兴趣 认真 执著 创新

《电子线路分析与设计》

第六讲：大网络分析基础

& 网络定理

胡薇薇

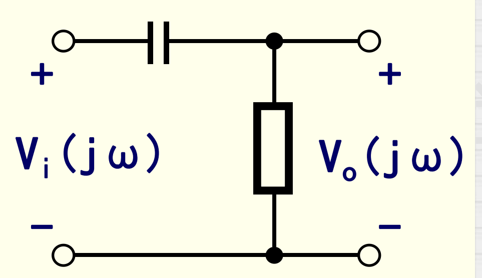
2023. 9. 27

北京大学

---

5. 一阶滤波器（一个动态元件）

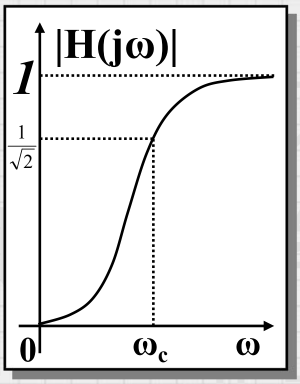
复习

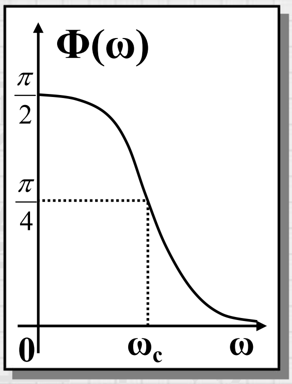


$$H(j\omega)=\frac{R}{R+1/j\omega C}=\frac{j\omega RC}{1+j\omega RC}$$

$$\begin{cases}|H(j\omega)|=\dfrac{1}{\sqrt{1+(\omega RC)^{-2}}}\\ |\Phi(\omega)|=\dfrac{\pi}{2}-\arctan(\omega RC)\end{cases}$$

- $\omega\to\infty$ $\quad |H(j\omega)|\to 1 \quad \Phi(\omega)\to 0$
- $\omega c=1/RC$ $\quad |H(j\omega)|=\dfrac{1}{\sqrt{2}} \quad \Phi(\omega)=\dfrac{\pi}{4}$
- $\omega=0$ $\quad |H(j\omega)|=0 \quad \Phi(\omega)=\dfrac{\pi}{2}$



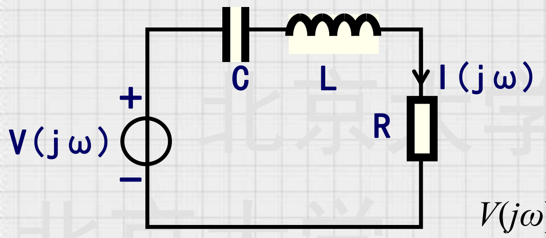


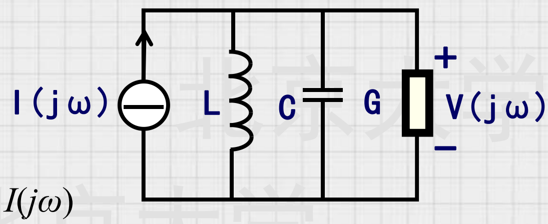
用传递函数的频率响应特性表示滤波器的选频特性

5. 二阶滤波器（两个动态元件）

复习

串联谐振电路←对偶关系→并联谐振电路





$$H(j\omega)=\frac{I(j\omega)}{V(j\omega)}=\frac{1}{Z(j\omega)}$$

$$Z(j\omega)=R+j\omega L+\frac{1}{j\omega C}$$

$V(j\omega) \leftrightarrow I(j\omega)$

$Z(j\omega) \leftrightarrow Y(j\omega)$

$L \leftrightarrow C$

$R \leftrightarrow G$

$$H(j\omega)=\frac{V(j\omega)}{I(j\omega)}=\frac{1}{Y(j\omega)}$$

$$Y(j\omega)=G+j\omega C+\frac{1}{j\omega L}$$

$$\omega_0=\frac{1}{\sqrt{LC}} \qquad Q=\frac{\omega_0 L}{R}=\frac{1}{\omega_0 RC}$$

$$\omega_0=\frac{1}{\sqrt{LC}} \qquad Q=\frac{\omega_0 C}{G}=\frac{1}{\omega_0 GL}$$

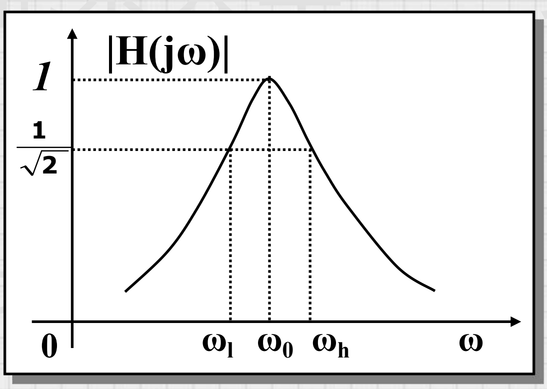
$$|H(j\omega)|=\frac{1}{\sqrt{1+Q^2\left(\frac{\omega}{\omega_0}-\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}}$$

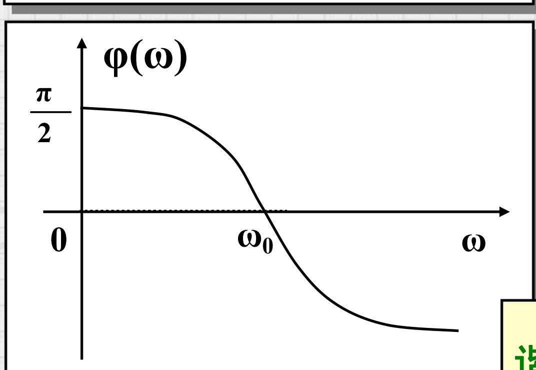
$$\varphi(\omega)=-\arctan Q\left(\frac{\omega}{\omega_0}-\frac{\omega_0}{\omega}\right)$$

找寻VCR矢量关系...

5. 二阶滤波器（两个动态元件）

复习





➡ 由半功率点可求得

$$\omega_l=\frac{\omega_0}{2Q}\left(\sqrt{1+4Q^2}-1\right)$$

$$\omega_h=\frac{\omega_0}{2Q}\left(\sqrt{1+4Q^2}+1\right)$$

➡ 带通滤波器3dB带宽

$$\Delta\omega=\omega_h-\omega_l=\frac{\omega_0}{Q}$$

➡ 相对带宽 $\frac{\Delta\omega}{\omega_0}=\frac{1}{Q}$

谐振频率 & 品质因数

网络定理：内容与约束条件

复习

置换定理： 一个有唯一解的网络中的一支路（电压V_k, 电流I_k），可以用一个电压为V_k的电压源（或者电流为I_k的电流源）来置换。

叠加定理： 线性含源网络中的某响应（电压或电流），等同于网络中各独立源单独作用时产生的响应的代数和。

互易定理： 线性无源（也不含受控源）双口网络，无论哪一口作为激励，哪一口作为响应，其响应和激励的比值相同。

网络定理：特性与应用

复习

置换定理:

置换后，当前网络的支路（V或I）不受影响。

简化电路分析

叠加定理:

线性电路中，无处不在的定理。

简化电路分析

互易定理:

