第3卷 第2期 电子学通讯 Vol. 3, No. 2
1981年4月 JOURNAL OF ELECTRONICS April, 1981

故障诊断和防止连锁性故障的途径*

方永绥 沈光铭
(中国科学院电子学研究所)

提 要

本文讨论了一种故障诊断技术以及决定 b 分支网络中故障元件的位置和数值的方法. 它是将电路的正常状态作为伴随电路与故障状态比较，通过对某些可测节点或分支的几次测量来完成的.

主要内容:（1）内部故障的外部映射;（2）故障状态的扩散;（3）连锁性故障的防止.

模拟系统的故障诊断问题日益引起更多的关注. 故障字典的方法固然是有效的，但由于故障情况的组合可能性太多，无法全部列入字典，因此，有许多故障在字典里找不到. Trick[1] 等人正确地指出，一种更可靠的体制也许是由测量结果来计算元件值. 这样就又回到了网络的可解性问题[2]. 文献 [1] 给出由单一试验频率的测量来决定一个元件值的可行算法，具有实用价值.

本文从以下考虑出发，即故障诊断问题与系统辨识问题有一个显著不同之点，那就是在系统辨识问题中被研究的对象是一个“黑箱”，我们对其内部情况，基本上是不了解的；而在故障诊断问题中可认为对被诊断的系统的正常状态是已知的，也就是说，既可合理地假定被诊断的电路或网络的拓扑是已知的，也可合理地认为电路中的元件的正常数值是已知的. 而我们所要解决的问题仅仅是找出数值上发生故障性变化的元件. 因此，从这个观点看来，故障诊断问题要知道的系统的外部行为可以比网络元件值可解性问题少一些. 因为后者实际上也是一类辨识问题，只是对“黑箱”的内部结构(拓扑)已有所知而已.

本方法是把电路的正常状态作为伴随电路与故障状态比较，通过很少几次外部测量，即可诊断故障元件的位置和数值的方法.

一、内部故障的外部映射

不难证明，对线性含内源的网络 B，当第 q 支路阻抗 Z_q 有变化值 δZ_q 时，在本支路中引起的电流变化为

$$\delta I_{qq} = -\frac{\Delta_{qq} I_q \delta Z_q}{\Delta + \Delta_{qq}\delta Z_q} \tag{1}$$

在第 p 支路中引起的电流变化为

---

* 1979年12月10日收到.

$$\delta I_{pq}=-\frac{\Delta_{pq}I_q\delta Z_q}{\Delta+\Delta_{qq}\delta Z_q} \tag{2}$$

在式(1)、(2)中，Δ为阻抗 Z_q 值变化之前电路的阻抗矩阵行列式，也即伴随电路的阻抗矩阵行列式；Δ_{pq} 为伴随电路的阻抗矩阵的代数余子式；I_q 为 q 支路的正常电流值.

用Δ分别除式(1)、(2)的右端分式的分子和分母，并考虑到 $Y_{qq}=\Delta_{qq}/\Delta$，$Y_{pq}=\Delta_{pq}/\Delta$，可得：

$$\delta I_{qq}=-\frac{Y_{qq}I_q\delta Z_q}{1+Y_{qq}\delta Z_q} \tag{3}$$

$$\delta I_{pq}=-\frac{Y_{pq}I_q\delta Z_q}{1+Y_{qq}\delta Z_q} \tag{4}$$

这里，Y_{qq} 及 Y_{pq} 分别是伴随电路的 q 支路的自导纳值和 p、q 支路之间的互导纳值，由式(4)可得：

$$\delta Z_q=-\frac{\delta I_{pq}}{Y_{pq}I_q+Y_{qq}\delta I_{pq}} \tag{5}$$

在式(5)中，Y_{pq}，Y_{qq} 均由伴随电路元件数值决定. I_q 是支路中故障之前的正常电流值，在电路的拓扑和正常元件值已知时，I_q 可以通过一个求解支路电流的算法求得. 因此，式(4)将 q 支路的阻抗变化(故障)映射为 p 支路中的电流变化，而式(5)则将 p 支路中的电流变化映射成 q 支路的故障.

同样，我们还可将 q 支路的故障映射为 p 支路两端电压的变化，见式(6)

$$\delta V_{pq}=Z_p\cdot\delta I_{pq}=-Z_p\frac{Y_{pq}I_q\delta Z_q}{1+Y_{qq}\delta Z_q} \tag{6}$$

和

$$\delta Z_q=-\frac{\delta V_{pq}/Z_p}{Y_{pq}I_q+Y_{qq}\delta V_{pq}/Z_p} \tag{7}$$

由式(5)或式(7)，可建立适用于只存在一个故障元件时的诊断方法如下：

(1) 对伴随电路，根据已知的拓扑和元件值解出全部支路的电流值和端电压值.

