

容差条件下的模拟电路故障诊断方法

李焱骏, 王厚军, 周龙甫, 师奕兵

(电子科技大学自动化工程学院 成都 610054)

【摘要】指出了线性模拟电路中, 测试点电压向量在故障状态下相对于标准状态下的变化量, 其向量方向由故障元件在被测电路中的位置决定。证明了线性电路中节点电压灵敏度向量的方向能够反映故障元件的位置。结合节点电压灵敏度向量的模反映故障元件参数变化量到测试点电压变化量的权重这一特点, 以节点电压灵敏度向量为故障特征建立了故障字典。提出一种容差条件下的故障诊断判定算法, 兼顾故障定位和元件的参数变化量, 可以有效地实现模拟电路元件参数在一定容差范围内随机变化条件下的单一软故障诊断。仿真结果验证了该理论的正确性和方法的有效性。

关键词 判定算法; 故障字典; 故障特征; 灵敏度向量

中图分类号 TN713

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.03.013

Method on Analog Circuit Fault Diagnosis with Tolerance

LI Yan-jun, WANG Hou-jun, ZHOU Long-fu, and SHI Yi-bing

(School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract In this paper, it is proved that the direction of the node-voltage difference vector, which is the difference between the node-voltage vector at faulty state and the one at the nominal state, is determined only by the location of the faulty element in linear analog circuits. It is further proved that the direction of the sensitivity vector indicates the location of the faulty element. Considering that the module of the sensitivity vector is the weight of the faulty element's parameter deviation to the voltage deviation, fault dictionary is set up based on node-voltage sensitivity vectors. A decision algorithm is proposed in consideration of both the location and the parameter deviation of the faulty element. Single soft fault with tolerance in analog circuit can then be diagnosed. The validity of the theory and the availability of the method are verified by simulation results.

Key words decision algorithm; fault dictionary; fault signature; sensitivity vector

20世纪80年代, 模拟电路故障诊断方法的研究成为热点。文献[1]总结了1979年前提出的模拟电路故障诊断方法, 讨论了模拟电路故障诊断中的元件参数可解性、K-故障诊断和容差条件下故障诊断等问题。文献[2-3]对20世纪90年代前提出的模拟电路故障诊断方法做了总结, 单故障无容差情况下的线性电路故障诊断方法取得了较大的发展。近10年来, 容差条件下的模拟电路故障诊断研究取得了一定的进展, 文献[4]提出了以节点电压灵敏度序列为故障特征的诊断方法, 但在容差条件下对无故障电路容易出现误诊断。文献[5]以节点电压灵敏度为故障特征, 讨论了容差条件下的故障诊断问题, 但对容差条件下参数随机变化的情况没有做详细讨论。文献[6]以节点电压灵敏度比值为故障特征, 以隶属度函数为判决条件提出了容差条件下的故障诊断方法, 但在较大容差(10%)条件下, 该方法的诊断率大大降

低。神经网络和小波神经网络在模拟电路故障诊断中的应用也吸引了众多研究者的注意力^[7-9], 然而神经网络存在学习和运算过程易陷入局部最小点及在线故障诊断计算量过大的缺点, 使得神经网络的故障诊断方法仍然处于理论研究阶段。

本文研究工作包括: (1) 被测电路中, 测试点电压在故障状态下相对于在标准状态下的变化量, 其向量方向由故障元件在被测电路中所处的位置决定, 将模拟电路故障诊断中参数变化的无穷多种可能性降低为元件的个数(N)种可能性。(2) 证明了节点电压灵敏度向量的方向能够反映故障元件的位置; 结合元件参数在故障状态和在容差范围内变化量的大小关系, 以节点电压灵敏度向量作为故障特征建立故障字典, 既保留了故障元件的位置信息, 也能反映故障元件的参数变化量。(3) 提出了一种针对容差条件下故障诊断特点的判定算法, 兼顾故障