双向激励置零后的电路结构完全相同

互易网络的传递函数满足双向对称性

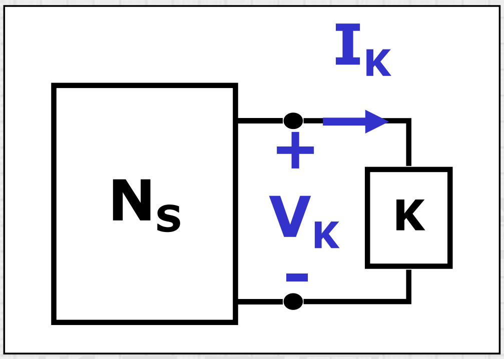
——双向的H(jω)相同

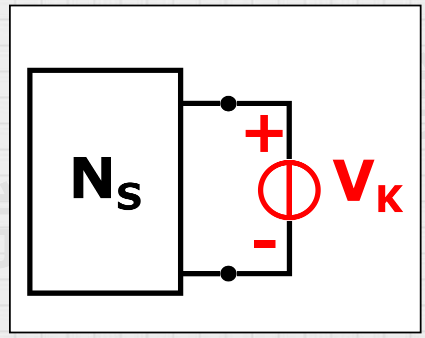
响应和激励变量是电压或电流，所以可以组合出4种。。。？

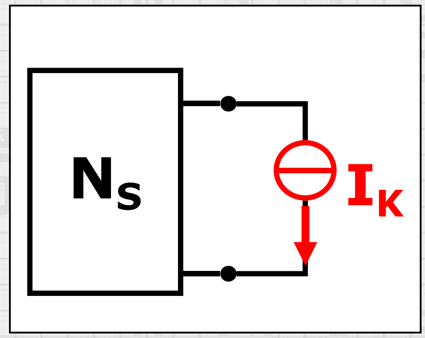
网络定理：1. 置换定理

复习

电路描述：







有唯一解的网络

注意参考方向

网络定理：2. 叠加定理:举例3

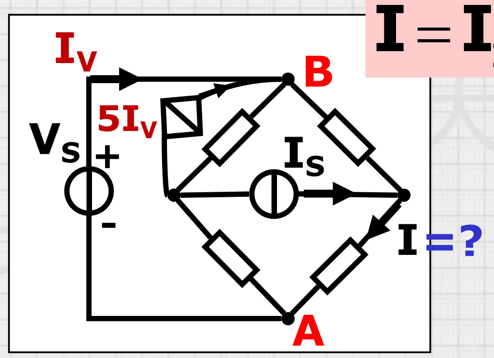
复习

$$I = I_1 + I_2$$

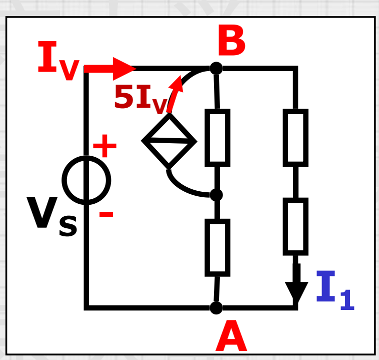
独立电压源置零：短路
独立电流源置零：开路

含受控源的处理：

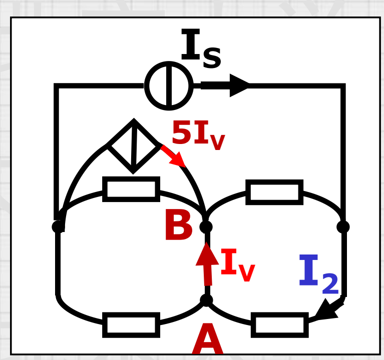
（受控源和控制量都要保留）



=



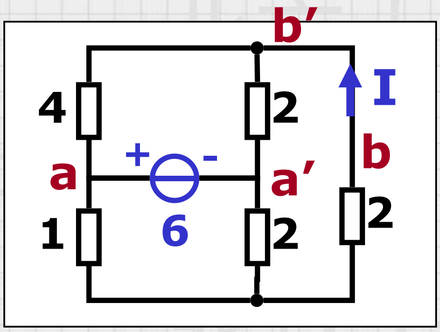
+

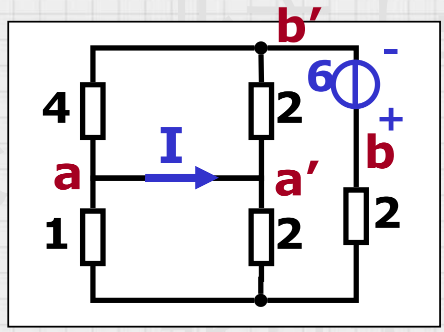


网络定理：3. 互易定理：举例

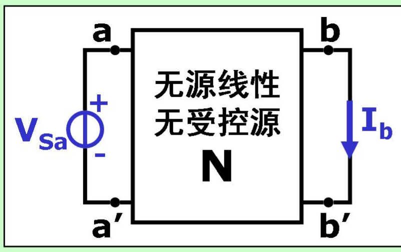
复习

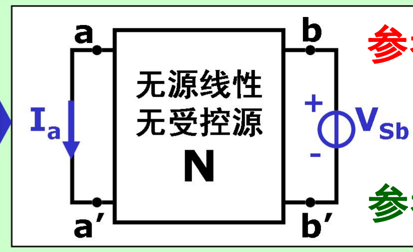
例：用互易定理求I＝？





形式一





参考高电位

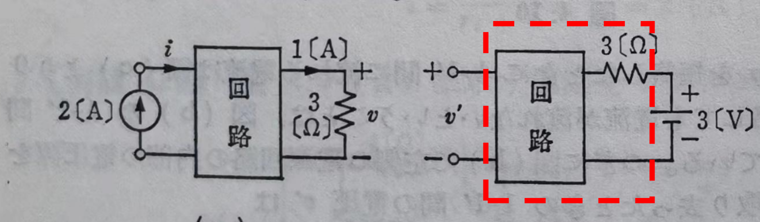
参考低电位

$I_b/V_{Sa}=I_a/V_{Sb}$　或者：若 $V_{sa}=V_{sb}$ 则 $I_a=I_b$

互易定理—举例

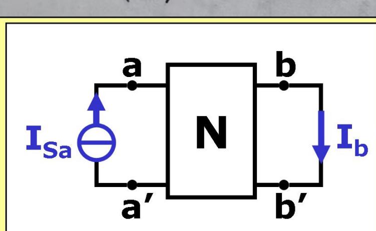
解法1：

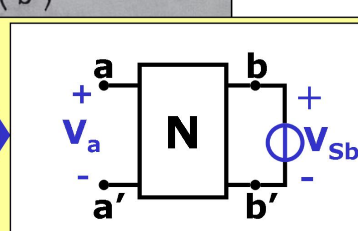
【例題 4.8】 図 4.12（a）に示すように，回路の左側に 2〔A〕の電流源を接続したところ，回路の右側の 3〔Ω〕の抵抗に 1〔A〕の電流が流れた。つぎに，同じ回路の右側に図（b）に示すように 3〔V〕の電圧源を接続した。このときの電圧 v' を求めよ。



（a）　（b）

形式三





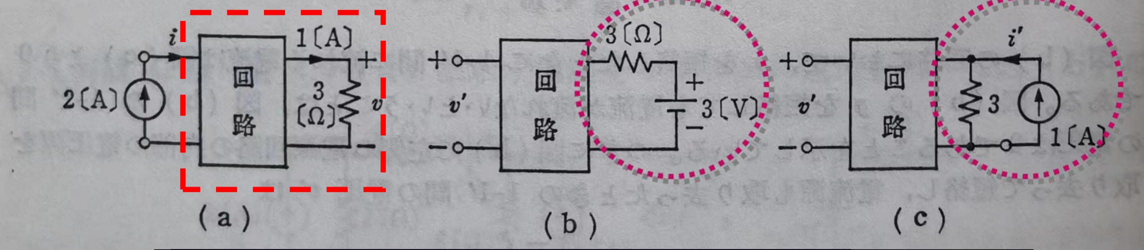
$V_a/V_{Sb}=I_b/I_{Sa}$　或者：若数值上 $I_{Sa}=V_{Sb}$ 则 $V_a=I_b$

=3/2

互易定理—举例

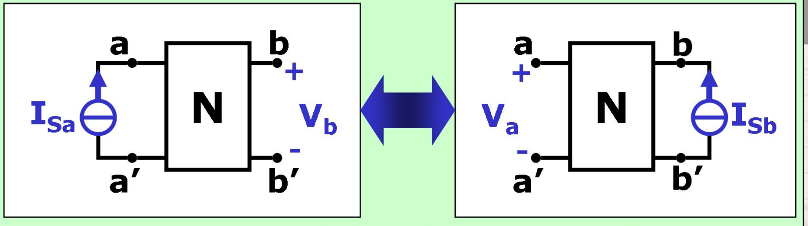
解法2：

【例題 4.8】 図 4.12（a）に示すように，回路の左側に 2〔A〕の電流源を接続したところ，回路の右側の 3〔Ω〕の抵抗に 1〔A〕の電流が流れた。つぎに，同じ回路の右側に図（b）に示すように 3〔V〕の電圧源を接続した。このときの電圧 v' を求めよ。



（a） （b） （c）

形式二

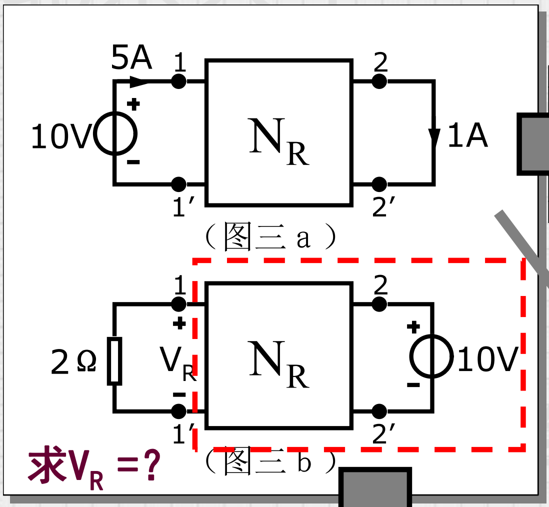


$V_a/I_{Sb}=V_b/I_{Sa}$ 或者：若 $I_{Sa}=I_{Sb}$ 则 $V_a=V_b$

=3/2

互易定理—举例

思路:找出虚线单口网络的等效电路



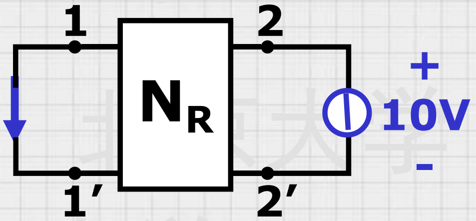
（图三 a）

（图三 b）

求V_R =?

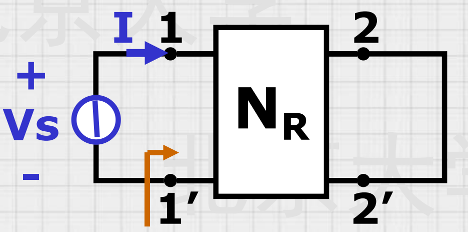
解法1：

互易定理1:



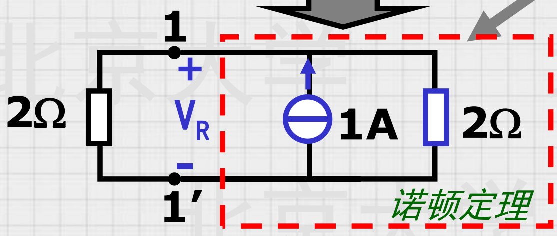
I_{sc}=1A

短路电流



Zin=Zeq=Vs/I=10/5=2Ω

等效电阻

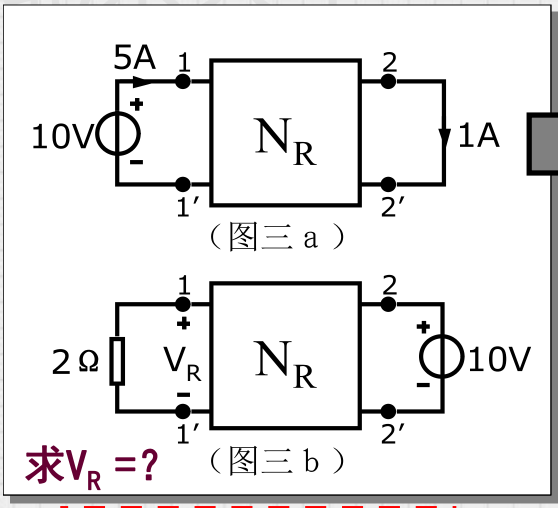


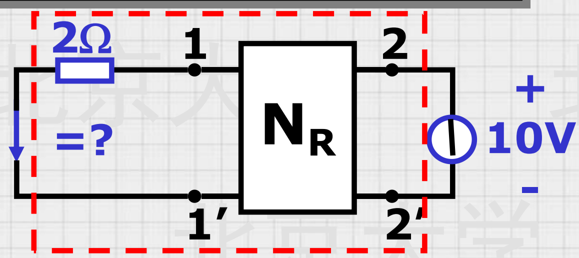
诺顿定理

$V_R=2\times0.5=1V$

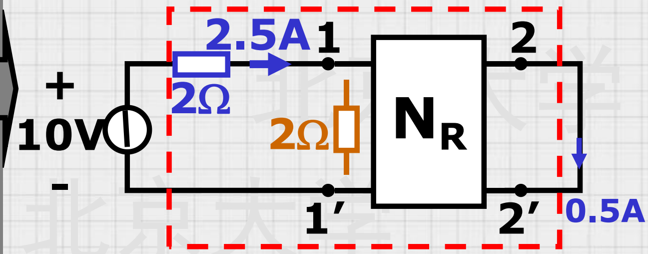
互易定理—举例

思路:找出两图可以使用互易定理1的相同电路，求“1”端口电流





解法2:

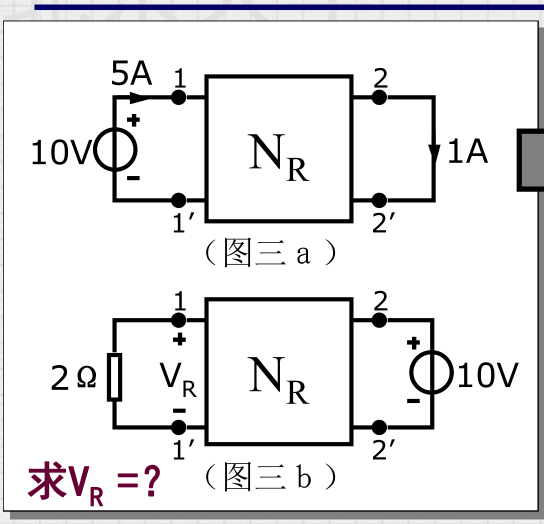


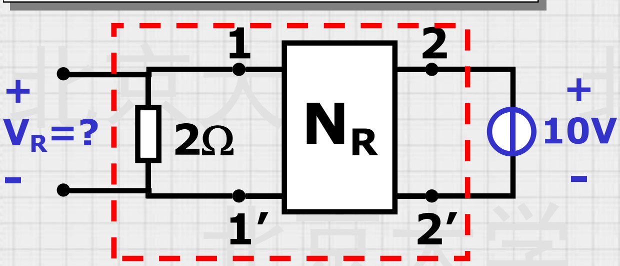
利用互易定理1

$V_R=2\times0.5=1V$

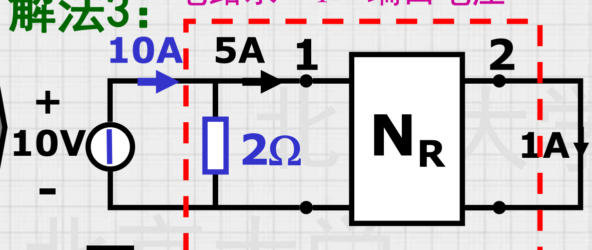
互易定理—举例

思路:找出两图可以使用互易定理3的电路求“1”端口电压

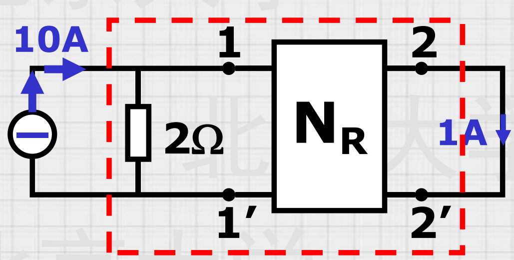




解法3:

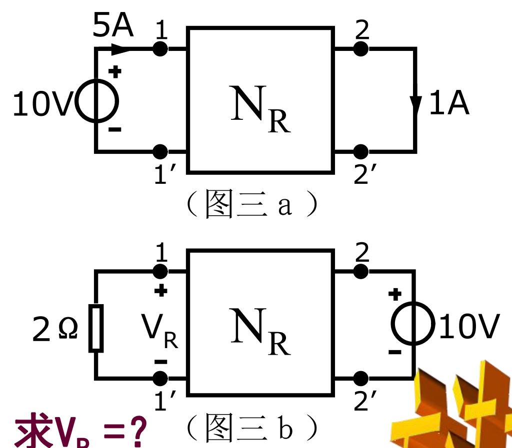


置换定理



互易定理3

互易定理—举例



求V_R =?

解法4：特勒根定理

解法5：

求N_R的Z参量

（第六章的双口网络）

法太多了！真是太多了！

☹？ ☺？

网络分析 ---- 由已知的网络结构和元件参数来求解和分析网络的支路电压和支路电流。

兴趣 认真 执著 创新

《电子线路分析与设计》

第六讲：大网络分析基础

胡薇薇

2023. 09. 27

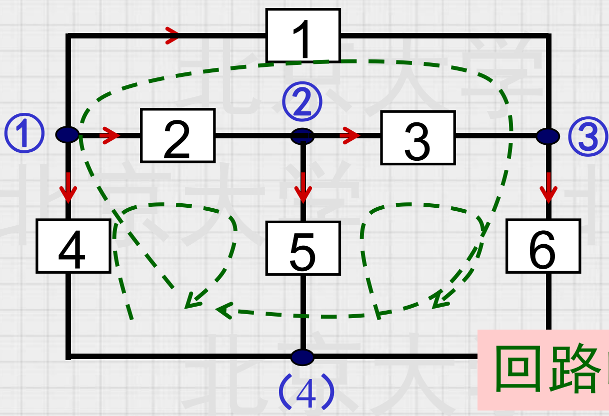
找寻网络中
由激励求响应
简单而规范的方法

鄙视和摒弃
雕虫小技

北京大学

基本定律（KVL、KCL、VCR定律）

回忆



1. KCL定律 =3个方程

$-I-I-I=0$

节点电压法

$I_1+I_3-I_6=0$

2. KVL定律 =3个方程

回路电流法

$+V_1+V_6=0$

$-V_4+V_2+V_5=0$

$-V_5+V_3+V_6=0$

支路数b=6，待求量=2b=12

引入虚拟变量：虚拟的电流、电压

3. VCR定律 =6个方程

3+3+6=12个方程

$V_i=R_iI_i$

线性网络分析方法

除了三大定律（VCR，KCL，KCL）

有没有分析线性网络的最简便最有效的方法？

假定一组求解变量(数目<支路数)

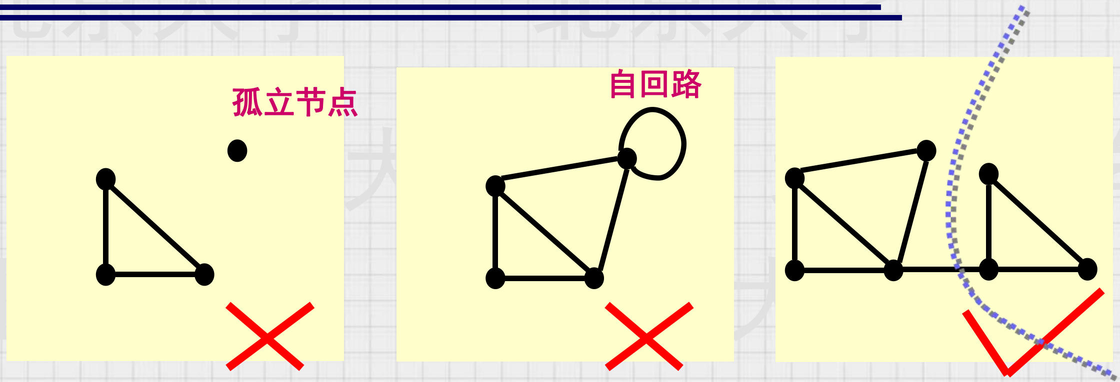
虚拟的电流, 电压

一组完备的独立的变量集

彼此线性无关

一个也不能少，
由此进一步获得全部支路电压、电流

网络拓扑分析的基本知识



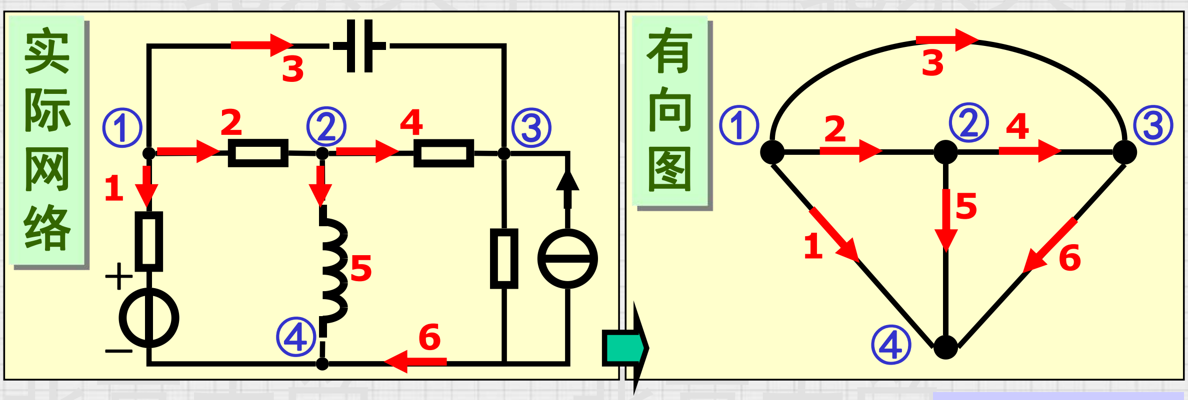
网络图: 是一组节点与支路的集合。**每条支路的两端终接在不同的节点上。**

连通图： 网络图中**任两个**节点**至少**存在一条由支路组成的通路。

右图是一个电路？两个电路？

网络拓扑分析的基本知识 ***

网络的拓扑图(有向图)： 对网络的节点和支路进行**编号**，并以编号的**有向线段**表示网络中的支路。

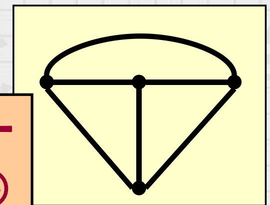


支路数b=6
节点数n=4

B=6? 7? 8?

