

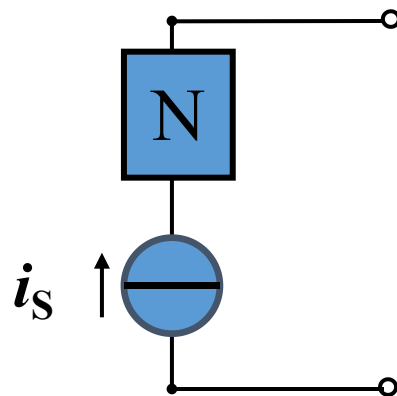
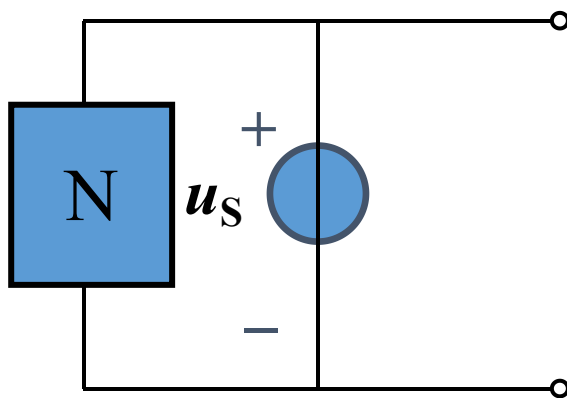


电路分析基础

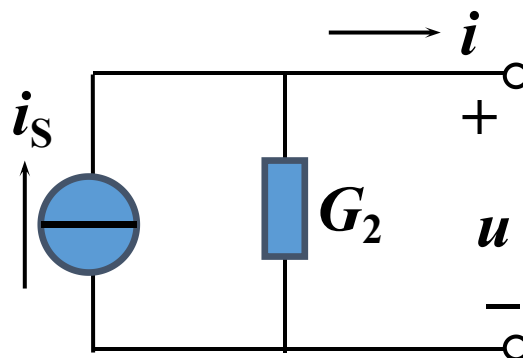
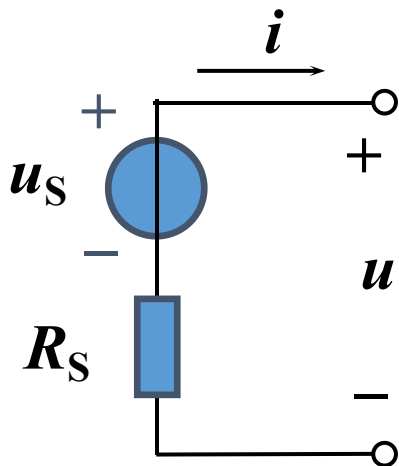
—院四教 张帆
15703565092

回顾——常用等效模型

1、去冗余



2、两种实际电源模型的等效变换



回顾——常用等效模型

3、等效电阻（输入/输出电阻）

单口网络除源后的等效电路（注意：受控源不能置零）

除源：指独立源置0，即

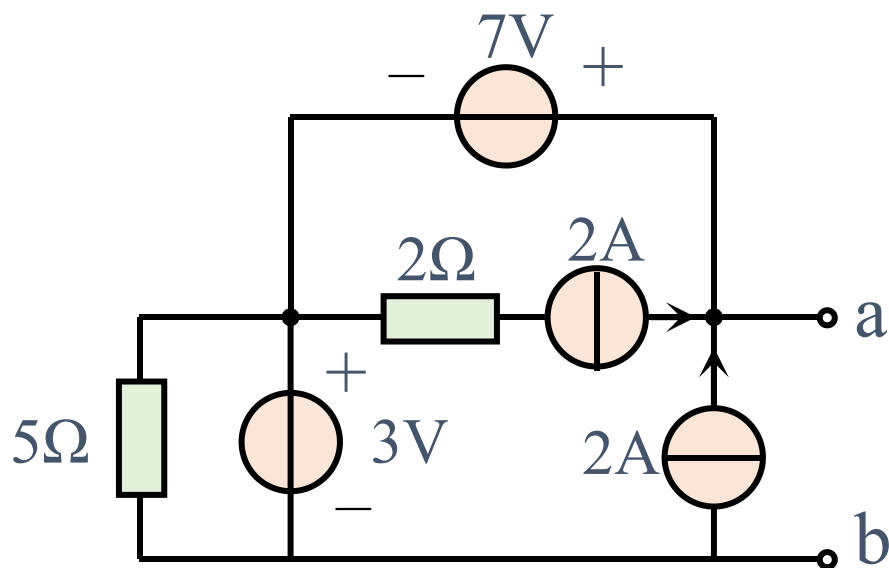
- 电压源用短路线代替
- 电流源用开路代替

两种求法：

- ①对 N_0 化简，即进行电阻串并联；
- ②用**外加电源法**求VCR得 $u= Ri$ ，
则 $R = u/i = \text{端口电压} / \text{端口电流}$

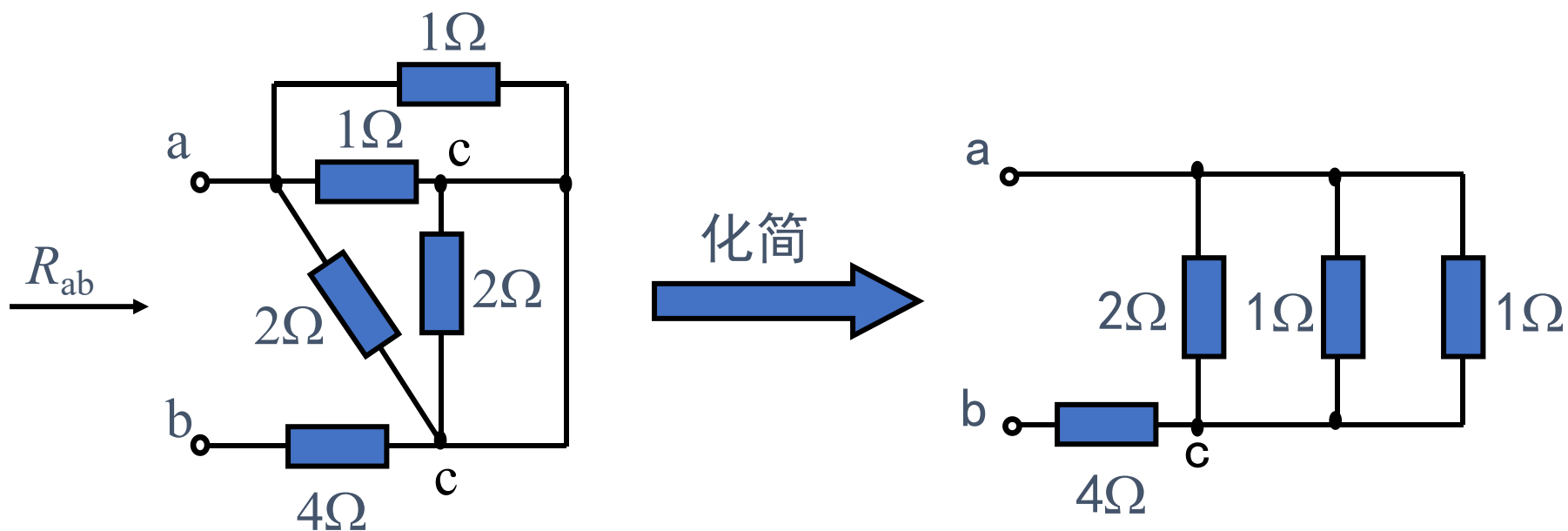
回顾

练习：化简下面的单口网络。



回顾

练习：求下面二端网络的**输入电阻**。



回顾——独立源和受控源对比

- ✓ 是否可以作为激励：
 - 独立源可以；
 - 受控源不可以。
- ✓ 含源单口网络的VCR：
 - 独立源： $u= Ri + u_{oc}$
 - 受控源： $u= Ri$
- ✓ 求等效电阻（输入/输出电阻）：
 - 独立源置零；
 - 受控源不置零。
- ✓ 实际电源模型之间的等效：
 - 受控源和独立源同等对待。

问题

- 方法不直接，不便于计算机完成，不适用于任意电路的求解。

需要更普适的电路分析方法




第三单元 电路的一般分析方法

第三单元 电路的一般分析方法

目的： 找出求解线性电路的分析方法。

对象： 含独立源、受控源的电阻网络。

应用： 主要用于复杂的线性电路的求解。

基础：  拓扑约束——KCL、KVL
元件约束——元件VCR

第三单元 电路的一般分析方法

本章重点：

- 掌握节点分析法
- 了解网孔分析法
- 了解回路分析法

第三单元 电路的一般分析方法

§ 1-9 两类约束 KCL、KVL方程的独立性

§ 1-10 支路分析

§ 2-1 网孔分析

§ 2-2 节点分析

§1-9 两类约束KCL、KVL方程的独立性

一、两类约束

二、KCL、KVL方程的独立性

三、2b法解电路

一、两类约束

1、元件约束

元件的VCR称为元件约束，反映了电路中各元件上电压与电流的关系，它来自元件的性质。

2、拓扑约束

KVL、KCL称为拓扑约束，反映了电路的整体连接关系，它来自元件的相互联接方式。

注记：KCL、KVL和元件的VCR是对电路中各电压变量、电流变量所施加的全部约束，是解决集总电路问题的基本依据。

§1-9 两类约束KCL、KVL方程的独立性

一、两类约束

二、KCL、KVL方程的独立性

三、2b法解电路

二、KCL、KVL方程的独立性

1、KCL方程的独立性

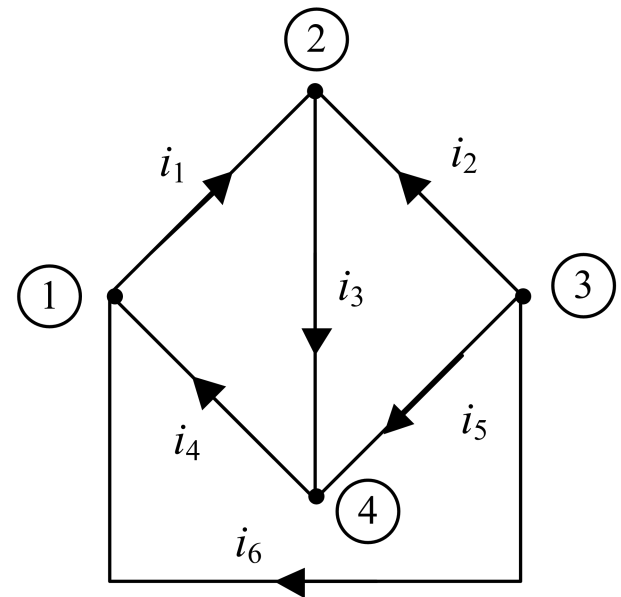
对于节点1、2、3、4可列出KCL方程(电流流出节点取“+”号，流入取“-”号)为

节点1: $i_1 - i_4 - i_6 = 0$

节点2: $-i_1 - i_2 + i_3 = 0$

节点3: $i_2 + i_5 + i_6 = 0$

节点4: $-i_3 + i_4 - i_5 = 0$



思考：这4个方程是独立的吗？

二、KCL、KVL方程的独立性

1、KCL方程的独立性

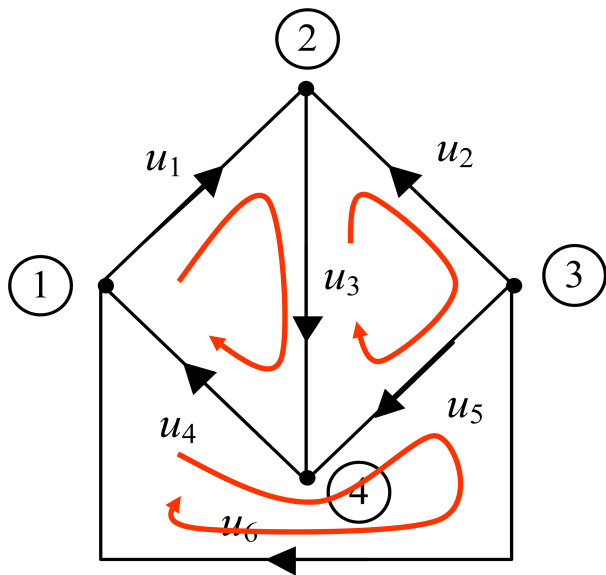
以上4个方程相加为零，故它们是**线性相关的非独立**方程组。不难验证，其中**任意3个方程**可组成**独立**方程组。

