第三章 电阻电路的一般分析

重点

（1）支路电流法

（2）网孔电流法

（3）结点电压法

下 页

线性电路的一般分析方法

(1) 普遍性：对任何线性电路都适用。

(2) 系统性：计算方法有规律可循。

方法的基础

（1）电路的连接关系—KCL，KVL定律。

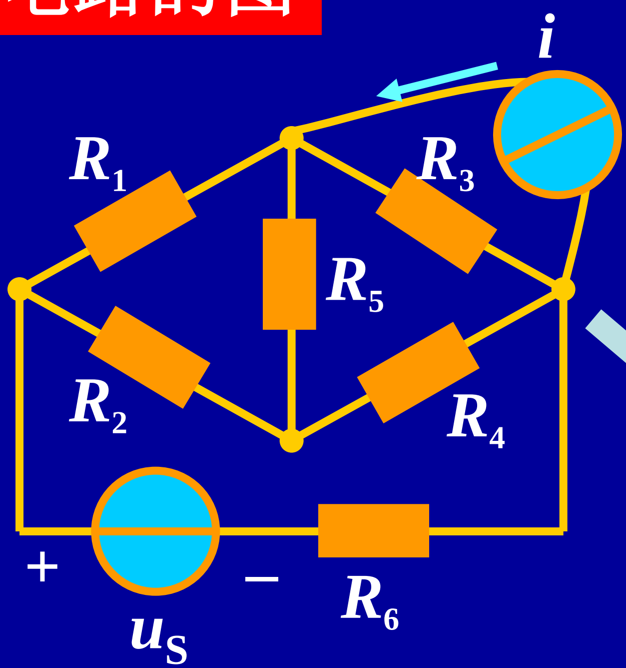
（2）元件的电压、电流关系特性。

复杂电路的一般分析法就是根据KCL、KVL及元件电压和电流关系列方程、解方程。根据列方程时所选变量的不同可分为支路电流法、回路电流法和结点电压法。

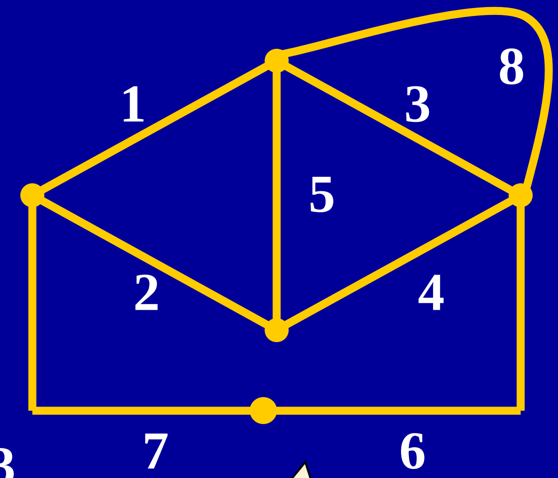
3.1 电路的图

1. 电路的图

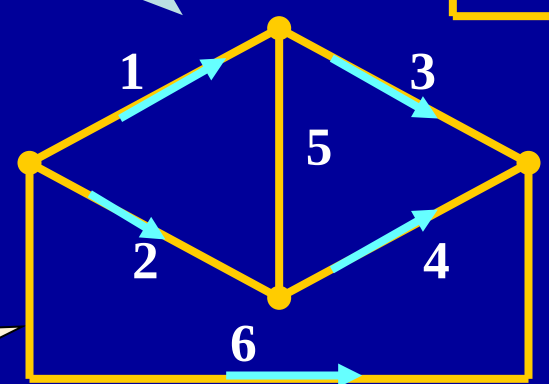
$n=5 \quad b=8$



抛开元件性质



一个元件作为一条支路



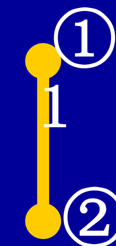
元件的串联及并联组合作为一条支路

有向图

$n=4 \quad b=6$

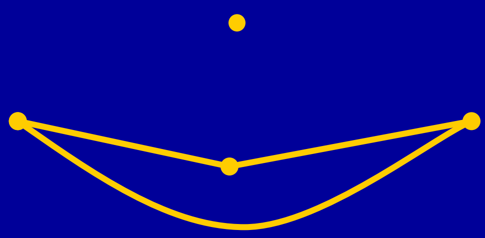
电路的图是用以表示电路几何结构的图形，图中的支路和结点与电路的支路和结点一一对应。

(1) 图的定义(Graph) → G={支路，结点}



a. 图中的结点和支路各自是一个整体。

b. 移去图中的支路，与它所联接的结点依然存在，因此允许有孤立结点存在。



c. 如把结点移去，则应把与它联接的全部支路同时移去。

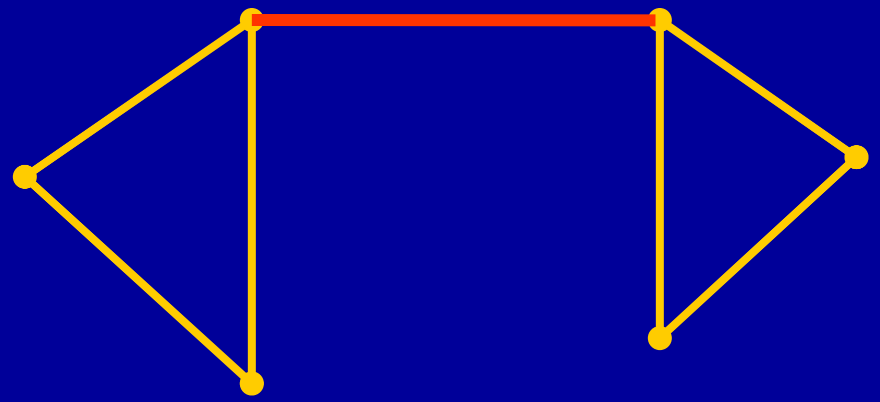
上 页 下 页

(2) 路径

从图G的一个结点出发沿着一些支路连续移动到达另一结点所经过的支路构成路径。

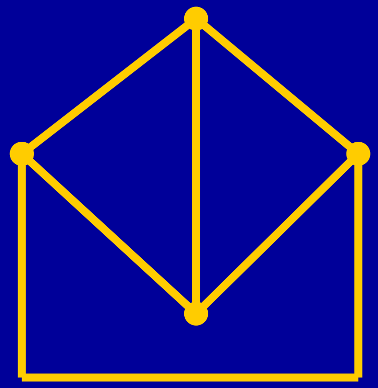
(3) 连通图

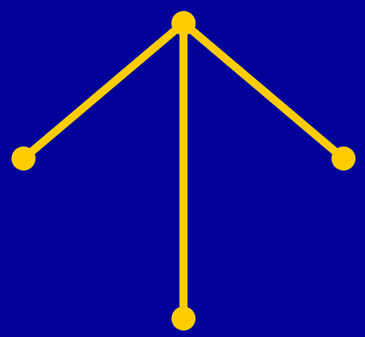
图G的任意两结点间至少有一条路径时称为连通图，非连通图至少存在两个分离部分。

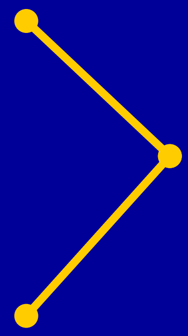


(4) 子图

若图G_1中所有支路和结点都是图G中的支路和结点，则称G_1是G的子图。







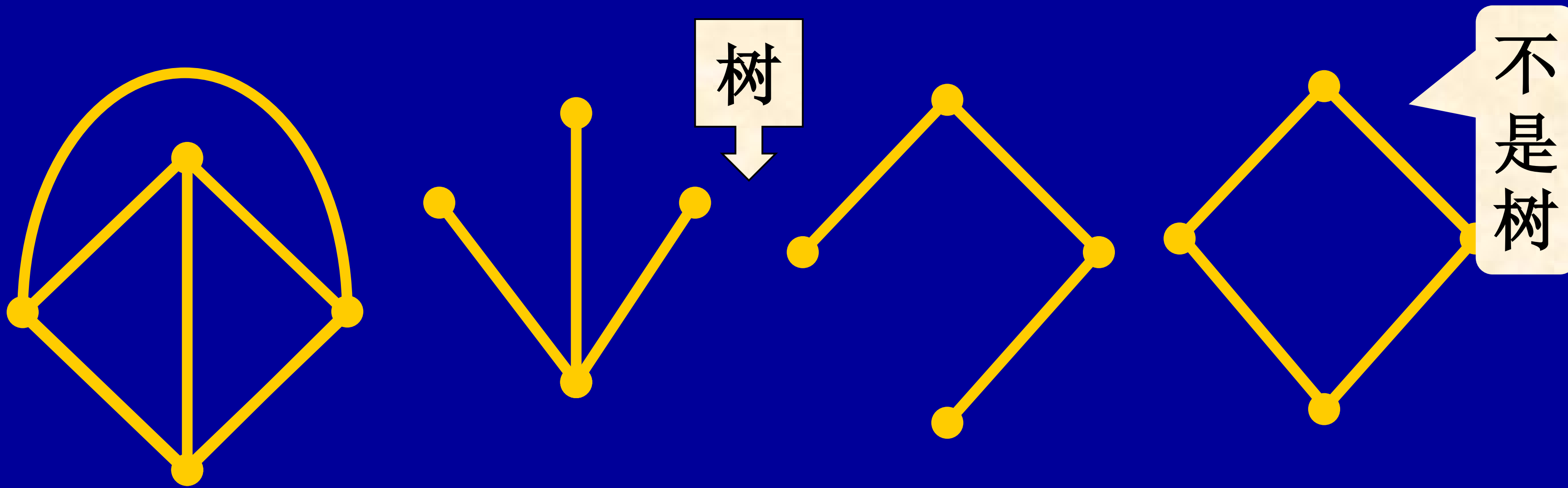
树 (Tree)

T是连通图的一个子图满足下列条件:

