

容差子网络级故障诊断¹

张友纯

(中国地质大学信息工程学院 武汉 430074)

摘要 该文在故障子网络等效电流矢量的基础上, 讨论了子网络的测试特性, 得到了容差条件下故障子网络判断的必要条件. 该方法在诊断过程中可对各子网络同时做出诊断, 不但能加快诊断过程, 而且可消除误差传递性的问题, 对于容差故障诊断具有理论和实际意义.

关键词 容差, 子网络, 子网络测试矩阵, 故障诊断

中图分类号 TN062

1 引言

模拟电路子网络级故障诊断系统的自验证^[1](STC) 和互验证^[2](MTC) 方法发展到解除了撕裂点必须全部可及的限制^[3,4], 但是, 由于实际存在的误差传递性问题往往使得诊断无法进行. 本文在文献 [5] 的 n 端网络电流控制电压源 (CCVS) 模型基础上提出了 n 端网络电流控制电流源 (CCCS) 模型, 并将一个子网络的故障用一个故障子网络等效电流矢量来表示, 进而得到了可表征子网络测试特性的测试矩阵, 并进一步讨论了容差条件下子网络测试矩阵的偏移, 得到容差条件下故障子网络判断的必要条件. 利用此方法可同时对各子网络独立地进行故障判断, 使消除子网络级故障诊断中误差传递性的影响成为可能.

2 子网络的测试矩阵

文献 [5] 提出了 n 端网络的 CCVS 模型, 在此模型基础上, 可以得到 n 端网络的 CCCS 模型, 即对一个 $(n+1)$ 个端点的网络 N , 如果选择一个端点为参考点, 则 N 各端的电流电压关系为

$$I_n = Y_n V_n + \alpha_n'' I_n - I_s \quad (1)$$

其中 I_n 为端电流向量, I_s 为等效电流源向量, 与 N 内独立源有关; V_n 为端电压向量; Y_n 为等效支路等效导纳矩阵, $Y_n = \text{diag}[y_1 y_2 \cdots y_n]$, $\alpha_n'' (\alpha_n'' \in C^{n \times n})$ 表示各端点电流间的控制关系. 因此一个 $(n+1)$ 个端点的网络 N 可用一个有 n 条 CCCS 星形等效支路来等效, 其中第 i 条等效支路如图 1 所示.

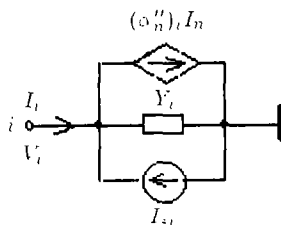


图 1 端点 i 与参考点间的 CCCS 模型的等效电路

¹ 1999-06-24 收到, 1999-12-24 定稿

由于每一支路的故障可用一个故障等效电流来表示, 因此和 N 内的独立源可等效为 CCCS 星形电路的等效电流源矢量一样, 一个子网络故障也可用一个故障等效电流矢量来表示。

对于一个网络 N , 如果其中一个子网络 N^i 等效为 CCCS 星形电路后, 则有如下定义:

定义 1 子网络转移阻抗矩阵 Z_n^i 在标称网络 N 中, 当一个子网络 N^i 等效为具有 n 条 CCCS 星形支路后, 假设第 k 条等效支路的电流激励 I_{sk}^i 在网络 N 的测试点 j 得到相对于 N 的参考点电位 V_{mj} , 则 N^i 的这条等效支路对第 j 个测试点的转移阻抗为 $Z_{jk}^i = V_{mj}/I_{sk}^i$ 。 N^i 的 n_i 条等效支路到全部测试点的转移阻抗矩阵为

$$Z_n^i = V_m(I_s^i)^{-1} \quad (2)$$

式中 $V_m \in C^{m \times n_i}$, $I_s^i \in C^{n_i \times n_i}$, $Z_n^i \in C^{m \times n_i}$ 。 n_i 为 N^i 的等效支路数, m 为测试点数, $m > n_i$ 。

