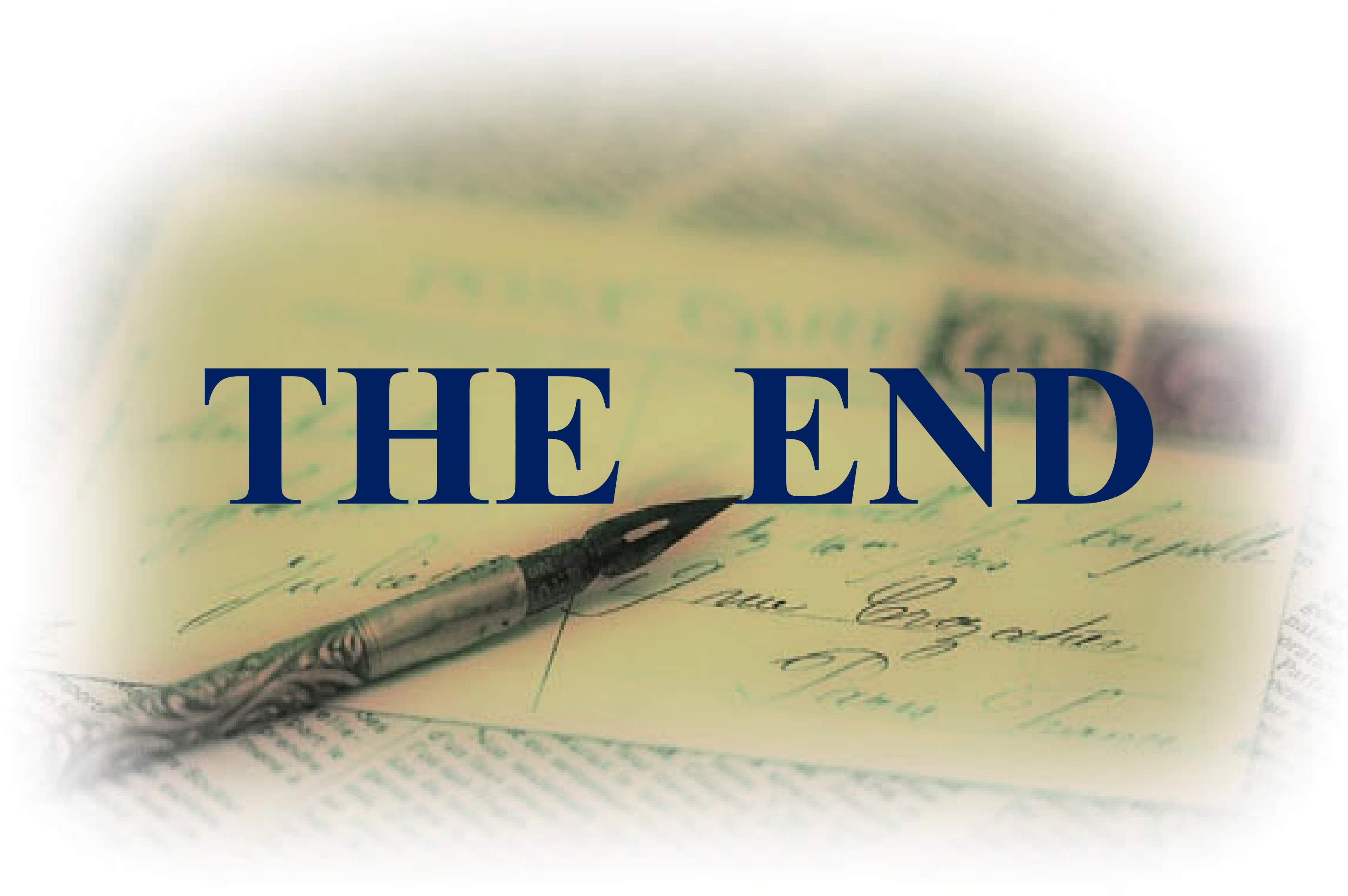
$$u=u_{n1}-u_{n2}$$

（控制量用节点电压表示）

分析法	支路法	网孔法	节点法
基本变量	支路电流 支路电压	网孔电流	节点电压
分析依据	**KCL, KVL** **VCR**	**KVL** **VCR**	**KCL** **VCR**
变量数	**b**	**b-(n-1)**	**n-1**
方程形式	**n-1个KCL方程** **b-(n-1)个KVL方程**	$\sum_{j=1}^{m} R_{ij} I_j = u_{Si}$	$\sum_{j=1}^{n-1} G_{ij} u_{nj} = i_{Si}$