(1) 连通

(2) 包含所有结点

(3) 不含回路



树支：构成树的支路　　　连支：属于G而不属于T的支路

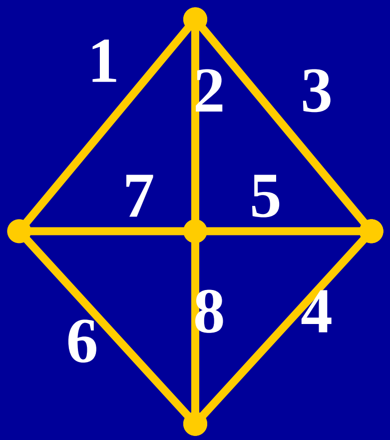
特点

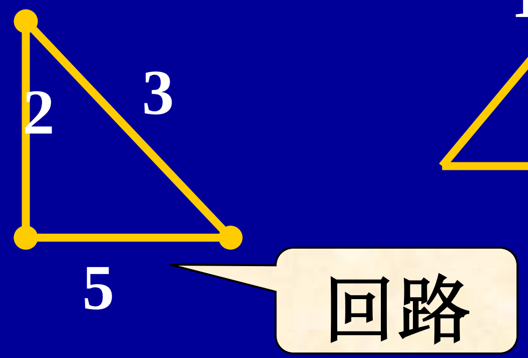
1）对应一个图有很多的树

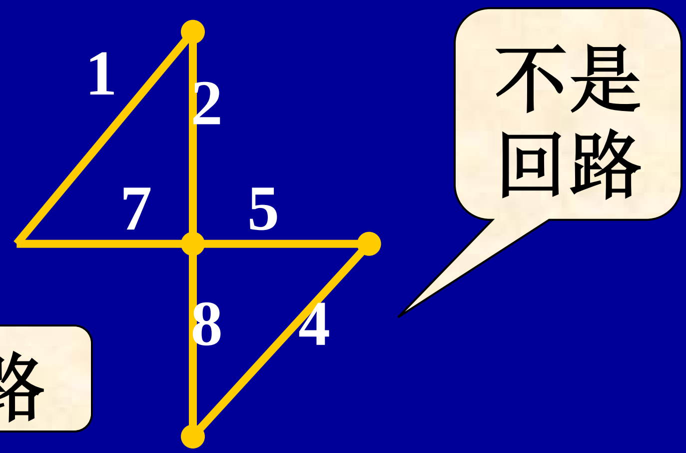
2）树支的数目是一定的： $b_t = n - 1$

连支数： $b_l = b - b_t = b - (n-1)$

回路 (Loop) → L是连通图的一个子图，构成一条闭合路径，并满足：(1)连通，(2)每个节点关联2条支路







特点

1）对应一个图有很多的回路

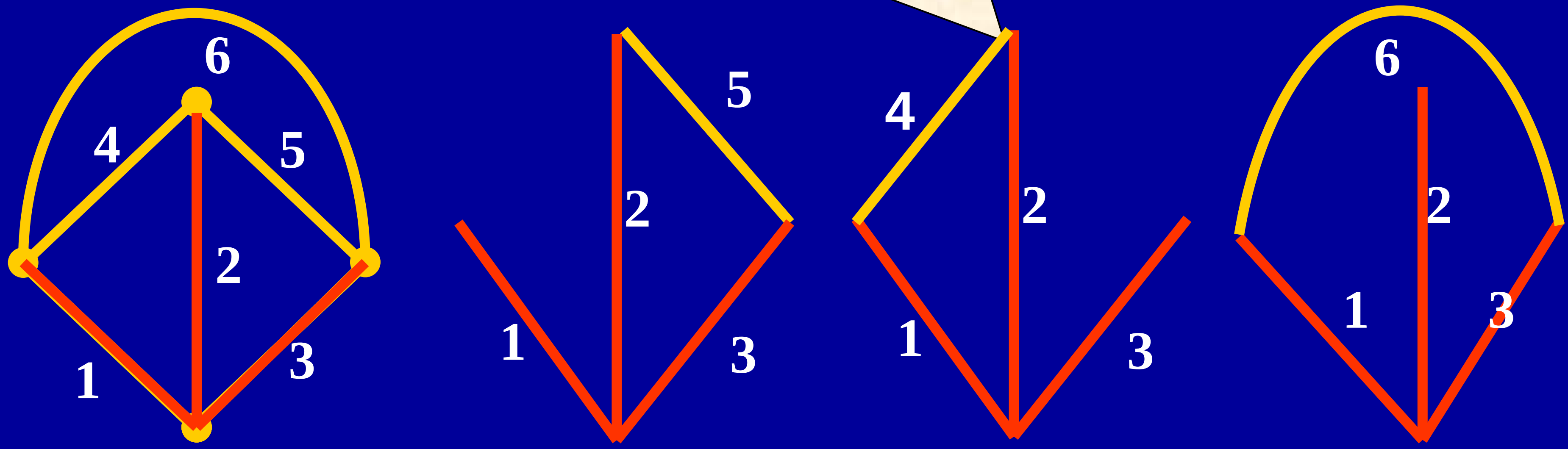
2）基本回路的数目是一定的，为连支数

3）对于平面电路，网孔数为基本回路数

$$l = b_l = b-(n-1)$$

基本回路(单连支回路)

基本回路具有独立的一条连支



结论 → 支路数＝树支数＋连支数

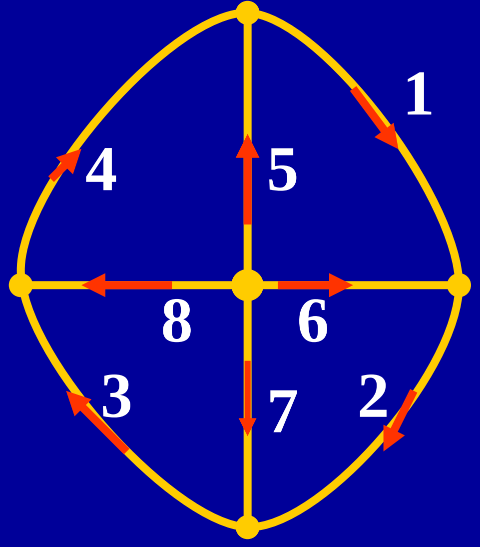
＝结点数－1＋基本回路数

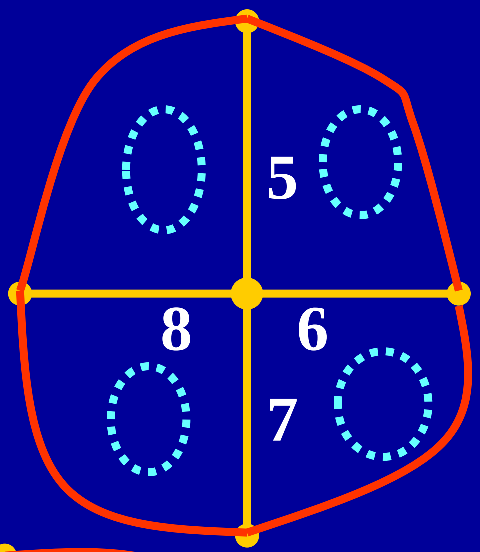
结点、支路和基本回路关系

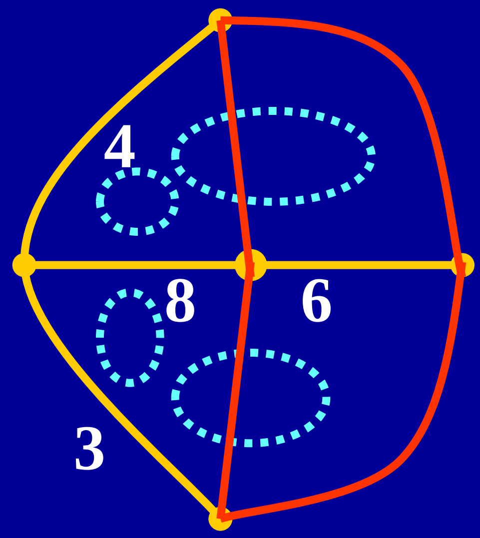
$$b = n - 1 + l$$

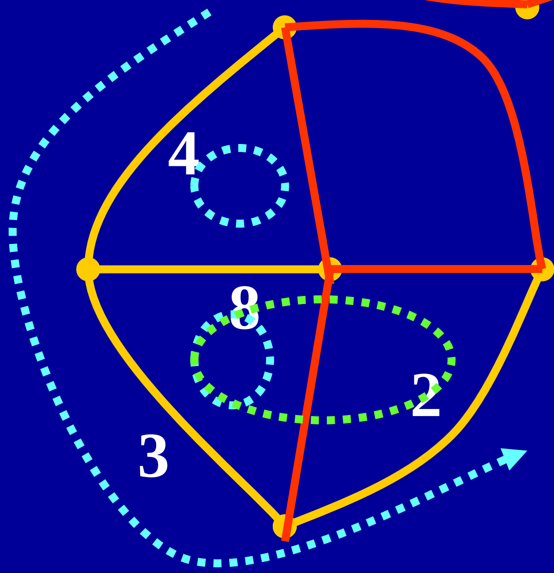
例

图示为电路的图，画出三种可能的树及其对应的基本回路。



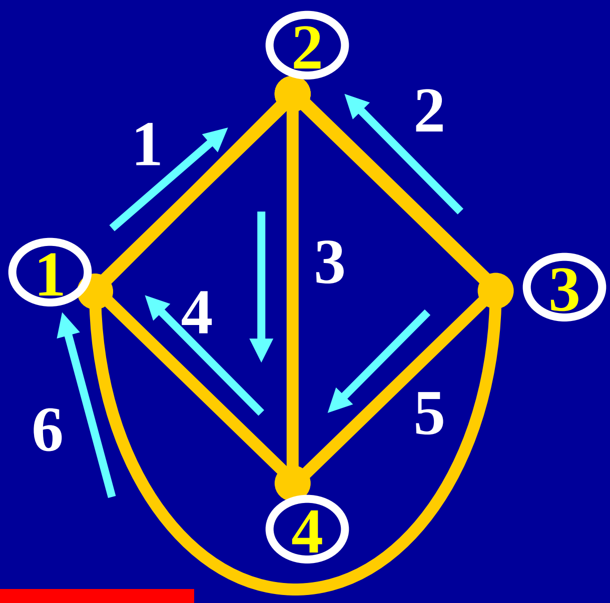






3.2 KCL和KVL的独立方程数

1. KCL的独立方程数



① $i_1 - i_4 - i_6 = 0$

② $-i_1 - i_2 + i_3 = 0$

③ $i_2 + i_5 + i_6 = 0$

④ $-i_3 + i_4 - i_5 = 0$

① + ② + ③ + ④ = 0

结论

n个结点的电路，独立的KCL方程为n-1个。

2. KVL的独立方程数

KVL的独立方程数 = 基本回路数=b－(n－1)

结论

n个结点、b条支路的电路, 独立的KCL和KVL方程数为:

$$(n-1)+b-(n-1)=b$$

3.3 支路电流法(Branch Current Method)

1. 支路电流法

→ 以各支路电流为未知量列写电路方程分析电路的方法。

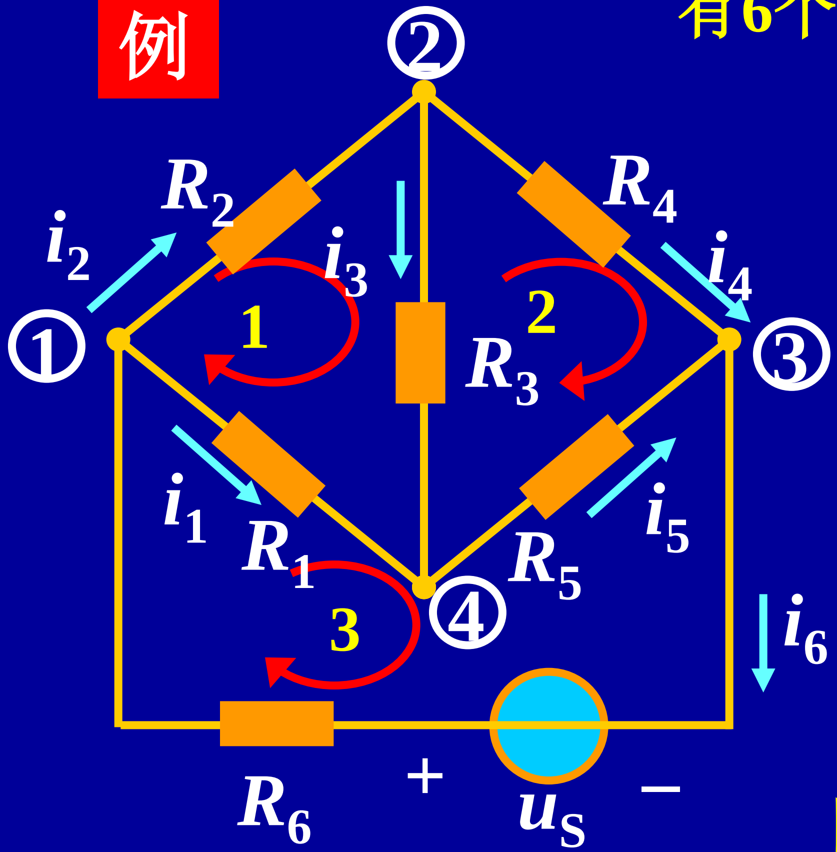
对于有n个节点、b条支路的电路，要求解支路电流，未知量共有b个。只要列出b个独立的电路方程，便可以求解这b个变量。

2. 独立方程的列写

（1）从电路的n个结点中任意选择n-1个结点列写KCL方程

（2）选择基本回路列写 b-(n-1) 个KVL方程

例



有6个支路电流，需列写6个方程。

KCL方程:

① $i_1 + i_2 - i_6 = 0$

② $-i_2 + i_3 + i_4 = 0$

③ $-i_4 - i_5 + i_6 = 0$

取网孔为基本回路，沿顺时针方向绕行列KVL写方程:

回路1 $R_2 i_2 + R_3 i_3 - R_1 i_1 = 0$

回路2 $R_4 i_4 - R_5 i_5 - R_3 i_3 = 0$

回路3 $R_1 i_1 + R_5 i_5 + R_6 i_6 = u_S$

支路电流法的一般步骤

(1) 标定各支路电流的参考方向；

(2) 选定$(n–1)$个节点，列写其KCL方程；

(3) 选定$b–(n–1)$个独立回路，列写其KVL方程；

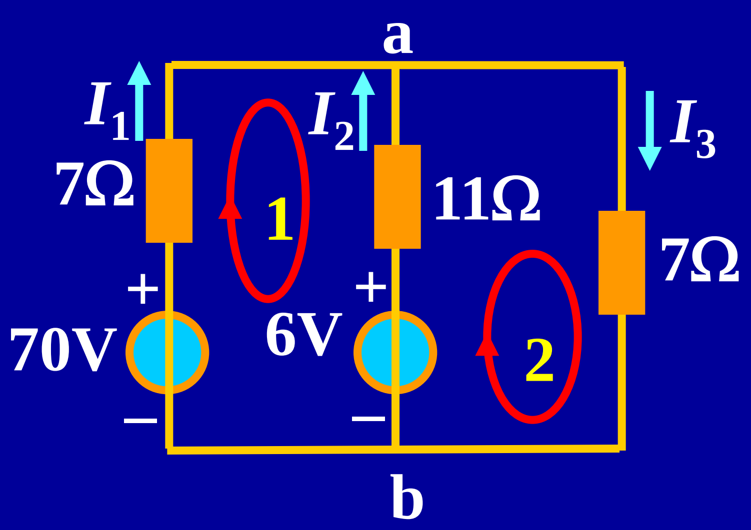
(4) 求解上述方程，得到b个支路电流；

(5) 进一步计算支路电压和进行其它分析。

支路电流法的特点

支路法列写的是KCL和KVL方程， 所以方程列写方便、直观，但方程数较多，宜于在支路数不多的情况下使用。

例1 求各支路电流及电压源各自发出的功率。



解 (1) n–1=1个KCL方程:

结点a: $-I_1 - I_2 + I_3 = 0$

(2) b–(n–1)=2个KVL方程:

$$7I_1 - 11I_2 + 6 - 70 = 0$$

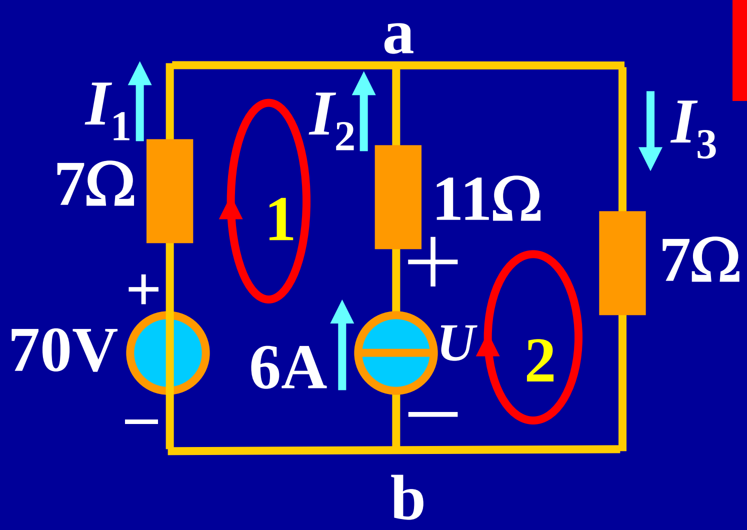
$$11I_2 + 7I_3 - 6 = 0$$

$$I_1 = 6A \qquad I_2 = -2A \qquad I_3 = I_1 + I_2 = 6 - 2 = 4A$$

$$P_{70发} = 6 \times 70 = 420W$$

$$P_{6发} = 6 \times (-2) = -12W$$

例2 利用支路电流法列写方程 (电路中含有理想电流源）。



解1

(1) n–1=1个KCL方程：

$$-I_1 - I_2 + I_3 = 0$$

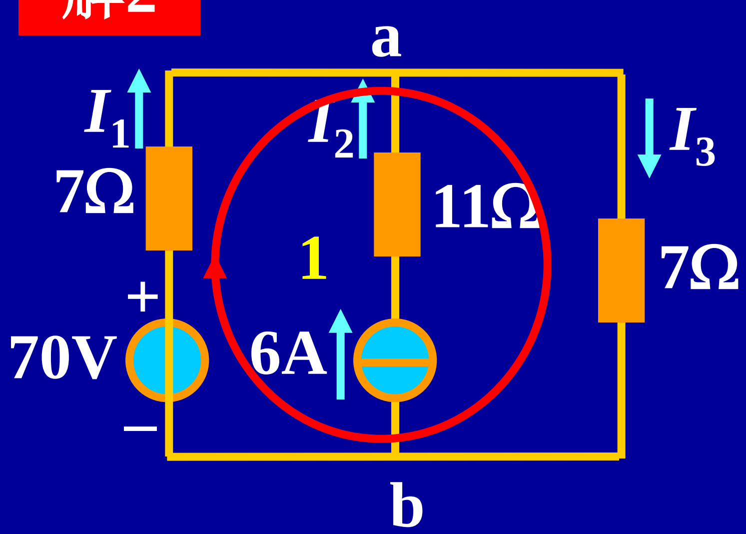
(2) b– (n–1) =2个KVL方程：

$$7I_1 - 11I_2 + U - 70 = 0$$

$$11I_2 + 7I_3 - U = 0$$

增补方程：I_2=6A

解2



由于I_2已知，故只列写两个方程

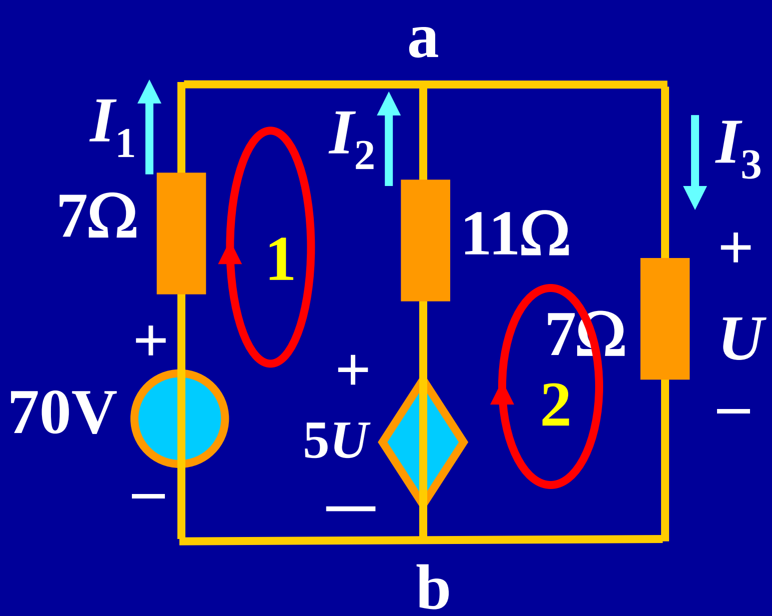
$$-I_1 - 6 + I_3 = 0$$

避开电流源支路取回路：

$$7I_1 + 7I_3 - 70 = 0$$

上 页 下 页

例3 列写支路电流方程 (电路中含有受控源）。



解

节点a：$-I_1 - I_2 + I_3 = 0$

$$7I_1 - 11I_2 + 5U - 70 = 0$$

$$11I_2 + 7I_3 - 5U = 0$$

增补方程：$U=7I_3$

有受控源的电路，方程列写分两步：

(1) 先将受控源看作独立源列方程；

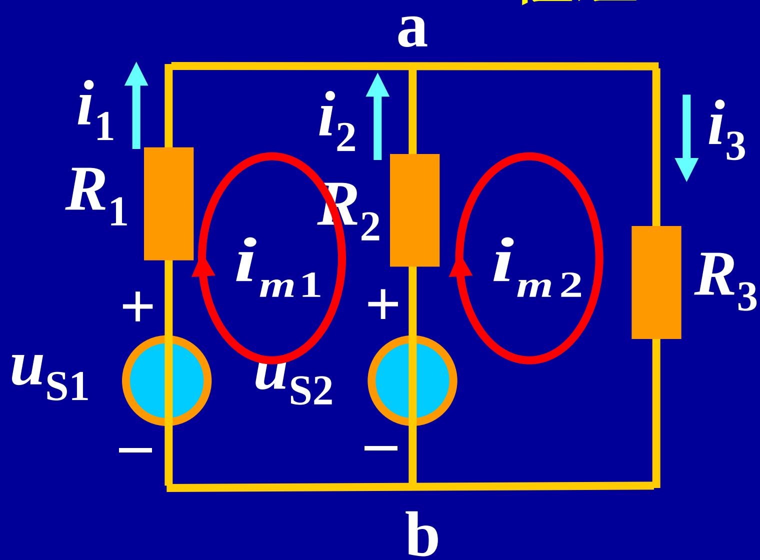
(2) 将控制量用支路电流表示，并代入(1)中所列的方程，消去中间变量。

3.4 网孔电流法 (Mesh Current Method)

1.网孔电流法 → 以平面电路中网孔电流为未知量来列写电路方程。

基本思想

为减少未知量(方程)的个数，假想在每个网孔中都有一个电流在流动。各支路电流可用网孔电流的线性组合表示，列出关于网孔电流的方程组。



选择两个网孔作为独立回路，以网孔电流为变量，支路电流可表示为：

$$i_1 = i_{m1} \qquad i_3 = i_{m2}$$

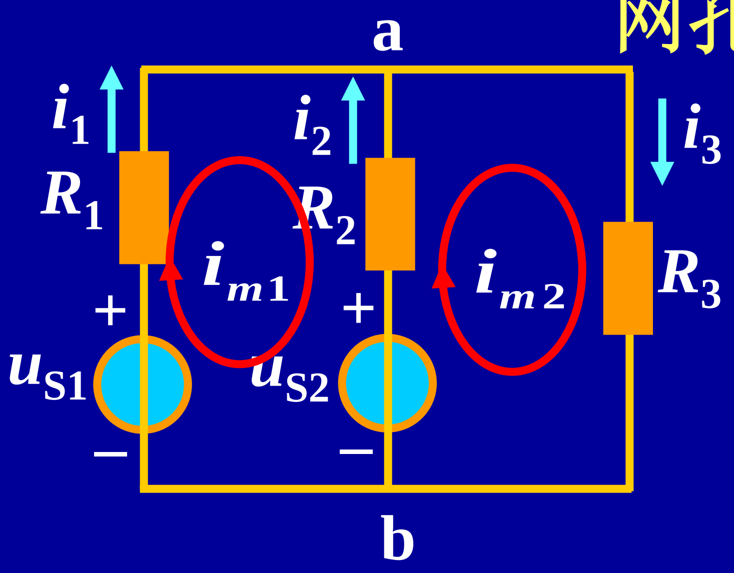
$$i_2 = i_3 - i_1 = i_{m2} - i_{m1}$$

列写方程　网孔电流法是对独立回路（网孔）列写KVL方程，方程数为：

$$b-(n-1)$$

与支路电流法相比，方程数减少*n*-1个。

2. 方程的列写



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

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

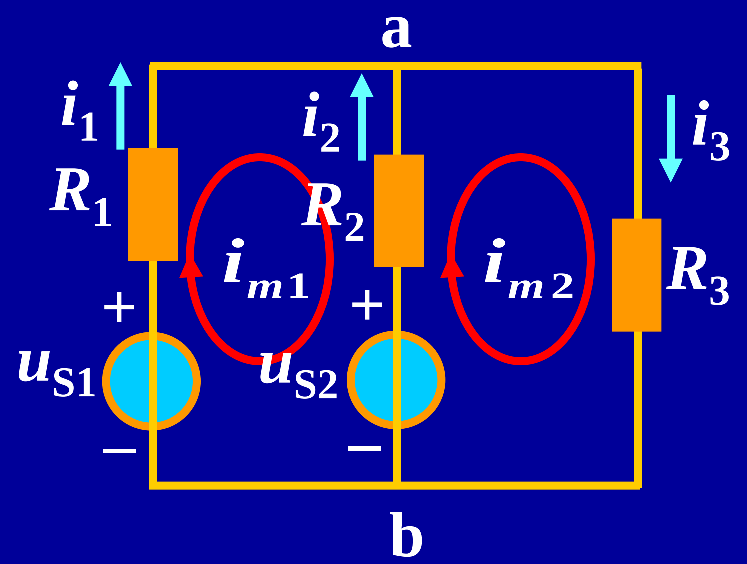
整理得：

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

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

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

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



$$R_{11}=R_1+R_2$$

$$R_{22}=R_2+R_3$$

$$R_{12}=R_{21}=-R_2$$

当两个网孔电流流过某电阻时，若两网孔电流参考方向对该电阻来说是一致的，则互电阻取正值，否则取负值。

$$u_{Sm1}=u_{S1}-u_{S2}$$

$$u_{Sm2}=u_{S2}$$

按网孔电流方向，若为电压降取负号，若为电压升取正号。

由此得标准形式的方程：

$$\begin{cases} R_{11}i_{m1}+R_{12}i_{m2}=u_{Sm1} \\ R_{21}i_{m1}+R_{22}i_{m2}=u_{Sm2} \end{cases}$$

对于具有 m 个网孔的电路，有：

$$\begin{cases} R_{11}i_{m1}+R_{12}i_{m2}+\cdots+R_{1m}i_{mm}=u_{Sm1} \\ R_{21}i_{m1}+R_{22}i_{m2}+\cdots+R_{2m}i_{mm}=u_{Sm2} \\ \vdots \\ R_{m1}i_{m1}+R_{m2}i_{m2}+\cdots+R_{mm}i_{mm}=u_{Smm} \end{cases}$$

R_{kk}:自电阻(为正)

R_{jk}:互电阻 $\begin{cases} + : \text{流过互阻的两个网孔电流方向相同} \\ - : \text{流过互阻的两个网孔电流方向相反} \\ 0 : \text{无关} \end{cases}$