定义 2 子网络测试矩阵 M_δ^i 对于一个网络 N , $(\Delta V_m + \delta)$ 是由故障和偏差引起的测试点电压增量矩阵, Z_n^i 是子网络 N^i 的转移阻抗矩阵, 若 $m > n_i$, 则子网络 N^i 的测试矩阵 M_δ^i 为

$$M_\delta^i = P_\delta Z_n^i - Z_n^i = P_\delta^\perp Z_n^i \quad (3)$$

式中 P_δ 和 P_δ^\perp 分别为 $(\Delta V_m + \delta)$ 空间的正交投影算子和 $(\Delta V_m + \delta)$ 的正交补空间的正交投影算子。由于 P_δ 或 P_δ^\perp 包含了网络 N 的全局测试信息, 而 $M_\delta^i = P_\delta^\perp Z_n^i$ 为 P_δ^\perp 的子空间 ($M_\delta^i \supseteq P_\delta^\perp$), 既包含了 N 的全局信息又包含了子网络 N^i 的局部信息, 因此被称为 N^i 的测试矩阵。

在无容差条件下, 则有

$$M^i = P Z_n^i - Z_n^i = P^\perp Z_n^i \quad (4)$$

式中 P 和 P^\perp 分别表示 ΔV_m 和 ΔV_m^\perp 空间的正交投影算子。

3 容差条件下测试矩阵的偏移

在容差条件下, 由于元件的偏差, 必然带来测试矩阵的偏移, 即

$$\Delta M_\delta^i = M_{\delta f}^i - M_\delta^i \quad (5)$$

下面利用矩阵扰动理论^[6]讨论其偏移情况。

对于容差网络 N_δ , 在测试端施以 $s(s > k, k$ 为 N 内独立故障支路数) 次独立激励, 则有

$$V_m = (Z_m + \Delta Z_m)I_m + (Z_{mf} + \Delta Z_{mf})I_f \quad (6)$$

$$(\Delta V_m + \delta) = Z_{mf}I_f + \Delta Z_{mf}I_f + \Delta Z_m I_m \quad (7)$$

式中 Z_m 、 Z_{mf} 分别为标称网络 N 的策动点阻抗和故障支路到策动点的转移阻抗, ΔZ_m 和 ΔZ_{mf} 分别为这两个阻抗的偏移, I_f 为故障支路等效电流。 $\Delta V_m = Z_{mf}I_f$, $\delta = \Delta Z_{mf}I_f + \Delta Z_m I_m$ 。

对于第一类容差^[7], $(\Delta V_m + \delta_1) = (Z_{mf} + \Delta Z_{mf})I_f$, 若故障支路独立, 则 Z_{mf} 与 ΔV_m 空间重合, 如果用 $P_{(Z_{mf} + \Delta Z_{mf})}$ 、 $P_{Z_{mf}}$ 和 P_{δ_1} 分别表示 $(Z_{mf} + \Delta Z_{mf})$ 、 Z_{mf} 、 $(\Delta V_m + \delta_1)$ 空间的正交投影算子, 则有 $P_{\delta_1} = P_{(Z_{mf} + \Delta Z_{mf})}$, $P = P_{Z_{mf}}$, 因此有

$$P_{\delta_1} - P = P_{(Z_{mf} + \Delta Z_{mf})} - P_{Z_{mf}} \quad (8)$$

所以第一类容差时, N^i 的测试矩阵的偏移为

$$\Delta M_1^i = M_{\delta_1}^i - M^i = (P_{\delta_1} - P)Z_n^i = (P_{(Z_{mf} + \Delta Z_{mf})} - P_{Z_{mf}})Z_n^i \quad (9)$$

因此根据投影扰动理论可得

$$\begin{aligned} \Delta M_1^i &= (P_{(Z_{mf} + \Delta Z_{mf})})(Z_{mf} + \Delta Z_{mf})^{+H} \Delta Z_{mf} P_{Z_{mf}}^\perp + P_{(Z_{mf} + \Delta Z_{mf})}^\perp \Delta Z_{mf} Z_{mf}^+ P_{Z_{mf}} Z_n^i \\ &= (P_{\delta_1} (Z_{mf} + \Delta Z_{mf})^{+H} \Delta Z_{mf} P^\perp + P_{\delta_1}^\perp \Delta Z_{mf} Z_{mf}^+ P) Z_n^i \end{aligned} \quad (10)$$

式中 $(Z_{mf} + \Delta Z_{mf})^+$ 和 Z_{mf}^+ 分别为 $(Z_{mf} + \Delta Z_{mf})$ 和 Z_{mf} 的广义逆。(10) 式表明, 第一类容差时, N^i 的测试矩阵的偏移 ΔM_1^i 仅与元件的偏差 ΔZ_{mf} 有关, 而与故障的大小无关。

