哈爾濱工業大學

第2章 线性直流电路

主讲教师　刘洪臣

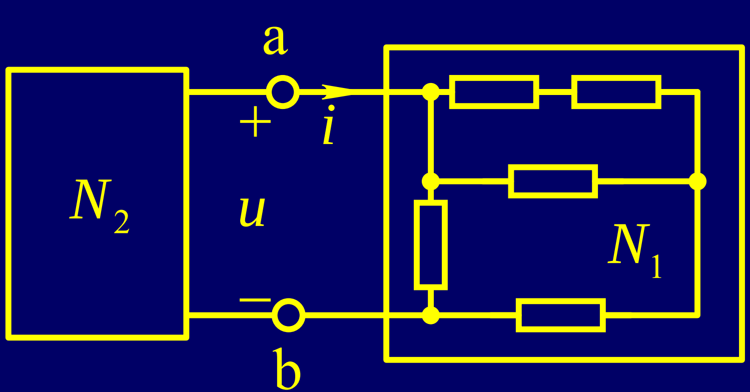
提要 本章主要内容包括三部分。第一部分首先介绍电阻的串联与并联化简、星形与三角形联接的等效变换、电源的等效变换等；第二部分介绍求解线性直流电路的一般方法，包括支路电流法、回路电流法和节点电压法；第三部分简要介绍运算放大器，含运算放大器电路的分析特点。

本章目次

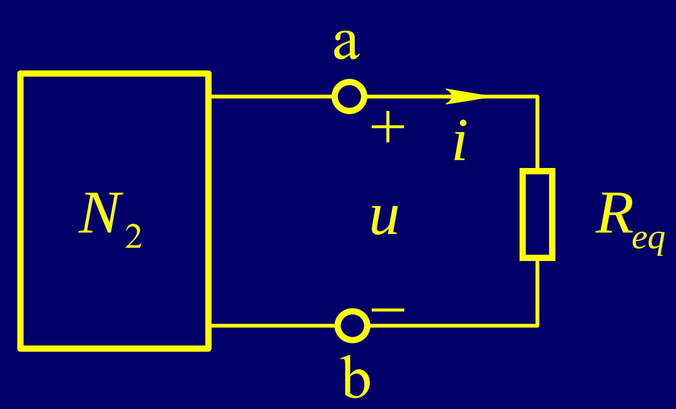
2.1 电阻的串联与并联

基本要求：掌握等效的概念，熟练运用电阻串、并联等效规律计算电路。

1 等效： 是指被化简的电阻网络N_1与等效电阻具有相同的 ***u-i*** 关系(即端口方程)，从而用等效电阻 R_{eq} 代替电阻网络N_1之后，不改变其余部分的电压和电流。



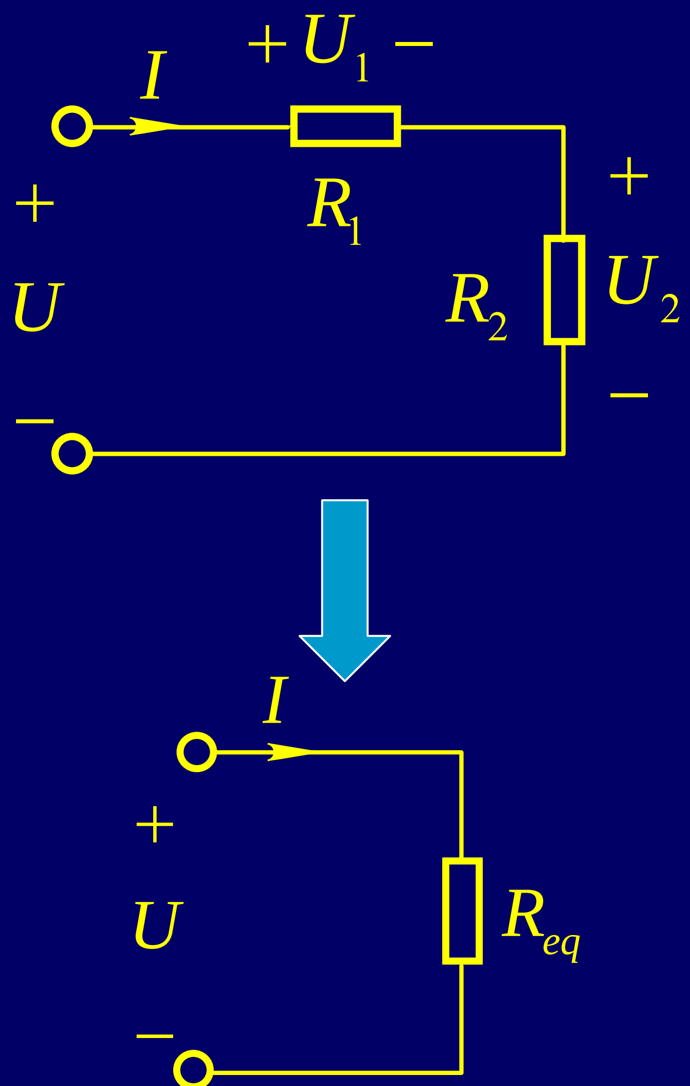
等效的概念



等效的概念

注：等效只是对外电路等效

2 电阻的串联



电阻的串联等效

根据KVL及欧姆定律列写电路方程

$$U = U_1 + U_2$$

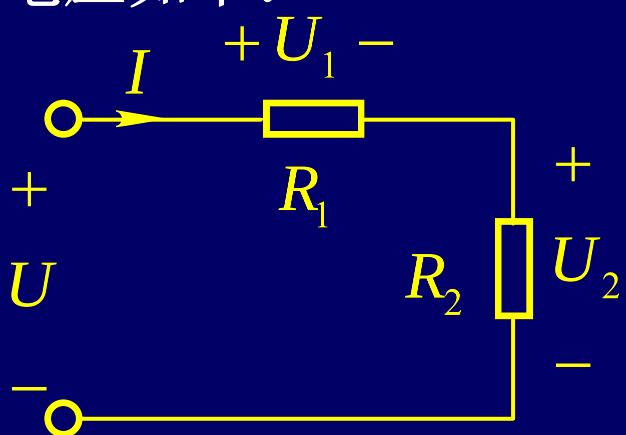
$$= R_1 I + R_2 I = (R_1 + R_2) I = R_{eq} I$$

即： $R_{eq} = R_1 + R_2$

推广之

$$R_{eq} = \sum_{k=1}^{N} R_k$$

串联的应用：电阻的串联联接常用于分压，其中每个串联电阻只承受总电压的一部分，两个电阻串联时，各个电阻所分担的电压如下：



$$U_1 = R_1 I = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U$$

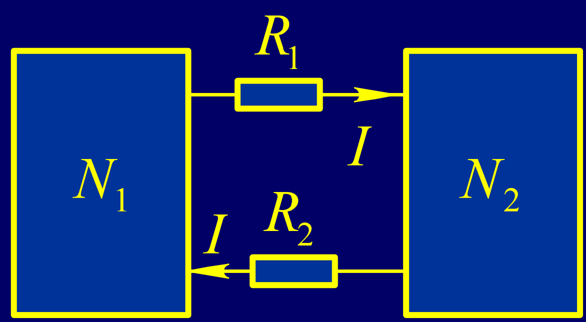
$$U_2 = R_2 I = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U$$

$$U_k = R_k I = \frac{R_k}{R_{eq}} U$$

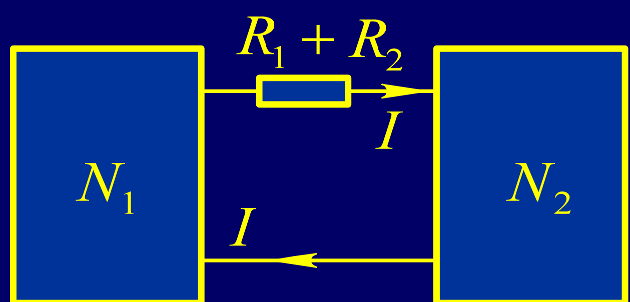
$$P_1 = U_1 I = R_1 I^2 \qquad P_2 = U_2 I = R_2 I^2$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{P_1}{P_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

按串联进行电路的化简：



(a)

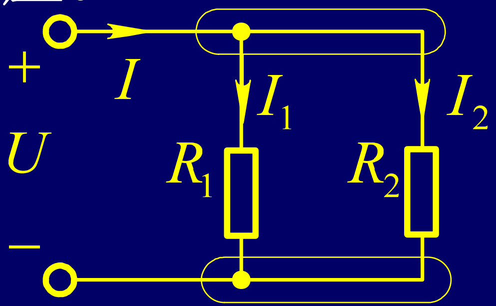


(b)

注：如此等效值后电路中的哪些量发生了变化？

2 电阻的并联

并联：各电阻都接到同一对节点之间，从而各电阻承受相同电压。



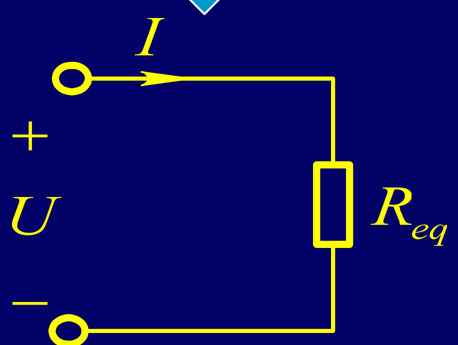
(a)

根据KCL及欧姆定律列写电路方程

$$I = I_1 + I_2$$

$$= \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} = (G_1 + G_2)U = G_{eq}U$$

即 $G_{\mathrm{eq}} = G_1 + G_2$ $\qquad R_{\mathrm{eq}} = \frac{1}{G_{\mathrm{eq}}} = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$

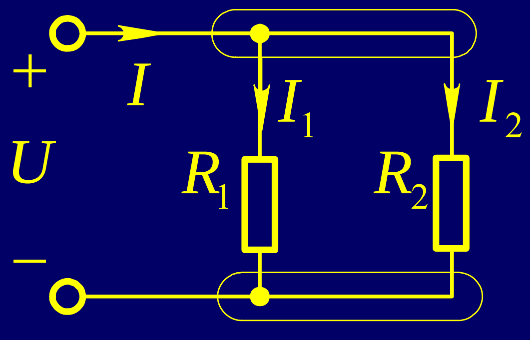


$$G_{eq} = \sum_{k=1}^{N} G_k \qquad R_{\mathrm{eq}} = \frac{1}{G_{\mathrm{eq}}} = \frac{1}{\sum_{k=1}^{N} G_k} = \frac{1}{\sum_{k=1}^{N} \frac{1}{R_k}}$$

电阻的并联等效

并联的应用：电阻的并联联接常用于分流，其中每个并联电阻只流过总电流的一部分，两个电阻并联时，各个电阻所分担的电流如下：

分流器



(a)

$$I_1 = G_1 U = \frac{G_1}{G_1 + G_2} I = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I$$

$$I_2 = G_2 U = \frac{G_2}{G_1 + G_2} I = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I$$

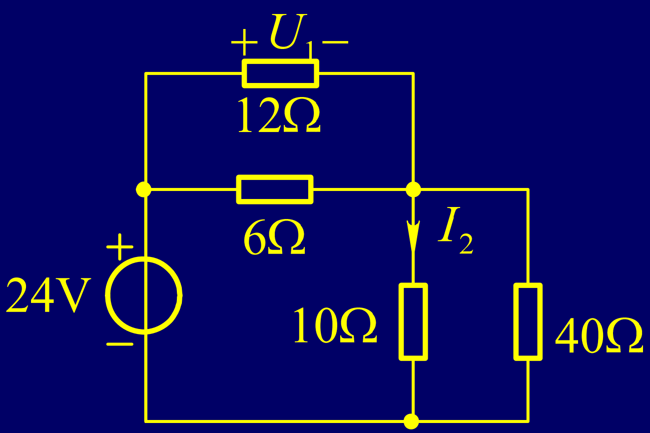
$$I_k = G_k U = G_k (R_{eq} I) = \frac{G_k}{G_{eq}} I$$

功率分配 $P_1 = UI_1 = G_1 U^2 \quad P_2 = UI_2 = G_2 U^2$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{P_1}{P_2} = \frac{G_1}{G_2}$$

例题 2.1

求图示电路的电压U_1及电流I_2。

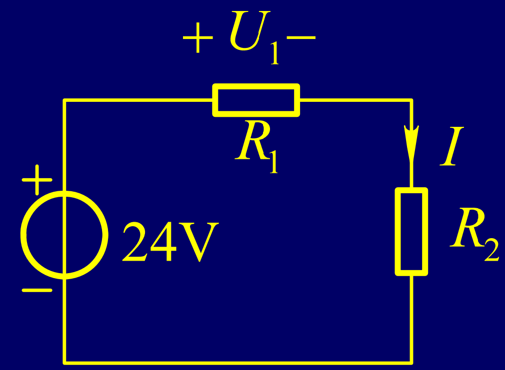


(a)

解 先应用并联化简得到图(b)所示电路

$$R_1=\frac{12\Omega\times6\Omega}{12\Omega+6\Omega}=4\Omega$$

$$R_2=\frac{10\Omega\times40\Omega}{10\Omega+40\Omega}=8\Omega$$



(b)

由串联分压公式得：

$$U_1=\frac{R_1}{R_1+R_2}\times24\text{V}=8\text{V}$$

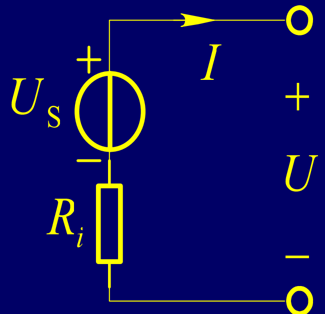
$$I=\frac{24\text{V}}{R_1+R2}=2\text{A}$$

分流公式得

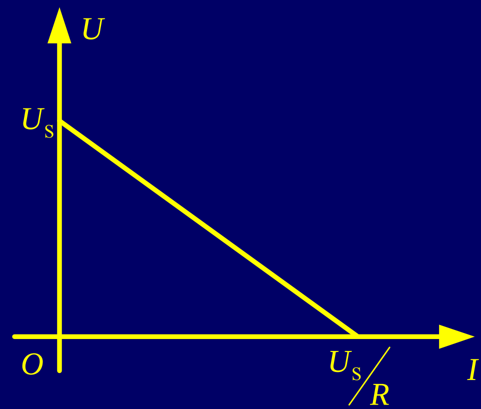
$$I_2=\frac{40\Omega}{10\Omega+40\Omega}\times I=1.6\text{A}$$