1. 网络中，网孔数少于节点，选择网孔法；反之，节点法

2.电流源多，列节点方程较方便；电压源多，则列网孔方程较方便。

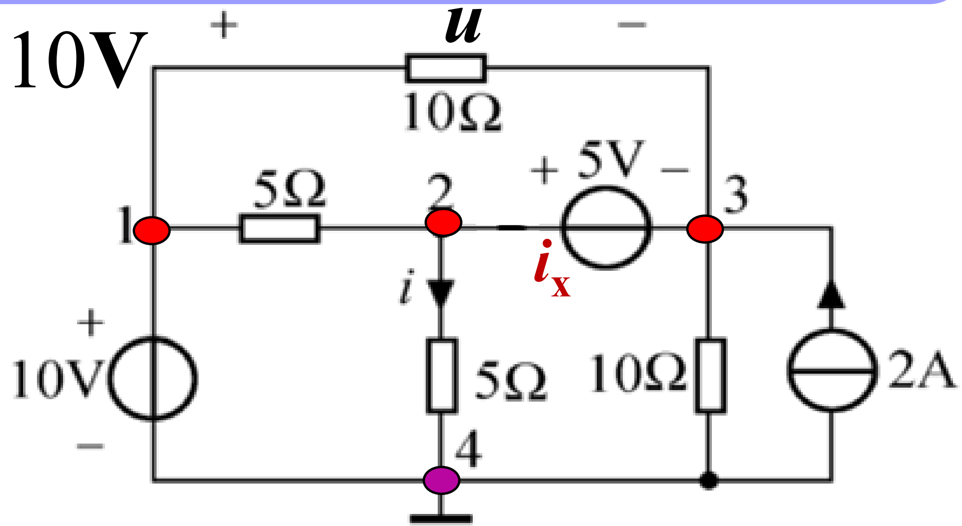


THE END

【例4】电路如下图所示，试用节点分析法求电路中的电压u和电流i。

解：（1）选4为参考节点，则 $u_{n1}=10\text{V}$

（2）设流过5V电压源的电流i_x：

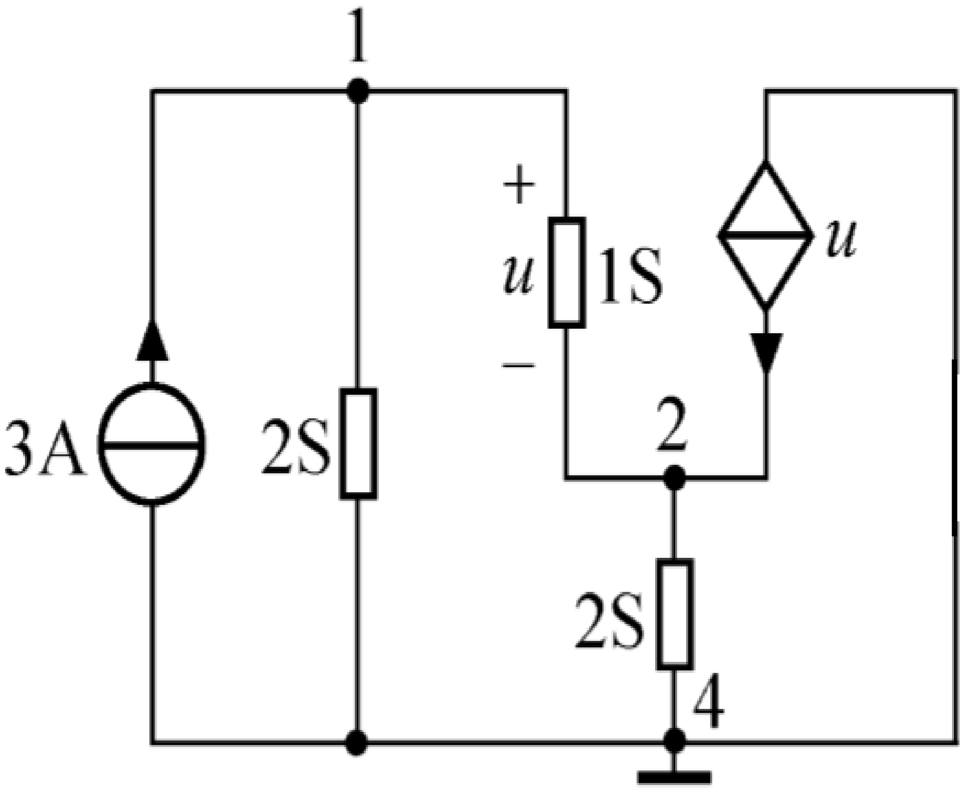


$$\begin{cases} u_{n1}=10\text{V} \\ -\dfrac{1}{5}u_{n1}+\left(\dfrac{1}{5}+\dfrac{1}{5}\right)u_{n2}=-i_x \\ -\dfrac{1}{10}u_{n1}+\left(\dfrac{1}{10}+\dfrac{1}{10}\right)u_{n3}=i_x+2 \\ u_{n2}-u_{n3}=5\text{V} \end{cases}$$

$$\begin{cases} u_{n2}=10\text{V} \\ u_{n3}=5\text{V} \end{cases}$$

$$u=u_{n1}-u_{n3}=5\text{V}$$

$$i=\frac{u_{n2}}{5}=\frac{10}{5}=2\text{A}$$



节点1： $(2+1)u_{n1}-u_{n2}=3$

节点2： $(1+2\cancel{+\ })u_{n2}-u_{n1}=u$

辅助方程：$u=u_{n1}-u_{n2}$

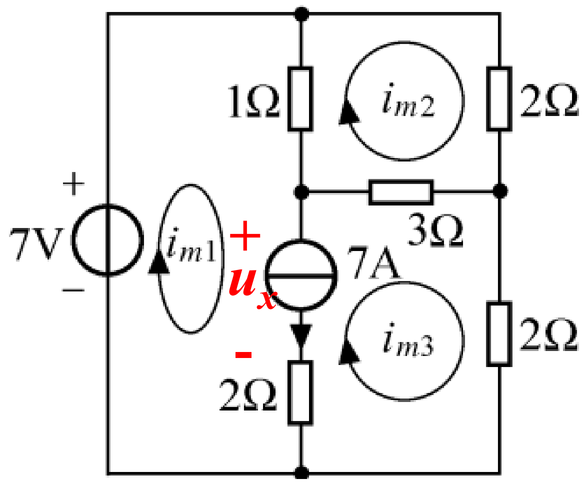
节点1： $(2+1)u_{n1}-u_{n2}=3$

节点2： $(1+2)u_{n2}-u_{n1}=u$

辅助方程：$u=u_{n1}-u_{n2}$

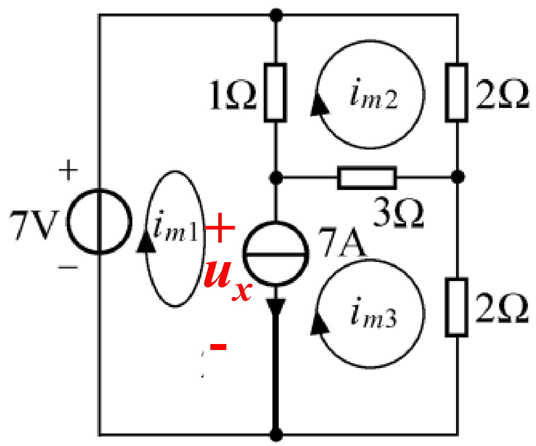
与（受控）电流源相连的电导不能计入自电导和互电导。

3-5(a) 电路如题图3-5所示，试列网孔方程。



解一：设电流源两端电压为u_x，参考方向如图所示。

$$
\begin{cases}
(1+2)i_{m1} - i_{m2} - 2i_{m3} = 7 - u_x \\
-i_{m1} + (1+2+3)i_{m2} - 3i_{m3} = 0 \\
-2i_{m1} - 3i_{m2} + (3+2+2)i_{m3} = u_x \\
i_{m1} - i_{m3} = 7
\end{cases}
$$



