第15章 电路方程的矩阵形式

本章重点

●重点

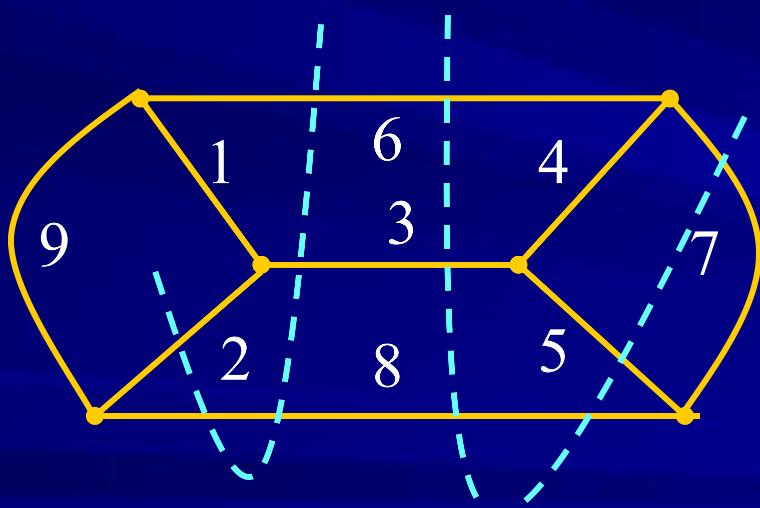
1. 关联矩阵、割集矩阵、基本回路矩阵和基本割集矩阵的概念
2. 回路电流方程、结点电压方程和割集电压方程的矩阵形式

15.1 割集

割集Q

连通图G中支路的集合，具有下述性质：

- 把Q中全部支路移去，图分成二个分离部分。
- 任意放回Q 中一条支路，仍构成连通图。

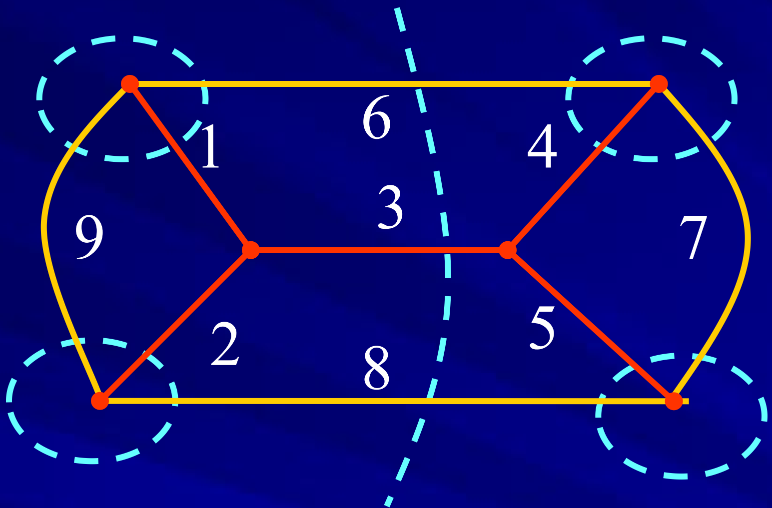


割集：(1 9 6) (2 8 9)
(3 6 8) (4 6 7) (5 7 8)

问题

(3 6 5 8 7) , (3 6 2 8)是割集吗？

基本割集 → 只含有一个树枝的割集。割集数 ＝n−1



注意

① 连支集合不能构成割集。

②属于同一割集的所有支路的电流应满足KCL。当一个割集的所有支路都连接在同一个结点上，则割集的KCL方程变为结点上的KCL方程。

注意

③对应一组线性独立的KCL方程的割集称为独立割集，基本割集是独立割集，但独立割集不一定是单树支割集。

15.2 关联矩阵、回路矩阵、割集矩阵

1. 图的矩阵表示

图的矩阵表示是指用矩阵描述图的拓扑性质，即KCL和KVL的矩阵形式。有三种矩阵形式：

结点 —— 支路 关联矩阵

回路 —— 支路 回路矩阵

割集 —— 支路 割集矩阵

2. 关联矩阵A

用矩阵形式描述结点和支路的关联性质。n个结点b条支路的图用n×b的矩阵描述：

$$A_a = \begin{array}{c|c} & \text{支路}\,b \rightarrow \\ \hline \text{结点}\,n \downarrow & \begin{bmatrix} n \times b \end{bmatrix} \end{array}$$

注意

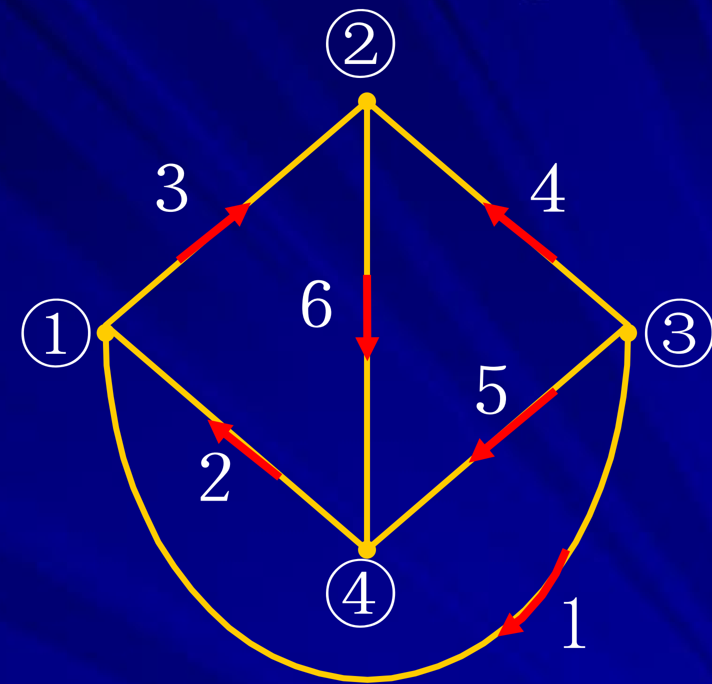
每一行对应一个结点，
每一列对应一条支路。

矩阵A_a的每一个元素定义为：

$$a_{jk} \begin{cases} a_{jk}=1 & \text{支路 } k \text{ 与结点 } j \text{ 关联，方向背离结点；} \\ a_{jk}=-1 & \text{支路 } k \text{ 与结点 } j \text{ 关联，方向指向结点；} \\ a_{jk}=0 & \text{支路 } k \text{ 与结点 } j \text{ 无关。} \end{cases}$$

例

$$A_a = \begin{array}{c} \text{结}\backslash\text{支} \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{array} \\ \begin{pmatrix} -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 \end{pmatrix} \end{array}$$



特点

①每一列只有两个非零元素，一个是+1，一个是-1，A_a的每一列元素之和为零。

②矩阵中任一行可以从其他n-1行中导出，即只有n-1行是独立的。

$$A_a = \begin{array}{c|c} \text{结}\backslash\text{支} & \begin{array}{cccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{array} \\ \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{array} & \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ \cancel{0} & \cancel{1} & \cancel{0} & \cancel{0} & \cancel{-1} & \cancel{-1} \end{bmatrix} \end{array}$$

支路b

$$A_a = \text{结点}\ n-1 \left[(n-1) \times b \right]$$

降阶关联矩阵A

特点 A的某些列只具有一个+1或一个－1，这样的列对应与划去结点相关联的一条支路。被划去的行对应的结点可以当作参考结点。

关联矩阵A的作用

①用关联矩阵A表示矩阵形式的KCL方程；

设：$[i]=[i_1 \quad i_2 \quad i_3 \quad i_4 \quad i_5 \quad i_6]^{\mathrm{T}}$

以结点④为参考结点

n-1个独立方程

$$[A][\,i\,]=\begin{pmatrix} -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \\ i_6 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -i_1-i_2+i_3 \\ i_3-i_4+i_6 \\ i_1+i_4+i_5 \end{bmatrix}=0$$

矩阵形式的KCL： $[\,A\,][\,i\,]=0$

②用矩阵$[A]^{T}$表示矩阵形式的KVL方程。

设：$[u]=[u_1\ u_2\ u_3\ u_4\ u_5\ u_6]^{T}$　$[u_n]=\begin{bmatrix}u_{n1}\\u_{n2}\\u_{n3}\end{bmatrix}$

$$[A]^{T}[u_n]=\begin{bmatrix}1&0&1\\-1&0&0\\1&-1&0\\0&-1&0\\0&0&1\\0&1&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_{n1}\\u_{n2}\\u_{n3}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-u_{n1}+u_{n3}\\-u_{n1}\\u_{n1}-u_{n2}\\-u_{n2}\\u_{n3}\\u_{n2}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}u_1\\u_2\\u_3\\u_4\\u_5\\u_6\end{bmatrix}$$

矩阵形式的KVL　$[u]=[A]^{T}[u_n]$

2. 回路矩阵B

独立回路与支路的关联性质可以用回路矩阵B描述。

$$[B]=\begin{array}{c|c} & \text{支路}\ b \\ \hline \text{独立回路}\ l & \begin{bmatrix} l \times b \end{bmatrix} \end{array}$$

注意

每一行对应一个独立回路，

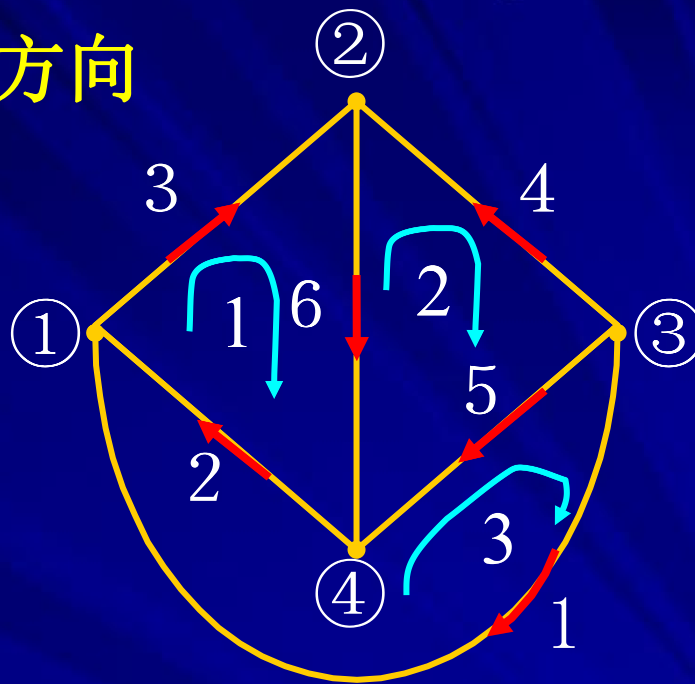
每一列对应一条支路。

矩阵B的每一个元素定义为：

$$b_{ij}\begin{cases} 1 & \text{支路}\ j\ \text{在回路}\ i\ \text{中，且方向一致；} \\ -1 & \text{支路}\ j\ \text{在回路}\ i\ \text{中，且方向相反；} \\ 0 & \text{支路}\ j\ \text{不在回路}\ i\ \text{中。} \end{cases}$$

例　取网孔为独立回路，顺时针方向

$$[B] = \begin{array}{c|cccccc} 回\backslash 支 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ \hline 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & -1 \\ 3 & 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{array}$$



