

北京图书馆藏

45640

中文资料

电力系统专题讲义

日本东京大学电气工科 関根泰次教授

日本中央电气研究所 高桥一弘博士

1979年8月在西安交通大学讲解

西安交通大学

发电教研室

1979.10.

前言

应我校邀请，今年暑假日本东京大学电工科教授⁷⁹⁷根泰次和日本中央电气研究所高桥一弘博士来我校作短期讲学活动。两位专家的讲学使我们受到了很大的启发，他们热情友好的态度和严谨的治学精神给我们留下了深刻的印象。

讲学期间两位专家除进行了十一次专题报告外，还就日本的教育事业、高校的科研等问题热情地为我们作了介绍，并参加了多次座谈讨论，认真细致地回答了我們提出来的问题。

两位专家讲课内容广泛涉及目前电力系统中实际理论方面的问题，反映了目前日本及世界的一些研究动向和水平。现在我们根据两位专家的讲稿、讲课录音，并参阅有关著作将这十一次专题讲学内容整理出来，供参考。参加讲稿整理工作的有王锡凡、夏道止、杨蔚百、沈赞坝等同志。

西安交通大学发电教研室

1979.10.



A791681

目 录

第一专题	电力系统离线计算..... 1 (高桥一弘博士讲)
第二专题	电力系统的最佳化..... 28 (高桥一弘博士分三次讲)
第三专题	电力系统静态稳定分析的频率响应法..... 111 (阙根泰次教授讲)
第四专题	电力系统状态估计..... 117 (阙根泰次教授讲)
第五专题	李雅普诺夫稳定性理论在电力系统动态稳定分析中的应用... 126 (阙根泰次分两次讲)
第六专题	电力系统的重大事故及可靠性..... 144 (阙根泰次分两次讲)
第七专题	电力系统的调度控制自动化..... 158 (高桥一弘博士讲)

第一专题 电力系统离线的计算机应用

(高桥一弘)

1. 潮流计算

1.1 功率方程

i) 结点导纳矩阵 (Y 矩阵)

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{11} & \dot{Y}_{12} & \cdots & \dot{Y}_{1n} \\ \dot{Y}_{21} & \dot{Y}_{22} & \cdots & \dot{Y}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \dot{Y}_{n1} & \dot{Y}_{n2} & \cdots & \dot{Y}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \vdots \\ \dot{V}_n \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

$$\begin{cases} \dot{Y}_{ij} = \dot{Y}_{ji} = -\dot{y}_{ij} \quad i \neq j \\ \dot{Y}_{ii} = \sum_{j=1}^n \dot{y}_{ij} \quad i=1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (1.2)$$

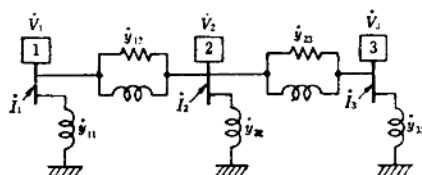


图 1.1.1 $\dot{V}$ 和 $\dot{I}$ 的关系

ii) 结点 i 的功率方程

$$\dot{W}_i = P_i + jQ_i = \dot{V}_i \dot{I}_i^* = \sum_{j=1}^n \dot{V}_i \dot{Y}_{ij}^* \dot{V}_j^* \quad i=1, 2, \dots, n \quad (1.3)$$

iii) 举例

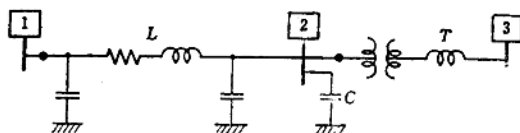


图 1.1.2 模型系统

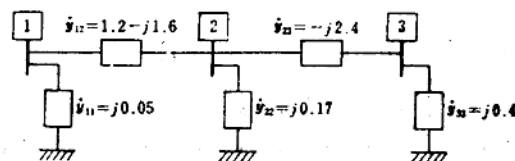
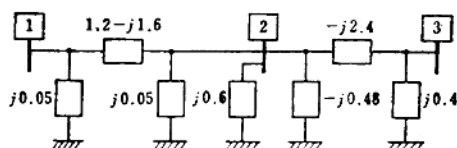


图 1.1.3 等效网络

$$Y = \begin{bmatrix} 1.20 - j1.55 & -1.20 + j1.60 & 0.0 \\ -1.20 + j1.60 & 1.20 - j3.83 & j2.40 \\ 0.0 & j2.40 & -j2.00 \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

1.2 牛顿——拉夫逊(NR)法潮流计算

i) NR法的计算过程

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ \dots\dots\dots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \end{cases} \quad (1.5)$$

修正方程

$$\begin{pmatrix} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \dots\dots\dots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \dots\dots\dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 = x_1 \\ x_2 = x_2 \\ \vdots \\ x_n = x_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1.6)$$

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k + A_1 \\ x_{k+1} = x_k + A_2 \\ \dots\dots\dots \\ x_{k+1} = x_k + A_n \end{cases} \quad (1.7)$$

(1.6) 式中由 $\frac{\partial f_i}{\partial x_j}$ 元素构成的矩阵称为雅可比(Jacobi)矩阵。

ii) 在结点 k 上的计算条件

$$\dot{W}_k = \sum_{i=1}^n \dot{V}_k \dot{Y}_{ki}^* \dot{V}_i^* \quad k=1, 2, \dots, n \quad (1.8)$$

$$\text{令} \quad \dot{W}_k = P_k + jQ_k, \quad \dot{V}_k = E_k + jF_k, \quad \dot{Y}_{ki} = G_{ki} - jB_{ki} \quad (1.9)$$