(2) 测定某两个方便于测量的 p_1，p_2 支路在故障状态下的电流值或端电压值，并与伴随电路中相应的数值比较，求出差值 $\delta I'_{pq}$，$\delta I''_{pq}$ 或 $\delta V'_{pq}$，$\delta V''_{pq}$.

(3) 将上节所得的差值代入式(5)或式(7)，从而计算 δZ_q. 显然，故障元件究竟在哪个支路中，事先是不知道的，故需用试算法；即先任意设一个故障位置，用 $\delta I'_{pq}$，$\delta I''_{pq}$ 或 $\delta V'_{pq}$，$\delta V''_{pq}$ 分别计算 δZ_q，并相互校验. 如果算得的结果一致，则所设的故障位置正确，否则再另行假设. 此方法的程序见图 2. 这样，对于由 m 个支路构成的电路，通过二次测量以及最多不超过 $2m$ 次的计算，便可作出正确的诊断，包括故障元件的位置和数值.

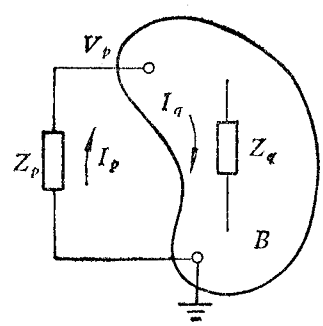

图 1　内部故障的外部映射

在不便于测量支路电流时，可用测量支路端电压来代替，也可用外接的附加测试支路来代替，但要注意，用附加支路时需将它们也计入伴随电路的拓扑. 上述方法只要求有两个可利用的节点，这是很容易满足的. 另外一般总是一出现故障马上就停止运行进行诊

断，且几个元件同时发生故障的几率远比一个元件发生故障的几率小，因此上述讨论适用于多数实际情况．另外，所需进行的测量也比文献 [1] 提供的方法简单些．

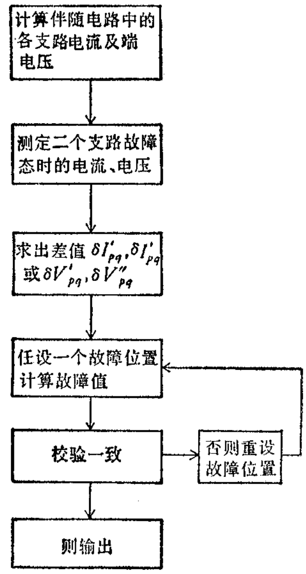

图 2　诊断程序

二、故障状态的扩散

为了尽量减少试算的次数，尽快找到故障，预先对故障位置作出判断是有意义的．这里引入一个有用的概念——故障状态的扩散．所谓故障状态的扩散，即在模拟电路中，某一故障元件引起电路中可观察的状态变化是以故障元件为中心(故障源) 逐步向周围扩散的 (这里先不涉及电路中包含受控源的情况)．由补偿定理知，阻抗 Z_q 有 δZ_q 的变化时，对各支路的影响相当于接在故障支路中的一个等效电压源 $I'_{qq}\delta Z_q$ 对相应的无源伴随电路 $B^{(n)}$ (原电路中去除一切独立内源) 所提供的影响．于是电路中各节点的电压变化(我们称之为故障附加电压)可由此等效电压源对无源伴随电路加以计算．不难看出，$B^{(n)}$ 中各节点的电压将随该节点远离故障源而呈图 3 的矢量关系．

图 3 中矢量电压的关系为：

$$\left.\begin{array}{ll}\delta \boldsymbol{V}_1=\delta \boldsymbol{V}_2+\delta \boldsymbol{V}_3 & \delta \boldsymbol{V}'_1=\delta \boldsymbol{V}'_2+\delta \boldsymbol{V}'_3 \\ \delta \boldsymbol{V}_3=\delta \boldsymbol{V}_4+\delta \boldsymbol{V}_5 & \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ \delta \boldsymbol{V}_5=\delta \boldsymbol{V}_6+\delta \boldsymbol{V}_7 & \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots & \end{array}\right\} \tag{8}$$

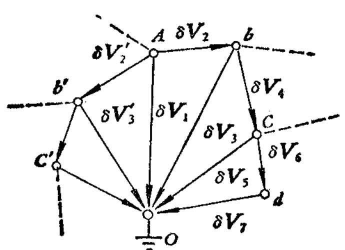

图 3　故障状态的扩散

在上述一组相邻节点中，只有节点 A, O 间的支路电压满足源矢量的条件：任何由节点 A 到参考点 O 间其它通路上各支路电压的矢量和等于该支路的矢量电压．根据这一性质，可由相邻节点电压测量并与伴随电路中相应节点电压相比较，进而分析差值电压的矢量关系来判断故障支路的位置．在纯电阻性网络中，则可以简单地由故障附加电压的绝对值大小来加以判断．