【结论】

若电路有 n 个节点，则有 $(n-1)$ 个独立的KCL方程。

二、KCL、KVL方程的独立性

2、KVL方程的独立性



$$(1) + (2) = (4)$$

$$(1) + (3) = (5)$$

$$(2) + (3) = (6)$$

$$(1) + (2) + (3) = (7)$$

$$(1) \quad u_1 + u_3 + u_4 = 0$$

$$(2) \quad -u_2 + u_5 - u_3 = 0$$

$$(3) \quad -u_4 - u_5 + u_6 = 0$$

$$(4) \quad u_1 - u_2 + u_5 + u_4 = 0$$

$$(5) \quad u_1 + u_3 - u_5 + u_6 = 0$$

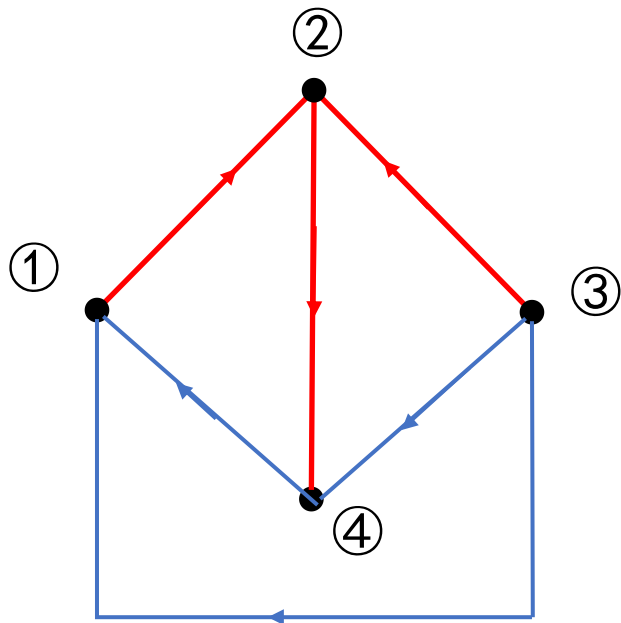
$$(6) \quad -u_3 - u_2 + u_6 - u_4 = 0$$

$$(7) \quad u_1 - u_2 + u_6 = 0$$

只有3个方程独立

二、KCL、KVL方程的独立性

2、KVL方程的独立性



红色支路：树枝

蓝色支路：连枝

若电路有 n 个节点， b 条支路，则有 $(n-1)$ 条树枝， $b-(n-1)$ 条连枝

【结论】

电路的网孔数=电路的连枝数= $b-(n-1)$

二、KCL、KVL方程的独立性

2、KVL方程的独立性

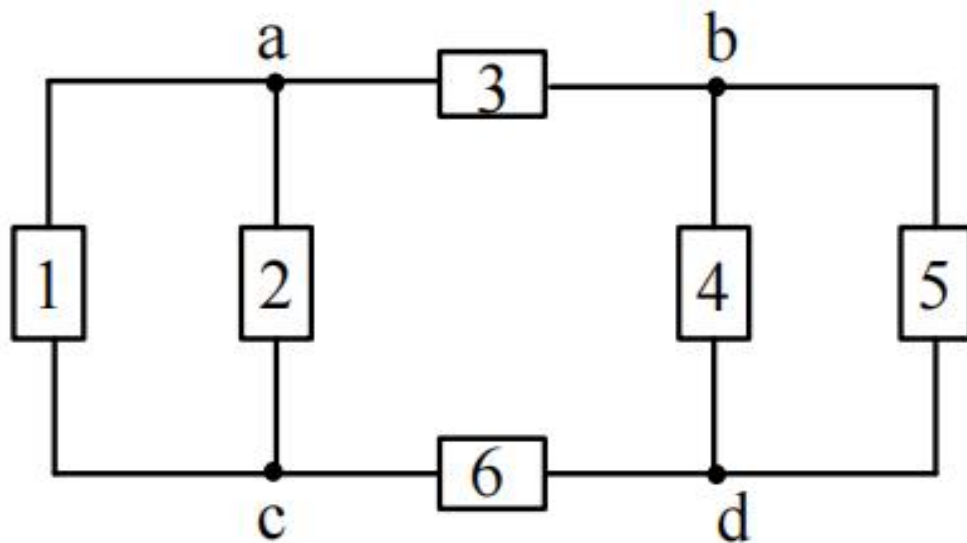
【结论】

若电路有 n 个节点， b 条支路，则有 $m=b-(n-1)$ 个网孔， m 个网孔的KVL方程是独立的，与独立KVL方程对应的回路称为独立回路。

■ 独立KVL回路选择：

- 方法1：对平面电路， m 个网孔是一组独立回路。
（如上例中1、2、3回路。）
- 方法2：每选一个回路，让该回路包含新的支路，选满 m 个为止。（如上例中1、4、7回路。）

二、KCL、KVL方程的独立性



$$b=6$$

$$n=4$$

$$l=6$$

$$m=3$$

独立KCL方程的数量： $n-1$

独立KVL方程的数量： $m=b-(n-1)$

二、KCL、KVL方程的独立性

- 1. 设电路的节点数为 n ，则独立的**KCL**方程为 $n-1$ 个，且为任意的 $n-1$ 个。
- 2. 给定一平面电路（ n 个节点， b 条支路），则该电路有 $b-(n-1)$ 个网孔， $b-(n-1)$ 个网孔的**KVL**是独立的。
- 3. 综合所述，由KCL、KVL可以得到的独立方程总数为 $(n-1)+[b-(n-1)]=b$ 个。

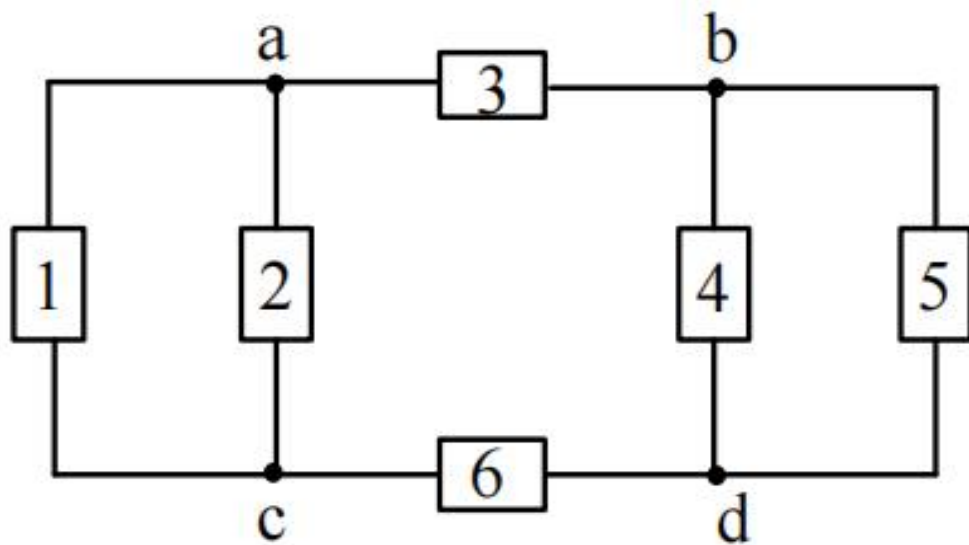
§1-9 两类约束KCL、KVL方程的独立性

一、两类约束

二、KCL、KVL方程的独立性

三、2b法解电路

三、2b法解电路



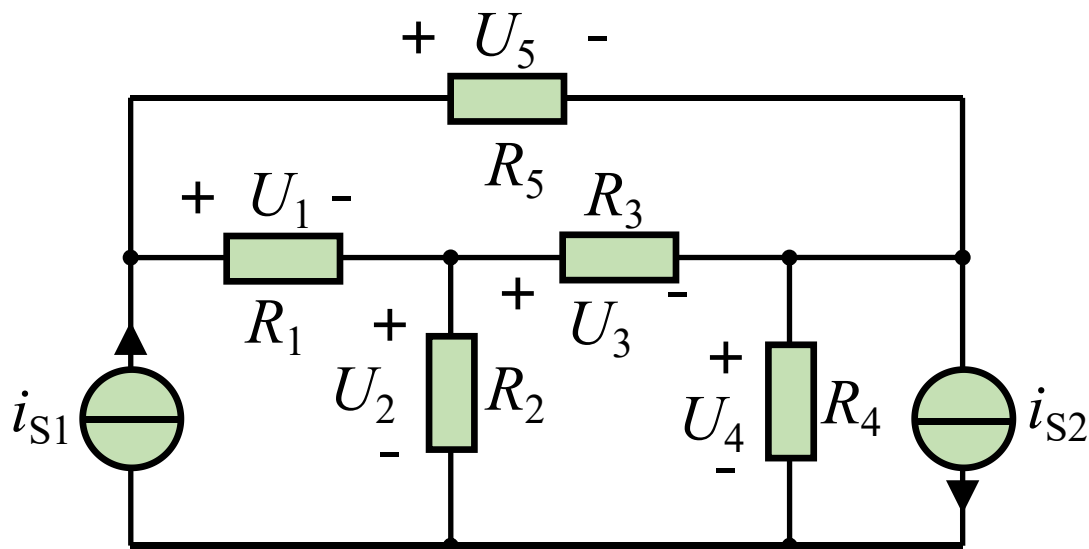
元件约束: b

拓扑约束: b

} 两类约束: $2b$

三、2b法解电路

例： 求解各支路的电流、电压



元件约束：7个

KVL方程：4个

KCL方程：3个

共14个方程

§1-10 支路分析

一、支路电流法

二、支路电压法

一、支路电流法

由KVL、KCL得到的 b 个独立的方程中，根据各支路的VCR，将所有支路电压 u 用支路电流 i 表示出，这样就得到以**支路电流**为变量的 b 个方程，称为**支路电流法**。

设支路电流



隐含：元件约束

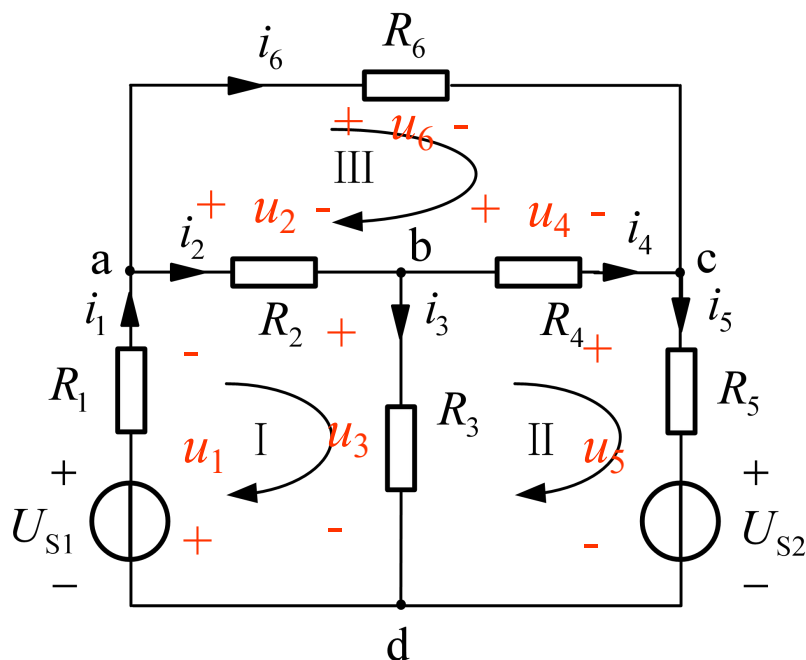
表示支路电压



列拓扑约束

一、支路电流法

例： 求各支路电压和支路电流。



$n-1$ 个 KCL 方程

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

$b-(n-1)$ 个 KVL 方程

$$\begin{cases} -U_{S1} + R_1 i_1 + R_2 i_2 + R_3 i_3 = 0 \\ -R_3 i_3 + R_4 i_4 + R_5 i_5 + U_{S2} = 0 \\ -R_2 i_2 - R_4 i_4 + R_6 i_6 = 0 \end{cases}$$

§1-10 支路分析

一、支路电流法

二、支路电压法

二、支路电压法

类似支路电流法，它是以**支路电压**为变量的 b 个独立的方程。

设支路电压



隐含：元件约束

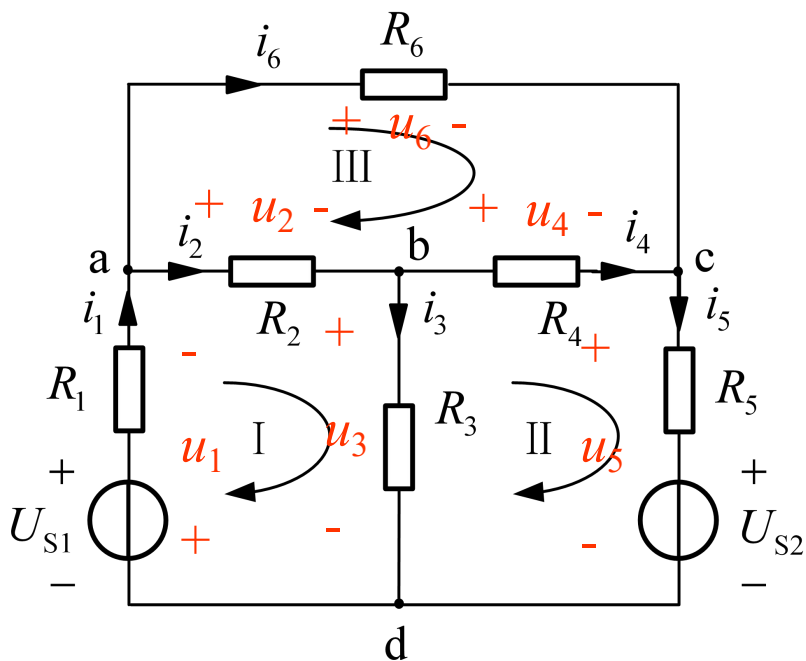
表示支路电流



列拓扑约束

一、支路电流法

例：求各支路电压和支路电流。



$b-(n-1)$ 个KVL方程

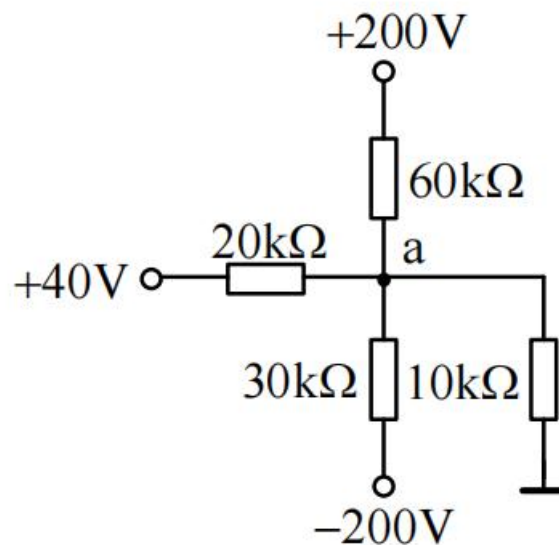
$$\begin{cases} u_1 + u_2 + u_3 = 0 \\ -u_3 + u_4 + u_5 = 0 \\ -u_2 - u_4 + u_6 = 0 \end{cases}$$