对于第二类容差, N^i 的 ΔM^i 为 $\Delta M^i = (P_\delta - P)Z_n^i = (P_\delta - P_{\delta_1})Z_n^i - (P_{\delta_1} - P)Z_n^i = \Delta M_2^i + \Delta M_1^i$ 。由于 $(\Delta V_m + \delta) - (\Delta V_m + \delta_1) = \Delta Z_m I_m$ 因此有

$$\Delta M^i = [P_\delta (Z_{mf} + \Delta Z_{mf})^{+H} \Delta Z_m I_m P_{\delta_1}^\perp + P_\delta^\perp \Delta Z_m I_m (\Delta V_m + \delta_1)^+ P_{\delta_1}] Z_n^i + \Delta M_1^i \quad (11)$$

(11) 式表明 M^i 的偏移 ΔM^i 在第二类容差时与故障比有关, 一般来说, 故障越大, 偏移越小。

4 容差条件下故障网络诊断

无容差时, 若 N 中有 L 个子网络发生故障, 且各子网络间无耦合, 则根据子网络转移阻抗的定义, 由故障引起的测试点电压增量为

$$\begin{aligned} \Delta V_m &= [Z_{nf}^1 \ Z_{nf}^2 \ \cdots \ Z_{nf}^L][I_{nf}^1 \ I_{nf}^2 \ \cdots \ I_{nf}^L]^T \\ &= [Z_{nf}^1 \ Z_{nf}^2 \ \cdots \ Z_{nf}^L] \text{diag}[\alpha_f^1 \ \alpha_f^2 \ \cdots \ \alpha_f^L][I_f^1 \ I_f^2 \ \cdots \ I_f^L]^T \end{aligned} \quad (12)$$

上式中 Z_{nf}^i 和 $I_{nf}^i (i = 1, 2, \dots, L)$ 分别为 N^i 的转移阻抗和子网络故障等效电流矩阵, I_f^i 和 $\alpha_f^i (i = 1, 2, \dots, L)$ 分别为 N^i 内的支路故障等效电流和故障支路所对应的电流变换矩阵, $\Delta V_m \in C^{m \times k}$ 。若 $\text{rank}(\Delta V_m) = k < m$, 则 $[Z_{nf}^1 \ Z_{nf}^2 \ \cdots \ Z_{nf}^L] \text{diag}[\alpha_f^1 \ \alpha_f^2 \ \cdots \ \alpha_f^L]$ 构成的空间与 ΔV_m 空间重合, 故有

$$P^\perp [Z_{nf}^1 \ Z_{nf}^2 \ \cdots \ Z_{nf}^L] \text{diag}[\alpha_f^1 \ \alpha_f^2 \ \cdots \ \alpha_f^L] = 0 \quad (13)$$

因此, 对于任一故障子网络有

$$P^\perp Z_{nf}^i \alpha_f^i = M_f^i \alpha_f^i = 0 \quad (14)$$

在容差条件下则有

$$M_{\delta_f}^i \alpha_f^i = (M_f^i + \Delta M_f^i) \alpha_f^i = \Delta M_f^i \alpha_f^i \quad (15)$$

而 (10) 式和 (11) 式给出了由元件偏差引起的子网络 N^i 的测试矩阵的偏移情况, 因此对于故障子网络 N_f^i , 在第一类容差时, 对应于故障支路, 根据 (10) 式有

$$M_{\delta_f}^i \alpha_f^i = \Delta M_f^i \alpha_f^i = [P_{\delta_1} (Z_{mf} + \Delta Z_{mf})^{+H} \Delta Z_{mf} P^\perp + P_{\delta_1}^\perp \Delta Z_{mf} Z_{mf}^+ P] Z_{nf}^i \alpha_f^i \quad (16)$$

由于 N_f^i 中 $Z_{nf}^i \alpha_f^i$ 为 ΔV_m 的子空间, 故 $P^\perp Z_{nf}^i \alpha_f^i = 0$, $P Z_{nf}^i \alpha_f^i = Z_{nf}^i \alpha_f^i$, 因此 $M_{\delta_f}^i \alpha_f^i = P_{\delta_1}^\perp \Delta Z_{mf} \cdot Z_{mf}^+ Z_{nf}^i \alpha_f^i$, 所以对于 N_f^i 内的每一故障支路 b_{fj}^i 有

$$\|M_{\delta_f}^i \alpha_{fj}^i\|_2 = \|P_{\delta_1}^\perp \Delta Z_{mf} Z_{mf}^+ Z_{nf}^i \alpha_{fj}^i\|_2 \quad (17)$$