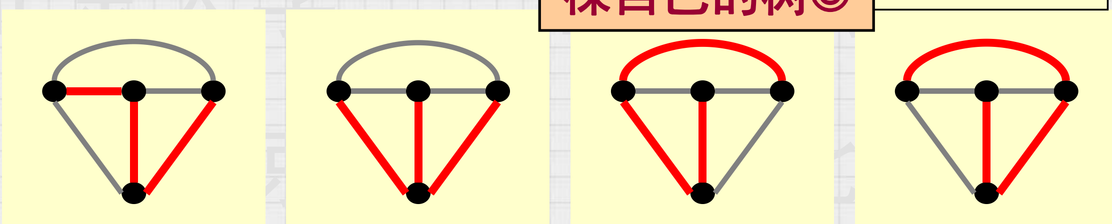
网络拓扑分析的基本知识 ***

- **树**：连通图中的一个子图：满足三个条件
  (1) 连通； (2) 无回路；
  (3) 含全部节点



每个人都有一棵自己的树☺

在例图中可以生成：



- **树支**：构成树的支路（红线）

结论：树支数等于节点数-1：$n_t=n-1$

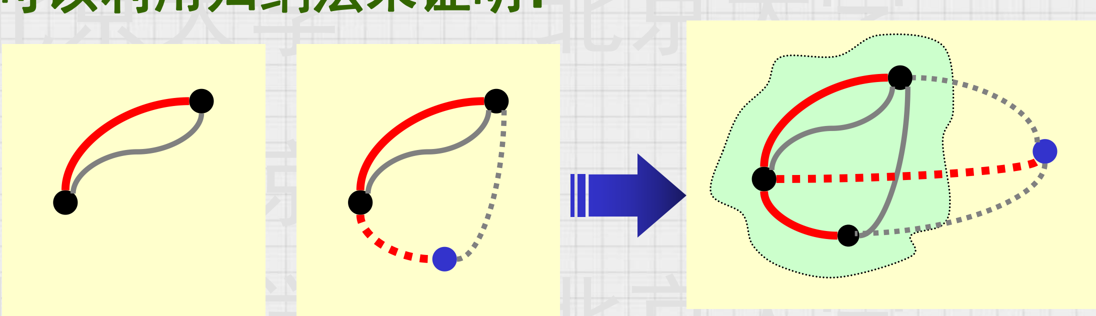
网络拓扑分析的基本知识 ***

推论（定理）：

连通网络的独立节点数等于树支数n_t

→ 满足：$n_t=n-1$

可以利用归纳法来证明：



$n = 2$ $\quad$ $n_t = 1$

$n = 3$ $\quad$ $n_t = 2$

$n' = n+1$ $\quad$ $n_t' = n_t+1$

网络拓扑分析的基本知识

❑ **割集**：网络图中的**支路集合**，满足：

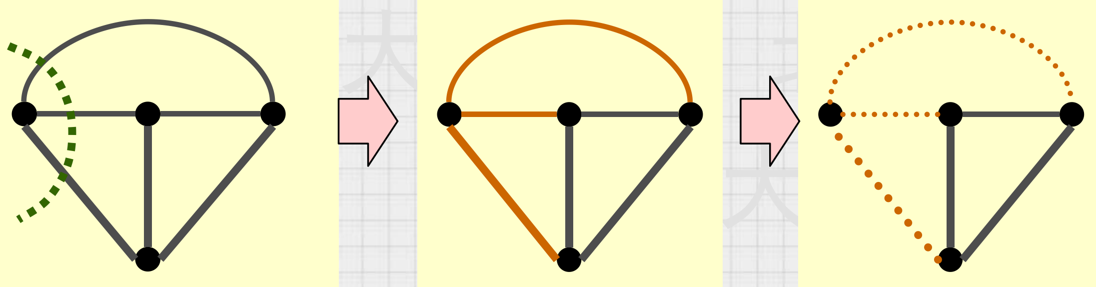
(1) 去掉此割集则网络不连通，并一分为二

(2) 割集中的支路留下任何一条则网络连通

获得方法：**在网络上做闭合曲面**（切**割**到的支路**集**合）

例：

回忆：闭合面上$\Sigma I=0$ 广义节点



网络拓扑分析的基本知识

❑ **割集**：网络图中的**支路集合**，满足：

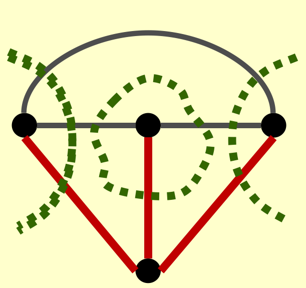
(1) 去掉此割集则网络不连通，并一分为二

(2) 割集中的支路留下任何一条则网络连通

获得方法：**在网络上做闭合曲面**（切**割**到的支路**集**合）

例：

回忆：闭合面上$\Sigma I=0$ 广义节点



每一条树支总可以和一些连支构成**唯一**的一个割集：

单树支割集（基本割集）

结论（定理）：

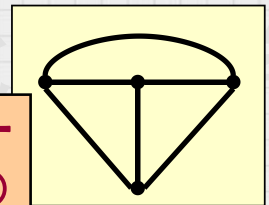
基本割集数=树支数=n_t=n-1

练习一下

网络拓扑分析的基本知识

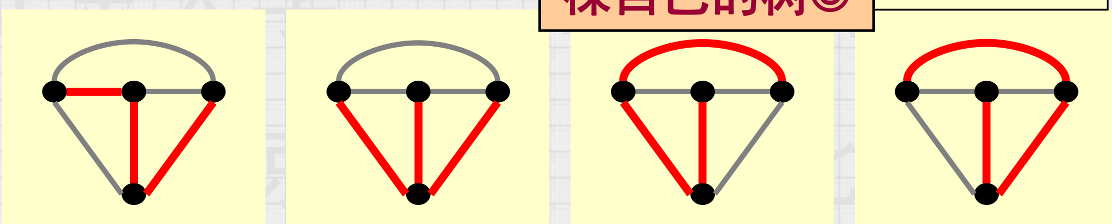
❑ 树：连通图中的一个子图：满足三个条件

(1) 连通； (2) 无回路；
(3) 含全部节点



每个人都有一棵自己的树☺

在例中，可以生成：



❑ 树支：构成树的支路(红线)

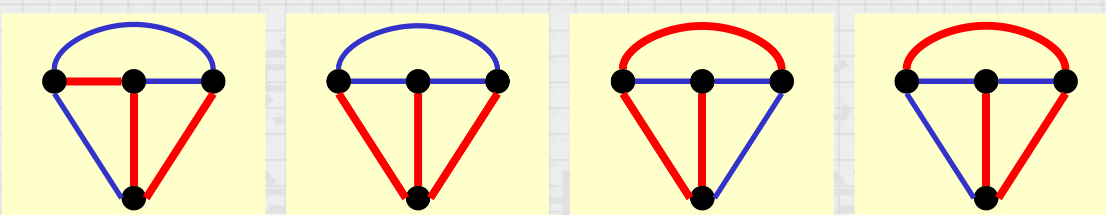
结论：树支数等于节点数-1: $n_t=n-1$

每一条树支必然和一些连支构成
一个与众不同的（单树支）割集

网络拓扑分析的基本知识

***

❑ 连支：非树支的支路(兰线)



▪连支数满足：$L=b-n_t=b-n+1$

独立回路（基本回路）

每一条连支必然和一些树支构成
一个与众不同的（单连支）回路

结论(定理)：
网络的独立回路数等于连支数$=b-n+1$

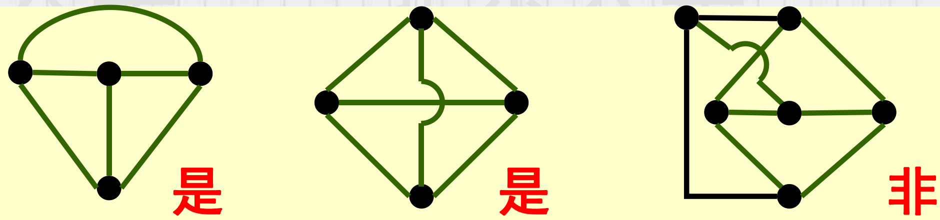
（基本回路）

网络拓扑分析的基本知识 ***

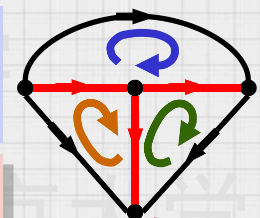
❑ **平面网络：** 网络的拓扑图可以画在一个平面上，而无支路重迭（交叉）

❑ **非平面网络：** 拓扑图无法画在一个平面上.