得到:

$$P_k + jQ_k = \sum_{i=1}^n (E_k + jF_k)(G_{ki} + jB_{ki})(E_i - jF_i) \quad k=1, 2, \dots, n \quad (1.10)$$

a) 当结点 k 规定为 PQ 结点

$$(P, Q) = (P_k^*, Q_k^*);$$

给定

$$\begin{cases} p_k \equiv \sum_{i=1}^n \varphi_{ki}(E_k, F_k, E_i, F_i) - P_k^* = 0 \\ q_k \equiv \sum_{i=1}^n \psi_{ki}(E_k, F_k, E_i, F_i) - Q_k^* = 0 \end{cases} \quad (1.11)$$

$$\begin{cases} \varphi_{ki}(E_k, F_k, E_i, F_i) = E_k G_{ki} E_i + E_k B_{ki} F_i + F_k G_{ki} F_i - F_k B_{ki} E_i \\ \psi_{ki}(E_k, F_k, E_i, F_i) = F_k G_{ki} E_i + E_k B_{ki} E_i - E_k G_{ki} F_i + F_k B_{ki} F_i \end{cases} \quad (1.12)$$

b) 当结点 k 规定为 PV 结点

$$(P, V) = (P_k^*, V_k^*);$$

给定

$$\begin{cases} p_k = \sum_{i=1}^n \varphi_{ki}(E_k, F_k; E_i, F_i) - P_k^s = 0 \\ v_k^2 = E_k^2 + F_k^2 - V_k^s = 0 \end{cases} \quad (1.13)$$

c) 当结点 k 指定为基准结点

$$(V, \theta) = (V_k^s, 0.0);$$

给定

$$\begin{cases} e_k = E_k - V_k^s = 0 \\ f_k = F_k = 0 \end{cases} \quad (1.14)$$

表 1.1.1 雅可比矩阵元素 (长方形)

$k \neq 1$	$k = l$
$\frac{\partial p_k}{\partial E_i} = G_{ki} E_k - B_{ki} F_k$	$\frac{\partial p_k}{\partial F_i} = -\frac{\partial q_k}{\partial E_i}$
$\frac{\partial q_k}{\partial E_i} = G_{ki} F_k + B_{ki} E_k$	$\frac{\partial q_k}{\partial F_i} = -\frac{\partial p_k}{\partial E_i}$
$\frac{\partial v_k^2}{\partial E_i} = 0$	$\frac{\partial v_k^2}{\partial F_i} = 0$
	$\frac{\partial v_k^2}{\partial E_k} = 2E_k$
	$\frac{\partial v_k^2}{\partial F_k} = 2F_k$

表中 $a_k = \sum_{i=1}^n (G_{ki} E_i + B_{ki} F_i)$, $b_k = \sum_{i=1}^n (G_{ki} F_i - B_{ki} E_i)$, $\dot{I}_k = a_k + j b_k$

iii) 举例

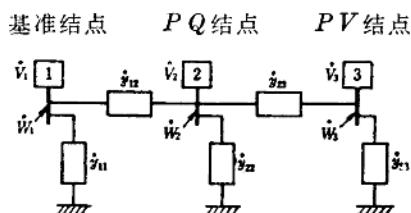


图 1.1.4 计算条件

表 1.1.2 雅可比矩阵

	∂E_1	∂F_1	∂E_2	∂F_2	∂E_3	∂F_3
∂e_1	1	.	.	.	.	.
∂f_1	.	1	.	.	.	.
∂p_2	$-1.20 E_2 + 1.60 F_2$	$-1.20 F_2 + 1.60 E_2$	$-1.20 E_1 - 1.60 F_1 + 2.40 E_2 - 2.40 F_3$	$1.60 E_1 - 1.20 F_1 + 2.40 F_2 + 2.40 E_3$	$2.40 F_2$	$-2.40 E_2$
∂q_2	$-1.20 F_2 + 1.60 E_2$	$-1.20 E_2 + 1.60 F_2$	$-1.60 E_1 + 1.20 F_1 + 7.66 E_2 - 2.40 E_3$	$-1.20 E_1 - 1.60 F_1 + 7.66 F_2 - 2.40 F_3$	$-2.40 E_2$	$-2.40 F_2$
∂p_3	.	.	$2.40 F_3$	$-2.40 E_3$	$2.40 F_3$	$2.40 E_2$
∂v_3^2	.	.	.	.	$2.00 E_3$	$2.00 F_3$

初值 (平直启动)

$$\begin{cases} {}_0E_1 + j_0F_1 = 1.0 + j0.0 \\ {}_0E_2 + j_0F_2 = 1.0 + j0.0 \\ {}_0E_3 + j_0F_3 = 1.0 + j0.0 \end{cases} \quad (1.15)$$

计算结果

$$\begin{cases} E_1 + jF_1 = 1.0 + j0.0 \\ E_2 + jF_2 = 1.0078 - j0.1085 \\ E_3 + jF_3 = 1.0689 - j0.2598 \end{cases} \quad (1.16)$$

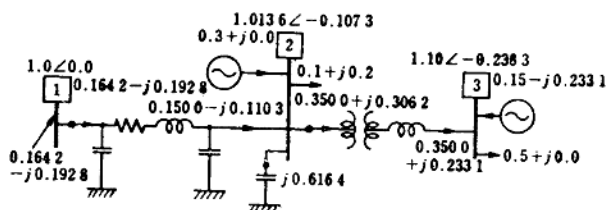


图 1.1.5 计算结果

表 1.1.3 潮流计算 (迭代过程)