$n-1$ 个KCL方程

$$\begin{cases} -\frac{u_1 + U_{S1}}{R_1} + \frac{u_2}{R_2} + \frac{u_6}{R_6} = 0 \\ -\frac{u_2}{R_2} + \frac{u_3}{R_3} + \frac{u_4}{R_4} = 0 \\ -\frac{u_4}{R_4} + \frac{u_5 - U_{S2}}{R_5} - \frac{u_6}{R_6} = 0 \end{cases}$$

二、支路电压法

例： 求a点的电压。



支路分析法总结

设支路电流（电压）



利用元件约束表示支路
电压（电流）



列拓扑约束方程

注记：只设电压变量（电流变量），直接利用元件约束写出另一组变量，故方程个数减少到 b 个

此题未设置答案，请点击右侧设置按钮

2b法是以_____为变量列方程？方程个数是_____？

支路分析法是以_____为变量列方程？方程个数是_____？

作答

支路分析法

思考1:

方程个数还能再继续减少吗？如果想继续减少方程数量，应该如何选择列方程的变量？

§2-2 节点分析

一、独立的节点电压变量

二、节点分析法

三、特殊情况的处理

一、独立的节点电压变量

回顾

1. 参考点: 电路中指定的零电位点，用接地表示。

2. 节点电位: 电路中某节点与参考点之间的电压。如 a 点电位记为 u_a 。两节点之间的电位差称为这两个节点之间的电压。

参考点选择的不同，则节点电位（ ），两点之间的电压（ ）。

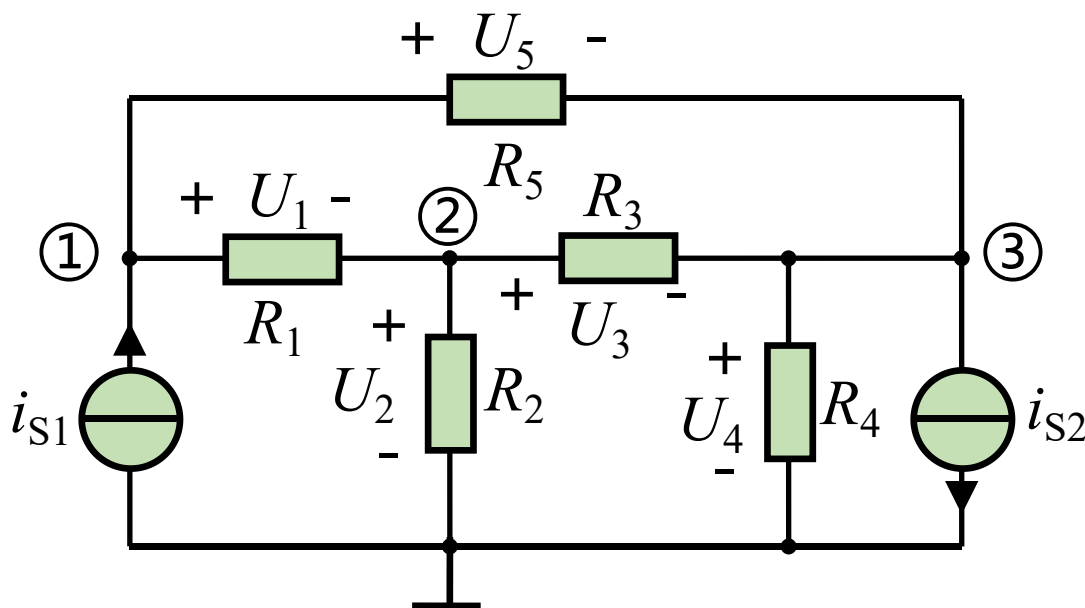
- ☐ A 相同，相同
- ☒ B 相同，不同
- ☐ C 不同，相同
- ☐ D 不同，不同

提交

一、独立的节点电压变量

n 个节点的电路，有 $n-1$ 个节点电压（其中一个节点为参考点），则 $n-1$ 个节点电压是一组独立的完备的电压变量。

- **独立性：**各节点电压线性无关。
- **完备性：**所有支路电压都能由节点电压表示出来。

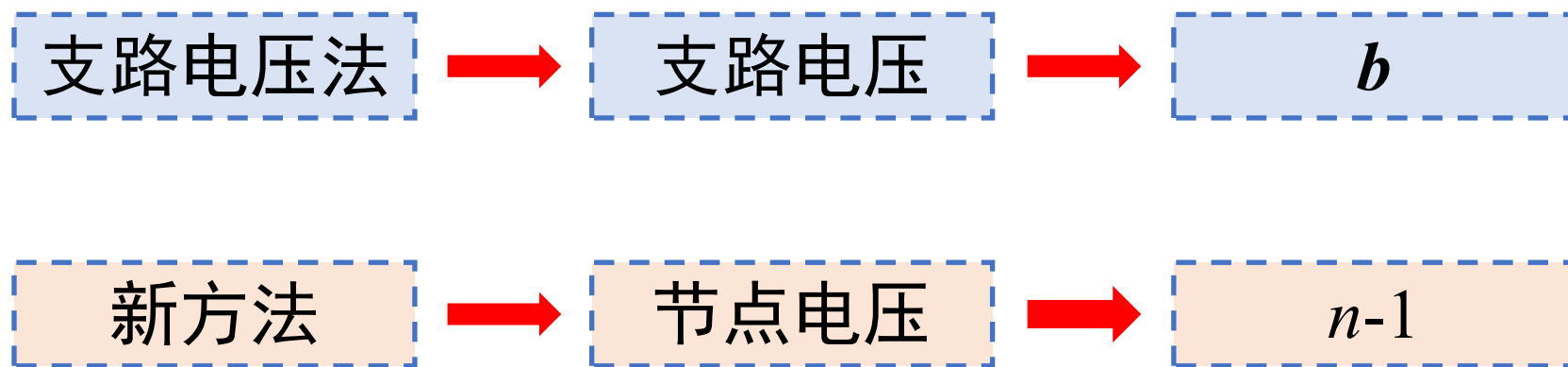


设 u_1 u_2 u_3 分别为节点①、②、③的节点电压。

一、独立的节点电压变量

选取变量

变量个数



变量个数减少到 $n-1$ ，只需要列 $n-1$ 个线性无关的方程即可。

§2-2 节点分析

一、独立的节点电压变量

二、节点分析法

三、特殊情况的处理

支路电压法是设支路电压，用支路电压表示支路电流的依据是（ ），列方程的依据是（ ）。

- ☐ A 元件约束，元件约束
- ☒ B 元件约束，拓扑约束
- ☐ C 拓扑约束，元件约束
- ☐ D 拓扑约束，拓扑约束

提交

用节点电压表示支路电压的依据是（ ）

- ☐ A 元件约束
- ☐ B KCL
- ☒ C KVL

提交

二、节点分析法

设节点电压 ($n-1$)

利用的条件数量: $b-n+1$ ↓ 依据: KVL

表示支路电压

利用的条件数量: b ↓ 依据: 元件约束

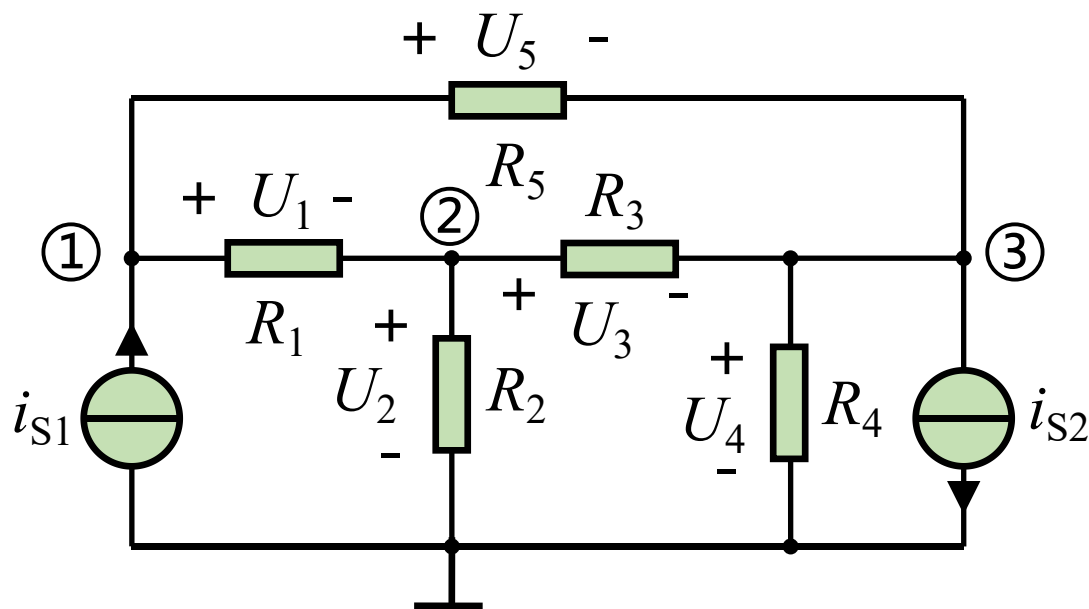
表示支路电流

↓ 依据: ?

方程数量?

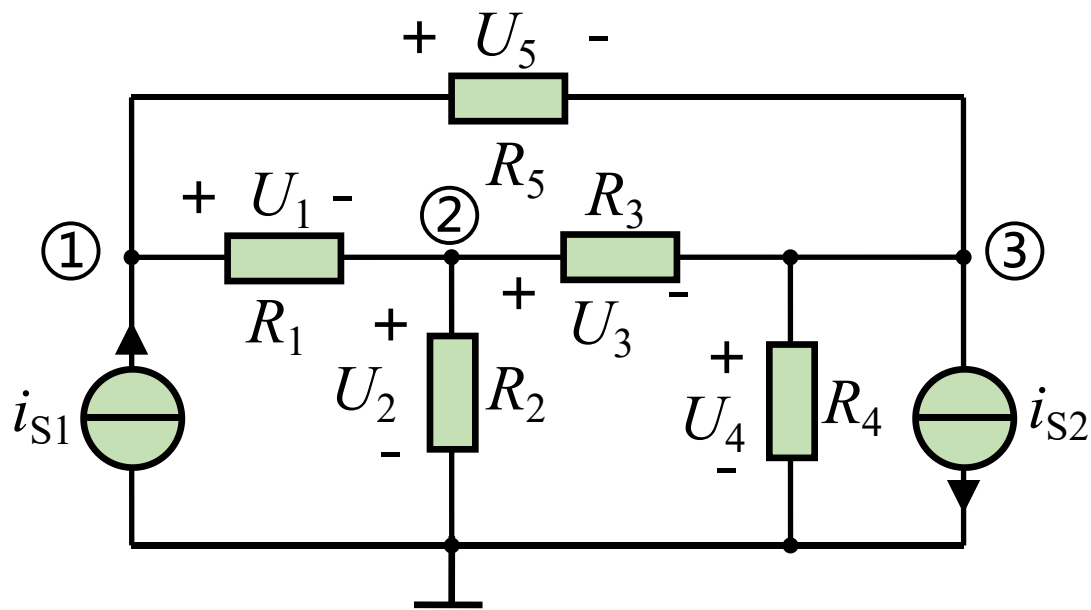
列方程

二、节点分析法



请同学们自行列方程，求解 u_1 ， u_2 ， u_3

二、节点分析法



$$\begin{cases} (G_1 + G_5)u_1 - G_1u_2 - G_5u_3 = i_{s1} \\ -G_1u_1 + (G_1 + G_2 + G_3)u_2 - G_3u_3 = 0 \\ -G_5u_1 - G_3u_2 + (G_3 + G_4 + G_5)u_3 = -i_{s2} \end{cases}$$

二、节点分析法

节点方程的一般形式：

方程数量： $n-1$

$$\begin{cases} G_{11}u_1 + G_{12}u_2 + \cdots + G_{1(n-1)}u_{n-1} = i_{s1} \\ G_{21}u_1 + G_{22}u_2 + \cdots + G_{2(n-1)}u_{n-1} = i_{s2} \\ \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \\ G_{(n-1)1}u_1 + G_{(n-1)2}u_2 + \cdots + G_{(n-1)(n-1)}u_{n-1} = i_{s(n-1)} \end{cases}$$

或矩阵形式

$$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \cdots & G_{1(n-1)} \\ G_{21} & G_{22} & \cdots & G_{2(n-2)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ G_{(n-1)1} & G_{(n-1)2} & \cdots & G_{(n-1)(n-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \cdots \\ u_{(n-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ \cdots \\ i_{s(n-1)} \end{bmatrix}$$