注意　给定B可以画出对应的有向图。

基本回路矩阵B_f

独立回路对应一个树的单连枝回路得基本回路矩阵$[B_f]$

规定 ① 连支电流方向为回路电流方向；

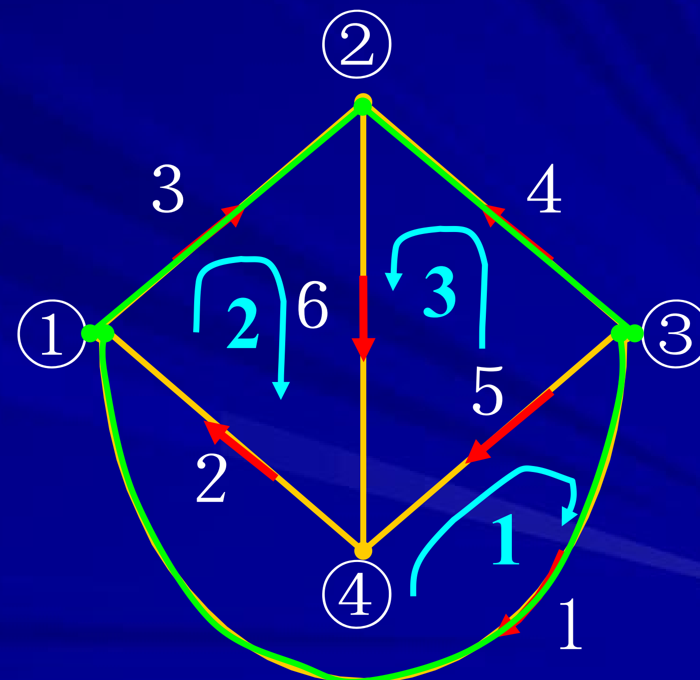
②支路排列顺序为先连支后树支，回路顺序与连支顺序一致。

例 选 2、5、6为树，连支顺序为1、 3 、 4 。

$$
[B]=\begin{array}{c|cccccc}
\text{回}\backslash\text{支} & 1 & 3 & 4 & 2 & 5 & 6 \\
\hline
1 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\
2 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\
3 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1
\end{array}
$$

$$
\underbrace{\begin{matrix}1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{matrix}}_{B_l}\qquad\underbrace{\begin{matrix}-1 & -1 & 0\\ 1 & 0 & 1\\ 0 & -1 & 1\end{matrix}}_{B_t}
$$

$$=[1\ \ B_t]$$



回路矩阵[B]的作用

①用回路矩阵[B]表示矩阵形式的KVL方程；

设 $[u]=[\underbrace{u_1\ u_3\ u_4}_{u_l}\ \underbrace{u_2\ u_5\ u_6}_{u_t}]$

l个独立KVL方程

$$[B][u]=\begin{pmatrix}1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1\\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1\end{pmatrix}\begin{bmatrix}u_1\\u_3\\u_4\\u_2\\u_5\\u_6\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}u_1-u_2-u_5\\u_3+u_2+u_6\\u_4-u_5+u_6\end{bmatrix}=0$$

矩阵形式的KVL：$[B][u]=0$

注意 连支电压可以用树支电压表示。

$$[\,B_f\,][\,u\,]=0 \longrightarrow [1 \quad B_{\mathrm{t}}\,]\begin{bmatrix} u_l \\ u_t \end{bmatrix}=0$$

$$u_l+B_t u_t=0 \qquad u_l=-B_t u_t$$

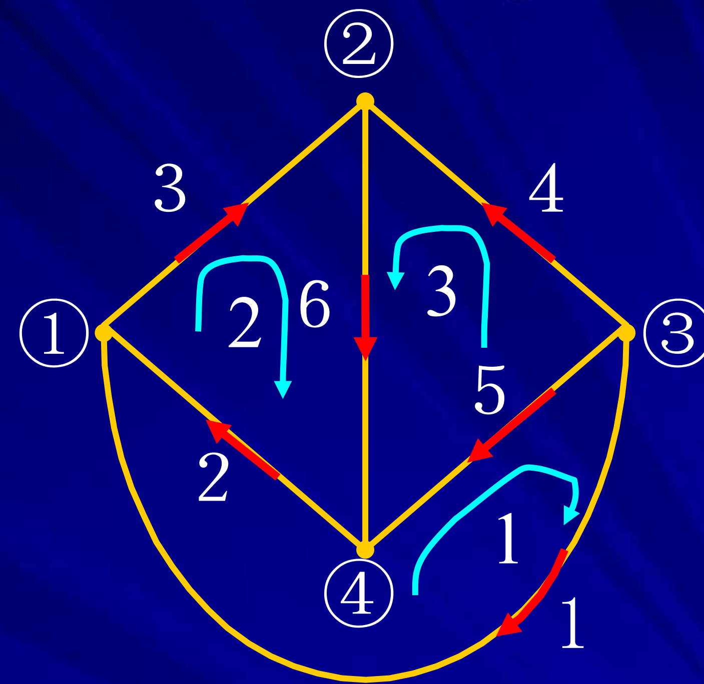
②用回路矩阵$[B]^{\mathrm{T}}$表示矩阵形式的KCL方程

设：$[i]=[i_1\ i_3\ i_4\ i_2\ i_5\ i_6\ ]^{\mathrm{T}}$

$$[i_l]=\begin{bmatrix} i_{l1} \\ i_{l2} \\ i_{l3} \end{bmatrix}$$

独立回路电流

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{l1} \\ i_{l2} \\ i_{l3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{l1} \\ i_{l2} \\ i_{l3} \\ -i_{l1}+i_{l2} \\ -i_{l1}-i_{l3} \\ i_{l2}+i_{l3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_2 \\ i_5 \\ i_6 \end{bmatrix}$$



矩阵形式的KCL：　$[\,B\,]^{\mathrm{T}}[\,i_l\,]=[\,i\,]$

注意　树支电流可以用连支电流表出。

$$[B_f]^T = \begin{bmatrix} 1 \\ B_t^T \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 \\ B_t^T \end{bmatrix}[i_l] = \begin{bmatrix} i_l \\ i_t \end{bmatrix} \rightarrow B_t^T i_l = i_t$$

3. 基本割集矩阵 $[Q_f]$

割集与支路的关联性质可以用割集矩阵描述，这里主要指基本割集矩阵。

$$[Q]= \begin{array}{c|c} & \text{支路}b \rightarrow \\ \hline \text{割集数}\downarrow & \begin{bmatrix} (n\text{-}1)\times b \end{bmatrix} \end{array}$$

注意

每一行对应一个基本割集，每一列对应一条支路.

矩阵Q的每一个元素定义为：

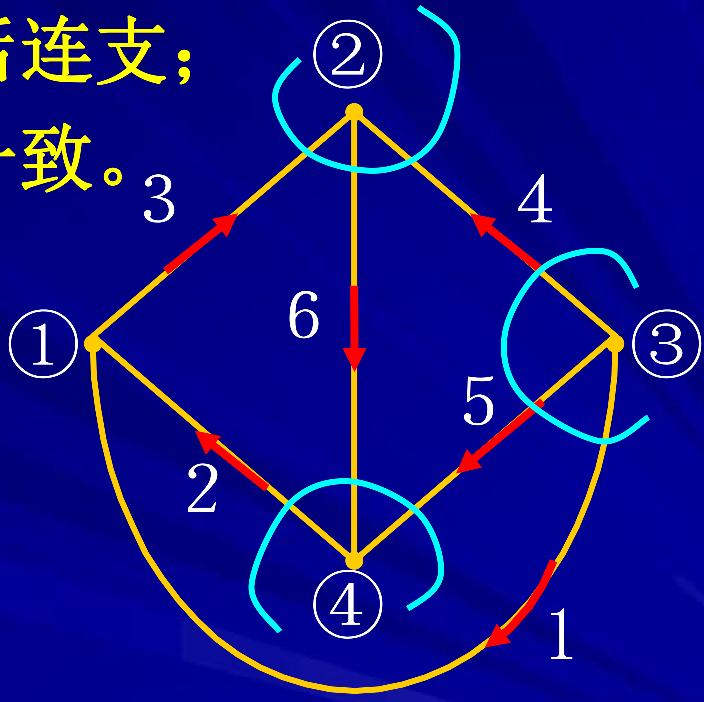
$$q_{ij}\begin{cases} 1 & \text{支路 } j \text{ 在割集 } i \text{ 中，且与割集方向一致；} \\ -1 & \text{支路 } j \text{ 在割集 } i \text{中，且与割集方向相反；} \\ 0 & \text{支路 } j \text{ 不在割集 } i \text{ 中。} \end{cases}$$

规定 基本割集矩阵$[Q_f]$

①割集方向为树支方向；

②支路排列顺序先树支后连支；

③割集顺序与树支次序一致。



例　选 1、2、3支路为树

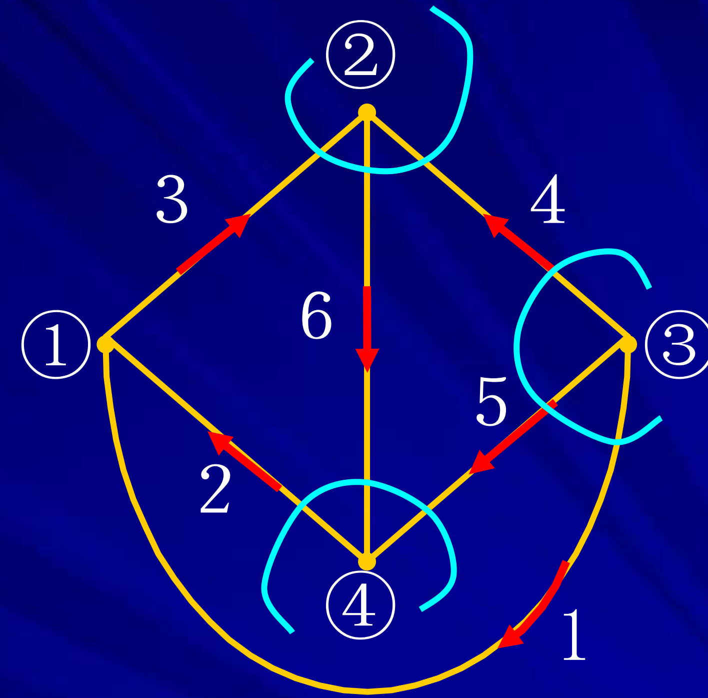
Q_1: {1, 4, 5}

Q_2: {2, 5, 6}

Q_3: {3, 4 , 6}

$$
\begin{array}{c}
\text{割集} \backslash \text{支} \quad 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \quad 6 \\
[Q_f]=\begin{array}{c} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{array}\left[\begin{array}{cccccc} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 \end{array}\right]
\end{array}
$$

$$\underbrace{\quad 1 \quad 2 \quad 3 \quad}_{Q_t} \quad \underbrace{\quad 4 \quad 5 \quad 6 \quad}_{Q_l}$$



$$=[1 \;\; Q_l]$$

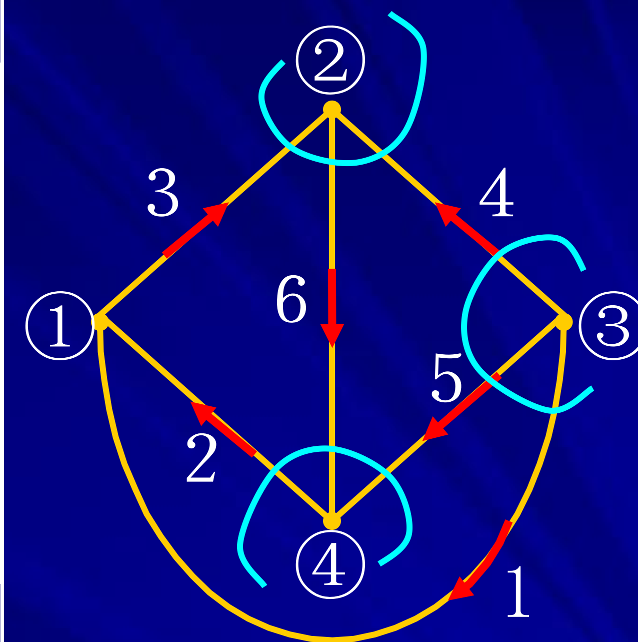
基本割集矩阵$[Q_f]$的作用

①用基本割集矩阵$[Q_f]$表示矩阵形式的KCL方程。

设　$[i]=[i_1 \; i_2 \; i_3 \; i_4 \; i_5 \; i_6]^{\mathrm{T}}$

$$[\,Q_f\,][\,i\,]=\begin{pmatrix}1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1\\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1\end{pmatrix}\begin{bmatrix}i_1\\ i_2\\ i_3\\ i_4\\ i_5\\ i_6\end{bmatrix}$$

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



n-1个独立KCL方程

矩阵形式的KCL：$[\,Q_f\,][\,i\,]=0$

②用$[Q_f]^T$表示矩阵形式的KVL方程

设树枝电压（或基本割集电压）：$u_t=[\ u_1\ u_2\ u_3\ ]^T$

$$[Q_f]^T[u_t]=\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\\1&0&1\\1&-1&0\\0&-1&-1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_{t1}\\u_{t2}\\u_{t3}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}u_{t1}\\u_{t2}\\u_{t3}\\u_{t1}+u_{t3}\\u_{t1}-u_{t2}\\-u_{t2}-u_{t3}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}u_1\\u_2\\u_3\\u_4\\u_5\\u_6\end{bmatrix}=[u]$$

矩阵形式的KVL：$[\ Q_f]^T[u_t\ ]=[u]$

注意 连支电压可以用树支电压表示。

$$[u]=\begin{bmatrix} u_t \\ u_l \end{bmatrix}=[Q_f]^T[u_t]=\begin{bmatrix} 1 \\ Q_l^T \end{bmatrix}[u_t]$$

$$\rightarrow u_l = Q_l^T u_t$$

小结

	A	B	Q
KCL	$[A][i]=0$	$[B]^T[i_l]=[i]$ $B_t^T i_l = i_t$	$[Q_f][i]=0$ $i_t = -Q_l i_l$
KVL	$[A]^T[u_n]=[u]$	$[B][u]=0$ $u_l = -B_t u_t$	$[Q]^T[u_t]=[u]$ $u_l = Q_l^T u_t$

