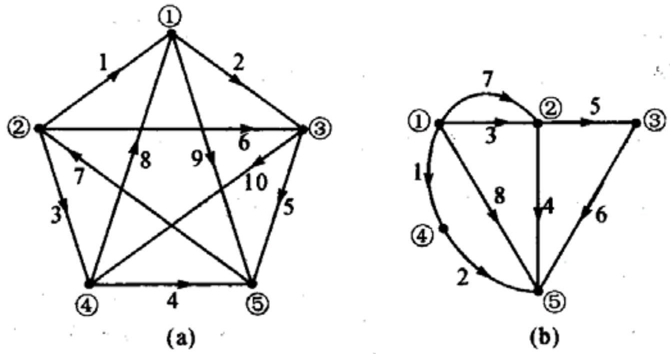
15－1 以结点 ⑤ 为参考，写出图示有向图的关联矩阵 **A**.



题 15－1 图

解　图(a)：

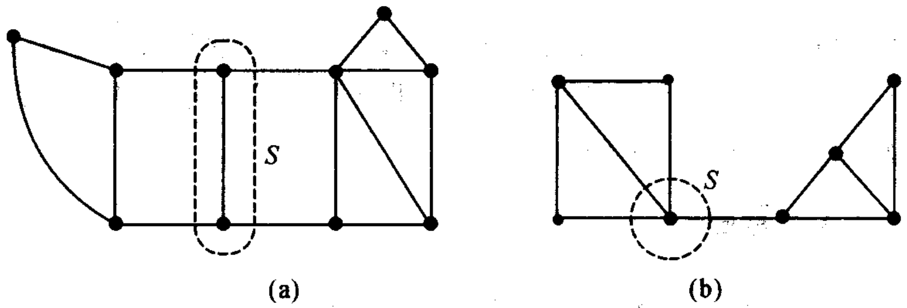
$$
\boldsymbol{A}=\begin{array}{c@{}c}
 & \begin{array}{cccccccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \end{array} \\
\begin{array}{c} \text{①} \\ \text{②} \\ \text{③} \\ \text{④} \end{array} &
\begin{bmatrix}
-1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\
1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & -1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1
\end{bmatrix}
\end{array}
$$

图(b)：

$$
\boldsymbol{A}=\begin{array}{c@{}c}
 & \begin{array}{cccccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \end{array} \\
\begin{array}{c} \text{①} \\ \text{②} \\ \text{③} \\ \text{④} \end{array} &
\begin{bmatrix}
1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\
0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & -1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\
-1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
\end{bmatrix}
\end{array}
$$

15－2 对于图(a) 和(b)，与用虚线画出的闭合面 S 相切割的支路集

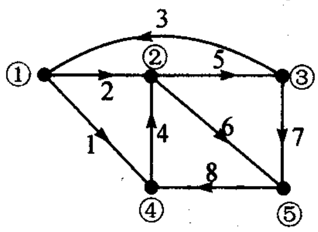
合是否构成割集?为什么?



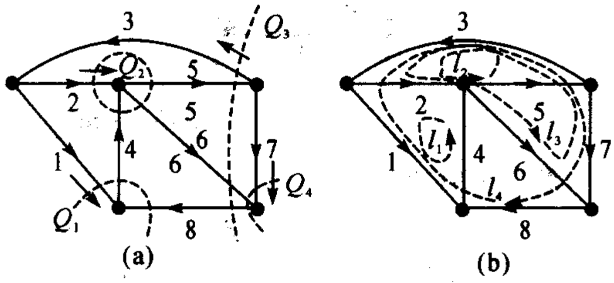
题 15－2 图

解　对图(a) 和(b) 所示的图 G，移去闭合面 S 所割到的全部支路，图 G 将被分成三部分，因此不构成割集.

15－3 对于图示有向图，若选支路 1，2，3，7 为树，试写出基本割集矩阵和基本回路矩阵；另外，以网孔作为回路写出回路矩阵.



题 15－3 图



题解 15－3 图

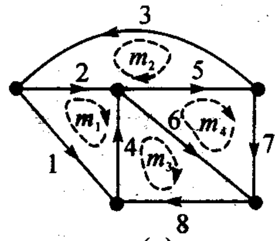
解　选 1，2，3，7 为树支，作单树支割集，如题解 15－3 图(a) 所示，按先树支后连支的顺序，则基本割集阵为

$$\begin{array}{cc} & \begin{array}{cccccccc} 1 & 2 & 3 & 7 & 4 & 5 & 6 & 8 \end{array} \\ Q_f = \begin{array}{c} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \end{array} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \end{array}$$

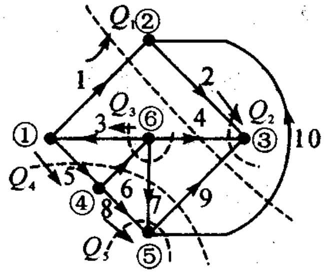
作单连支回路，如题解 15－3 图(b) 所示，仍按先树支后连支的顺序，则基本回路矩阵为

$$\boldsymbol{B}_{\mathrm{f}} = \begin{array}{cc} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 7 & 4 & 5 & 6 & 8 \end{matrix} \\ \begin{matrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \\ l_4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array}$$

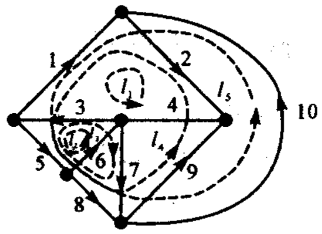
以网孔作回路，取顺时针方向，则回路矩阵为



题解 15－3 图



题 15－4 图



题解 15－4 图

$$\boldsymbol{B}_{\mathrm{m}} = \begin{array}{cc} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \end{matrix} \\ \begin{matrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ m_4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{array}$$

15－4 对于图示有向图，若选支路 1,2,3,5,8 为树，试写出基本割集矩阵和基本回路矩阵.

解 选 1,2,3,5,8 为树支，作单树支割集，按先树支后连支的顺序，则 Q_{f} 为

$$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{f}} = \begin{array}{cc} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 5 & 8 & 4 & 6 & 7 & 9 & 10 \end{matrix} \\ \begin{matrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ Q_5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \end{array}$$

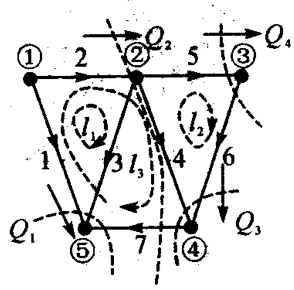
作单连支回路，仍按先树支后连支的顺序，则 B_{f} 为

$$\boldsymbol{B}_{\mathrm{f}}=\begin{array}{c}\\ l_1\\ l_2\\ l_3\\ l_4\\ l_5\end{array}\begin{array}{c}\begin{array}{cccccccccc}1&2&3&5&8&4&6&7&9&10\end{array}\\ \left[\begin{array}{cccccccccc}-1&-1&-1&0&0&1&0&0&0&0\\0&0&1&1&0&0&1&0&0&0\\0&0&-1&-1&-1&0&0&1&0&0\\-1&-1&0&1&1&0&0&0&1&0\\-1&0&0&1&1&0&0&0&0&1\end{array}\right]\end{array}$$

亦可由 $\boldsymbol{Q}_{\mathrm{f}}=[\boldsymbol{I}_{\mathrm{t}}\ \vdots\ \boldsymbol{Q}_{\mathrm{l}}]$，$\boldsymbol{B}_{\mathrm{f}}=[-\boldsymbol{Q}_{\mathrm{l}}^{\mathrm{T}}\ \vdots\ \boldsymbol{I}_{\mathrm{l}}]$ 得 $\boldsymbol{B}_{\mathrm{f}}$.