例：



平面网络：
形象上可以将网络看成一张网→→网孔



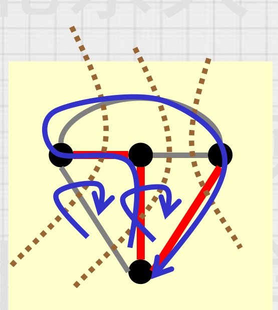
定理：平面网络的
网孔数=独立回路数=连支数=b-n+1

不用找树！

拓扑分析的基础知识--树，树支，和连支

❑ **树：** 连通图中的一个子图：满足三个条件
(1)连通　(2)无回路　(3)含全部节点

❑ **树支：** 构成树的支路(红线)　**连支：** 非树支的支路(灰线)

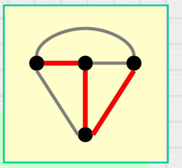


去树根，留下n-1个独立节点
→n-1个独立的KCL方程
→节点电压法　*不用找树！*

连支+单树支，n-1个独立割集
→n-1个独立的KCL方程
→割集分析法

树支+单连支，b-n+1个独立回路
→b-n+1个独立的KVL方程
→回路电流法，网孔电流法　*不用找树！*

网络拓扑分析的基本知识



建立网络方程的原则：要满足独立性和完备性

线性无关　一个也不能少

结论：网络的独立节点数＝树支数＝n-1

用全部独立的节点建立KCL方程 ➔ 节点分析　不用找树！

结论：网络的独立回路数＝连支数＝b-n+1

用全部独立的回路建立KVL方程 ➔ 回路分析

结论（平面网络）：网孔数＝独立回路数＝b-n+1

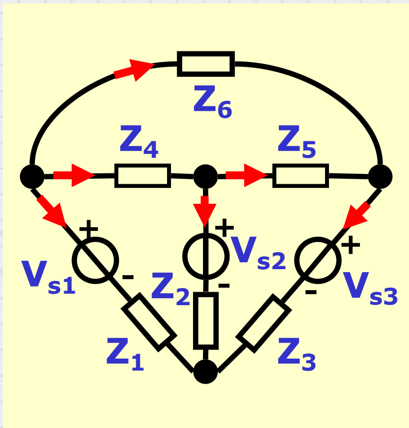
用全部独立的网孔建立KVL方程 ➔ 网孔分析　不用找树！

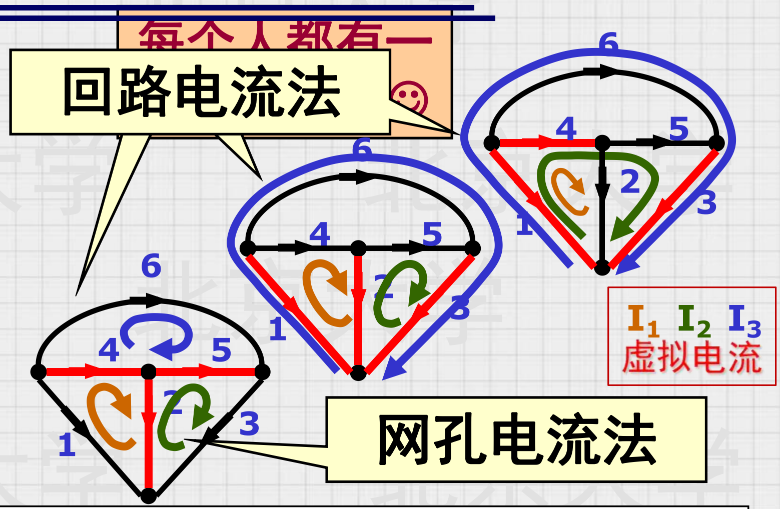
n<=b ⇨ 方程数<b

Tea break!

作业：6－2，4，12（12用网孔电流法做）

网络的基本分析方法--回路电流法与网孔电流法 ***



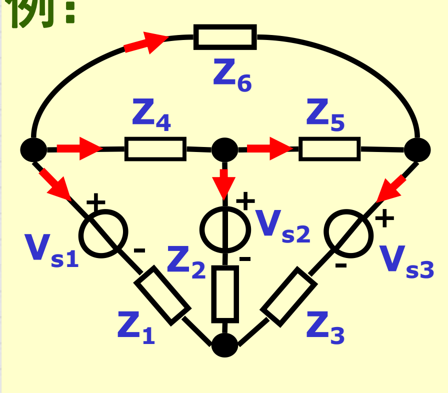


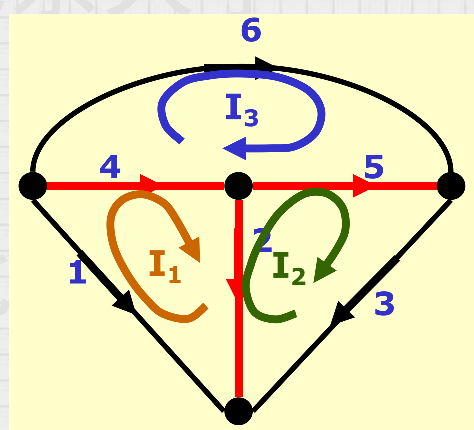
- ❑ 回路电流法：方程的建立取决于**树**的形状；
  可用于非平面网络
- ❑ 网孔电流法：无树，简单易学；
  只能用于平面网络

共有支路的回路电流方向

网络的基本分析方法--回路电流法的引出和推导

例：

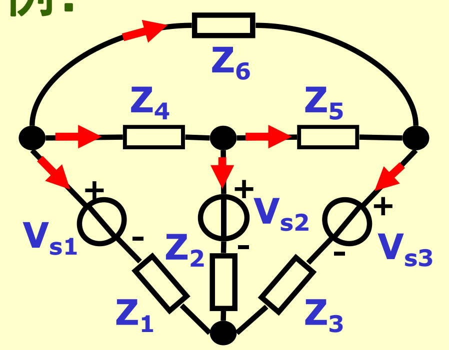


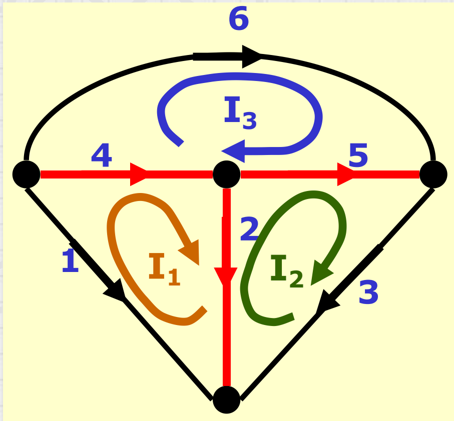


- ❑推导过程一：给电路标号、方向
- ❑推导过程二：选定回路电流方向
  一般选取顺时针方向
- ❑推导过程三：写出KVL方程：

网络的基本分析方法--回路电流法的引出和推导

例：





假设压降顺回路方向为正写KVL：

$$\begin{cases} \text{I} & Z_1I_1 - V_{S1} + Z_4(I_1 - I_3) + V_{S2} + Z_2(I_1 - I_2) = 0 \\ \text{II} & Z_2(I_2 - I_1) - V_{S2} + Z_5(I_2 - I_3) + V_{S3} + Z_3I_2 = 0 \\ \text{III} & Z_6I_3 + Z_5(I_3 - I_2) + Z_4(I_3 - I_2) = 0 \end{cases}$$

推导过程四：整理成矩阵形式

网络的基本分析方法--回路电流方程矩阵

***

$$\begin{pmatrix} Z_1+Z_2+Z_4 & -Z_2 & -Z_4 \\ -Z_2 & Z_2+Z_3+Z_5 & -Z_5 \\ -Z_4 & -Z_5 & Z_4+Z_5+Z_6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{S1}-V_{S2} \\ V_{S2}-V_{S3} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$Z \cdot I = V_S \quad \Rightarrow \quad I = Z^{-1} \cdot Vs$$

回路阻抗矩阵

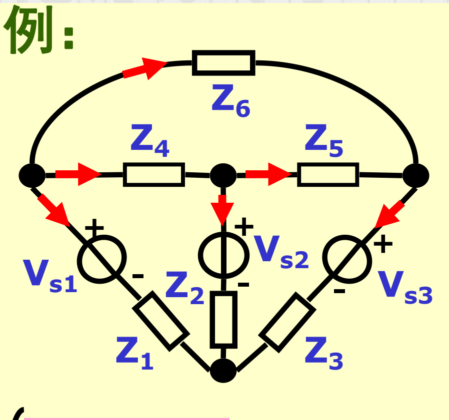
回路电流列向量

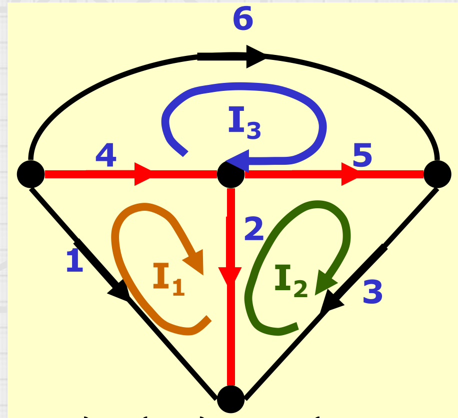
回路电压源列向量

分析矩阵、发现规律！

网络的基本分析方法--回路电流法的引出 ***

例：





$$\begin{pmatrix} Z_1+Z_2+Z_4 & -Z_2 & -Z_4 \\ -Z_2 & Z_2+Z_3+Z_5 & -Z_5 \\ -Z_4 & -Z_5 & Z_4+Z_5+Z_6 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} V_{s1}-V_{s2} \\ V_{s2}-V_{s3} \\ 0 \end{pmatrix}$$

Z_{ii} ：回路i的各支路阻抗的总和（自阻抗）正的

网络的基本分析方法--回路电流法的引出 ***

网孔电流法

$$\begin{pmatrix} Z_1+Z_2+Z_4 & -Z_2 & -Z_4 \\ -Z_2 & Z_2+Z_3+Z_5 & -Z_5 \\ -Z_4 & -Z_5 & Z_4+Z_5+Z_6 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} V_{s1}-V_{s2} \\ V_{s2}-V_{s3} \\ 0 \end{pmatrix}$$