二、节点分析法

在节点分析法的一般形式中：

G_{ii} — **自电导**，等于接在节点 i 上所有支路的电导之和，总为**正**。

$G_{ij} = G_{ji}$ — **互电导**，等于接在节点 i 与节点 j 之间的所有支路的电导之和，并冠以**负**号。

i_{Si} — **流入**节点 i 的所有电流源电流的代数和。

二、节点分析法

思考2:

节点方程的系数矩阵一定是对称矩阵吗？

二、节点分析法

节点方程一般形式的标准电路有哪些要求：

- 1、电路中无受控源、独立电压源，只有独立电流源和电阻；
- 2、在独立电流源支路上无其它元件。

思考

若电路不是节点方程一般形式的标准电路该怎么办？

§2-2 节点分析

一、独立的节点电压变量

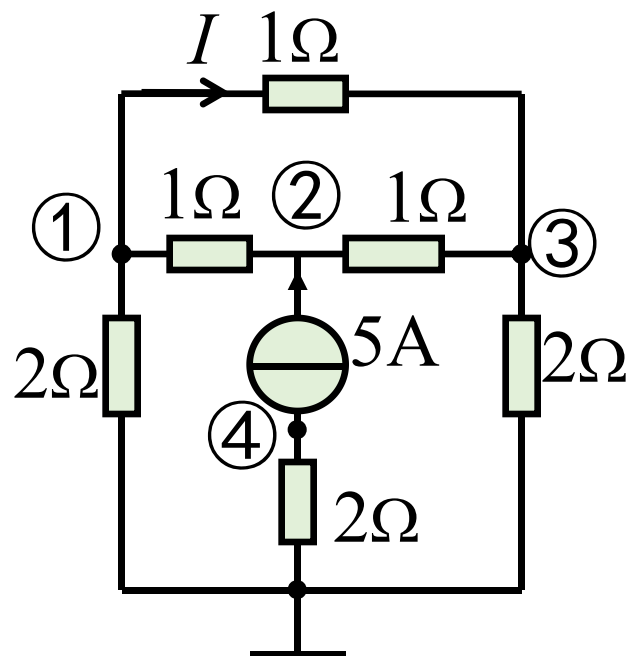
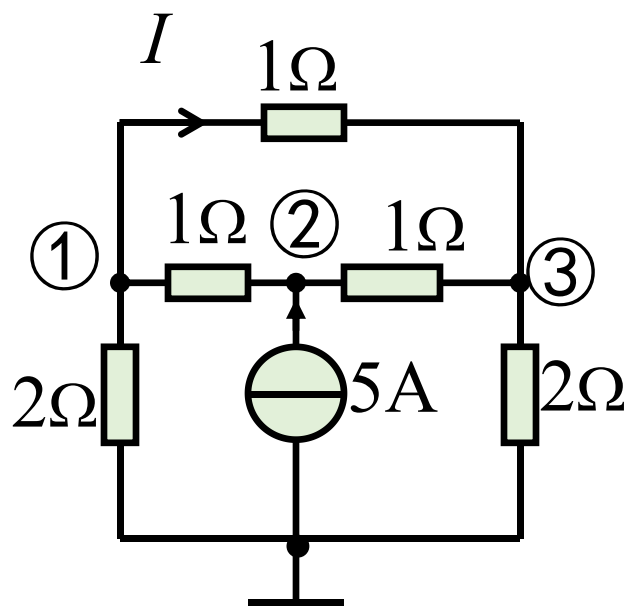
二、节点分析法

三、特殊情况的处理

三、特殊情况的处理

特殊情况1： 在电流源支路上串联一个电阻

例 求电路中电流 I 及电流源功率



思考： 在电流源支路上串一个电阻，节点方程改变吗？那改变的是什么？

三、特殊情况的处理

特殊情况2：两个独立节点之间连接有理想电压源

例 列写图示电路的节点电压方程。

方法1:

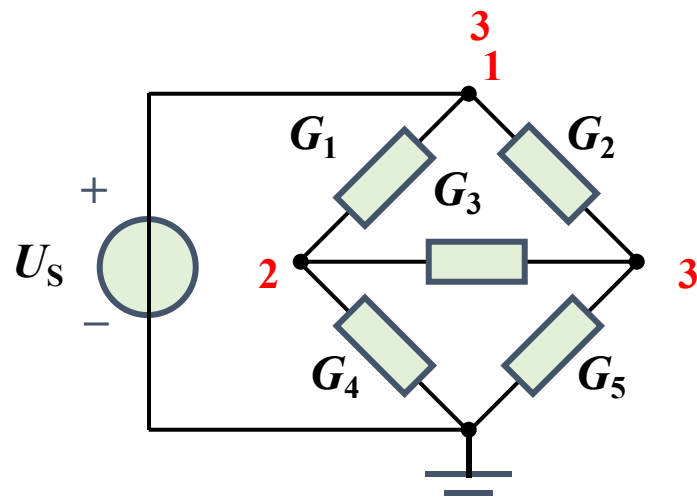
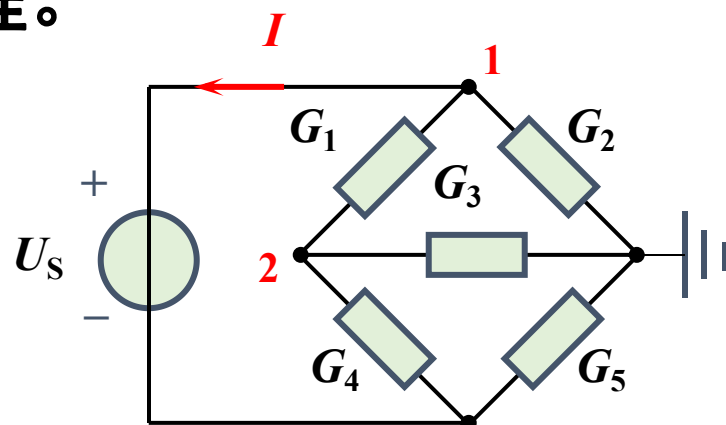
设电压源支路的电流为 I ，增加补充方程（节点电压与电压源间的关系）。

适用于已标定参考点的情况

方法2:

选择合适的参考点（电压源的负极）。

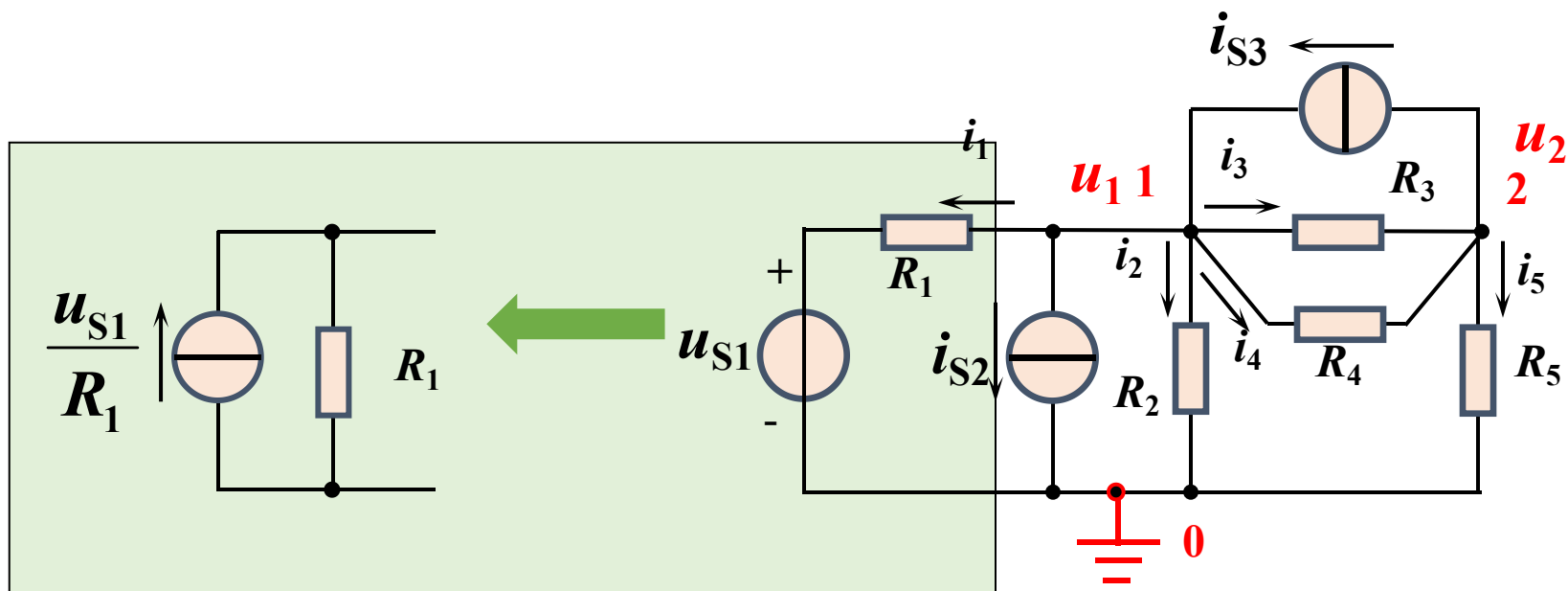
适用于未标定参考点的情况



三、特殊情况处理

特殊情况3：电路中含电压源与电阻串联的支路

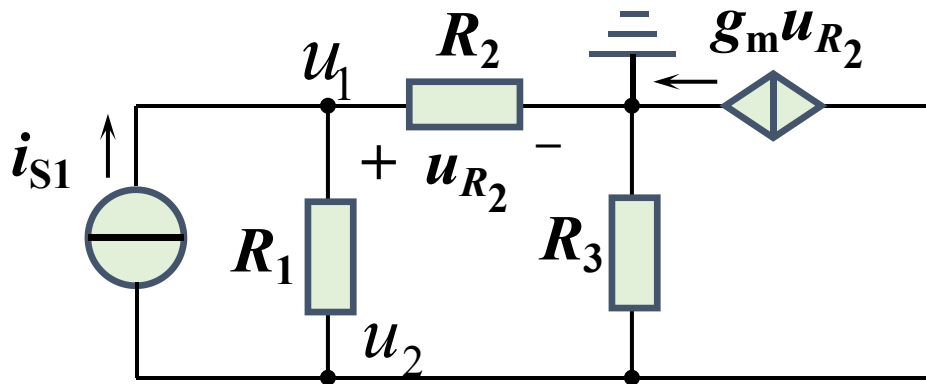
可将该支路进行电源等效变换后，再列方程。



三、特殊情况的处理

特殊情况4：电路中含有受控电流源

例 列写下图含VCCS电路的节点电压方程。



- (1) 先把受控源当作独立源看待，列方程；
- (2) 增加补充方程，用节点电压表示控制量。

三、特殊情况的处理

特殊情况4：电路中含有受控电流源

回答思考2： 节点方程的系数矩阵一定是对称矩阵吗？

答： 当电路含受控源时，系数矩阵一般不再为对称阵。

思考3： 当电路中含有受控电压源时该如何列写节点电压方程？

节点分析法总结

在列节点方程时应注意：

1. 参考点的选择：

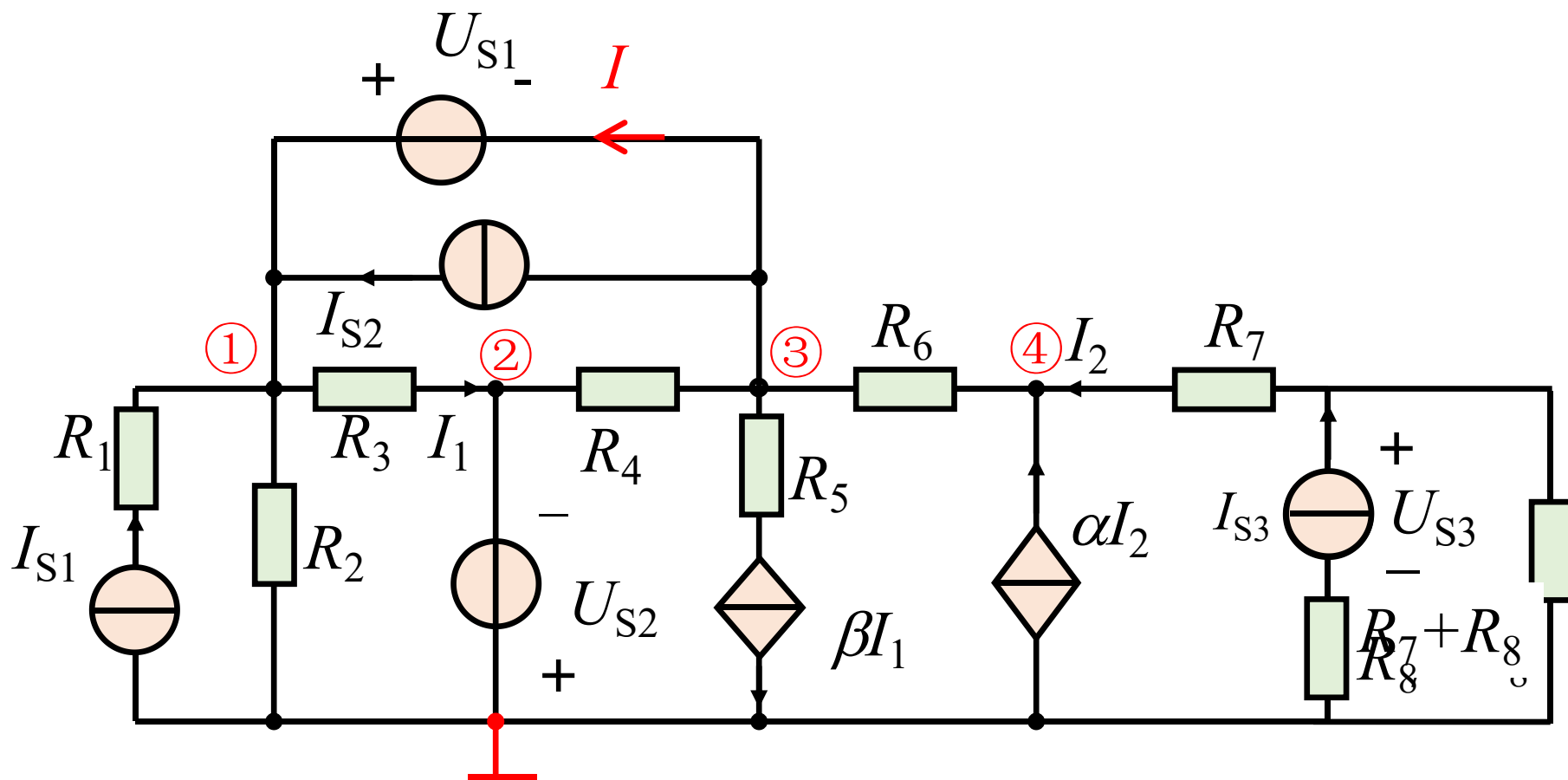
- a. 最多支路的连接点；
- b. 将电压源的一端作为参考点。

2. 注意几种特殊情况的处理：

- 电流源支路上串个电阻，原节点方程不改变；
- 节点之间有电压源，取合适的参考点；
- 电压源与电阻串联，先等效为电流源与电阻并联；
- 对受控源的处理，补充方程——控制量用节点电压表示。