15－5 对图示有向图，若选结点 ⑤ 为参考，并选支路 1，2，4，5 为树. 试写出关联矩阵、基本回路矩阵和基本割集矩阵；并验证

$$\boldsymbol{B}_{\mathrm{t}}^{\mathrm{T}}=-\boldsymbol{A}_{\mathrm{t}}^{-1}\boldsymbol{A}_{\mathrm{l}}\text{ 和 }\boldsymbol{Q}_{\mathrm{l}}=-\boldsymbol{B}_{\mathrm{t}}^{\mathrm{T}}.$$



题 15－5 图

解 选 1，2，4，5 为树，按先树支后连支的顺序.

$$\boldsymbol{A}=\begin{array}{c}\\ ①\\ ②\\ ③\\ ④\end{array}\begin{array}{c}\begin{array}{ccccccc}1&2&4&5&3&6&7\end{array}\\ \left[\begin{array}{ccccccc}1&1&0&0&0&0&0\\0&-1&1&1&1&0&0\\0&0&0&-1&0&1&0\\0&0&-1&0&0&-1&1\end{array}\right]\end{array}=[\boldsymbol{A}_{\mathrm{t}}\ \vdots\ \boldsymbol{A}_{\mathrm{l}}]$$

$$\boldsymbol{B}_{\mathrm{f}}=\begin{array}{c}\\ l_1\\ l_2\\ l_3\end{array}\begin{array}{c}\begin{array}{ccccccc}1&2&4&5&3&6&7\end{array}\\ \left[\begin{array}{ccccccc}-1&1&0&0&1&0&0\\0&0&-1&1&0&1&0\\-1&1&1&0&0&0&1\end{array}\right]\end{array}=[\boldsymbol{B}_{\mathrm{t}}\ \vdots\ \boldsymbol{I}_{\mathrm{l}}]$$

$$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{f}}=\begin{array}{c}\\ Q_1\\ Q_2\\ Q_3\\ Q_4\end{array}\begin{array}{c}\begin{array}{ccccccc}1&2&4&5&3&6&7\end{array}\\ \left[\begin{array}{ccccccc}1&0&0&0&1&0&1\\0&1&0&0&-1&0&-1\\0&0&1&0&0&1&-1\\0&0&0&1&0&-1&0\end{array}\right]\end{array}=[\boldsymbol{I}_{\mathrm{t}}\ \vdots\ \boldsymbol{Q}_{\mathrm{l}}]$$

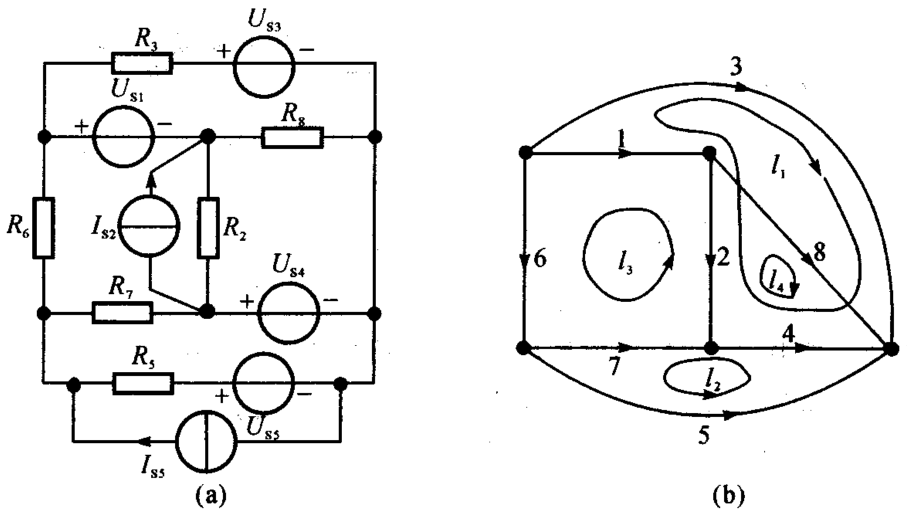
由以上矩阵 $\boldsymbol{B}_{\mathrm{f}}$ 和 $\boldsymbol{Q}_{\mathrm{f}}$，可得：$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{l}}=-\boldsymbol{B}_{\mathrm{t}}^{\mathrm{T}}$.

又因为

$$-A_t^{-1}A_l = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

所以有 $\qquad B_t^T = -A_t^{-1}A_l.$

15－6 对图示电路，选支路 1，2，4，7 为树，用矩阵形式列出其回路电流方程. 各支路电阻均为 5Ω，各电压源电压均为 3V，各电流源电流均为 2A.



题 15－6 图

解 提示 注意$[B_f]$，$[Z]$，$[U_s][I_s]$ 的支路顺序要相同.

选 1，2，4，7 为树，作单连支回路，按先树支后连支的顺序，则

$$[B_f] = \begin{array}{c} \\ l_1 \\ l_2 \\ l_3 \\ l_4 \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccccccc} 1 & 2 & 4 & 7 & 3 & 5 & 6 & 8 \end{array} \\ \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array}$$

$[Z] = \mathrm{diag}[0 \quad R_2 \quad 0 \quad R_7 \quad R_3 \quad R_5 \quad R_6 \quad R_8]$

$[U_s] = [-U_{s1} \quad 0 \quad -U_{s4} \quad 0 \quad -U_{s3} \quad -U_{s5} \quad 0 \quad 0]^T$

$[I_s] = [0 \quad I_{s2} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad I_{s5} \quad 0 \quad 0]^T$

回路电流矩阵方程为

$$[\boldsymbol{B}_f][\boldsymbol{Z}][\boldsymbol{B}_f]^T[\boldsymbol{I}_l]=[\boldsymbol{B}_f][\boldsymbol{U}_s]-[\boldsymbol{B}][\boldsymbol{Z}][\boldsymbol{I}_s]$$