15.3* 矩阵A、B_f、Q_f之间的关系

三个矩阵从不同角度表示同一网络的连接性质，它们之间自然存在着一定的关系。

1. A与B之间的关系

对同一有向图，支路排列次序相同时，满足：

$$\begin{cases} [u]=[A]^{\mathrm{T}}[u_{\mathrm{n}}] \\ [B][u]=0 \end{cases} \longrightarrow [B][A]^{\mathrm{T}}[u_{\mathrm{n}}]=0$$

$$[B][A]^{\mathrm{T}}=0 \quad \text{or} \quad [A][B]^{\mathrm{T}}=0$$

2. B_f与Q_f之间的关系

对同一有向图，支路排列次序相同时，满足：

$$\begin{cases} [i]=[B]^{\mathrm{T}}[i_l] \\ [Q][i]=0 \end{cases} \longrightarrow [Q][B]^{\mathrm{T}}[i_l]=0$$

$$\boxed{[Q][B]^{\mathrm{T}}=0 \quad \text{or} \quad [B][Q]^{\mathrm{T}}=0}$$

对同一有向图，任选一树，按先树枝后连枝顺序有：

$$[Q_f][B_f]^{\mathrm{T}}=[1\ \ Q_l]\begin{bmatrix} B_t^{\mathrm{T}} \\ 1 \end{bmatrix}=0 \qquad \boxed{Q_l=-B_t^{T}}$$

3. A与Q_f之间的关系

对同一有向图，任选一树，按先树枝后连枝顺序写出矩阵：

$$\begin{cases}[A]=[A_t \;\; A_l] \\ [B_f]=[B_t \;\; 1] \\ [Q_f]=[1 \;\; Q_l]\end{cases} \rightarrow [A][B_f]^{\mathrm{T}}=[A_t \;\; A_l]\begin{bmatrix}B_t^{\mathrm{T}} \\ 1\end{bmatrix}=0$$

$$A_t B_t^{\mathrm{T}}+A_l=0$$

$$\text{or} \;\; B_t^{\mathrm{T}}=-A_t^{-1}A_l$$

$$\rightarrow Q_l=-B_t^{\mathrm{T}}=A_t^{-1}A_l$$

$$\boxed{[Q_f]=[1 \;\; A_t^{-1}A_l]}$$

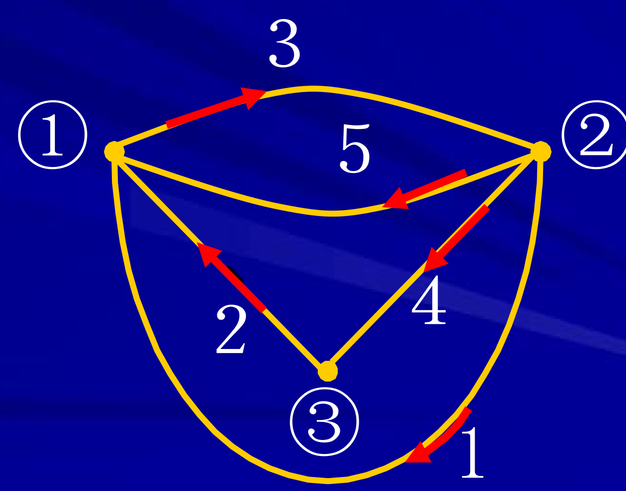
例　已知：
$$[B_f]=\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

求基本割集矩阵，并画出网络图。

解

$$\because \quad Q_l=-B_t^T=-\begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

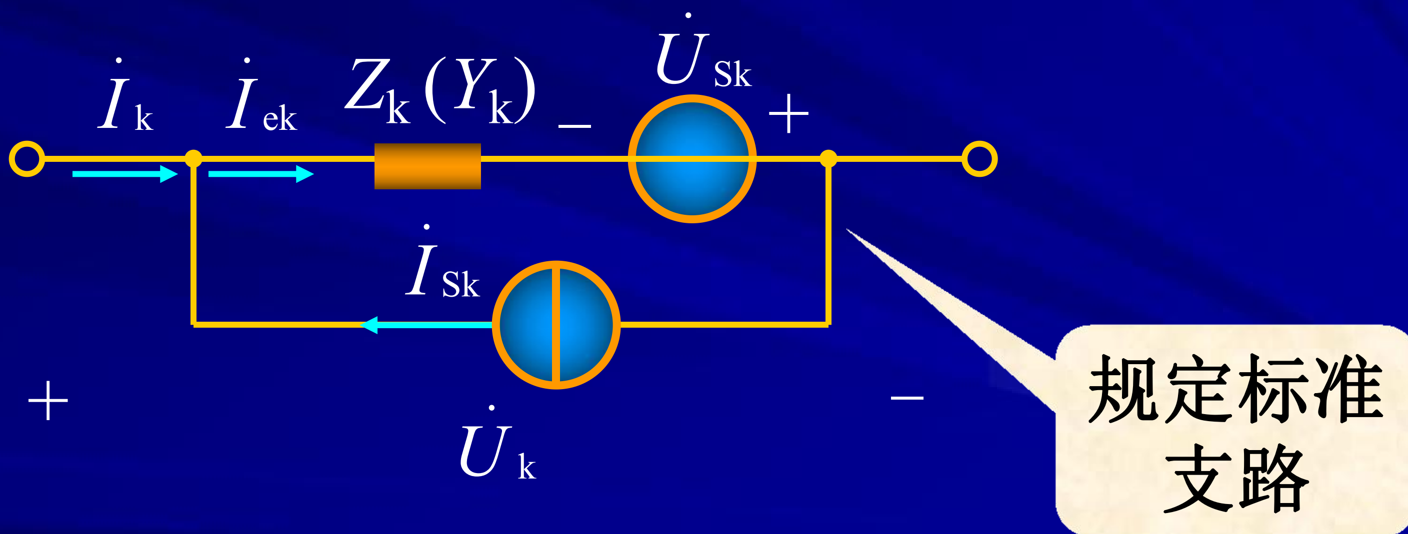
$$\therefore \quad [Q_f]=\begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \end{array}$$

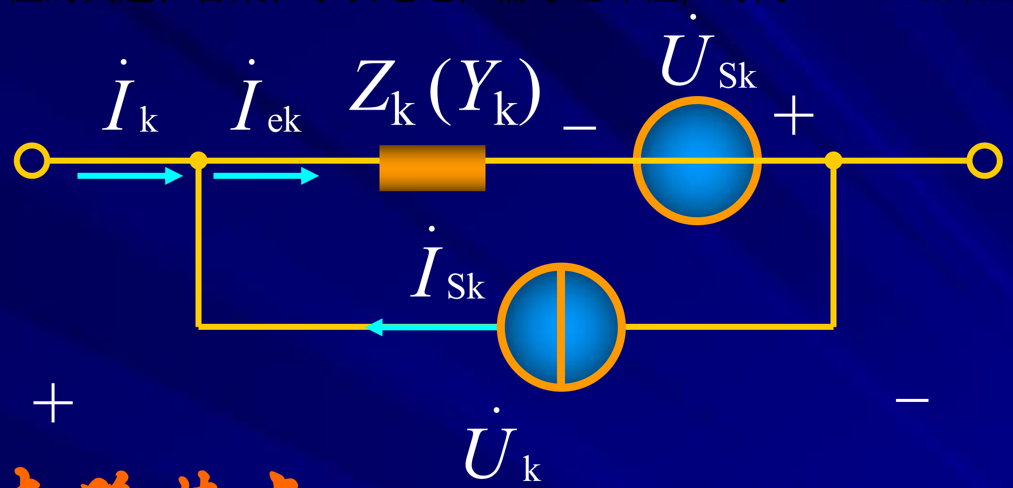


15.4 回路电流方程的矩阵形式

1.复合支路

反映元件性质的支路电压和支路电流关系的矩阵形式是网络矩阵分析法的基础。





复合支路特点

①支路的独立电压源和独立电流源的方向与支路电压、电流的方向相反；

②支路电压与支路电流的方向关联；

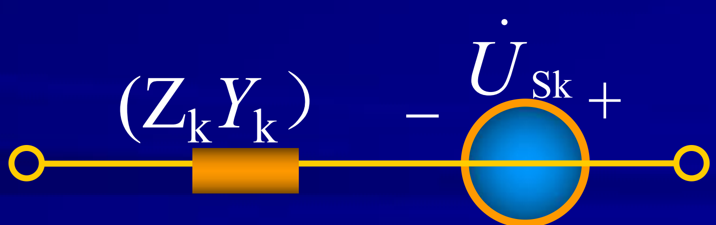
③支路的阻抗（或导纳）只能是单一的电阻、电容、电感，而不能是它们的组合。

即 $$Z_{K}=\begin{cases} R_{k} \\ j\omega L_{k} \\ \dfrac{1}{j\omega C_{K}} \end{cases}$$

