



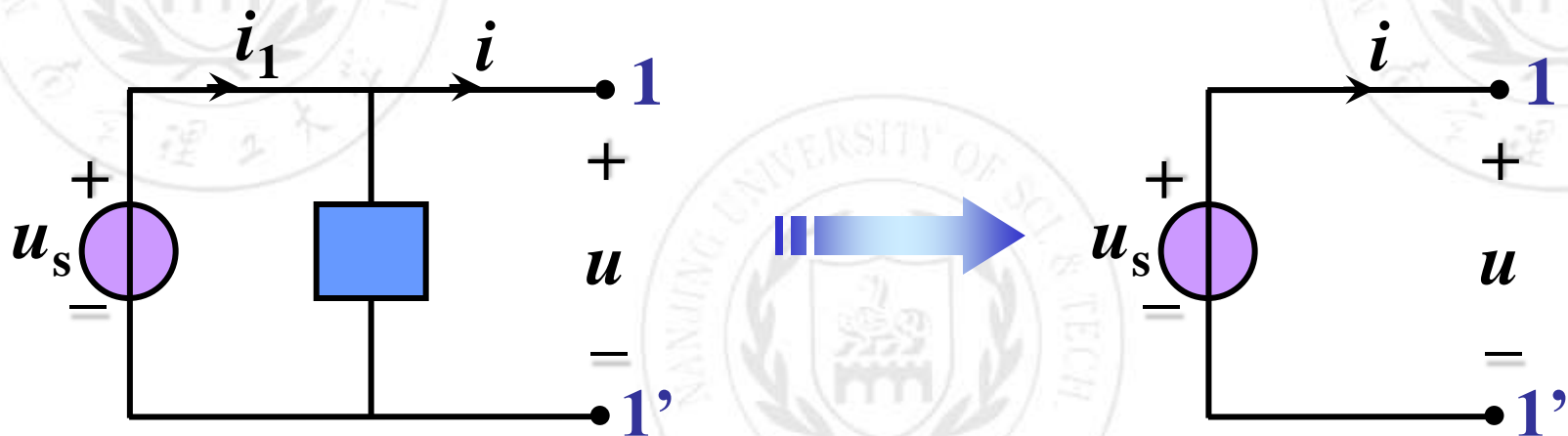
作业

2-13

2-42

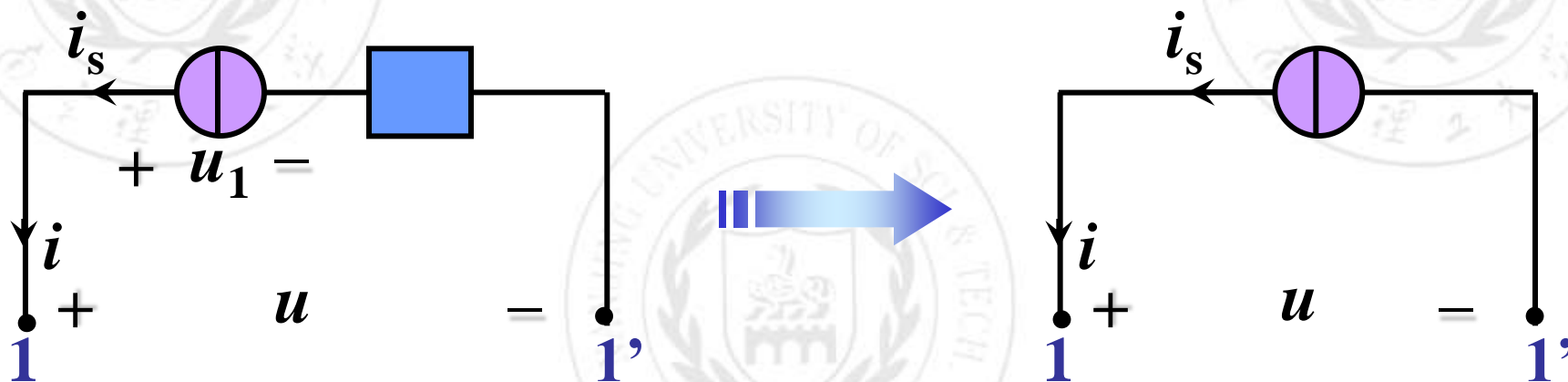
2-46

2.1.3 电压源、电流源的串联和并联



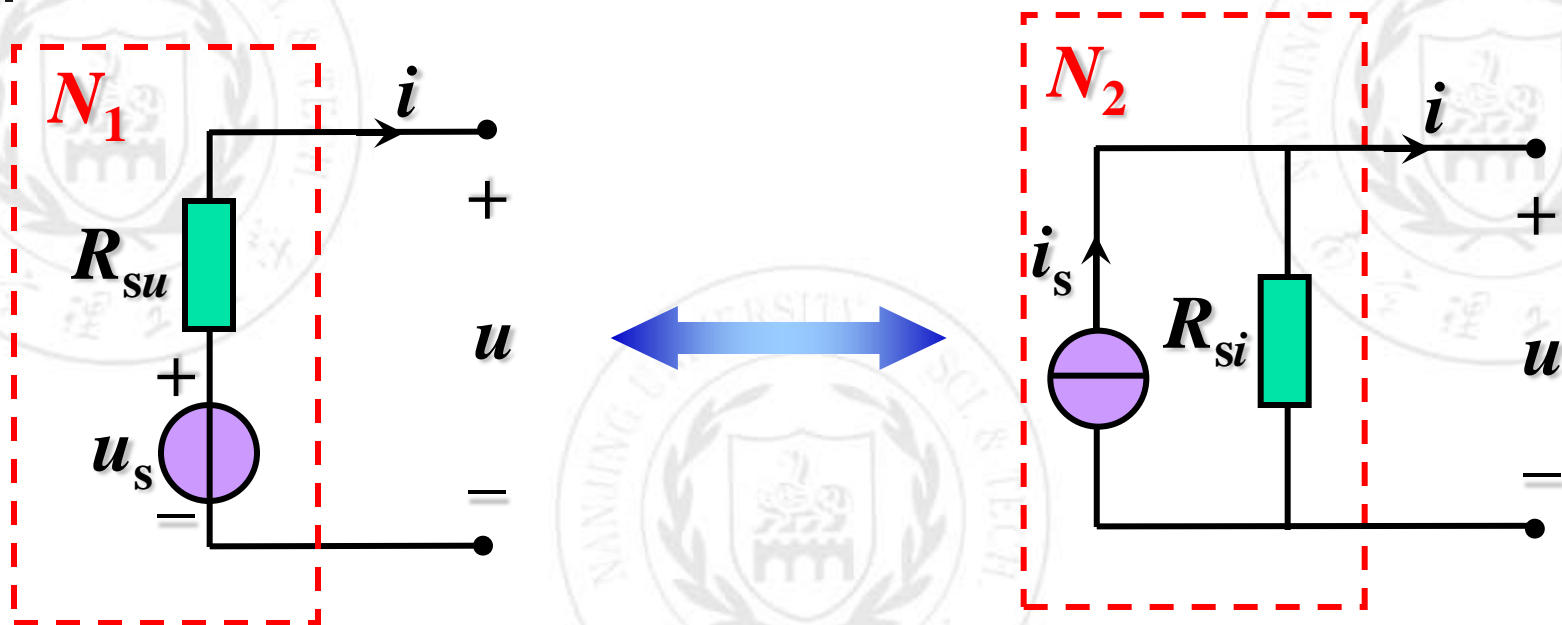
电压源与支路并联：可用一个等效电压源替代。

2.1.3 电压源、电流源的串联和并联



电流源与支路串联：可用一个等效电流源替代。

2.1.4 实际电源模型的等效变换



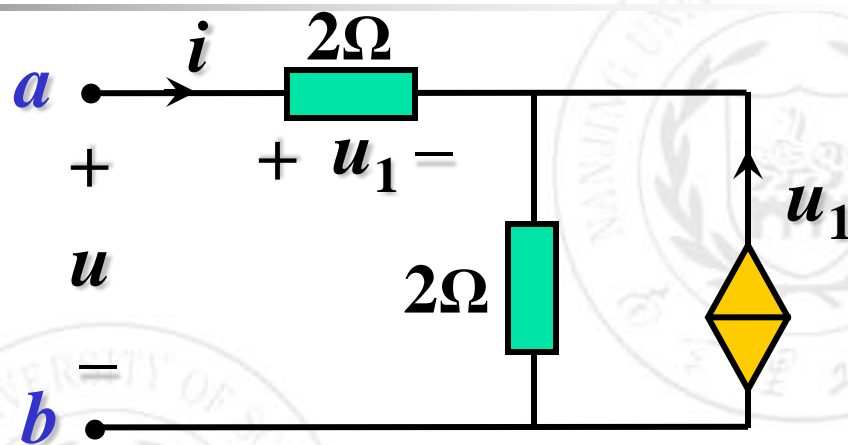
$$\begin{cases} R_{su} = R_{si} \triangleq R_s \\ u_s = R_s i_s \quad (i_s = \frac{u_s}{R_s}) \end{cases}$$

■ 用等效变换方法分析含受控源电路

- 求含受控源一端口电阻电路的输入电阻时，一律用欧姆定律。
- 受控源与电阻串并联等效变换与独立源类似。
- **注意：**等效变换中**控制支路**尽量不参与变换。