回路电流法

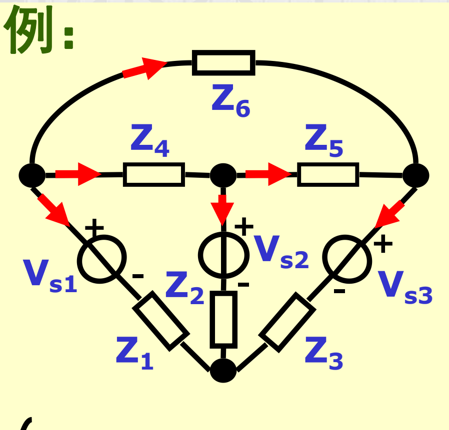
$$\begin{pmatrix} Z_1+Z_2+Z_4 & -Z_2 & Z_1 \\ -Z_2 & Z_2+Z_3+Z_5 & Z_3 \\ Z_1 & Z_3 & Z_1+Z_3+Z_6 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} V_{s1}-V_{s2} \\ V_{s2}-V_{s3} \\ V_{s1}-V_{s3} \end{pmatrix}$$

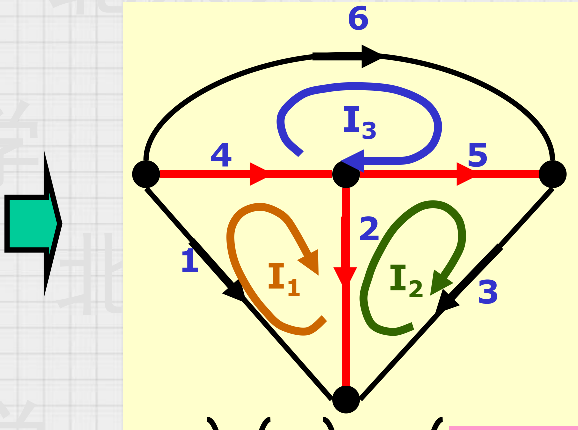
Z_{ij} 回路i和j共用支路上的阻抗（互阻抗）
并且I_i和I_j的方向相同时Z_{ij}为正，否则为负

网络的基本分析方法--回路电流法的引出

***

例：





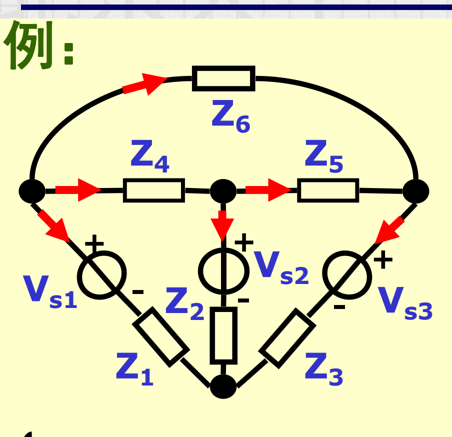
$$\begin{pmatrix} Z_1+Z_2+Z_4 & -Z_2 & -Z_4 \\ -Z_2 & Z_2+Z_3+Z_5 & -Z_5 \\ -Z_4 & -Z_5 & Z_4+Z_5+Z_6 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} V_{S1}-V_{S2} \\ V_{S2}-V_{S3} \\ 0 \end{pmatrix}$$

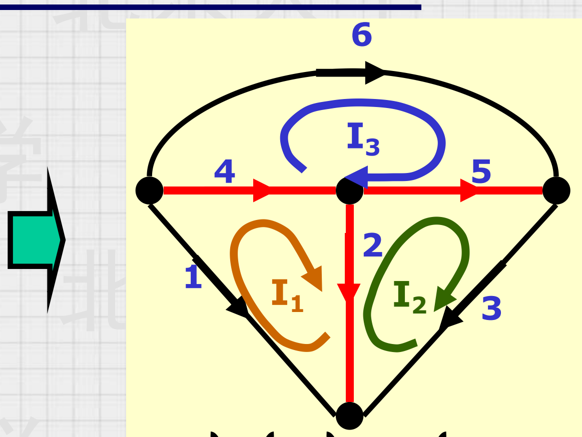
V_{Si} 沿回路i的回路电流方向的所有电压源的电压升的代数和

网络的基本分析方法--回路电流法的引出

***

例：





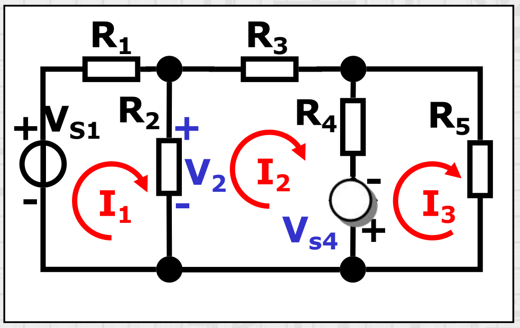
$$\begin{pmatrix} Z_1+Z_2+Z_4 & -Z_2 & -Z_4 \\ -Z_2 & Z_2+Z_3+Z_5 & -Z_5 \\ -Z_4 & -Z_5 & Z_4+Z_5+Z_6 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} V_{S1}-V_{S2} \\ V_{S2}-V_{S3} \\ 0 \end{pmatrix}$$

I_i 待求变量回路电流i，由它可以求出所有支路电流I_{bi}、以及支路电压V_{bi}

利用规律还原电路…

回路电流法——举例 ***

直观的、快速的、准确地写出矩阵：



步骤1. 确定回路(网孔)电流向量

$$\mathbf{I}=(I_1,I_2,I_3)^T$$

步骤2. 写Z矩阵

自阻抗

$$\begin{pmatrix} R_1+R_2 & & \\ & R_2+R_3+R_4 & \\ & & R_4+R_5 \end{pmatrix}$$

互阻抗

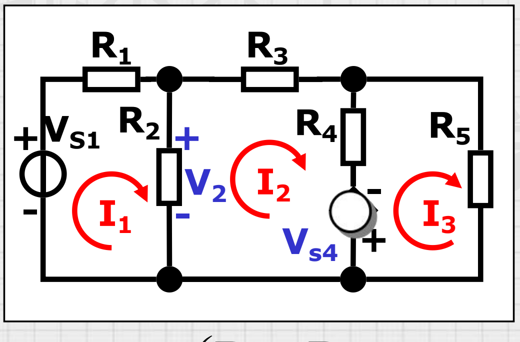
$$\begin{pmatrix} R_1+R_2 & -R_2 & 0 \\ & R_2+R_3+R_4 & -R_4 \\ & & R_4+R_5 \end{pmatrix}$$

对称

$$\begin{pmatrix} R_1+R_2 & -R_2 & 0 \\ -R_2 & R_2+R_3+R_4 & -R_4 \\ 0 & -R_4 & R_4+R_5 \end{pmatrix}$$

又长本事啦。。。

回路电流法——举例 ***



步骤4. 求出回路电流

步骤3. Vs

$$\begin{pmatrix} R_1+R_2 & -R_2 & 0 \\ -R_2 & R_2+R_3+R_4 & -R_4 \\ 0 & -R_4 & R_4+R_5 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} V_{S1} \\ V_{S4} \\ -V_{S4} \end{pmatrix}$$

步骤5：各支路电流可以由回路电流求出

步骤6：各支路电压可以由支路电流求出

由矩阵回复电路的唯一性？试试回路法建立方程的恢复唯一佛。。。

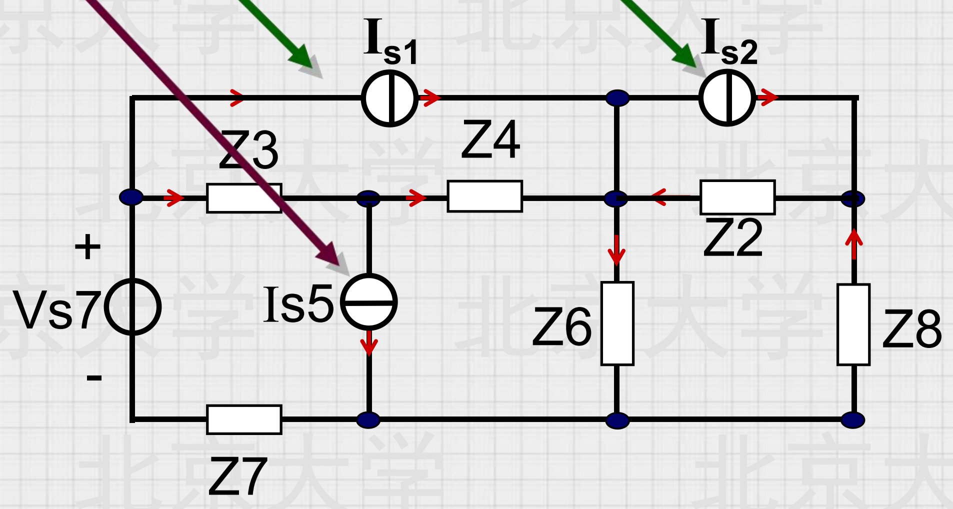
电流源？→

回路电流法—含电流源支路的处理

(1) 源等效法(诺顿⇔戴维南) 缺点：改变了原网络的结构

(2) 虚回路电流法（电流源支路在边界支路上时）

(3) 假设支路电压法（电流源支路不在边界支路上时）

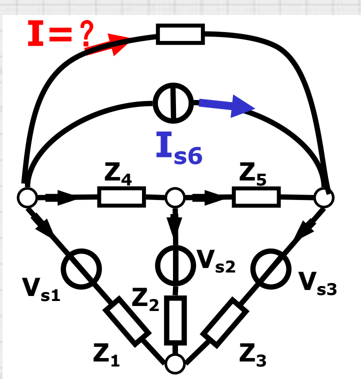


回路电流法—含电流源支路的处理

(1) 源等效法(诺顿→戴维南) 缺点：改变了原网络的结构

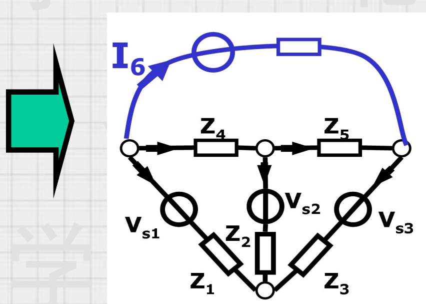
(2) 虚回路电流法（电流源支路在边界支路上时）

(3) 假设支路电压法（电流源支路不在边界支路上时）



诺顿✗戴维南 ？

单独立源支路怎么办?