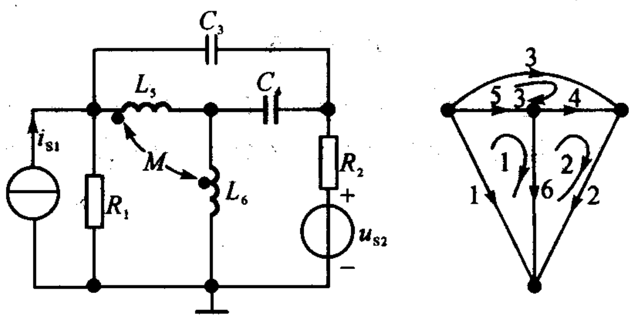
$$\begin{bmatrix} R_2+R_3 & 0 & R_2 & R_2 \\ 0 & R_5+R_7 & -R_7 & 0 \\ R_2 & -R_7 & R_2+R_6+R_7 & R_2 \\ R_2 & 0 & R_2 & R_2+R_8 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_{l1} \\ I_{l2} \\ I_{l3} \\ I_{l4} \end{bmatrix}$$

$$=\begin{bmatrix} U_{s1}-U_{s3}+U_{s4}+R_2 I_{s2} \\ U_{s4}-U_{s5}-R_5 I_{s5} \\ U_{s1}+R_2 I_{s2} \\ U_{s4}+R_2 I_{s2} \end{bmatrix}$$

代入数值得

$$\begin{bmatrix} 10 & 0 & 5 & 5 \\ 0 & 10 & -5 & 0 \\ 5 & -5 & 15 & 5 \\ 5 & 0 & 5 & 10 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_{l1} \\ I_{l2} \\ I_{l3} \\ I_{l4} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 13 \\ -10 \\ 13 \\ 13 \end{bmatrix}$$

15-7 对图示电路，用运算形式（设零值初始条件）在下列 2 种不同情况下列出网孔电流方程：(1) 电感 L_5 和 L_6 之间无互感；(2) L_5 和 L_6 之间有互感 M.



(a)　　　　(b)

题 15-7 图

解　(1) 电感 L_5 和 L_6 之间无互感，选网孔电流如图(b) 所示，则

$$[\boldsymbol{B}] = \begin{array}{c} \\ l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{array} \\ \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \end{array}$$

$$[\boldsymbol{Z}(s)] = \mathrm{diag}\left[R_1 \quad R_2 \quad \frac{1}{sC_3} \quad \frac{1}{sC_4} \quad sL_5 \quad sL_6\right]$$

$$[\boldsymbol{U}_s(s)] = [0 \quad -U_{s2}(s) \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^{\mathrm{T}}$$

$$[\boldsymbol{I}_s(s)] = [I_{s1}(s) \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^{\mathrm{T}}$$

代入矩阵方程

$$[\boldsymbol{B}][\boldsymbol{Z}(s)][\boldsymbol{B}]^{\mathrm{T}}[\boldsymbol{I}_l(s)] = [\boldsymbol{B}][\boldsymbol{U}_s(s)] - [\boldsymbol{B}][\boldsymbol{Z}][\boldsymbol{I}_s(s)]$$

得
$$\begin{bmatrix} R_1 + sL_5 + sL_6 & -sL_6 & -sL_5 \\ -sL_6 & R_2 + \dfrac{1}{sC_4} + sL_6 & -\dfrac{1}{sC_4} \\ -sL_5 & -\dfrac{1}{sC_4} & \dfrac{1}{sC_3} + \dfrac{1}{sC_4} + sL_5 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{l1}(s) \\ I_{l2}(s) \\ I_{l3}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 I_{s1}(s) \\ -U_{s2}(s) \\ 0 \end{bmatrix}$$

(2) L_5 和 L_6 之间有互感 M，支路的阻抗阵 $\boldsymbol{Z}(s)$ 为

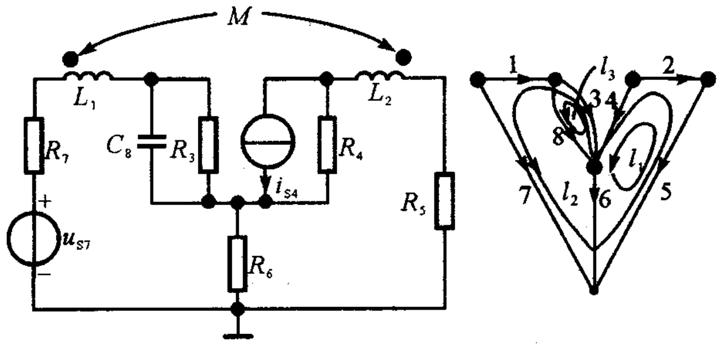
$$[\boldsymbol{Z}(s)] = \begin{bmatrix} R_1 & & & & & \\ & R_2 & & & 0 & \\ & & \dfrac{1}{sC_3} & & & \\ & & & \dfrac{1}{sC_4} & & \\ & 0 & & & sL_5 & sM \\ & & & & sM & sL_6 \end{bmatrix}$$

其余的矩阵均不变，代入网孔矩阵方程可得

$$\begin{bmatrix} R_1 + s(L_5 + L_6 + 2M) & -s(L_6 + M) & -s(L_5 + M) \\ -s(L_6 + M) & R_2 + \dfrac{1}{sC_4} + sL_6 & -\dfrac{1}{sC_4} + sM \\ -s(L_5 + M) & -\dfrac{1}{sC_4} + sM & \dfrac{1}{sC_3} + \dfrac{1}{sC_4} + sL_5 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{l1}(s) \\ I_{l2}(s) \\ I_{l3}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 I_{s1}(s) \\ -U_{s2}(s) \\ 0 \end{bmatrix}$$

15-8 对图示电路，选支路 1,2,3,4,5 为树，试写出此电路回路电流方程的矩阵形式.



(a) (b)

题 15-8 图

解 选 1,2,3,4,5 为树，作单连支回路，则

$$[\boldsymbol{B}] = \begin{array}{c} \\ l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \end{array} \\ \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array}$$

支路阻抗阵为

$$[\boldsymbol{Z}] = \begin{bmatrix} \mathrm{j}\omega L_1 & -\mathrm{j}\omega M & & & & & & \\ -\mathrm{j}\omega M & \mathrm{j}\omega L_2 & & & 0 & & & \\ & & R_3 & & & & & \\ & & & R_4 & & & & \\ & & 0 & & R_5 & & & \\ & & & & & R_6 & & \\ & & & & & & R_7 & \\ & & & & & & & \dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_8} \end{bmatrix}$$

$$[\dot{U}_s]=[0\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0\quad -\dot{U}_{s7}\quad 0]^T$$
$$[\dot{I}_s]=[0\quad 0\quad 0\quad -\dot{I}_{s4}\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0]^T$$

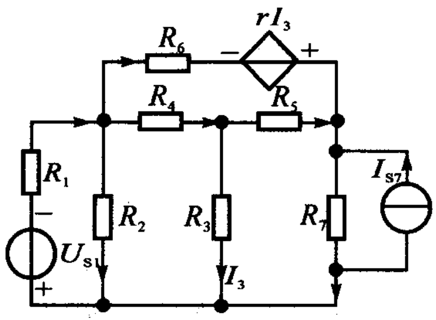
代入回路矩阵方程

$$[\boldsymbol{B}][\boldsymbol{Z}][\boldsymbol{B}]^T[\dot{\boldsymbol{I}}_l]=[\boldsymbol{B}][\dot{\boldsymbol{U}}_s]-[\boldsymbol{B}][\boldsymbol{Z}][\dot{\boldsymbol{I}}_s]\text{，可得}$$