运用等效变换分析含受控源的电阻电路

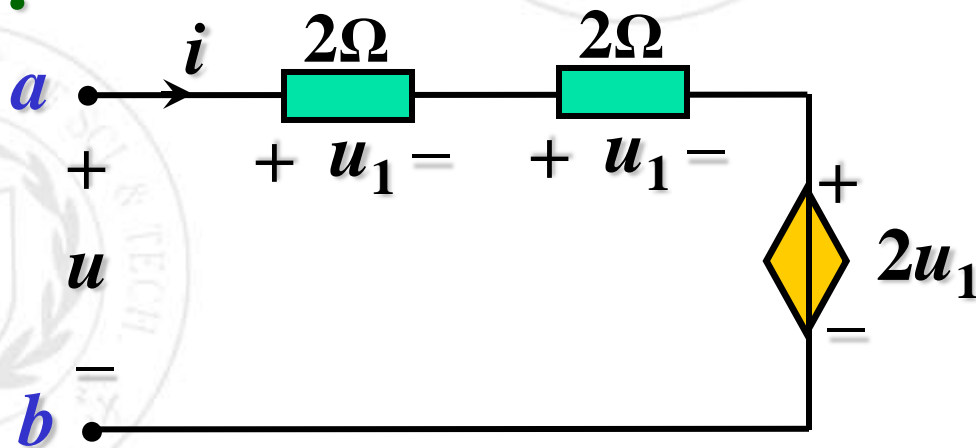
例：求输入电阻



解：输入电阻：

$$R_{in} = \frac{u}{i} = \frac{u_1 + 2 \times 1.5 u_1}{\frac{u_1}{2}} = 8\Omega$$

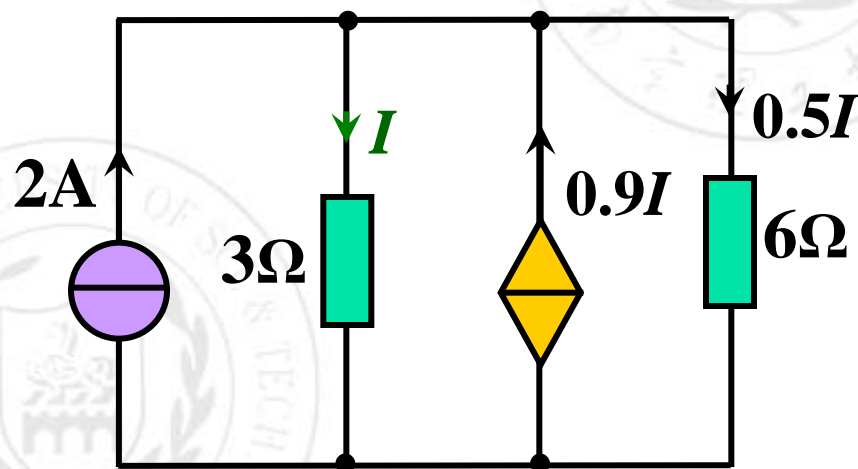
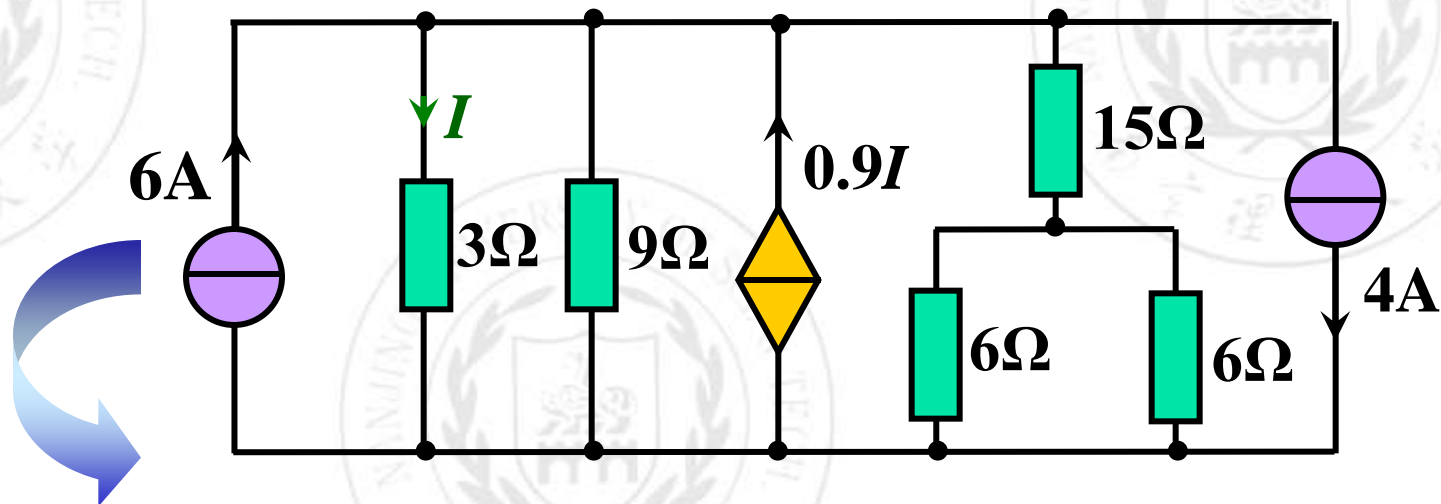
另解：