由于 $\Delta Z_{mf} = (Z_{mf})_{\delta_1} - Z_{mf}$, ($(Z_{mf})_{\delta_1}$ 为第一类容差时故障支路的实际转移阻抗阵), $P_{\delta_1}^\perp (Z_{mf})_{\delta_1} = 0$, 因此有 $P_{\delta_1}^\perp \Delta Z_{mf} Z_{mf}^+ = [P_{\delta_1}^\perp (Z_{mf})_{\delta_1} - P_{\delta_1}^\perp Z_{mf}] Z_{mf}^+ = -P_{\delta_1}^\perp Z_{mf} Z_{mf}^+ = -P_{\delta_1}^\perp P$, 所以 $P_{\delta_1}^\perp \Delta Z_{mf} Z_{mf}^+ Z_{nf}^i \alpha_{fj}^i = -P_{\delta_1}^\perp P Z_{nf}^i \alpha_{fj}^i = -P_{\delta_1}^\perp Z_{nf}^i \alpha_{fj}^i$, 因此有

$$\|M_{\delta_f}^i \alpha_{fj}^i\|_2 = \|P_{\delta_1}^\perp Z_{nf}^i \alpha_{fj}^i\|_2 \quad (18)$$

若设第一类容差时, N^i 的实际子网络转移阻抗矩阵和 b_{fj}^i 支路实际电流变换向量的乘积为 $(Z_{nf}^i \alpha_{fj}^i)_{\delta_1}$, 即 $(Z_{nf}^i \alpha_{fj}^i)_{\delta_1} = Z_{nf}^i \alpha_{fj}^i + \Delta(Z_{nf}^i \alpha_{fj}^i)$, 因此有

$$P_{\delta_1}^\perp Z_{nf}^i \alpha_{fj}^i = P_{\delta_1}^\perp (Z_{nf}^i \alpha_{fj}^i)_{\delta_1} - P_{\delta_1}^\perp \Delta(Z_{nf}^i \alpha_{fj}^i) \quad (19)$$

由于 $(Z_{nf}^i \alpha_{fj}^i)_{\delta_1}$ 在 $(\Delta V_m + \delta_1)$ 空间之中, 故 $P_{\delta_1}^\perp (Z_{nf}^i \alpha_{fj}^i)_{\delta_1} = 0$, 因此

$$\|M_{\delta_f}^i \alpha_{fj}^i\|_2 = \|P_{\delta_1}^\perp \Delta(Z_{nf}^i \alpha_{fj}^i)\|_2 \leq \|\Delta(Z_{nf}^i \alpha_{fj}^i)\|_2 \quad (20)$$

若设电路整体相对容差为 $\delta\%$, 即 $\|\Delta(Z_{nf}^i \alpha_{fj}^i)\|_2 \leq \delta\% \|Z_{nf}^i \alpha_{fj}^i\|_2$, 则有

$$\|M_{\delta_f}^i \alpha_{fj}^i\|_2 \leq \delta\% \|Z_{nf}^i \alpha_{fj}^i\|_2 \quad (21)$$

应该指出, 在一般情况下, 元件的容差和电路整体容差并不相同, 在电路的容差设计中, 往往先给出输出指标的范围 (或容差), 然后根据灵敏度分析得到各元件所允许的偏差 (或元件的容差), 在一个电路中各元件的容差往往是不同的, 因此在故障诊断中, 应以电路的整体容差为依据。

(21) 式表明, 若 N_f^i 为故障子网络时, $M_{\delta_f}^i \alpha_{fj}^i$ 中至少一个列向量的 $\|\bullet\|_2$ 满足该式。

对于第二类容差有 $M_\delta^i = M^i + \Delta M_1^i + \Delta M_2^i$, 因此对于 N_f^i 内的故障支路有

$$M_{\delta_f}^i \alpha_f^i = M_f^i \alpha_f^i + \Delta M_1^i \alpha_f^i + \Delta M_2^i \alpha_f^i = \Delta M_1^i \alpha_f^i + \Delta M_2^i \alpha_f^i \quad (22)$$