k	kx	kf	kJ	kA
0	$\begin{bmatrix} 1.0000 \\ 0.0000 \\ 1.0000 \\ 0.0000 \\ 1.0000 \\ 0.0000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.0000 \\ 0.0000 \\ -0.2000 \\ 0.0300 \\ 0.3500 \\ -0.2100 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.0000 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1.0000 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -1.2000 & -1.6000 & 1.2000 & 4.0000 & 0.0000 & -2.4000 \\ -1.6000 & 1.2000 & 3.6600 & -1.2000 & -2.4000 & 0.0000 \\ \cdot & \cdot & 0.0000 & -2.4000 & 0.0000 & 2.4000 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 2.0000 & 0.0000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.0000 \\ 0.0000 \\ 0.0240 \\ -0.1118 \\ 0.1050 \\ -0.2576 \end{bmatrix}$
1	$\begin{bmatrix} 0.0000 \\ 0.0000 \\ 0.0240 \\ -0.1118 \\ 0.1050 \\ -0.2576 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.0 \\ 0.0 \\ -0.0236 \\ 0.0251 \\ 0.0133 \\ -0.0774 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.0000 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1.0000 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -1.4076 & -1.5043 & 1.8759 & 3.9838 & -0.2682 & -2.4576 \\ -1.5043 & 1.4076 & 3.5919 & -1.4379 & -2.4576 & 0.2682 \\ \cdot & \cdot & -0.6182 & -2.6520 & 0.2682 & 2.4576 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 2.2100 & -0.5152 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.0000 \\ 0.0000 \\ -0.0159 \\ 0.0032 \\ -0.0355 \\ -0.0021 \end{bmatrix}$
2	$\begin{bmatrix} 1.0000 \\ 0.0000 \\ 1.0082 \\ -0.1086 \\ 1.0695 \\ -0.2597 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.0 \\ 0.0 \\ 0.0000 \\ -0.0003 \\ 0.0004 \\ -0.0013 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.0000 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1.0000 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -1.3835 & -1.4823 & 1.8428 & 3.9033 & -0.2605 & -2.4196 \\ -1.4823 & 1.3835 & 3.5556 & -1.4083 & -2.4196 & 0.2605 \\ \cdot & \cdot & -0.6232 & -2.5668 & 0.2605 & 2.4196 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 2.1390 & -0.5193 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.0000 \\ 0.0000 \\ -0.0003 \\ 0.0000 \\ -0.0006 \\ -0.0001 \end{bmatrix}$
3	$\begin{bmatrix} 1.0000 \\ 0.0000 \\ 1.0078 \\ -0.1085 \\ 1.0689 \\ -0.2598 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.0 \\ 0.0 \\ 0.0000 \\ 0.0000 \\ 0.0000 \\ 0.0000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.0000 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1.0000 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -1.3830 & -1.4823 & 1.8423 & 3.9049 & -0.2604 & -2.4188 \\ -1.4823 & 1.3830 & 3.5548 & -1.4077 & -2.4188 & 0.2604 \\ \cdot & \cdot & -0.6235 & -2.5653 & 0.2604 & 2.4188 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 2.1378 & -0.5196 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.0000 \\ 0.0000 \\ 0.0000 \\ 0.0000 \\ 0.0000 \\ 0.0000 \end{bmatrix}$

$${}_k x = \begin{pmatrix} {}_k E_1 \\ {}_k F_1 \\ {}_k E_2 \\ {}_k F_2 \\ {}_k E_3 \\ {}_k F_3 \end{pmatrix}, \quad {}_k f = \begin{pmatrix} e_1({}_k x) \\ f_1({}_k x) \\ p_2({}_k x) \\ q_2({}_k x) \\ p_3({}_k x) \\ v_3^2({}_k x) \end{pmatrix}, \quad {}_k \Delta = \begin{pmatrix} {}_k \Delta E_1 \\ {}_k \Delta F_1 \\ {}_k \Delta E_2 \\ {}_k \Delta F_2 \\ {}_k \Delta E_3 \\ {}_k \Delta F_3 \end{pmatrix}$$

iv) 雅可比矩阵的性质

对大电力系统，其雅可比矩阵是稀疏矩阵。例如：

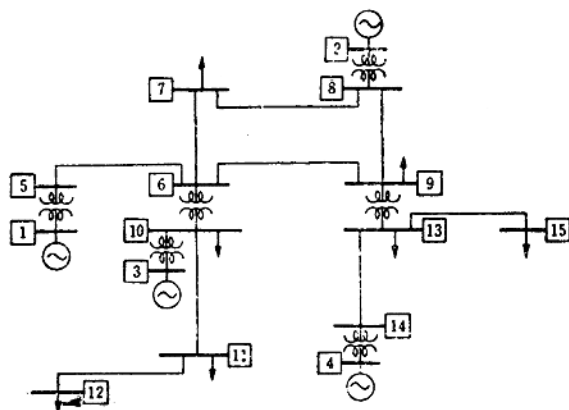


图 1.1.6 具有 15 结点电力系统及其雅可比矩阵

其中 非零元素数为：168， 矩阵全部元素数为：30×30=900

	$E_1 F_1$	$E_1 F_2$	$E_1 F_3$	$E_1 F_4$	$E_1 F_5$	$E_1 F_6$	$E_1 F_7$	$E_1 F_8$	$E_1 F_9$	$E_1 F_{10}$	$E_1 F_{11}$	$E_1 F_{12}$	$E_1 F_{13}$	$E_1 F_{14}$	$E_1 F_{15}$
E_1	1														
F_1		*					*								
E_2		*	*		*					*	*				
F_2		*	*	*	*					*	*			*	*
E_3	*	*			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
F_3		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
E_4		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
F_4		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
E_5		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
F_5		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
E_6		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
F_6		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
E_7		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
F_7		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
E_8		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
F_8		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
E_9		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
F_9		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
E_{10}		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
F_{10}		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
E_{11}		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
F_{11}		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
E_{12}		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
F_{12}		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
E_{13}		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
F_{13}		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
E_{14}		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
F_{14}		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
E_{15}		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
F_{15}		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