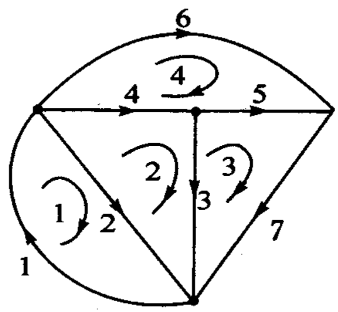
$$\begin{bmatrix} j\omega L_2+R_4+R_5+R_6 & j\omega L_2-j\omega M+R_4+R_5 & 0 \\ j\omega L_2-j\omega M+R_4+R_5 & j\omega(L_1+L_2-2M)+R_3+R_4+R_5+R_7 & R_3 \\ 0 & R_3 & R_3+\dfrac{1}{j\omega C_8} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{l1} \\ \dot{I}_{l2} \\ \dot{I}_{l3} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} R_4\dot{I}_{s4} \\ -\dot{U}_{s7}+R_4\dot{I}_{s4} \\ 0 \end{bmatrix}$$

15-9 写出图示电路网孔电流方程的矩阵形式.



题 15-9 图



题解 15-9 图

解 有向图如题解 15-9 图所示，取顺时针方向，则

$$[\boldsymbol{B}]=\begin{array}{c} \\ l_1 \\ l_2 \\ l_3 \\ l_4 \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{ccccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{array}$$

支路阻抗阵为

$$[\boldsymbol{Z}]=\begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -r & 0 & 0 & R_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_7 \end{bmatrix}$$

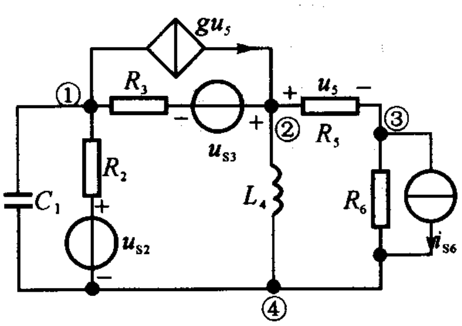
$$[\boldsymbol{U}_s]=[-U_{s1}\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0]^T$$

$$[\boldsymbol{I}_s]=[0\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0\quad I_{s7}]^T$$

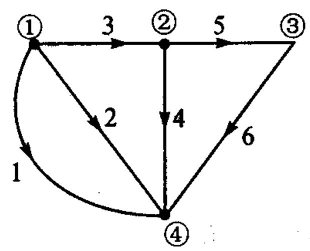
代入$[\boldsymbol{B}][\boldsymbol{Z}][\boldsymbol{B}]^T[\boldsymbol{I}_l]=[\boldsymbol{B}][\boldsymbol{U}_s]-[\boldsymbol{B}][\boldsymbol{Z}][\boldsymbol{I}_s]$得

$$\begin{bmatrix} R_1+R_2 & -R_2 & 0 & 0 \\ -R_2 & R_2+R_3+R_4 & -R_3 & -R_4 \\ 0 & -R_3 & R_3+R_5+R_7 & -R_5 \\ 0 & -(r+R_4) & r-R_5 & R_4+R_5+R_6 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_{l1} \\ I_{l2} \\ I_{l3} \\ I_{l4} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -U_{s1} \\ 0 \\ -R_7 I_{s7} \\ 0 \end{bmatrix}$$

15-10 图示电路中电源角频率为ω，试以结点④为参考结点，列写该电路结点电压方程的矩阵形式.



题15-10图



题解15-10图

解　有向图如题解15-10图所示

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

支路导纳矩阵为

$$[\boldsymbol{Y}]=\begin{bmatrix}\mathrm{j}\omega C_1 & & & & & \\ & \dfrac{1}{R_2} & & 0 & & \\ & & \dfrac{1}{R_3} & & g & \\ & 0 & & \dfrac{1}{\mathrm{j}\omega L_4} & & \\ & & & & \dfrac{1}{R_5} & \\ & & & & & \dfrac{1}{R_6}\end{bmatrix}$$

$$[\dot{\boldsymbol{U}}_\mathrm{s}]=[0\quad -\dot{U}_{\mathrm{s}2}\quad \dot{U}_{\mathrm{s}3}\quad 0\quad 0\quad 0]^\mathrm{T}$$

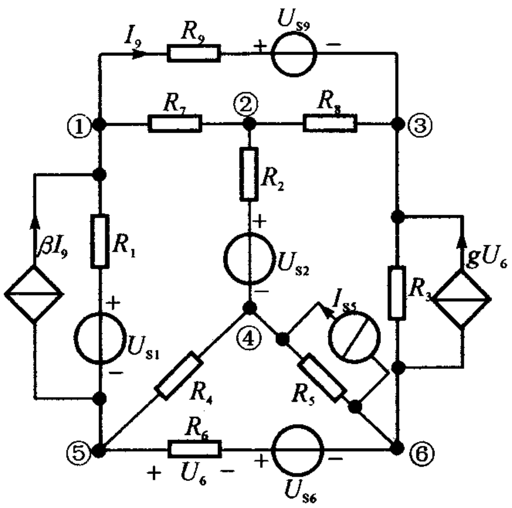
$$[\dot{\boldsymbol{I}}_\mathrm{s}]=[0\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0\quad -\dot{I}_{\mathrm{s}6}]^\mathrm{T}$$

代入矩阵方程 $[\boldsymbol{A}][\boldsymbol{Y}][\boldsymbol{A}]^\mathrm{T}[\dot{\boldsymbol{U}}_\mathrm{n}]=[\boldsymbol{A}][\dot{\boldsymbol{I}}_\mathrm{s}]-[\boldsymbol{A}][\boldsymbol{Y}][\dot{\boldsymbol{U}}_\mathrm{s}]$ **得**

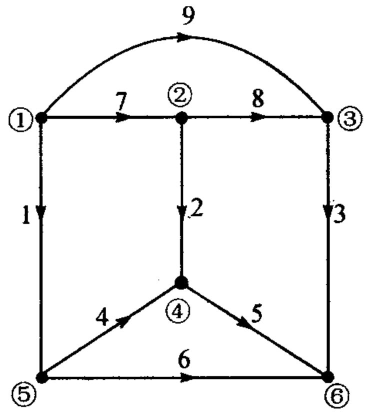
$$\begin{bmatrix}\mathrm{j}\omega C_1+\dfrac{1}{R_1}+\dfrac{1}{R_3} & g-\dfrac{1}{R_3} & -g\\ -\dfrac{1}{R_3} & \dfrac{1}{R_3}+\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega L_4}+\dfrac{1}{R_5}-g & g-\dfrac{1}{R_5}\\ 0 & -\dfrac{1}{R_5} & \dfrac{1}{R_5}+\dfrac{1}{R_6}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_{\mathrm{n}1}\\ \dot{I}_{\mathrm{n}2}\\ \dot{I}_{\mathrm{n}3}\end{bmatrix}$$

$$=\begin{bmatrix}\dfrac{\dot{U}_{\mathrm{s}2}}{R_2}-\dfrac{\dot{U}_{\mathrm{s}3}}{R_3}\\ \dfrac{\dot{I}_{\mathrm{s}3}}{R_3}\\ -\dot{I}_{\mathrm{s}6}\end{bmatrix}$$

[illegible] 试以结点 ⑥ 为参考结点，列出图示电路的矩阵形式的结点电压方程.