$$R_{in} = \frac{4u_1}{0.5u_1} = 8\Omega$$

运用等效变换分析含受控源的电阻电路

例：运用等效变换方法 I



$$I + 0.5I - 0.9I = 2$$

$$I = \frac{10}{3} \text{ A}$$

目 录

2.1 二端网络与等效变换

2.2 支路电流法 ▶

2.3 网孔电流法 ▶

2.4 结点电压法

2.5 叠加定理 ▶

2.6 等效电源定理

2.7 负载获得最大功率的条件

2.8 含受控源电路的分析

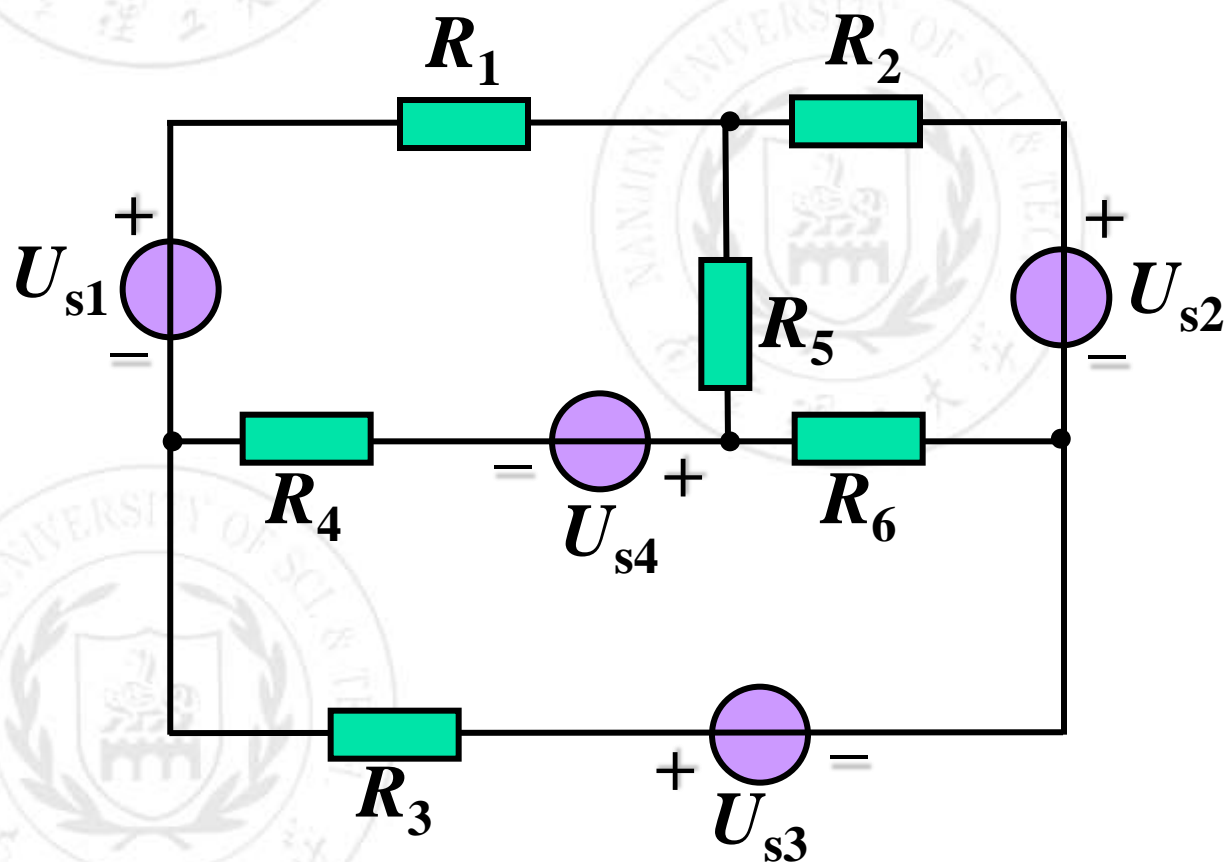
■ 支路电流法

- 以支路电流为未知量，根据KCL、KVL列关于支路电流的方程，进行求解的过程
- 支路：任一段无分支的电路
- 结点：三条及三条以上支路的联接点

2.2 支路电流法

基本步骤

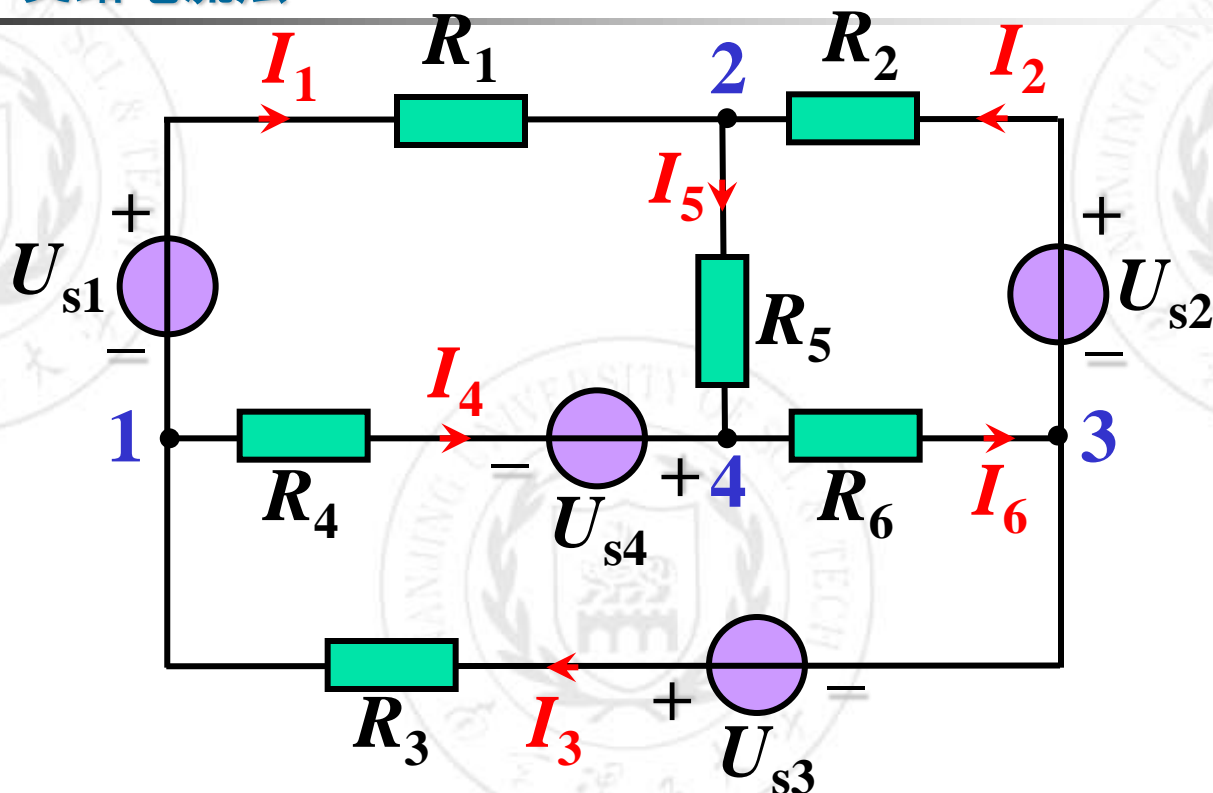
■ 仅含电阻和电压源的电路



结点数 (n): 4

支路数 (b): 6

2.2 支路电流法



■ **第1步：**选定各支路电流参考方向，各结点KCL方程如下：

节点 1: $I_1 - I_3 + I_4 = 0$

节点 2: $-I_1 - I_2 + I_5 = 0$

节点 3: $I_2 + I_3 - I_6 = 0$

节点 4: $-I_4 - I_5 + I_6 = 0$

2.2 支路电流法

$$1: I_1 - I_3 + I_4 = 0$$

$$2: -I_1 - I_2 + I_5 = 0$$

$$3: I_2 + I_3 - I_6 = 0$$

$$4: -I_4 - I_5 + I_6 = 0$$

可见：上述四个结点的KCL方程不是相互独立的

若选图中所示电路中的结点4为参考节点，则结点1、2、3为独立结点，其对应的KCL方程必将独立，

即：

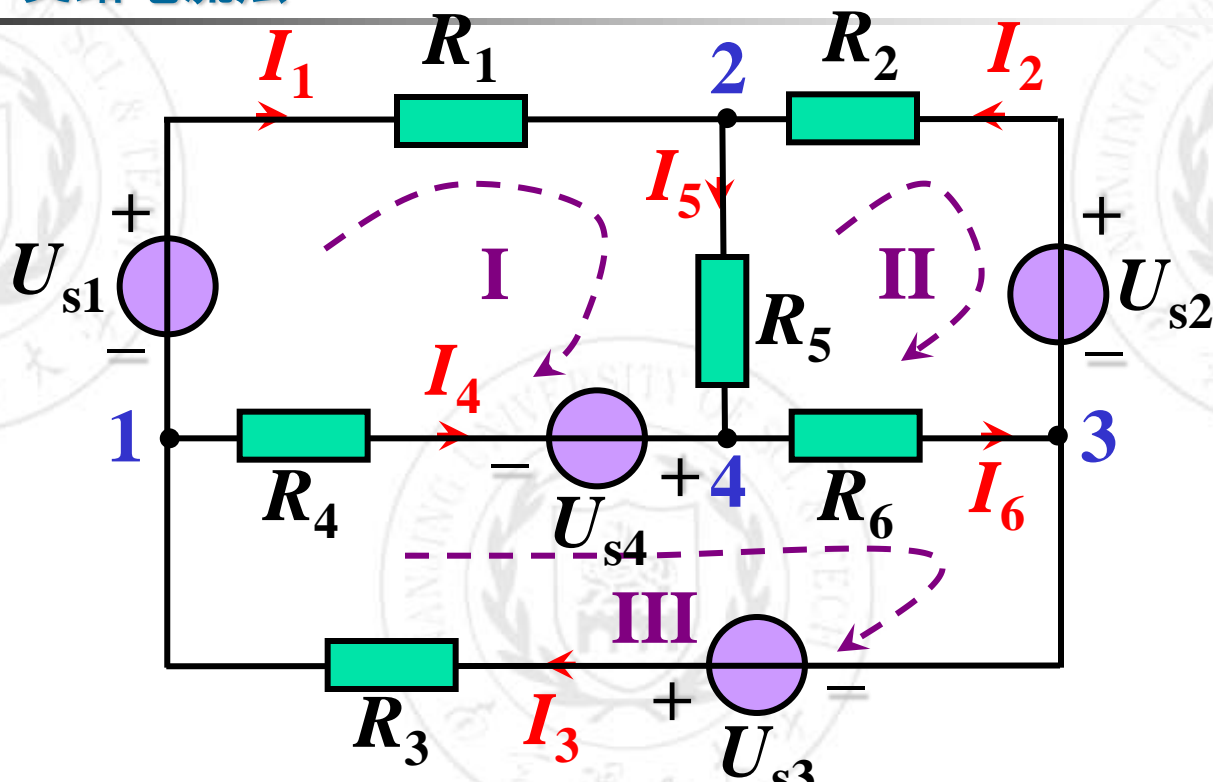
$$1: I_1 - I_3 + I_4 = 0$$

$$2: -I_1 - I_2 + I_5 = 0$$

$$3: I_2 + I_3 - I_6 = 0$$

第2步：对 $(n-1)$ 个独立结点列KCL方程

2.2 支路电流法



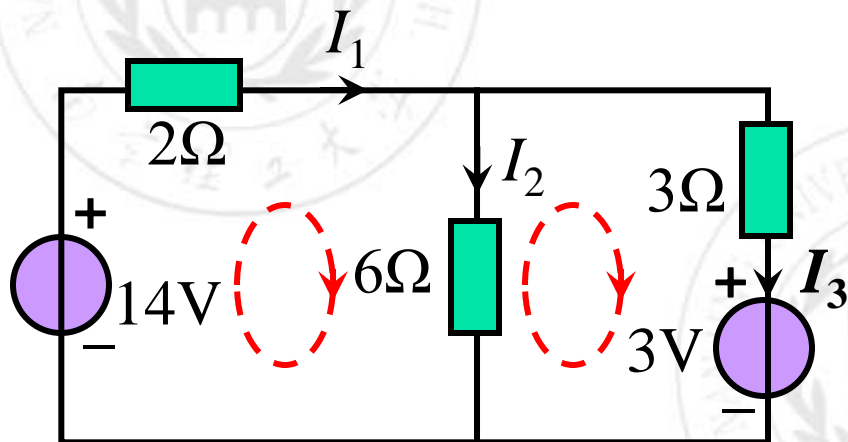
■ 第3步：对 $b-(n-1)$ 个独立回路列关于支路电流的KVL方程

