可诊断容差模拟电路软故障的新故障字典法

陈圣俭[1], 洪炳熔[1], 王月芳[1], 石志勇[2], 黄允华[2]
(1. 哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001; 2. 军械工程学院, 石家庄 050003)

摘 要: 基于支路屏蔽的原理, 本文提出一种可以诊断容差模拟电路软故障的新故障字典法. 文中讨论了该方法的诊断原理和字典的建立方法, 给出了容差情况下的仿真诊断例子.

关键词: 支路屏蔽; 容差电路故障诊断; 软故障; 故障字典法
中图分类号: TP302.8 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2000) 02-0127-03

A New Fault Dictionary Method Enable to Diagnose Soft Fault of Tolerance Analog Circuits

CHEN Sheng-jian[1], HONG Bing-rong[1], WANG Yue-fang[1], SHI Zhi-yong[2], HUANG Yun-hua[2]
(1. *Harbin Institute of Technology, Harbin* 150001, *China*;
2. *Shijiazhuang Mechanical Engineering College, Shijiazhuang* 050003, *China*)

Abstract: Based on the princple of branch screening, a new kind of fault dictionary method for tolerance analog circuits soft fault diagnosis is proposed in this paper. Diagnosis principle and establishment method for this dictionary is discussed, and in the meantime a tolerance circuit fault diagnosis example is given.

Key words: branch screening; tolerance circuits fault diagnosis; soft fault; fault dictionary method

1 引言

在模拟电路故障诊断的众多方法中, 故障字典法因适用于非线性电路的诊断, 可诊断性条件没有严格的限制, 实用性强, 受到了人们的重视, 工程上多采用这种方法. 然而, 到目前为止, 国内外关于故障字典法的研究和应用文献[1, 2, 5]中, 均没有对软故障和容差的影响给出系统而有效的处理方法, 使其存在着较大的局限性.

基于支路屏蔽的原理, 作者提出的新故障字典法[3], 不但能诊断硬故障, 而且可以诊断元件参数任意变值的软故障. 在此基础上, 提出的"全激励、全测试、被屏蔽支路集求交集"的容差电路诊断方法[4], 有效地解决了容差的影响问题. 本文就是在上述基础上, 系统地给出了该方法的诊断原理和字典建立方法. 为工程上故障字典诊断法的应用开辟了一种新的途径. 另外, 该方法对容差电路的故障诊断具有普遍的启迪和指导意义.

2 软故障字典法原理

2.1 支路屏蔽的原理

简单地讲, 支路屏蔽就是通过施加某种特定的激励电流, 使得电路中某特定支路的支路电压为零, 这时该支路元件参数无论发生怎样的变化, 对电路的输出都不会再有影响. 为叙述方便, 以线性电路为例进行分析.

设有正常标称网络 N_0, N_f 为 N_0 故障后的故障网络; 假定网络中元件类型为导纳及电压控制电流源 VCCS(其他元件类型也可以, 这种假定只是为了方便叙述而已). 在相同的端口电流激励下, N_f 相对于 N_0 的端口电压增量设为 ΔV_m, ΔV_m 可以认为是由支路等效故障电流源的存在而引起的[5], 即有:

$$\Delta V_m = \boldsymbol{Z}_{mb} \cdot \boldsymbol{I}_B^f \tag{1}$$

式中 $\boldsymbol{Z}_{mb}$ 为 N_0 的支路对端口的转移阻抗矩阵, $\boldsymbol{I}_B$ 为故障支路的等效故障电流源.

又由支路等效故障电流源的定义[5]知:

$$I_j^f = 0 \leftarrow \text{等效} \rightarrow V_i = 0 \tag{2}$$

这里, 对于故障导纳元件有 $i = j$, 对于故障的 VCCS, i 为控制支路号, j 为受控支路号.

由于网络支路电压 V_i 是端口激励电流的函数, 所以只要能找到某个特定的端口激励电流 $I_m = i^*$, 使得故障网络 N_f 的故障支路被屏蔽(即 $V_i = 0$), 由式(2)知, 必有 $I_j^f = 0$, 亦即式(1)中的 $I_B^f = 0$, 从而推出: $\Delta V_m = 0$.

也就是在这种特定激励电流的激励下 N_f 与 N_0 有完全相同的输出(两者相应节点和支路的电压均相同).

可以证明[6, 7], 不论是线性还是非线性电路, 只要特定激励电流的个数 m 大于故障支路数 k, 上述特定激励电流就是存在的.