上 页 下 页

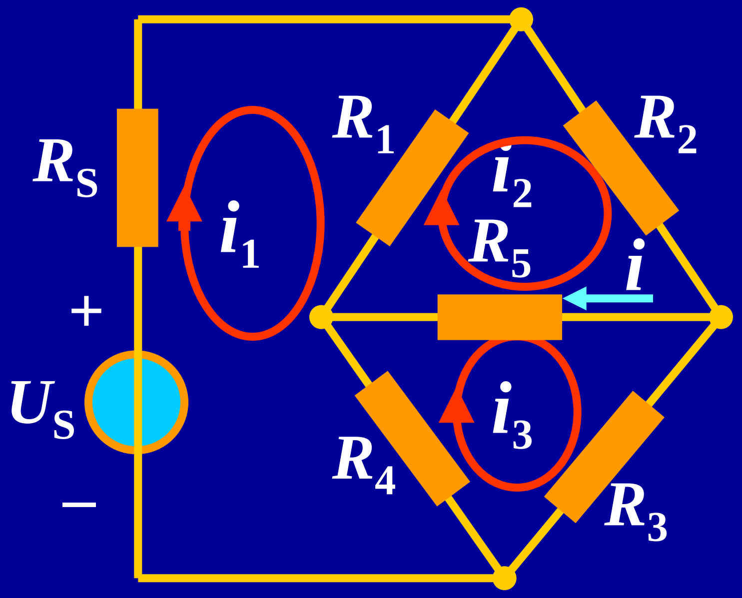
例1　用网孔电流法求解电流 i

解　独立回路有三个，选网孔为独立回路：

$$(R_S + R_1 + R_4)i_1 - R_1 i_2 - R_4 i_3 = U_S$$

$$-R_1 i_1 + (R_1 + R_2 + R_5)i_2 - R_5 i_3 = 0$$

$$-R_4 i_1 - R_5 i_2 + (R_3 + R_4 + R_5)i_3 = 0$$



$$i = i_2 - i_3$$

表明

（1）不含受控源的线性网络 $R_{jk}= R_{kj}$，系数矩阵为对称阵。

（2）当网孔电流均取顺（或逆）时针方向时，R_{jk}均为负。

网孔电流法分析电路的一般步骤

(1) 选定网孔作为独立回路，并标出网孔电流方向；

(2) 以网孔电流为未知量，用观察法列写各回路的KVL方程；

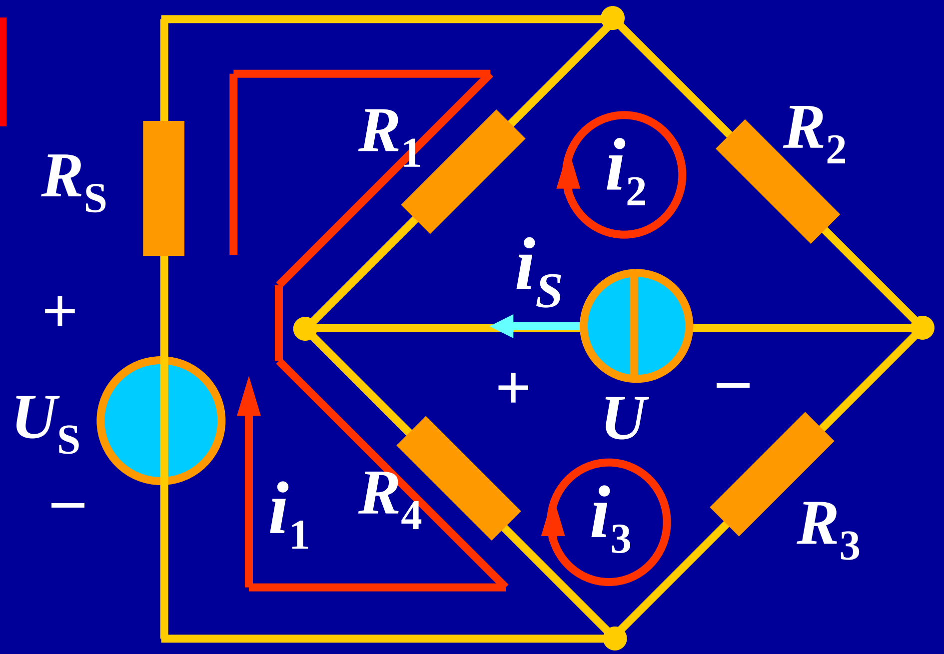
(3) 求解上述方程组，得到各网孔电流；

(4) 求各支路电流(用网孔电流线性表示)；

(5) 其它分析。

3.无伴电流源支路的处理

例



电流源看作电压源列方程

$$(R_S + R_1 + R_4)i_1 - R_1 i_2 - R_4 i_3 = U_S$$

引入电流源电压

$$-R_1 i_1 + (R_1 + R_2)i_2 = U$$

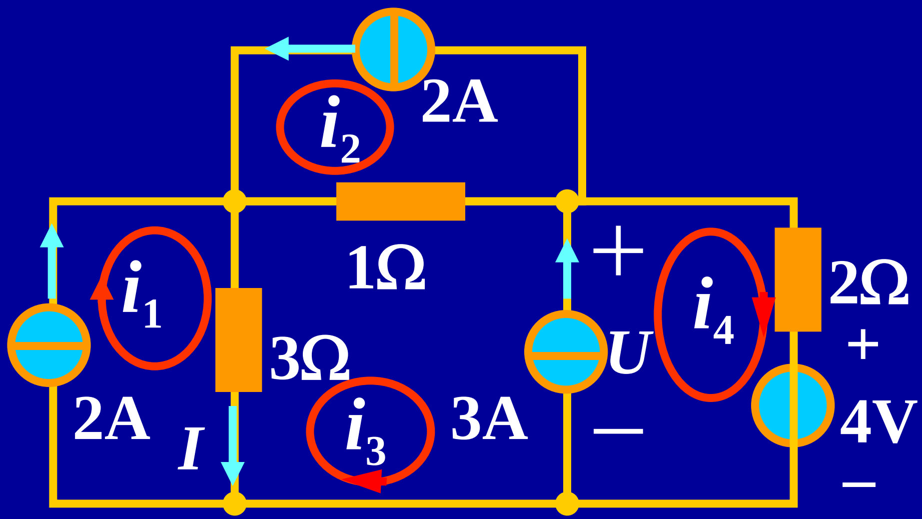
$$-R_4 i_1 + (R_3 + R_4)i_3 = -U$$

增加网孔电流和电流源电流的关系方程

增补方程：

$$i_S = i_2 - i_3$$

例 求电路中电压U和电流 I。



解

$$i_1 = 2A$$

$$i_2 = 2A$$

$$4i_3 - 3i_1 + i_2 = -U$$

$$2i_4 = U - 4$$

$$i_4 - i_3 = 3A$$

$$i_3 = -1A$$

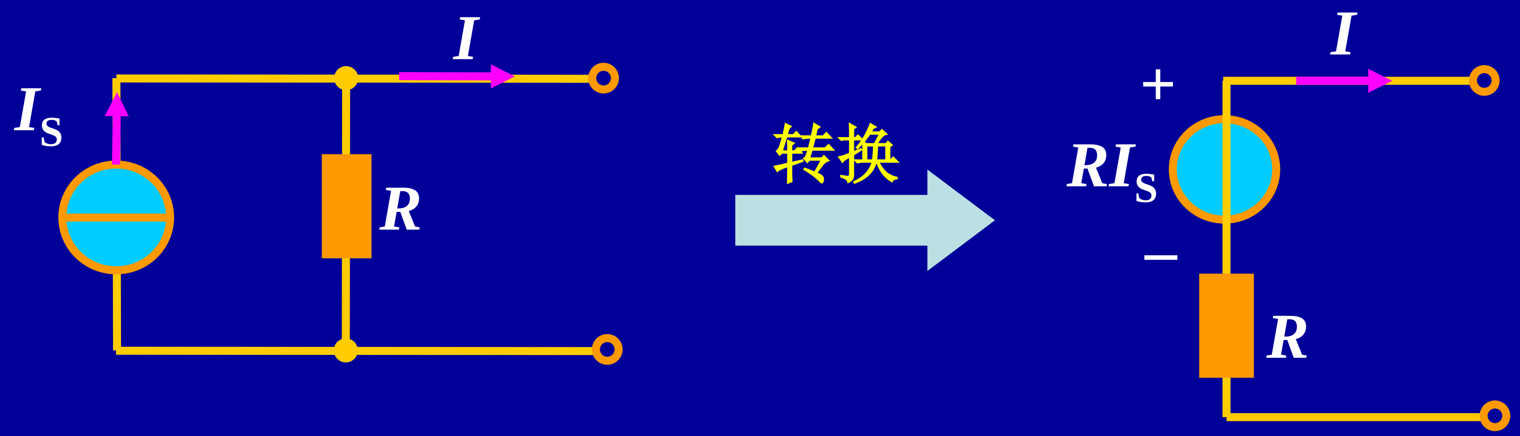
$$i_4 = 2A$$

$$U = 8V$$

$$I = i_1 - i_3 = 3A$$

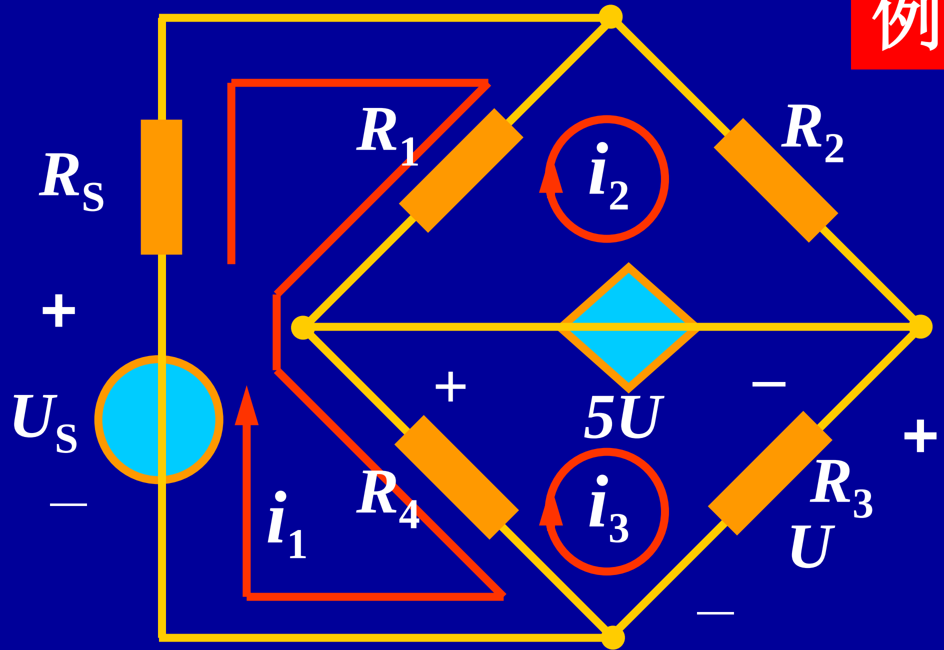
4. 受控电源支路的处理

我们已经知道：与电阻并联的电流源，可用电压源和电阻串联进行等效



因此，对含有受控电源支路的电路，可先把受控源看作独立电源按上述方法列方程，再将控制量用网孔电流表示。

例1 列写网孔电流方程



$$(R_S + R_1 + R_4)i_1 - R_1 i_2 - R_4 i_3 = U_S$$

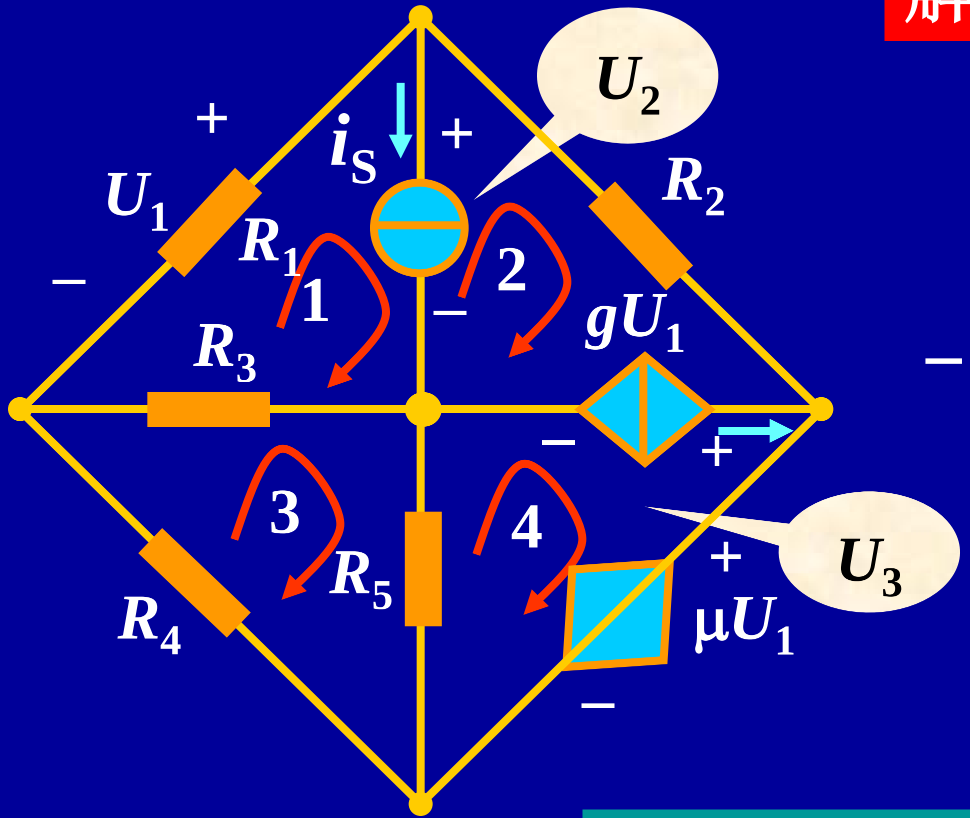
$$-R_1 i_1 + (R_1 + R_2)i_2 = 5U$$

$$-R_4 i_1 + (R_3 + R_4)i_3 = -5U$$

受控电压源看作独立电压源列方程

增补方程：$U = R_3 i_3$

例2 列写网孔电流方程



解

$$(R_1+R_3)i_1 - R_3 i_3 = -U_2$$

$$R_2 i_2 = U_2 - U_3$$

$$-R_3 i_1 + (R_3+R_4+R_5)i_3 - R_5 i_4 = 0$$

$$-R_5 i_3 + R_5 i_4 = U_3 - \mu U_1$$

增补方程：

$$\begin{cases} i_1 - i_2 = i_S \\ i_4 - i_2 = gU_1 \\ U_1 = -R_1 i_1 \end{cases}$$