由于 $\Delta V_m + \delta_1 = (Z_{mf} + \Delta Z_{mf}) I_f$, 当 N 内独立故障数为 k 时, 则有 $\text{rank}(\Delta V_m + \delta_1) = k$, 所以, 如果故障不被容差 $(\delta - \delta_1) = \Delta Z_m I_m$ 所掩盖, 则当独立测试次数为 $s = k$ 时, 一定有 $\text{rank}(\Delta V_m + \delta) = \text{rank}(\Delta V_m + \delta_1) = k$, (独立故障数 k 可利用扰动对奇异值的影响来确定); 如果存在故障被容差掩盖的情况, 即扰动使 $\text{rank}(\Delta V_m + \delta) = k' < k$, 则可以认为在容差范围 N 内的独立故障数为 k' , 因此当 $s = k'$ 时也有 $\text{rank}(\Delta V_m + \delta) = \text{rank}(\Delta V_m + \delta_1) = k'$. 所以总可以有 $\text{rank}(\Delta V_m + \delta) = \text{rank}(\Delta V_m + \delta_1)$. 根据投影扰动理论^[6], 有

$$\begin{aligned} \|P_\delta - P_{\delta_1}\|_2 &\leq \min\{\|(\Delta V_m + \delta)^+\|_2 \|(\Delta V_m + \delta_1)^+\|_2\} \|\Delta Z_m I_m\|_2 \\ &\leq \|(\Delta V_m + \delta)^+\|_2 \|\Delta Z_m I_m\|_2 \end{aligned} \quad (23)$$

式中 $\Delta Z_m I_m = \delta - \delta_1$, 因此对应于故障支路 b_{fj}^i , 有

$$\|M_{\delta f}^i \alpha_{fj}^i\|_2 \leq \|Z_{nf}^i \alpha_{fj}^i\|_2 \delta\% + \|(\Delta V_m + \delta)^+\|_2 \|\Delta Z_m I_m\|_2 \|Z_{nf}^i \alpha_{fj}^i\|_2 \quad (24)$$

由于 $Z_m I_m = V_{m0}$ (V_{m0} 为标称网络测试点电压), ΔZ_m 为 Z_m 的偏差, 因此当电路整体容差为 $\delta\%$ 时有

$$\|\Delta Z_m I_m\|_2 = \delta\% \|V_{m0}\|_2 \quad (25)$$

代入 (24) 式可得

$$\|M_{\delta f}^i \alpha_{fj}^i\|_2 \leq \delta\% \|Z_{nf}^i \alpha_{fj}^i\|_2 [1 + \|(\Delta V_m + \delta)^+\|_2 \|V_{m0}\|_2] \quad (26)$$

若设

$$T_{1j}^i = \delta\% \|Z_{nf}^i \alpha_{fj}^i\|_2 \quad (27)$$

$$T_{2j}^i = \delta\% \|Z_{nf}^i \alpha_{fj}^i\|_2 [1 + \|(\Delta V_m + \delta)^+\|_2 \|V_{m0}\|_2] \quad (28)$$

分别为第一类和第二类容差时子网络 N_f^i 中支路 b_{fj}^i 的 $\|M_{\delta f}^i \alpha_{fj}^i\|_2$ 的最大值, 则根据 (21) 式和 (26) 式得 N_f^i 发生故障时, 必有

$$\|M_{\delta f}^i \alpha_{fj}^i\|_2 \leq T_{1j}^i, \quad (\text{第一类容差}) \quad (29)$$

$$\|M_{\delta f}^i \alpha_{fj}^i\|_2 \leq T_{2j}^i, \quad (\text{第二类容差}) \quad (30)$$

(29) 式和 (30) 式给出了两类容差条件下故障子网络判断的必要条件。由于各子网络的测试矩阵 M_δ 和 T_{1j}^i (T_{2j}^i) 在得到 $(\Delta V_m + \delta)$ 后可独立地依据各子网络的标称值参数得到, 因此可以并列地进行各子网络的故障诊断。

5 子网络级故障可诊断条件

定义 3 子网络级故障可诊断 对于网络 N , 如果有 L 个子网络发生故障, 若能唯一地判断出 L 个子网络, 则称网络 N 是故障可诊断的。

定义 4 k 支路空间和支路与 k 支路空间的距离 设 N 的独立测试点数为 m , 在 N 中的任意 k ($k < m$) 条支路, 由这 k 条支路的各支路所在子网络的转移阻抗矩阵 Z_n^L 与该支路所在子网络的电流变换向量 α_j^L 的乘积 $Z_n^L \alpha_j^L$ 组成的空间称为 k 支路空间, 用 B_k 表示, $B_k \in C^{m \times k}$; N 中任意支路, 其所在子网络 N^i 的转移阻抗矩阵 Z_n^i 与该支路在 N^i 内的 α_j^i 的乘积 $Z_n^i \alpha_j^i$ 向量在 k 支路空间的正交补空间上的投影的大小称为该支路与 k 支路空间的距离, 用 $d_{k,j}^i$ 表示, 即