2. 大型稀疏矩阵

2.1 三角分解—— B_L ——分解法

i) B_L ——分解法

$$A = LU \quad (2.1)$$

式中: A ——方阵

L ——下三角矩阵

U ——单位上三角矩阵。

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{11} & 0 & 0 & 0 \\ l_{21} & l_{22} & 0 & 0 \\ l_{31} & l_{32} & l_{33} & 0 \\ l_{41} & l_{42} & l_{43} & l_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & u_{12} & u_{13} & u_{14} \\ 0 & 1 & u_{23} & u_{24} \\ 0 & 0 & 1 & u_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

B_L ——分解法

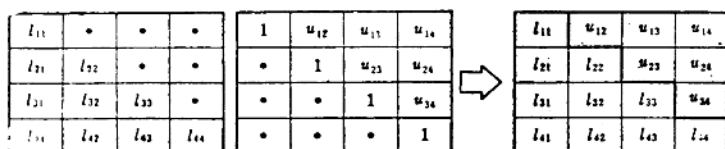


图 1.2.1 矩阵 L , U 组合存储

计算 l_{ip} , u_{ip} 的方法

$$\begin{aligned} l_{ip} &= a_{ip} \quad i \geq p \\ u_{pj} &= \frac{a_{pj}}{a_{pp}} \quad j > p \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$a_{ij} = a_{ij} - \frac{a_{ip}a_{pj}}{a_{pp}}, \quad i > p, \quad j > p$$

其中 $p=1, 2, \dots, n$

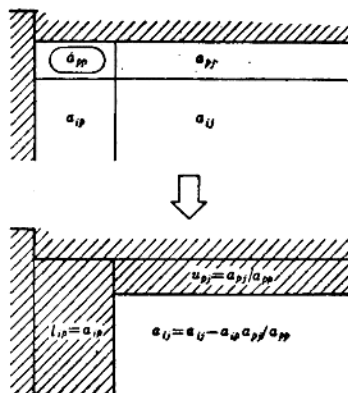


图 1.2.2 计算过程

ii) 举例

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 3 & 0 \\ 2 & 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

2.2 联立方程——Crout 法

i) Crout 法

$$Ax = b \quad (2.5)$$

式中: x ——为未知向量

b ——为已知向量。

$$Ax = LUx = b \quad (2.6)$$

$$\begin{cases} Ly = b \\ Ux = y \end{cases} \quad (2.7)$$

$$\begin{bmatrix} l_{11} & \cdot & \cdot & \cdot \\ l_{21} & l_{22} & \cdot & \cdot \\ l_{31} & l_{32} & l_{33} & \cdot \\ l_{41} & l_{42} & l_{43} & l_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & u_{12} & u_{13} & u_{14} \\ \cdot & 1 & u_{23} & u_{24} \\ \cdot & \cdot & 1 & u_{34} \\ \cdot & \cdot & \cdot & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

前代过程

$$\begin{aligned} l_{11}y_1 &= b_1 \quad \therefore y_1 = \frac{b_1}{l_{11}} \\ l_{21}y_1 + l_{22}y_2 &= b_2 \quad \therefore y_2 = \frac{(b_2 - l_{21}y_1)}{l_{22}} \\ l_{31}y_1 + l_{32}y_2 + l_{33}y_3 &= b_3 \quad \therefore y_3 = \frac{(b_3 - l_{31}y_1 - l_{32}y_2)}{l_{33}} \\ l_{41}y_1 + l_{42}y_2 + l_{43}y_3 + l_{44}y_4 &= b_4 \quad \therefore y_4 = \frac{(b_4 - l_{41}y_1 - l_{42}y_2 - l_{43}y_3)}{l_{44}} \end{aligned} \quad (2.9)$$

回代过程

$$\begin{aligned} x_4 &= y_4 \quad \therefore x_4 = y_4 \\ x_3 + u_{34}x_4 &= y_3 \quad \therefore x_3 = y_3 - u_{34}x_4 \\ x_2 + u_{23}x_3 + u_{24}x_4 &= y_2 \quad \therefore x_2 = y_2 - u_{23}x_3 - u_{24}x_4 \\ x_1 + u_{12}x_2 + u_{13}x_3 + u_{14}x_4 &= y_1 \quad \therefore x_1 = y_1 - u_{12}x_2 - u_{13}x_3 - u_{14}x_4 \end{aligned} \quad (2.10)$$

ii) 举例

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 3 & 0 \\ 2 & 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ 10 \\ 7 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

表 1.2.1 计算过程(例)

第一步

$$A = \begin{bmatrix} \textcircled{1} & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 3 & 0 \\ 2 & 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix}$$

第二步

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & \textcircled{3} & 3 & 0 \\ 2 & -4 & 2 & 0 \\ 1 & -2 & 0 & 4 \end{bmatrix}$$

第三步

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 1 & 0 \\ 2 & -4 & \textcircled{6} & 0 \\ 1 & -2 & 2 & 4 \end{bmatrix}$$

第四步

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 1 & 0 \\ 2 & -4 & 6 & 0 \\ 1 & -2 & 2 & \textcircled{4} \end{bmatrix}$$

结 束

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 1 & 0 \\ 2 & -4 & 6 & 0 \\ 1 & -2 & 2 & 4 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 3 & \cdot & \cdot \\ 2 & -4 & 6 & \cdot \\ 1 & -2 & 2 & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ 10 \\ 7 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} 1 & 2 & 0 & 0 \\ \cdot & 1 & 1 & 0 \\ \cdot & \cdot & 1 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$y_1=1, y_2=1, y_3=2, y_4=1 \quad (2.13)$$

计算结果

$$x_4=1, x_3=2, x_2=-1, x_1=3 \quad (2.14)$$

3. 电网 VQ 特性的简化计算

3.1 由于 V 和 θ 的变化所引起的潮流的增量。

功率方程:

输电线路:

$$p_{s,r} = b_{s,r} V_s V_r \sin(\theta_s - \theta_r) + g_{s,r} [V_s^2 - V_s V_r \cos(\theta_s - \theta_r)] \quad (3.1)$$

$$q_{s,r} = -g_{s,r} V_s V_r \sin(\theta_s - \theta_r) + b_{s,r} [V_s^2 - V_s V_r \cos(\theta_s - \theta_r)] - \frac{1}{2} C_{s,r} V_s^2 \quad (3.2)$$

变压器:

$$\frac{V_m}{V_s} = a_{s,r}, \quad \theta_m - \theta_s = \alpha_{s,r} \quad (3.3)$$

并联电容器:

$$q_{s,s} = C_{s,s} V_s^2 \quad (3.4)$$

$$V_s \angle \theta_s \rightarrow (V_s + \delta V_s) \angle (\theta_s + \delta \theta_s)$$

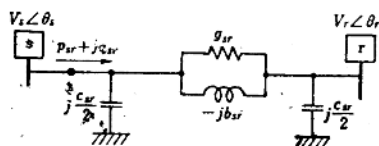
$$V_r \angle \theta_r \rightarrow (V_r + \delta V_r) \angle (\theta_r + \delta \theta_r) \quad (3.5)$$

$$V_m \angle \theta_m \rightarrow (V_m + \delta V_m) \angle (\theta_m + \delta \theta_m)$$

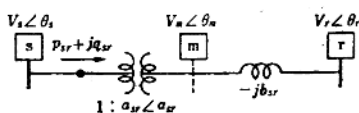
$\Downarrow$

$$a_{s,r} \angle \alpha_{s,r} \rightarrow (a_{s,r} + \delta a_{s,r}) \angle (\alpha_{s,r} + \delta \alpha_{s,r}), \quad c_{s,s} \rightarrow c_{s,s} + \delta c_{s,s}$$

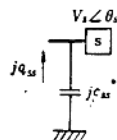
$$p_{s,r} \rightarrow p_{s,r} + \delta p_{s,r}, \quad q_{s,r} \rightarrow q_{s,r} + \delta q_{s,r}, \quad q_{s,s} \rightarrow q_{s,s} + \delta q_{s,s}$$



(a) 输电线路



(b) 变压器



(c) 电容器

图 1.3.1 系统元件表示图

如果 $g_{s,r}=0$, 那末:

$$\delta p_{sr} = b_{sr} V_s V_r \sin \theta_{sr} \cdot \left(\frac{\delta V_s}{V_s} + \frac{\delta V_r}{V_r} + \frac{\delta \theta_{sr}}{\tan \theta_{sr}} \right) \quad (3.6)$$

$$\delta q_{sr} = b_{sr} \left\{ 2 V_s^2 \cdot \frac{\delta V_s}{V_s} - V_s V_r \cos \theta_{sr} \cdot \left(\frac{\delta V_s}{V_s} + \frac{\delta V_r}{V_r} - \frac{\delta \theta_{sr}}{\cot \theta_{sr}} \right) \right\} - C_{sr} V_s^2 \cdot \frac{\delta V_s}{V_s} \quad (3.7)$$

$$\frac{\delta \theta_{sr}}{\alpha_{sr}} = \frac{\delta V_m}{V_m} - \frac{\delta V_s}{V_s}, \quad \delta \alpha_{sr} = \delta \theta_m - \delta \theta, \quad (3.8)$$

3.2 $p-\theta$ 网络—— δp_{sr} 和 $\delta \theta_s$, $\delta \theta_r$ 间的近似关系

i) 设 $\frac{\delta V_s}{V_s} = 0$, 及 $\frac{\delta V_r}{V_r} = 0$. 则

$$\delta p_{sr} = b_{sr} V_s V_r \cos \theta_{sr} \cdot (\delta \theta_s - \delta \theta_r) = -\delta p_{rs} \quad (3.9)$$

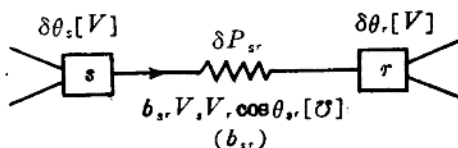


图 1.3.2(a) $p-\theta$ 网络

ii) 举例

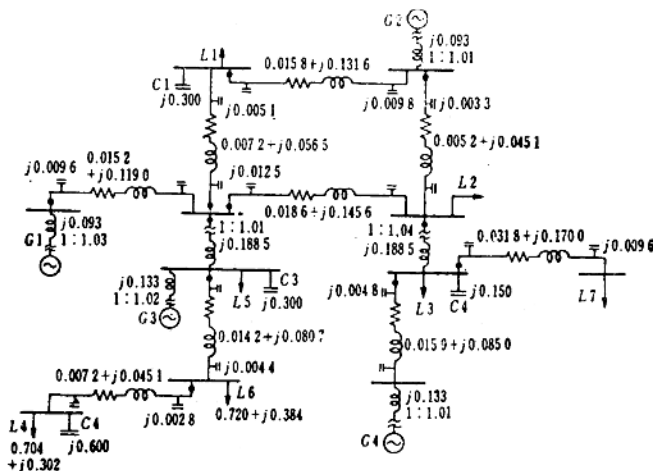


图 1.3.2 在基本潮流下的系统参数
(以标么值表)