$$\text{I: } R_1 I_1 + R_5 I_5 + U_{s4} - R_4 I_4 - U_{s1} = 0$$

✚ 演算：找没有列过KCL方程的结点和没有列过KVL方程的回路验证。

2.2 支路电流法

例：用支路电流法求电路中各支路电流。



**解：首先设定支路电流，
列写 $n-1$ 个KCL方程。**

$$I_1 = I_2 + I_3$$

其次列写 $b-(n-1)$ 个KVL方程。

$$2I_1 + 6I_2 - 14 = 0$$

$$3I_3 + 3 - 6I_2 = 0$$

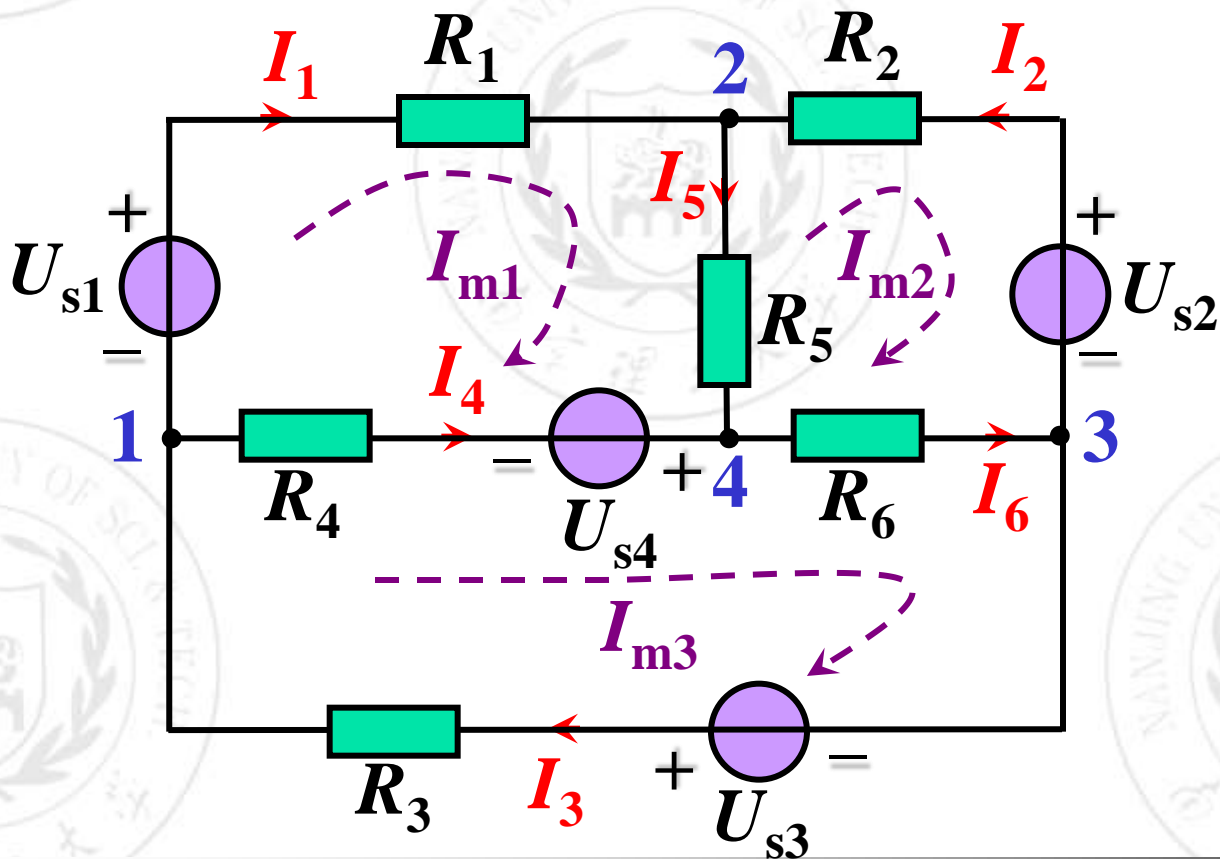
最后联立方程解得：

$$I_1 = 3\text{ A} \quad I_2 = \frac{4}{3}\text{ A} \quad I_3 = \frac{5}{3}\text{ A}$$



■ 网孔电流法

■ 网孔电流：是假想沿着电路中网孔边界流动的电流，
如图中所示闭合虚线电流 I_{m1} 、 I_{m2} 、 I_{m3}



■ 网孔电流

✚ 对于一个结点数 n 、支路数为 b 的平面电路，其网孔数为 $(b-n+1)$ 个，网孔电流数也为 $(b-n+1)$ 个

✚ 网孔电流有两个特点：

独立性：网孔电流自动满足KCL，而且相互独立

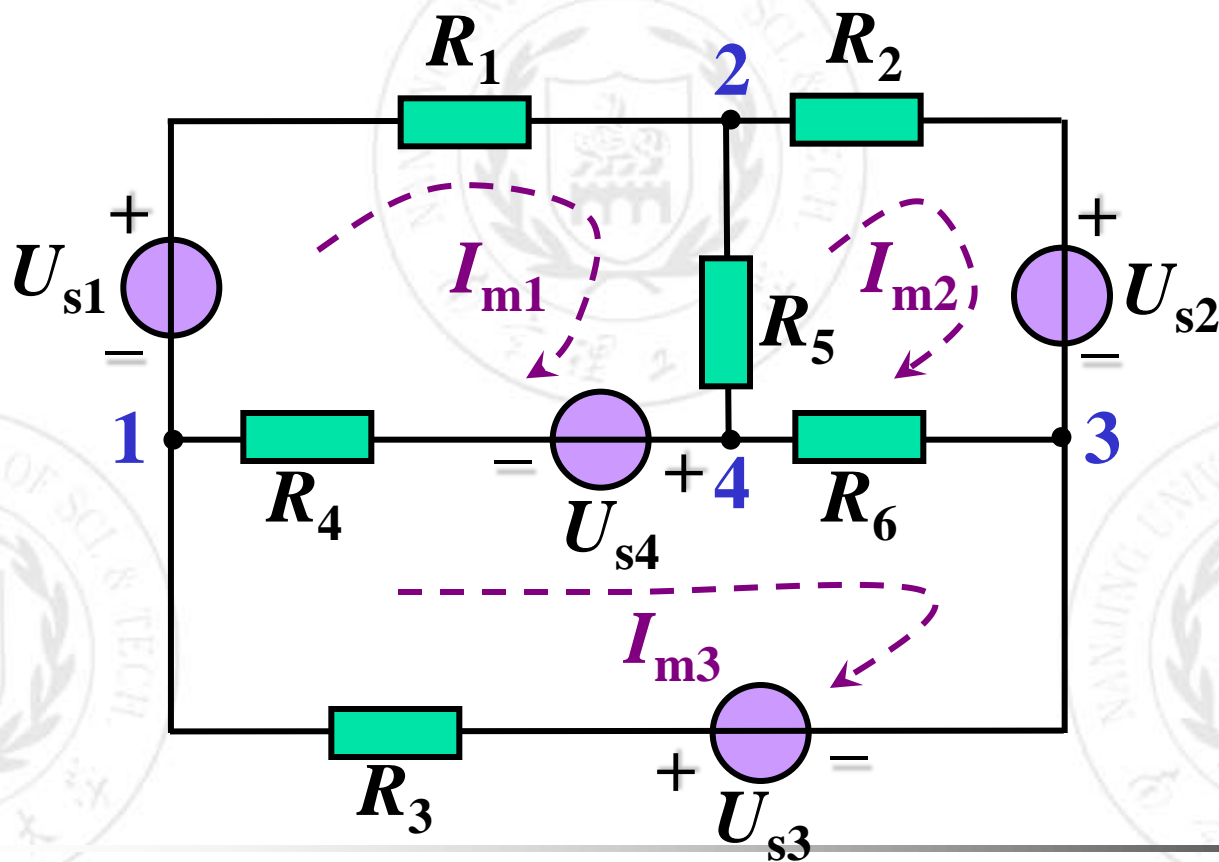
完备性：电路中所有支路电流都可以用网孔电流表示

■ 网孔电流法

✚ **网孔电流法：**以网孔电流作为独立变量，根据KVL列出关于网孔电流的电路方程，进行求解的过程

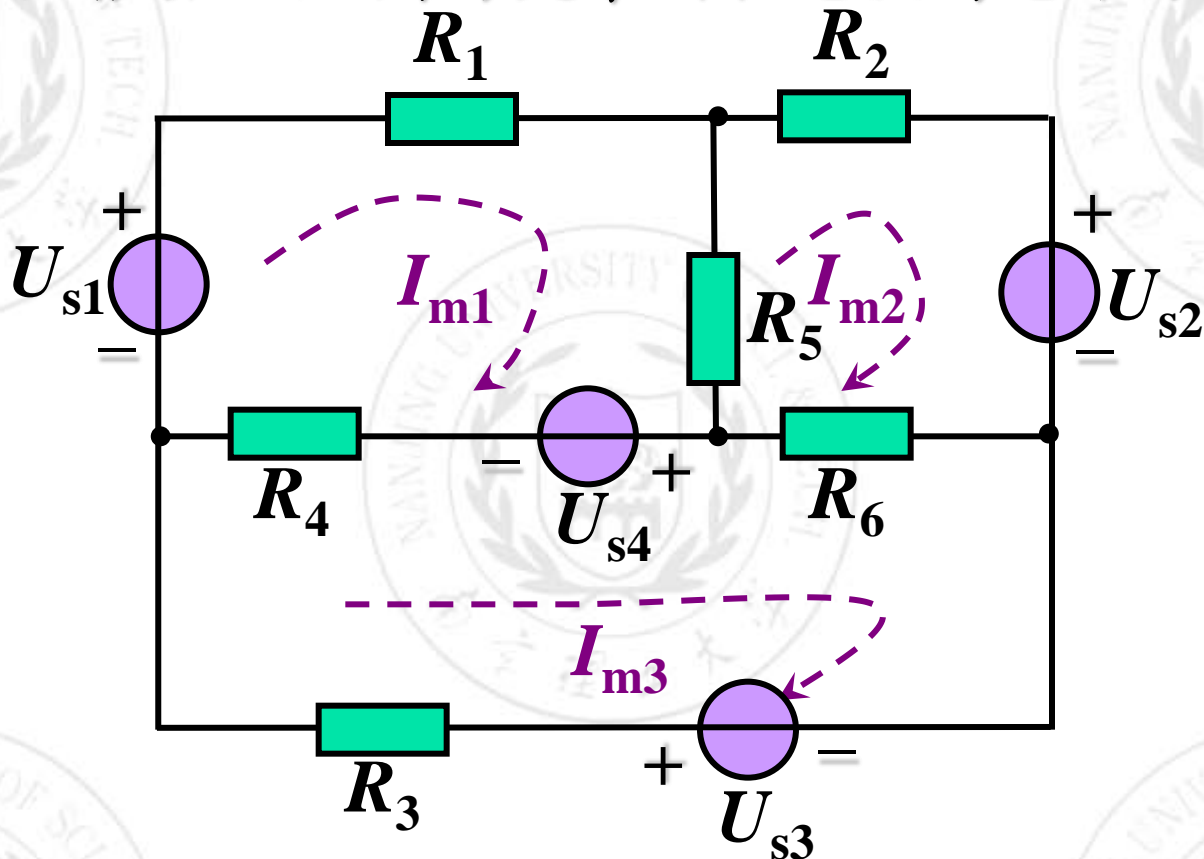
基本步骤

- **第1步：** 指定网孔电流的参考方向，并以此作为列写 KVL 方程的回路绕行方向



2.3 网孔电流法

第2步：根据KVL列写关于网孔电流的电路方程



$$\begin{cases} R_1 I_{m1} + R_5 (I_{m1} - I_{m2}) + U_{s4} + R_4 (I_{m1} - I_{m3}) - U_{s1} = 0 \\ R_2 I_{m2} + U_{s2} + R_6 (I_{m2} - I_{m3}) + R_5 (I_{m2} - I_{m1}) = 0 \\ R_4 (I_{m3} - I_{m1}) - U_{s4} + R_6 (I_{m3} - I_{m2}) - U_{s3} + R_3 I_{m3} = 0 \end{cases}$$