$$d_{k,j}^i = \|P_k^\perp Z_n^i \alpha_j^i\|_2 \quad (31)$$

上式中 P_k^\perp 表示 k 支路空间的正交补空间上的正交投影算子。

定理 1 设网络 N 的任一子网络均为故障可测, 且 N 中独立故障数为 k , 则 N 在容差条件下为子网络级故障可诊断的条件是: 任意一子网络 N^L 内的任一支路 b_j^L 到由其它子网络的任意 k 条支路组成的 k 支路空间的距离 $d_{k,j}^L$ 满足

$$d_{k,j}^L > 2T_{1j}^L, \quad (\text{第一类容差}) \quad (32)$$

$$d_{k,j}^L > 2T_{2j}^L, \quad (\text{第二类容差}) \quad (33)$$

证明 第一类容差, 对于子网络 N^L , $M_{\delta_1}^L = P_{\delta_1}^\perp Z_n^L = P_{\delta_1} Z_n^L - Z_n^L = (P_{\delta_1} - P)Z_n^L + (PZ_n^L - Z_n^L) = (P_{\delta_1} - P)Z_n^L + P^\perp Z_n^L$, 所以有 $P^\perp Z_n^L = M_{\delta_1}^L - (P_{\delta_1} - P)Z_n^L$, 式中 P 和 P^\perp 分别为 ΔV_m 空间和 ΔV_m 正交补空间的正交投影算子, 因此, 对于 N^L 内的任一支路 b_j^L 有

$$\|P^\perp Z_n^L \alpha_j^L\|_2 \leq \|M_{\delta_1}^L \alpha_j^L\|_2 + \|(P_{\delta_1} - P)u\|_2 \|Z_n^L \alpha_j^L\|_2 \quad (34)$$

由于 ΔV_m 空间与 B_f 空间重合, 故有

$$\|P^\perp Z_n^L \alpha_j^L\|_2 = d_{f,j}^L \quad (35)$$

若设向量 u 为 ΔV_m 空间的一个单位向量, 对于 $(P_{\delta_1} - P)$, 有 $(P_{\delta_1} - P)u = P_{\delta_1} u - u = P_{\delta_1}^\perp u$, 根据投影扰动理论, 设 $\delta\%$ 为电路的整体容差, 因此有

$$\|P_{\delta_1} - P\|_2 = \|(P_{\delta_1} - P)u\|_2 = \|P_{\delta_1}^\perp u\|_2 \leq \delta\% \quad (36)$$

因此由 (34) 式, 有

$$\|M_{\delta_1}^L \alpha_j^L\|_2 \geq \|P^\perp Z_n^L \alpha_j^L\|_2 - \delta\% \|Z_n^L \alpha_j^L\|_2 = d_{f,j}^L - T_{1j}^L \quad (37)$$

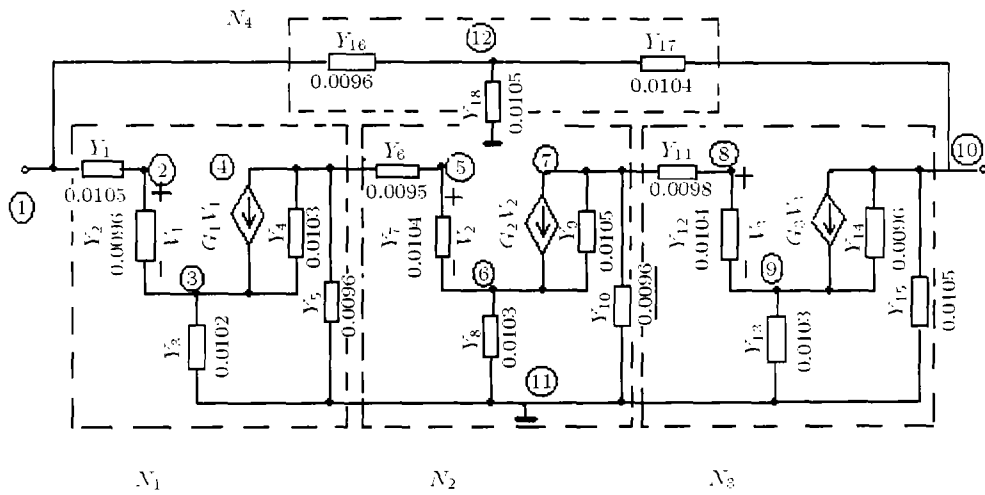
当任意的 $d_{k,j}^L > 2T_{1j}^L$ 时, 就必有 $\|M_{\delta_1}^L \alpha_j^L\|_2 > T_{1j}^L$, 因此任一非故障子网络 N^L 必不被误诊, 而只有故障子网络满足 (29) 式而被唯一地诊断为故障子网络。对于第二类容差条件的证明与以上步骤相同, 故略。 证毕