解二：7A电流源与2欧姆电阻串联，等效为7A电流源

$$
\begin{cases}
i_{m1} - i_{m2} = 7 - u_x \\
-i_{m1} + (1+2+3)i_{m2} - 3i_{m3} = 0 \\
-3i_{m2} + (3+2)i_{m3} = u_x \\
i_{m1} - i_{m3} = 7
\end{cases}
$$

独立电路变量的选择与独立方程的存在性

独立变量？

电路方程？

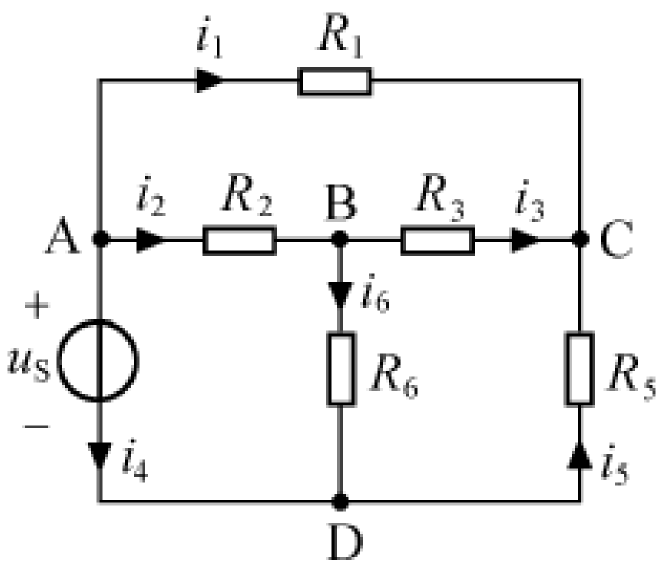
网络图论的一个重要应用：能够提供一个正确选取网络独立变量的方法。

网络图论的基本概念

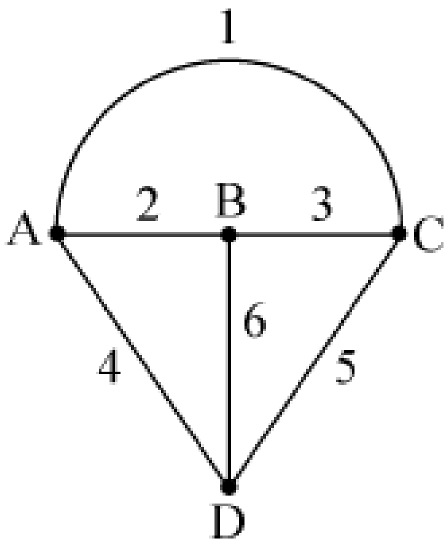
支路约束关系，与支路元件性质无关

- 拓扑支路：撇开元件的性质，将支路抽象为一根线段
- 拓扑节点：网络节点抽象为几何点
- 线图：点与线的集合

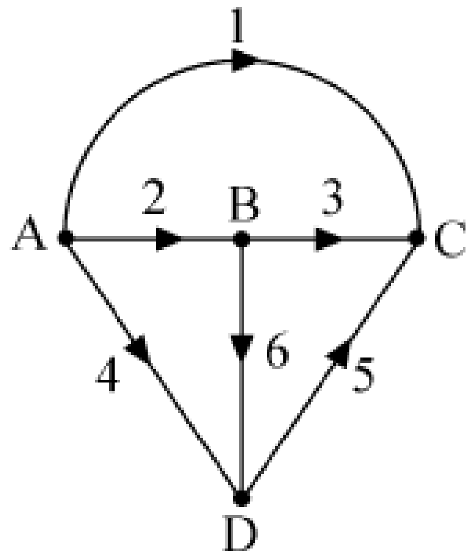