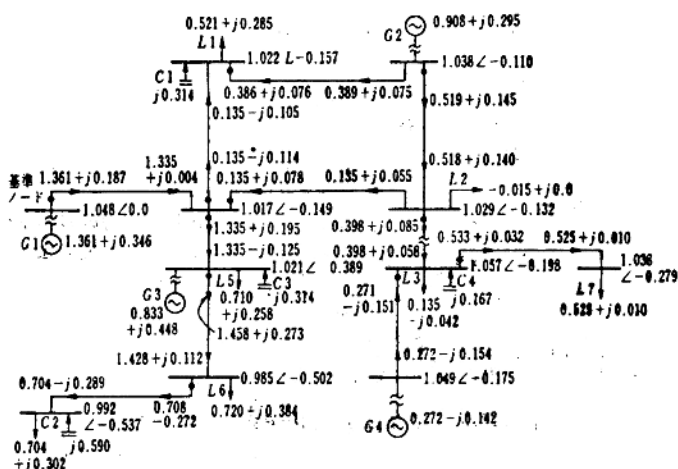


图 1.3.3 在基本潮流下的计算结果
(以标么值表)

当发电机G4有功功率变化1%（以百分值表出）时的潮流增量，如图1.3.5，图1.3.6所示。图1.3.5为精确计算，图1.3.6是根据 $P-\theta$ 网络法计算的。

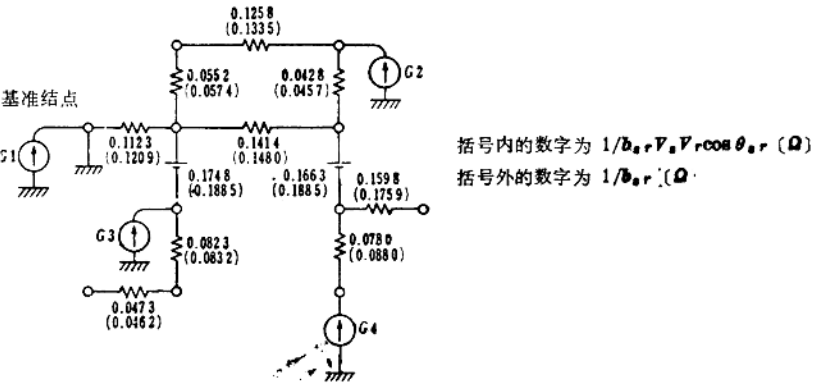


图 1.3.4 $P-\theta$ 网络

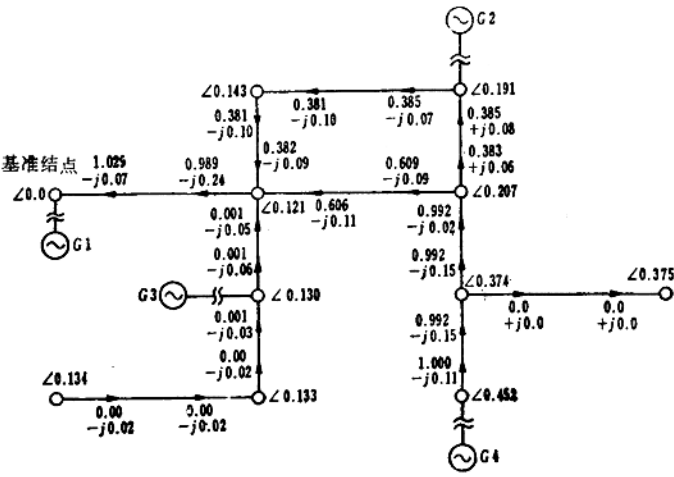


图 1.3.5 潮流增量分布 (精确算法)

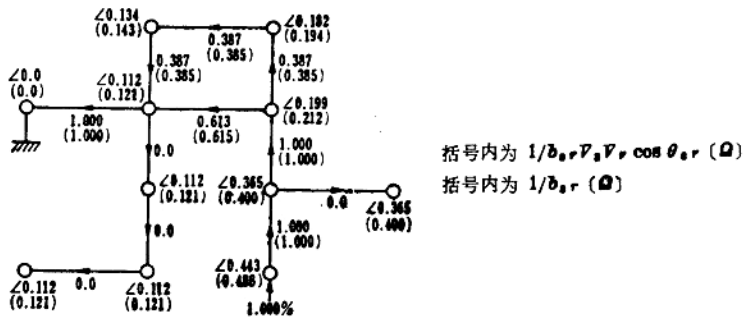


图 1.3.6 潮流增量分布 ($P-\theta$ 网络法)

3.3 Q-s 网络—— $\delta q_{s,r}$ 和 $\delta V_s, \delta V_r$ 间的近似关系

i) 设 $g_{s,r}=0$ 及 $\delta p_{s,r}=0$, 则

$$b_{s,r} V_s V_r \sin \theta_{s,r} \cdot \left(\frac{\delta V_s}{V_s} + \frac{\delta V_r}{V_r} + \frac{\delta \theta_{s,r}}{\tan \theta_{s,r}} \right) = 0 \quad (3.10)$$

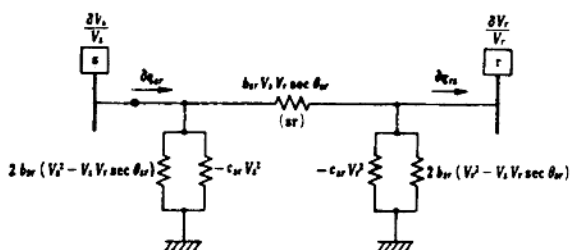


图 1.3.6(a) Q-s 网络

——输电线路中的无功增量

$$\begin{aligned} \delta q_{s,r} &= b_{s,r} \left\{ 2 V_s^2 \cdot \frac{\delta V_s}{V_s} - V_s V_r \cos \theta_{s,r} \cdot \left(\frac{\delta V_s}{V_s} + \frac{\delta V_r}{V_r} - \frac{\delta \theta_{s,r}}{\cot \theta_{s,r}} \right) \right\} - C_{s,r} V_s^2 \cdot \frac{\delta V_s}{V_s} \\ &= b_{s,r} V_s V_r \sec \theta_{s,r} \cdot \left(\frac{\delta V_s}{V_s} - \frac{\delta V_r}{V_r} \right) + 2 b_{s,r} (V_s^2 - V_s V_r \sec \theta_{s,r}) \cdot \frac{\delta V_s}{V_s} \\ &\quad - C_{s,r} V_s^2 \cdot \frac{\delta V_s}{V_s} \end{aligned} \quad (3.11)$$