2.3 网孔电流法和回路电流法

$$\begin{cases} R_1 I_{m1} + R_5 (I_{m1} - I_{m2}) + U_{s4} + R_4 (I_{m1} - I_{m3}) - U_{s1} = 0 \\ R_2 I_{m2} + U_{s2} + R_6 (I_{m2} - I_{m3}) + R_5 (I_{m2} - I_{m1}) = 0 \\ R_4 (I_{m3} - I_{m1}) - U_{s4} + R_6 (I_{m3} - I_{m2}) - U_{s3} + R_3 I_{m3} = 0 \end{cases}$$



$$\begin{cases} (R_1 + R_4 + R_5) I_{m1} - R_5 I_{m2} - R_4 I_{m3} = U_{s1} - U_{s4} \\ -R_5 I_{m1} + (R_2 + R_5 + R_6) I_{m2} - R_6 I_{m3} = -U_{s2} \\ -R_4 I_{m1} - R_6 I_{m2} + (R_3 + R_4 + R_6) I_{m3} = U_{s3} + U_{s4} \end{cases}$$



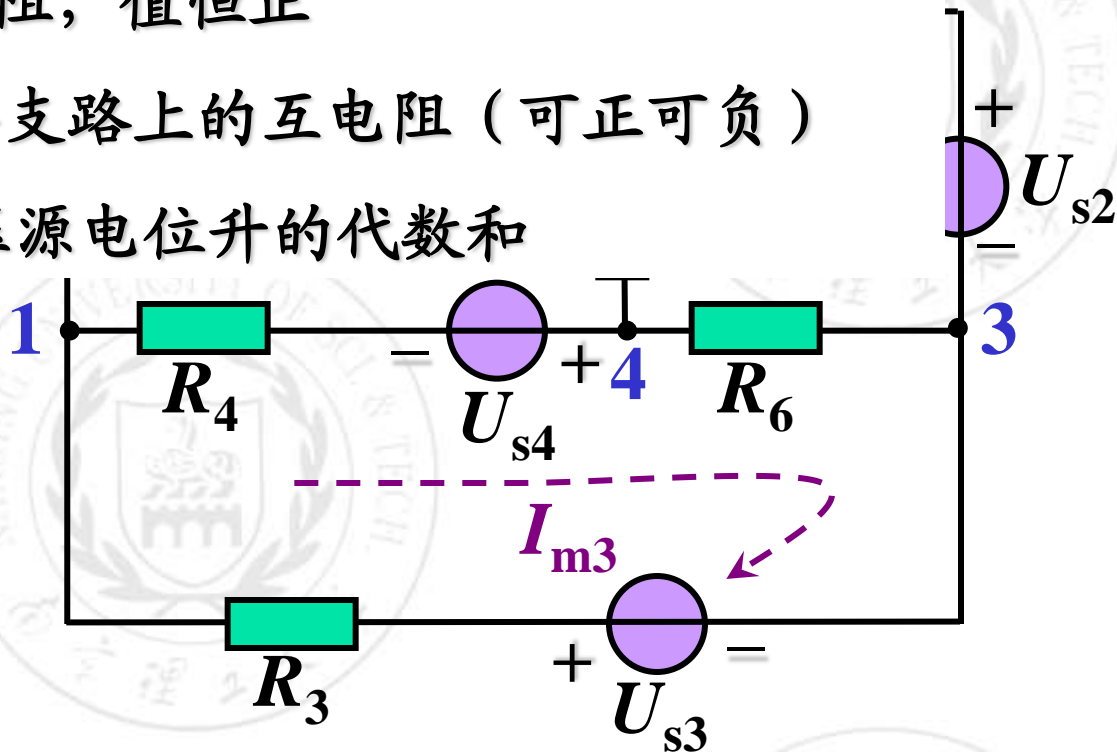
$$\begin{bmatrix} R_1 + R_4 + R_5 & -R_5 & -R_4 \\ -R_5 & R_2 + R_5 + R_6 & -R_6 \\ -R_4 & -R_6 & R_3 + R_4 + R_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{m1} \\ I_{m2} \\ I_{m3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{s1} - U_{s4} \\ -U_{s2} \\ U_{s3} + U_{s4} \end{bmatrix}$$

2.3 网孔电流法

R_{kk} ——第k个网孔的自电阻，值恒正

R_{kj} ——k网孔和j网孔公共支路上的互电阻（可正可负）

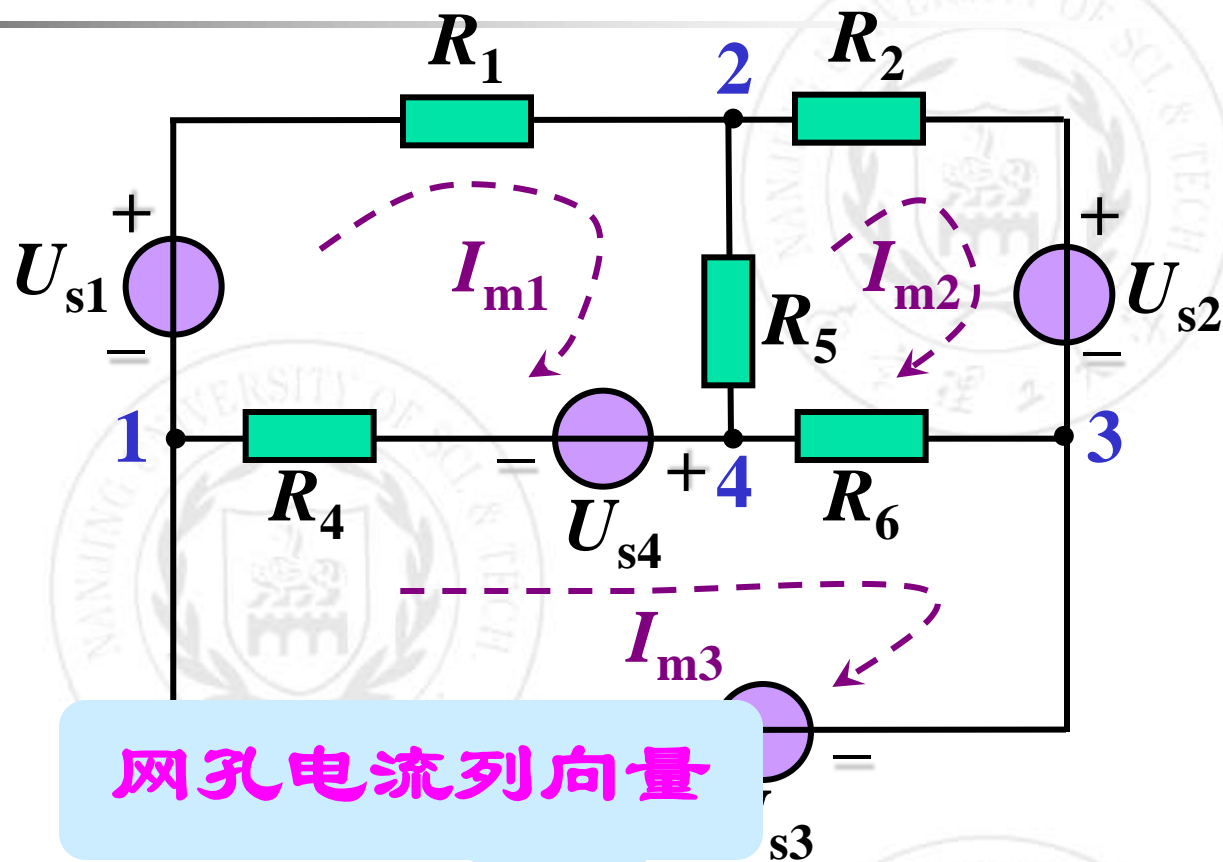
U_{Skk} ——k网孔内所有电压源电位升的代数和



网孔电阻矩阵

$$\begin{bmatrix} R_1 + R_4 + R_5 & -R_5 & -R_4 \\ -R_5 & R_2 + R_5 + R_6 & -R_6 \\ -R_4 & -R_6 & R_3 + R_4 + R_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{m1} \\ I_{m2} \\ I_{m3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{s1} - U_{s4} \\ -U_{s2} \\ U_{s3} + U_{s4} \end{bmatrix}$$

2.3 网孔电流法



网孔电流列向量

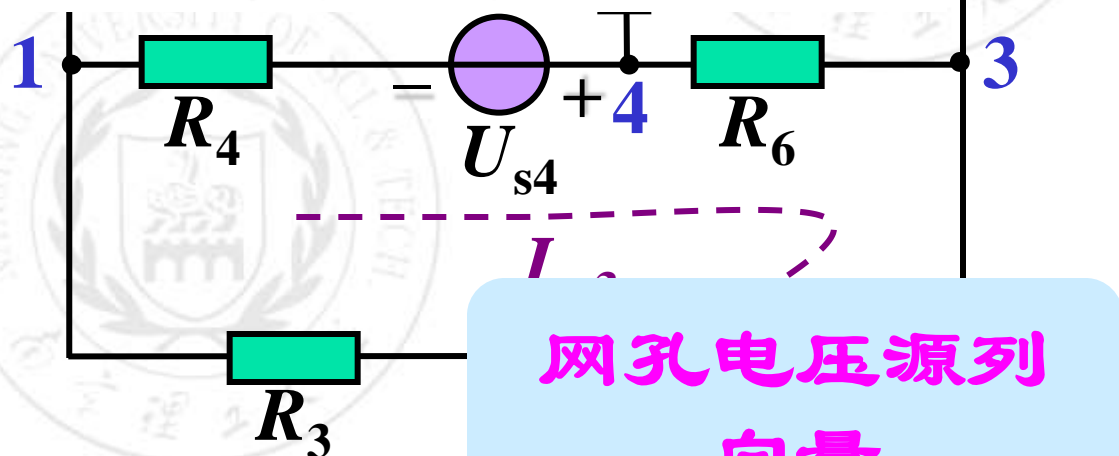
$$\begin{bmatrix} R_1 + R_4 + R_5 & -R_5 & -R_4 \\ -R_5 & R_2 + R_5 + R_6 & -R_6 \\ -R_4 & -R_6 & R_3 + R_4 + R_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{m1} \\ I_{m2} \\ I_{m3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{s1} - U_{s4} \\ -U_{s2} \\ U_{s3} + U_{s4} \end{bmatrix}$$