电路图　线图　有向图



（a）电路图

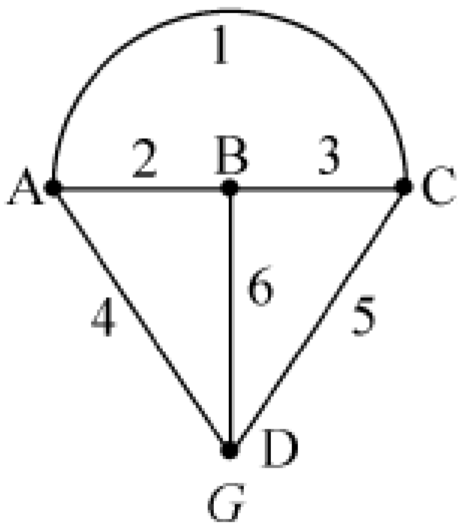


（b）对应线图



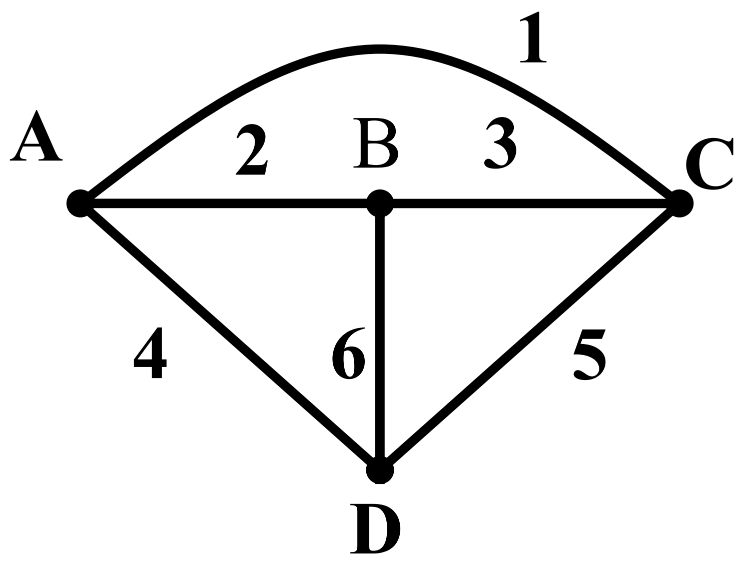
（c）有向图

子 图



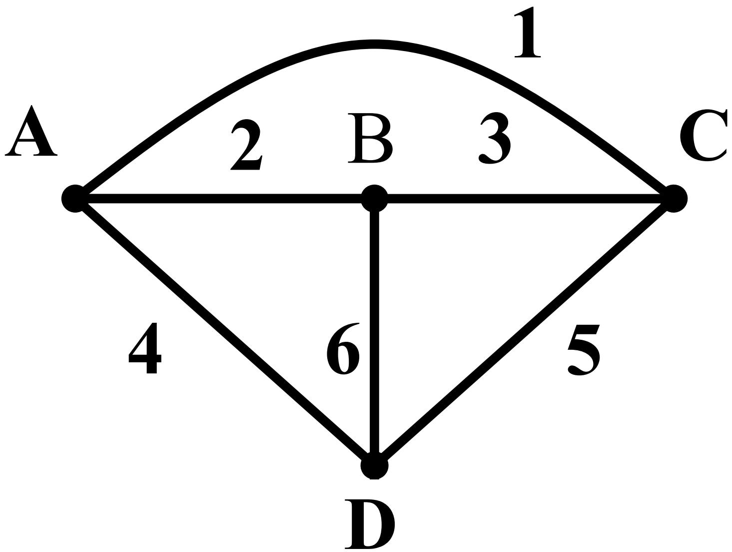
连通图

- 任意两节点间至少有一条由支路构成的路径；
- 只有1个独立部分



非连通图

➢至少有**2个独立部分**



割集

割集定义

连通图中的一组支路的集合，满足:

- 移去集合中所有支路(注意保留节点)，原连通图将分为两个独立部分;
- 保留集合中任一条支路，仍连通;

割集选取

对一个连通图G作闭合面（广义节点）

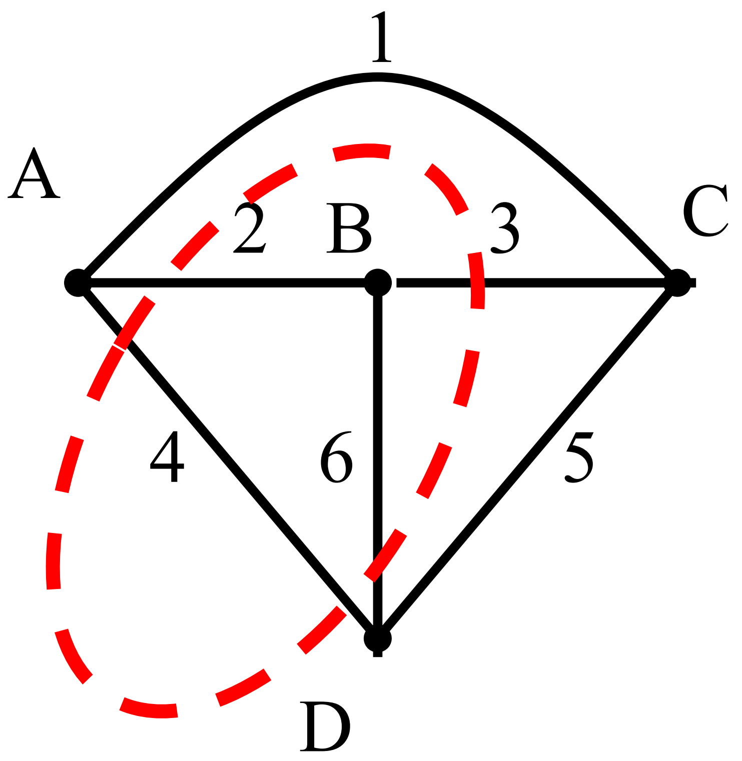
- 使其将图分割为两个部分;
- 只要少移去一条支路，图仍为连通的，则与闭合面相交支路的集合就是一个割集。