3.5 回路电流法（概述）

1. 回路电流法

以基本回路中沿回路连续流动的假想电流为未知量，列写电路方程分析电路的方法。它适用于平面和非平面电路。

列写的方程数

回路电流法是对独立回路列写KVL方程，方程数为：

$$b-(n-1)$$

注意

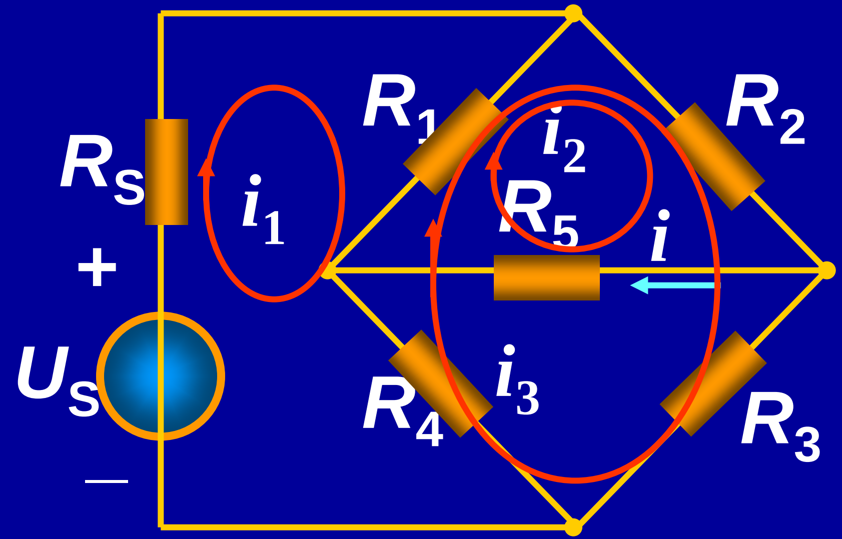
与支路电流法相比，方程数减少n-1个。

2. 方程的列写

例　用回路电流法求解电流 i

解

只让一个回路电流经过R_5支路。



$$(R_S + R_1 + R_4)i_1 - R_1 i_2 - (R_1 + R_4)i_3 = U_S$$

$$-R_1 i_1 + (R_1 + R_2 + R_5)i_2 + (R_1 + R_2)i_3 = 0$$

$$-(R_1 + R_4)i_1 + (R_1 + R_2)i_2 + (R_1 + R_2 + R_3 + R_4)i_3 = 0$$

$$i = i_2$$

方程的标准形式：

对于具有 $l=b-(n-1)$ 个回路的电路，有：

$$
\begin{cases}
R_{11}i_{l1}+R_{12}i_{l2}+\cdots+R_{1l}i_{ll}=u_{sl1} \\
R_{21}i_{l1}+R_{22}i_{l2}+\cdots+R_{2l}i_{ll}=u_{sl2} \\
\cdots \\
R_{l1}i_{l1}+R_{l2}i_{l2}+\cdots+R_{ll}i_{ll}=u_{sll}
\end{cases}
$$

注意 R_{kk}：自电阻(总为正)

R_{jk}：互电阻

$$
\begin{cases}
+ : & \text{流过互阻的两个回路电流方向相同；} \\
- : & \text{流过互阻的两个回路电流方向相反；} \\
0 : & \text{无关。}
\end{cases}
$$

小结　（1）回路法的一般步骤：

① 选定$l=b-(n-1)$个独立回路，并确定其绕行方向；

② 对l 个独立回路，以回路电流为未知量，列写其KVL方程；

③ 求解上述方程，得到 l 个回路电流；

④ 求各支路电流；

⑤ 其它分析。

（2）回路法的特点：

① 通过灵活的选取回路可以减少计算量；

② 互有电阻的识别难度加大，易遗漏互有电阻。

3. 理想电流源支路的处理

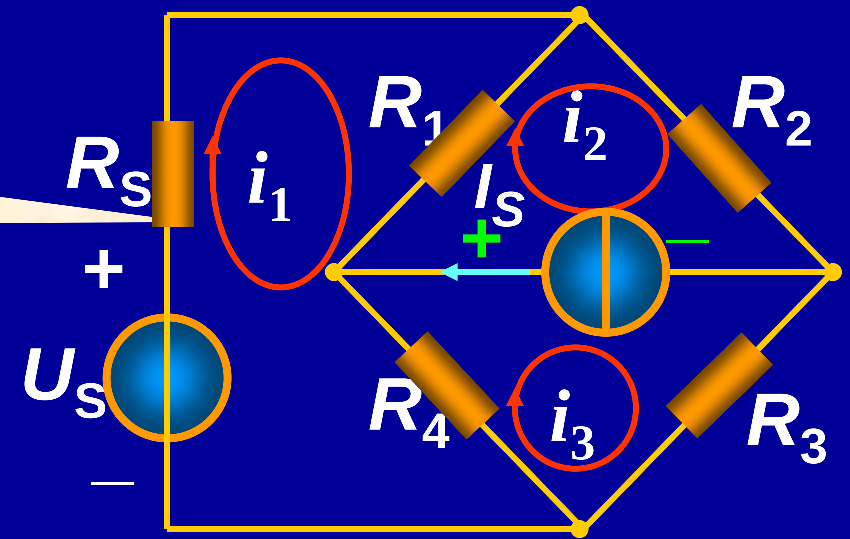
- 引入电流源电压，增加回路电流和电流源电流的关系方程。

例 $$(R_S + R_1 + R_4)i_1 - R_1 i_2 - R_4 i_3 = U_S$$

$$-R_1 i_1 + (R_1 + R_2)i_2 = U$$

$$-R_4 i_1 + (R_3 + R_4)i_3 = -U$$

方程中应包括电流源电压



增补方程： $$I_S = i_2 - i_3$$

- 选取独立回路，使理想电流源支路仅仅属于一个回路，该回路电流即 I_S。

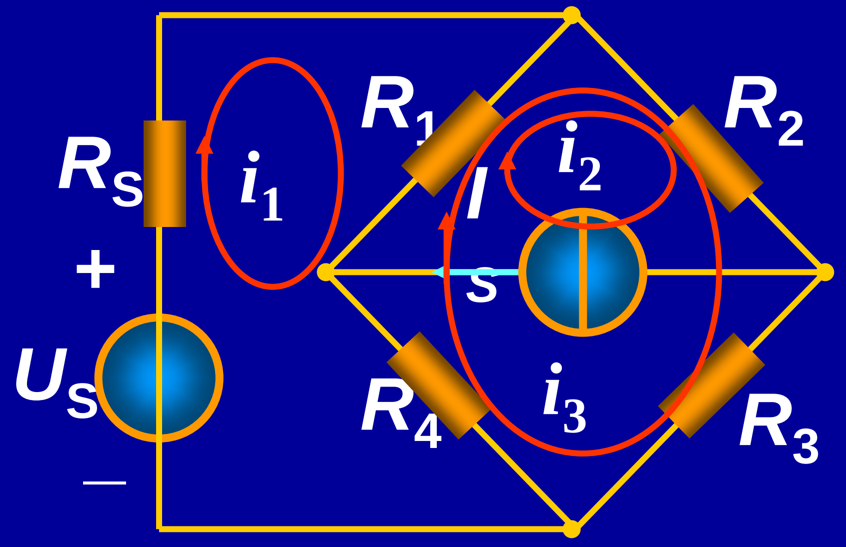
例

$$(R_S+R_1+R_4)i_1-R_1i_2-(R_1+R_4)i_3=U_S$$

$$i_2=I_S$$

已知电流，实际减少了一方程

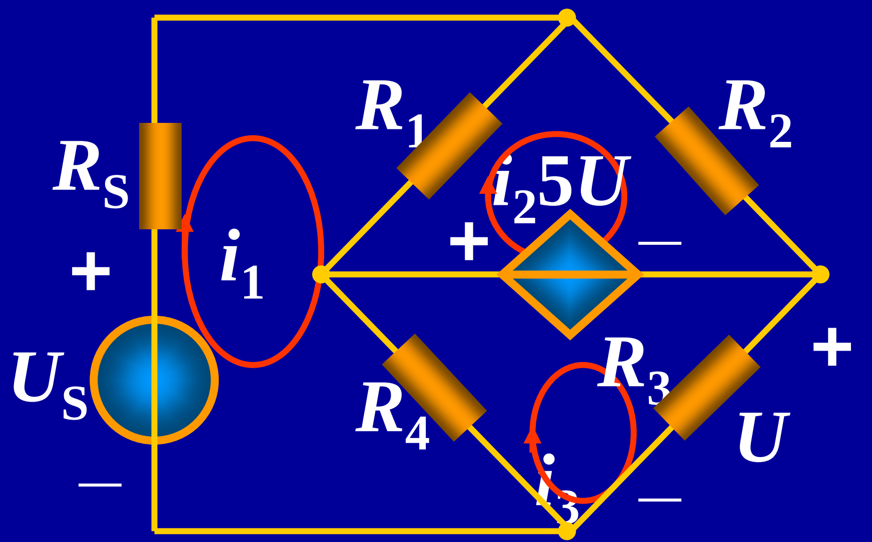
$$-(R_1+R_4)i_1+(R_1+R_2)i_2+(R_1+R_2+R_3+R_4)i_3=0$$