收稿日期: 2008-10-15; 修回日期: 2009-02-19

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0804)

作者简介: 李焱骏(1978-), 男, 博士生, 主要从事模拟电路故障诊断、信号处理方法等方面的研究。

定位和元件参数的变化量, 仅以较小的计算量可以有效地实现模拟电路元件参数在10%容差范围内随机变化条件下的单一软故障诊断。对ITC'97 Benchmark中连续时间状态可变滤波器^[10]进行仿真和故障诊断的结果验证了理论的正确性和方法的有效性。

1 故障位置特征

设如图1所示线性时不变电路C共有N+1个节点, 其中第N+1个节点作为参考节点接地, 第M个节点的电压可测, 测试点电压用向量V表示。不失一般性, 设电路由一个独立电流源e激励。C中的一个电阻g_i跨接在电路的第i个端口。如图2所示, 当电阻g_i发生故障时, 即其电导值由g_i变为g_i+Δg_i时, 测试点电压变为V+ΔV_i。

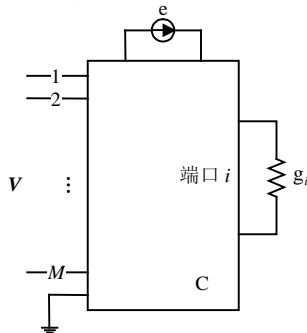


图1 N+1节点线性时不变电路

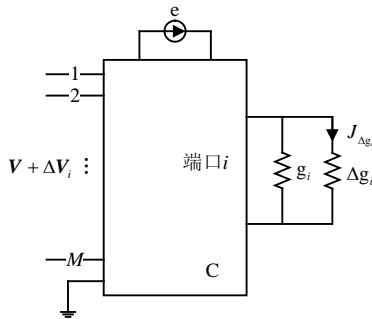


图2 电阻g_i发生故障

定理 1 向量ΔV_i的方向由电阻g_i在C中所处的位置决定。

证明 如图3所示, 根据等效原理, Δg_i可以由独立电流源j_{Δg_i}代替, j_{Δg_i}等于图2中流经Δg_i的电流。由于C为线性电路, 测试点电压V+ΔV_i为独立电流源e和j_{Δg_i}激励的线性叠加。如图4所示, 将独立电流源e设为零, 则测试点电压为ΔV_i, 且满足:

$$\Delta V_i = r_i j_{\Delta g_i} \tag{1}$$

式中 r_i = [r_{1i} r_{2i} ... r_{Mi}]^T; r_{li} (l=1,2,...,M) 为端口i到测试点l的等效电阻。显然, 向量ΔV_i的方向由r_i决定, 与j_{Δg_i}的大小无关, 即:

$$\Delta \tilde{V}_i = \pm \tilde{r}_i \tag{2}$$

式中 ΔV_i和r_i分别表示ΔV_i和r_i的归一化向量, 即向量ΔV_i和r_i的方向、±符号由j_{Δg_i}的流向决定。而r_i是由C的电路结构及端口i在C中所处的位置决定的, 故定理得证。

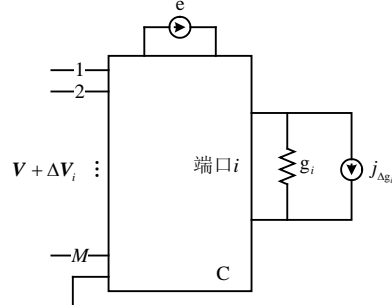


图3 Δg_i到j_{Δg_i}的等效变换 e=0

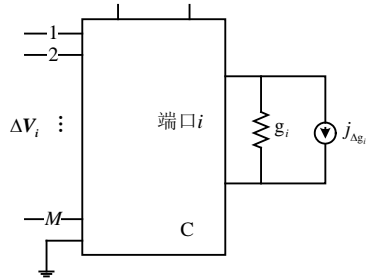


图4 设独立源e=0

注: (1) 设电路激励源e=0, 在端口i引入单位电流源, 测试点电压向量V_i即为r_i; (2) ΔV_i的方向与电阻g_i参数的变化大小无关, 但ΔV_i的模由g_i参数的变化量决定; (3) 在无容差条件下, 以C中各元件参数变化时的ΔV_i建立故障字典。当C中的某个元件发生故障时, 得到测试点的电压变化量ΔV。故障字典中与ΔV夹角为零的向量所对应的元件即为故障元件。