上述概念还可用于故障区分割．如图 4 的链型网络，设节点 A, C 之间在网络 $B_2^{(n)}$ 内部有通路，则判决规则为

$$\left.\begin{array}{ll}\text{若有 } \delta \boldsymbol{V}_A=\delta \boldsymbol{V}_{AC}+\delta \boldsymbol{V}_C, & \text{则故障在 } B_1 \text{ 中;} \\ \text{若有 } \delta \boldsymbol{V}_C=\delta \boldsymbol{V}_{CA}+\delta \boldsymbol{V}_A, & \text{则故障在 } B_3 \text{ 中;} \\ \text{否则} & \text{故障在 } B_2 \text{ 中.}\end{array}\right\} \tag{9}$$

因此，利用故障状态扩散的检查，即检查故障电路中各支路端电压相对于伴随电路的变化，并找出变化“最大”的那个支路 (“最大”是指唯一可以作为源矢量的那个电压变化，

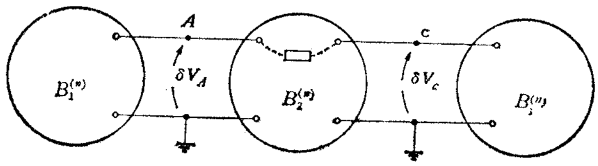

图 4　故障区的分割

如图 3 所示)首先假定为故障支路，用本文前面给出的算法加以计算，就可大大减少计算次数而迅速找到故障元件.

三、连锁性故障的防止

一般孤立地产生几个无关的故障的可能性是很少的. 多个故障的情况往往是连锁反应造成的. 即由某一元件的故障引起与之相关的另一些元件的故障. 在分析故障状态扩散的基础上,可以指出防止连锁性故障的安全设计.

由式 (4) 及 (6) 可以确定每个可能故障的元件，存在故障 δZ_q 时，对第 p 支路造成的故障附加电压 δV_{pq} 及电流 δI_{pq}，对连锁性故障，δV_{pq} 及 δI_{pq} 将是引起 p 支路元件 Z_p 故障的原因. 于是,连锁性故障是否会发生便可由之判断.

建立元件的可能故障值集

$$[\delta Z_q], \qquad q = 1, 2, \cdots, m \tag{10}$$

由此可决定相应的故障状态扩散值矩阵

$$[\delta V_{pq}], \quad \begin{cases} p = 1, 2, \cdots, m \\ q = 1, 2, \cdots, m \end{cases}$$

$$[\delta I_{pq}], \quad \begin{cases} p = 1, 2, \cdots, m \\ q = 1, 2, \cdots, m \end{cases}$$

或写成

$$\left.\begin{aligned} [\delta V_{pq}] &= \begin{bmatrix} \delta V_{11} \cdots \delta V_{1m} \\ \vdots \qquad\quad \vdots \\ \delta V_{m1} \cdots \delta V_{mm} \end{bmatrix} \\ [\delta I_{pq}] &= \begin{bmatrix} \delta I_{11} \cdots \delta I_{1m} \\ \vdots \qquad\quad \vdots \\ \delta I_{m1} \cdots \delta I_{mm} \end{bmatrix} \end{aligned}\right. \tag{11}$$

第 p 支路的元件额定耐压和耐流相对于正常工作状态时承受的实际值的富余量应使之满足:

$$pT_{V_p} \geqslant \max\,[\delta V_{pq}] \tag{12}$$

$$pT_{I_p} \geqslant \max\,[\delta I_{pq}] \tag{13}$$

这里 $\max\,[\delta V_{pq}]$ 和 $\max\,[\delta I_{pq}]$ 分别是矩阵 (11) 中第 p 行的各元素值中的最大值. 由式 (12) 和 (13)，便可作出既可靠又经济的防止连锁性故障的安全设计.

参 考 文 献

[1] T. N. Trick, W. Mayeda, A. A. Sakla, "*Determination of Component Values from Node Voltage Measurements*" *Proceedings of 1979 ISCAS*, pp. 878—881.
[2] R. S. Berkowitz, IRE Trans. on CT, CT-9 (1962), 24.

FAULT DIAGNOSIS AND THE APPROACH TO PREVENT CHAIN-FAULT

Fang Yong-sui Shen Guang-ming
(Institute of Electronics, Academia Sinica)

In this paper, there is discussed a fault diagnosis technique and related method of calculation to determine the position and value of a fault component which happens to be in a b-branches network. This technique based on comparing the fault circuit with the adjoint circuit (which is named to indicate the original circuit in normal state) requires only a few measurements on some of accessible nodes or branches.

Three main concepts are discussed in this paper: (1) The discussion about the external mapping of the internal faults; (2) The discussion about the extension of a fault state; (3) The discussion about the approach to proventing chain-fault.