4. 受控电源支路的处理

对含有受控电源支路的电路，可先把受控源看作独立电源按上述方法列方程，再将控制量用回路电流表示。

例1



增补方程：

$$U = R_3 i_3$$

$$(R_S + R_1 + R_4)i_1 - R_1 i_2 - R_4 i_3 = U_S$$

$$-R_1 i_1 + (R_1 + R_2)i_2 = 5U$$

$$-R_4 i_1 + (R_3 + R_4)i_3 = -5U$$

受控源看作独立源列方程

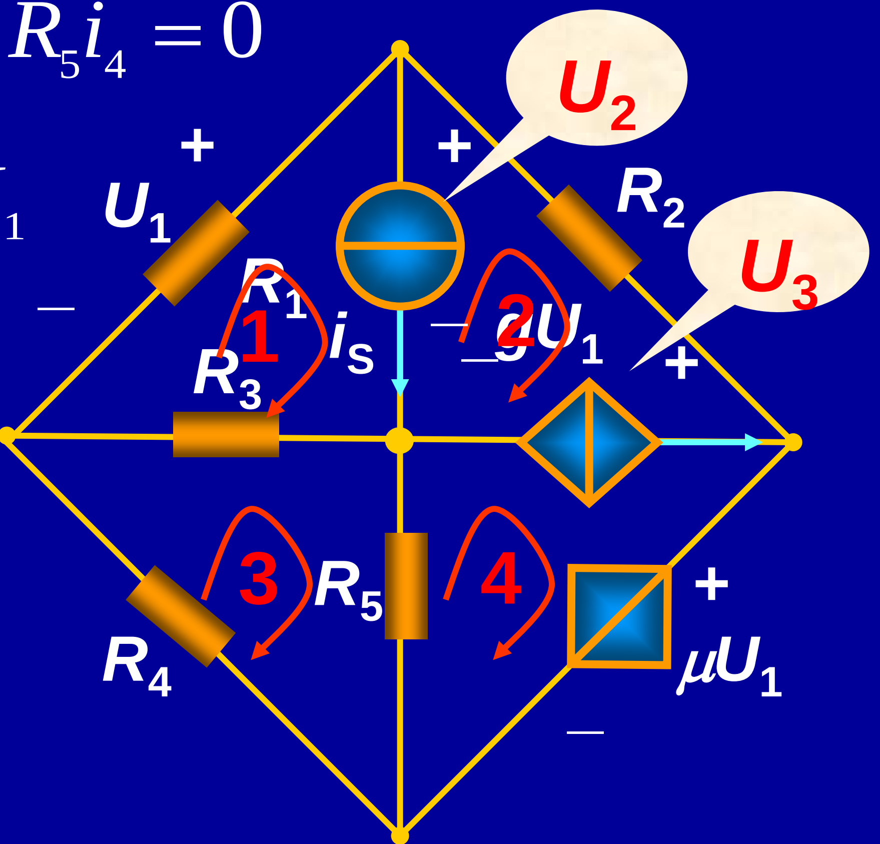
例2 列回路电流方程 **解1** 选网孔为独立回路

$$(R_1 + R_3)i_1 - R_3 i_3 = -U_2$$

$$R_2 i_2 = U_2 - U_3$$

$$-R_3 i_1 + (R_3 + R_4 + R_5)i_3 - R_5 i_4 = 0$$

$$-R_5 i_3 + R_5 i_4 = U_3 - \mu U_1$$



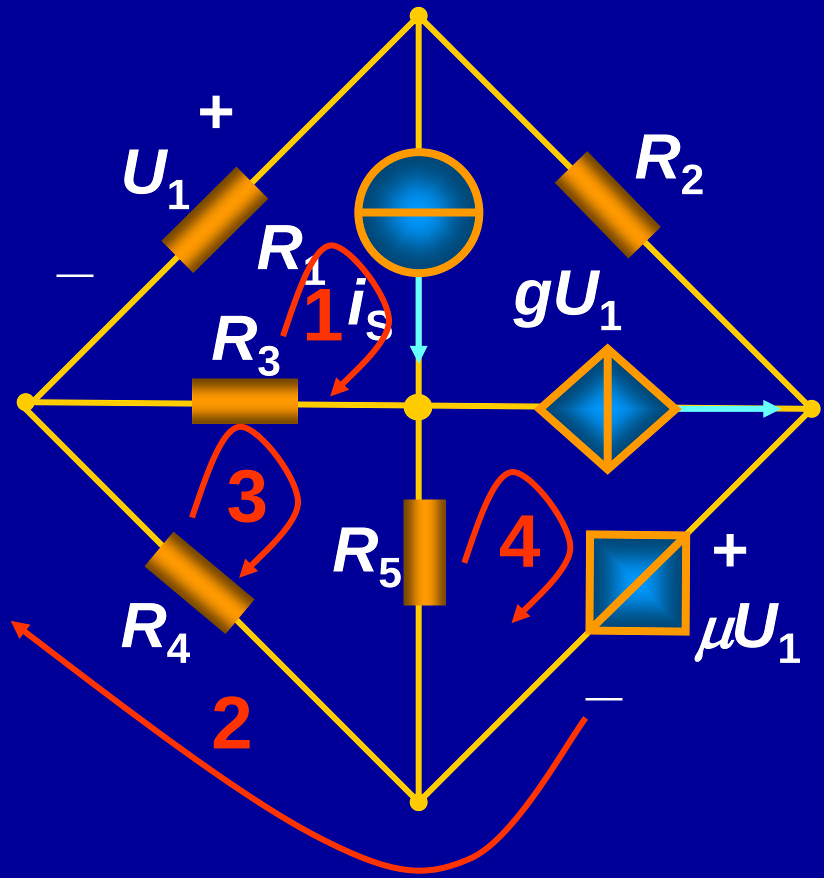
增补方程：

$$\begin{cases} i_1 - i_2 = i_S \\ i_4 - i_2 = gU_1 \\ U_1 = -R_1 i_1 \end{cases}$$

解2 回路2选大回路 $i_1 = i_S$

$$R_1 i_1 + (R_1 + R_2 + R_4) i_2 + R_4 i_3 = -\mu U_1$$

$$-R_3 i_1 + R_4 i_2 + (R_3 + R_4 + R_5) i_3 - R_5 i_4 = 0$$



$$i_4 = gU_1$$

增补方程:

$$U_1 = -R_1(i_1 + i_2)$$

3.6 结点电压法 (Node Voltage Method)

1. 结点电压法

以结点电压为未知量列写电路方程分析电路的方法。适用于结点较少的电路。

基本思想

选择结点电压作为求解变量，各支路电流、电压可视为结点电压的线性组合，求出结点电压后，便可方便地得到各支路电压、电流。

列写方程

结点电压法列写的是结点上的KCL方程，独立方程数为：

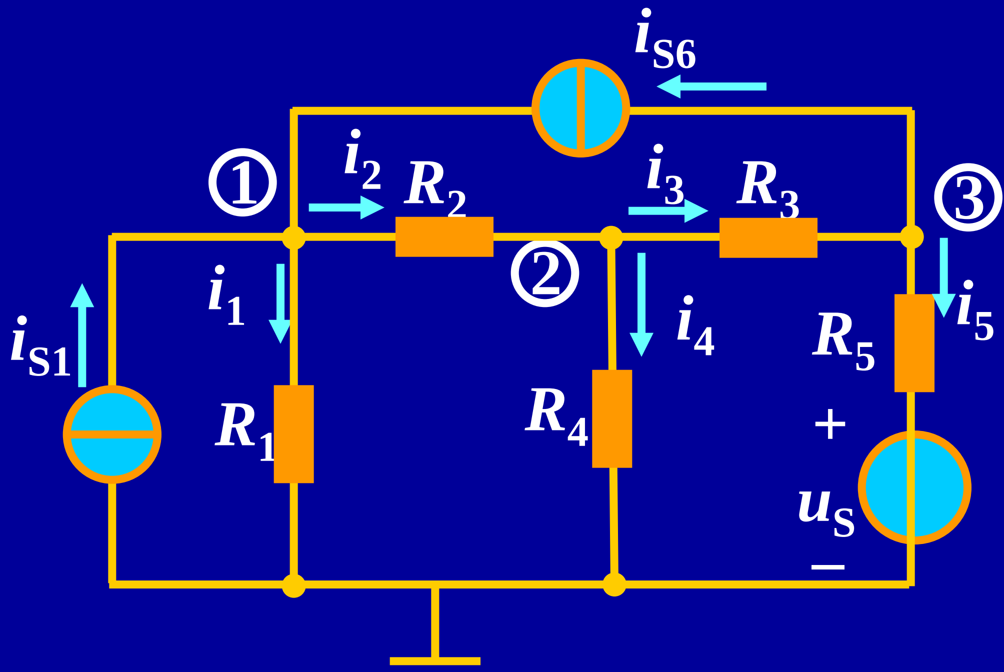
$$(n-1)$$

与支路电流法相比，方程数减少 $b-(n-1)$ 个。

说明 任意选择**参考点**：其它结点与参考点的电压差即是**结点电压(位)**，**方向为从独立结点指向参考结点**。

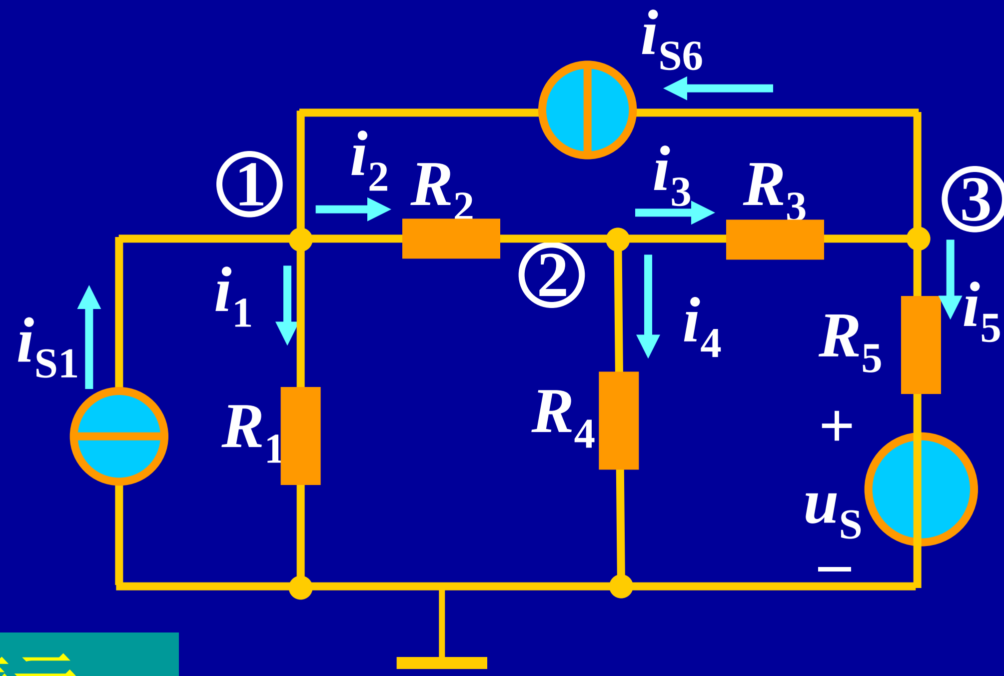
2. 方程的列写

(1) 选定参考结点，标明其余 *n*-1 个独立结点的电压



(2) 列KCL方程:

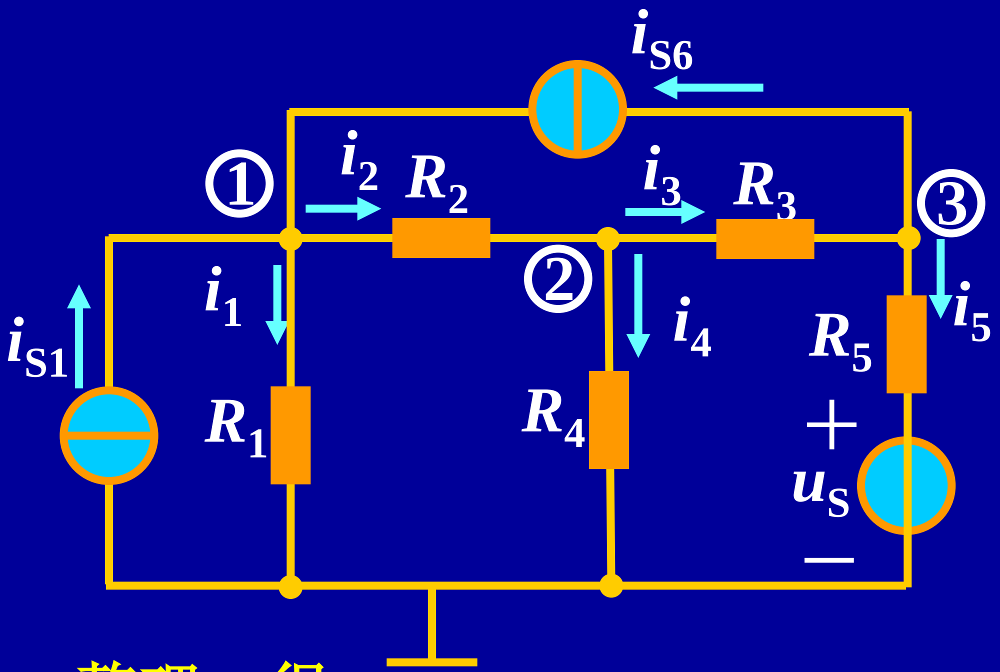
$$\sum i_{R出} = \sum i_{S入}$$



$$\begin{cases} i_1 + i_2 = i_{S1} + i_{S6} \\ -i_2 + i_3 + i_4 = 0 \\ -i_3 + i_5 = -i_{S6} \end{cases}$$

把支路电流用结点电压表示:

$$\begin{cases} \dfrac{u_{n1}}{R_1} + \dfrac{u_{n1} - u_{n2}}{R_2} = i_{S1} + i_{S6} \\ -\dfrac{u_{n1} - u_{n2}}{R_2} + \dfrac{u_{n2} - u_{n3}}{R_3} + \dfrac{u_{n2}}{R_4} = 0 \\ -\dfrac{u_{n2} - u_{n3}}{R_3} + \dfrac{u_{n3} - u_S}{R_5} = -i_{S6} \end{cases}$$



$$\frac{u_{n1}}{R_1}+\frac{u_{n1}-u_{n2}}{R_2}=i_{S1}+i_{S6}$$

$$-\frac{u_{n1}-u_{n2}}{R_2}+\frac{u_{n2}-u_{n3}}{R_3}+\frac{u_{n2}}{R_4}=0$$

$$-\frac{u_{n2}-u_{n3}}{R_3}+\frac{u_{n3}-u_S}{R_5}=-i_{S6}$$

整理，得：

$$\begin{cases}
\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)u_{n1}-\frac{1}{R_2}u_{n2}=i_{S1}+i_{S6} \\
-\frac{1}{R_2}u_{n1}+\left(\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_4}\right)u_{n2}-\frac{1}{R_3}u_{n3}=0 \\
-\frac{1}{R_3}u_{n2}+\left(\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_5}\right)u_{n3}=-i_{S6}+\frac{u_S}{R_5}
\end{cases}$$