基本要求：掌握各种含源支路的等效化简方法和戴维南、诺顿两种典型电路之间的等效变换规律，能熟练运用这些等效规律化简电路。

1 戴维南与诺顿电路



戴维南电路



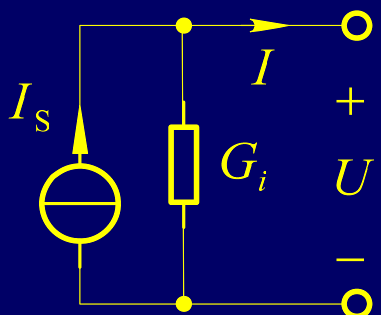
端口特性方程

$$U = U_S - R_i I$$

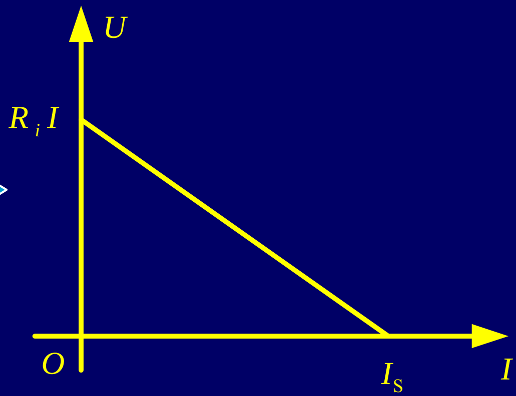
$$I = I_S - G_i U$$

等效条件为

$$I_S = \frac{U_S}{R_i},\quad G_i = \frac{1}{R_i}$$

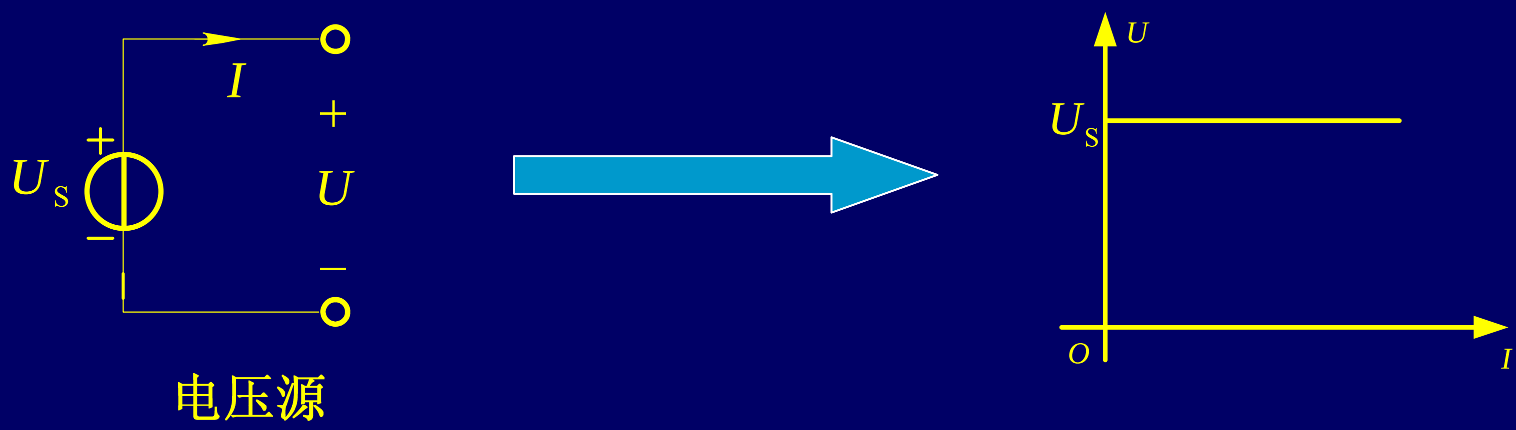


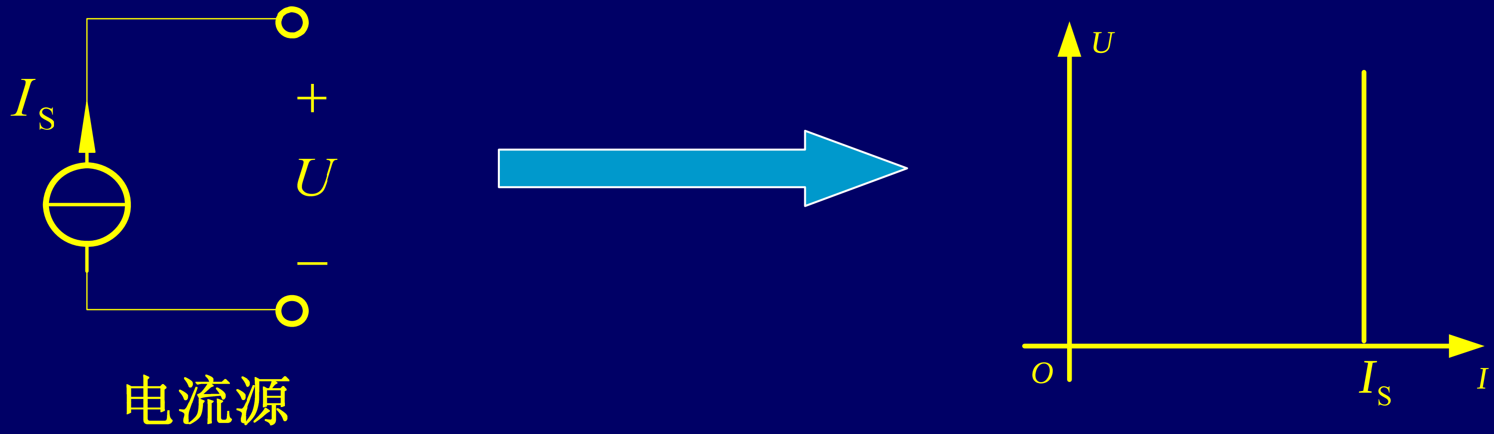
诺顿电路



由于R_i和G_i互为倒数，所以两电路的电阻是同一个电阻

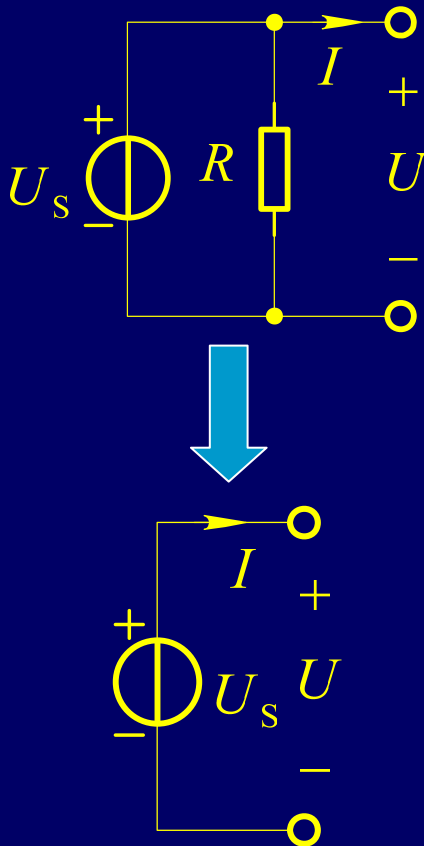
注：电压源内阻R_i=0，而电流源内导G_i=0时，即内阻等于无穷大，它们也称为理想电源。零不能取倒数，故电压源和电流源不能相互等效 。



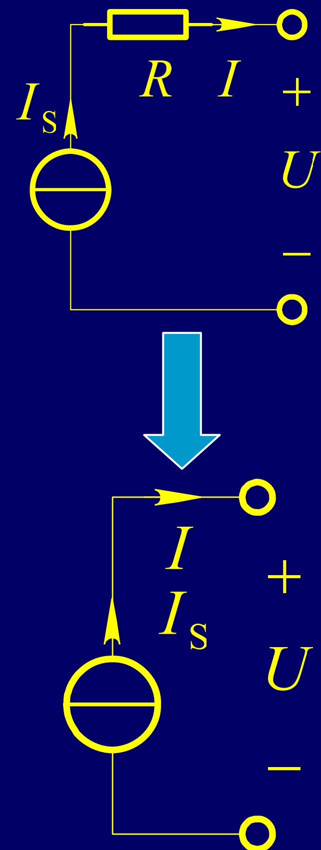


2 其它含源支路的等效

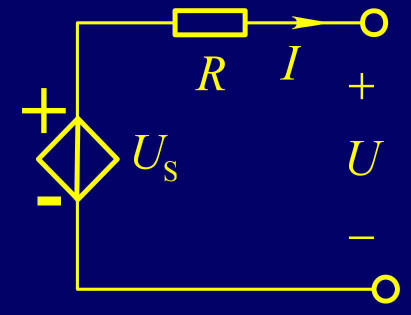
- 电压源并电阻



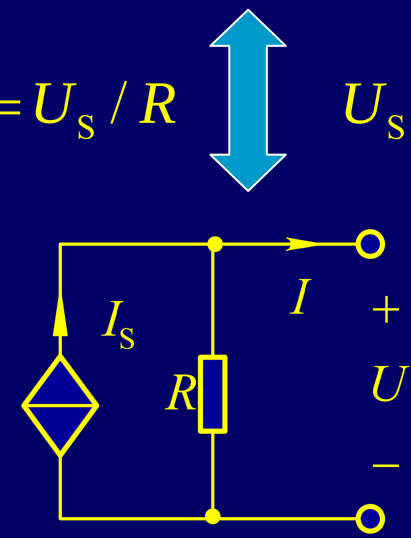
- 电流源串电阻



- 含受控源支路的等效



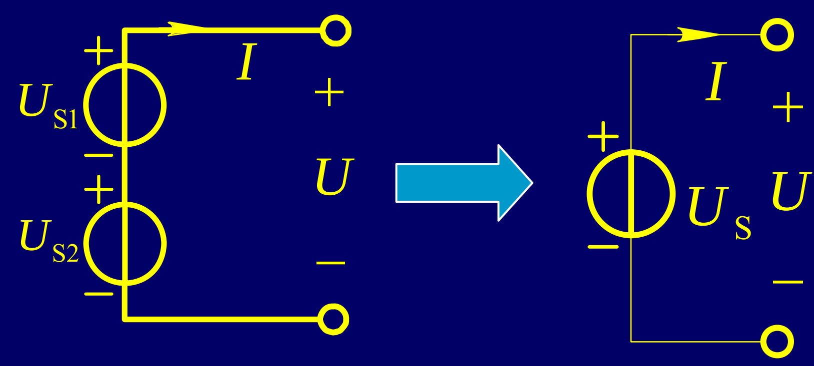
$I_S = U_S / R$ $\quad$ $U_S = I_S R$



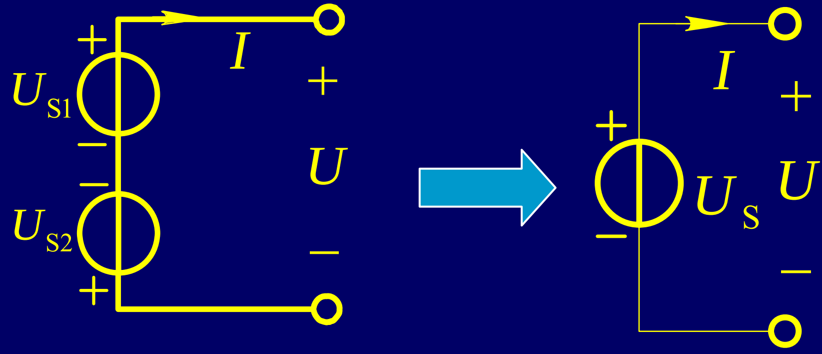
1）“等效”只是对外部电路(不包含被变换部分)而言；

2）受控源支路变换方法与含独立源的情况相似。但在使用这种变换时注意不要使控制量消失。

- 电压源的正向，反向串联

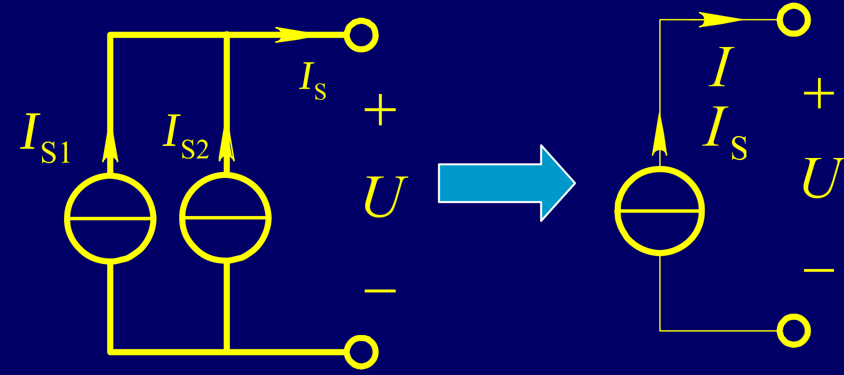


$$U_S = U_{S1} + U_{S2}$$

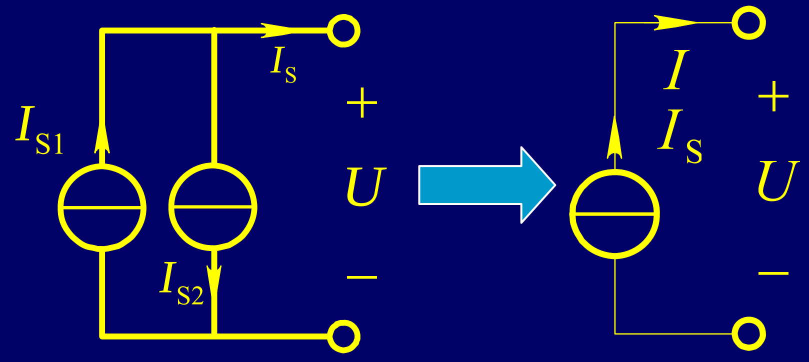


$$U_S = U_{S1} - U_{S2}$$

- 电流源的正向，反向并联



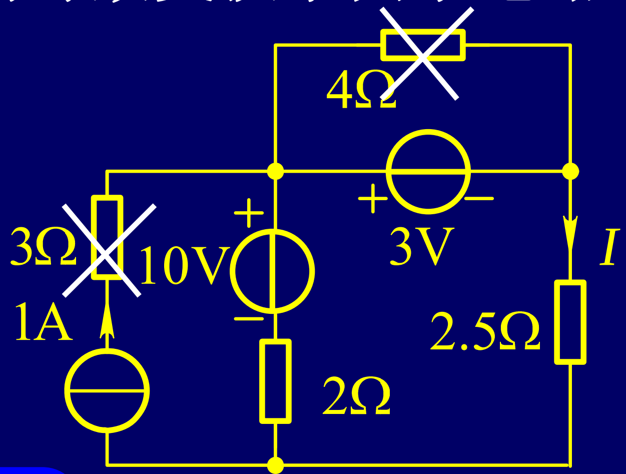
$$I_S = I_{S1} + I_{S2}$$



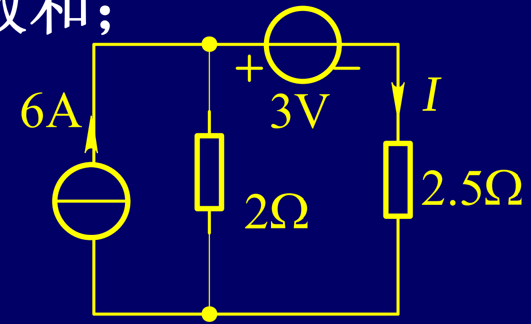
$$I_S = I_{S1} - I_{S2}$$

例题 2.2

用等效变换求图示电路中电流I。

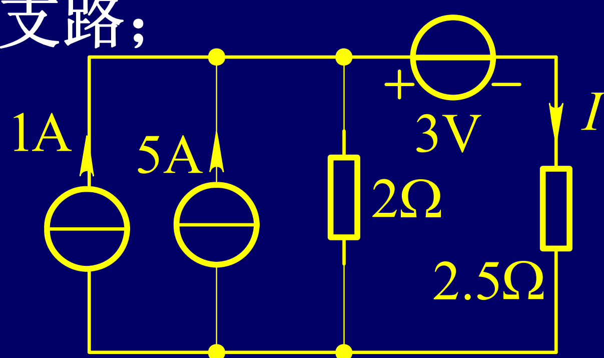


将两个并联电流源等效为一个电流源，其源电流等于两个并联电流源源电流的代数和；

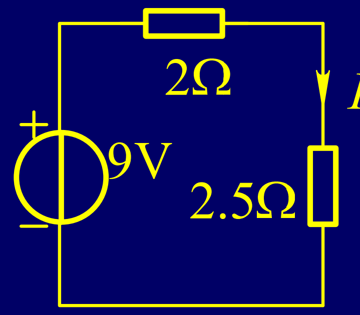


解

将电流源与电阻串联电路等效成电流源，将电压源与电阻并联电路等效成电压源，将电压源与电阻串联支路等效成电流源与电阻并联支路；



将电流源与电阻并联电路等效成电压源与电阻串联支路，并将两个串联电压源等效成一个电压源；

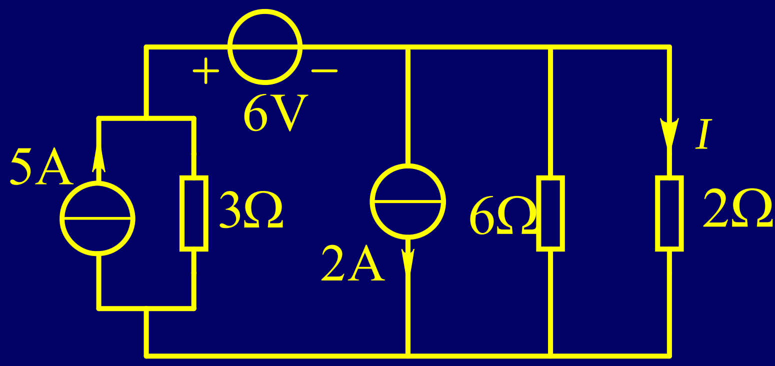


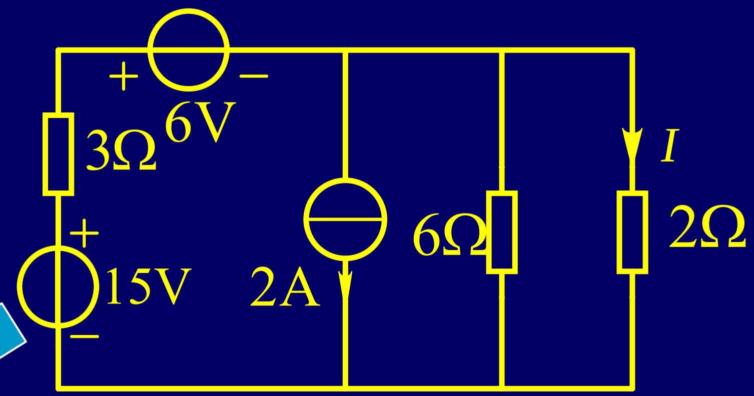
$$I=\frac{9\text{V}}{2\Omega+2.5\Omega}=2\text{A}$$

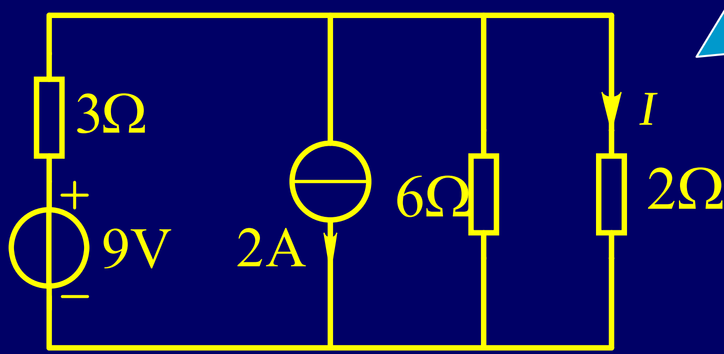
[补充2.1]