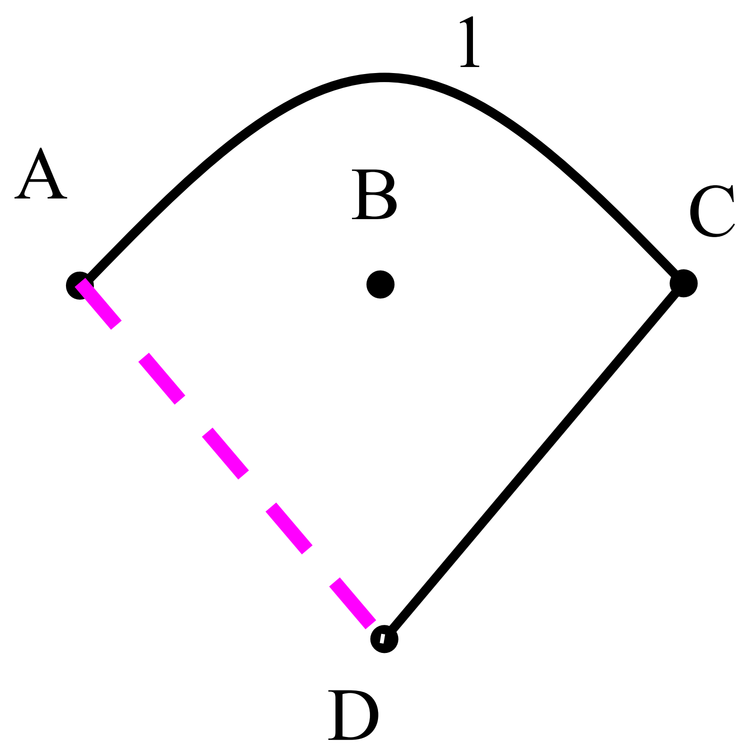
{4，5，6}

{2，3，6}

{1，2，5，6}

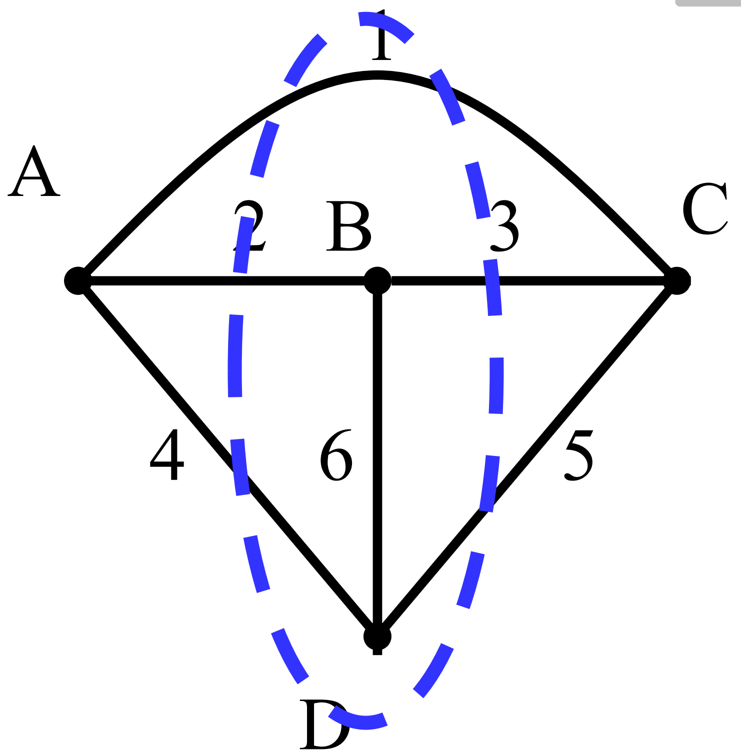
非割集： {2， 3， 4， 6}

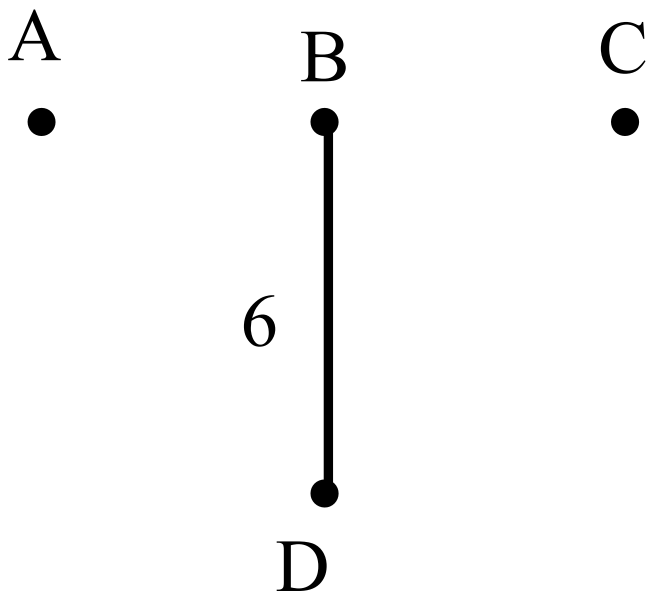




保留4仍为非连通

非割集：{1，2，3，4，5}





分成三个独立部分

树

连通图的特殊子图

- 连通图
- 含全部节点
- 无回路

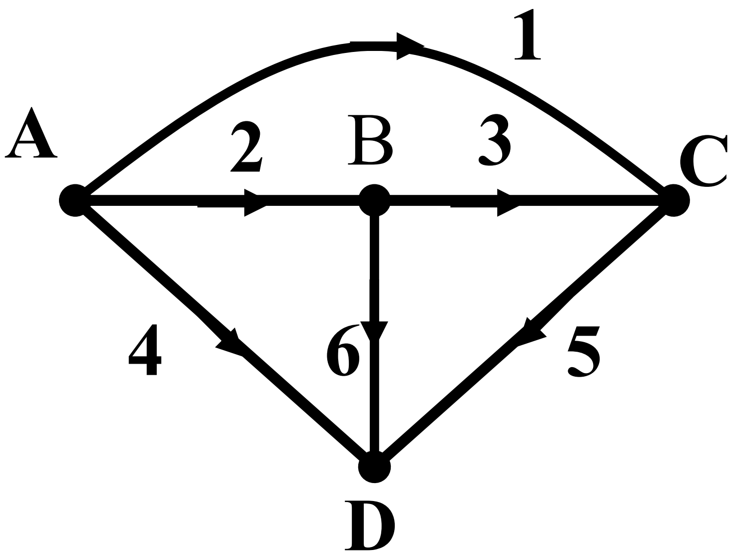
树支：构成树的支路；　树支的集合为树{ 2 , 6 , 5 }；　(n-1)

连支：余下的支路；　连支的集合为余树{ 1 , 3 , 4 }(补树)；

b-(n-1)