——在结点处的无功增量

$$\sum_r \delta q_{s,r} - 2 V_s^2 C_{s,r} \cdot \frac{\delta V_s}{V_s} = \delta Q_s + V_s^2 \delta C_{s,r} \quad (3.12)$$

ii) 举例

当发电机 G1 电压变化 1% (以百分值表示) 时的潮流增量。

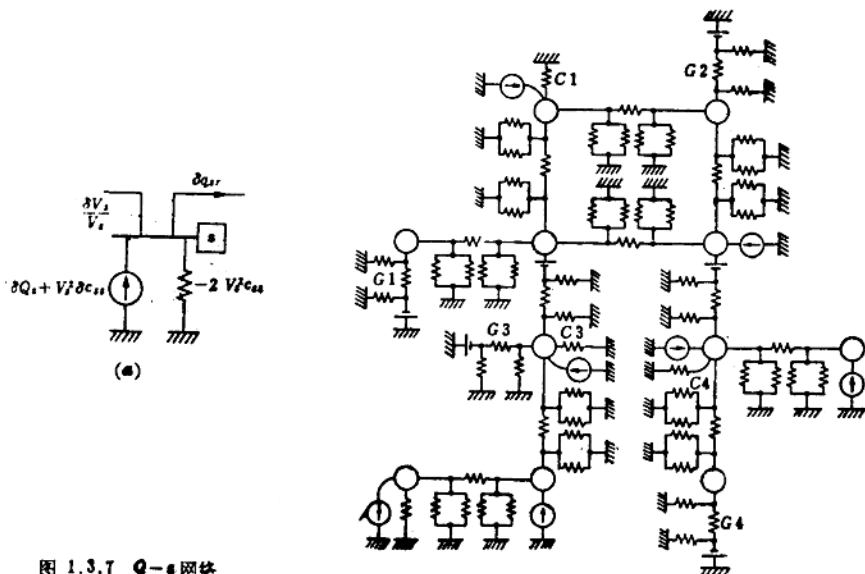
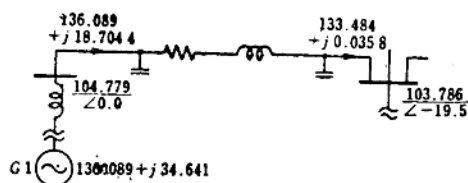
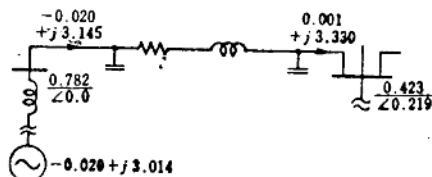


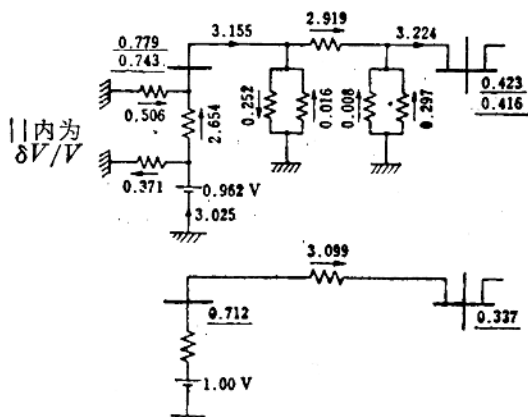
图 1.3.7 Q-s 网络



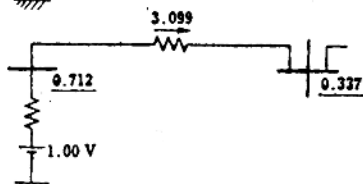
基本潮流分布



精确计算



用 $Q-s$ 网络计算



用近似的 $Q-s$ 网络计算

图 1.3.8 流量分布 ($Q-s$ 网络法)

4. Y 矩阵

4.1 三角分解

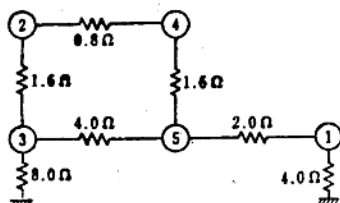


图 1.4.1 网络模型

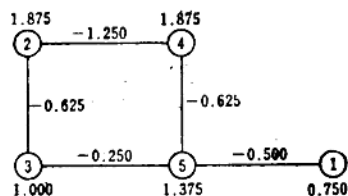


图 1.4.2 Y 矩阵图示

$$Y = \begin{bmatrix} \textcircled{1} & \textcircled{2} & \textcircled{3} & \textcircled{4} & \textcircled{5} \\ \textcircled{1} & 0.750 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & -0.500 \\ \textcircled{2} & 0.0 & 1.875 & -0.625 & -1.250 & 0.0 \\ \textcircled{3} & 0.0 & -0.625 & 1.000 & 0.0 & -0.250 \\ \textcircled{4} & 0.0 & -1.250 & 0.0 & 1.875 & -0.625 \\ \textcircled{5} & -0.500 & 0.0 & -0.250 & -0.625 & 1.375 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Y 矩阵的三角分解

$$Y = LDL' \quad (4.2)$$

$$L = \begin{matrix} & \textcircled{1} & \textcircled{2} & \textcircled{3} & \textcircled{4} & \textcircled{5} \\ \textcircled{1} & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \textcircled{2} & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \textcircled{3} & \cdot & -0.333 & 1 & \cdot & \cdot \\ \textcircled{4} & \cdot & -0.667 & -0.526 & 1 & \cdot \\ \textcircled{5} & -0.667 & \cdot & -0.316 & -0.920 & 1 \end{matrix} \quad (4.3)$$

$$D = \begin{matrix} & \textcircled{1} & \textcircled{2} & \textcircled{3} & \textcircled{4} & \textcircled{5} \\ \textcircled{1} & 0.750 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \textcircled{2} & \cdot & 1.875 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \textcircled{3} & \cdot & \cdot & 0.792 & \cdot & \cdot \\ \textcircled{4} & \cdot & \cdot & \cdot & 0.822 & \cdot \\ \textcircled{5} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0.267 \end{matrix} \quad (4.4)$$