§2-2 节点分析

练习 求电流 I_1 , I_2



§2-2 节点分析

思考：

4. 说说节点电压与支路电压的不同之处；
5. 节点分析法对非平面电路适用吗？

回顾

节点方程的一般形式：

$$\begin{cases} G_{11}u_1 + G_{12}u_2 + \cdots + G_{1(n-1)}u_{n-1} = i_{s1} \\ G_{21}u_1 + G_{22}u_2 + \cdots + G_{2(n-1)}u_{n-1} = i_{s2} \\ \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \\ G_{(n-1)1}u_1 + G_{(n-1)2}u_2 + \cdots + G_{(n-1)(n-1)}u_{n-1} = i_{s(n-1)} \end{cases}$$

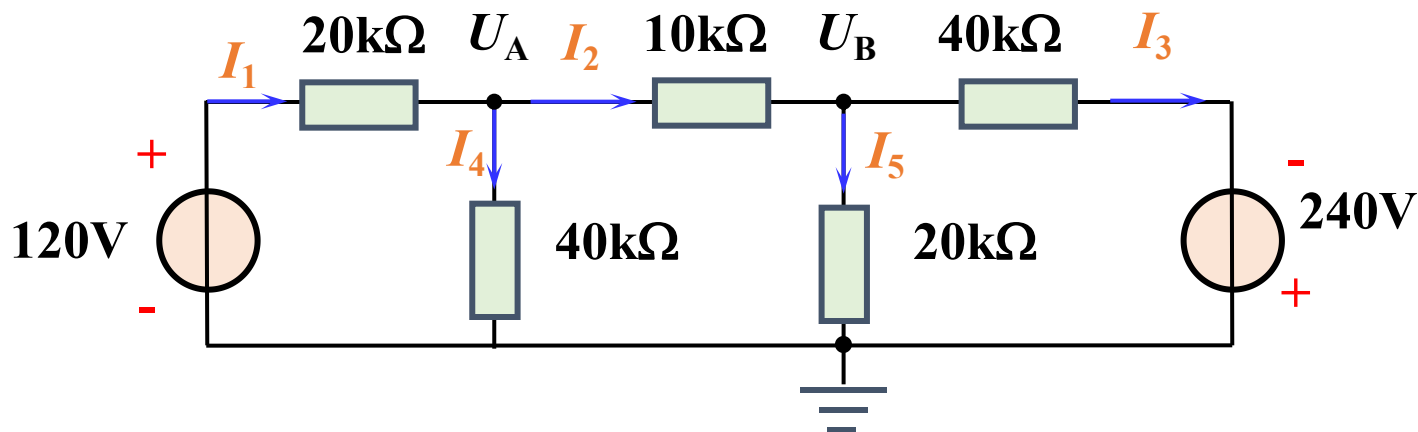
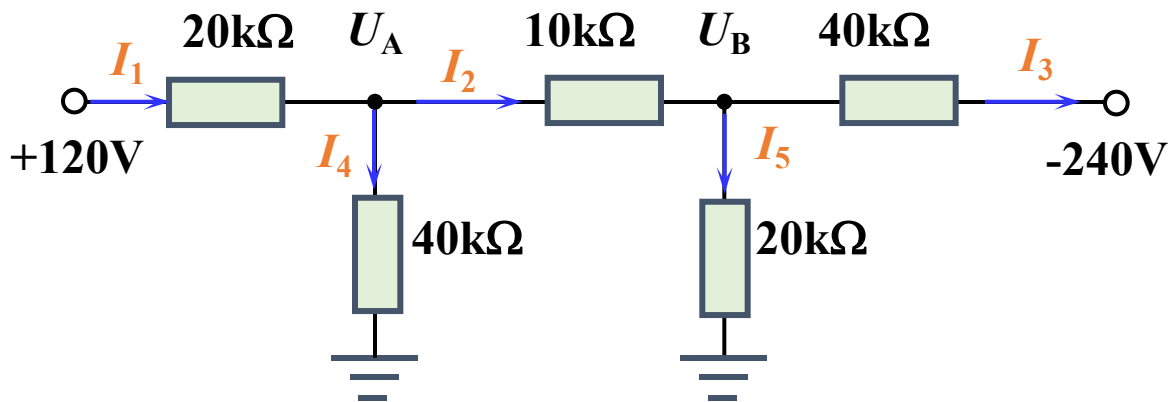
G_{ii} ——**自电导**，等于接在节点*i*上所有支路的电导之和，总为**正**。

$G_{ij} = G_{ji}$ ——**互电导**，等于接在节点*i*与节点*j*之间的所有支路的电导之和，并冠以**负号**。

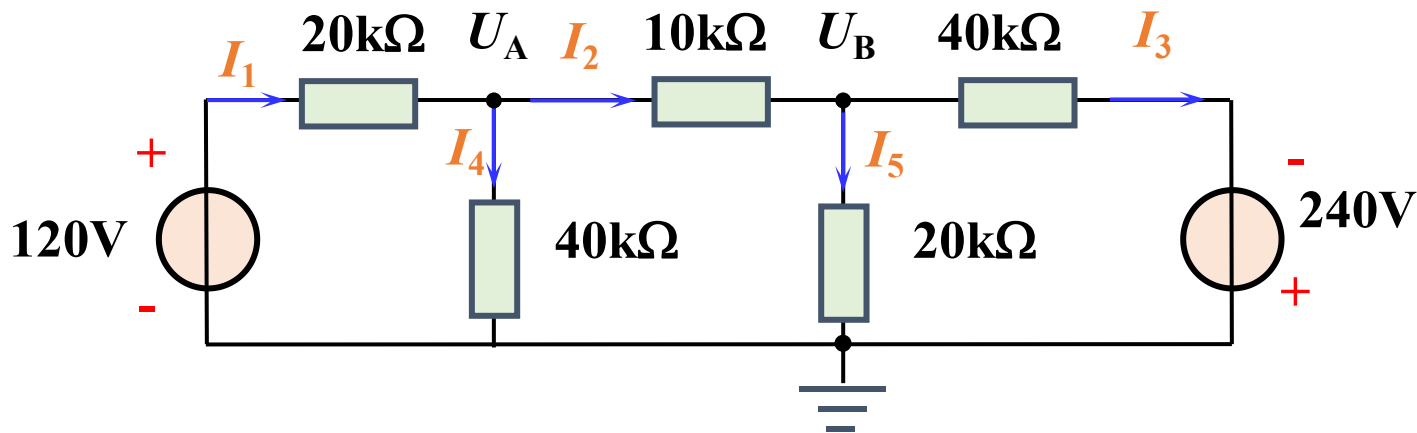
i_{si} ——**流入**节点*i*的所有**电流源**电流的代数和。

§2-2 节点分析

例 用节点法求各支路电流。



§2-2 节点分析



解

$$\left(\frac{1}{20} + \frac{1}{40} + \frac{1}{10}\right)U_A - \frac{1}{10}U_B = \frac{120}{20}$$

$$-\frac{1}{10}U_A + \left(\frac{1}{10} + \frac{1}{20} + \frac{1}{40}\right)U_B = -\frac{240}{40}$$



$$\begin{cases} U_A = 21.8\text{V} \\ U_B = -21.82\text{V} \end{cases}$$

各支路电流：

$$I_1 = (120 - U_A) / 20 = 4.91\text{mA}$$

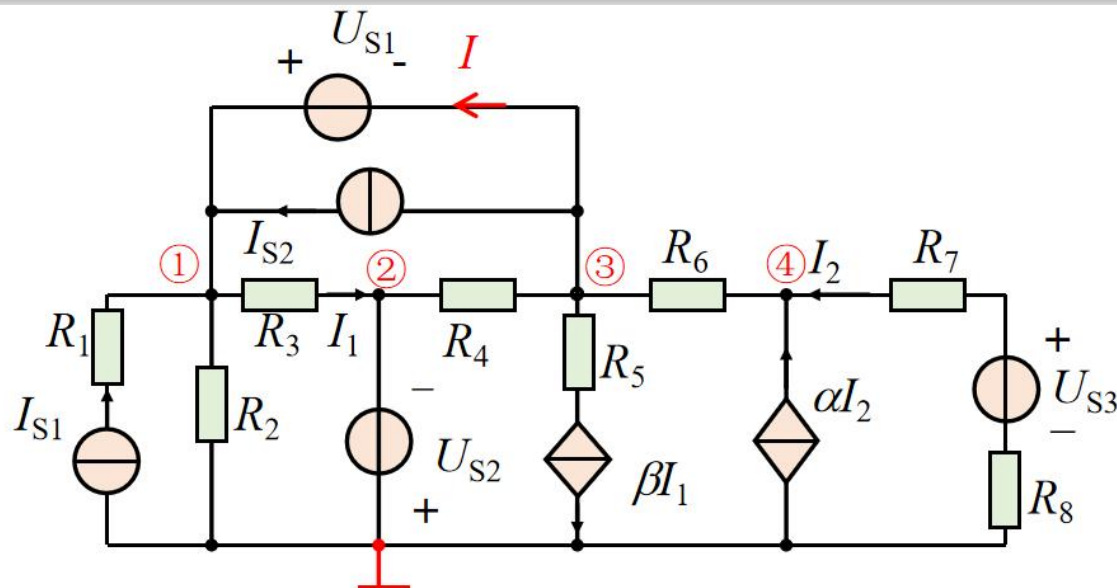
$$I_3 = (U_B + 240) / 40 = 5.46\text{mA}$$

$$I_5 = U_B / 20 = -1.09\text{mA}$$

$$I_2 = (U_A - U_B) / 10 = 4.36\text{mA}$$

$$I_4 = U_A / 40 = 0.546\text{mA}$$

§2-2 节点分析



$$\left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) u_1 - \frac{1}{R_3} u_2 = I + I_{S1} + I_{S2} - I_1$$



$$\left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} \right) u_3 - \frac{1}{R_4} u_2 - \frac{1}{R_6} u_4 = -\beta I_1 - I - I_{S2}$$