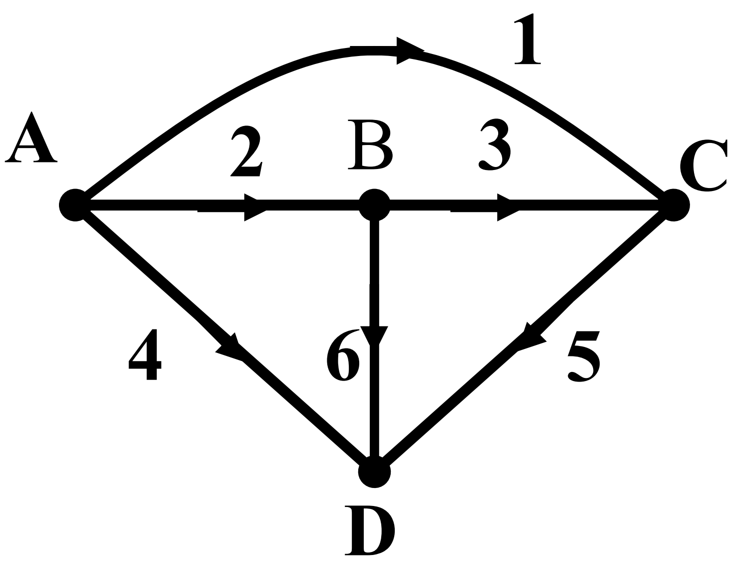
基本回路

- 只含一条连支，其余都是树支构成的回路（单连支回路）
- b-(n-1)个，方向为连支的方向



基本割集

- 只含一条树支，其余都是连支的割集（单树支割集）
- (n-1)个，方向为树支的方向。



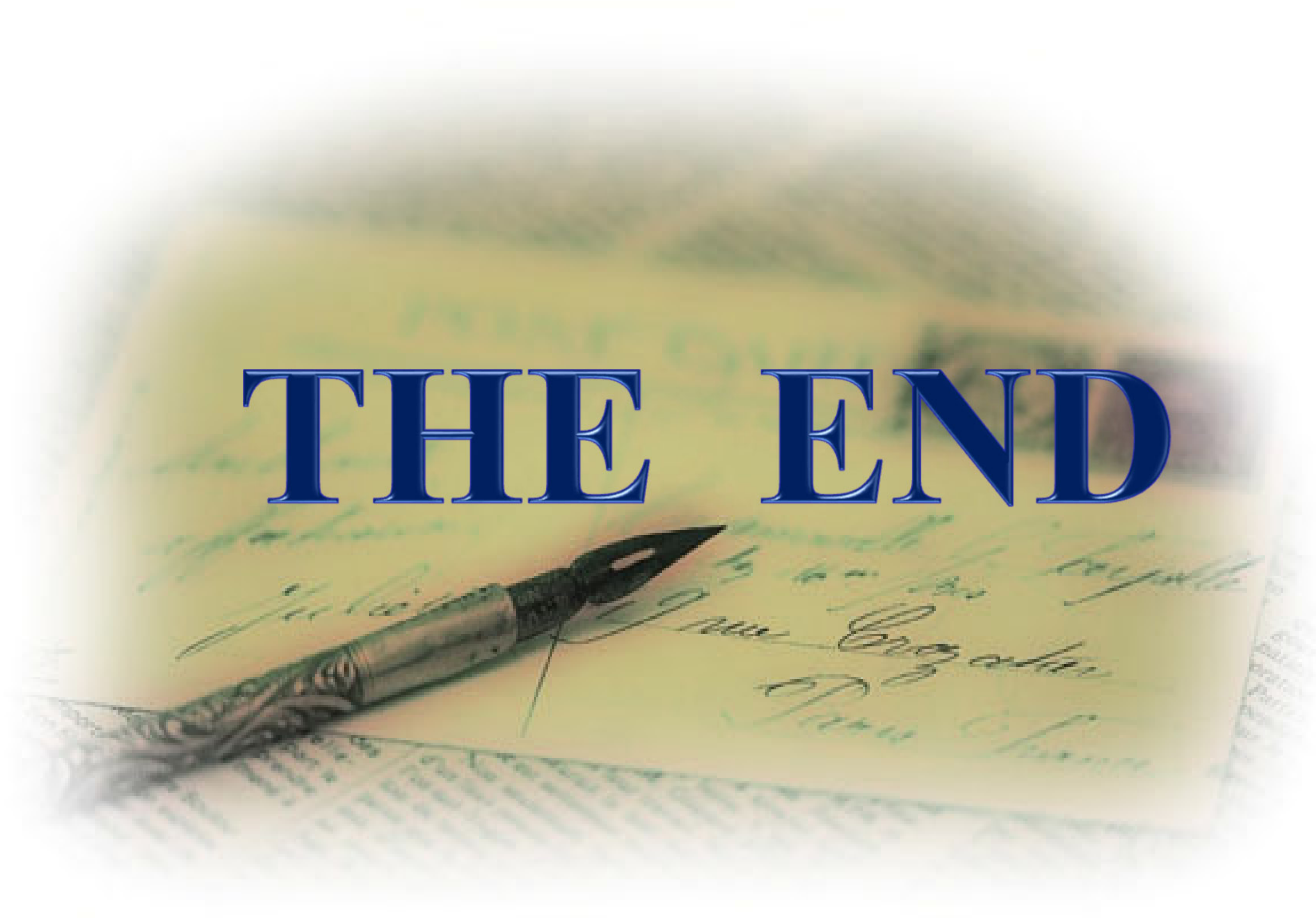
独立变量与独立方程

b-(n-1)个基本回路**KVL**方程是独立的；

(n-1)个基本割集**KCL**方程是独立的；

b-(n-1)个连支电流是一组独立完备的变量；

(n-1)个树支电压是一组独立而完备的变量。


THE END

3-7 电路的对偶特性与对偶电路

电路的对偶特性和对偶电路

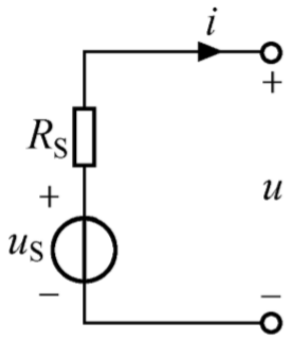
电路中的许多变量、元件、结构及定律等总是成对出现，存在一一对应关系，这种类比关系称为电路的对偶特性。