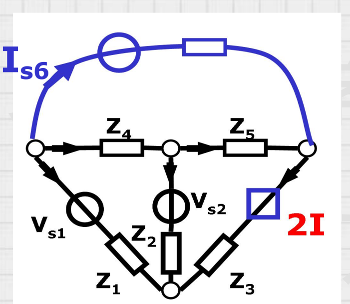
约束关系变了

怎么办?

？

$I = I_6 - I_{s6}$

$I+I_{s6}$



控制量被灭了

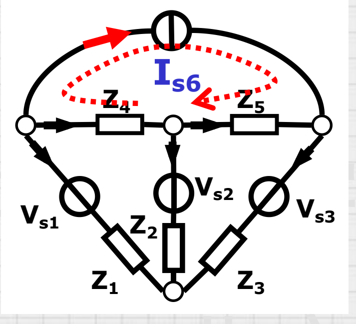
怎么办?

？

回路电流法—含电流源支路的处理

***

(2) 虚回路电流法(电流源支路在边界支路上时)



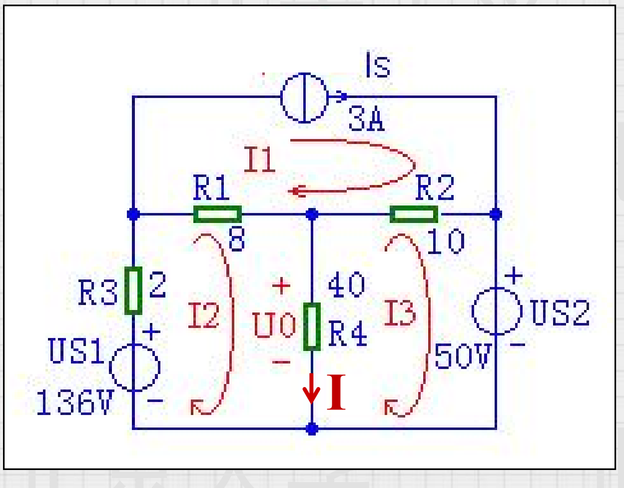
$$I_3 = I_{s6}$$

$$\begin{pmatrix} Z_1+Z_2+Z_4 & -Z_2 & -Z_4 \\ -Z_2 & Z_2+Z_3+Z_5 & -Z_5 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{S1}-V_{S2} \\ V_{S2}-V_{S3} \\ I_{S6} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} Z_1+Z_2+Z_4 & -Z_2 \\ -Z_2 & Z_2+Z_3+Z_5 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{S1}-V_{S2}+Z_4 I_{S6} \\ V_{S2}-V_{S3}+Z_5 I_{S6} \end{pmatrix}$$

回路电流法—举例

直观的、快速的、准确地写出矩阵:



$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -8 & 50 & -40 \\ -10 & -40 & 50 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 136 \\ -50 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 8 \\ 6 \end{pmatrix}$$

求40欧姆电阻上的电流**I=?**

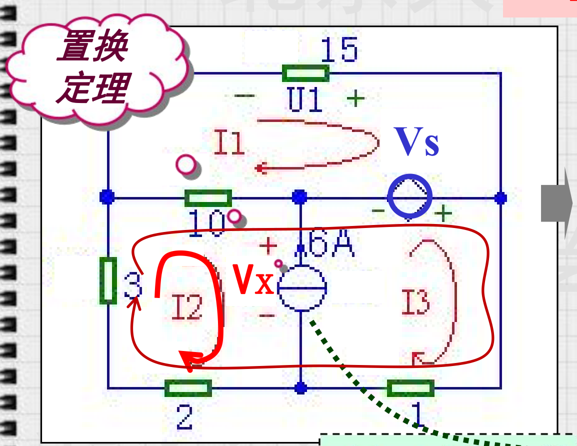
$$I = I_2 - I_3 = 2A$$

回路电流法—含电流源支路的处理

***

当电流源不在边界支路上时

(a)假设支路电压法：**- Vx +**



$$\begin{pmatrix}25 & -10 & 0\\ -10 & 15 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}I_1\\ I_2\\ I_3\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}-V_s\\ -Vx\\ V_s+Vx\end{pmatrix}$$

II + III

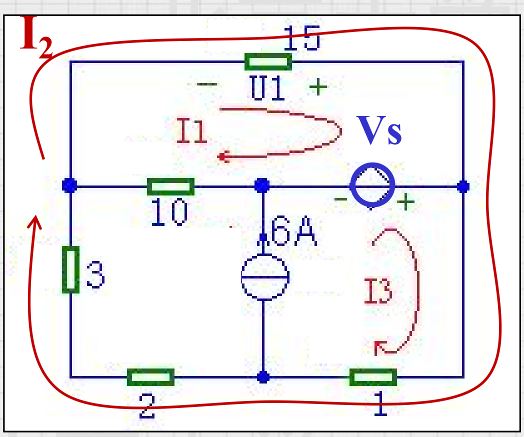
$$\begin{pmatrix}25 & -10 & 0\\ -10 & 15 & 1\\ 0 & -1 & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}I_1\\ I_2\\ I_3\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}-V_s\\ V_s\\ 6\end{pmatrix}$$

$$-I_2+I_3=6$$

(b)引入超网孔的概念（回路不含电流源）：

回路电流法—含电流源支路的处理

当电流源不在边界支路上时



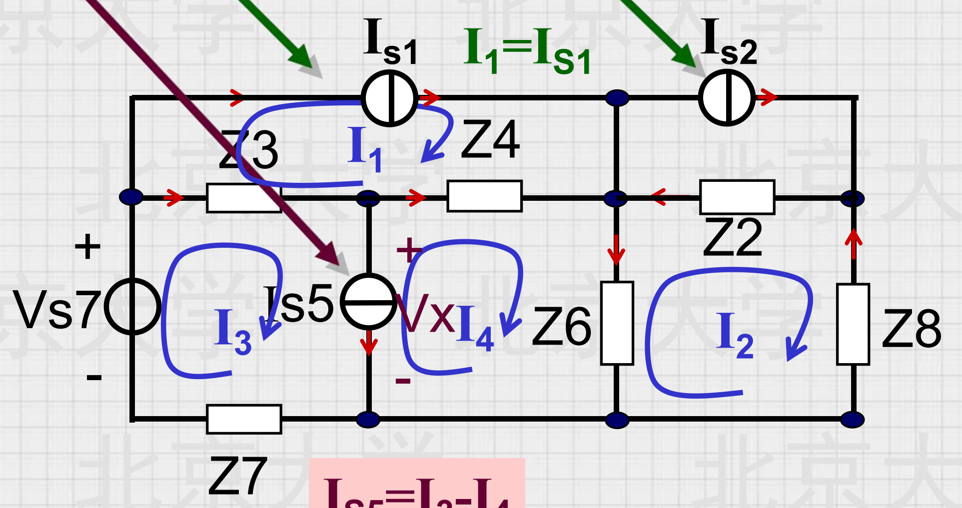
回路电流法—含电流源支路的处理

小结

(1) 源等效法（诺顿⇔戴维南）

(2) 虚回路电流法（电流源支路在边界支路上时）

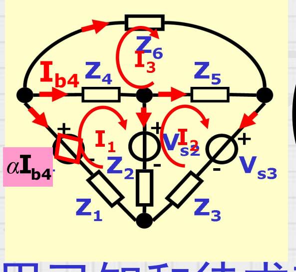
(3) 假设支路电压法（电流源支路不在边界支路上时）



$I_{S5}=I_3-I_4$

回路电流法—含受控电压源支路的处理

(a) 先将受控源看成源，写出回路方程矩阵：



$$\begin{pmatrix} Z_1+Z_2+Z_4 & -Z_2 & -Z_4 \\ -Z_2 & Z_2+Z_3+Z_5 & -Z_5 \\ -Z_4 & -Z_5 & Z_4+Z_5+Z_6 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} \alpha I_{b4}-V_{S2} \\ V_{S2}-V_{S3} \\ 0 \end{pmatrix}$$

(b) 用已知和待求变量表示控制量：

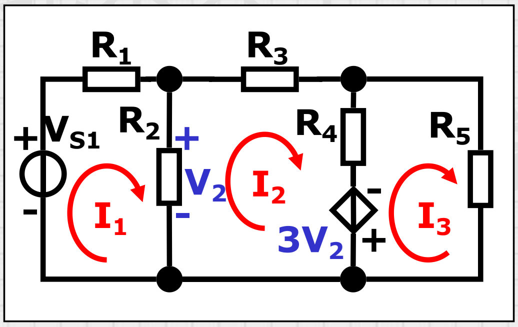
$$I_{b4}=I_1-I_3$$

(c) 代入整理，得到非对称矩阵：

$Z_{ji} \neq Z_{ij}$

$$\begin{pmatrix} Z_1+Z_2+Z_4-\alpha & -Z_2 & -Z_4+\alpha \\ -Z_2 & Z_2+Z_3+Z_5 & -Z_5 \\ -Z_4 & -Z_5 & Z_4+Z_5+Z_6 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} -V_{S2} \\ V_{S2}-V_{S3} \\ 0 \end{pmatrix}$$