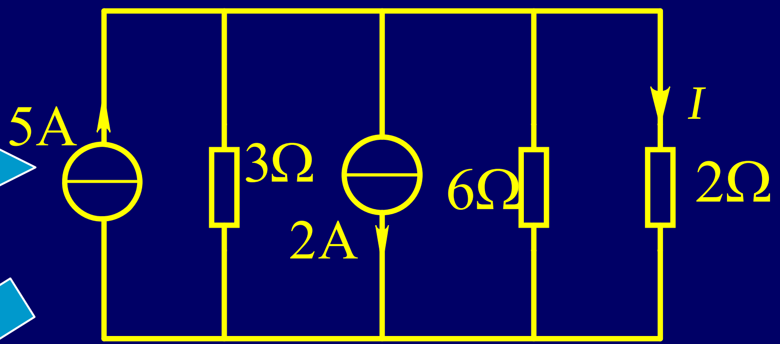
利用等效化简求电流I

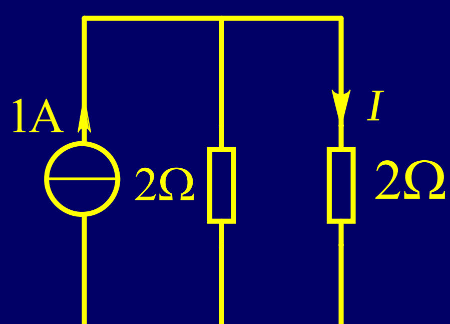
[解] 规则是向待求量附近化简









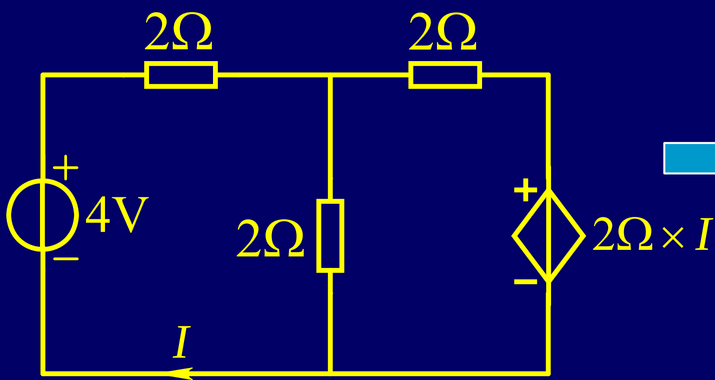


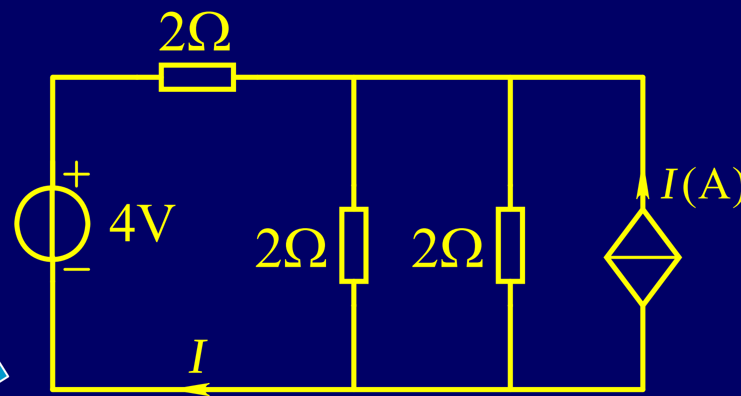
$$I = 0.5\text{A}$$

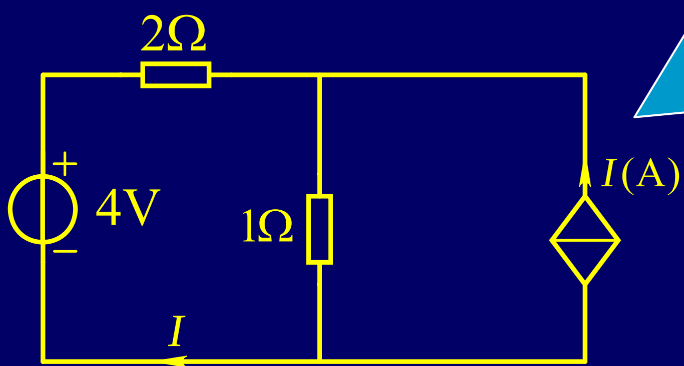
[补充2.2]

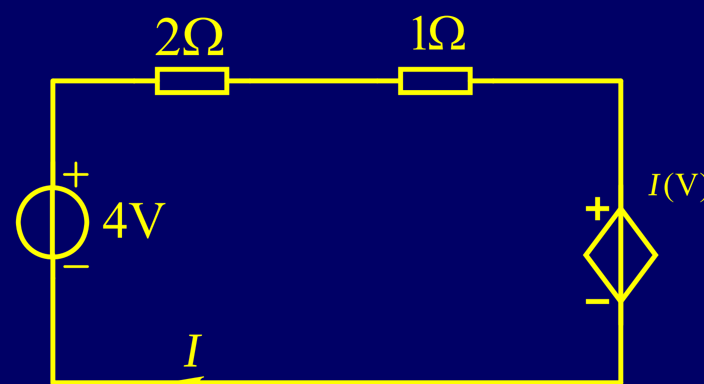
利用等效化简求电流I

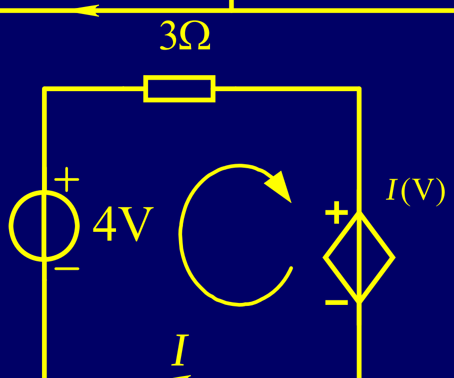
[解]











根据KVL

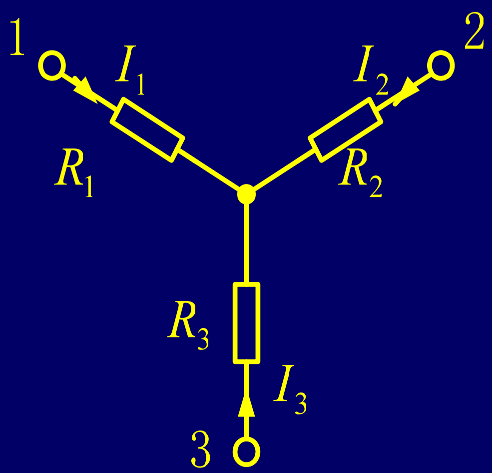
$$-4\text{V}+3\Omega\times I+I(\text{V})=0$$

$$I=1\text{A}$$

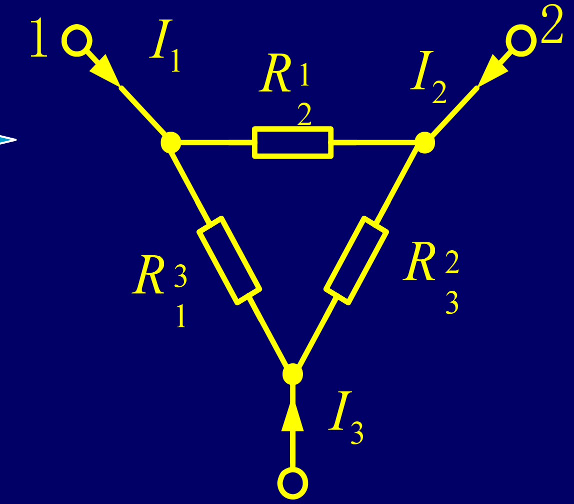
2.3 电阻的星形和三角形联接

基本要求：掌握电阻的星形和三角形联接的等效原理和等效变换公式，并能应用这些等效变换规律计算电路。

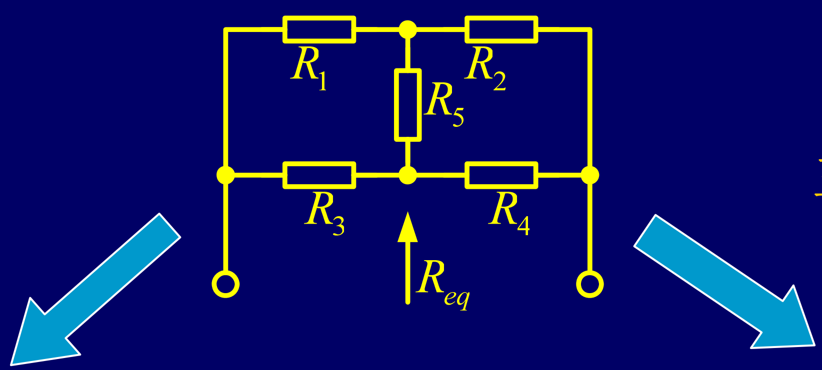
1 星形联结和三角形连结

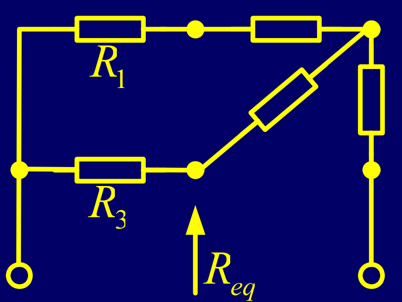


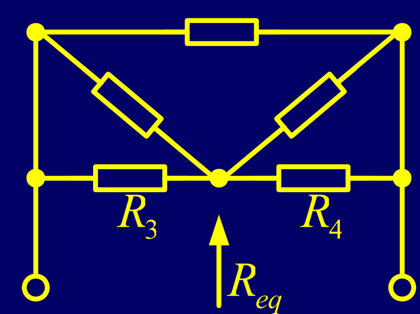
星形(T形)联接



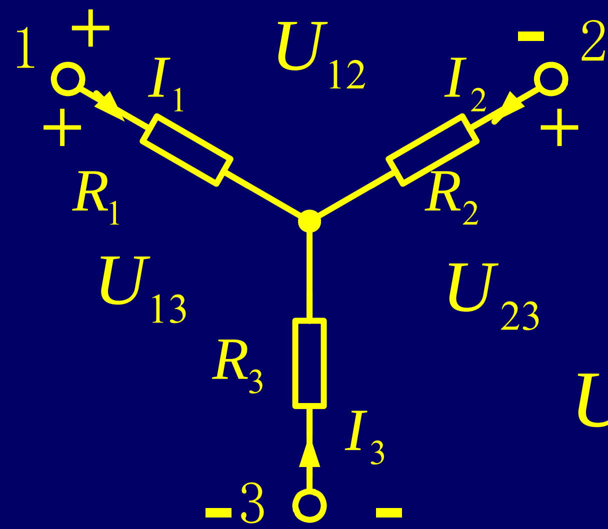
三角形(Δ形)联接





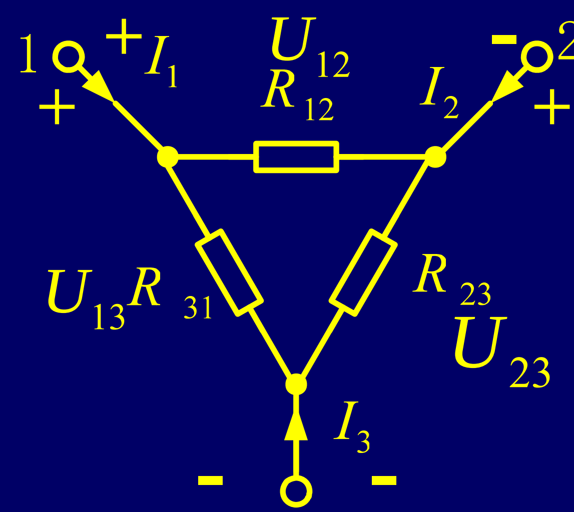


2 等效条件



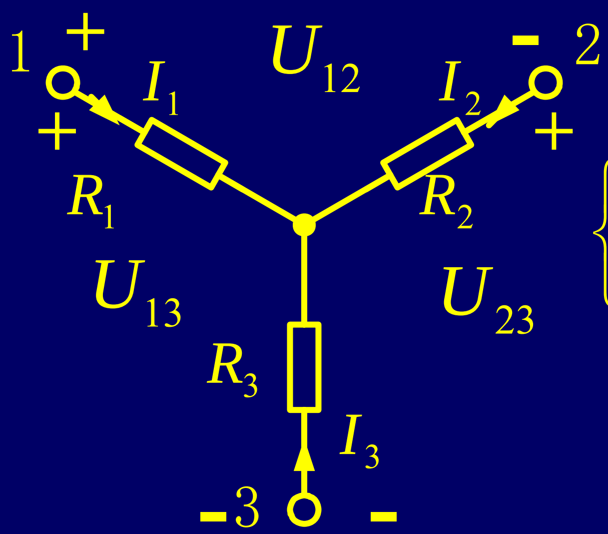
$$I_3 = -(I_1 + I_2)$$

$$U_{13} = U_{12} + U_{23}$$



分析：将星形连接转换成三角形连接时，将减少一个节点，但要增加一个回路；而将三角形连接转换成星形连接时，将减少一个回路，但要增加一个节点。

星形与三角形联接的网络属于三端网络，有三对端子间电压和三个端子电流，根据**KVL**和**KCL**，三端网络的对外作用可以用两对端子间电压和对应的两个端子电流来表示。如果**Y**形联接的网络和Δ形联接的网络具有相同的电压、电流关系，则这两种网络可以相互替代，而不影响其它部分的电压与电流，此时称**Y**形网络与Δ形网络相互等效。



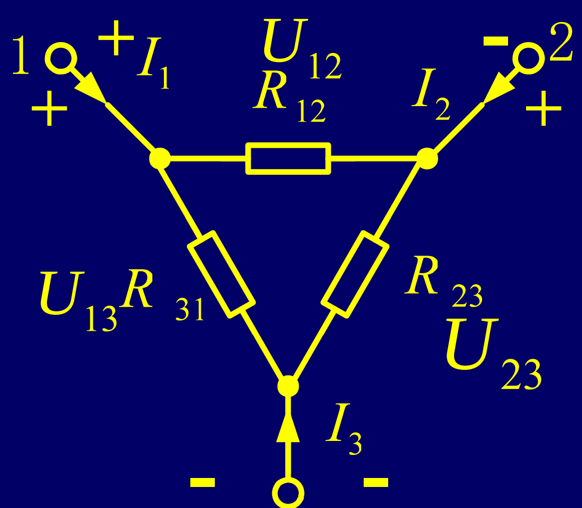
- 星形连接中的电压、电流关系

$$\begin{cases} U_{13} = R_1 I_1 - R_3 I_3 = R_1 I_1 + R_3 (I_1 + I_2) = (R_1 + R_3) I_1 + R_3 I_2 \\ U_{23} = R_2 I_2 - R_3 I_3 = R_2 I_2 + R_3 (I_1 + I_2) = R_3 I_1 + (R_2 + R_3) I_2 \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} U_{13} \\ U_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + R_3 & R_3 \\ R_3 & R_2 + R_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{U = RI}$$

- 三角形连接中的电压、电流关系



$$I_1 = \frac{U_{13}}{R_{31}} + \frac{U_{12}}{R_{12}} = \frac{U_{13}}{R_{31}} + \frac{U_{13} - U_{23}}{R_{12}} = (G_{12} + G_{31}) U_{13} - G_{12} U_{23}$$

$$I_2 = \frac{U_{23}}{R_{23}} - \frac{U_{12}}{R_{12}} = \frac{U_{23}}{R_{23}} - \frac{U_{13} - U_{23}}{R_{12}} = -G_{12} U_{13} + (G_{12} + G_{23}) U_{23}$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{12} + G_{31} & -G_{12} \\ -G_{12} & G_{12} + G_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{13} \\ U_{23} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{I = GU} \qquad \boldsymbol{U = G^{-1} I}$$

• 由此得二者之间的等效条件是

Y形—Δ形

$$\left.\begin{aligned}
R_{12} &= \frac{1}{G_{12}} = \frac{R_1R_2 + R_2R_3 + R_3R_1}{R_3} = \frac{G_1 + G_2 + G_3}{G_1G_2} \\
R_{23} &= \frac{1}{G_{23}} = \frac{R_1R_2 + R_2R_3 + R_3R_1}{R_1} = \frac{G_1 + G_2 + G_3}{G_2G_3} \\
R_{31} &= \frac{1}{G_{31}} = \frac{R_1R_2 + R_2R_3 + R_3R_1}{R_2} = \frac{G_1 + G_2 + G_3}{G_3G_1}
\end{aligned}\right\}$$

Δ形—Y形

$$\left.\begin{aligned}
R_1 &= \frac{G_{23}}{G_{12}G_{23} + G_{23}G_{31} + G_{31}G_{12}} = \frac{R_{12}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \\
R_2 &= \frac{G_{31}}{G_{12}G_{23} + G_{23}G_{31} + G_{31}G_{12}} = \frac{R_{23}R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \\
R_3 &= \frac{G_{12}}{G_{12}G_{23} + G_{23}G_{31} + G_{31}G_{12}} = \frac{R_{31}R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}
\end{aligned}\right\}$$

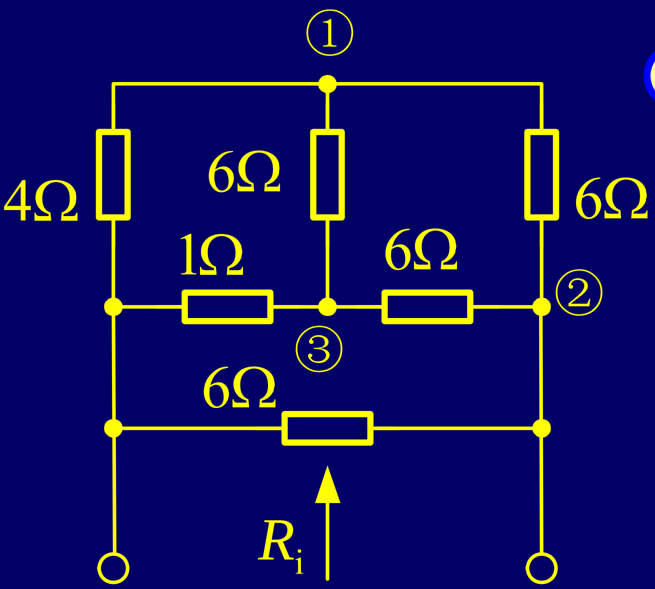
三个相等的电阻接成Y形或Δ形时的等效变换是：

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_Y$$

$$R_{12} = R_{23} = R_{31} = R_\Delta = 3R_Y \quad \Rightarrow \quad R_Y = \frac{1}{3}R_\Delta$$