题 15－11 图



题解 15－11 图

解 以结点 ⑥ 为参考结点有向图如题解 15－11 图所示，则

$$[\boldsymbol{A}] = \begin{array}{c} \\ ① \\ ② \\ ③ \\ ④ \\ ⑤ \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccccccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{array}$$

支路导纳阵为

$$[\boldsymbol{Y}] = \begin{bmatrix} G_1 & & & & & & & & -\beta G_9 \\ & G_2 & & & 0 & & & & \\ & & G_3 & & & -g & & & \\ & & & G_4 & & & & & \\ & & & & G_5 & & & & 0 \\ & & & & & G_6 & & & \\ & & 0 & & & & G_7 & & \\ & & & & & & & G_8 & \\ & & & & & & & & G_9 \end{bmatrix}$$

$$[\boldsymbol{U}_s] = [-U_{s1} \quad -U_{s2} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad -U_{s6} \quad 0 \quad 0 \quad -U_{s9}]^T$$

$$[\boldsymbol{I}_s] = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad I_{s5} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$$

代入结点电压方程

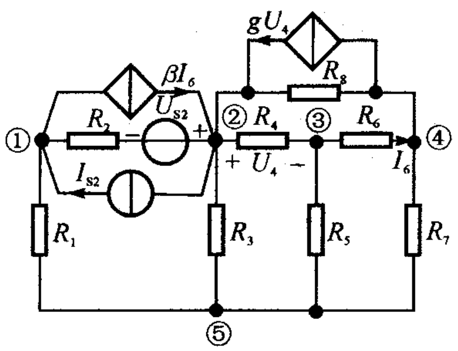
$$[\boldsymbol{A}][\boldsymbol{Y}][\boldsymbol{A}]^T[\boldsymbol{U}_n] = [\boldsymbol{A}][\boldsymbol{I}_s] - [\boldsymbol{A}][\boldsymbol{Y}][\boldsymbol{U}_s]$$

则可得

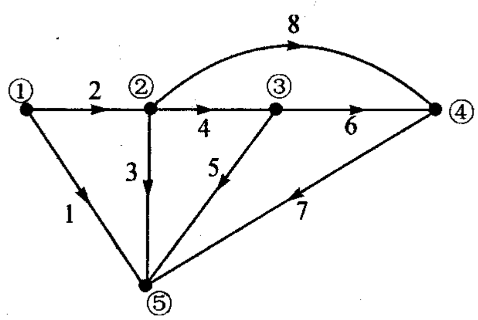
$$\begin{bmatrix} G_1+G_7+G_9-\beta G_9 & -G_7 & -G_9+\beta G_9 & 0 & -G_1 \\ -G_7 & G_2+G_7+G_8 & -G_8 & -G_2 & 0 \\ -G_9 & -G_8 & G_3+G_8+G_9 & 0 & -g \\ 0 & -G_2 & 0 & G_2+G_4+G_5 & -G_4 \\ -G_1+\beta G_9 & 0 & -\beta G_9 & -G_4 & G_1+G_4+G_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{n1} \\ U_{n2} \\ U_{n3} \\ U_{n4} \\ U_{n5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_1U_{s1}+G_9U_{s9}-\beta G_9U_{s9} \\ G_2U_{s2} \\ -gU_{s6}-G_9U_{s9} \\ I_{s5}-G_2U_{s2} \\ -G_1U_{s1}+G_6U_{s6}+\beta G_9U_{s9} \end{bmatrix}$$

提示　受控源的出现只会影响到导纳阵，其中 βI_9 的控制量是电流 I_9，因为要列写结点电压方程，因此要把 I_9 用支路电压 U_9 表示.

15-12 对图示电路，选结点⑤为参考结点，列出该电路矩阵形式的结点电压方程.



题 15-12 图



题解 15-12 图

解　图示电路的有向图如题解 15-12 图所示，结点⑤为参考结点，则

$$
\begin{array}{cc}
 & \begin{array}{cccccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \end{array} \\
[\boldsymbol{A}] = & \begin{bmatrix}
1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & -1
\end{bmatrix}
\end{array}
$$

导纳阵为

$$
[\boldsymbol{Y}] = \begin{bmatrix}
G_1 & & & & & & & \\
 & G_2 & & & & \beta G_6 & & \\
 & & G_3 & & & & 0 & \\
 & & & G_4 & & & & \\
 & & & & G_5 & & & \\
 & & & & & G_6 & & \\
 & 0 & & & & & G_7 & \\
 & & & -g & & & & G_8
\end{bmatrix}
$$

电压源列向量为

$$[\boldsymbol{U}_s] = [0 \quad U_{s2} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$$

电流源列向量为

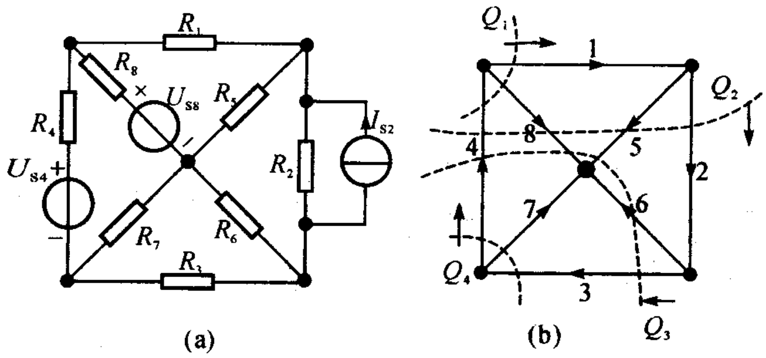
$$[\boldsymbol{I}_s] = [0 \quad I_{s_2} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$$

代入矩阵方程

$$[\boldsymbol{A}][\boldsymbol{Y}][\boldsymbol{A}]^T[\boldsymbol{U}_n] = [\boldsymbol{A}][\boldsymbol{I}_s] - [\boldsymbol{A}][\boldsymbol{Y}][\boldsymbol{U}_s]\text{，整理得}$$

$$
\begin{bmatrix}
G_1 + G_2 & -G_2 & \beta G_6 & -\beta G_6 \\
-G_2 & G_2 + G_3 + G_4 + G_8 - g & g - G_4 - \beta G_6 & \beta G_6 - G_8 \\
0 & -G_4 & G_4 + G_5 + G_6 & -G_6 \\
0 & g - G_8 & -g - G_6 & G_6 + G_7 + G_8
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix} U_{n1} \\ U_{n2} \\ U_{n3} \\ U_{n4} \end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix} I_{s2} - G_2 U_{s2} \\ -I_{s2} + G_2 U_{s2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}
$$

15-12 电路如图(a)所示，图(b)为其有向图. 选支路 1、2、6、7 为树，列出矩阵形式的割集电压方程.