收稿日期: 1998-08-10; 修订日期: 1999-04-05
基金项目: 中国博士后科研基金资助课题

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.2 软故障字典法原理及字典建立和诊断方法

根据上面的讨论, 网络 N_f 的故障支路被屏蔽时, N_f 与 N_0 有完全相同的响应输出. 显然, 此时 N_0 中与 N_f 相对应的支路也被屏蔽了. 反过来易知, 若网络 N_0 的某支路被屏蔽了, 那么不论该支路元件参数发生怎样的变化(故障), 它都不会对电路的输出有影响. 根据这一特点, 测前依据标称网络 N_0, 可以建立故障字典.

建立字典的关键在于求取特定激励电流. 以单支路故障为例, 根据上节结论($m > k$), 只需施加两个激励电流(I_1, I_2). 支路 P 被屏蔽时, 其支路电压为零, 即应满足关系(3):

$$V_P = V_{n1}(I_1, I_2) - V_{n2}(I_1, I_2) = 0 \qquad (3)$$

这里 V_P 表示支路 p 的支路电压, $V_{n1}(I_1, I_2)$, $V_{n2}(I_1, I_2)$ 表示支路 p 两端节点电压; I_1, I_2 为施加于某可及节点上的激励电流. 根据文献[7]推知, 满足方程(3)的解 $I_p^* = (I_1^*, I_2^*)$ 不是唯一的点, 而是 $I_1 - I_2$ 平面上过原点的一条连续曲线. 可以先给定 I_1 一个值, $I_1 = I_1^*$. 以式(3)为目标函数, 以 I_2 为变量, 利用牛顿迭代法求 I_2^* 的值; 具体求解方法请参阅文献[4]. 下面举例说明字典建立方法及诊断过程.

例 1. 设有图 1 所示的非线性电路 N_0, 图中 R_2 为一非线性元件, 伏安关系为 $I = V^3$, $R_3 = R_4 = R_8 = 0.5\Omega$, 其余电阻均为 1Ω. 设节点 1、2 和 0 为可及节点, 试建立单故障字典.

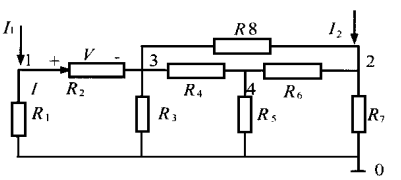


图 1 例 1 所示电路图

表 1 例 1 的字典数据

被屏蔽支路	屏蔽电流 I_2^*(A) ($I_1^* = 1$)	节点 2 电压计算值(V)	节点 2 电压实测值(V)
$R1$	−6.500000	2.400000	1.390900
$R2$	5.000000	−2.000000	−1.328500
$R3$	−0.476508	0.127100	0.036700
$R4$	4.706931	−1.882800	−1.253700
$R5$	−0.300308	0.060100	−0.003800
$R6$	0.000000	−0.054300	−0.073400
$R7$	−0.142478	−1.395E−07	−0.040400
$R8$	0.129454	−0.103600	−0.103600

解: 设激励电流加在节点(1, 0), (2, 0)间, 并设 $I_1 = I_1^* = 1$A, 根据公式(3), 利用牛顿迭代法, 求得各支路的屏蔽电流如表 1 中所示(I_2^*).

选取可及节点 2 作为电压测量端口, 先计算出标称网络 N_0 在各屏蔽电流的分别激励下, 节点 2 的电压计算值如表 1 中所示.

把被屏蔽支路号, 相应屏蔽电流值, 以及此时节点 2 所对应的电压计算值, 作为一组数据(定义为一个记录), 存贮起来, 故障字典便建立起来, 如表 1 中前 3 例. 故障仿真:

设已知网络 N_0 发生了单故障, 故障后的网络设为 N_f. 利用上述字典中提供的激励电流分别依次激励网络 N_f, 得到节点 2 的实测电压值(表 1 中最后一列), 该实例电压值和字典中存贮的节点 2 电压计算值相比较, 可以看到, 只有当用 $I_1^* = 1$A, $I_2^* = 0.129454$A 激励网络 N_f 时, 节点 2 的电压才相等, 经查表得, 故障支路为 $R8$. 事实上, 上述数据是在 $R8$ 变为 0.001Ω 后得到的.