6 实例

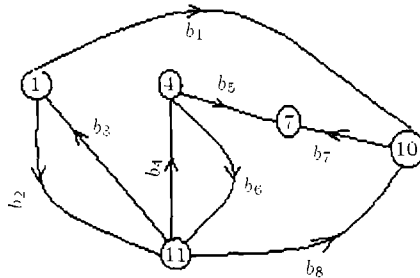
例 如图 2(a) 所示网络, 标称值为 $y_i = 0.01S (i = 1, 2, \dots, 18)$, 实际值如图 2(a) 所示。设撕裂点为 $n_s = \{1, 4, 7, 10, 11\}$ 将 N 分裂成 4 个子网络, 且设端点 (1), (4), (10), (11) 分别为 N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 的参考点, 得 N 的 CCCS 模型等效网络的拓扑图如图 2(b) 所示, 其中 N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 的等效支路分别为 $\{b_3, b_4\}$, $\{b_5, b_6\}$, $\{b_7, b_8\}$, $\{b_1, b_2\}$ 。在等效网络图 2(b) 上选择 (11) 为参考点, $\{1, 4, 10\}$ 为测试点, 设 $g_1 = 0$, 激励电流为 $I_m = [1 \ 0 \ 0]^T$, 其诊断过程为

$$V_{m0} = [128.66 \quad -114.86 \quad -32.03]$$

$$Z_n = \begin{bmatrix} -52.21 & -102.56 & 814.1 & 13.85 & -1106 & 981.1 & 1616 & -32.94 \\ 46.62 & 91.55 & 284.1 & 52.56 & 906 & -969.7 & -1441 & 29.39 \\ 91.26 & -13.59 & 1374 & 28.41 & -2115 & 2046 & 3365 & -68.61 \end{bmatrix}$$



(a) 例题网络



(b) 子网络等效电路的拓扑图

图 2 例题网络及子网络等效电路拓扑图

$$\alpha^1 = \begin{bmatrix} 2.78 \times 10^{-2} & 0.954 & 1.85 \times 10^{-2} & -9.26 \times 10^{-3} & 9.26 \times 10^{-3} \\ 0 & -49 & 0.5 & 0.5 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\alpha^2 = \begin{bmatrix} -1.44 \times 10^{-2} & -0.976 & -0.99 & 9.62 \times 10^{-3} & 4.81 \times 10^{-2} \\ -2.78 \times 10^{-2} & -0.954 & -0.982 & 9.26 \times 10^{-3} & -9.26 \times 10^{-2} \end{bmatrix}$$

$$\alpha^3 = \begin{bmatrix} 1.44 \times 10^{-2} & 0.976 & 4.81 \times 10^{-3} & -9.62 \times 10^{-3} & -4.81 \times 10^{-3} \\ 0 & 48.33 & 0.483 & -0.4833 & -0.9667 \end{bmatrix}$$

$$\alpha^4 = \begin{bmatrix} -0.5 & 0 & -0.5 \\ -0.5 & -0.5 & 0 \end{bmatrix}$$

对于实际网络测试得: $V_{mf} = [105.1 \ 13.21 \ 26.38]^T$, 因此有 $(\Delta V_m + \delta) = [23.56 \ 139.28 \ -58.42]$, $(\Delta V_m + \delta)^+ = [0.001 \ 0.0059 \ 0.00248]$, $\|(\Delta V_m + \delta)^+\|_2 = 0.0065$, $\|V_{m0}\|_2 = 174$. 在根据 (3) 式求出各子网络 M_δ^i 后, 得到各子网络 $M_\delta^i \alpha^i$ 为

$$M_\delta^1 \alpha^1 = \begin{bmatrix} 34.01 & 62.07 & 23.94 & -0.059 & 33.91 \\ 1.616 & 7.496 & 1.565 & 0.049 & 1.514 \\ 9.867 & 7.024 & 9.96 & 0.0468 & 10.06 \end{bmatrix}$$