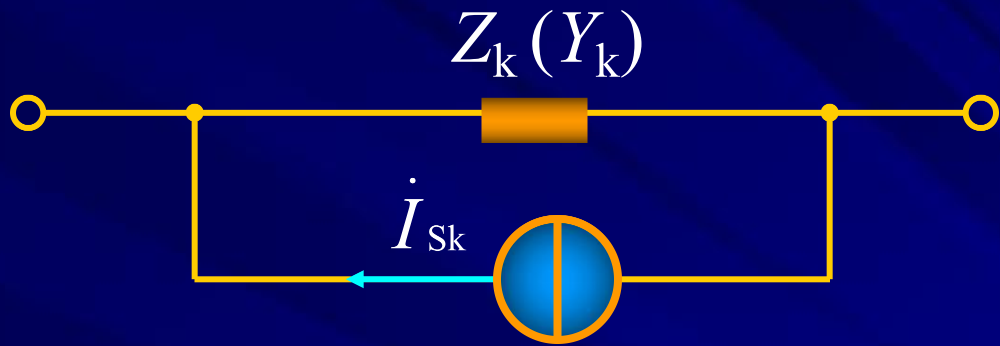
注意

复合支路定义了一条支路最多可以包含的不同元件数及连接方法，但允许缺少某些元件。

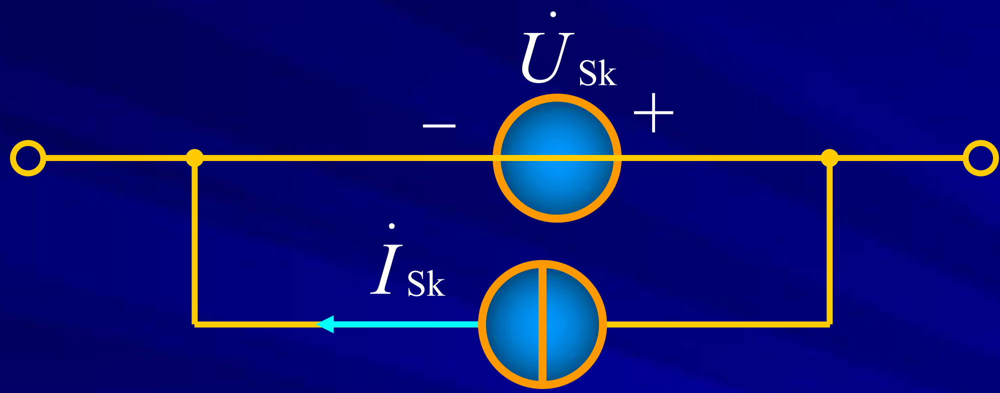
$\dot{U}_{Sk}=0 \quad \dot{I}_{Sk}=0$



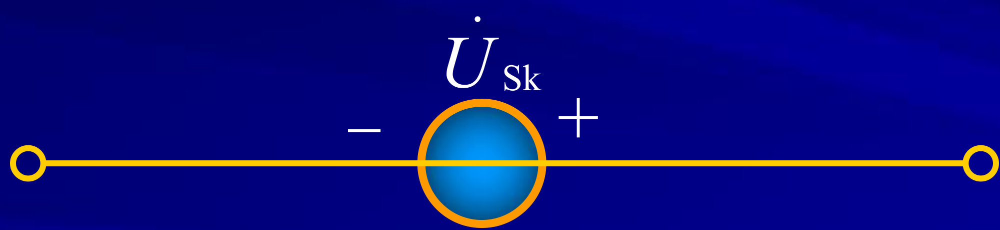
$\dot{I}_{Sk}=0$



$\dot U_{Sk}=0$

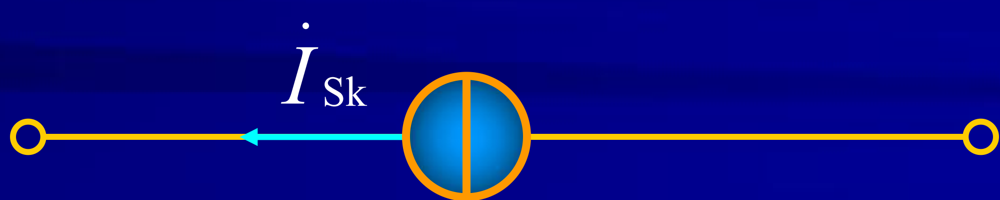


$Z_k(Y_k)=0$



$\dot I_{Sk}=0$

$Z_k(Y_k)=0$



$\dot U_{Sk}=0$

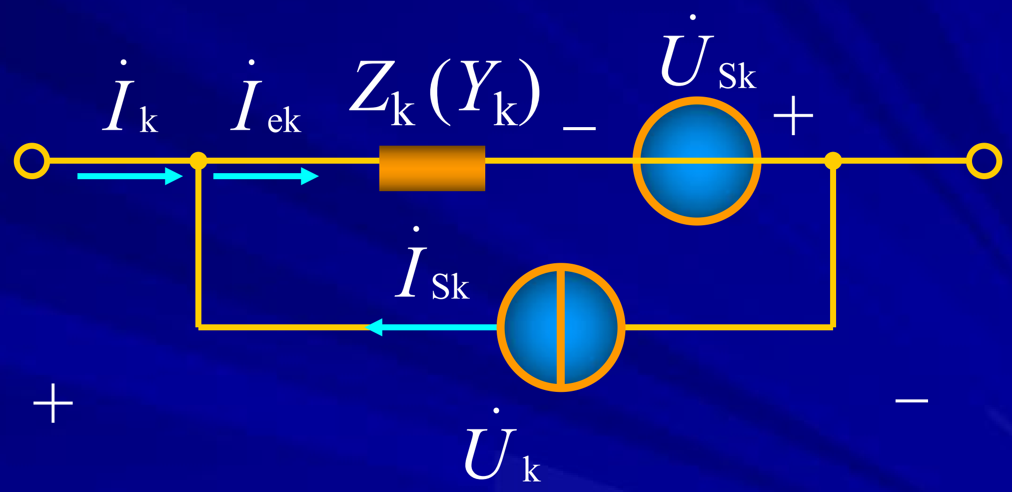
$Z_k(Y_k)=0$

2. 支路阻抗矩阵形式

①电路中电感之间无耦合

$$\dot{U}_k=(\dot{I}_k+\dot{I}_{Sk})Z_k-\dot{U}_{Sk}$$

如有b条支路，则有：



$$\dot{U}_1=(\dot{I}_1+\dot{I}_{S1})Z_1-\dot{U}_{S1}$$

$$\dot{U}_2=(\dot{I}_2+\dot{I}_{S2})Z_2-\dot{U}_{S2}$$

… … … …

$$\dot{U}_b=(\dot{I}_b+\dot{I}_{Sb})Z_b-\dot{U}_{Sb}$$

设

$$[\dot{I}] = [\dot{I}_1 \dot{I}_2 \cdots\cdots \dot{I}_b]^T$$ → 支路电流列向量

$$[\dot{U}] = [\dot{U}_1 \dot{U}_2 \cdots\cdots \dot{U}_b]^T$$ → 支路电压列向量

$$[\dot{U}_s] = [\dot{U}_{s1} \dot{U}_{s2} \cdots\cdots \dot{U}_{sb}]^T$$ → 电压源的电压列向量

$$[\dot{I}_s] = [\dot{I}_{s1} \dot{I}_{s2} \cdots\cdots \dot{I}_{sb}]^T$$ → 电流源的电流列向量

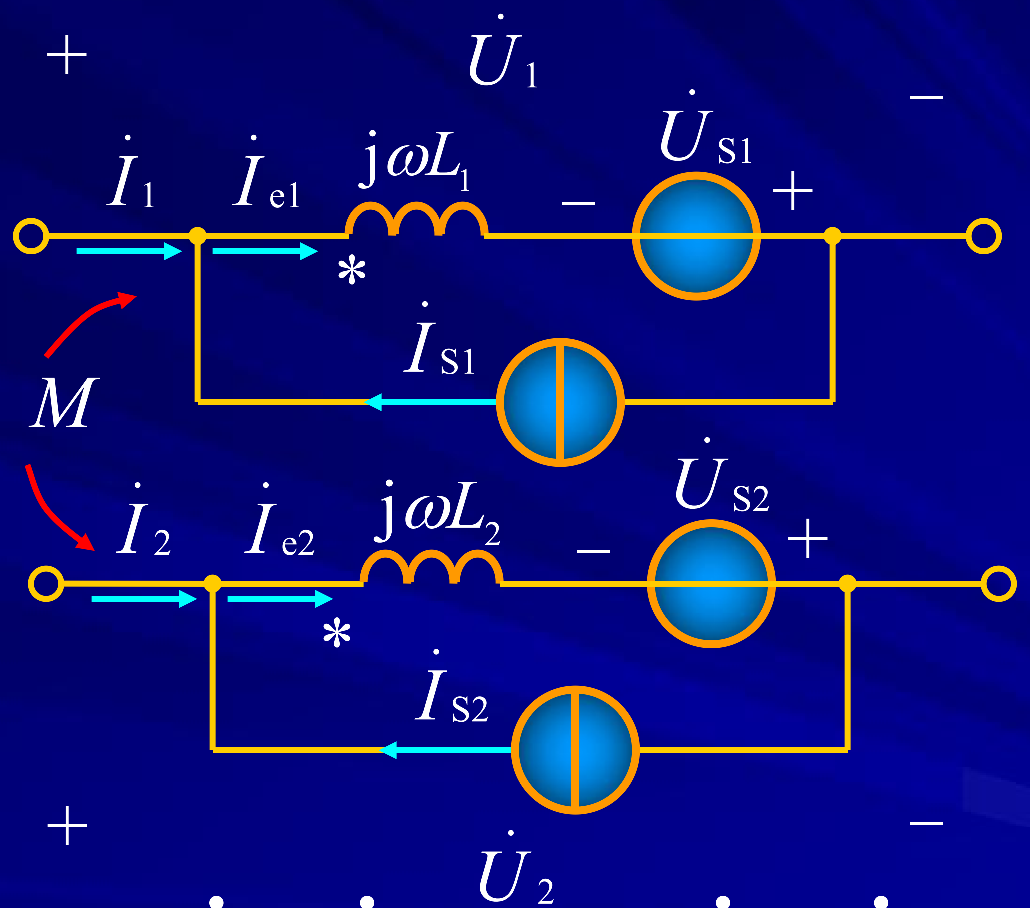
$$[Z] = \mathrm{diag}[Z_1 Z_2 \cdots\cdots Z_b]$$ → 阻抗矩阵

整个电路的支路电压、电流关系矩阵：

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \vdots \\ \dot{U}_b \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} Z_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & Z_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & Z_b \end{bmatrix}}_{b\times b\text{阶对角阵}} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 + \dot{I}_{s1} \\ \vdots \\ \dot{I}_b + \dot{I}_{sb} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{U}_{s1} \\ \vdots \\ \dot{U}_{sb} \end{bmatrix}$$

$$\left[\dot{U}\right] = [Z]\left[\dot{I}\right] + [Z]\left[\dot{I}_s\right] - \left[\dot{U}_s\right]$$

②电路中电感之间有耦合



$$\dot U_1 = j\omega L_1(\dot I_{S1}+\dot I_1)+j\omega M(\dot I_{S2}+\dot I_2)-\dot U_{S1}$$

$$\dot U_2 = j\omega L_2(\dot I_{S2}+\dot I_2)+j\omega M(\dot I_{S1}+\dot I_1)-\dot U_{S2}$$

$$\dot{U}_1 = j\omega L_1(\dot{I}_{S1} + \dot{I}_1) + j\omega M(\dot{I}_{S2} + \dot{I}_2) - \dot{U}_{S1}$$

$$\dot{U}_2 = j\omega L_2(\dot{I}_{S2} + \dot{I}_2) + j\omega M(\dot{I}_{S1} + \dot{I}_1) - \dot{U}_{S2}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\omega L_1 & j\omega M \\ j\omega M & j\omega L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{S1} + \dot{I}_1 \\ \dot{I}_{S2} + \dot{I}_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{U}_{S1} \\ \dot{U}_{S2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \vdots \\ \dot{U}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\omega L_1 & j\omega M & & & 0 \\ j\omega M & j\omega L_2 & & & \\ & & Z_3 & & \\ & & & \ddots & \\ 0 & & & & Z_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{S1} + \dot{I}_1 \\ \vdots \\ \dot{I}_{Sb} + \dot{I}_b \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{U}_{S1} \\ \vdots \\ \dot{U}_{sb} \end{bmatrix}$$

$$[Z]=\begin{bmatrix} j\omega L_1 & j\omega M & & & 0 \\ j\omega M & j\omega L_2 & & & \\ & & Z_3 & & \\ & & & \ddots & \\ 0 & & & & Z_b \end{bmatrix}$$

Z不是对角阵

如1支路至g支路间均有互感

$$\dot{U}_1=Z_1\dot{I}_{e1}\pm j\omega M_{12}\dot{I}_{e2}\pm j\omega M_{13}\dot{I}_{e3}\pm\cdots\pm j\omega M_{1g}\dot{I}_{eg}-\dot{U}_{S1}$$

$$\dot{U}_2=\pm j\omega M_{21}\dot{I}_{e1}+Z_2\dot{I}_{e2}\pm j\omega M_{23}\dot{I}_{e3}\pm\cdots\pm j\omega M_{2g}\dot{I}_{eg}-\dot{U}_{S2}$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$

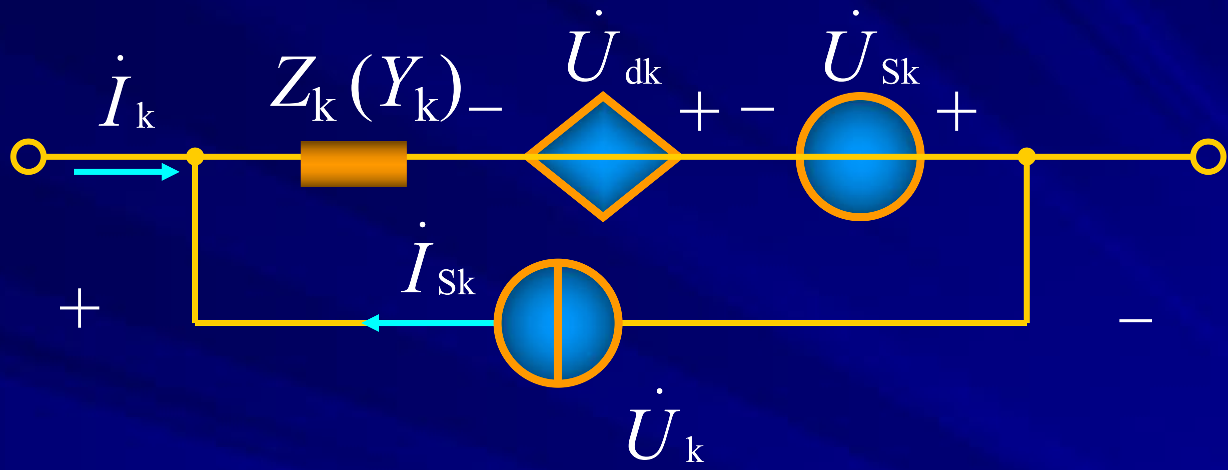
$$\dot{U}_g=\pm j\omega M_{g1}\dot{I}_{e1}\pm j\omega M_{g2}\dot{I}_{e2}\pm j\omega M_{g3}\dot{I}_{e3}\pm\cdots\pm Z_g\dot{I}_{eg}-\dot{U}_{Sg}$$

$$\begin{bmatrix} \dot U_1 \\ \dot U_2 \\ \vdots \\ \dot U_g \\ \dot U_h \\ \vdots \\ \dot U_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & \pm j\omega M_{12} & \cdots & \pm j\omega M_{1g} & 0 & \cdots & 0 \\ \pm j\omega M_{21} & Z_2 & \cdots & \pm j\omega M_{2g} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \pm j\omega M_{g1} & \pm j\omega M_{g2} & \cdots & \pm Z_g & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & Z_h & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & Z_b \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} \dot I_1 + \dot I_{S1} \\ \dot I_2 + \dot I_{S2} \\ \vdots \\ \dot I_g + \dot I_{Sg} \\ \dot I_h + \dot I_{Sh} \\ \vdots \\ \dot I_b + \dot I_{Sb} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot U_{S1} \\ \dot U_{S2} \\ \vdots \\ \dot U_{Sg} \\ \dot U_{Sh} \\ \vdots \\ \dot U_{Sb} \end{bmatrix}$$