对于多故障, 利用类似的方法可以建立多故障字典. 设有 $K(1 < K < m)$ 个支路同时发生故障, 为了将它们全部屏蔽, 应施加($K+1$)个激励电流, 并以下式为优化目标函数:

$$\begin{cases} V_{b1} = V_{b11}(I_1, I_2, \cdots, I_{K+1}) - V_{b12}(I_1, I_2, \cdots, I_{K+1}) = 0 \\ V_{b2} = V_{b21}(I_1, I_2, \cdots, I_{K+1}) - V_{b22}(I_1, I_2, \cdots, I_{K+1}) = 0 \\ \cdots\cdots \\ V_{bK} = V_{bK1}(I_1, I_2, \cdots, I_{K+1}) - V_{bK2}(I_1, I_2, \cdots, I_{K+1}) = 0 \end{cases} \qquad (4)$$

式中 V_{bi} 是第 i 条支路的支路电压, V_{bi1}, V_{bi2} 表示支路 i 两端节点的电压. 由文献[7]知: 方程(4)与方程(3)类似, 方程(4)的求解实质上是一个 K 维非线性方程组(设网络 N_0 为非线性网络)的求解. 利用非线性方程组的牛顿迭代法可以求出其中的 K 个激励电流值. 当($K+1$)个屏蔽电流确定后, 仿照前面可以建立相应的多故障字典.

3 容差情况下故障字典的建立及诊断原理

上面讨论了不计元件参数容差时的情况. 当计及元件参数容差后, 情况就复杂的多. 经过理论分析, 结合实验仿真, 我们提出一种"全激励、全测试, 被屏蔽支路集求交集"的容差电路故障诊断方法.

3.1 容差电路屏蔽电流和测试节点电压的确定

测前按元件的标称值计算屏蔽每一条支路的屏蔽电流, 把这些屏蔽电流作为有容差但无故障网络的相应支路的近似屏蔽电流. 在这种电流的激励下, 计算容差网络的选定测试节点的电压. 由于此时元件参数是在容差限内随机变动的, 因此该电压是一个区间值, 该区间可以应用蒙特卡洛法确定出来, 设为$[V_i^{\phi}, V_i^{\varphi}]$.

3.2 被屏蔽支路集的确定

在特定激励电流的激励下, 某支路被屏蔽实质上就是对测试节点而言, 节点电压相对于该支路元件参数的灵敏度为零.

用近似屏蔽电流激励无故障容差网络是这样进行的. 首先给无故障容差网络的各元件在其容差限内多次随机赋值, 当赋值的组数足够多时, 这些组样本值就基本上反映了无故障容差网络元件所有可能的取值情况.

用每一组近似屏蔽电流分别去激励上述给定的各取值网络, 并对选定测试点电压进行灵敏度分析(节点电压相对各支路元件参数的灵敏度), 把对应于每组激励电流下, 元件参数的每种不同取值时, 灵敏度最低的支路选出来, 作为该近似屏蔽电流下的被屏蔽支路集. 设其为: Ω_1, Ω_2, …, Ω_b(Ω_i 表示在支路 i 的近似屏蔽电流激励下, 容差网络被屏蔽的所有支路集合).

3.3 容差故障字典的建立及诊断方法

把上面所述的各近似屏蔽电流, 与之对应的测试节点的各电压区间, 以及相应的被屏蔽支路集 Ω_i 作为一组数据存入

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

主一个记录中, 这样容差故障字典就建立起来了.

实际诊断时, 采用全激励、全测试, 被屏蔽支路集求交集的方法. 即对被诊断网络, 依次分别施加每一组近似屏蔽电流, 并分别测量其输出电压, 把输出电压落入字典中相应电压区间中($V_i^m \in [V_i^{\phi}, V_i^{\phi}]$)的几组激励所对应的被屏蔽支路集, 进行求交集运算, 结果即为故障支路(集). 设故障支路(集)为 Ω, 则有: $\Omega = \Omega_1 \cap \Omega_2 \cap \ldots \cap \Omega_b$.

下面以一个例子说明上述过程.

例 2　设有网络 N_0, 电路图和各元件标称参数及伏安关系同例 1, 元件参数容差为元件标称值的 10%, 试建立该容差网络的单故障字典.

解: 该容差网络各支路的近似屏蔽电流例 1 中已经求出, 如表 2(第 2 列)所示. 在各近似屏蔽电流的激励下, 对容差网络进行灵敏度分析, 得到被屏蔽支路集如表 2(第 3 列)所示. 在各近似屏蔽电流的激励下, 结合各元件参数的容差, 利用蒙特卡洛法计算得到节点 2 的计算电压区间如表 2(第 4 列)所示.

表 2 中第 2、3、4 列按对应关系存入相应记录, 容差故障字典就建立起来了.