2.3 网孔电流法

R_{kk} ——第k个网孔的自电阻，值恒正

R_{kj} ——k网孔和j网孔公共支路上的互电阻（可正可负）

U_{Skk} ——k网孔内所有电压源电位升的代数和

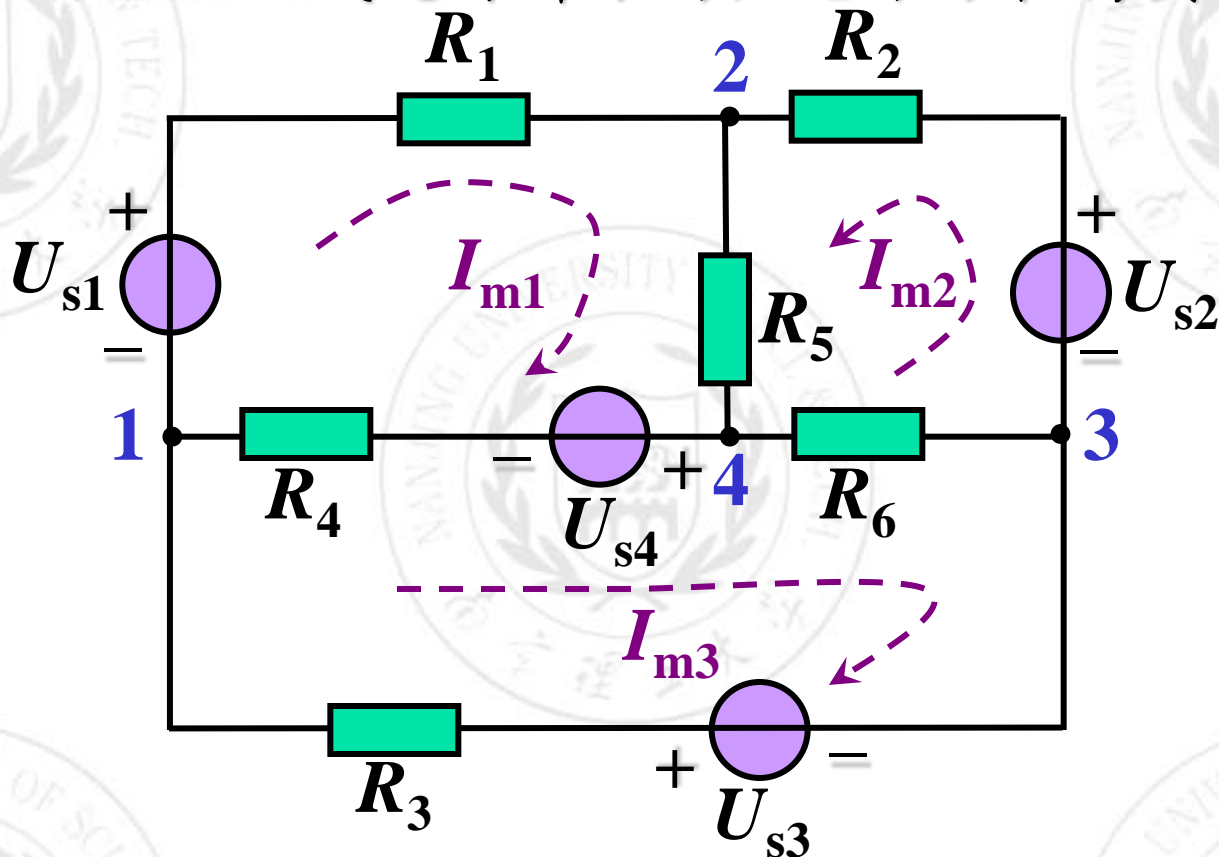


$$\begin{bmatrix} R_1 + R_4 + R_5 & -R_5 & -R_4 \\ -R_5 & R_2 + R_5 + R_6 & -R_6 \\ -R_4 & -R_6 & R_3 + R_4 + R_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{m1} \\ I_{m2} \\ I_{m3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{s1} - U_{s4} \\ -U_{s2} \\ U_{s3} + U_{s4} \end{bmatrix}$$

网孔电压源列
向量

2.3 网孔电流法

● 思考：若 I_{m2} 改成逆时针方向，电路方程需要改变吗？



$$\begin{cases} (R_1 + R_4 + R_5)I_{m1} + R_5I_{m2} - R_4I_{m3} = U_{s1} - U_{s4} \\ +R_5I_{m1} + (R_2 + R_5 + R_6)I_{m2} + R_6I_{m3} = +U_{s2} \\ -R_4I_{m1} + R_6I_{m2} + (R_3 + R_4 + R_6)I_{m3} = U_{s3} + U_{s4} \end{cases}$$

■ 电路中仅含电压源的网孔法

✚ 第1步：选取各网孔电流绕行方向

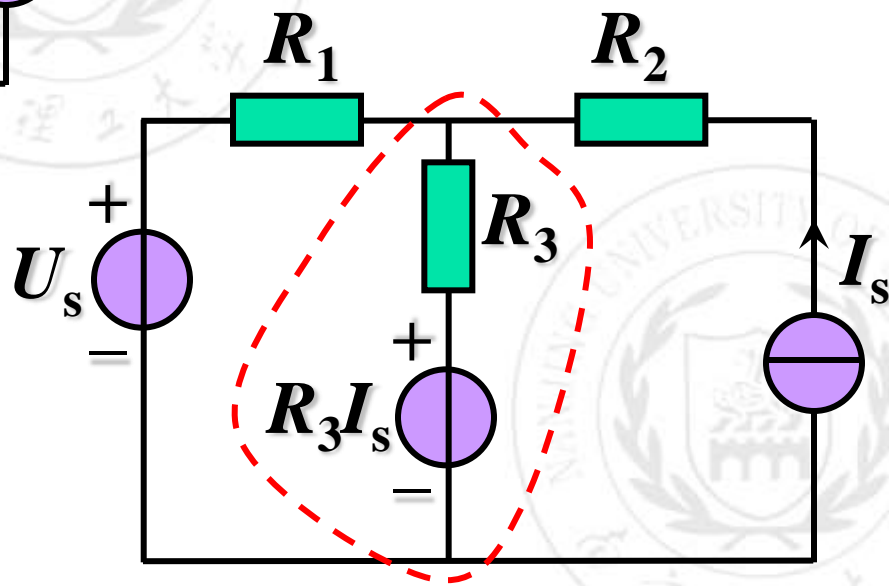
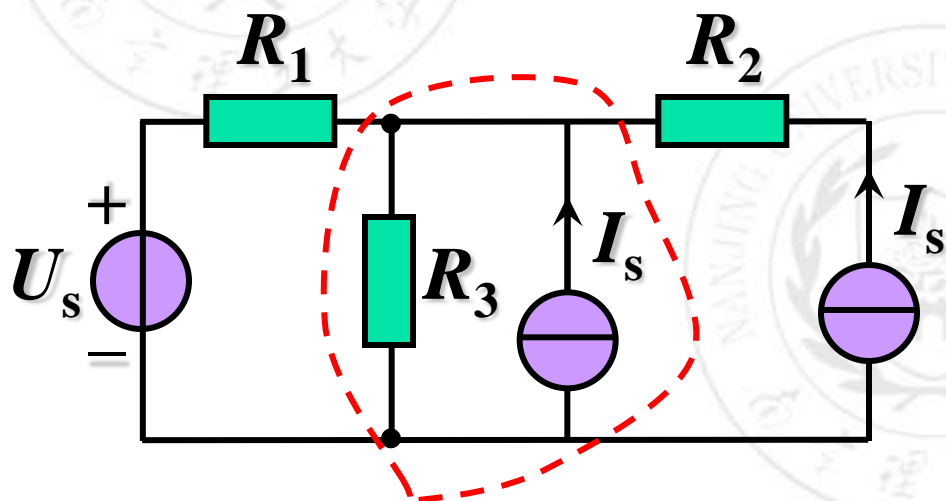
✚ 第2步：利用直接观察法形成方程