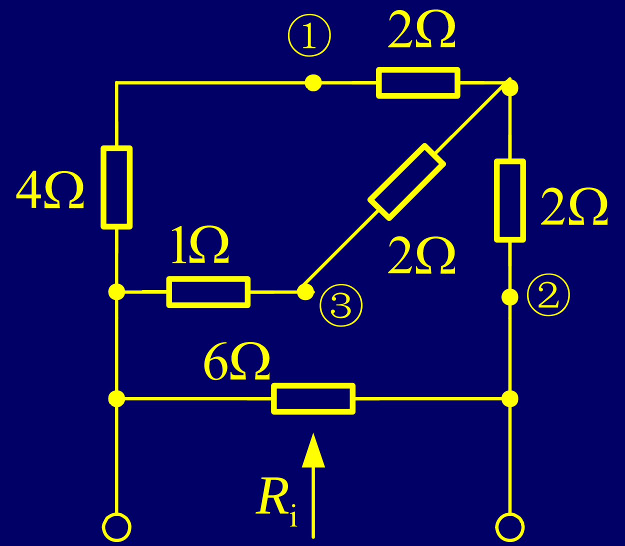
例题 2.3

求图示电路的等效电阻R_i

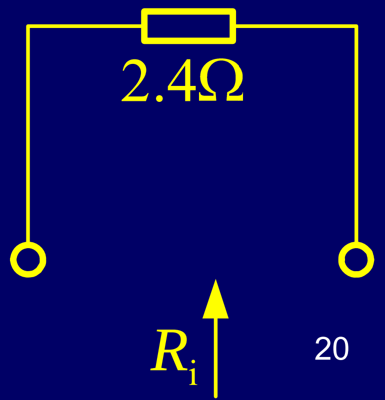


解

将节点①、②、③之间的对称Δ形联接电阻化为等效对称的Y形联接。



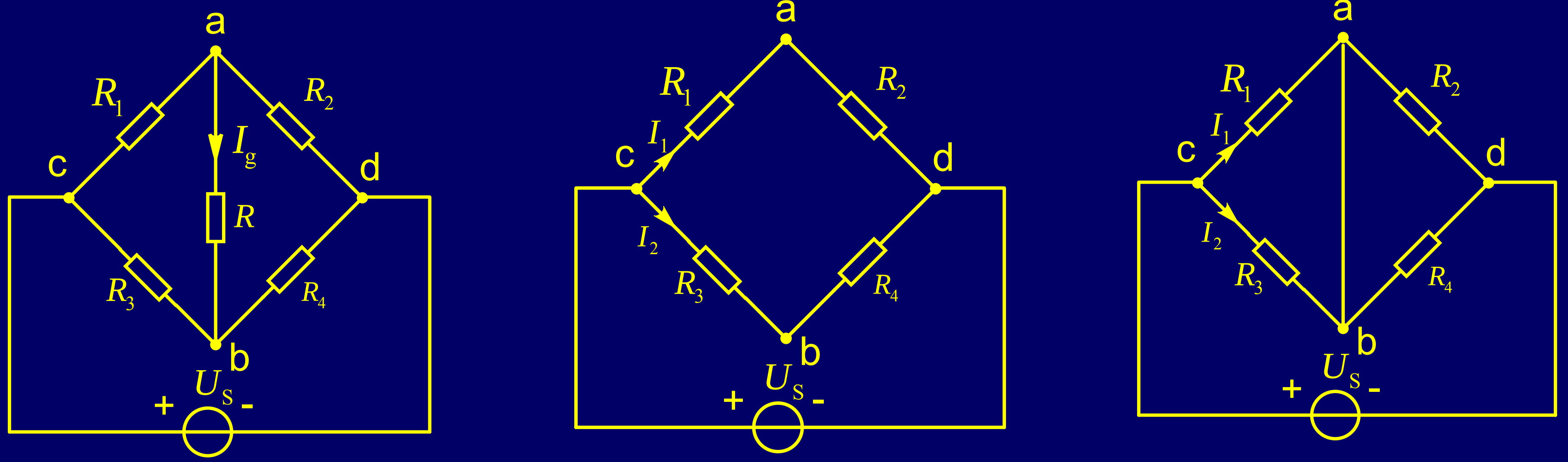
用串并联化简等效后的电路求出等效电阻



$$R_i = 6\Omega \,\|\, [(4\Omega + 2\Omega) \,\|\, (1\Omega + 2\Omega) + 2\Omega] = 2.4\Omega$$

[补充2.3]

图示电路是桥形电阻电路，当I_g=0，U_{ab}=0时称电桥是平衡的，试说明电桥平衡时的电阻R_1，R_2，R_3 和R_4 应满足什么关系？



(a) (b) (c)

[解] 电桥平衡时I_g=0，U_{ab}=0。从Ig=0角度看，a，b两点间是开路的，如图(b)所示；从U_{ab}=0角度看， a，b两点间是短路的，如图(c)所示。

由图b有 $I_1 = \dfrac{U_S}{R_1 + R_2}$ $I_2 = \dfrac{U_S}{R_3 + R_4}$

由图c有 $U_{ca} = U_{cb}$ 即 $R_1 I_1 = R_3 I_2$

$$\frac{R_1 U_S}{R_1 + R_2} = \frac{R_3 U_S}{R_3 + R_4}$$

即 $\dfrac{R_1}{R_2} = \dfrac{R_3}{R_4}$

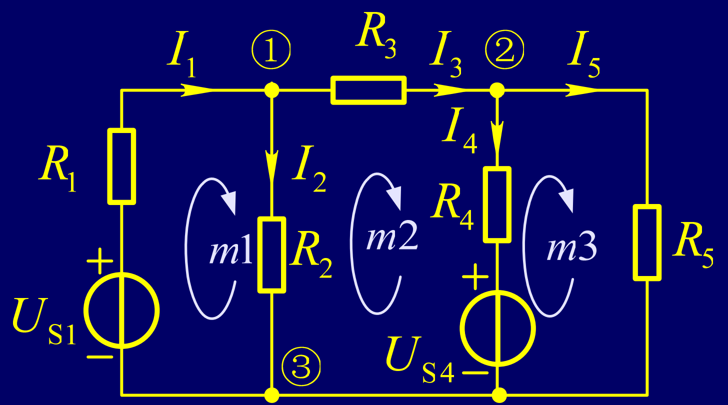
基本要求：熟练掌握支路电流法的原理及方程的列写规则。

设给定的线性直流电路具有b条支路、n个节点，那么**支路电流法**就是以b个未知的支路电流作为待求量，对n-1个节点列出独立的KCL方程，再对b-(n-1)个回路列出独立的KVL方程，这b个方程联立便可解得b个支路电流。

注：为列写独立的KVL方程，就要选取独立的回路，在平面电路中，对全部内网孔列出的KVL方程是一组独立方程。

例题 2.4

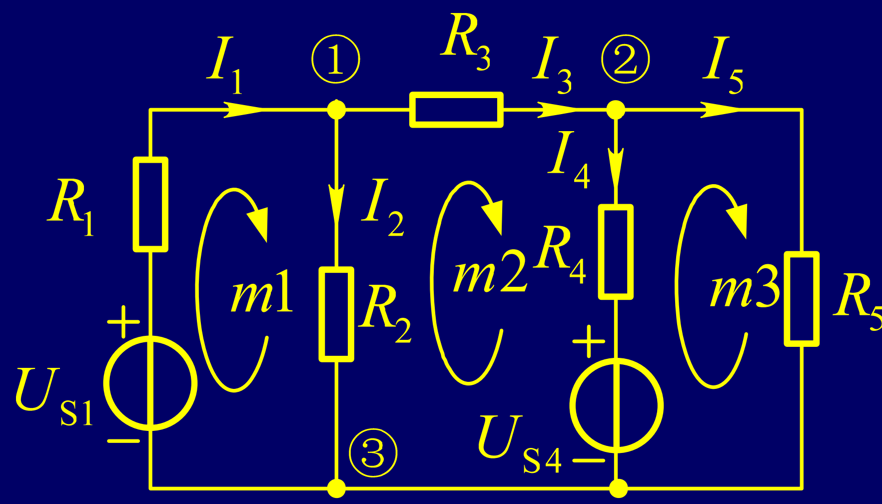
列出图示电路的支路电流方程。



分析：图中 共有5个支路电流，参考方向已标在图中。需列出5个独立方程。现有2个独立节点，对应2个KCL方程；3个网孔，对应3个KVL方程。

解

对n-1个节点列KCL方程：



节点①：$-I_1+I_2+I_3=0$

节点②：$-I_3+I_4+I_5=0$

对网孔列KVL方程，其中电阻电压用支路电流来表示：

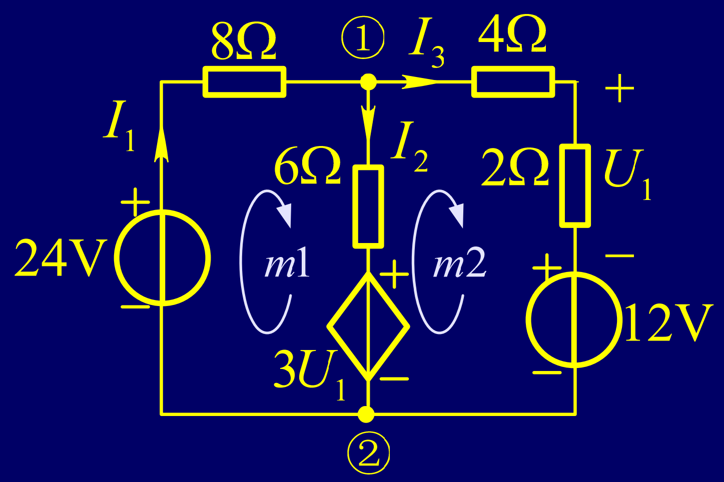
网孔$m1$：$R_1I_1+R_2I_2=U_{S1}$

网孔$m2$：$-R_2I_2+R_3I_3+R_4I_4=-U_{S4}$

网孔$m3$：$-R_4I_4+R_5I_5=U_{S4}$

例题 2.5

用支路电流法求图中电流I_1，I_2，I_3。



解 对节点①列KCL方程

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

对网孔列KVL方程

网孔*m*1： $8\Omega \times I_1 + 6\Omega \times I_2 + 3U_1 = 24\text{V}$

网孔*m*2： $-6\Omega \times I_2 + (4+2)\Omega \times I_3 - 3U_1 = -12\text{V}$

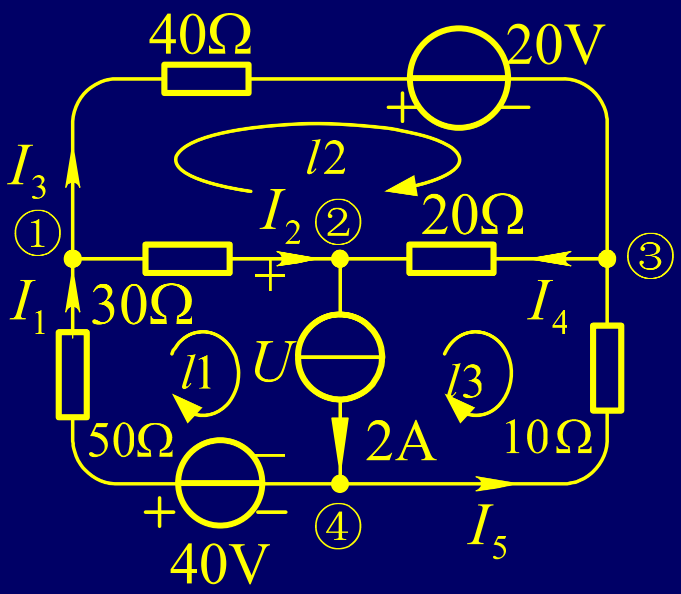
补充受控源控制量方程，在支路电流方程中要用支路电流表示控制量。

$$U_1 = 2\Omega \times I_3$$

解得 $I_1 = \dfrac{12}{7}\text{A}, I_2 = 2\text{A}, I_3 = -\dfrac{2}{7}\text{A}$

例题 2.6

列写图示含电流源电路的支路电流方程。



解 电流源所在支路的电流是已知的，列写KCL方程时，可将其直接列入等号右端。

节点①：$-I_1 + I_2 + I_3 = 0$

节点②：$I_2 + I_4 = 2\text{A}$

节点③：$-I_3 + I_4 - I_5 = 0$

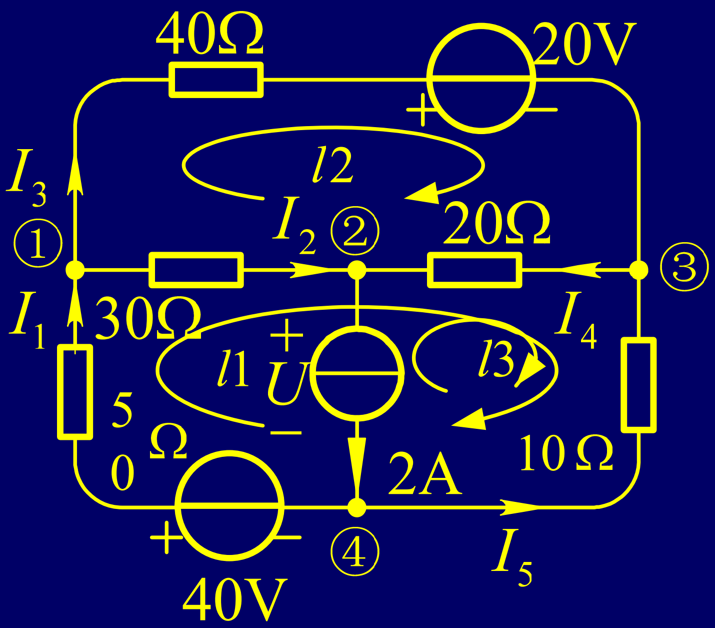
对包含电流源的回路列KVL方程，特别的对未知的电流源的两端电压，要作为变量列入到方程中。

网孔*l*1：$50\Omega \times I_1 + 30\Omega \times I_2 + U = 40\text{V}$

网孔*l*2：$-30\Omega \times I_2 + 40\Omega \times I_3 + 20\Omega \times I_4 = -20\text{V}$

网孔*l*3：$-20\Omega \times I_4 - 10\Omega \times I_5 - U = 0$

讨论：在列方程时能否避开电流源的两端电压？



节点①： $-I_1 + I_2 + I_3 = 0$

节点②： $I_2 + I_4 = 2\text{A}$

节点③： $-I_3 + I_4 - I_5 = 0$

网孔$l1$：$50\Omega \times I_1 + 30\Omega \times I_2 - 20\Omega \times I_4 - 10\Omega \times I_5 = 40\text{V}$

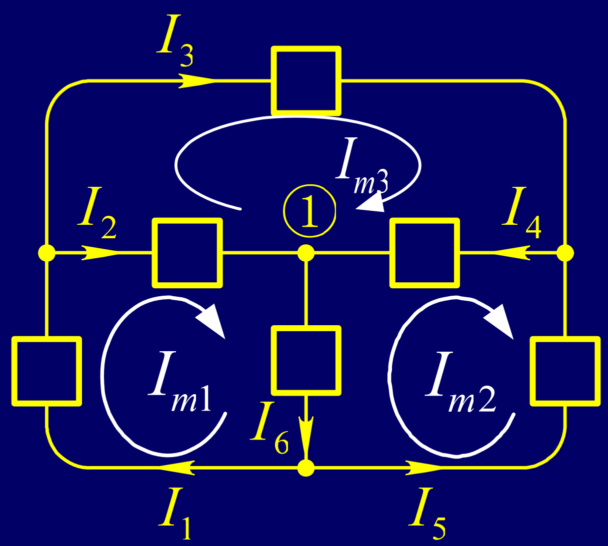
网孔$l2$：$-30\Omega \times I_2 + 40\Omega \times I_3 + 20\Omega \times I_4 = -20\text{V}$

~~网孔$l3$：~~ $\cancel{-20\Omega \times I_4 - 10\Omega \times I_5 - U = 0}$

适当的选取回路，使电流源支路只包含在一个回路中，如果不求电流源两端的电压时，包含电流源回路的KVL方程就可以 不列写了，这样便减少了方程的数目

基本要求：掌握回路电流的概念、回路电流法的原理和列写规则，并能熟练的应用回路电流法解决电路问题。

1 回路电流



回路电流的概念

1）概念：假设在每个独立回路中闭合流动的电流。

2）支路电流与回路电流的关系

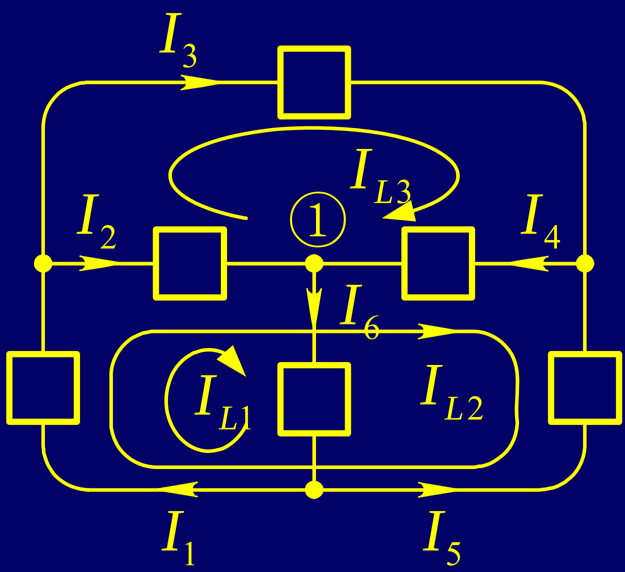
首先看哪条支路是回路所私有的，在数值上可以用支路电流代替回路电流

规定：若支路电流与回路电流方向相同时，回路电流前取正号，否则取负号

$$I_1 = I_{m1}, \quad I_3 = I_{m3}, \quad I_5 = -I_{m2}$$

如果一条支路被包含在多个回路中，则该支路电流等于相应的回路电流的代数和

$$I_2 = I_{m1} - I_{m3}, \quad I_4 = -I_{m2} + I_{m3}, \quad I_6 = I_{m1} - I_{m2}$$



回路电流的概念

$$I_3 = I_{L3}, \quad I_5 = -I_{L2}, \quad I_6 = I_{L1}$$

$$I_1 = I_{L1} + I_{L2}, \quad I_2 = I_{L1} + I_{L2} - I_{L3}, \quad I_4 = -I_{L2} + I_{L3},$$