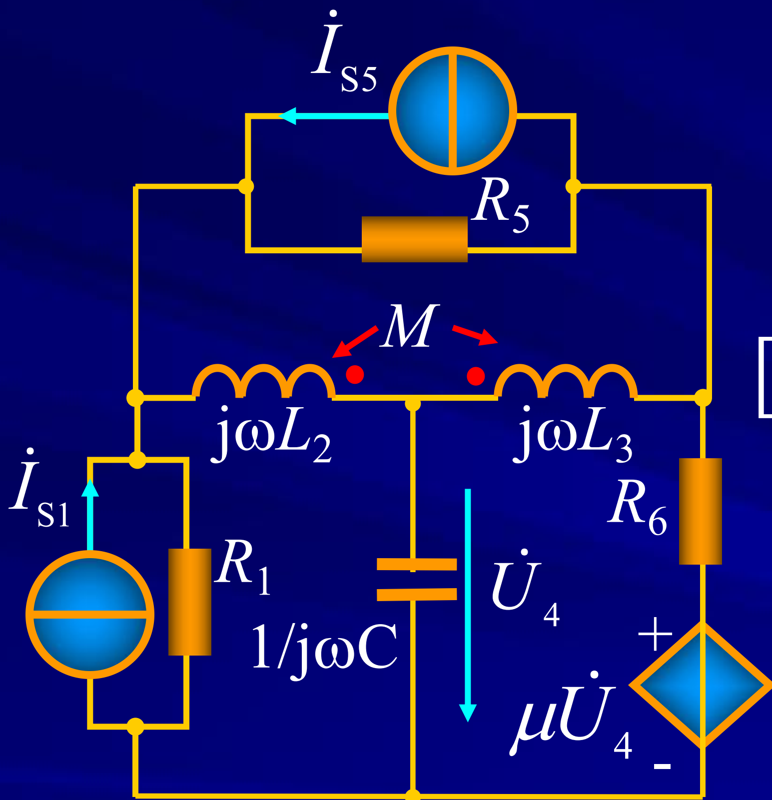
$$\dot U = Z(\dot I + \dot I_S) - \dot U_S$$

③电路中有受控电压源



[Z]的非主对角元素将有与受控电压源的控制系数有关的元素。

例 写出图示电路的阻抗矩阵



$$[Z]=\begin{bmatrix} R_1 & \cdots & & & & 0 \\ 0 & j\omega L_2 & \pm j\omega M & \cdots & & 0 \\ 0 & \pm j\omega M & j\omega L_3 & \cdots & & 0 \\ 0 & \cdots & & 1/j\omega C & \cdots & 0 \\ 0 & & \cdots & \mu/j\omega C & R_5 & 0 \\ 0 & & \cdots & & & R_6 \end{bmatrix}$$

3. 回路电流方程的矩阵形式

KVL： $[B]\left[\dot{U}_{\mathrm{b}}\right]=0$

KCL： $\left[\dot{I}_{\mathrm{b}}\right]=[B]^{\mathrm{T}}\left[\dot{I}_{l}\right]$

回路电流$[i_l]$
(b-n+1)×1阶

支路方程： $\left[\dot{U}_{\mathrm{b}}\right]=[Z]\left[\dot{I}_{\mathrm{b}}\right]+[Z]\left[\dot{I}_{\mathrm{S}}\right]-\left[\dot{U}_{\mathrm{S}}\right]$

$$[B]\left[\dot{U}_{\mathrm{b}}\right]=[B][Z]\left[\dot{I}_{\mathrm{b}}\right]+[B][Z]\left[\dot{I}_{\mathrm{S}}\right]-[B]\left[\dot{U}_{\mathrm{S}}\right]=0$$

$$[B][Z][B]^{T}\left[\dot{I}_{l}\right]=[B]\left[\dot{U}_{\mathrm{S}}\right]-[B][Z]\left[\dot{I}_{\mathrm{S}}\right]$$

$$[B][Z][B]^T\left[\dot{I}_l\right]=[B]\left[\dot{U}_S\right]-[B][Z]\left[\dot{I}_S\right]$$

$$\left[Z_l\right]=[B][Z][B]^{\mathrm{T}}$$ → 回路阻抗阵，主对角线元素为自阻抗，其余元素为互阻抗。

$$\left[\dot{U}_{lS}\right]=[B]\left[\dot{U}_S\right]-[B][Z]\left[\dot{I}_S\right]$$ → 回路电压源向量

$$[Z_l]\left[\dot{I}_l\right]=\left[\dot{U}_{lS}\right]$$ → 回路矩阵方程

小结 回路分析法的步骤：

①从已知网络，写出 $[B]$ $[Z]$ $[\dot{U}_S]$ $[\dot{I}_S]$

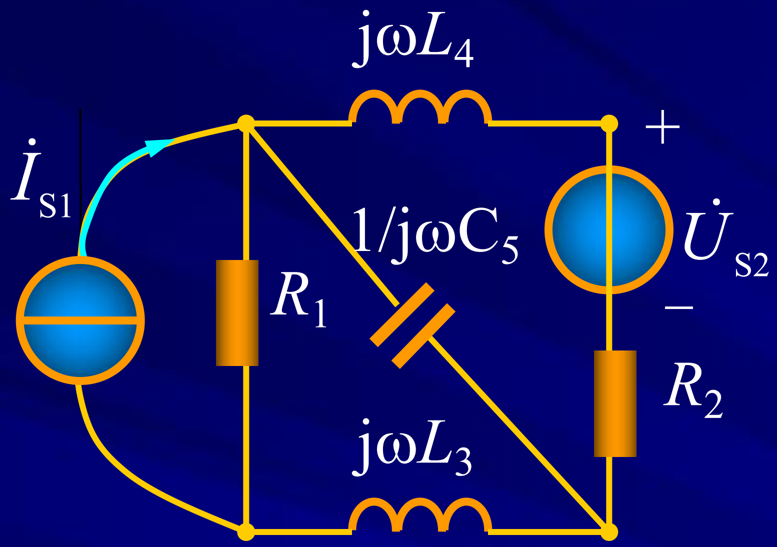
②求出 $[Z_l]$ $[\dot{U}_l]$ 列出回路方程

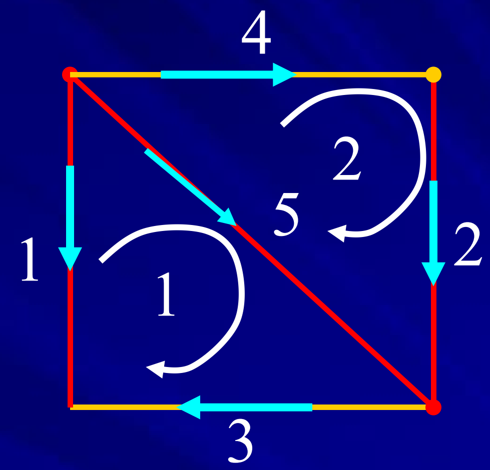
$$[Z_l][\dot{I}_l]=[\dot{U}_{lS}]$$

③求出 $[\dot{I}_l]$ 由KCL解出 $[\dot{I}_b]=[B]^{\mathrm{T}}[\dot{I}_l]$

根据支路方程解出 $[\dot{U}_b]$

例　用矩阵形式列出电路的回路电流方程。





解　做出有向图，选支路1，2，5为树枝。

$$
\begin{array}{cc}
 & \begin{array}{ccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{array} \\
[B]= \begin{array}{c} 1 \\ 2 \end{array} & \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}
\end{array}
$$

$$Z=\mathrm{diag}\left[R_1, R_2, \mathrm{j}\omega L_3, \mathrm{j}\omega L_4, \frac{1}{\mathrm{j}\omega C_5}\right]$$

$$\dot{U}_{\mathrm{S}}=[0\ \ -\dot{U}_{\mathrm{S2}}\ \ 0\ \ 0\ \ 0]^{\mathrm{T}}$$

$$\dot{I}_{\mathrm{S}}=[\dot{I}_{\mathrm{S1}}\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0]^{\mathrm{T}}$$

把上式各矩阵代入回路电流方程的矩阵形式

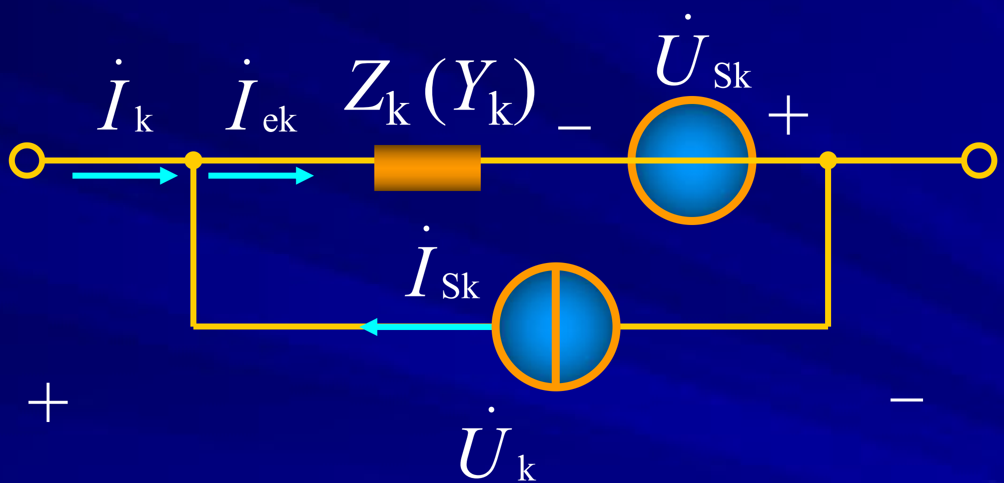
$$[B][Z][B]^T\left[\dot{I}_l\right]=[B]\left[\dot{U}_{\mathrm{S}}\right]-[B][Z]\left[\dot{I}_{\mathrm{S}}\right]$$

$$\Rightarrow\begin{bmatrix} R_1+\mathrm{j}\omega L_3+\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_5} & -\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_5} \\ -\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_5} & R_2+\mathrm{j}\omega L_4+\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_5} \end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_{l1}\\ \dot{I}_{l2}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}R_1\dot{I}_{\mathrm{S1}}\\ -\dot{U}_{\mathrm{S2}}\end{bmatrix}$$