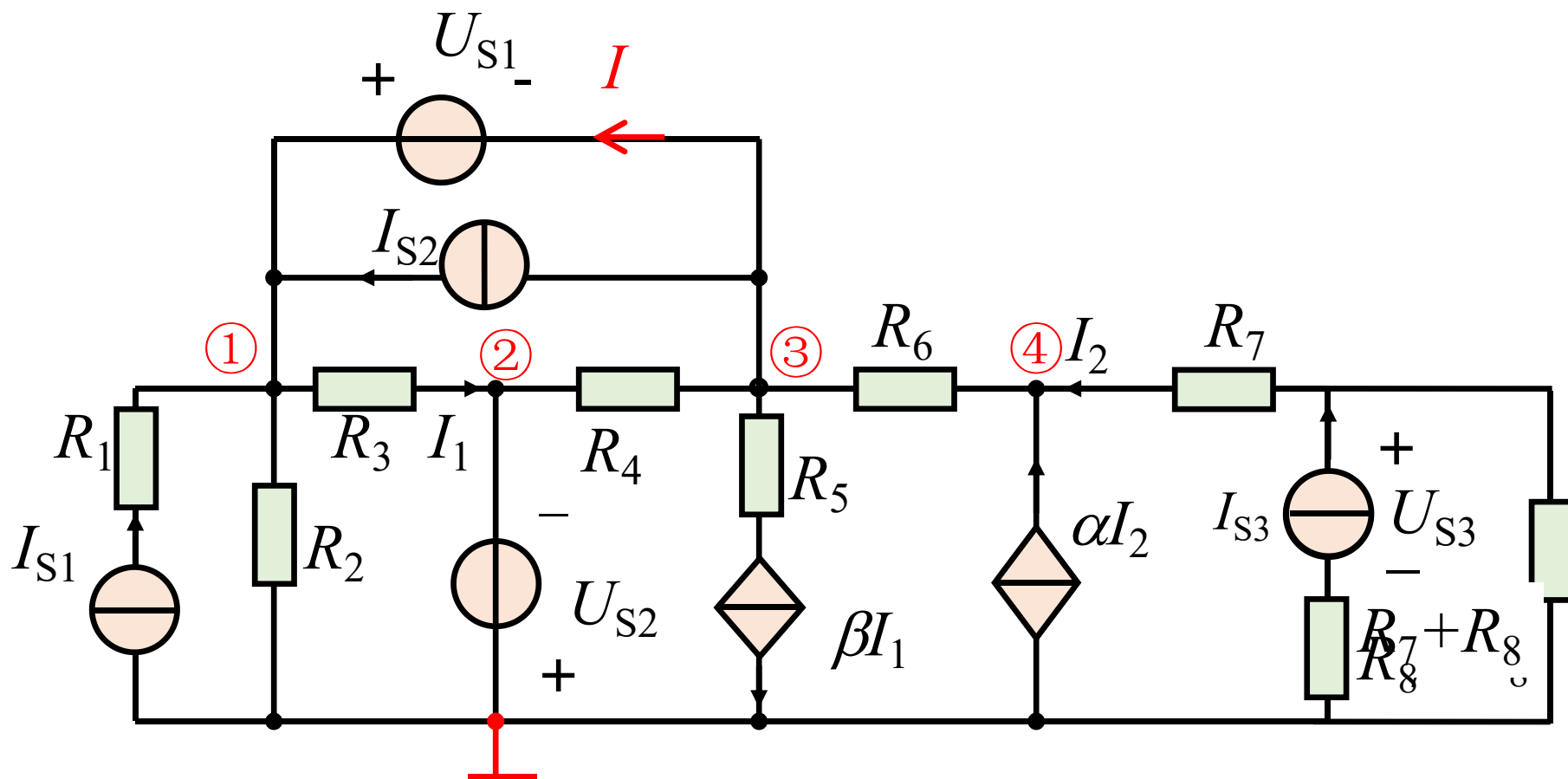


$$\left(\frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_7} + \frac{1}{R_8} \right) u_4 - \frac{1}{R_6} u_3 = \alpha I_2 + \frac{u_{S3}}{R_7 + R_8}$$



§2-2 节点分析

例 求电流 I_1 , I_2



§2-2 节点分析

总结：

- 1、变量： $n-1$ 节点电压变量
- 2、列方程依据： $n-1$ 个KCL方程
- 3、特殊情况：
 - 电流源支路上串电阻；
 - 有伴电压源、无伴电压源；
 - 有受控源。

§2-2 节点分析

思考：

- 4、说说节点电压与支路电压的不同之处；
- 5、节点分析法对非平面电路适用吗？

§2-1 网孔分析

一、独立的网孔电流变量

二、网孔分析法

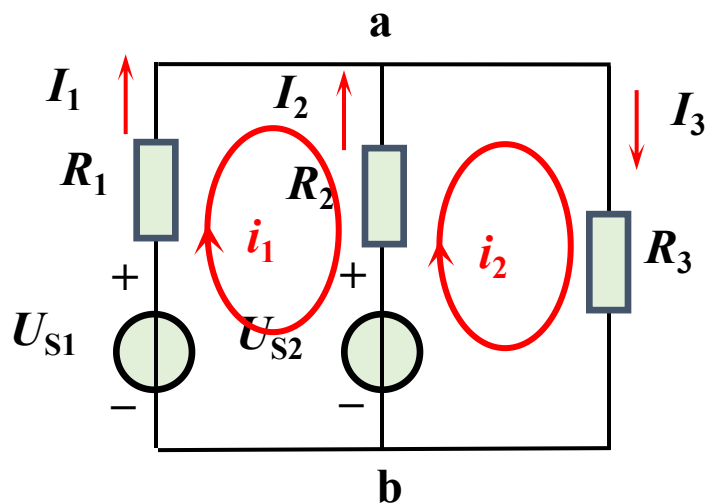
三、特殊情况的处理

一、独立的网孔电流变量

网孔电流变量：是一种假想的电流，沿各网孔边界流动的首尾闭合的环流，可顺时针流，也可逆时针流，方向由自己任意假设。

- **独立性：**各网孔电流线性无关。
- **完备性：**其它电流可用网孔电流表示出来。

网孔电流是在独立网孔中闭合的，对每个相关节点均流进一次，流出一次，所以KCL自动满足。



§2-1 网孔分析

一、独立的网孔电流变量

二、网孔分析法

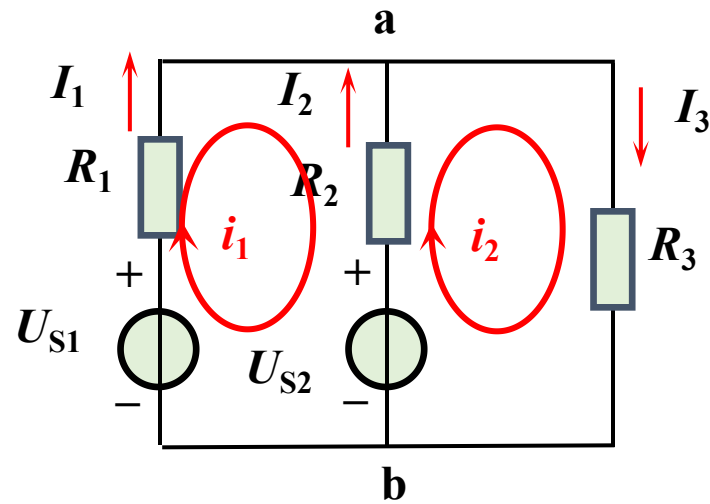
三、特殊情况的处理

二、网孔分析法

若以网孔电流为未知量列方程来求解电路，只需对独立网孔列写KVL方程。

回路1 $R_1 i_1 + R_2(i_1 - i_2) - u_{S1} + u_{S2} = 0$

回路2 $R_2(i_2 - i_1) + R_3 i_2 - u_{S2} = 0$



整理得

$$\begin{aligned} (R_1 + R_2) i_1 - R_2 i_2 &= u_{S1} - u_{S2} \\ -R_2 i_1 + (R_2 + R_3) i_2 &= u_{S2} \end{aligned}$$

二、网孔分析法

网孔方程的一般形式：

方程数量： $b-(n-1)$

$$\begin{cases} R_{11}i_1 + R_{12}i_2 + \cdots + R_{1m}i_m = u_{s1} \\ R_{21}i_1 + R_{22}i_2 + \cdots + R_{2m}i_m = u_{s2} \\ \cdots \quad \quad \quad \cdots \quad \quad \quad \cdots \quad \quad \quad \cdots \\ R_{m1}i_1 + R_{m2}i_2 + \cdots + R_{mm}i_m = u_{sm} \end{cases}$$

或矩阵形式

$$\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \cdots & R_{1m} \\ R_{21} & R_{22} & \cdots & R_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ R_{m1} & R_{m2} & \cdots & R_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \cdots \\ i_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{s1} \\ u_{s2} \\ \cdots \\ u_{sm} \end{bmatrix}$$

二、网孔分析法

在网孔分析法的一般形式中：

R_{kk} ：第 k 个网孔的自电阻(为正)， $k=1, 2, \dots, l$

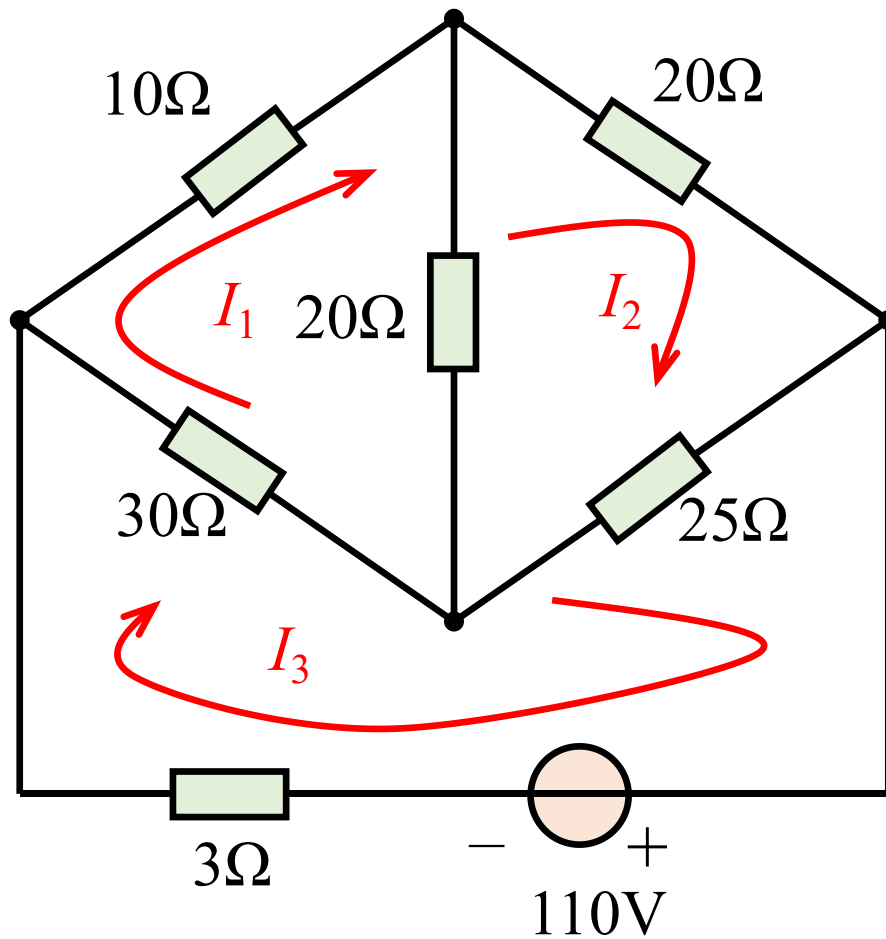
R_{jk} ：第 j 个网孔和第 k 个网孔的互电阻

$\left\{ \begin{array}{l} + : \text{流过互阻的两个网孔电流方向相同} \\ - : \text{流过互阻的两个网孔电流方向相反} \\ 0 : \text{无关} \end{array} \right.$

u_{sm} ：第 m 个网孔中所有电压源电压升的代数和。

二、网孔分析法

例：求 I_1 、 I_2 、 I_3



§2-1 网孔分析

一、独立的网孔电流变量

二、网孔分析法

三、特殊情况的处理

三、特殊情况处理

特殊情况1：电路中含有独立电流源支路

例 列写含有理想电流源支路的电路的网孔电流方程。

方法1：

* 引入电流源的端电压变量 U_i 列网孔的KVL方程

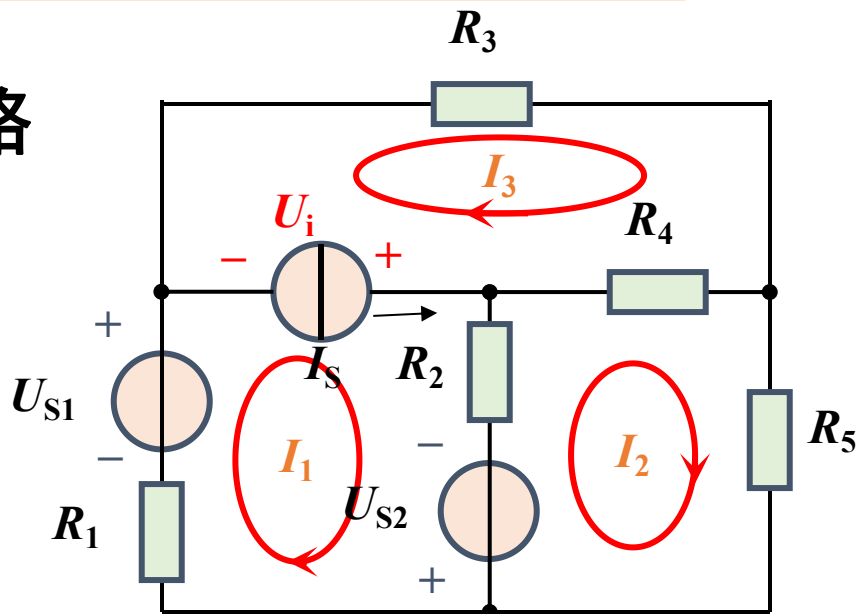
$$(R_1 + R_2)I_1 - R_2I_2 = U_{S1} + U_{S2} + U_i$$