3）回路电流的特点

可以证明：以回路电流作为待求量，可以自动地满足**KCL**方程，下面我们举例说明

节点 ① $\quad -I_2 - I_4 + I_6 = 0$

若用回路电流表示支路电流得：

$$-I_{L1} - I_{L2} + I_{L3} + I_{L2} - I_{L3} + I_{L1} = 0$$ 为等于零的恒等式

所以以回路电流作为待求量，无须列写**KCL**方程

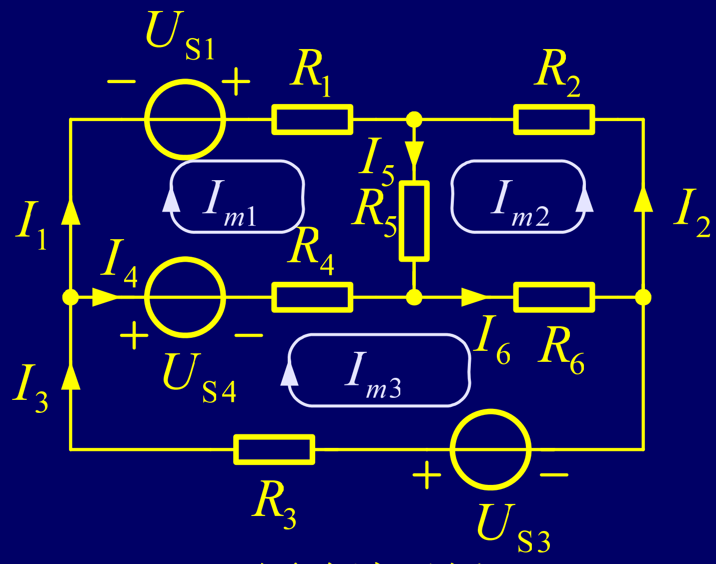
2 回路电流方程的列写

选择**b-(n-1)**个独立回路，以各回路电流为待求量列写**KVL**方程，这种分析方法称为回路电流法或回路分析法。

$$I_1 = I_{m1} \quad I_2 = I_{m2} \quad I_3 = I_{m3}$$

$$I_4 = -I_{m1} + I_{m3} \quad I_5 = I_{m1} + I_{m2}$$

$$I_6 = I_{m2} + I_{m3}$$



回路法示例

列写电路方程：

回路1： $R_1 I_1 + R_5 I_5 - R_4 I_4 = U_{S1} + U_{S4}$

回路2： $R_2 I_2 + R_5 I_5 + R_6 I_6 = 0$

回路3： $R_4 I_4 + R_6 I_6 + R_3 I_3 = U_{S3} - U_{S4}$

回路1: $R_1 I_{m1} + R_5(I_{m1} + I_{m2}) - R_4(-I_{m1} + I_{m3}) = U_{S1} + U_{S4}$

回路2: $R_2 I_{m2} + R_5(I_{m1} + I_{m2}) + R_6(I_{m2} + I_{m3}) = 0$

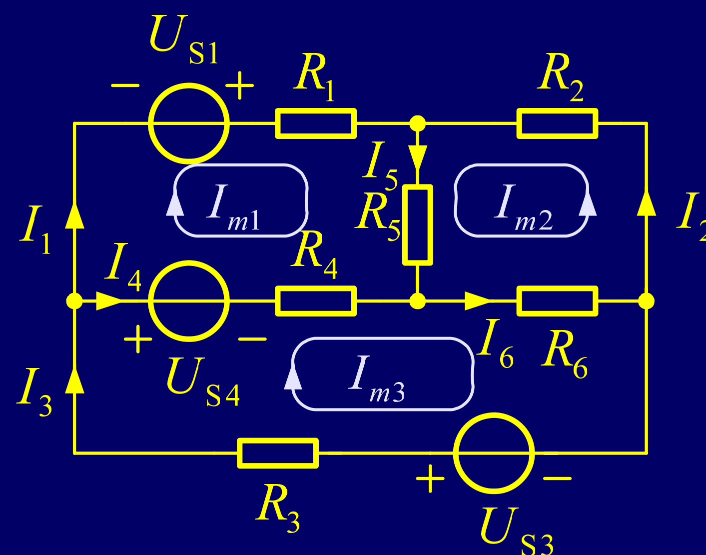
回路3: $R_4(-I_{m1} + I_{m3}) + R_6(I_{m2} + I_{m3}) + R_3 I_{m3} = U_{S3} - U_{S4}$

整理得

$$\left.\begin{array}{l} (R_1 + R_4 + R_5)I_{m1} + R_5 I_{m2} - R_4 I_{m3} = U_{S1} + U_{S4} \\ R_5 I_{m1} + (R_2 + R_5 + R_6)I_{m2} + R_6 I_{m3} = 0 \\ -R_4 I_{m1} + R_6 I_{m2} + (R_3 + R_4 + R_6)I_{m3} = U_{S3} - U_{S4} \end{array}\right\}$$

标准形式

$$\left.\begin{array}{l} R_{11} I_{m1} + R_{12} I_{m2} + R_{13} I_{m3} = \sum\limits_{\text{网孔1}} U_S \\ R_{21} I_{m1} + R_{22} I_{m2} + R_{23} I_{m3} = \sum\limits_{\text{网孔2}} U_S \\ R_{31} I_{m1} + R_{32} I_{m2} + R_{33} I_{m3} = \sum\limits_{\text{网孔3}} U_S \end{array}\right\}$$



回路法示例

列写回路电流方程的一般规则：

1 $R_{11}=R_1+R_4+R_5$，$R_{22}=R_2+R_5+R_6$，$R_{33}=R_3+R_4+R_6$

分别是组成回路1、2、3的各支路上电阻之和，称为回路的自阻。

2 $R_{12}=R_{21}=R_5$，$R_{13}=R_{31}=-R_4$，$R_{23}=R_{32}=R_6$

分别对应两个回路间公共支路上的电阻，称为相邻两回路之间的互阻。如果这两个回路电流在此公共支路上的方向相同，互阻为正；否则为负。

注：在只含独立电源和电阻的电路中，互阻$\boldsymbol{R_{ij}}=\boldsymbol{R_{ji}}$

3 $\sum\limits_{\text{回路1}} U_S = U_{S1}+U_{S4}$, $\sum\limits_{\text{回路2}} U_S = 0$, $\sum\limits_{\text{回路3}} U_S = U_{S3}-U_{S4}$

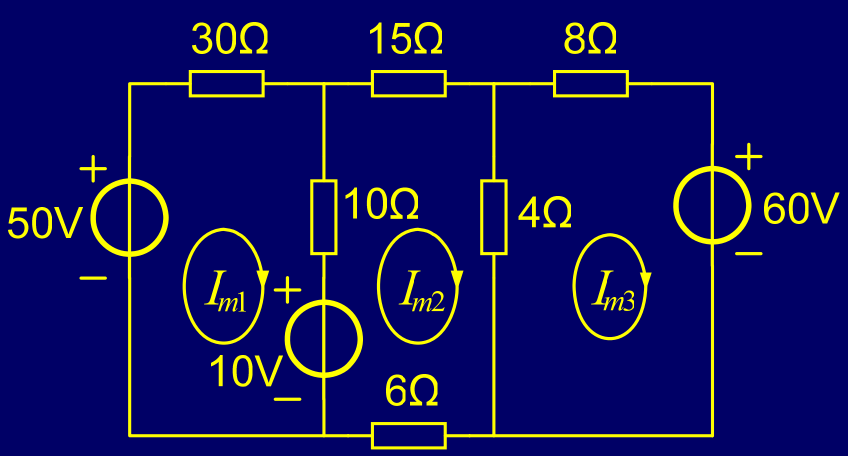
分别为沿回路1、2、3电压源电位升的代数和，沿回路电位升取正号，沿回路电位降取负号。

一般形式：

$$\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \cdots & R_{1m} \\ R_{21} & R_{22} & \cdots & R_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{m1} & R_{m2} & \cdots & R_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{m1} \\ I_{m2} \\ \vdots \\ I_{mm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum\limits_{\text{回路}1} U_S \\ \sum\limits_{\text{回路}2} U_S \\ \vdots \\ \sum\limits_{\text{回路}m} U_S \end{bmatrix}$$

回路电阻矩阵　　回路电流向量　　回路源电压向量

列图示电路的回路电流方程。



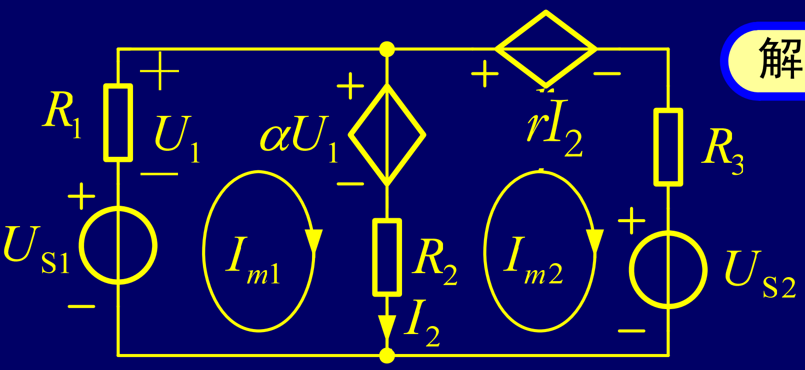
$$(30\Omega + 10\Omega) I_{m1} - 10\Omega I_{m2} = 50\text{V} - 10\text{V}$$

$$-10\Omega I_{m1} + (10\Omega + 15\Omega + 4\Omega + 6\Omega) I_{m2} - 4\Omega I_{m3} = 10\text{V}$$

$$-4\Omega I_{m2} + (4\Omega + 8\Omega) I_{m3} = -60\text{V}$$

例题 2.7

电路如图所示。试列出回路电流方程。



解 1）首先将受控源按独立电源处理

2）用回路电流来表示受控源的控制量

选网孔为独立回路，如图所示，列方程：

$$(R_1+R_2)I_{m1}-R_2I_{m2}=U_{S1}-\alpha U$$

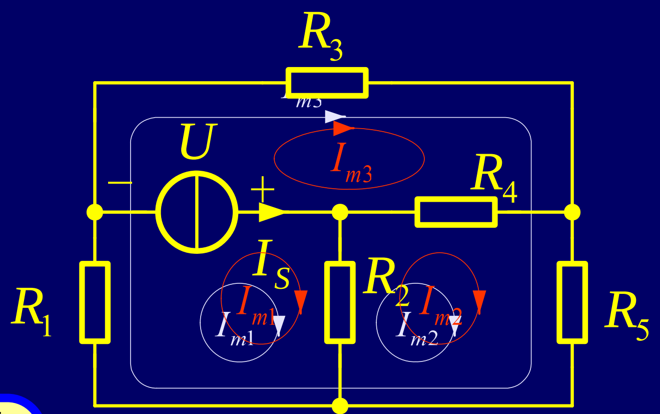
$$-R_2I_{m1}+(R_2+R_3)I_{m2}=-U_{S2}+\alpha U_1-rI_2$$

补充：
$$\left.\begin{aligned}U_1&=-R_1I_{m1}\\ I_2&=I_{m1}-I_{m2}\end{aligned}\right\}$$

对方程进行整理：
$$\left.\begin{aligned}&(R_1+R_2-\alpha R_1)I_{m1}-R_2I_{m2}=U_{S1}\\ &(-R_2+\alpha R_1+r)I_{m1}+(R_2+R_3-r)I_{m2}=-U_{S2}\end{aligned}\right\}$$

例题 2.8

列出图示含有电流源电路的回路电流方程。



能否利用电流源电流这个已知条件来减少方程数?

解

以网孔作为独立回路。

电流源的两端电压U是未知的，应将其直接列入回路电流方程:

$$\left.\begin{aligned}&(R_1+R_2)I_{m1}-R_2I_{m2}-U=0\\&-R_2I_{m1}+(R_2+R_4+R_5)I_{m2}-R_4I_{m3}=0\\&-R_4I_{m2}+(R_3+R_4)I_{m3}+U=0\end{aligned}\right\}$$

补充 $I_{m1}-I_{m3}=I_S$

适当选取独立回路使电流源只流过一个回路电流这样该回路电流 I_{m1} 便等于电流源 I_S。因此减少一个待求的回路电流。

$$(R_1+R_2)I_S-R_2I_{m2}+R_1I_{m3}-U=0$$

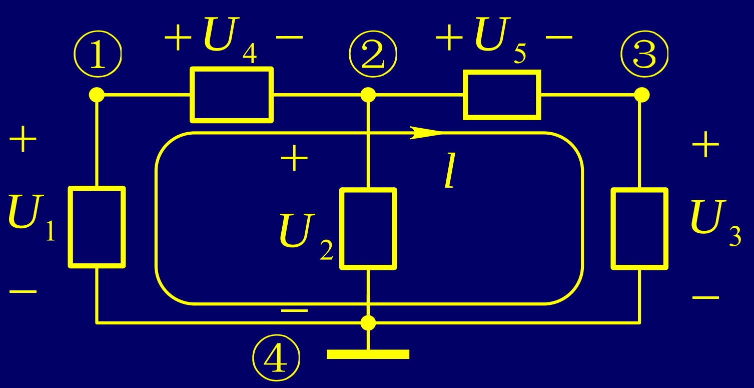
$$-R_2I_S+(R_2+R_4+R_5)I_{m2}+R_5I_{m3}=0$$

$$R_1I_S+R_5I_{m2}+(R_1+R_3+R_5)I_{m3}=0$$

注：在对含电流源的电路列回路电流方程时，应适当选取回路，使电流源中只流过一个回路电流，从而减少待求量个数。

基本要求：透彻理解节点电压的概念、熟练掌握节点电压法的原理和方程的列写规则。

1 节点电压：任选一点作为参考点，其它各点与参考点之间的电压称为该点的节点电压或节点电位。



节点电压举例

①，②，③的节点电压用

U_{n1} U_{n2} U_{n3}

1）节点电压具有单值性，与路径无关

2）任意两点之间的电压可表达成这两个节点电压之差。

$$U_4 = U_1 - U_2 = U_{n1} - U_{n2}$$

$$U_5 = U_2 - U_3 = U_{n2} - U_{n3}$$

3）当用节点电压表示支路电压时，支路电压一定满足KVL方程。

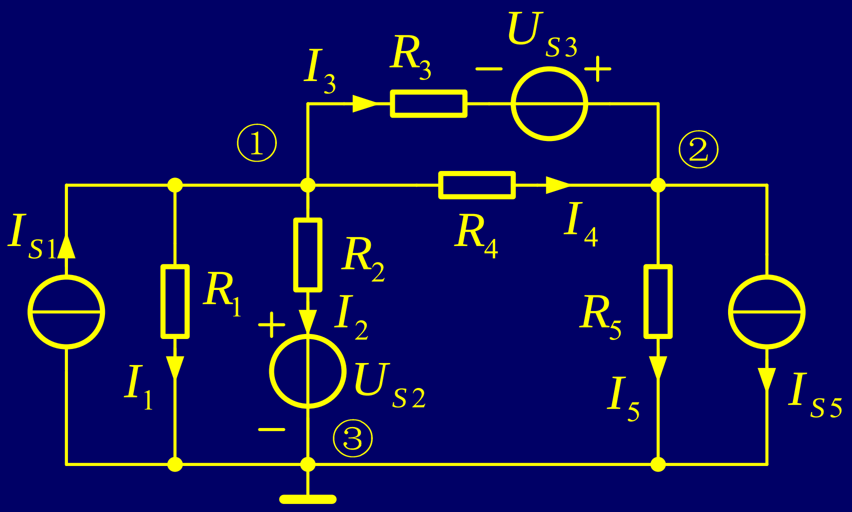
$$-U_1 + U_4 + U_5 + U_3 = 0$$

$$-U_{n1} + (U_{n1} - U_{n2}) + (U_{n2} - U_{n3}) + U_{n3} = 0$$

2 节点电压法：以n-1个节点电压为待求量，对n-1个节点列写KCL方程的方法 。

节点电压方程的列写规则：

1） 选取参考节点，对其他剩余节点列写KCL方程



节点电压法示例

以节点③为参考点，节点①、②的KCL方程为

$$\left.\begin{aligned} I_1 + I_2 + I_3 + I_4 &= I_{S1} \\ -I_3 - I_4 + I_5 &= -I_{S5} \end{aligned}\right\}$$

2） 用节点电压表示各个支路电流

$$\frac{U_{n1}}{R_1} + \frac{U_{n1} - U_{S2}}{R_2} + \frac{U_{n1} - U_{n2} + U_{S3}}{R_3} + \frac{U_{n1} - U_{n2}}{R_4} = I_{S1}$$

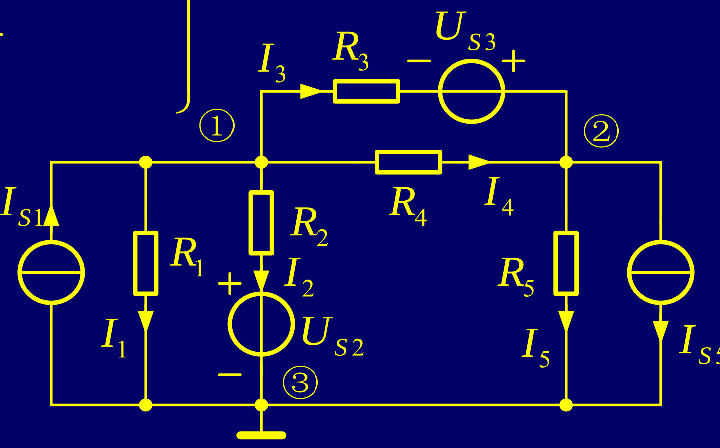
$$-\frac{U_{n1} - U_{n2} + U_{S3}}{R_3} - \frac{U_{n1} - U_{n2}}{R_4} + \frac{U_{n2}}{R_5} = -I_{S5}$$