15.5 结点电压方程的矩阵形式

1. 支路导纳矩阵形式

①电路中不含互感和受控源



$$\dot{U}_k = (\dot{I}_k + \dot{I}_{Sk})Z_k - \dot{U}_{Sk}$$

$$\dot{I}_k = Y_k\dot{U}_k + Y_k\dot{U}_{Sk} - \dot{I}_{Sk}$$

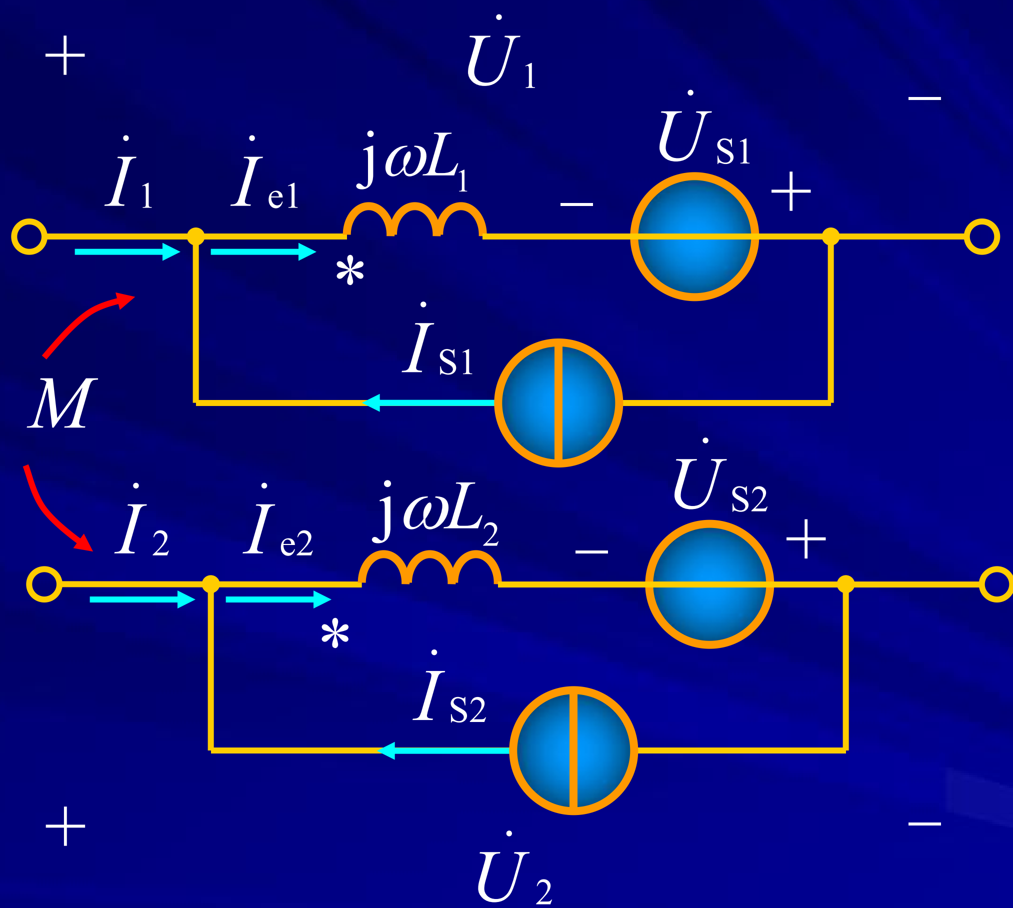
$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \vdots \\ \dot{I}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & Y_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & Y_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 + \dot{U}_{s1} \\ \vdots \\ \dot{U}_b + \dot{U}_{sb} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{I}_{s1} \\ \vdots \\ \dot{I}_{sb} \end{bmatrix}$$

$$\boxed{\left[\dot{I}\right] = [Y]\left[\dot{U}\right] + [Y]\left[\dot{U}_S\right] - \left[\dot{I}_S\right]}$$

$$[Y]=[Z]^{-1}=\begin{bmatrix} Y_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & Y_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & Y_b \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \frac{1}{Z_1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{1}{Z_2} & \cdots & 0 \\ \vdots & & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{1}{Z_b} \end{bmatrix}$$

b×b阶对角阵

②电路中电感之间有耦合



$$[Z_{11}] = \begin{bmatrix} j\omega L_1 & j\omega M \\ j\omega M & j\omega L_2 \end{bmatrix}$$

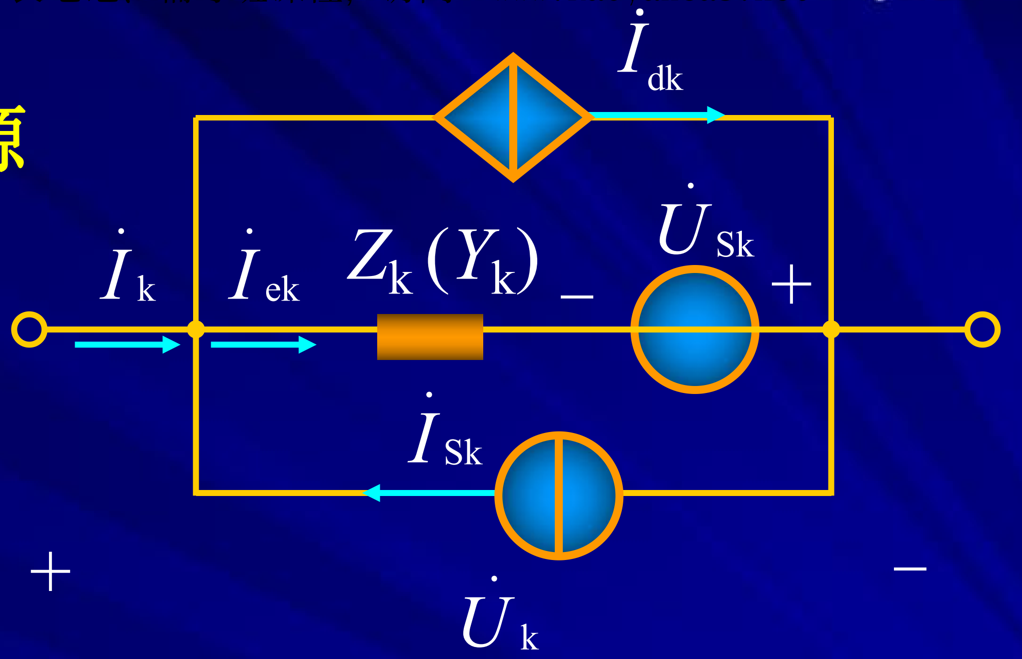
$$[Y]=[Z]^{-1}=\begin{bmatrix} Z_{11}^{-1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{1}{Z_2} & \cdots & 0 \\ \vdots & & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{1}{Z_b} \end{bmatrix}$$

$$[Z_{11}]^{-1}=\begin{bmatrix} j\omega L_1 & j\omega M \\ j\omega M & j\omega L_2 \end{bmatrix}^{-1}=\begin{bmatrix} \frac{L_2}{\Delta} & -\frac{M}{\Delta} \\ -\frac{M}{\Delta} & \frac{L_1}{\Delta} \end{bmatrix}$$

$$\Delta=j\omega(L_1L_2-M^2)$$

③电路中有受控电源

(a) $\dot{I}_{dk}$ 为VCCS



设： $\dot{I}_{dk}=g_{kj}\dot{U}_{ej}$

$$\dot{I}_{ek}=Y_k\dot{U}_{ek}=Y_k(\dot{U}_k+\dot{U}_{Sk})$$

$$\dot{I}_{dk}=g_{kj}\dot{U}_{ej}=g_{kj}(\dot{U}_j+\dot{U}_{Sj})$$

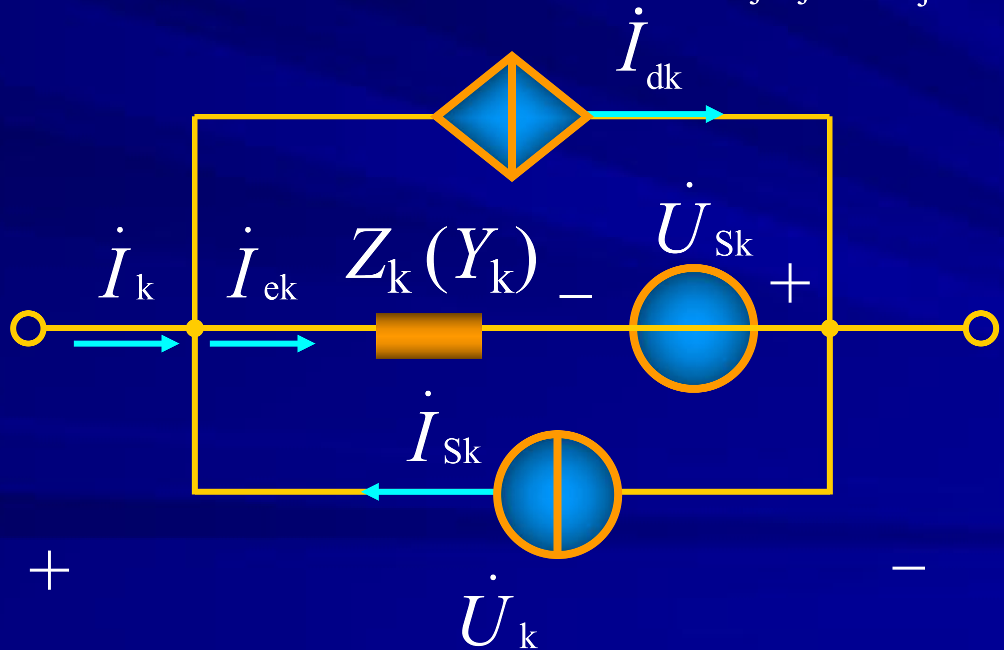
$$\dot{I}_k=Y_k(\dot{U}_k+\dot{U}_{Sk})+g_{kj}(\dot{U}_j+\dot{U}_{Sj})-\dot{I}_{Sk}$$

(2) $\dot{I}_{\mathrm{dk}}$ 为 CCCS

设：$\dot{I}_{\mathrm{dk}} = \beta_{\mathrm{kj}} \dot{I}_{\mathrm{ej}}$

$$\dot{I}_{\mathrm{ej}} = Y_{\mathrm{j}}(\dot{U}_{\mathrm{j}} + \dot{U}_{\mathrm{Sj}})$$

$$\Rightarrow \dot{I}_{\mathrm{k}} = Y_{\mathrm{k}}(\dot{U}_{\mathrm{k}} + \dot{U}_{\mathrm{Sk}}) + \beta_{\mathrm{kj}} Y_{\mathrm{j}}(\dot{U}_{\mathrm{j}} + \dot{U}_{\mathrm{Sj}}) - \dot{I}_{\mathrm{Sk}}$$



考虑b个支路时：

若：$\dot{I}_k = Y_k(\dot{U}_k + \dot{U}_{Sk}) + g_{kj}(\dot{U}_j + \dot{U}_{Sj}) - \dot{I}_{Sk}$

$$
\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \vdots \\ \dot{I}_k \\ \vdots \\ \dot{I}_j \\ \vdots \\ \dot{I}_b \end{bmatrix}
=
\begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} & & k & j & \end{array} \\ \begin{bmatrix} Y_1 & & & & 0 \\ & \ddots & & & \\ & & Y_k & g_{kj} & \\ & & & \ddots & \\ & & & Y_j & \\ & & & & \ddots \\ 0 & & & & Y_b \end{bmatrix} \end{array}
\begin{bmatrix} \dot{U}_1 + \dot{U}_{S1} \\ \vdots \\ \dot{U}_k + \dot{U}_{Sk} \\ \vdots \\ \dot{U}_j + \dot{U}_{Sj} \\ \vdots \\ \dot{U}_b + \dot{U}_{Sb} \end{bmatrix}
-
\begin{bmatrix} \dot{I}_{s1} \\ \vdots \\ \dot{I}_{sk} \\ \vdots \\ \dot{I}_{sj} \\ \vdots \\ \dot{I}_{Sb} \end{bmatrix}
$$

若：$\dot{I}_k = Y_k(\dot{U}_k + \dot{U}_{Sk}) + \beta_{kj}Y_j(\dot{U}_j + \dot{U}_{Sj}) - \dot{I}_{Sk}$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \vdots \\ \dot{I}_k \\ \vdots \\ \dot{I}_j \\ \vdots \\ \dot{I}_b \end{bmatrix} = \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} & & \text{k} & & \text{j} \end{array} \\ \begin{bmatrix} Y_1 & & & & & & 0 \\ & \ddots & & & & & \\ & & Y_k & & \boxed{\beta_{kj}Y_j} & & \\ & & & \ddots & & & \\ & & & & Y_j & & \\ & & & & & \ddots & \\ 0 & & & & & & Y_b \end{bmatrix} \end{array} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 + \dot{U}_{S1} \\ \vdots \\ \dot{U}_k + \dot{U}_{Sk} \\ \vdots \\ \dot{U}_j + \dot{U}_{Sj} \\ \vdots \\ \dot{U}_b + \dot{U}_{Sb} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{I}_{s1} \\ \vdots \\ \dot{I}_{sk} \\ \vdots \\ \dot{I}_{sj} \\ \vdots \\ \dot{I}_{Sb} \end{bmatrix}$$

2. 结点电压方程的矩阵形式

支路方程： $$\left[\dot{I}\right]=[Y]\left[\dot{U}\right]+[Y]\left[\dot{U}_{s}\right]-\left[\dot{I}_{s}\right]$$

KCL $$[A]\left[\dot{I}\right]=0$$

$$\rightarrow [A][Y]\left[\dot{U}\right]+[A][Y]\left[\dot{U}_{s}\right]-[A]\left[\dot{I}_{s}\right]=0$$

KVL $$\left[\dot{U}\right]=[A]^{T}\left[\dot{U}_{n}\right]$$

$$\rightarrow [A][Y][A]^{T}\left[\dot{U}_{n}\right]=[A]\left[\dot{I}_{s}\right]-[A][Y]\left[\dot{U}_{s}\right]=\left[\dot{I}_{sn}\right]$$

$$\underbrace{[A][Y][A]^{T}}_{[Y_n]}\left[\dot{U}_{n}\right]=[A]\left[\dot{I}_{s}\right]-[A][Y]\left[\dot{U}_{S}\right]=\left[\dot{I}_{sn}\right]$$