$$-R_2I_1 + (R_2 + R_4 + R_5)I_2 - R_4I_3 = -U_{S2}$$

$$-R_4I_2 + (R_3 + R_4)I_3 = -U_i$$

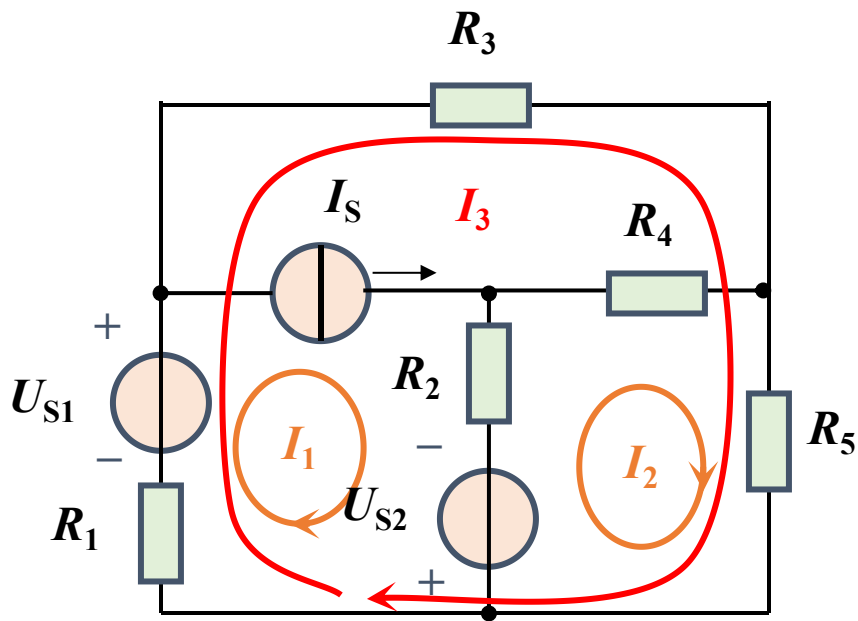
** 增加网孔电流和电流源电流的关系方程

$$I_S = I_1 - I_3$$



三、特殊情况的处理

方法2：选取独立回路，使理想电流源支路仅仅属于一个回路，则该回路电流即为 I_S 。



$$I_1 = I_S$$

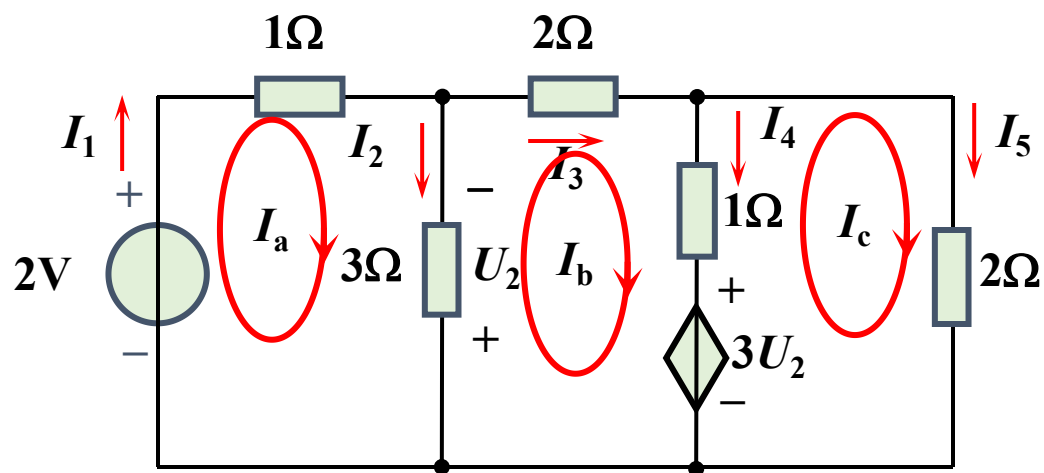
$$-R_2 I_1 + (R_2 + R_4 + R_5) I_2 + R_5 I_3 = -U_{S2}$$

$$R_1 I_1 + R_5 I_2 + (R_1 + R_3 + R_5) I_3 = U_{S1}$$

三、特殊情况的处理

特殊情况2：电路中含有受控电压源

例 用网孔法求含有受控电压源电路的各支路电流。



(1) 将受控源看作独立源建立方程；

$$\textcircled{1} \begin{cases} 4I_a - 3I_b = 2 \\ -3I_a + 6I_b - I_c = -3U_2 \\ -I_b + 3I_c = 3U_2 \end{cases}$$

(2) 增加补充方程（控制量和回路电流关系）。

$$\textcircled{2} \quad U_2 = 3(I_b - I_a)$$

三、特殊情况的处理

将②代入①，得

$$\begin{cases} 4I_a - 3I_b = 2 \\ -12I_a + 15I_b - I_c = 0 \\ 9I_a - 10I_b + 3I_c = 0 \end{cases} \xrightarrow{\text{解得}} \begin{cases} I_a = 1.19\text{A} \\ I_b = 0.92\text{A} \\ I_c = -0.51\text{A} \end{cases}$$

各支路电流为：

$$I_1 = I_a = 1.19\text{A} \quad , \quad I_2 = I_a - I_b = 0.27\text{A} \quad , \quad I_3 = I_b = 0.92\text{A}$$

$$I_4 = I_b - I_c = 1.43\text{A} \quad , \quad I_5 = I_c = -0.52\text{A}$$

*** 由于含受控源，方程的系数矩阵一般不对称。**

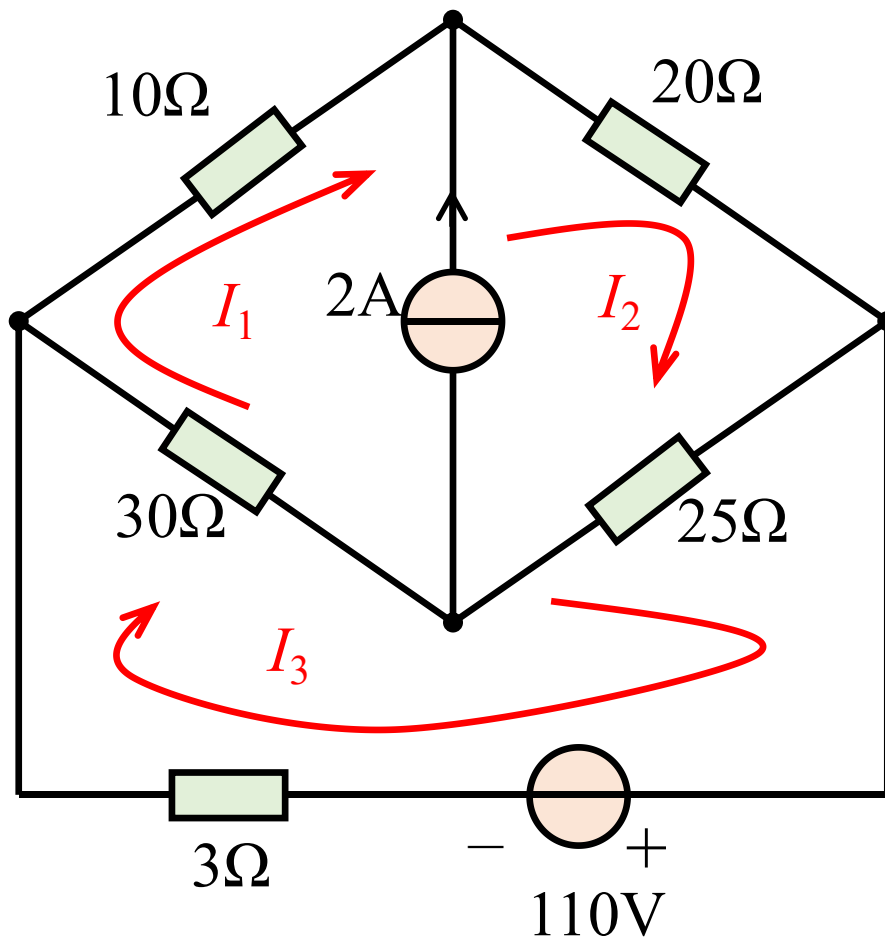
思考6：

当电路中含有受控电流源时该如何列写回路电流方程？

二、网孔分析法

例：列网孔方程

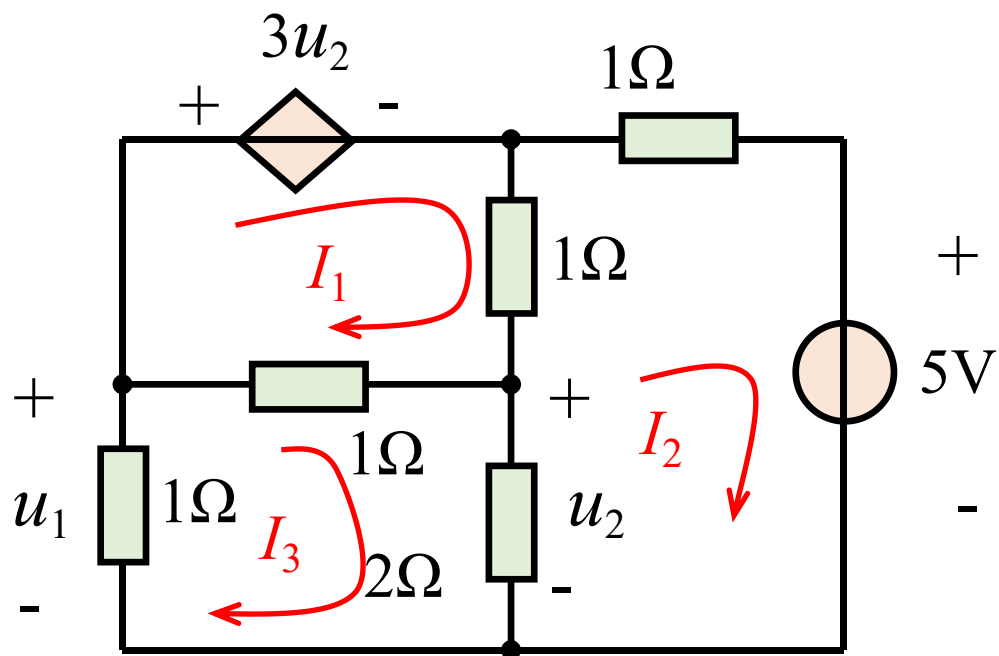
含电流源



二、网孔分析法

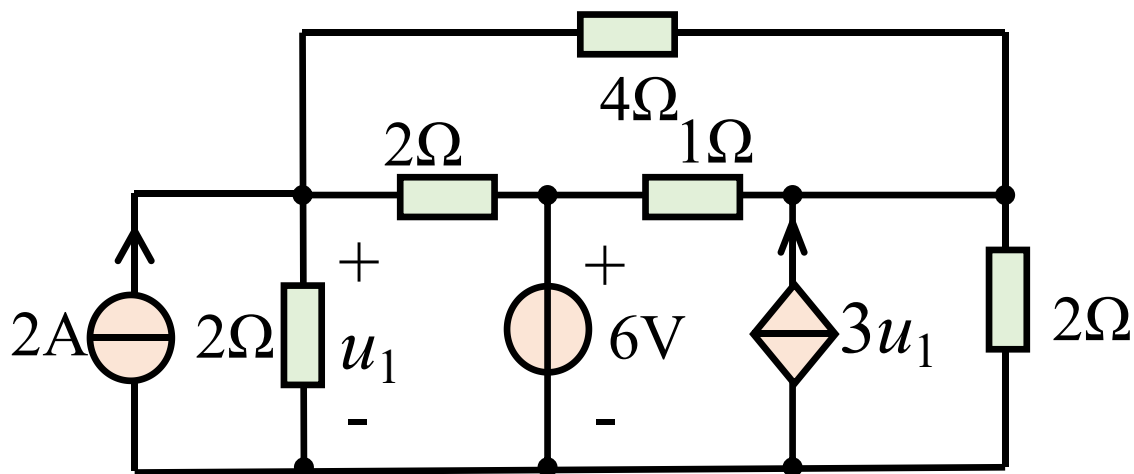
练习：求 u_1

含受控源

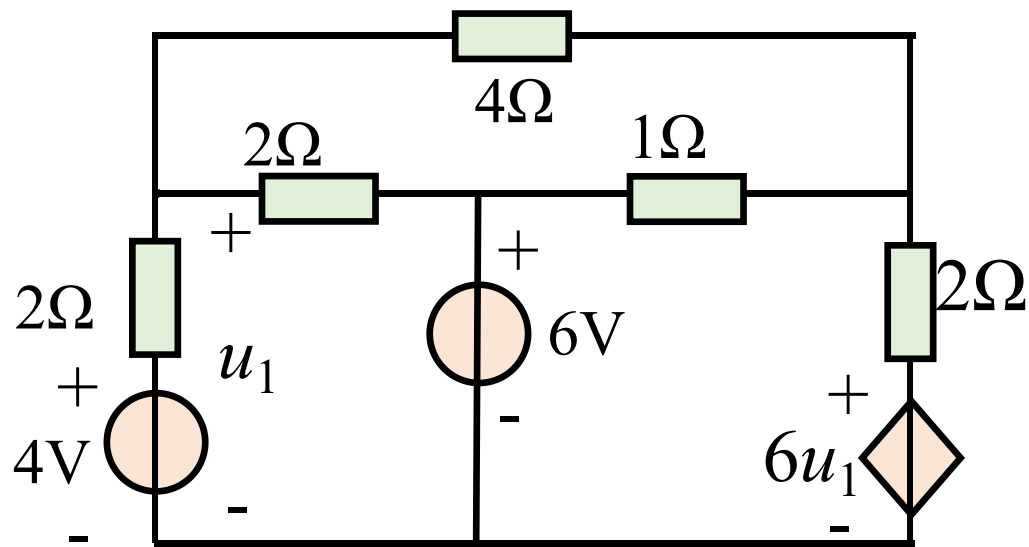


二、网孔分析法

练习：列网孔电流方程



等效为：



§2-1 网孔分析

列网孔方程时注意：

1、对受控源的处理：一般有几个受控源则有几个补充方程，补充方程为：将控制量用网孔电流表出。

2、对电流源的处理：电流源在内部支路上时，给电流源两端设电压，则多一个未知量，多一个补充方程，补充方程为：将电流源的电流用网孔电流表示；电流源在边缘支路上时，其所在网孔的网孔电流就是电流源电流。