题 15 - 13 图

解　作单树支割集，方向为树支方向，则

$$[\boldsymbol{Q}_{\mathrm{f}}]=\begin{array}{c}\begin{array}{cccccccc}1&2&6&7&3&4&5&8\end{array}\\ \begin{bmatrix}1&0&0&0&0&-1&0&1\\0&1&0&0&0&-1&1&1\\0&0&1&0&1&-1&0&1\\0&0&0&1&-1&1&0&0\end{bmatrix}\end{array}$$

支路导纳阵为(注意与割集阵支路顺序一致)

$$[\boldsymbol{Y}]=\mathrm{diag}\left[\frac{1}{R_1},\frac{1}{R_2},\frac{1}{R_6},\frac{1}{R_7},\frac{1}{R_3},\frac{1}{R_4},\frac{1}{R_5},\frac{1}{R_8}\right]$$

电压源与电流源列向量为(注意支路顺序)

$$[\boldsymbol{U}_{\mathrm{s}}]=[0\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0\quad U_{s4}\quad 0\quad -U_{s8}]^{\mathrm{T}}$$

$$[\boldsymbol{I}_{\mathrm{s}}]=[0\quad I_{s2}\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0]^{\mathrm{T}}$$

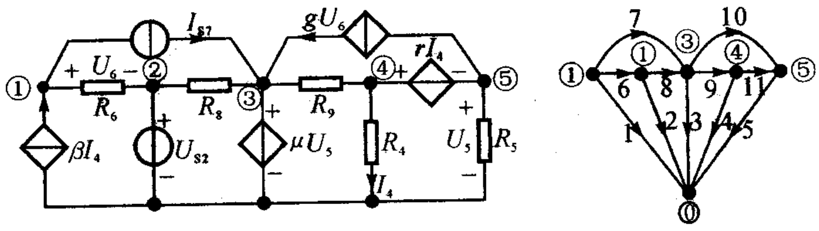
代入割集方程

$$[\boldsymbol{Q}_{\mathrm{f}}][\boldsymbol{Y}][\boldsymbol{Q}_{\mathrm{f}}]^{\mathrm{T}}[\boldsymbol{U}_{\mathrm{t}}]=[\boldsymbol{Q}_{\mathrm{f}}][\boldsymbol{I}_{\mathrm{s}}]-[\boldsymbol{Q}_{\mathrm{f}}][\boldsymbol{Y}][\boldsymbol{U}_{\mathrm{s}}]\text{ 得}$$

$$\begin{bmatrix}G_1+G_4+G_8 & G_4+G_8 & G_4+G_8 & -G_4\\ G_4+G_8 & G_2+G_4+G_5+G_8 & G_4+G_5+G_8 & -G_4\\ G_4+G_8 & G_4+G_5+G_8 & G_3+G_4+G_5+G_6+G_8 & -G_3-G_4\\ -G_4 & -G_4 & -G_3-G_4 & G_3+G_4+G_7\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}U_{t1}\\U_{t2}\\U_{t3}\\U_{t4}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}G_4U_{s4}+G_8U_{s8}\\ I_{s2}+G_4U_{s4}+G_8U_{s8}\\ G_4U_{s4}+G_8U_{s8}\\ -G_4U_{s4}\end{bmatrix}$$

15-14 电路如图(a)所示，图(b)为其有向图. 试写出结点列表法中支路方程的矩阵形式.



(a) (b)

题 15-14 图

解 各支路方程为

$I_1+\beta I_4=0, U_2=U_{s2}, U_3-\mu U_5=0, U_4-R_4I_4=0,$

$U_5-R_5I_5=0, U_6-R_6I_6=0, I_7=I_{s7}, U_8-R_8I_8=0,$

$U_9-R_9I_9=0, I_{10}+gU_6=0, U_{11}-rI_4=0$

因此，

$$
[\boldsymbol{F}]=\begin{array}{c@{}c}
 & \begin{array}{ccccccccccc} & & & & 5 & & & & & & \end{array} \\
\begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ 10 \\ \\ \end{array} & \left[\begin{array}{ccccccccccc}
0 & & & & \vdots & & & & & & \\
 & 1 & & & \vdots & & & & & & \\
\cdots & \cdots & 1 & \cdots & -\mu & & & & 0 & & \\
 & & & 1 & & & & & & & \\
 & & & & 1 & & & & & & \\
 & & & & & 1 & & & & & \\
 & & 0 & & & & 0 & & & & \\
 & & & & & & & 1 & & & \\
 & & & & & & & & 1 & & \\
\cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & g & & & & 0 & \\
 & & & & & \vdots & & & & & 1
\end{array}\right] \\
 & \begin{array}{ccccccccccc} & & & & & 6 & & & & & \end{array}
\end{array}
$$

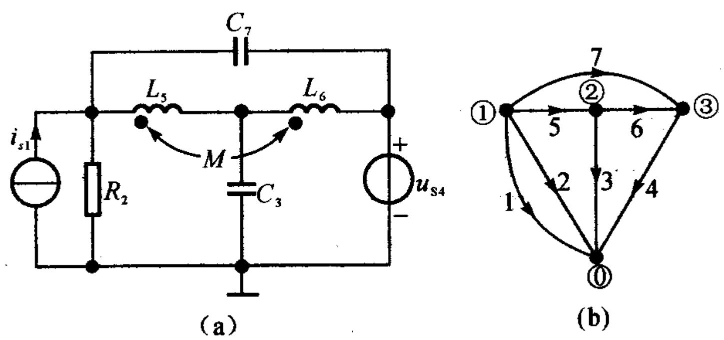
$$[\boldsymbol{H}]=\begin{array}{r@{}c}
 & \begin{array}{ccccccccccc} & & & 4 & & & & & & & \end{array} \\
\begin{array}{r} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ 11 \end{array} & \begin{bmatrix}
1 & \cdots & \cdots & \beta & & & & & & & \\
 & 0 & & & & & & & & & \\
 & & 0 & & & & & 0 & & & \\
 & & & -R_4 & & & & & & & \\
 & & & & -R_5 & & & & & & \\
 & & & & & -R_6 & & & & & \\
 & & & & & & 1 & & & & \\
 & & 0 & & & & & -R_8 & & & \\
 & & & & & & & & -R_9 & & \\
 & & & & & & & & & 1 & \\
\cdots & \cdots & & -r & & & & & & & 0
\end{bmatrix} \\
 & \begin{array}{ccccccccccc} & & & 4 & & & & & & & \end{array}
\end{array}$$

电压源向量与电流源向量之和为

$$[\boldsymbol{U}_s]+[\boldsymbol{I}_s]=[0\quad U_{s2}\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0\quad I_{s7}\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0]^{T}$$

代入支路方程$[\boldsymbol{F}][\boldsymbol{U}]+[\boldsymbol{H}][\boldsymbol{I}]=[\boldsymbol{U}_s]+[\boldsymbol{I}_s]$即可获得支路方程矩阵.