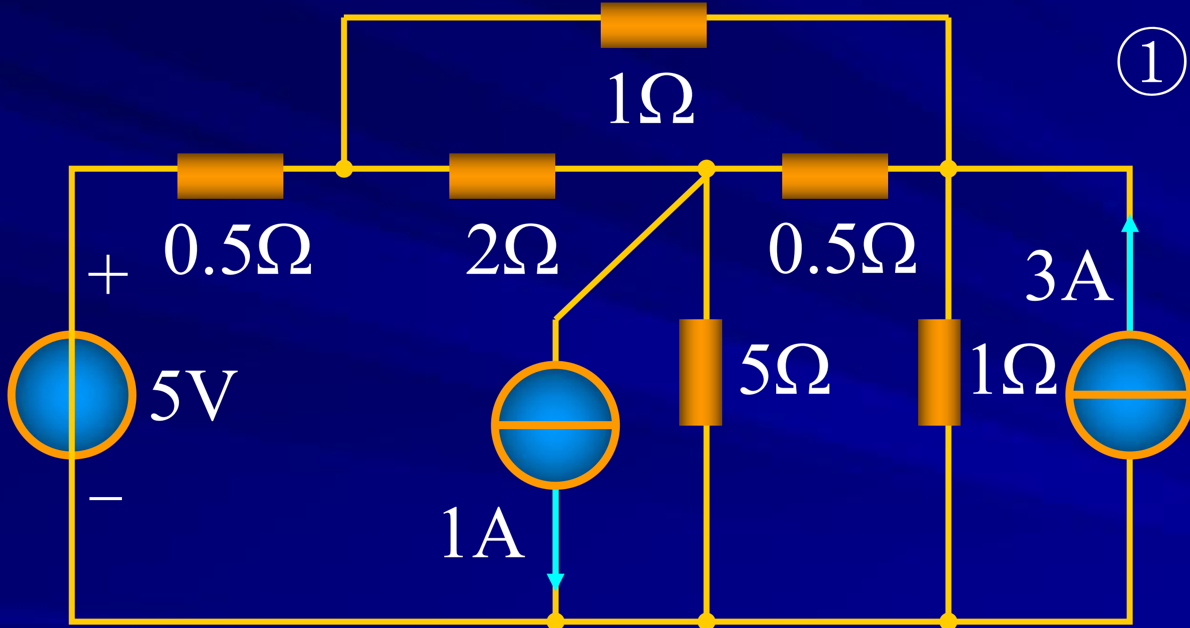
结点导纳阵

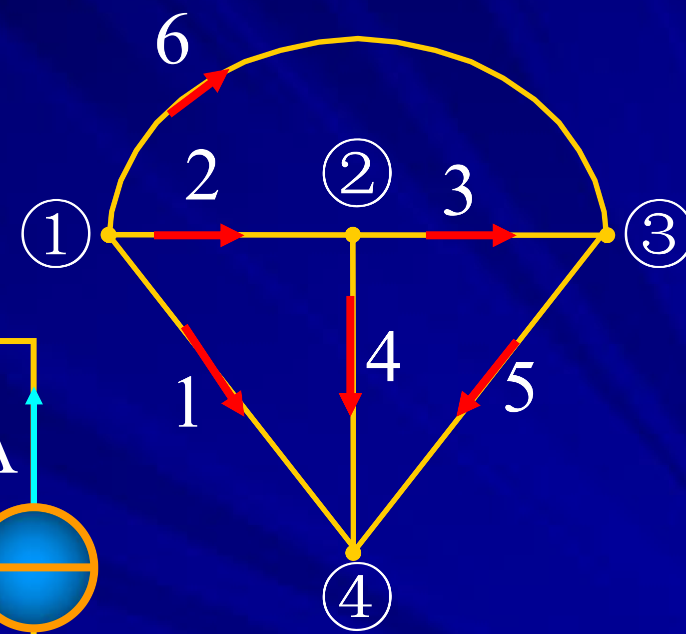
独立电源引起的流入结点的电流列向量

$$\boxed{[Y_{n}]\left[\dot{U}_{n}\right]=\left[\dot{I}_{Sn}\right]}$$

小结　结点分析法的步骤

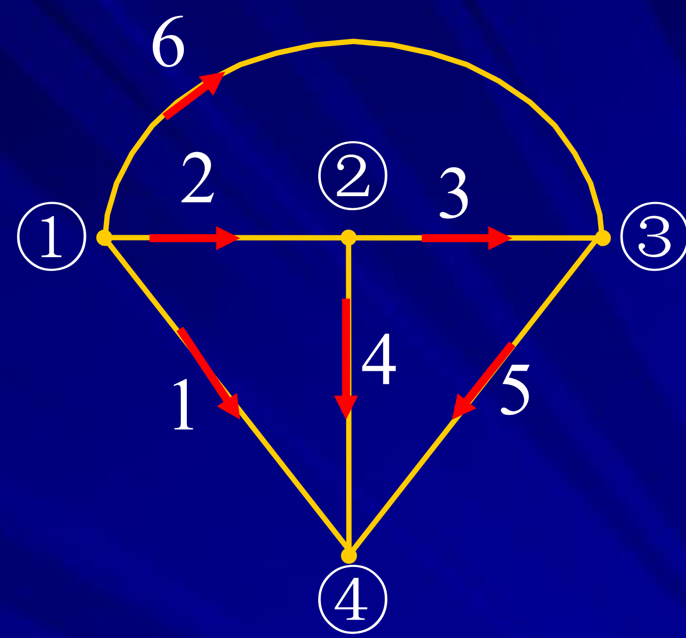
第一步：把电路抽象为有向图





第二步：形成矩阵[*A*]

$$[A]=\begin{array}{c} \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{array} \\ \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix} \end{array}$$



第三步：形成矩阵[*Y*]

$$[Y]=\begin{bmatrix} 2 & & & & & \\ & 0.5 & & & & \\ & & 2 & & & \\ & & & 0.2 & & \\ & & & & 1 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix}$$

第四步：形成$[U_S]$、$[I_S]$

$$[U_S]=[\ -5\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ ]^T$$

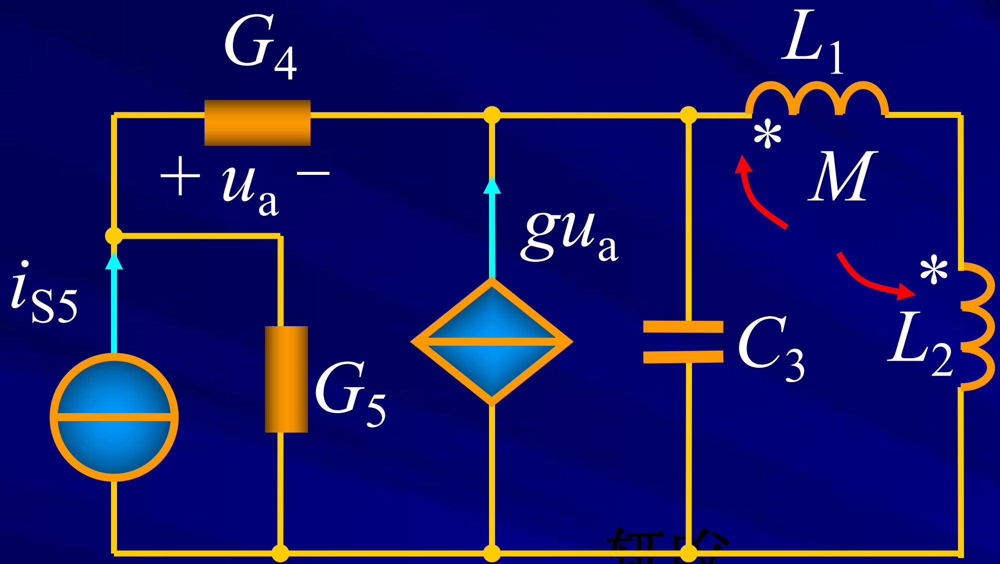
$$[I_S]=[0\ \ 0\ \ 0\ \ -1\ \ 3\ \ 0\ ]^T$$

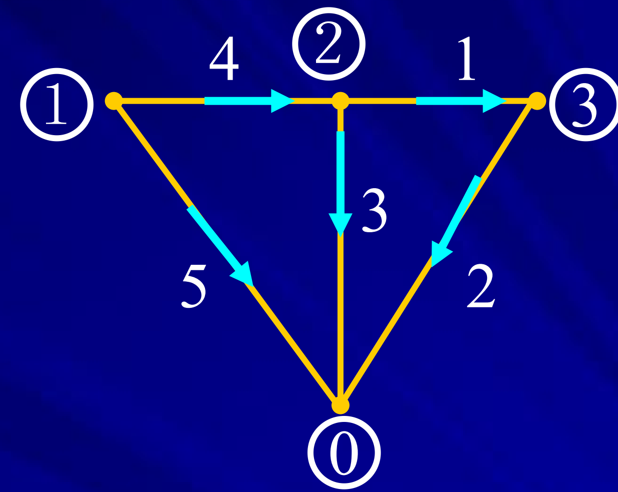
第五步：用矩阵乘法求得结点方程

$$[A][Y][A]^{\mathrm{T}}\left[\dot{U}_{\mathrm{n}}\right]=[A]\left[\dot{I}_{\mathrm{S}}\right]-[A][Y]\left[\dot{U}_{\mathrm{S}}\right]=\left[\dot{I}_{\mathrm{sn}}\right]$$

$$\begin{bmatrix} 3.5 & -0.5 & 0 \\ -0.5 & 2.7 & -2 \\ -1 & -2 & 4 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{U}_{\mathrm{n1}} \\ \dot{U}_{\mathrm{n2}} \\ \dot{U}_{\mathrm{n3}} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 50 \\ -1 \\ 3 \end{bmatrix}$$

例 用矩阵形式列出电路的结点电压方程。

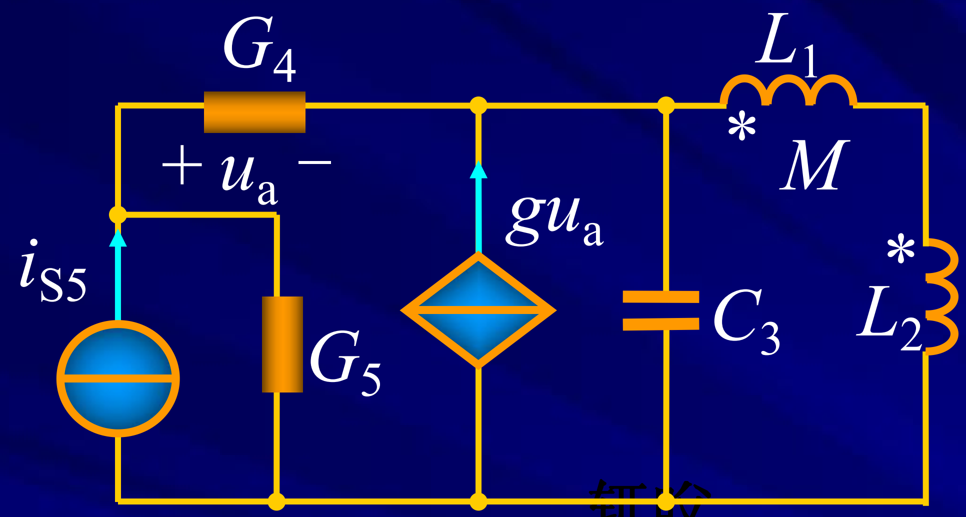


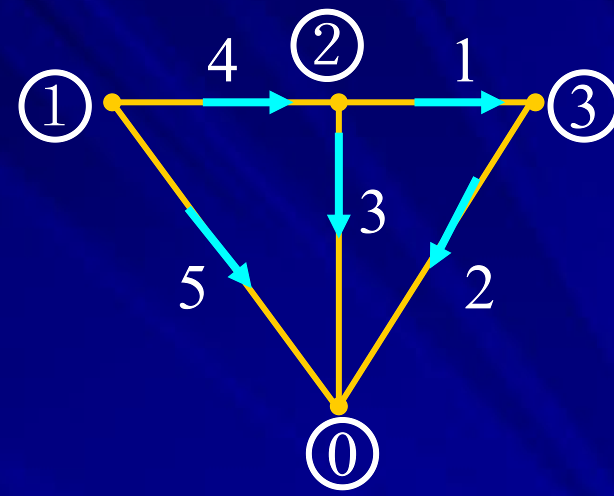


解 做出有向图

$$[A]=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[I_s]=[0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad i_{S5}]$$





$$[Y]=\begin{bmatrix} \dfrac{L_2}{\Delta} & \dfrac{-M}{\Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \dfrac{-M}{\Delta} & \dfrac{L_1}{\Delta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & j\omega C_3 & -g & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_5 \end{bmatrix}$$