✚ 第3步：求解

2.3 网孔电流法

■ 电路中含电流源的网孔法

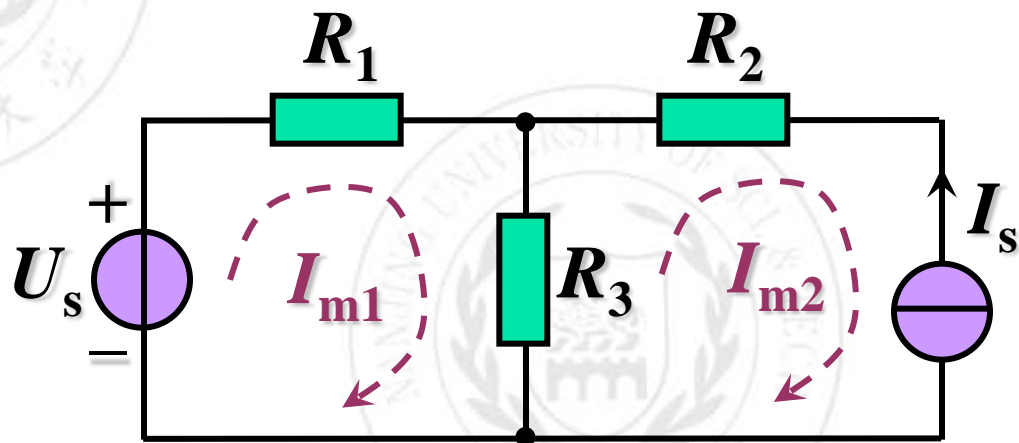
■ 第1类情况：含实际电流源：作一次等效变换



2.3 网孔电流法

第2类情况：含理想电流源支路

理想电流源位于边沿支路



a: 选取网孔电流绕行方向，其中含理想电流源支路的

网孔电流为已知量： $I_{m2} = -I_s$

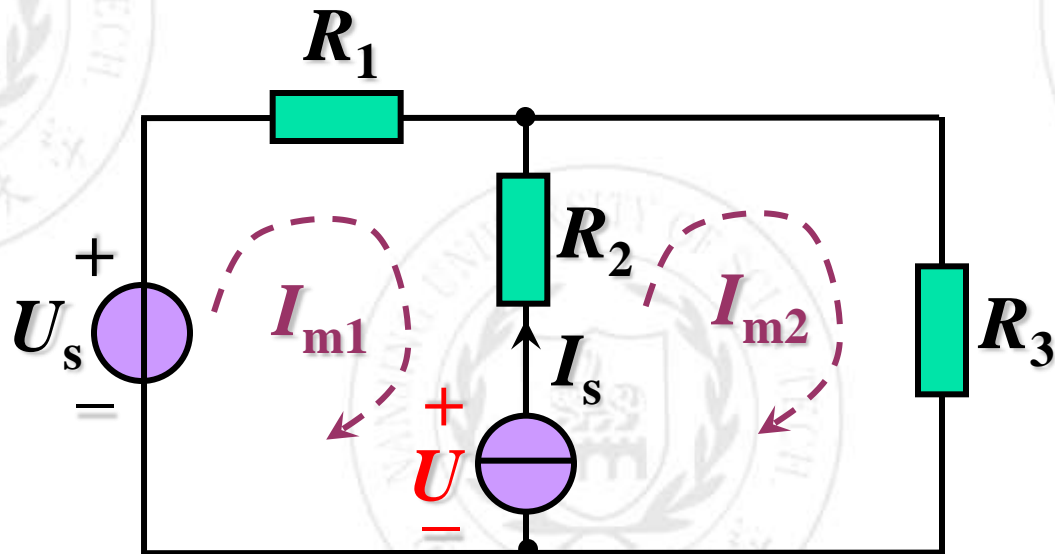
b: 对不含有电流源支路的网孔根据直接观察法列方程：

$$(R_1 + R_3)I_{m1} - R_3I_{m2} = U_s$$

c: 求解

2.3 网孔电流法

理想电流源位于公共支路



a: 选取网孔电流绕行方向，虚设电流源电压 U

b: 根据直接观察法列方程：

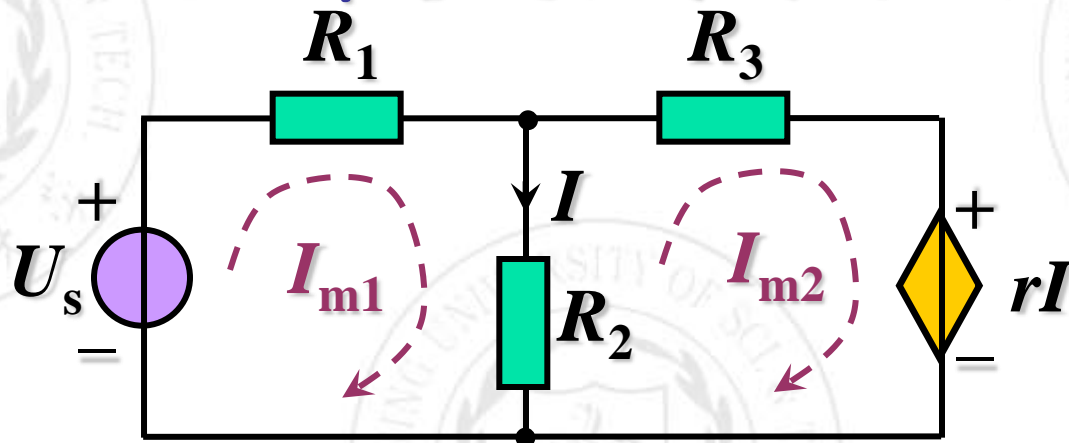
$$\begin{aligned}(R_1 + R_2)I_{m1} - R_2I_{m2} + U &= U_s \\ -R_2I_{m1} + (R_2 + R_3)I_{m2} - U &= 0\end{aligned}$$

c: 添加约束方程： $I_{m2} - I_{m1} = I_s$

d: 求解

2.3 网孔电流法

■ 电路中含受控源的网孔法



✚ a: 选取网孔电流绕行方向

✚ b: 先将受控源作独立电源处理，利用直接观察法列方程：

$$(R_1 + R_2)I_{m1} - R_2I_{m2} = U_s$$

$$-R_2I_{m1} + (R_2 + R_3)I_{m2} = -rI$$

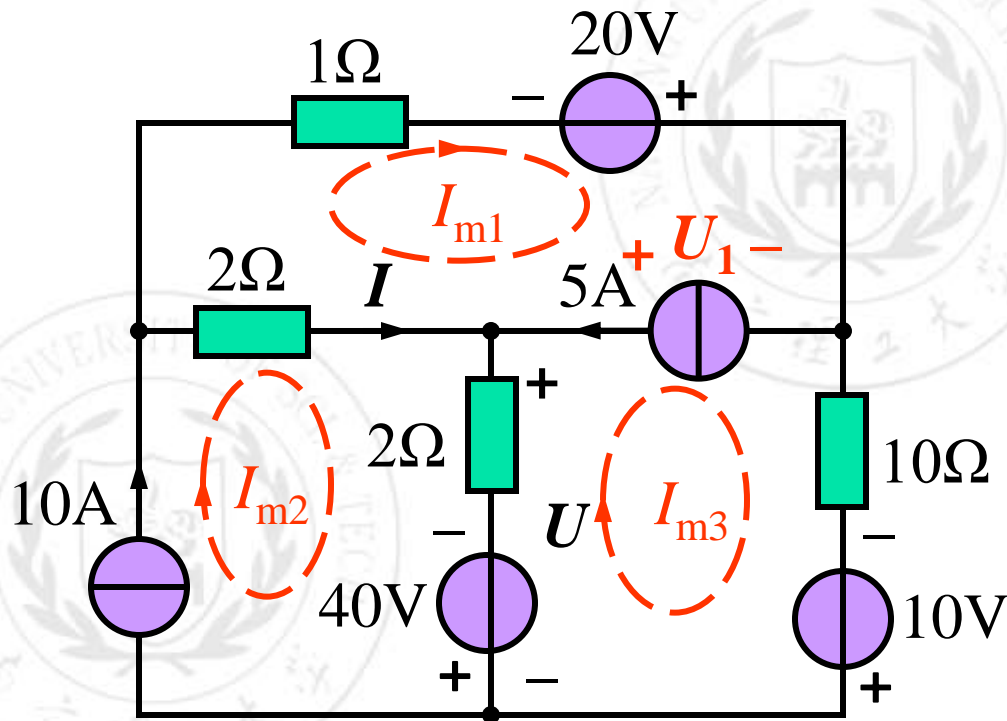
✚ c: 再将控制量用未知量表示: $I = I_{m1} - I_{m2}$

✚ d: 整理求解: $(R_1 + R_2)I_{m1} - R_2I_{m2} = U_s$ (注意: $R_{12} \neq R_{21}$)