3、将电流源并电阻等效变换为电压源串电阻。

§2-1 网孔分析

总结：

- 1、变量： $b-(n-1)$ 个网孔电流变量
- 2、列方程依据： $b-(n-1)$ 个KVL方程
- 3、特殊情况：
 - 电路中含有独立电流源支路；
 - 电路中有受控源。

§2-1 网孔分析

思考：

- 7. 说说支路电流和网孔电流的区别；
- 8. 网孔分析法对非平面电路适用吗？

补充：回路分析

一、图论的相关知识

二、连枝电流变量和回路方程

一、图论的相关知识

1、电路的线图：

将电路中所有支路都用线段来表示，节点仍用节点表示，这样得到的几何结构图形为电路的线图。

2、有向线图：

给电路线图的每条线段规定一个方向（关联参考方向），则得到的图称为有向线图。

3、连通图：

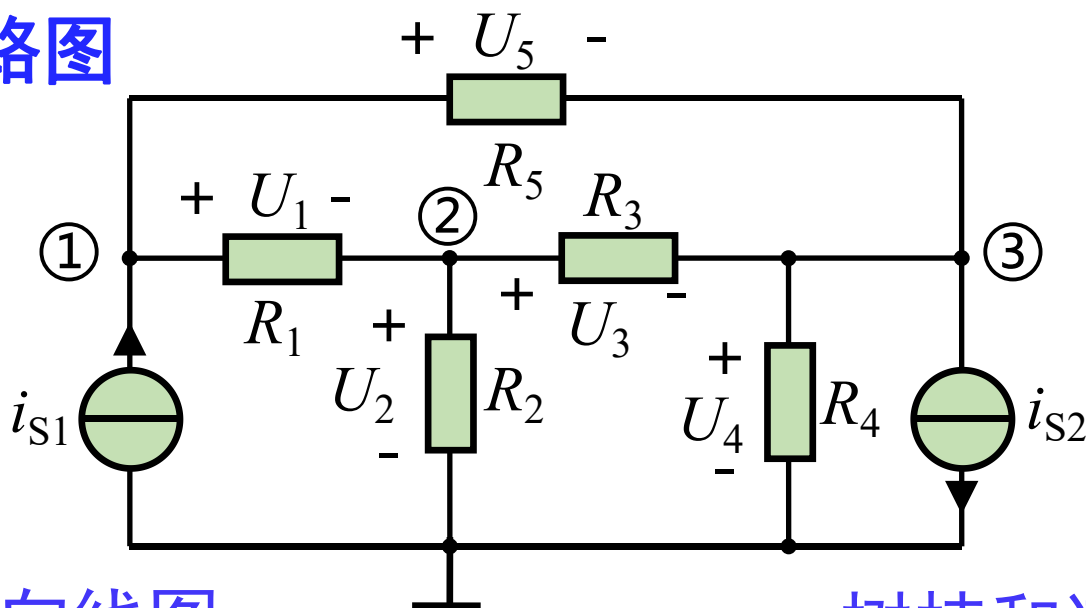
如果图的任一两点之间至少存在着一条由支路构成的路径，则该图称为连通图。

4、树：

不存在任何闭合回路，但所有的节点仍互相连通，这样的图称为树。构成树的支路叫树支，其余支路叫连支。

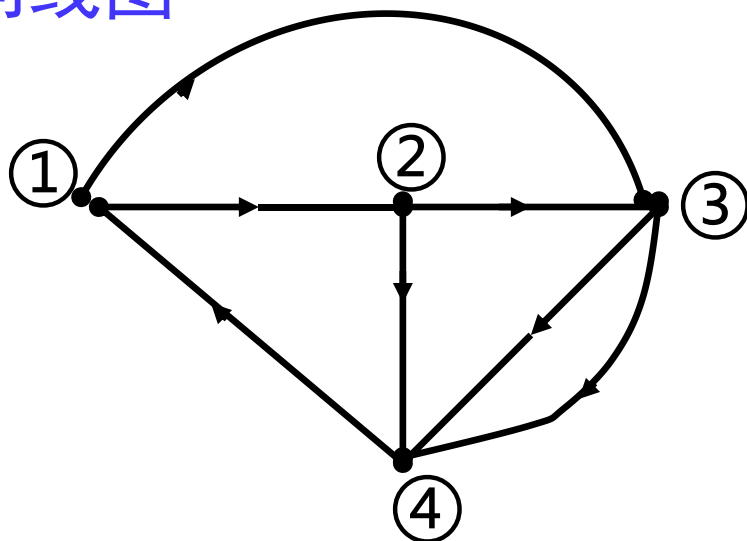
一、图论的相关知识

电路图

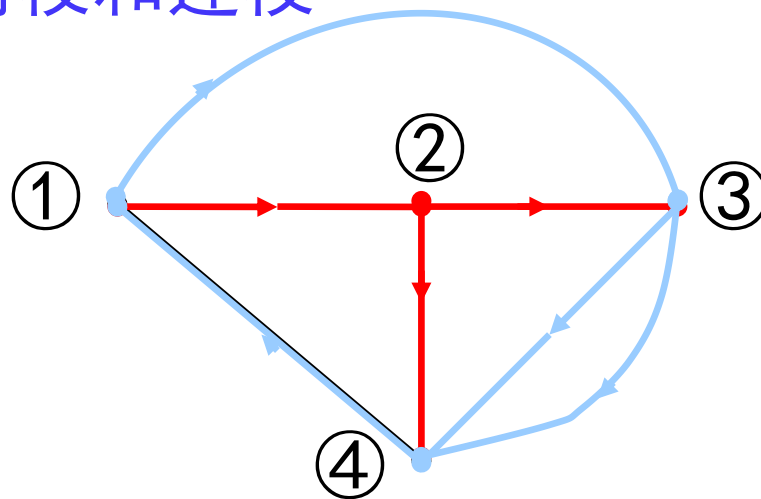


若图形的节点数为 n ，
则树枝数为 $n-1$ ，连枝
数为 $b-(n-1)$ 。树枝数
是一组独立的完备的
电压变量个数，连枝
数是一组独立的完备的
独立电流变量个数。

有向线图



树枝和连枝



补充：回路分析

一、图论的相关知识

二、连枝电流变量和回路方程

二、连枝电流变量和回路方程

1、连枝电流变量：

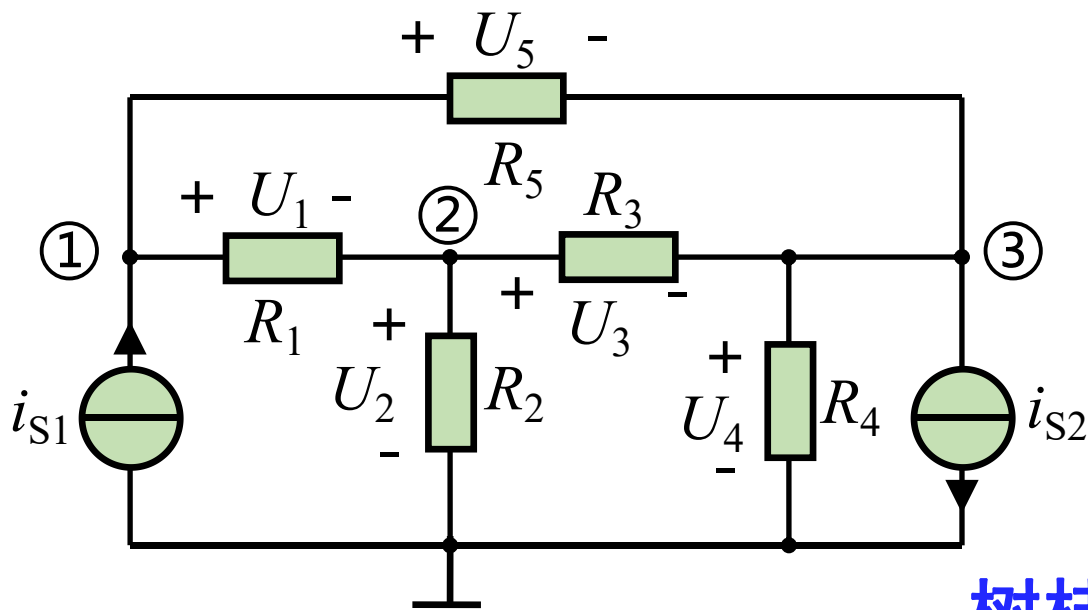
连枝电流是一组独立的电流变量，共 $b-(n-1)$ 个，具有独立性，完备性。

2、回路方程（以KVL为依据）：

基本回路：选定树后，由一条连枝和相应的树枝构成的回路称基本回路，回路的绕向是连枝的方向，基本回路的个数等于连枝数。树选定后，基本回路则是唯一的。

设想连枝电流在基本回路中流动，形成一个回路电流，称基本回路电流，其方向为连枝电流的方向。

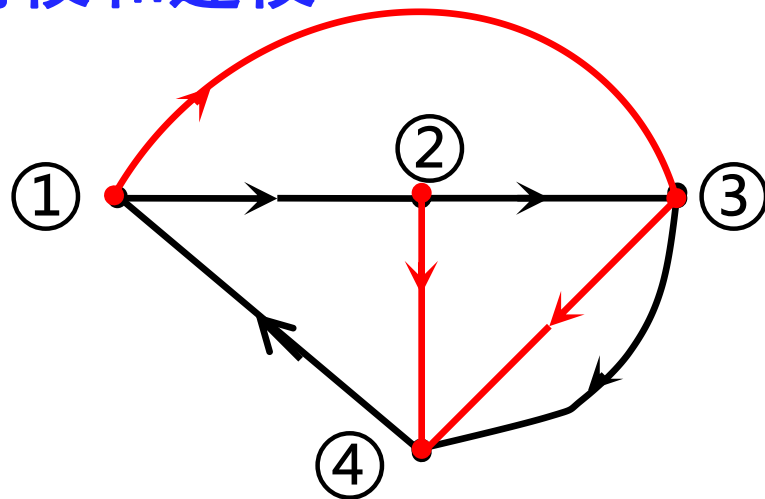
二、连枝电流变量和回路方程



树枝和连枝

一般将电流源支路作为连枝。

回路法对于平面电路和非平面电路都适合。

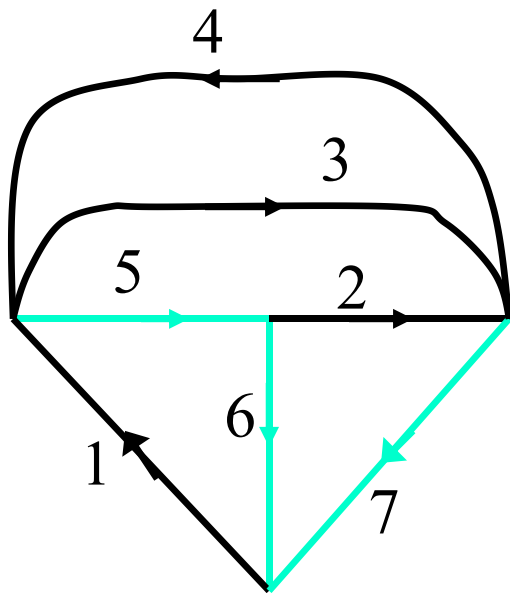
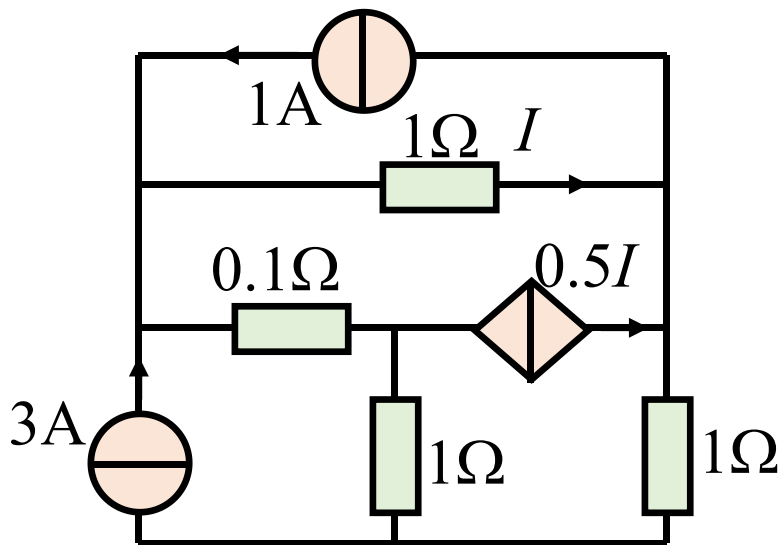


二、连枝电流变量和回路方程

3、回路方程的列法：

- ① 画有向线图；
- ② 选树；
- ③ 确定基本回路，定回路绕向；
- ④ 给回路编号；
- ⑤ 列回路方程

基本回路 $l_1(1,5,6)$ 、
 $l_2(2,6,7)$ 、 $l_3(3,5,6,7)$ 、
 $l_4(4,5,6,7)$ 。



总结

节点分析法、网孔分析法、回路分析法的比较

(1) 方程数的比较

| | KCL方程 | KVL方程 | 方程总数 |
|-------|-------|---------|---------|
| 节点分析法 | $n-1$ | 0 | $n-1$ |
| 网孔分析法 | 0 | $b-n+1$ | $b-n+1$ |
| 回路分析法 | 0 | $b-n+1$ | $b-n+1$ |

(2) 对于非平面电路，选独立回路不容易，选独立节点较容易。

(3) 回路分析法、节点分析法易于编程。目前用计算机分析网络（电网络，集成电路设计等）采用节点法较多。