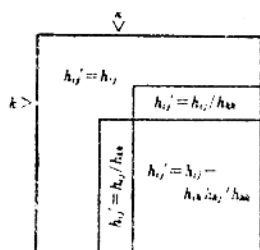
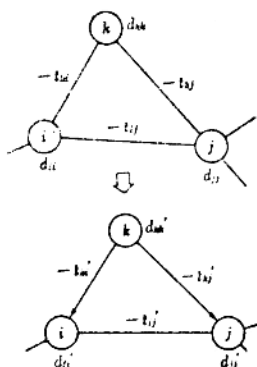


图 1.4.3 B_1 ——分解法
(矩阵表示)



$$\begin{aligned} d_{kk}' &= d_{kk} & d_{ii}' &= d_{ii} - t_{ki}'^2 d_{kk}' \\ t_{ki}' &= t_{ki} / d_{kk}' & d_{jj}' &= d_{jj} - t_{kj}'^2 d_{kk}' \\ t_{kj}' &= t_{kj} / d_{kk}' & t_{ij}' &= t_{ij} - t_{ki}' t_{kj}' d_{kk}' \end{aligned}$$

图 1.4.5 B_1 ——分解法
(图示)

第一步

0.750	·	·	·	-0.500
·	1.875	-0.625	-1.250	·
·	-0.625	1.000	·	-0.250
·	-1.250	·	1.875	-0.625
-0.500	·	-0.250	-0.625	1.375

第二步

0.750	·	·	·	-0.667
·	1.8750	-0.625	-1.250	·
·	-0.625	1.000	·	-0.250
·	-1.250	·	1.875	-0.625
-0.667	·	-0.250	-0.625	1.042

第三步

0.750	·	·	·	-0.667
·	1.875	-0.333	-0.667	·
·	-0.333	0.792	-0.417	-0.250
·	-0.667	-0.417	1.042	-0.625
-0.667	·	-0.250	-0.625	1.042

第四步

0.750	·	·	·	-0.667
·	1.875	-0.333	-0.667	·
·	-0.333	0.792	-0.526	-0.316
·	-0.667	-0.526	0.822	-0.757
-0.667	·	-0.316	-0.757	0.963

第五步

0.750	·	·	·	-0.667
·	1.875	-0.333	-0.667	·
·	-0.333	0.792	-0.526	-0.316
·	-0.667	-0.526	0.822	-0.920
-0.667	·	-0.316	-0.920	0.267

图 1.4.4 三角分解过程

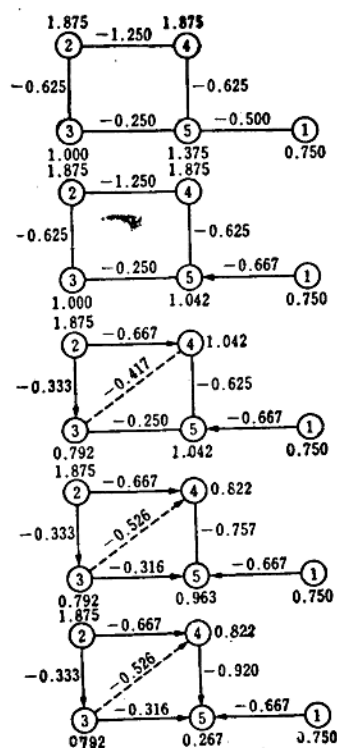


图 1.4.6 三角分解过程

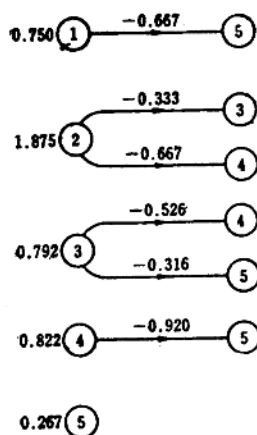
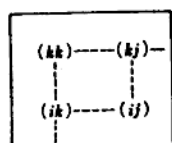
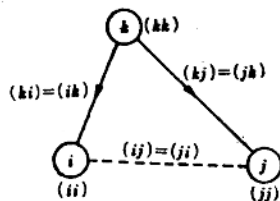


图 1.4.7 LDL^T 矩阵元素构成的图

4.2 结点顺序排列



(a) 矩阵



(b) 图示

图 1.4.8 B_k ——分解过程中的新的非零元素

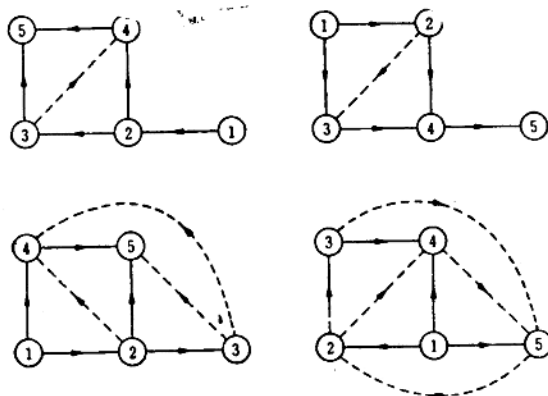


图 1.4.9 例 1