回路电流法—举例



先将受控源看成独立源写矩阵

1. 写矩阵

$$\begin{pmatrix} R_1+R_2 & -R_2 & 0 \\ -R_2 & R_2+R_3+R_4 & -R_4 \\ 0 & -R_4 & R_4+R_5 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} V_{S1} \\ 3V_2 \\ -3V_2 \end{pmatrix}$$

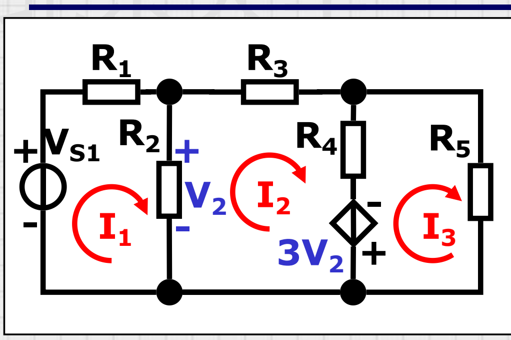
2. 用已知量和网孔电流表示受控源：

$$V_2=R_2(I_1-I_2)$$

代入上式

整理得

回路电流法—举例



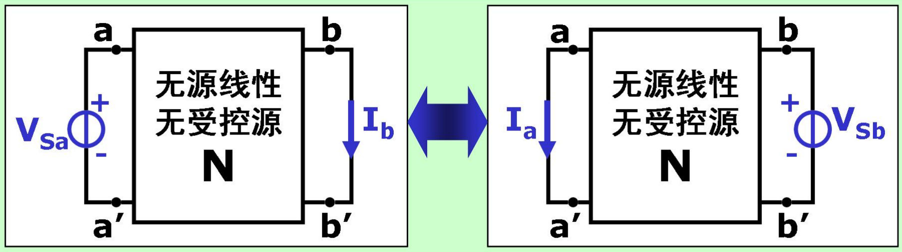
$$\begin{pmatrix} R_1+R_2 & -R_2 & 0 \\ -4R_2 & 4R_2+R_3+R_4 & -R_4 \\ 3R_2 & -3R_2-R_4 & R_4+R_5 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} V_{S1} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

含受控源的网络中 $Z_{ji} \neq Z_{ij}$ 非对称矩阵

用回路电流法证明互易定理

证明：

形式一



$I_b/V_{Sa}=I_a/V_{Sb}$　或者：若 $V_{sa}=V_{sb}$ 则 $I_a=I_b$

设Ia和Ib为网络N的回路电流，根据回路电流法有：

$$I_i=\sum_{k=1}^{L}\frac{\Delta_{ki}}{|Z|}V_{Sk}$$

所以：$I_b=\frac{\Delta_{ab}}{|Z|}V_{Sa}$　$I_a=\frac{\Delta_{ba}}{|Z|}V_{Sb}$

因为网络线性无源，也无受控源

所以：$\Delta_{ba}=\Delta_{ab}$

所以：$I_b/V_{Sa}=I_a/V_{Sb}$

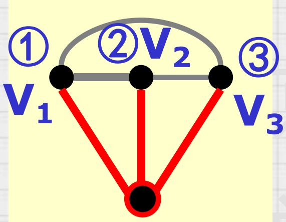
先在黑板上画出无源图或双源图

节点电压法—定义

***

❑以假想的节点电压为待求变量，根据KCL定律建立约束节点电压的独立&完备的方程

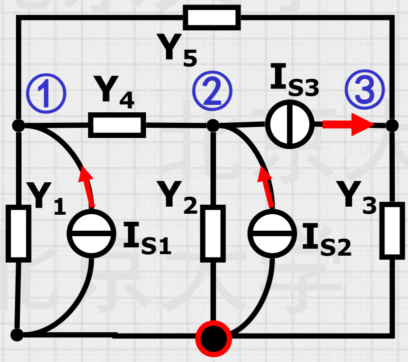
去树根，留下n-1个独立节点
→n-1个独立的KCL方程
→节点电压法



树根：
参考节点

节点电压一旦确定，网络中各支路的电压、电流均可用节点电压表示出来。

节点电压法—方法的引出与推导



参考节点

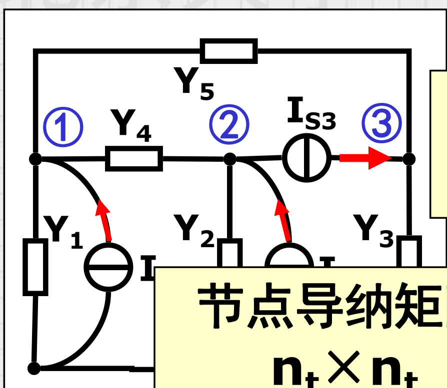
节点电压列向量：

$$V=\begin{pmatrix}V_1\\V_2\\V_3\end{pmatrix}$$

以流出节点为正，对各节点可以建立KCL方程：

$$\begin{cases}① & Y_1(V_1-0)+Y_4(V_1-V_2)+Y_5(V_1-V_3)-I_{S1}=0\\② & Y_4(V_2-V_1)+Y_2(V_2-0)-I_{S2}+I_{S3}=0\\③ & Y_3(V_3-0)+Y_5(V_3-V_1)-I_{S3}=0\end{cases}$$

节点电压法—方法的引出



节点导纳矩阵 $n_t \times n_t$

节点电压列向量 $n_t \times 1$

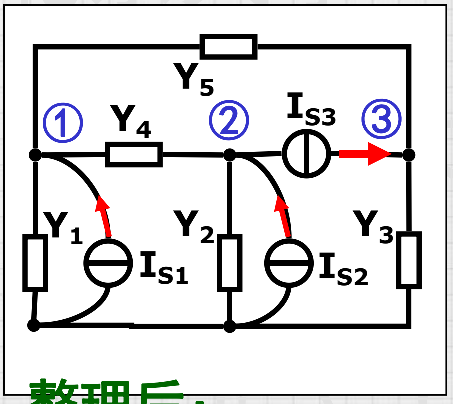
节点电流源列向量 $n_t \times 1$

$$Y\cdot V=I_S$$

整理后：

$$\begin{array}{c}①\rightarrow\\②\rightarrow\\③\rightarrow\end{array}\begin{pmatrix}Y_1+Y_4+Y_5 & -Y_4 & -Y_5\\-Y_4 & Y_2+Y_4 & 0\\-Y_5 & 0 & Y_3+Y_5\end{pmatrix}\begin{pmatrix}V_1\\V_2\\V_3\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}I_{S1}\\I_{S2}-I_{S3}\\I_{S3}\end{pmatrix}$$

节点电压法—规律在哪里? ***



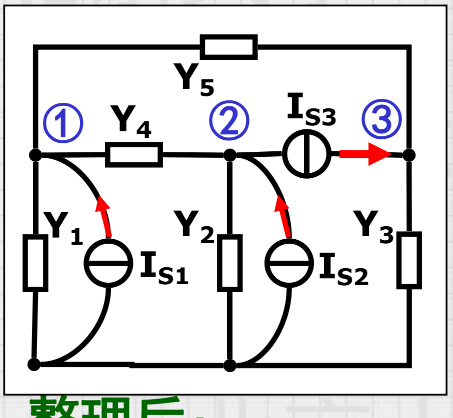
I_S 是流入节点i的电流源的代数和

$$\mathbf{Y} \cdot \mathbf{V} = \boxed{\mathbf{I}_S}$$

整理后:

$$\begin{array}{c} ①\rightarrow \\ ②\rightarrow \\ ③\rightarrow \end{array}
\begin{pmatrix} Y_1+Y_4+Y_5 & -Y_4 & -Y_5 \\ -Y_4 & Y_2+Y_4 & 0 \\ -Y_5 & 0 & Y_3+Y_5 \end{pmatrix}
\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix} =
\boxed{\begin{pmatrix} I_{S1} \\ I_{S2}-I_{S3} \\ I_{S3} \end{pmatrix}}$$

节点电压法—规律在哪里? ***



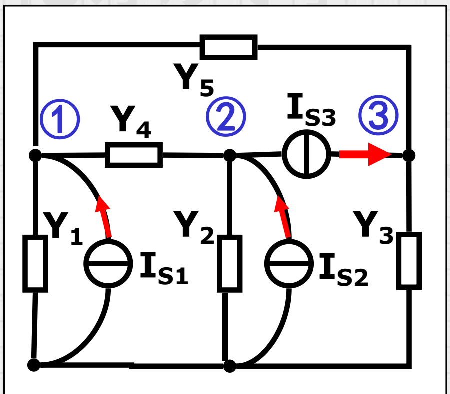
Y_{ii} 与节点i相连的所有支路导纳的总和(自导纳>0)

整理后:

$$\begin{array}{c} ①\rightarrow \\ ②\rightarrow \\ ③\rightarrow \end{array}
\begin{pmatrix} Y_1+Y_4+Y_5 & -Y_4 & -Y_5 \\ -Y_4 & Y_2+Y_4 & 0 \\ -Y_5 & 0 & Y_3+Y_5 \end{pmatrix}
\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix} =
\begin{pmatrix} I_{S1} \\ I_{S2}-I_{S3} \\ I_{S3} \end{pmatrix}$$

节点电压法—规律在哪里?

***



Y_{ij} 节点i和j之间所有支路导纳总和的负值(互导纳<0)

当网络中不含受控源时

Y是对称矩阵，满足：$Y_{ji}=Y_{ij}$

整理后:

$$
\begin{array}{c}
①\rightarrow \\
②\rightarrow \\
③\rightarrow
\end{array}
\begin{pmatrix}
Y_1+Y_4+Y_5 & -Y_4 & -Y_5 \\
-Y_4 & Y_2+Y_4 & 0 \\
-Y_5 & 0 & Y_3+Y_5
\end{pmatrix}
\begin{pmatrix}
V_1 \\ V_2 \\ V_3
\end{pmatrix}
=
\begin{pmatrix}
I_{S1} \\ I_{S2}-I_{S3} \\ I_{S3}
\end{pmatrix}
$$