故障仿真:

设网络 N_0 发生了单故障, 故障元件为 $R4$, 其余元件参数均在容差限内. 各元件参数假定为: $R1 = 0.9$, $R3 = 0.55$, $R4 = 100$, $R5 = 1.1$, $R6 = 0.9$, $R8 = 0.45$.

表 2　例 2 的数据表

支路	近似屏蔽电流 I_2^*(A)($I_1^* = 1$A)	被屏蔽支路	节点 2 电压计算区间值(V)	节点 2 电压实测值(V)
$R1$	− 6.500000	$R1$, $R4$	[+ 2.0440, + 2.8017]	2.4539
$R2$	5.000000	$R1$, $R2$, $R4$	[− 2.3757, − 1.67601]	− 2.0728
$R3$	− 0.476508	$R3$, $R4$	[+ 0.1012, + 0.1512]	0.1314
$R4$	4.706931	$R1$, $R4$	[− 2.2380, − 1.8784]	− 1.9527
$R5$	− 0.300308	$R4$, $R5$	[+ 0.0392, + 0.0830]	0.0654
$R6$	0.000000	$R4$, $R6$	[− 0.0771, − 0.0308]	− 0.0519
$R7$	− 0.142478	$R4$, $R5$, $R6$, $R7$	[− 0.0191, + 0.0232]	0.0037
$R8$	0.129454	$R4$, $R8$	[− 0.1297, − 0.0800]	− 0.1026

经过仿真, 得到各近似屏蔽电流的激励下节点 2 电压值如表 2(第 5 列)所示.

显然上述各电压值, 均落入相应的电压区间内, 所以故障支路为:

$$\Omega = \Omega_1 \cap \Omega_2 \cap \Omega_3 \cap \Omega_4 \cap \Omega_5 \cap \Omega_6 \cap \Omega_7 \cap \Omega_8 = (R1 \cup R4) \cap (R1 \cup R2 \cup R4) \cap (R3 \cup R4) \cap (R1 \cup R4) \cap (R4 \cup R5) \cap (R4 \cup R6) \cap (R4 \cup R5) \cap (R6 \cup R7) \cap (R4 \cup R8) = R4$$

即故障支路为 $R4$, 显然该结论与前面的假定是一致的.

4　结论

(1)本文给出的故障字典法, 可以诊断容差电路的软故障和多故障, 是对故障字典法的进一步完善和发展, 该方法对实际工程应用具有十分重要的意义.

(2)论文中给出的支路屏蔽电流为理论计算值, 该值(最小单位为微安级)对激励电流源的精度要求较高; 工程实际中如何降低对激励电流源的要求(如激励电流最小单位为毫安级), 同时又能满足诊断精度的要求, 这是一个值得研究的方面.

(3)实际容差电路诊断时, 有时会出现模糊故障集(即除包含有故障支路外, 还有个别正常支路包含在故障支路集中), 关于这一问题, 有另文详细探讨.

参考文献

[1] Ruey-wen Liu. Testing and Diagnosis of Analog Circuits and Systems. Van Nostrand Rein Hold, New York, 1991

[2] Takao Ozawa. Analog Methods for Computer-Aided Circuit Analysis and Diagnosis. Marcel Dekker, Inc. New York, 1988

[3] 陈圣俭、何强、黄允华. 一种新的模拟电路故障字典法. 测试技术学报, 1996, 3: 377~381

[4] 陈圣俭. 模拟电路故障诊断理论与工程应用研究. 军械工程学院, 博士学位论文, 1997

[5] 杨士元. 模拟系统的故障诊断与可靠性设计. 清华大学出版社, 1993

[6] 王虎符. 模拟电路的等输入/等输出 K 故障屏蔽方法. 湖南大学硕士学位论文, 1986

[7] 王虎符等. 非线性电路的 K 故障屏蔽. 电子学报, 1990, 18(1): 104~108



陈圣俭　1966 年出生. 1997 年获博士学位, 1997~1999 年在哈尔滨工业大学计算机系做博士后研究工作, 发表论文 20 余篇, 曾获军队科技进步二等奖和国家科技进步三等奖, 研究兴趣有: 电子系统的故障诊断和可靠性研究, 信号处理及应用等.



洪炳熔　1937 年出生, 教授, 博士生导师, 现为哈尔滨工业大学计算机系智能机器人研究室主任, 中国智能机器人学会常务理事, 中国机器人足球协会会长, 主要研究方向: 智能机器人, 星载计算机可靠性及虚拟现实技术.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net