☞ 电路变量：电流↔电压

☞ 电路结构：节点↔网孔

电路定律：**KCL↔KVL**

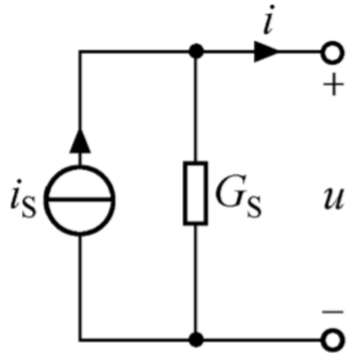
电路元件：电容**C**↔电感**L**
电阻**R**　电导**G**



拓扑对偶

元件对偶

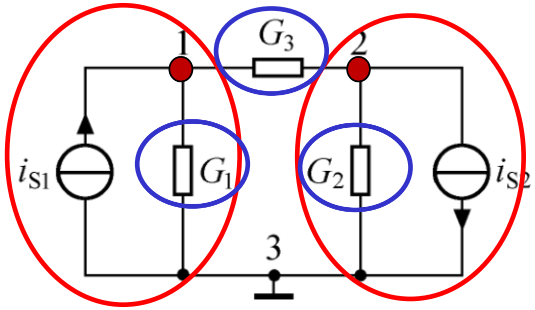
对偶电路



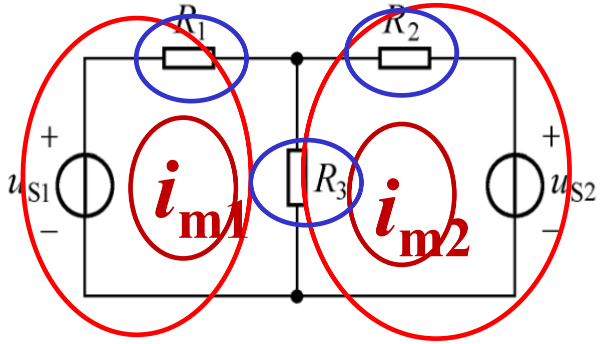
$$u = u_S - R_S i$$

$$i = i_S - G_S u$$

举例：图（a）(b)所示电路



(a) 电路 N



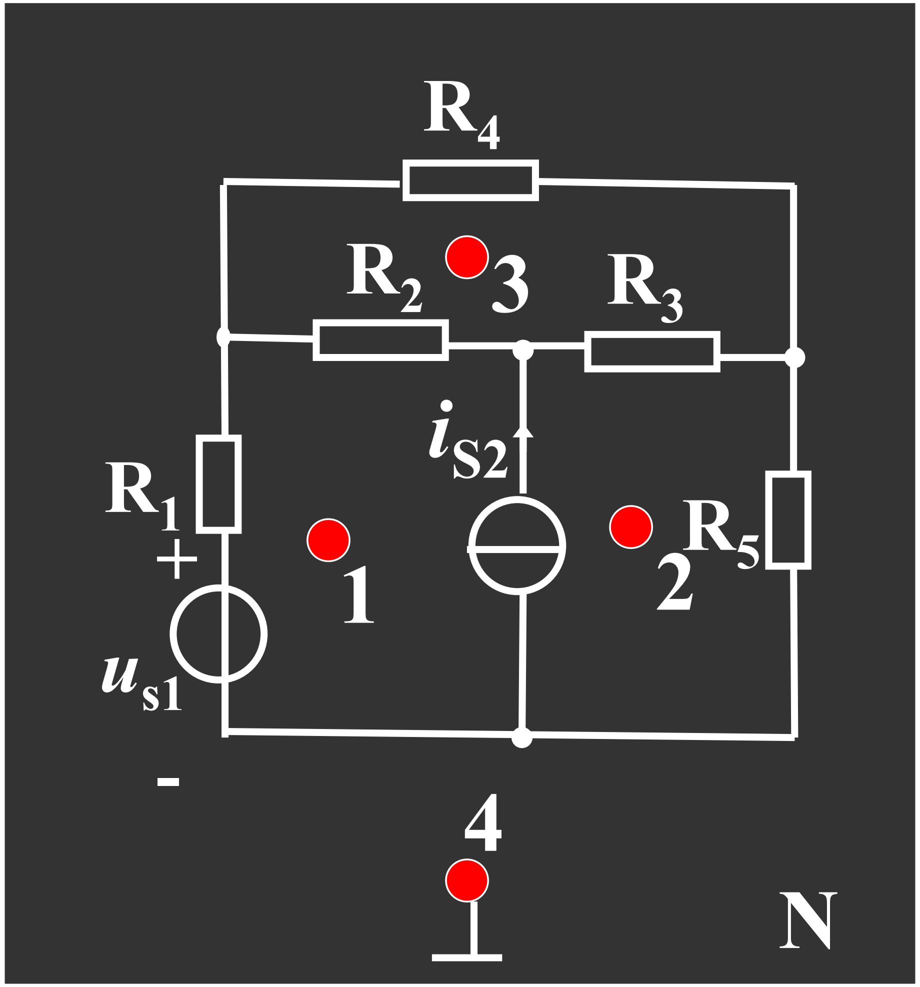
(b) 电路 N′

数学意义上相同

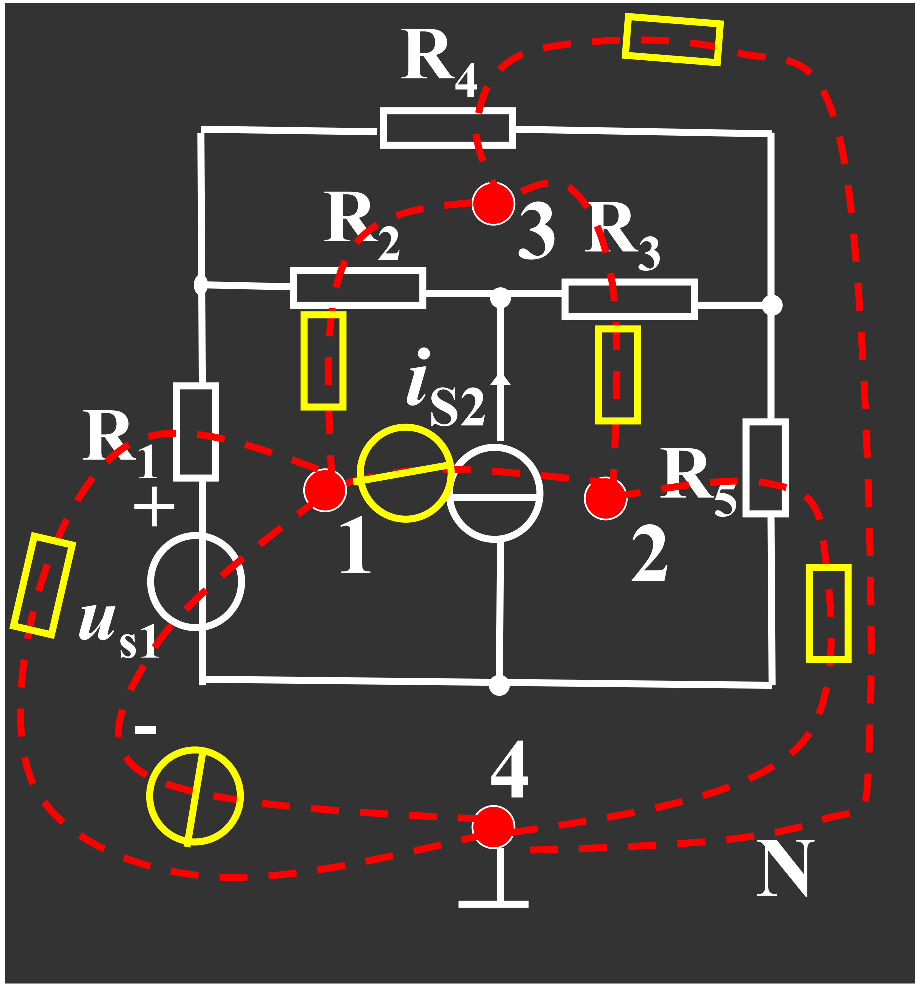
若对偶电路的对偶元件参数数值上相等，则只要求得其中一个电路的响应，即可同时得到其**对偶电路**的响应。