15-15 电路如图(a)所示，图(b)为其有向图. 写出结点列表方程的矩阵形式.



题 15-15 图

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

各支路方程为

$\dot{I}_1 = -\dot{I}_{s1}$， $\dot{I}_2 - R_2\dot{I}_2 = 0$， $\dot{I}_s - j\omega C_3\dot{I}_3 = 0$， $\dot{I}_4 = \dot{I}_{s4}$，

$\dot{I}_5 - j\omega L_5\dot{I}_5 - j\omega M\dot{I}_6 = 0$， $\dot{I}_6 - j\omega M\dot{I}_5 - j\omega L_6\dot{I}_6 = 0$，

$\dot{I}_7 - j\omega C_7\dot{I}_7 = 0$

结点列表方程中支路方程的矩阵形式为

$$[\boldsymbol{F}][\dot{\boldsymbol{U}}] + [\boldsymbol{H}][\dot{\boldsymbol{I}}] = [\dot{\boldsymbol{U}}_s] + [\dot{\boldsymbol{I}}_s] \text{ 则}$$

$$[\boldsymbol{F}] = \begin{bmatrix} 0 & & & & & & \\ & 1 & & & & 0 & \\ & & -j\omega C_3 & & & & \\ & & & 1 & & & \\ & & & & 1 & & \\ & & 0 & & & 1 & \\ & & & & & & -j\omega C_7 \end{bmatrix},$$

$$[\boldsymbol{H}] = \begin{bmatrix} 1 & & & & & & \\ & -R_2 & & & & & 0 \\ & & 1 & & & & \\ & & & 0 & & & \\ & & & & -j\omega L_5 & -j\omega M & \\ & 0 & & & -j\omega M & -j\omega L_6 & \\ & & & & & & 1 \end{bmatrix}$$

电压源列向量与电流源列向量之和为

$$[\dot{\boldsymbol{U}}_s] + [\dot{\boldsymbol{I}}_s] = [-\dot{\boldsymbol{I}}_{s1} \quad 0 \quad 0 \quad \dot{\boldsymbol{U}}_{s4} \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$$

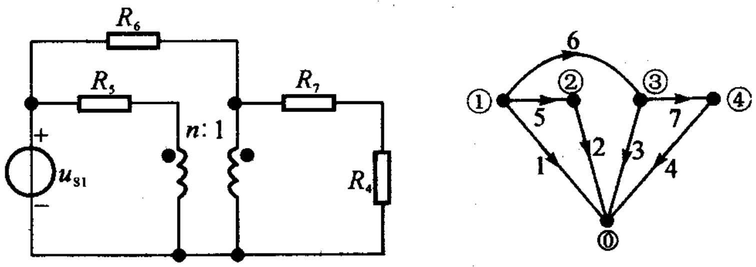
代入结点列表方程的矩阵形式中，即

$$\begin{bmatrix} [\boldsymbol{O}] & [\boldsymbol{O}] & [\boldsymbol{A}] \\ -[\boldsymbol{A}]^T & [\boldsymbol{I}_b] & [\boldsymbol{O}] \\ [\boldsymbol{O}] & [\boldsymbol{F}] & [\boldsymbol{H}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\dot{\boldsymbol{I}}_n] \\ [\dot{\boldsymbol{I}}] \\ [\dot{\boldsymbol{I}}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\boldsymbol{O}] \\ [\boldsymbol{O}] \\ [\dot{\boldsymbol{U}}_s] + [\dot{\boldsymbol{U}}_s] \end{bmatrix}$$

就可得结点列表方程的矩阵形式.

15-16 电路如图(a)所示，图(b)为其有向图. 列出结点列表方程的矩阵形式.

解



（a）　　　　　　　　（b）

题 15－16 图

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

支路方程的矩阵形式为

$$[\boldsymbol{F}][\dot{\boldsymbol{U}}]+[\boldsymbol{H}][\dot{\boldsymbol{I}}]=[\dot{\boldsymbol{U}}_s]+[\dot{\boldsymbol{I}}_s]$$

各支路方程为

$\dot{I}_1=\dot{I}_{s1}$，　$\dot{U}_2-n\dot{U}_3=0$，　$\dot{I}_3+n\dot{I}_2=0$，　$\dot{U}_4-R_4\dot{I}_4=0$，
$\dot{U}_5-R_5\dot{I}_5=0$，　$\dot{U}_6-R_6\dot{I}_6=0$，　$\dot{U}_7-R_7\dot{I}_7=0$，则

$$[\boldsymbol{F}]=\begin{bmatrix}1&&&&&&\\&1&-n&&&0&\\&&0&&&&\\&&&1&&&\\&&0&&1&&\\&&&&&1&\\&&&&&&1\end{bmatrix},$$

$$[\boldsymbol{H}]=\begin{bmatrix}0&&&&&&\\&0&&&&&\\&n&1&&0&&\\&&&-R_4&&&\\&&&&-R_5&&\\&&0&&&-R_6&\\&&&&&&-R_7\end{bmatrix}$$

电压源向量与电流源向量之和为

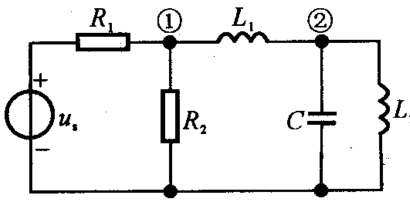
$$[\dot{U}_s]+[\dot{I}_s]=[\dot{I}_{s1}\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0]^T$$

代入列表方程矩阵

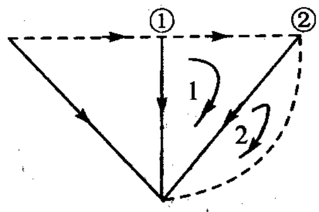
$$\begin{bmatrix} [\mathbf{0}] & [\mathbf{0}] & [\boldsymbol{A}] \\ -[\boldsymbol{A}]^T & [\mathbf{I}_b] & [\mathbf{0}] \\ [\mathbf{0}] & [\boldsymbol{F}] & [\boldsymbol{H}] \end{bmatrix}\begin{bmatrix} [\dot{I}_n] \\ [\dot{I}] \\ [\dot{I}] \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} [\mathbf{0}] \\ [\mathbf{0}] \\ [\dot{I}_s] \end{bmatrix}$$

那可得结点列表方程的矩阵形式.

15-17 列出图示电路的状态方程.若选结点①和②的结点电压为输出量,写出输出方程.