进行整理

$$
\left.\begin{aligned}
&\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_4}\right)U_{n1}-\left(\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_4}\right)U_{n2}=I_{S1}+\frac{U_{S2}}{R_2}-\frac{U_{S3}}{R_3}\\
&-\left(\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_4}\right)U_{n1}+\left(\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_4}+\frac{1}{R_5}\right)U_{n2}=-I_{S5}+\frac{U_{S3}}{R_3}
\end{aligned}\right\}
$$

3 标准形式

$$
\left.\begin{aligned}
G_{11}U_{n1}+G_{12}U_{n2}&=\sum_{\text{节点1}} I_{Sk}+\sum_{\text{节点1}} G_k U_{Sk}\\
G_{21}U_{n1}+G_{22}U_{n2}&=\sum_{\text{节点2}} I_{Sk}+\sum_{\text{节点2}} G_k U_{Sk}
\end{aligned}\right\}
$$



节点电压法示例

推广之：

$$
\begin{bmatrix}
G_{11} & G_{12} & \cdots & G_{1(n-1)}\\
G_{21} & G_{22} & \cdots & G_{2(n-1)}\\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\
G_{(n-1)1} & G_{(n-1)2} & \cdots & G_{(n-1)(n-1)}
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
U_{n1}\\ U_{n2}\\ \vdots\\ U_{n(n-1)}
\end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix}
\sum_1 I_S+\sum_1 GU_S\\
\sum_2 I_S+\sum_2 GU_S\\
\vdots\\
\sum_{n-1} I_S+\sum_{n-1} GU_S
\end{bmatrix}
$$

节点电导矩阵

节点电压向量

节点源电流向量

规则小结：

1 $G_{11}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_4}, G_{22}=\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_4}+\frac{1}{R_5}$ 分别是与节点①、②直接相连的各支路电导之和，称为节点①、②的自导。

2 $G_{12}=-(\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_4}), G_{21}=-(\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_4})$ 是直接联接在节点①、②之间的诸支路电导之和并带一负号，称为节点①、②间的互导。

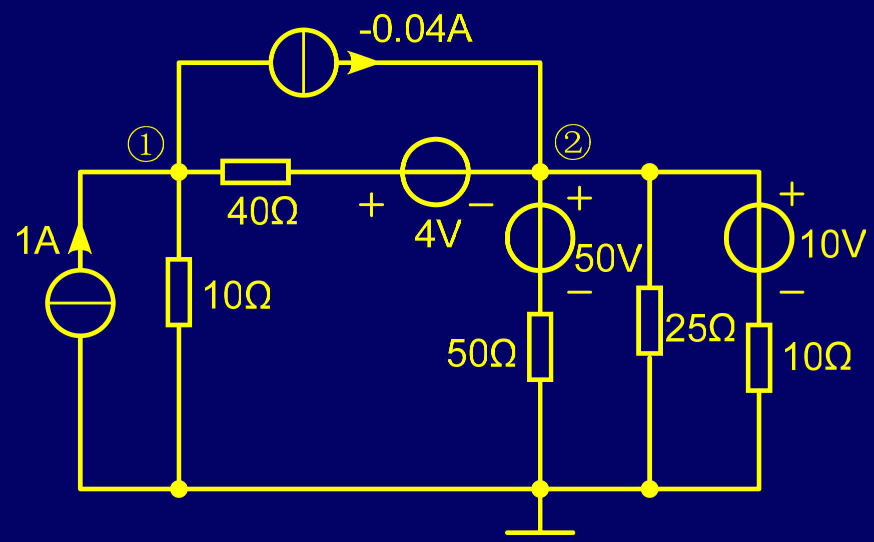
3 $\sum_{\text{节点1}} I_{Sk}, \sum_{\text{节点2}} I_{Sk}$ 表示与节点①、②相连的电流源电流代数和，当电流流入节点时取“＋”号；否则取“－”号；

4 $\sum_{\text{节点1}} G_k U_{Sk}, \sum_{\text{节点2}} G_k U_{Sk}$ 分别是与节点①、②相连的电压源与串联电导乘积的代数和，当电压源正极性端指向节点时，取“＋”号；否则取“－”号。

3、4分别称为节点①、②的注入电流或节点源电流。

[补充2.4]

求图示电路的节点电压法



[解]

选定参考点，给其余节点编号，按一般规则列节点电压法方程

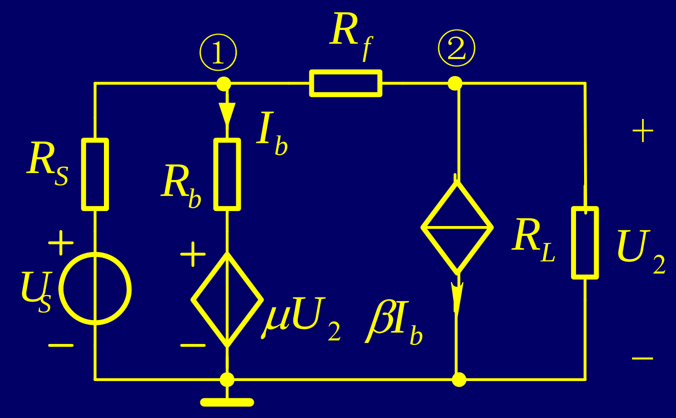
$$\left(\frac{1}{10\Omega}+\frac{1}{40\Omega}\right)U_{n1}-\frac{1}{40\Omega}U_{n2}=1\text{A}+0.4\text{A}+\frac{4\text{V}}{40\Omega}$$

$$-\frac{1}{40\Omega}U_{n1}+\left(\frac{1}{40\Omega}+\frac{1}{50\Omega}+\frac{1}{25\Omega}+\frac{1}{10\Omega}\right)U_{n2}=-0.4\text{A}-\frac{4\text{V}}{40\Omega}+\frac{50\text{V}}{50\Omega}+\frac{10\text{V}}{10\Omega}$$

$$\begin{cases}0.125S\times U_{n1}-0.025S\times U_{n2}=1.5\text{A}\\-0.025\text{S}\times U_{n1}+0.185S\times U_{n2}=1.5\text{A}\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}U_{n1}=14\text{V}\\U_{n2}=10\text{V}\end{cases}$$

例题 2.9

列出图示电路的节点电压方程。



解

分析：此电路特殊之处在于含受控源，列节点电压方程时，仍将受控源按独立源处理。

1 对节点①、②列出节点电压方程

$$\left(\frac{1}{R_S}+\frac{1}{R_b}+\frac{1}{R_f}\right)U_{n1}-\frac{1}{R_f}U_{n2}=\frac{U_S}{R_S}+\frac{\mu U_2}{R_b}$$

$$-\frac{1}{R_f}U_{n1}+\left(\frac{1}{R_f}+\frac{1}{R_L}\right)U_{n2}=-\beta I_b$$

2 把受控电源的控制量用节点电压来表示

$$U_2=U_{n2},\quad I_b=\frac{U_{n1}-\mu U_2}{R_b}$$

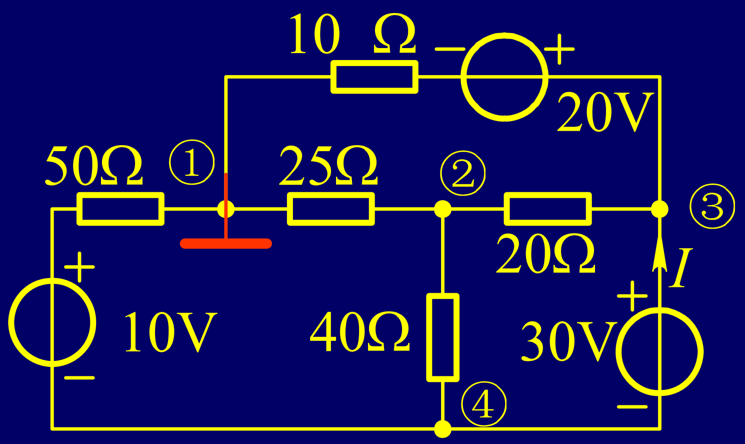
3 对方程进行整理：

$$\left.\begin{aligned}&\left(\frac{1}{R_S}+\frac{1}{R_b}+\frac{1}{R_f}\right)U_{n1}-\left(\frac{1}{R_f}+\frac{\mu}{R_b}\right)U_{n2}=\frac{U_S}{R_S}\\&-\left(\frac{1}{R_f}+\frac{\beta}{R_b}\right)U_{n1}+\left(\frac{1}{R_f}+\frac{1}{R_L}-\frac{\beta\mu}{R_L}\right)U_{n2}=0\end{aligned}\right\}$$

注：受控源要影响节点电压方程的系数，一般不再具有对称性。

例题 2.10

列出图示电路对应不同参考点的节点电压方程，并计算25 Ω 电阻消耗的功率。



解

分析：图中存在一个仅含电压源的支路，即纯电压源支路。该支路电阻为零，电压源的电流不能表达成其端电压的函数。

解决方法：将未知电流 *I* 设为变量列入KCL方程中。

节点②：$$\left(\frac{1}{25\Omega}+\frac{1}{20\Omega}+\frac{1}{40\Omega}\right)U_{n2}-\frac{1}{20\Omega}U_{n3}-\frac{1}{40\Omega}U_{n4}=0$$

节点③：$$-\frac{1}{20\Omega}U_{n2}+\left(\frac{1}{10\Omega}+\frac{1}{20\Omega}\right)U_{n3}-I=\frac{20\text{V}}{10\Omega}$$

节点④：$$-\frac{1}{40\Omega}U_{n2}+\left(\frac{1}{40\Omega}+\frac{1}{50\Omega}\right)U_{n4}+I=\frac{10\text{V}}{50\Omega}$$

需根据电压源特性列补充方程 $U_{n3}-U_{n4}=30\text{V}$

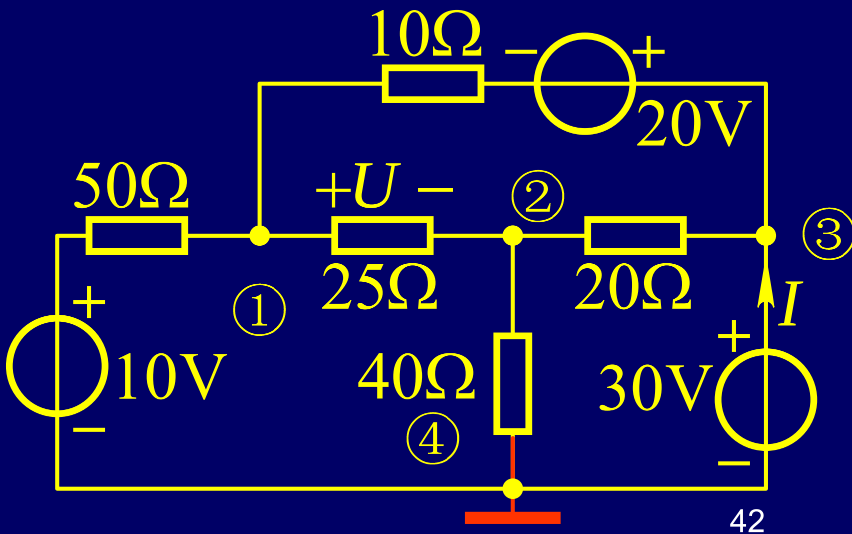
$$U_{n1}=0.625\text{V} \quad U_{n2}=1.25\text{V} \quad U_{n3}=0.25\text{V} \quad I_1=0.5\text{A}$$

要点：1）将电压源支路的电流设为变量列入方程

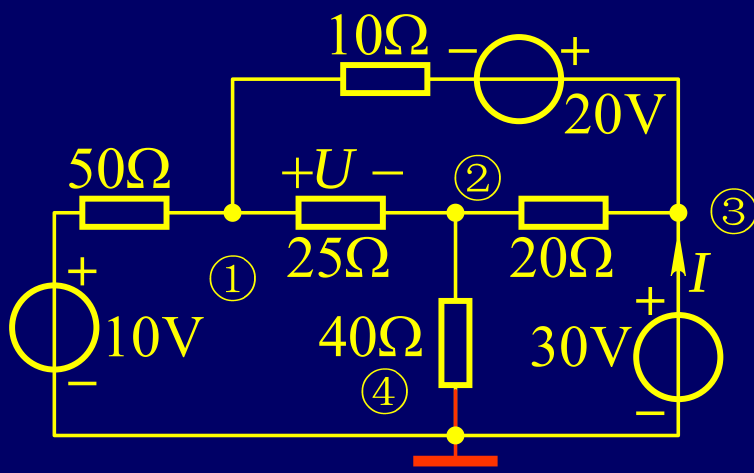
2）补充电压源两端节点电压之差等于电压源的源电压

说明：若电路中存在非二端电阻元件(如存在纯电压源支路)，则这种支路的电流不能用支路电导与相关节点电压之积来表示。为解决这类问题，须对节点电压法进行修正，建立所谓的改进节点电压法 。

若选择电压源的一端为参考点，则另一端的节点电压便是已知量，问题可以得到简化。



左图以节点④为参考点，则节点③的电压为**30V**，为已知量



$$(\frac{1}{50\Omega}+\frac{1}{25\Omega}+\frac{1}{10\Omega})U_{n1}-\frac{1}{25\Omega}U_{n2}-\frac{1}{10\Omega}\times 30\text{V}=\frac{10\text{V}}{50\Omega}-\frac{20\text{V}}{10\Omega}$$

$$-\frac{1}{25\Omega}U_{n1}+(\frac{1}{25\Omega}+\frac{1}{40\Omega}+\frac{1}{20\Omega})U_{n2}-\frac{1}{20\Omega}\times 30\text{V}=0$$

$$\cancel{-\frac{1}{10\Omega}U_{n1}-\frac{1}{20\Omega}U_{n2}+(\frac{1}{10\Omega}+\frac{1}{20\Omega})U_{n3}-I=\frac{20\text{V}}{10\Omega}}$$

$$\begin{cases} 0.16U_{n1}-0.04U_{n2}=1.2\text{V} \\ -0.04U_{n1}+0.115U_{n2}=1.5\text{V} \end{cases}$$

解得 $U_{n1}\approx 11.79\text{V}$ $U_{n2}\approx 17.14\text{V}$

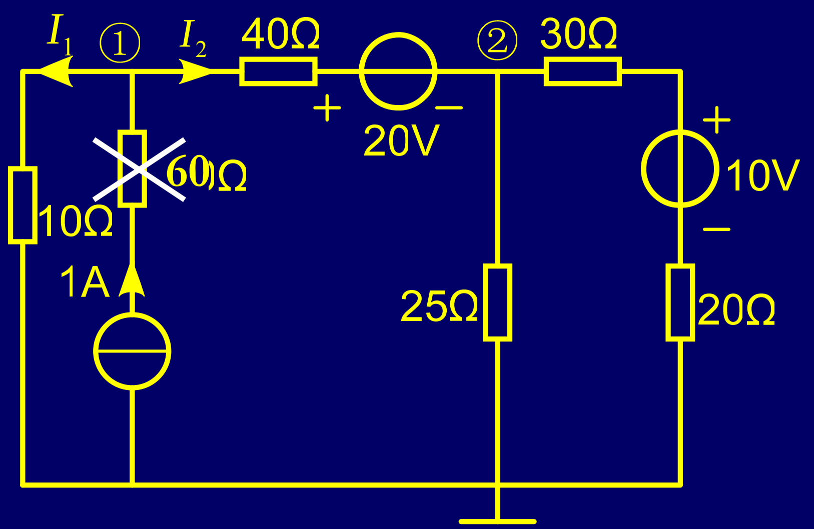
25 Ω 电阻两端电压及消耗功率分别为

$$U=U_{n1}-U_{n2}\approx 11.79\text{V}-17.14\text{V}=-5.35\text{V}$$

$$P=\frac{U^2}{25\Omega}\approx 1.14\text{W}$$

[补充2.5] 求节点电压及电流源发出的功率

[解]



$$I_1 + I_2 = 1\text{A}$$

$$\frac{U_{n1}}{10\Omega} + \frac{U_{n1} - U_{n2} - 20\text{V}}{40\Omega} = 1\text{A}$$

$$(\frac{1}{10\Omega} + \frac{1}{40\Omega})U_{n1} - \frac{1}{40\Omega}U_{n2} = 1\text{A} + \frac{20\text{V}}{40\Omega}$$

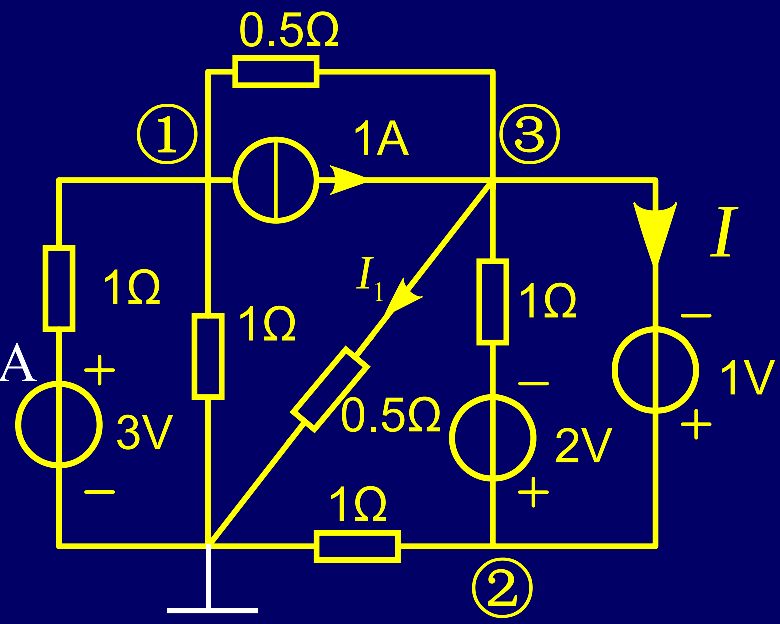
$$(\frac{1}{10\Omega} + \frac{1}{40\Omega} + \cancel{\frac{1}{60\Omega}})U_{n1} - \frac{1}{40\Omega}U_{n2} = 1\text{A} + \frac{20\text{V}}{40\Omega}$$

$$-\frac{1}{40\Omega}U_{n1} + (\frac{1}{40\Omega} + \frac{1}{25\Omega} + \frac{1}{50\Omega})U_{n2} = \frac{50\text{V}}{50\Omega} - \frac{20\text{V}}{40\Omega}$$

$$\begin{cases} 0.125S \times U_{n1} - 0.025S \times U_{n2} = 1.5\text{A} \\ -0.025\text{S} \times U_{n1} + 0.085S \times U_{n2} = 0.5\text{A} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} U_{n1} = 14\text{V} \\ U_{n2} = 10\text{V} \end{cases}$$

$$U = U_{n1} + 20\Omega \times 1\text{A} = 14\text{V} + 20\text{V} = 34\text{V} \Rightarrow P = U \times 1\text{A} = 34\text{W}$$