$$(r - R_2)I_{m1} + (R_2 + R_3 - r)I_{m2} = 0$$

例：用网孔分析法求电流 I 和电压 U 。

- 解**
- 1、设定网孔电流及其参考方向
 - 2、在电流源两端增设电压
 - 3、列写方程
 - 4、补充方程



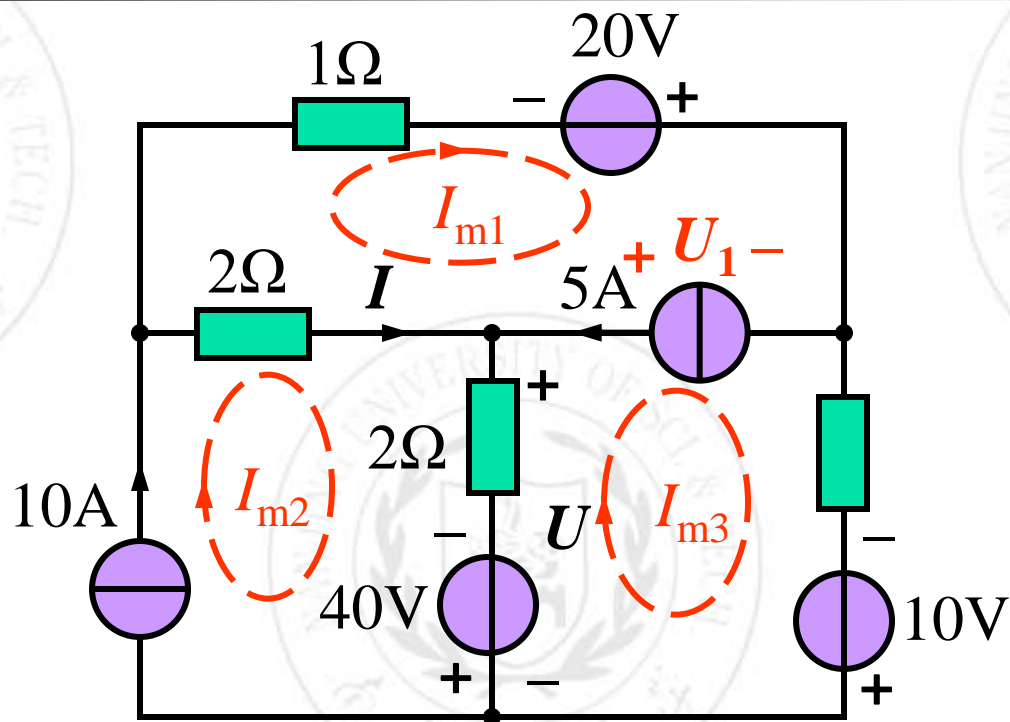
$$(2 + 1)I_{m1} - 2I_{m2} = 20 + U_1$$

$$I_{m2} = 10$$

$$-2I_{m2} + (2 + 10)I_{m3} = 10 - 40 - U_1$$

$$I_{m1} - I_{m3} = 5$$

2.3 网孔电流法



解得: $I_{m1} = 6A$

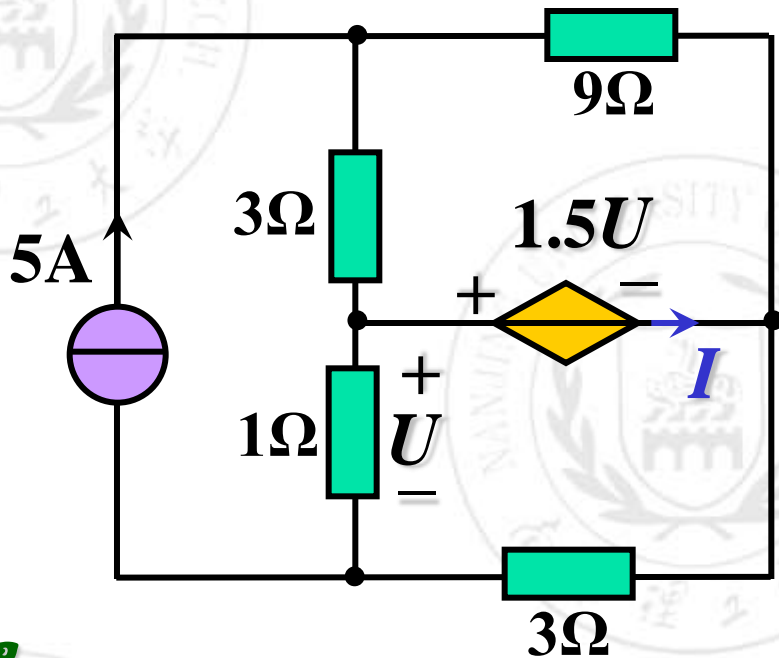
$$I_{m3} = 1A$$

$$I = -I_{m1} + I_{m2} = 4A$$

$$U = 2(I_{m2} - I_{m3}) - 40 = -22V$$

例题

例：求受控电压源发出的功率



电桥平衡只是相对于无源电路而言

解：

$$U = 6\text{ V}$$

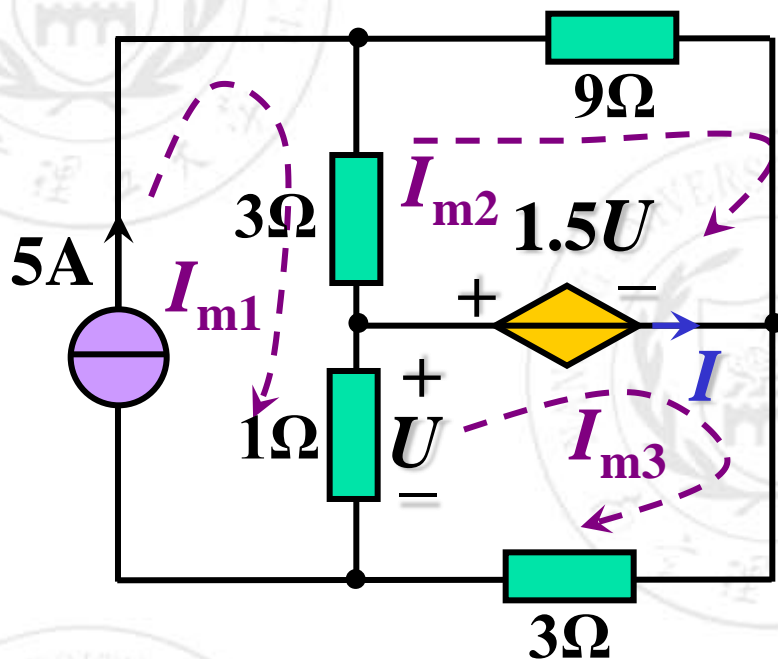
$$I = -3\text{ A}$$

$$P = 1.5U \times I = -27\text{ W}$$

故受控电压源发出功率27W

例题

例：求受控电压源发出的功率



$$1: I_{m1} = 5A$$

$$2: -3I_{m1} + (3 + 9)I_{m2} = 1.5U$$

$$3: -I_{m1} + (1 + 3)I_{m3} = -1.5U$$

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

解： $I_{m2} = 2A; I_{m3} = -1A; U = 6V; I = I_{m3} - I_{m2} = -3A$

$$P = 1.5U \times I = -27W$$

故受控电压源发出功率27W



■ 线性函数 $f(x)$

✚ 可加性: $f(x_1 + x_2) = f(x_1) + f(x_2)$

✚ 齐次性: $f(ax) = af(x)$

✚ 叠加性: $f(ax_1 + bx_2) = af(x_1) + bf(x_2)$

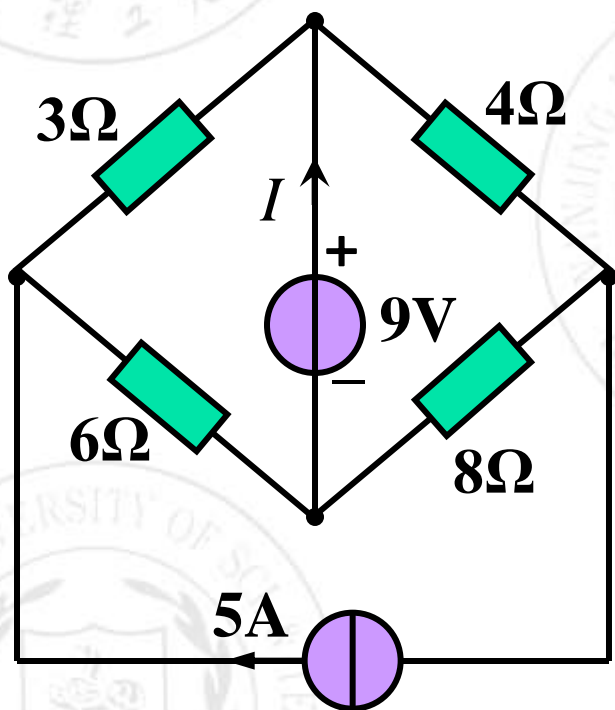
(a, b 为任意常数)

■ 叠加定理

对于任一线性网络，若同时受到多个独立电源的作用，
则这些共同作用的电源在某条支路上所产生的电压或
电流，等于每个独立电源各自单独作用时，在该支
路上所产生的电压或电流分量的代数和。

2.5 叠加定理

例：试用叠加定理计算电流 I



2.5 叠加定理

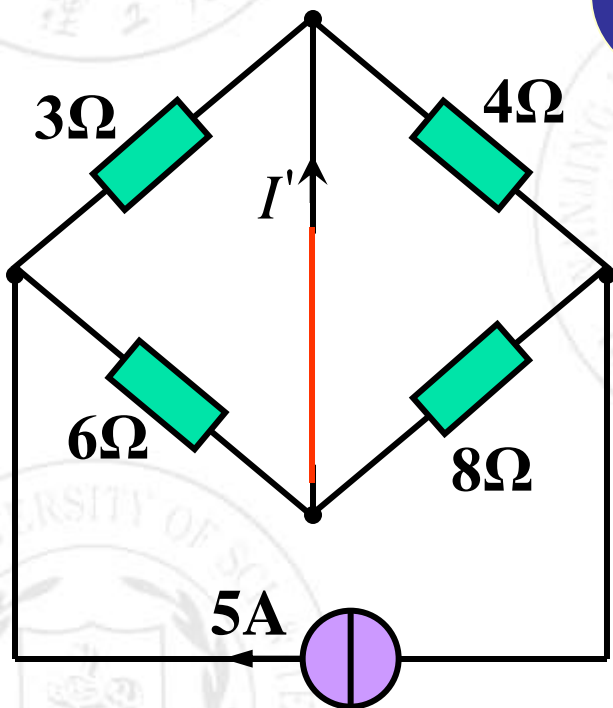
例：试用叠加定理计算电流 I

解

1、电流源单独作用时，
电压源短路处理。

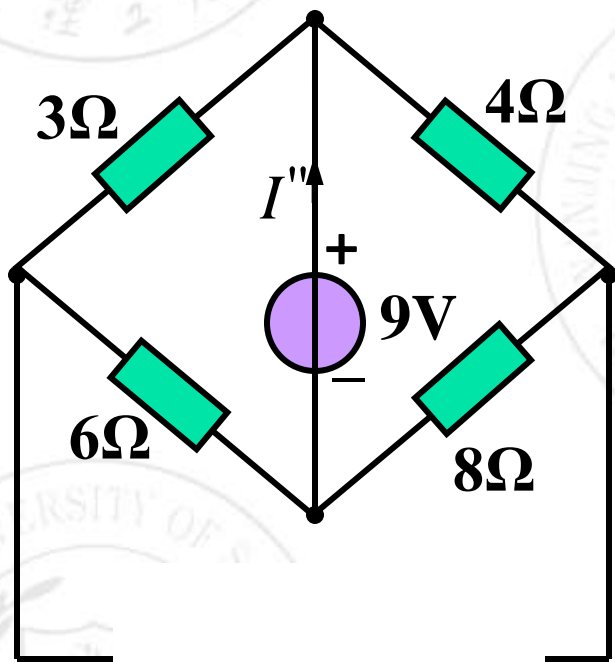
此时，电流为 I' 。

显然： $I' = 0$



2.5 叠加定理

例：试用叠加定理计算电流 I



2、电压源单独作用时，
电流源开路处理。

此时，电流为 I'' 。

$$I'' = \frac{9}{3 + 6} + \frac{9}{4 + 8} = 1.75 \text{ A}$$

所以：

$$I = I' + I'' = 1.75 \text{ A}$$

■ 注意!

- 只适用于线性电路中求电压、电流，不适用于求功率；也不适用非线性电路
- 某个独立电源单独作用时，其余独立电源全为零值，电压源用“短路”替代，电流源用“断路”替代
- 受控源不可以单独作用，当每个独立源作用时均予以保留
- “代数求和”指分量参考方向与原方向一致取正，不一致取负



本次课重点

- ◆ 网孔电流法.
- ◆ 叠加定理.