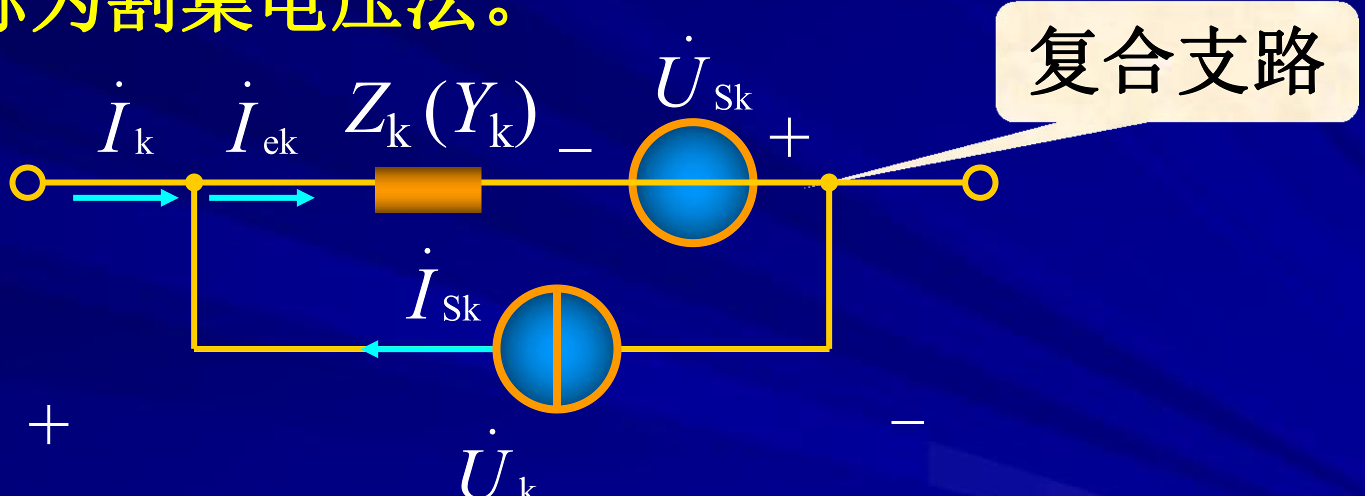
注意g的位置

代入 $[A][Y][A]^{\mathrm{T}}\left[\dot{U}_{\mathrm{n}}\right]=[A]\left[\dot{I}_{\mathrm{S}}\right]-[A][Y]\left[\dot{U}_{\mathrm{S}}\right]$

$$\begin{bmatrix} G_4+G_5 & -G_4 & 0 \\ -g-G_4 & g+G_4+j\omega L_3+\dfrac{L_2}{\Delta} & -\dfrac{L_2+M}{\Delta} \\ 0 & -\dfrac{L_2+M}{\Delta} & \dfrac{L_1+L_2+2M}{\Delta} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{U}_{\mathrm{n1}} \\ \dot{U}_{\mathrm{n2}} \\ \dot{U}_{\mathrm{n3}} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \dot{I}_{\mathrm{S5}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

*15.6 割集电压方程的矩阵形式

割集电压是指由割集划分的两分离部分之间的一种假想电压。以割集电压为电路独立变量的分析法称为割集电压法。



用导纳表示的支路方程：

$$\left[\dot{I}_b\right]=[Y]\left[\dot{U}_b\right]+[Y]\left[\dot{U}_S\right]-\left[\dot{I}_S\right]$$

$$\left[\dot{I}_{\mathrm{b}}\right]=[Y]\left[\dot{U}_{\mathrm{b}}\right]+[Y]\left[\dot{U}_{\mathrm{S}}\right]-\left[\dot{I}_{\mathrm{S}}\right]$$

KCL ： $[Q_f]\left[\dot{I}_{\mathrm{b}}\right]=0$

KVL： $\left[\dot{U}_{\mathrm{b}}\right]=[Q_f]^{\mathrm{T}}\left[\dot{U}_{\mathrm{t}}\right]$

以树支电压为未知量

$$[Q_f]\left[\dot{I}_{\mathrm{b}}\right]=[Q_f][Y]\left[\dot{U}_{\mathrm{b}}\right]+[Q_f][Y]\left[\dot{U}_{\mathrm{S}}\right]-[Q_f]\left[\dot{I}_{\mathrm{S}}\right]=0$$

结合以上方程有：

$$[Q_f][Y][Q_f]^{\mathrm{T}}\left[\dot{U}_{\mathrm{t}}\right]=[Q_f]\left[\dot{I}_{\mathrm{S}}\right]-[Q_f][Y]\left[\dot{U}_{\mathrm{S}}\right]$$

$$[Q_f][Y][Q_f]^{\mathrm{T}}\left[\dot{U}_{\mathrm{t}}\right]=[Q_f]\left[\dot{I}_{\mathrm{S}}\right]-[Q_f][Y]\left[\dot{U}_{\mathrm{S}}\right]$$

$$\left[Y_{\mathrm{t}}\right]=[Q][Y][Q]^{\mathrm{T}} \longrightarrow$$

割集导纳矩阵，主对角线元素为相应割集各支路的导纳之和，总为正；其余元素为相应两割集之间共有支路导纳之和。

$$\left[\dot{I}_{\mathrm{t}}\right]=[Q_f]\left[\dot{I}_{\mathrm{S}}\right]-[Q_f][Y]\left[\dot{U}_{\mathrm{S}}\right] \longrightarrow$$ 割集电流源向量

$$[Y_t]\left[\dot{U}_{\mathrm{t}}\right]=\left[\dot{I}_{\mathrm{t}}\right]$$

割集矩阵方程

注意　割集电压法是结点电压法的推广，或者说结点电压法是割集电压法的一个特例。若选择一组独立割集，使每一割集都由汇集在一个结点上的支路构成时，割集电压法便成为结点电压法。

小结　割集分析法的步骤：

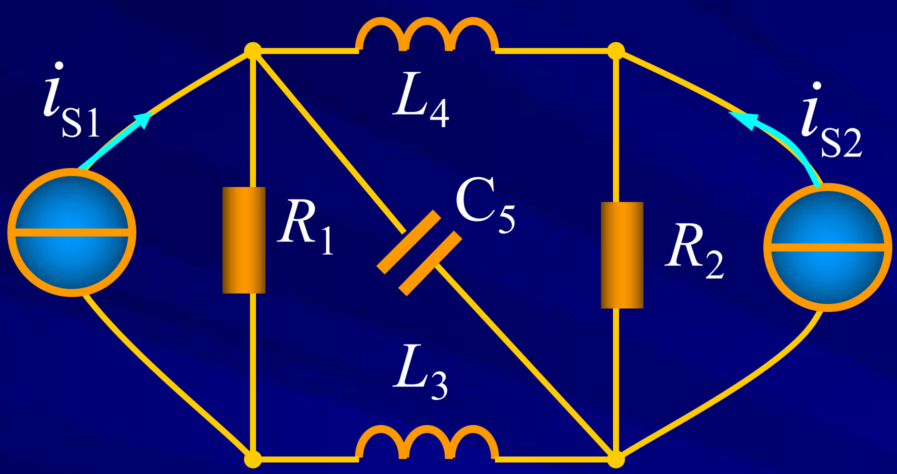
①选定一个树，写出　$[Q_f],[Y],[\dot{U}_S],[\dot{I}_S]$

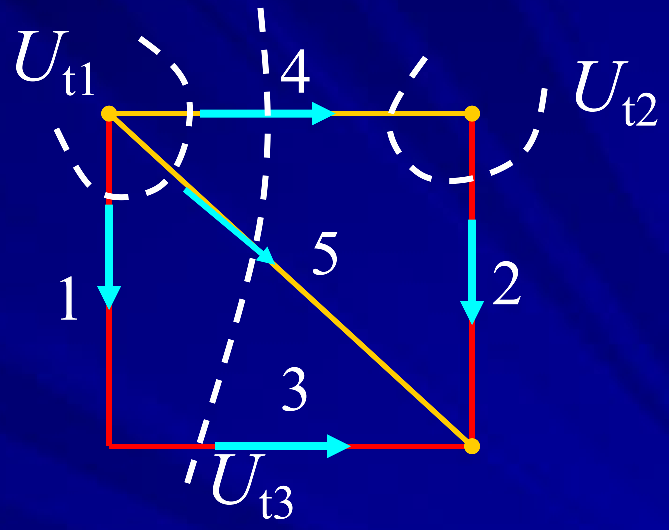
②计算 $[Y_t]$ $[\dot{I}_t]$，列出割集方程 $[Y_t][\dot{U}_t]=[\dot{I}_t]$

③求出 $[\dot{U}_t]$，由KVL解出 $[\dot{U}_b]$

根据支路方程解出 $[\dot{I}_b]$

例 以运算形式列出电路的割集电压方程的矩阵形式，设动态元件的初始条件为零。





解 做出有向图，选支路1，2，3为树枝。

$$
Q_f = \begin{array}{c} \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{array}
\begin{array}{c}
\begin{array}{ccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{array} \\
\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}
\end{array}
$$

用拉氏变换表示时，有：

$$U_{\mathrm{S}}(s)=0 \qquad I_{\mathrm{S}}(s)=[I_{\mathrm{S1}}(s) \quad I_{\mathrm{S2}}(s) \quad 0 \quad 0 \quad 0]^{\mathrm{T}}$$

$$Y(s)=\mathrm{diag}\left[\frac{1}{R_1},\frac{1}{R_2},\frac{1}{sL_3},\frac{1}{sL_4},sC_5\right]$$

代入割集方程：

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_1}+\frac{1}{sL_4}+sC_5 & -\frac{1}{sL_4} & \frac{1}{sL_4}+sC_5 \\ -\frac{1}{sL_4} & \frac{1}{R_2}+\frac{1}{sL_4} & -\frac{1}{sL_4} \\ \frac{1}{sL_4}+sC_5 & -\frac{1}{sL_4} & \frac{1}{sL_3}+\frac{1}{sL_4}+sC_5 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} U_{\mathrm{t1}}(s) \\ U_{\mathrm{t2}}(s) \\ U_{\mathrm{t3}}(s) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} I_{\mathrm{S1}}(s) \\ I_{\mathrm{S2}}(s) \\ 0 \end{bmatrix}$$

*15.7 列表法

1. 矩阵分析法的局限性

①回路电流法不允许存在无伴电流源支路，且规定的复合支路不允许存在受控电流源；

②结点电压法和割集电压法不允许存在无伴电压源支路，且规定的复合支路不允许存在受控电压源。

2. 列表法

规定一个元件为一条支路，用阻抗描述电阻或电感支路，用导纳描述电导或电容支路。

对于电阻或电感支路有：

$$\dot{U}_k = Z_k \dot{I}_k \qquad Z_k = R_k \quad \text{或} \quad Z_k = \mathrm{j}\omega L_k$$

对于电导或电容支路有：

$$\dot{I}_k = Y_k \dot{U}_k \qquad Y_k = G_k \quad \text{或} \quad Y_k = \mathrm{j}\omega C_k$$

对于VCVS支路有： $\dot{U}_k = \mu_{kj} \dot{U}_j$

对于CCVS支路有： $\dot{U}_k = r_{kj} \dot{I}_j$

对于VCCS支路有： $\dot{I}_k = g_{kj} \dot{U}_j$

对于CCCS支路有： $\dot{I}_k = \beta_{kj} \dot{I}_j$

对于独立电源支路有： $\dot{U}_k = \dot{U}_{Sk} \qquad \dot{I}_k = \dot{I}_{Sk}$

支路方程： $F\dot{U} + H\dot{I} = \dot{U}_S + \dot{I}_S$

$$\dot{U} = [\dot{U}_1 \quad \dot{U}_2 \quad \cdots \quad \dot{U}_b]^T$$

$$\dot{I} = [\dot{I}_1 \quad \dot{I}_2 \quad \cdots \quad \dot{I}_b]^T$$

KCL $\quad [A]\left[\dot{I}\right] = 0$

KVL $\quad \left[\dot{U}\right] - [A]^T\left[\dot{U}_n\right] = 0$

结点列表方程的矩阵形式：

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & A \\ -A^T & 1_b & 0 \\ 0 & F & H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_n \\ \dot{U} \\ \dot{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{U}_S + \dot{I}_S \end{bmatrix}$$

- 本章完！