[补充2.6] 用节点电压法求I_1



[解]

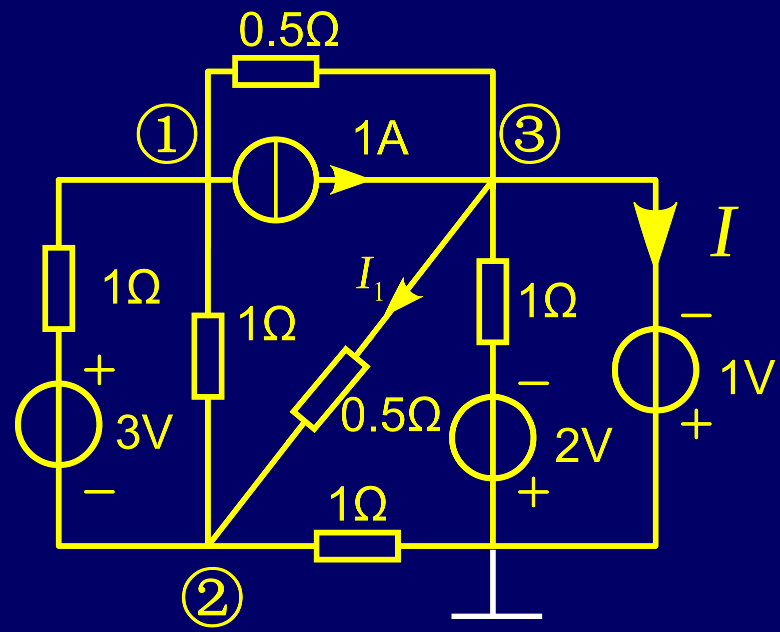
①：$$\left(\frac{1}{1\Omega}+\frac{1}{1\Omega}+\frac{1}{0.5\Omega}\right)U_{n1}-\frac{1}{0.5\Omega}U_{n3}=\frac{3\text{V}}{1\Omega}-1\text{A}$$

②：$$\left(\frac{1}{1\Omega}+\frac{1}{1\Omega}\right)U_{n2}-\frac{1}{1\Omega}U_{n3}=\frac{2\text{V}}{1\Omega}+I$$

③：$$-\frac{1}{0.5\Omega}U_{n1}-\frac{1}{1\Omega}U_{n2}+\left(\frac{1}{0.5\Omega}+\frac{1}{0.5\Omega}+\frac{1}{1\Omega}\right)U_{n3}=1\text{A}-\frac{2\text{V}}{1\Omega}-I$$

补充 $$U_{n2}-U_{n3}=1\text{V}$$

$$U_{n1}=0.625\text{V},U_{n2}=1.25\text{V},U_{n3}=0.25\text{V},I_1=0.5\text{A}$$



重新编号

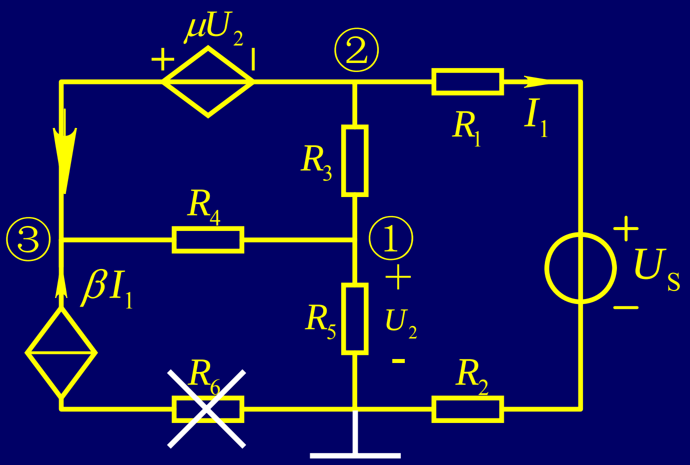
①: $$\left(\frac{1}{1\Omega}+\frac{1}{1\Omega}+\frac{1}{0.5\Omega}\right)U_{n1}-\left(\frac{1}{1\Omega}+\frac{1}{1\Omega}\right)U_{n2}-\frac{1}{0.5\Omega}(-1\mathrm{V})=\frac{3\mathrm{V}}{1\Omega}-1\mathrm{A}$$

②: $$-\left(\frac{1}{1\Omega}+\frac{1}{1\Omega}\right)U_{n1}+\left(\frac{1}{1\Omega}+\frac{1}{1\Omega}+\frac{1}{1\Omega}+\frac{1}{0.5\Omega}\right)U_{n2}-\frac{1}{0.5\Omega}(-1\mathrm{V})=\frac{-3\mathrm{V}}{1\Omega}$$

$$U_{n1}=-0.625\mathrm{V},U_{n2}=-1.25\mathrm{V},I_1=0.5\mathrm{A}$$

参考节点改变之后的各节点电压与原来基准下的相应的节点电压间只差了一个新旧节点之间的电压值

[补充2.7] 列写图示电路的节点电压法方程



[解]

① $$\left(\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_4}+\frac{1}{R_5}\right)U_{n1}-\frac{1}{R_3}U_{n2}-\frac{1}{R_4}U_{n3}=0$$

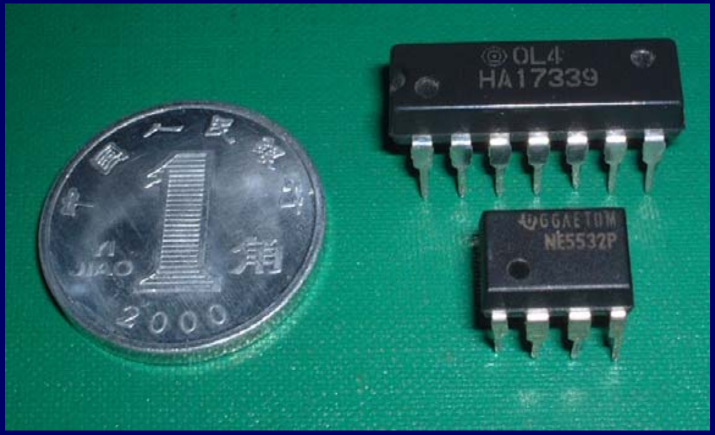
② $$-\frac{1}{R_3}U_{n1}-\left(\frac{1}{R_1+R_2}\right)U_{n2}=-I+\frac{U_S}{R_1+R_2}$$

③ $$-\frac{1}{R_4}U_{n1}+\frac{1}{R_4}U_{n3}=I+\beta I_1$$

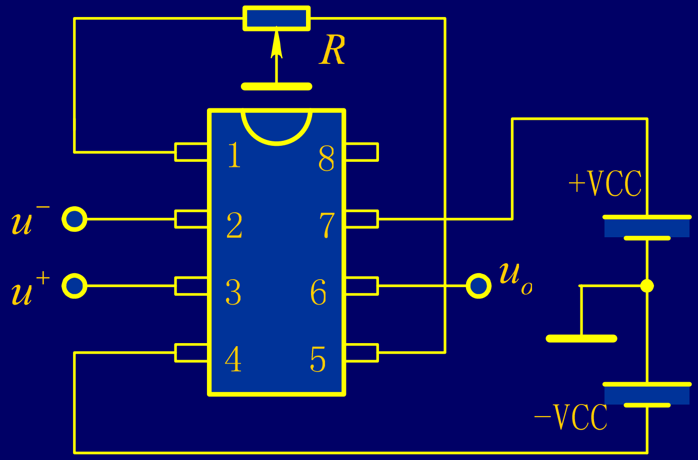
补充 $$\begin{cases} U_{n3}-U_{n2}=\mu U_2 \\ I_1=\dfrac{U_{n2}-U_S}{R_1+R_2} \\ U_2=\mu U_{n1} \end{cases}$$

基本要求：掌握实际运算放大器和理想运算放大器的特性。

运算放大器简称运放是一种用集成电路工艺制成的多端元件。



运算放大器NE5532P和HA17339的封装图



NE5532P的外部接线图

运放管脚功能介绍

Pin1,Pin5: 调零端。 **Pin2:** 反相输入端。
Pin3: 同相输入端。 **Pin4:** 负电源接入端。
Pin6: 电压输出端。 **Pin7:** 正电源接入端。
Pin8: 未用。

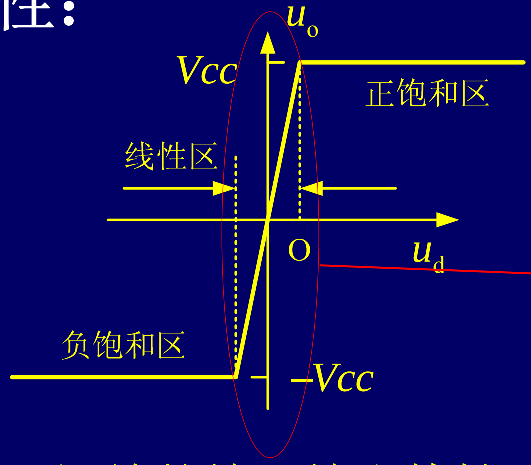
实际运放的输入输出特性：

$$u_d = u^+ - u^-$$

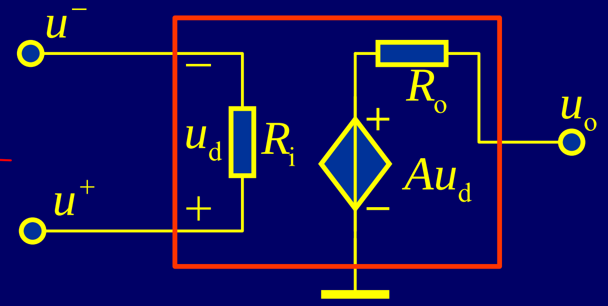
$$A = \frac{u_o}{u_d}$$

开环增益

开环电压放大倍数



运放的输入输出特性



工作在线性区时运放的电路模型

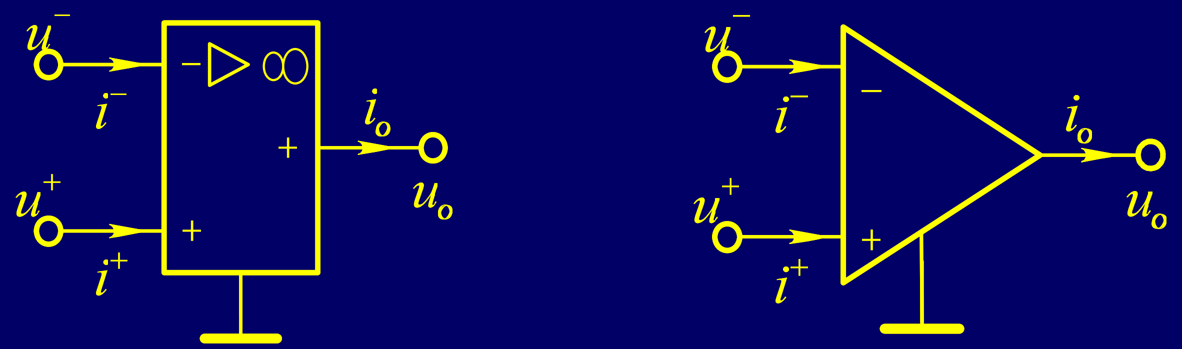
运算放大器电路模型中参数的典型取值范围

参数名称、符号	典型值	理想值
开环电压增益 A	10^5 到 10^8	∞
输入电阻 R_i	$10^6\Omega$ 到 $10^{13}\Omega$	∞
输出电阻 R_o	10Ω 到 100Ω	0
工作电压 Vcc	5V 到 24V	

注：运放的开环增益非常大，一个微小的输入电压就足以使运放工作到饱和区。因此，为使运放工作在线性区，必须引入负反馈。

理想运放的模型及特性

理想化条件：无穷大的开环增益、无穷大的输入电阻和零输出电阻。



理想运放的电路符号 (a)国标符号；(b)国际通用符号

理想运放的端口特性：

1 因为输入电阻为无穷大，所以输入电流

$$i^- = i^+ = \frac{u_d}{R_i} = 0 \quad \text{即} \quad i^- = 0,\quad i^+ = 0$$

电流为零，相当于开路，所以此性质称为虚断。

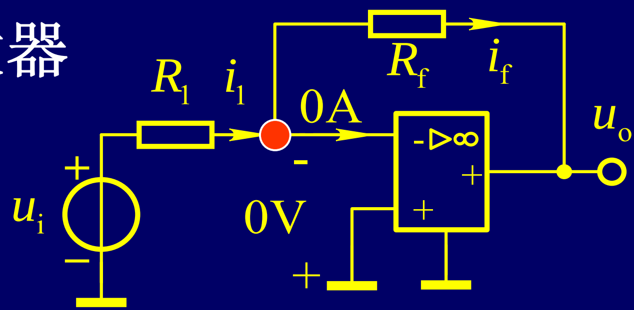
2 因为开环增益为无穷大，所以输入电压

$$u_d = u^+ - u^- = \frac{u_o}{A} = 0 \quad \text{即} \quad u^+ = u^-$$

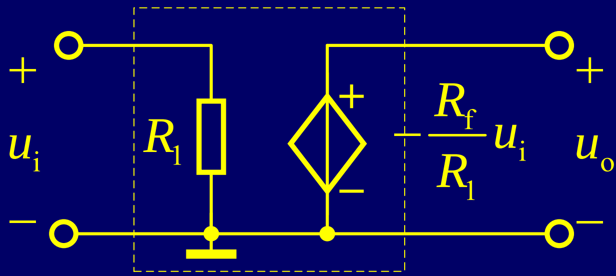
电压相等，相当于短路，所以此性质称为虚短。

基本要求：结合反相同相放大器、加法器和差动放大器，掌握含理想运算放大器电路的分析方法。

1 反相放大器



反相放大器图



反相放大器的等效电路

根据输入端口电流为零的特性 ⟹ $i_1 = i_f$

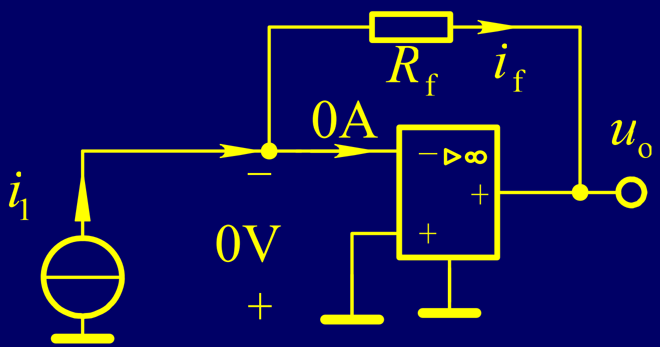
根据输入端口电压为零的特性 ⟹ $i_1 = \dfrac{u_i - 0}{R_1}$ $\quad i_f = \dfrac{0 - u_o}{R_f}$

得输入、输出电压关系 $u_o = -\dfrac{R_f}{R_i} u_i$

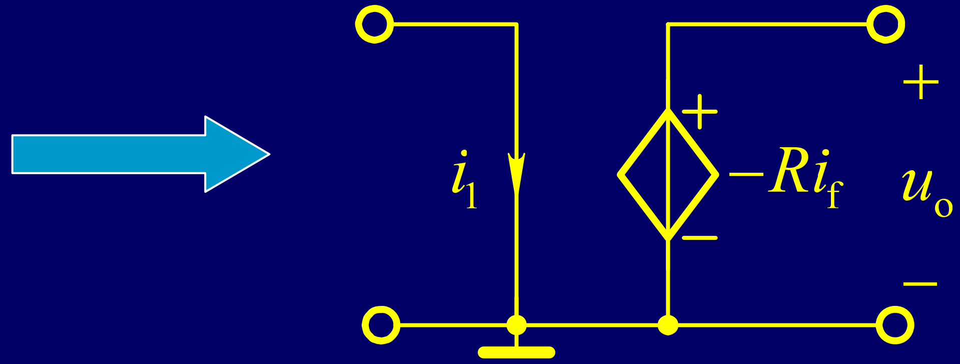
注：输出电压与输入电压成正比，极性相反，因此称为反相放大器。

当 $R_1 = R_f$ 时，$u_o = -u_i$ 电路被称为反向器

用反相放大器实现电流控制电压源

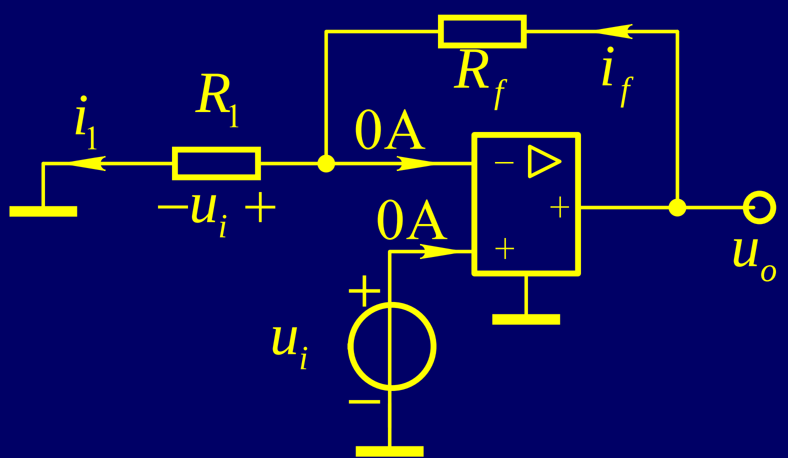


用理想运放实现CCVS



$$u_o = -R_f i_f = -R_f i_1$$

2 同相放大器　输入电压加在运放的同相输入端，而在反相输入端引入负反馈



同相放大器

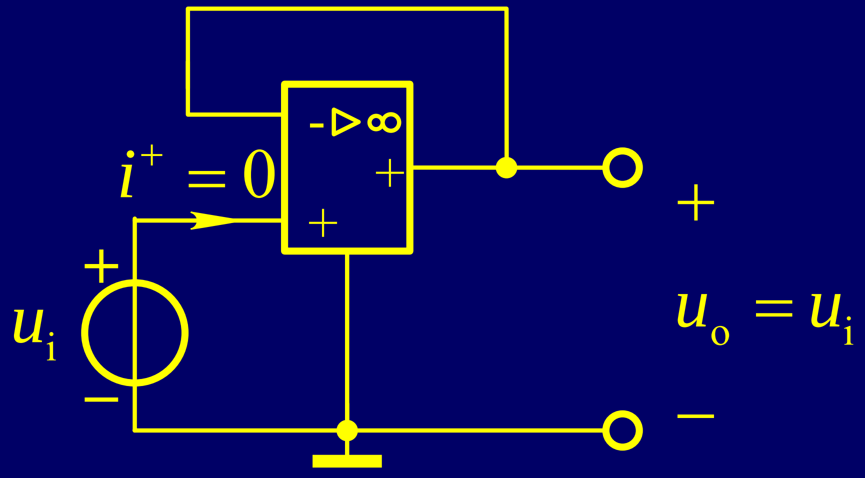
根据虚短和KVL $u_{\mathrm{o}} = R_{\mathrm{f}} i_{\mathrm{f}} + u_{\mathrm{i}}$ $i_1 = u_{\mathrm{i}} / R_1$