$$M_{\delta}^2 \alpha^2 = \begin{bmatrix} 12.78 & 66.78 & 55.2 & -0.736 & -13.5 \\ 9.78 & -24.75 & -15.26 & 0.305 & 10.46 \\ -28.13 & 85.47 & 58.18 & -1.02 & -30.38 \end{bmatrix}$$

$$M_{\delta}^3 \alpha^3 = \begin{bmatrix} 22.6 & -45.96 & -7.94 & -0.387 & 23.45 \\ -17.13 & 34.65 & 6.002 & 0.292 & -17.74 \\ 49.95 & -76.96 & -17.26 & 0.607 & 51.23 \end{bmatrix}$$

$$M_{\delta}^4 \alpha^4 = \begin{bmatrix} 24.5 & 44.1 & -19.6 \\ -12.7 & -2.94 & 15.6 \\ 4.55 & 24.45 & 29.3 \end{bmatrix}$$

因此有

$$\{\|M_{\delta_1}^1 \alpha_j^1\|_2\} = \{35.54, 62.91, 25.98, 0.10, 35.4\}$$

$$\{\|M_{\delta_2}^2 \alpha_j^2\|_2\} = \{32.41, 119.1, 81.64, 1.29, 34.85\}$$

$$\{\|M_{\delta_3}^3 \alpha_j^3\|_2\} = \{57.44, 95.9, 19.92, 0.78, 59.1\}$$

$$\{\|M_{\delta_4}^4 \alpha_j^4\|_2\} = \{27.97, 50.41, 38.55\}$$

若取 $\delta\% = 5\%$ ，则根据 (28) 式得

$$\{T_{2j}^1\} = \{8.79, 30.1, 9.13, 0.388, 9.49\}$$

$$\{T_{2j}^2\} = \{3.47, 14.18, 11.96, 0.138, 3.73\}$$

$$\{T_{2j}^3\} = \{6.16, 12.53, 2.16, 0.11, 6.39\}$$

$$\{T_{2j}^4\} = \{8.39, 7.39, 6.15\}$$

由于仅有子网络 N^1 中 $\|M_{\delta_1}^1 \alpha_4^1\|_2 = 0.10 < 0.388 = T_{24}^1$ ，故根据 (30) 式判断，子网络 N^1 为故障子网络，与所设相符。

6 结 束 语

在子网络内的故障用子网络 CCCS 等效电路中的故障等效电流表示后，得到了子网络级故障的诊断方法，以上的讨论表明了该方法在容差条件下是可行的。应该指出本文仅给出了判断故障子网络的必要条件，对于故障子网络的唯一诊断条件还有待进一步的研究。另外，对那些仅知道子网络的端口特性而不知道其内部结构参数的所谓“黑箱”子网络（如各种集成电路）故障的诊断将是要深入研究的问题。

参 考 文 献

- [1] A. E. Salama *et al.*, A unified decomposition approach for fault location in large analog circuit, IEEE Trans. on CAS, 1984, 31(7), 609-622.
- [2] C. C. Wu, *et al.*, Analog fault diagnosis with failure bounds, IEEE Trans. on CAS, 1982, 29(5), 277-284.
- [3] 黄东泉等, 子网络级故障可诊断的拓扑条件, 中国科学 A 辑, 1991, 21(12), 1326-1332.

- [4] 黄东泉, 蔡金锭, 子网络故障诊断的误区分析, 电子学报, 1995, 23(8), 75-77.
- [5] 张友纯, 大规模电路岛桥分析, 电子科学学刊, 1995, 17(2), 161-169.
- [6] 孙继广, 矩阵扰动分析, 北京, 科学出版社, 1987, 319-354.
- [7] 杨祖樱, 张志涌, 故障验证体系的可诊性理论, 电子科学学刊, 1996, 18(2), 158-162.

FAULT DIAGNOSIS OF TOLERANCE SUBNETWORK

Zhang Youchun

(*China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*)

Abstract In this paper, the test property of fault subnetworks has been discussed based on the fault subnetwork equivalent current vector, and the essential condition for determining fault subnetworks has been given. Using this method, every subnetwork may be diagnosed at the same time independently. The method not only may quicken diagnosis process, but also may solve the error transfer question. Thus, this paper should have theoretical and practical significance for tolerance fault diagnosis.

Key words Tolerance, Subnetwork, Test-matrix of subnetwork, Fault diagnosis

张友纯: 男, 1954年生, 副教授, 从事电路理论及模拟电路故障诊断方面的教学和研究.