题 15-17 图



题解 15-17 图

解　有向图如题解 15-17 图所示,并选特有树为图中实线所示,对只含电容树支的结点②列 KCL 方程.

$$C\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}=i_{L1}-i_{L_2}$$

对由电感 L_1 和 L_2 连支所确定的基本回路 1 和 2 列 KVL 方程.

$$L_1\frac{\mathrm{d}i_{L1}}{\mathrm{d}t}=u_{R2}-u_C$$

$$L_2\frac{\mathrm{d}i_{L2}}{\mathrm{d}t}=u_C$$

消去非状态变量 u_{R2}，$u_{R2}=R_2(i_{R1}-i_{L1})$，而 $i_{R1}=\frac{1}{R_1}(u_s-u_{R2})$，则

$$u_{R2}=-\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}i_{L1}+\frac{R_2}{R_1+R_2}u_s$$

则状态方程为

$$\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{C}i_{L1}-\frac{1}{C}i_{L2}$$

$$\frac{\mathrm{d}i_{L1}}{\mathrm{d}t}=-\frac{1}{L_1}u_C-\frac{R_1R_2}{L_1(R_1+R_2)}i_{L1}+\frac{R_2}{L_1(R_1+R_2)}u_s$$

$$\frac{\mathrm{d}i_{L2}}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{L_2}u_C$$

写成矩阵形式为 $[\dot{\boldsymbol{X}}]=[\boldsymbol{A}][\boldsymbol{X}]+[\boldsymbol{B}][\boldsymbol{u}]$

$$\begin{bmatrix}\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}\\ \frac{\mathrm{d}i_{L1}}{\mathrm{d}t}\\ \frac{\mathrm{d}i_{L2}}{\mathrm{d}t}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & \frac{1}{C} & -\frac{1}{C}\\ -\frac{1}{L_1} & -\frac{R_1R_2}{L_1(R_1+R_2)} & 0\\ \frac{1}{L_2} & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_C\\ i_{L1}\\ i_{L2}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ \frac{R}{L_1(R_1+R_2)}\\ 0\end{bmatrix}[u_s(t)]$$

选结点 ① 和 ② 的结点电压为输出，则

$$u_{n1}=u_{R2}=-\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}i_{L1}+\frac{R_2}{R_1+R_2}u_s$$

$$u_{n2}=u_C$$

则输出方程的矩阵形式为 $[\boldsymbol{Y}]=[\boldsymbol{C}][\boldsymbol{X}]+[\boldsymbol{D}][\boldsymbol{u}]$

$$\begin{bmatrix}u_{n1}\\ u_{n2}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & -\frac{R_1R_2}{R_1+R_2} & 0\\ 1 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_C\\ i_{L1}\\ i_{L2}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\frac{R_1}{R_1+R_2}\\ 0\end{bmatrix}[U_s(t)]$$

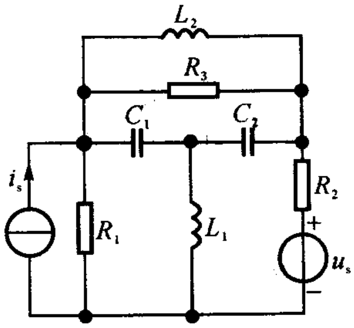
15-18 列出图示电路的状态方程. 设 $C_1=C_2=1\mathrm{F}$, $L_1=1\mathrm{H}$, $L_2=2\mathrm{H}$, $R_1=R_2=1\Omega$, $R_3=2\Omega$, $u_s(t)=2\sin t\mathrm{V}$, $i_s(t)=2\mathrm{e}^{-t}\mathrm{A}$.

解 有向图如题解 15-18 图所示，选取特有树如图中实线所示，对由电容 C_1 和 C_2 两树支所确定的基本割集 Q_1 和 Q_2 列出 KCL 方程

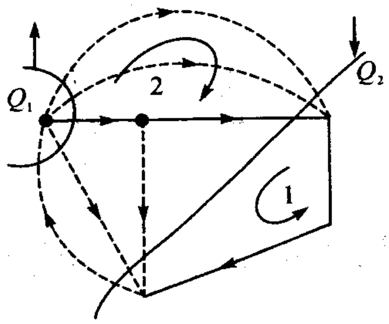
$$C_1\frac{\mathrm{d}u_{C1}}{\mathrm{d}t}=-i_{L2}-i_{R2}-i_{R3}+i_s$$

$$C_2\frac{\mathrm{d}u_{C2}}{\mathrm{d}t}=-i_{L1}-i_{L2}-i_{R1}-i_{R3}+i_s$$

对由电感 L_1 和 L_2 两个连支所确定的基本回路 1 和 2 列 KVL 方程.



题 15－18 图



题解 15－18 图

$$L_1\frac{\mathrm{d}i_{L1}}{\mathrm{d}t}=u_C+u_{R2}+u_s$$

$$L_2\frac{\mathrm{d}i_{L2}}{\mathrm{d}t}=u_{C1}+u_{C2}$$

消去非状态变量 i_{R1}，i_{R3} 和 u_{R2}

由 $$i_{R1}=\frac{1}{R_1}(u_{C1}+u_{C2}+u_{R2}+u_s)$$

$$u_{R2}=R_2(-i_{R1}-i_{L1}+i_s)$$

$$i_{R3}=\frac{1}{R_3}(u_{C1}+u_{C2})$$

得 $$i_{R1}=\frac{1}{1+\frac{R_1}{R_2}}\left[\frac{1}{R_2}(u_{C1}+u_{C2}+u_s)+i_s-i_{L1}\right]$$

$$u_{R2}=\frac{1}{1+\frac{R_1}{R_2}}[R_1(-i_{L1}+i_s)-u_{C1}-u_{C2}]$$

经整理代入数值后可得状态方程

$$\frac{\mathrm{d}u_{C1}}{\mathrm{d}t}=-u_{C1}-u_{C2}+\frac{1}{2}i_{L1}-i_{L2}-\frac{1}{2}u_s+\frac{1}{2}i_s$$

$$\frac{\mathrm{d}u_{C2}}{\mathrm{d}t}=-u_{C1}-u_{C2}-\frac{1}{2}i_{L1}-i_{L2}-\frac{1}{2}u_s+\frac{1}{2}i_s$$

$$\frac{\mathrm{d}i_{L1}}{\mathrm{d}t}=-\frac{1}{2}u_{C1}+\frac{1}{2}u_{C2}-\frac{1}{2}i_{L1}+\frac{1}{2}u_s+\frac{1}{2}i_s$$

$$\frac{\mathrm{d}i_{L2}}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{2}u_{C1} + \frac{1}{2}u_{C2}$$

写成状态方程$[\dot{\boldsymbol{X}}] = [\boldsymbol{A}][\boldsymbol{X}] + [\boldsymbol{B}][\boldsymbol{u}]$

其中

$$[\boldsymbol{A}] = \begin{bmatrix} -1 & -1 & \frac{1}{2} & -1 \\ -1 & -1 & -\frac{1}{2} & -1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad [\boldsymbol{B}] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[\boldsymbol{X}] = [u_{C1} \quad u_{C2} \quad i_{L1} \quad i_{L2}]^{\mathrm{T}}, [\boldsymbol{u}] = [2\sin t \quad 2\mathrm{e}^{-t}]^{\mathrm{T}}$$