根据虚断 $i_{\mathrm{f}} = i_1$

获得输出电压与输入电压的关系 $u_{\mathrm{o}} = (1 + \dfrac{R_{\mathrm{f}}}{R_1}) u_{\mathrm{i}}$

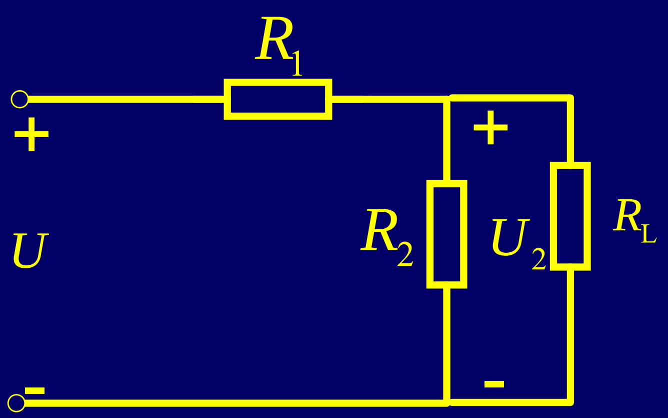
注：同相放大器是增益大于1的电压控制电压源,输出电压与输入电压极性相同 。

若令R_{f}=0，R_1=∞ ，此时电路变为电压跟随器。在电路中起隔离作用



电压跟随器

如：

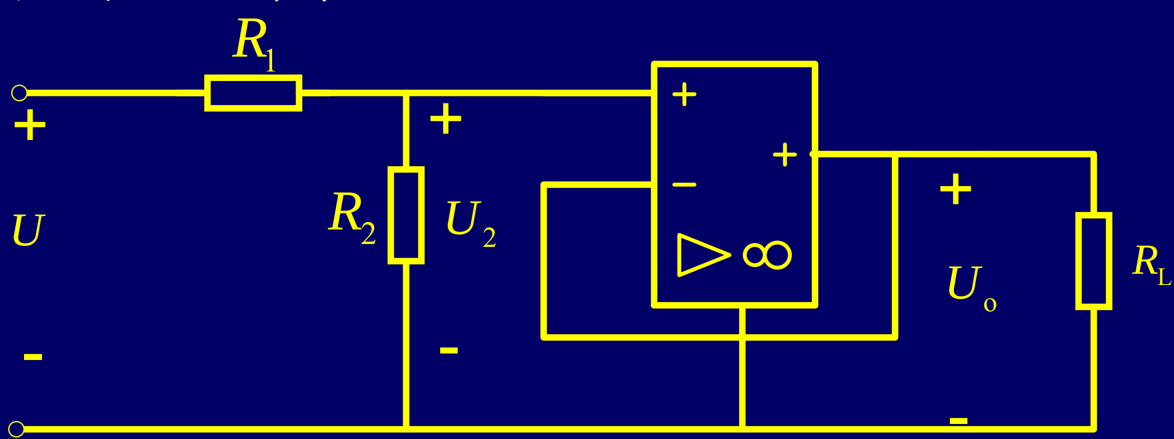


图中由R_1和R_2构成的分压电路中，开路电压

$$U_{oc}=\frac{R_2}{R_1+R_2}U_1$$

接负载电阻R_L后 $U_2<U_{oc}$

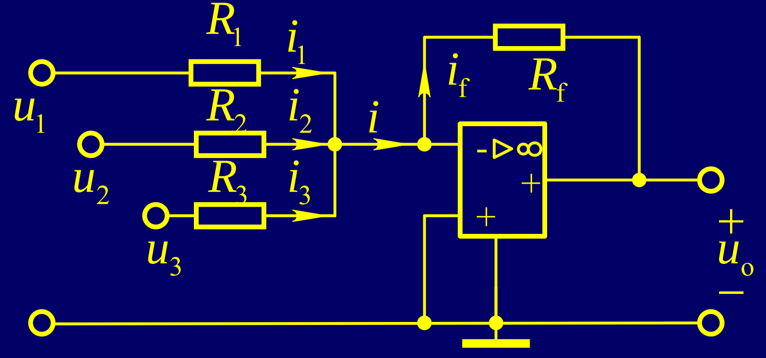
如果通过电压跟随器接入负载电阻R_L，由于运算放大器输入电阻趋于∞，则



$$U_2=U_{oc}=\frac{R_2}{R_1+R_2}U_1$$

即负载电阻的作用被隔离了，因此，电压跟随器在实际电路中起隔离作用

3 加法器



三输入加法器

根据虚短特性 $i_1 = \dfrac{u_1}{R_1},\quad i_2 = \dfrac{u_2}{R_2},\quad i_3 = \dfrac{u_3}{R_3}$

根据虚断特性和**KCL** $i_f = i = i_1 + i_2 + i_3$

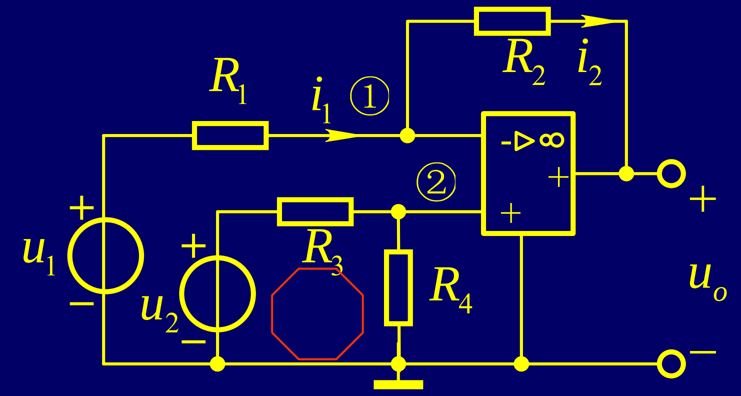
根据欧姆定律和**KVL**求得输出电压和输入电压的关系

$$u_o = -R_f i_f = -\frac{R_f}{R_1}u_1 - \frac{R_f}{R_2}u_2 - \frac{R_f}{R_3}u_3 = k_1u_1 + k_2u_2 + k_3u_3$$

若 $R_1 = R_2 = R_3 = R_f$ 则 $u_o = -u_1 - u_2 - u_3$

4 差动放大器

根据虚短和虚断的性质，利用分压公式，求得节点①、②电压



差动放大器电路

$$u_{n1}=u_{n2}=\frac{R_4}{R_3+R_4}u_2$$

进一步求得电流 $\boldsymbol{i_1}$ 和 $\boldsymbol{i_2}$

$$i_2=i_1=\frac{u_1-u_{n1}}{R_1}=\frac{u_1-u_{n2}}{R_1}$$

应用KVL求得输出电压与输入电压的关系

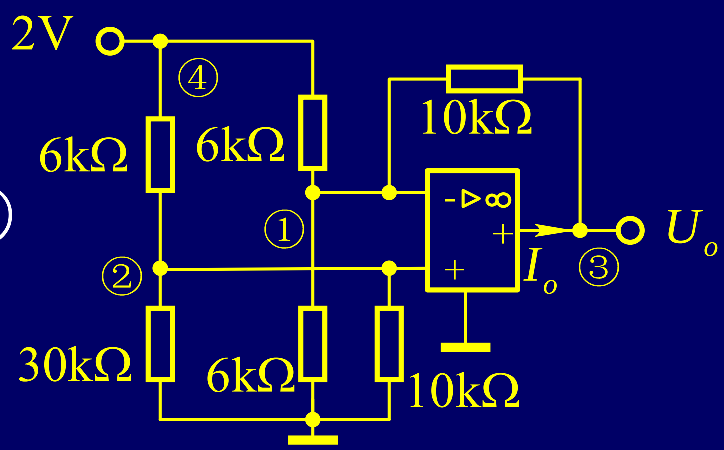
$$u_o=-R_2 i_2+u_{n2}=\frac{R_2}{R_1}\frac{(1+R_1/R_2)}{(1+R_3/R_4)}u_2-\frac{R_2}{R_1}u_1$$

特别的： $\dfrac{R_2}{R_1}=\dfrac{R_4}{R_3}=A$

输出电压与两输入电压之差成正比 $u_o=A(u_2-u_1)$

例题 2.11

求出图示电路的输出电压 U_0



解

图示电路共有4个独立节点，其中节点④的电压为2V。可对节点①、②、③列节点方程：

$$\left(\frac{1}{6\text{k}\Omega}+\frac{1}{6\text{k}\Omega}+\frac{1}{10\text{k}\Omega}\right)U_{n1}-\frac{1}{10\text{k}\Omega}U_{n3}=\frac{2\text{V}}{6\text{k}\Omega}$$

$$\left(\frac{1}{6\text{k}\Omega}+\frac{1}{30\text{k}\Omega}+\frac{1}{10\text{k}\Omega}\right)U_{n2}=\frac{2\text{V}}{6\text{k}\Omega}$$

$$\boxed{-\frac{1}{10\text{k}\Omega}U_{n1}+\frac{1}{10\text{k}\Omega}U_{n3}-\boxed{I_o}=0}$$

如不求此输出电流，则无须对输出节点列KCL方程

补充理想运算放大器输入端口电压方程

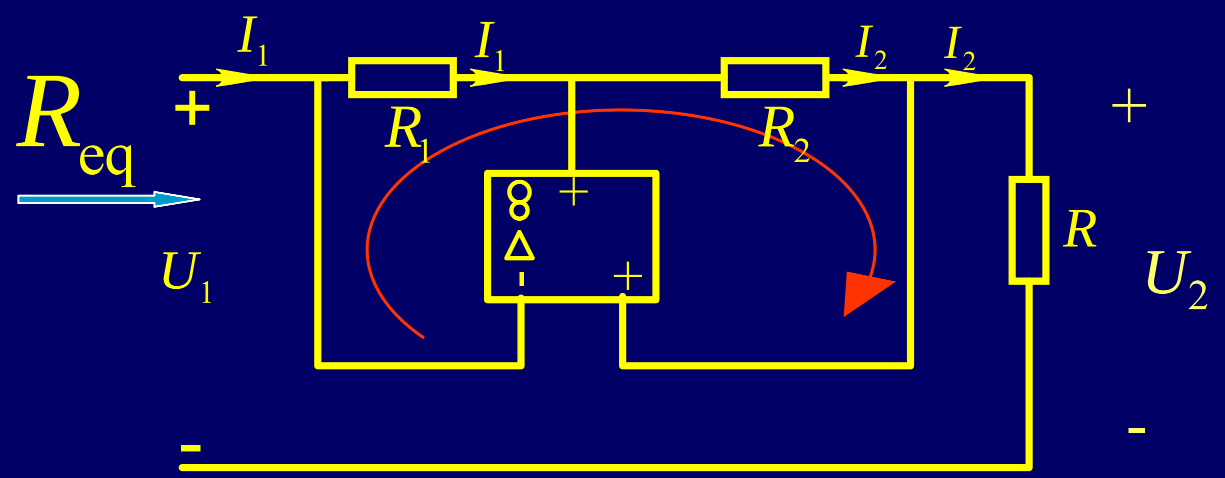
$$U_{n1}=U_{n2}$$

解得：

$$U_{n1}=U_{n2}=(10/9)\text{V}$$

$$U_{n3}=(40/27)\text{V}$$

[补充2.8]　负电阻变换器

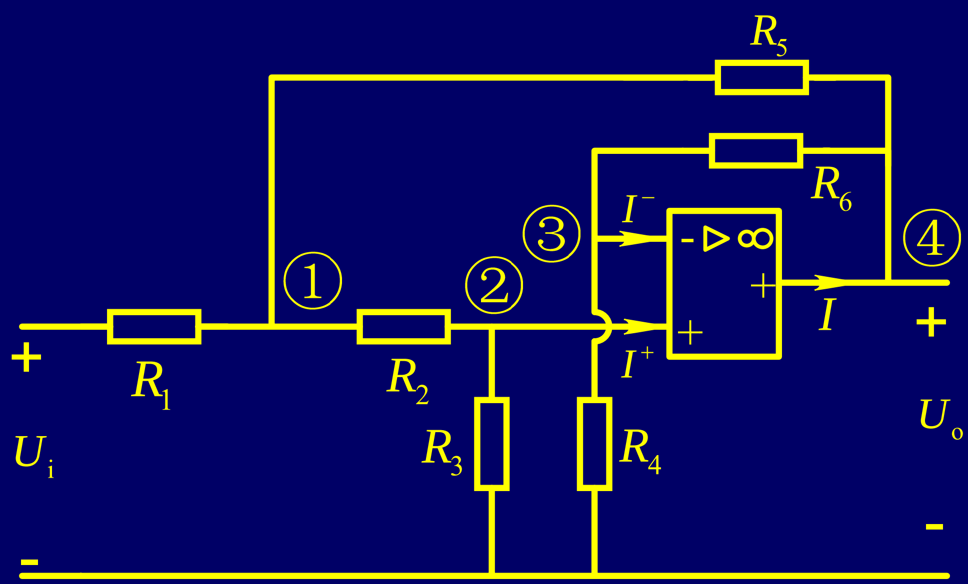


[解] 根据KVL方程

$$\begin{cases} I_1R_1 + I_2R_2 = 0 \\ U_1 = U_2 \end{cases}$$

$$R_{eq} = \frac{U_1}{I_1} = U_1 \Big/ \left(-R_2/R_1\right) I_2 = -\frac{R_1}{R_2} \times \frac{U_1}{I_2} = -\frac{R_1}{R_2} \times \frac{U_2}{I_2} = -\frac{R_1}{R_2} R$$

[补充2.9]　列节点电压方程



[解]

$$
\begin{cases}
\left(\dfrac{1}{R_1}+\dfrac{1}{R_2}+\dfrac{1}{R_5}\right)U_{n1}-\dfrac{1}{R_2}U_{n2}-\dfrac{1}{R_5}U_{n4}=\dfrac{U_i}{R_1} \\[2ex]
-\dfrac{1}{R_2}U_{n1}+\left(\dfrac{1}{R_2}+\dfrac{1}{R_3}\right)U_{n2}=0 \\[2ex]
\left(\dfrac{1}{R_4}+\dfrac{1}{R_6}\right)U_{n3}-\dfrac{1}{R_6}U_{n4}=0 \\[2ex]
-\dfrac{1}{R_5}U_{n1}-\dfrac{1}{R_6}U_{n3}+\left(\dfrac{1}{R_5}+\dfrac{1}{R_6}\right)U_{n4}=I
\end{cases}
$$

补充：　$U_{n2}=U_{n3}$

本章小节

1 电阻串联时总电阻等于各串联电阻之和，电阻串联常用于分压。

2 电阻并联时总电导等于各并联电导之和，电阻并联用于分流。

3 星形联接的电阻网络可以等效成三角形联接的电阻网络，反之亦然。星形联接比三角形联接多一个节点但少一个回路。

4 电压源与电阻串联支路可以等效变换成电流源与电阻并联支路，反之亦然。

5 支路电流法是以b条支路的支路电流为待求量，对n-1个节点列KCL方程、对b-(n-1)个独立回路列KVL方程。即沿回路各电阻电位降的代数和等于电源电位升的代数和。

6 回路电流法是在**b-(n-1)**个独立回路中假设回路电流，并以其为待求量，按自阻、互阻、回路源电压等规则列写各独立回路的**KVL**方程。

7 根据集中参数电路中电压与计算路径无关的性质，定义节点电压，即任一节点与参考点之间的电压，参考点的节点电 压为零。

8 节点电压法是以**n-1**个节点电压为待求量，按自导、互导、节点源电流等规则列写**n-1**个节点的**KCL**方程。

9 列写含受控源电路的方程时，首先将受控源按独立源来处理，然后再用待求量表示受控源的控制量，从而消去方程中的控制量。

10运算放大器是一种高放大倍数、高输入电阻和低输出电阻的电压放大器，常用理想运算放大器作为其模型。理想运放的端口特性是虚断和虚短。

11 使用理想运算放大器的端口特性可以简化含运算放大器电路的分析。当电路复杂时，节点电压法是分析含运算放大器电路的有效方法。