等效电流源

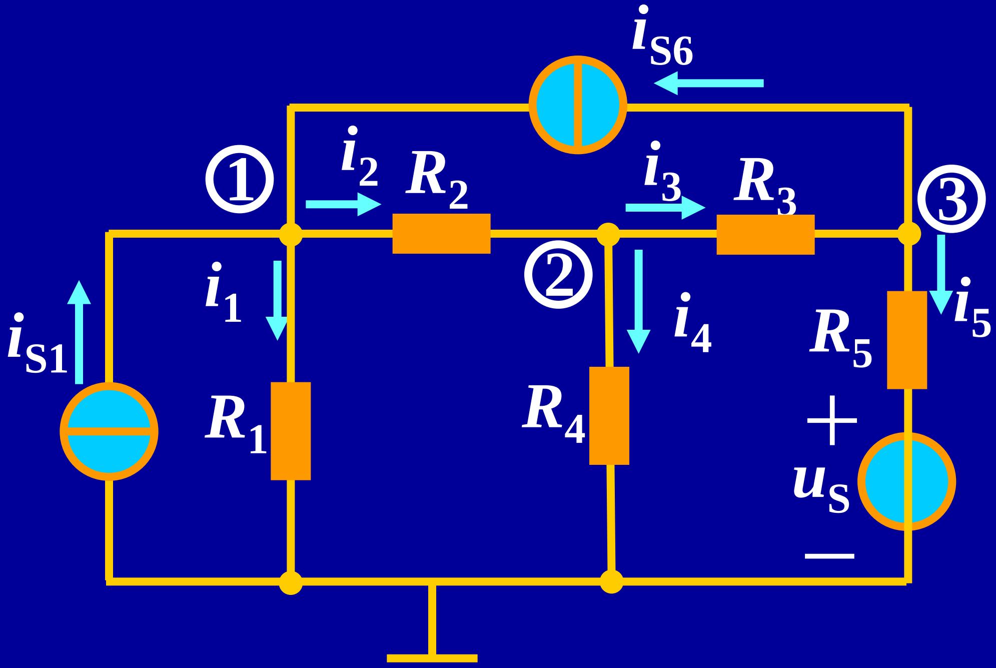
上 页　下 页

$$\begin{cases} (\dfrac{1}{R_1}+\dfrac{1}{R_2})\,u_{n1}-\dfrac{1}{R_2}u_{n2}=i_{S1}+i_{S6} \\ -\dfrac{1}{R_2}u_{n1}+(\dfrac{1}{R_2}+\dfrac{1}{R_3}+\dfrac{1}{R_4})\,u_{n2}-\dfrac{1}{R_3}u_{n3}=0 \\ -\dfrac{1}{R_3}u_{n2}+(\dfrac{1}{R_3}+\dfrac{1}{R_5})\,u_{n3}=-i_{S6}+\dfrac{u_S}{R_5} \end{cases}$$

令 $G_k=1/R_k$，$k=1, 2, 3, 4, 5$ 上式简记为:

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

标准形式的结点
电压方程



$$G_{11} = G_1 + G_2$$

$$G_{22} = G_2 + G_3 + G_4$$

$$G_{33} = G_3 + G_5$$

$$G_{12} = G_{21} = -G_2$$

$$G_{23} = G_{32} = -G_3$$

$$G_{13} = G_{31} = 0$$

$$i_{Sn1} = i_{S1} + i_{S6} \qquad i_{Sn2} = 0 \qquad i_{Sn3} = u_S / R_5 - i_{S6}$$

G_{ii}：结点 i 的自电导之和。

自电导总为正，互电导总为负。

G_{ij}：结点 i 与结点 j 之间的互电导，等于接在结点 i 与结点 j 之间的所有支路的电导之和。

流入结点取正号，流出取负号。

i_{Sni}：流入结点 i 的所有电源电流的代数和。

上 页 下 页

一般情况

$$\begin{cases} G_{11}u_{n1}+G_{12}u_{n2}+\cdots+G_{1(n-1)}u_{n(n-1)}=i_{Sn1} \\ G_{21}u_{n1}+G_{22}u_{n2}+\cdots+G_{2(n-1)}u_{n(n-1)}=i_{Sn2} \\ \vdots \\ G_{(n-1)1}u_{n1}+G_{(n-1)2}u_{n2}+\cdots+G_{(n-1)(n-1)}u_{n(n-1)}=i_{Sn(n-1)} \end{cases}$$

其中 G_{ii} —自电导，等于接在结点 i 上所有支路的电导之和(包括电压源与电阻串联支路)。总为正。

$G_{ij}=G_{ji}$—互电导，等于接在结点 i 与结点 j 之间的所支路的电导之和，总为负。

i_{Sni} — 流入结点i的所有电源电流的代数和(包括电压源与电阻串联支路等效的电流源)。

当电路不含受控源时，系数矩阵为对称阵。

上 页 下 页

结点法列方程的一般步骤：

(1) 选定参考结点，标定n-1个独立结点；

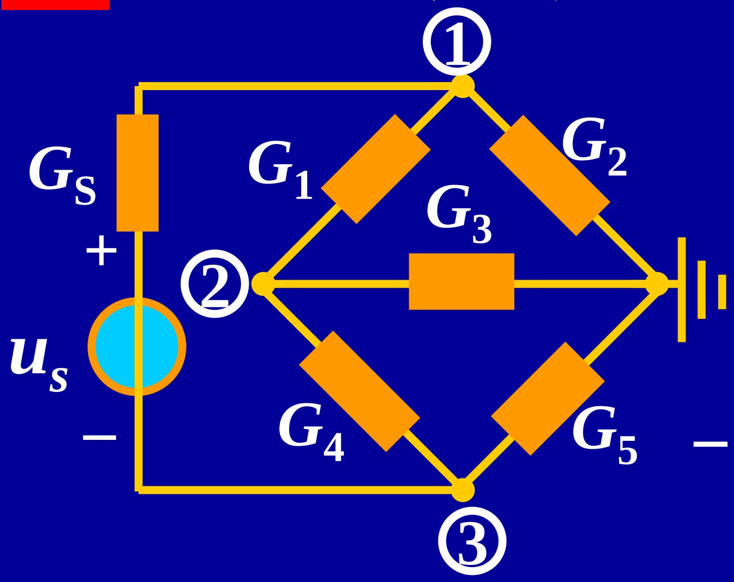
(2) 对n-1个独立结点，以结点电压为未知量，列写其KCL方程；

(3) 求解上述方程，得到n-1个结点电压；

(4) 求各支路电流(用结点电压表示)；

(5) 其它分析。

例 试列写电路的节点电压方程。



$$(G_1+G_2+G_S)u_{n1}-G_1u_{n2}-G_Su_{n3}=G_Su_S$$

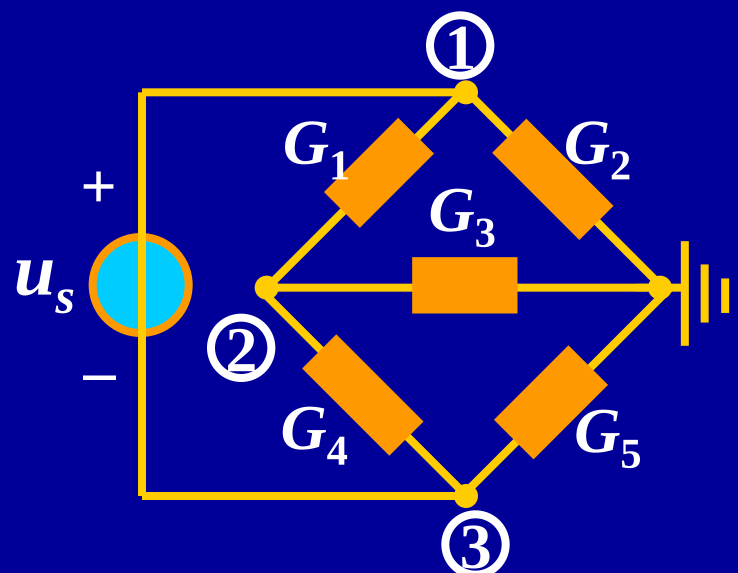
$$-G_1u_{n1}+(G_1+G_3+G_4)u_{n2}-G_4u_{n3}=0$$

$$-G_Su_{n1}-G_4u_{n2}+(G_4+G_5+G_S)u_{n3}=-G_Su_S$$

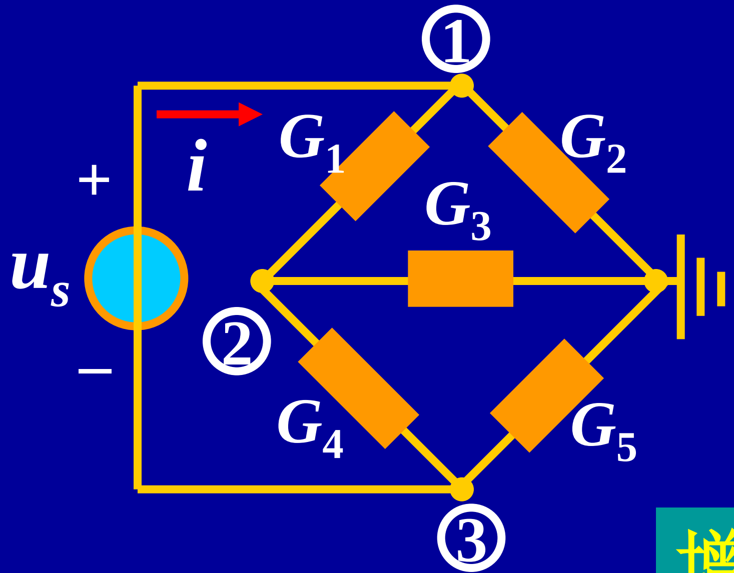
3. 无伴电压源支路的处理

（1）以电压源电流为变量，增补结点电压与电压源间的关系

（2） 选择合适的参考点



上 页 下 页

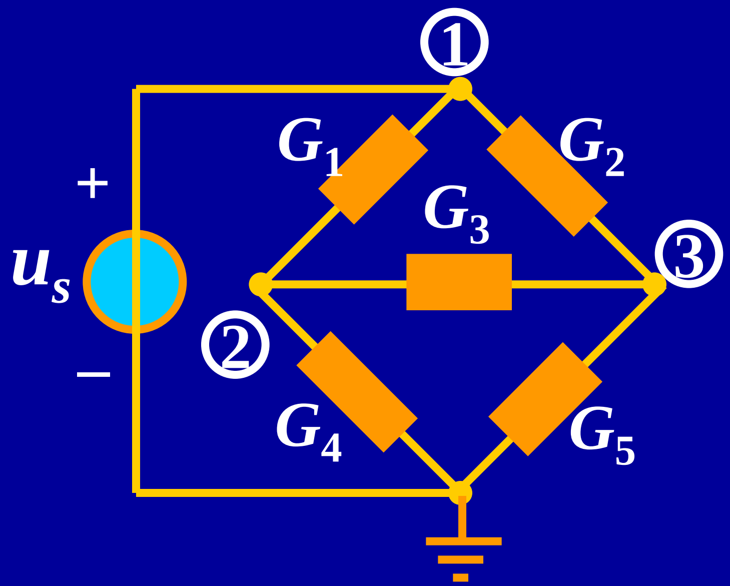


$$\begin{cases} (G_1+G_2)u_{n1}-G_1u_{n2}=i \\ -G_1u_{n1}+(G_1+G_3+G_4)u_{n2}-G_4u_{n3}=0 \\ -G_4u_{n2}+(G_4+G_5)u_{n3}=-i \end{cases}$$

看成电流源

增补方程 $u_{n1}-u_{n3}=u_S$

（2） 选择合适的参考点

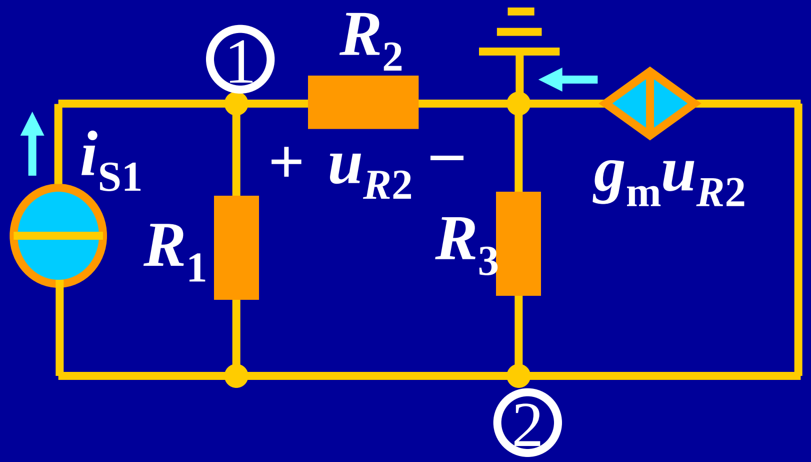


$$\begin{cases} u_{n1}=u_S \\ -G_1u_{n1}+(G_1+G_3+G_4)u_{n2}-G_3u_{n3}=0 \\ -G_2u_{n1}-G_3u_{n2}+(G_2+G_3+G_5)u_{n3}=0 \end{cases}$$