对偶电路的画法：

（1）N的每个网孔中安放N’的一个节点，N的外网孔对应N’的参考节点

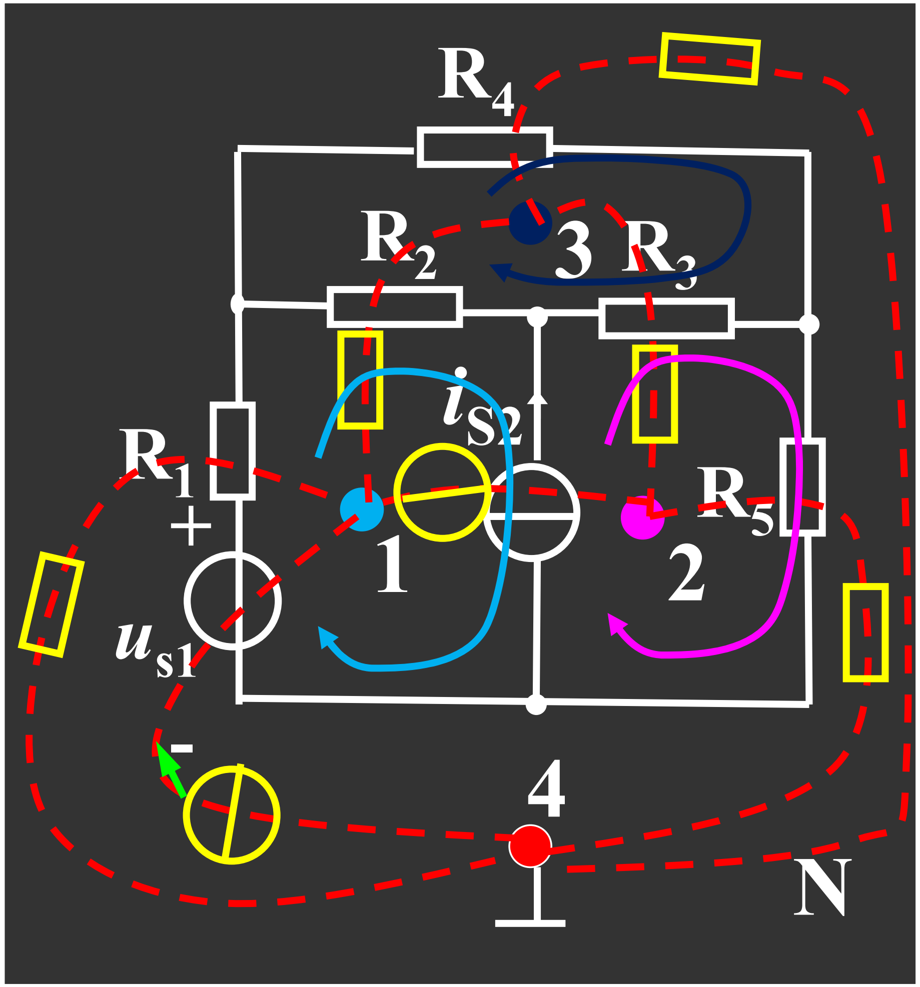


（2）穿过N的每个元件，用虚线将节点联起来，表示N’的一个支路，其元件是N中穿过元件的对偶元件

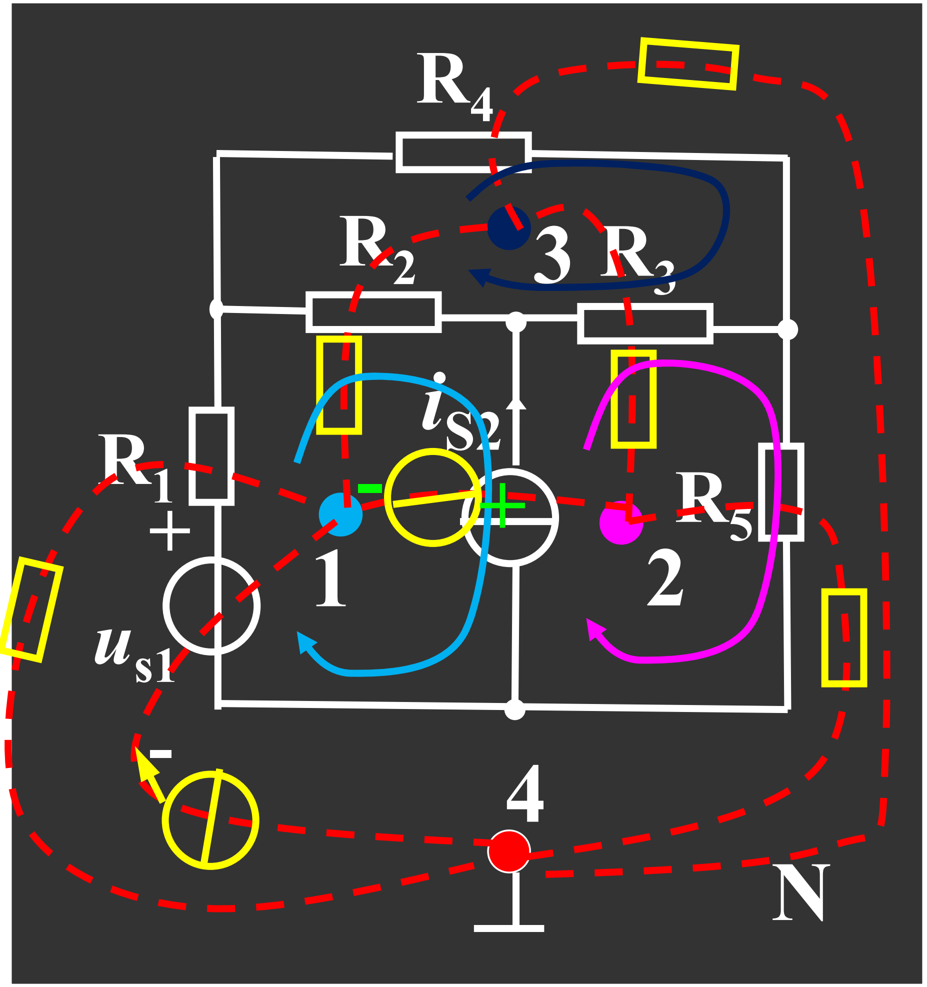


3）电源极性： 设N网孔方向取顺时针。

N中的电压源：若沿网孔方向电压升，则N’中电流源流入该网孔所对偶的节点；反之，流出该节点。——流入1



N中的电流源：若与该网孔方向一致，则N'中电压源正极与该网孔所对偶的节点相接，不一致接负极——2接+， 1接-



（4）整理N’