4. 受控电源支路的处理

对含有受控电源支路的电路，可先把受控源看作独立电源按上述方法列方程，再将控制量用结点电压表示。

例 列写电路的结点电压方程。



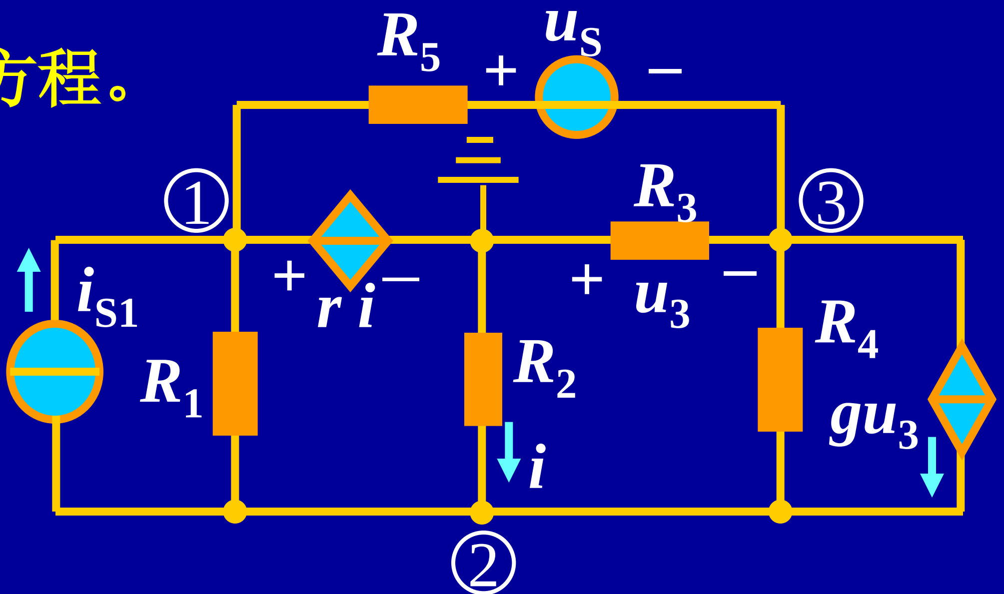
(1) 先把受控源当作独立源列方程；

$$\begin{cases} \left(\dfrac{1}{R_1}+\dfrac{1}{R_2}\right)u_{n1}-\dfrac{1}{R_1}u_{n2}=i_{S1} \\ -\dfrac{1}{R_1}u_{n1}+\left(\dfrac{1}{R_1}+\dfrac{1}{R_3}\right)u_{n2}=-g_m u_{R2}-i_{S1} \end{cases}$$

(2) 用结点电压表示控制量。

$$u_{R2}=u_{n1}$$

例 列写电路的结点电压方程。



解 (1)设参考点，把受控源当作独立源列方程；

$$\begin{cases} u_{n1} = ri \\ (\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_4})u_{n2} - \frac{1}{R_1}u_{n1} - \frac{1}{R_4}u_{n3} = -i_{S1} + gu_3 \\ -\frac{1}{R_5}u_{n1} - \frac{1}{R_4}u_{n2} + (\frac{1}{R_4}+\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_5})u_{n3} = -gu_3 - \frac{u_S}{R_5} \end{cases}$$

(2) 用结点电压表示控制量。

$$u_3 = -u_{n3}$$

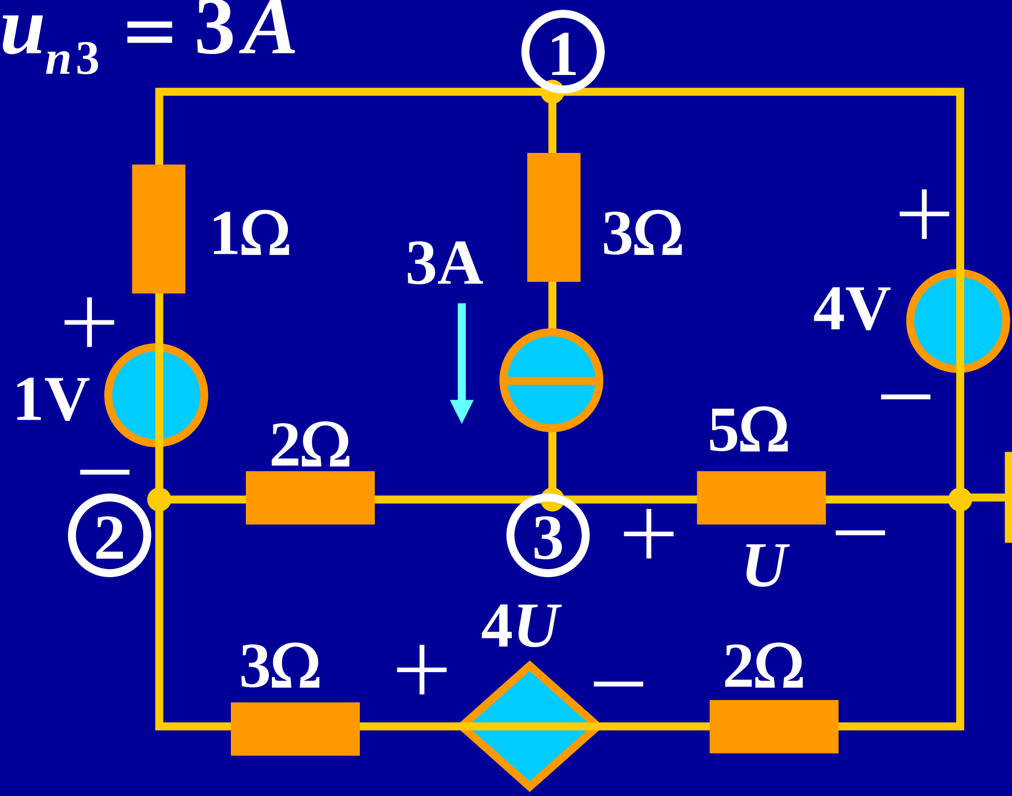
$$i = -u_{n2}/R_2$$

例 列写电路的结点电压方程。

$$u_{n1}=4V$$

$$-u_{n1}+(1+0.5+\frac{1}{3+2})u_{n2}-0.5u_{n3}=-1+\frac{4U}{5}$$

$$-0.5u_{n2}+(0.5+0.2)u_{n3}=3A$$



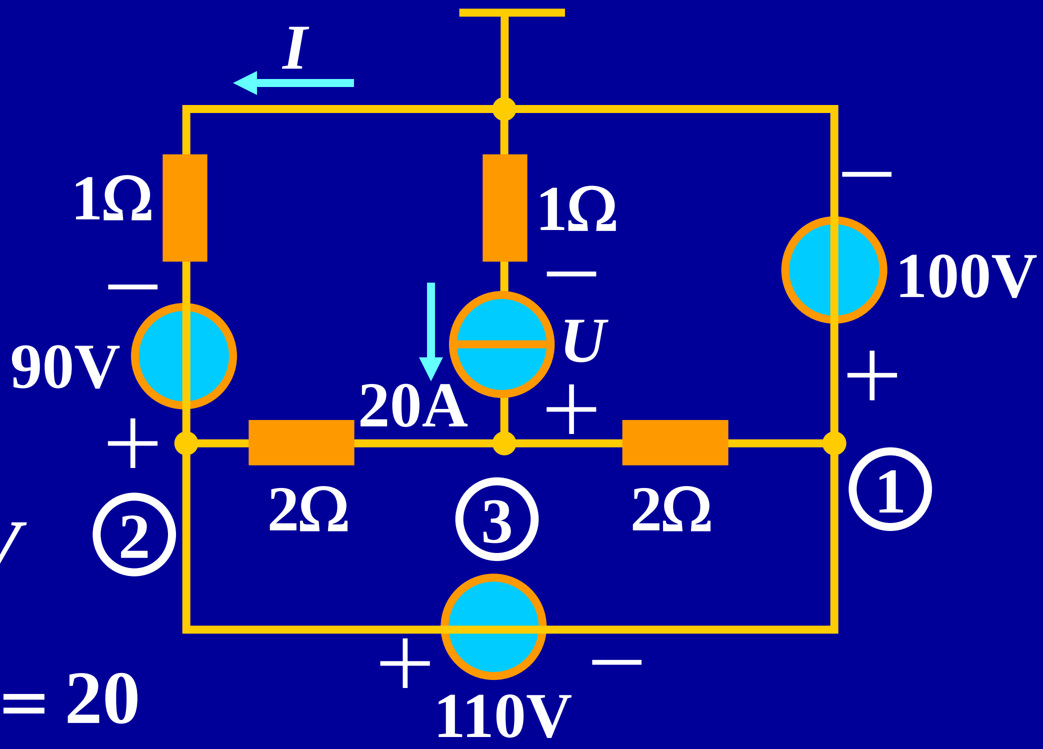
注：与电流源串接的电阻不参与列方程

电流源是一个理想模型，电流恒定，电阻和它串联并不改变任何外电路的参数。同学们可以这么理解：电流源的电阻是无穷大的，就像电压源电阻可以看作0一样。

增补方程：

$$U=u_{n3}$$

例 求U和I 。



解法1 应用结点电压法

$$u_{n1} = 100V$$

$$u_{n2} = 100 + 110 = 210V$$

$$-0.5u_{n1} - 0.5u_{n2} + u_{n3} = 20$$

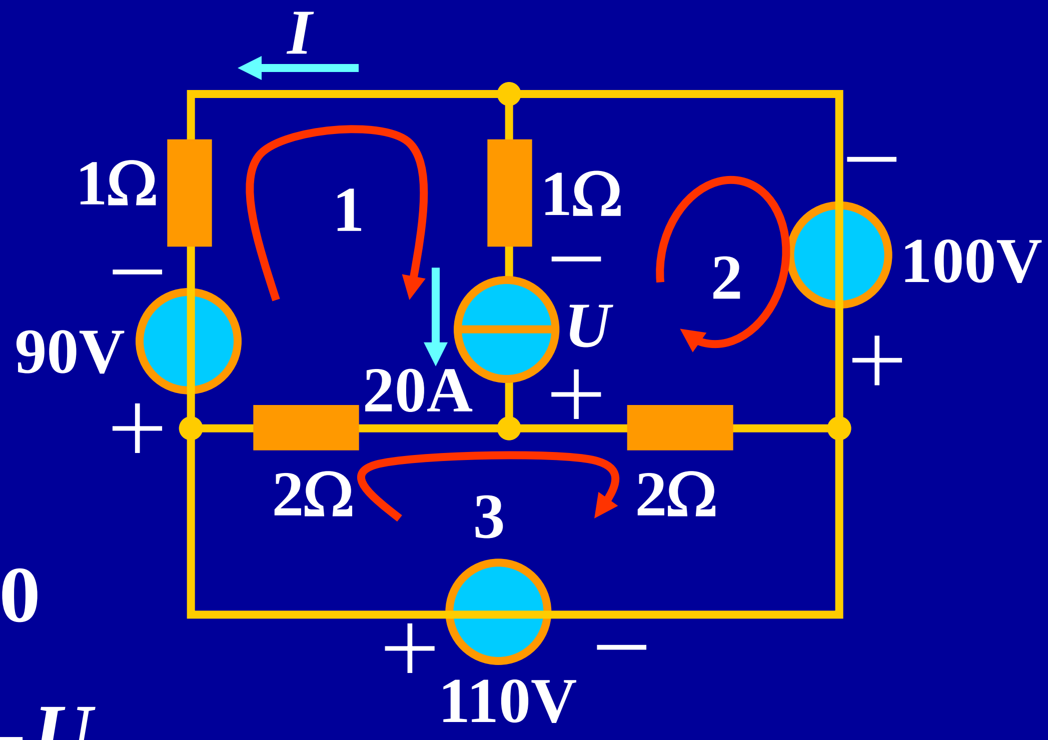
解得:

$$u_{n3} = 20 + 50 + 105 = 175V$$

$$U = u_{n3} + 1 \times 20 = 195V$$

$$I = (90 - u_{n2})/1 = -120A$$

解法2



应用网孔电流法

$$4i_1 - i_2 - 2i_3 = U - 90$$

$$-i_1 + 3i_2 - 2i_3 = 100 - U$$

$$-2i_1 - 2i_2 + 4i_3 = 110$$

$$i_1 - i_2 = 20$$

解得

$$I = -i_1 = -120$$

$$U = 195V$$