2 故障字典

由定理1的证明可知, 当C中g_i参数变化时, 测试点电压的变化量ΔV可以视作g_i所在端口的电流j_{Δg_i}与该端口到测试点的等效电阻的乘积, 则当电路C中各元件的参数发生变化时, 测试点电压变化量可以表示为:

$$\Delta V = \sum_{i=1}^K r_i \Delta j_i \tag{3}$$

式中 Δj_i为端口i元件参数变化引入的等效电流。线性电路中元件k所在端口的电流为:

$$j_k = f_k(x_1, x_2, \dots, x_K) = f_k(\mathbf{x}) \tag{4}$$

式中 x_i为元件i的参数。当电路中元件参数发生变化时, 端口k流过的电流变化量为:

$$\Delta j_k = \sum_{i=1}^K \frac{\partial}{\partial x_i} f_k(\mathbf{x}) \Delta x_i \quad (5)$$

式中 Δx_i 为元件*i*的参数变化量。则在线性电路中, 测试点*l*的电压对参数 x_k 的灵敏度^[8]为:

$$S_{x_k}^V = \frac{\partial V_l}{\partial x_k} = \frac{\partial V_l}{\partial j_k} \frac{\partial j_k}{\partial x_k} = r_{lk} \frac{\partial}{\partial x_k} f_k(\mathbf{x}) \quad (5)$$

式中 r_{lk} 为 r_k 的第*l*个元素。可以看出 x_k 的电压灵敏度向量可以表示为:

$$S_{x_k}^V = [S_{x_k}^{V_1} \quad S_{x_k}^{V_2} \quad \dots \quad S_{x_k}^{V_M}]^T = \left[\frac{\partial}{\partial x_k} f_k(\mathbf{x}) \right] r_k \quad (6)$$

显然, 向量 $S_{x_k}^V$ 的方向与 r_k 相同, 即 $S_{x_k}^V$ 反映了故障元件的位置。并且, 由式(3)、式(5)和式(7)可以得出:

$$\Delta V = \sum_{i=1}^K S_{x_i}^V \Delta x_i \quad (7)$$

可以看出 $S_{x_i}^V$ 的模反映了 Δx_i 到测试点电压变化量 ΔV 的权重。

综上所述, 线性电路中节点电压灵敏度向量的方向由故障元件在电路中所处的位置决定, 而其模为故障元件参数变化量到测试点电压向量变化量的权重。因此, 将电路中每一个元件到测试点的电压灵敏度向量作为该元件的故障特征, 建立的故障字典为:

$$A = \{S_{x_1}^V, S_{x_2}^V, \dots, S_{x_K}^V\} \quad (9)$$

式中 K 为电路中独立元件的个数。

3 故障诊断判定算法

设故障诊断中的故障集为 $F = \{F_0, F_1, F_2, \dots, F_K\}$, 其中 F_0 表示无故障状态, K 表示元件个数。本文提出被测电路状态的判据函数为:

$$\mu_{F_i}(\Delta V) = e^{-|\tan(\angle(\Delta V, S_{x_i}^V))|} \quad (10)$$

式中 $\angle(\Delta V, S_{x_i}^V)$ 表示被测电路测试点电压变化量向量与元件*i*的节点电压灵敏度向量的夹角。图5为 $\angle(\Delta V, S_{x_i}^V)$ 在 $-\pi/2 \sim \pi/2$ 范围内的计算结果, 可以看出, 该函数满足:

$$\forall x \in F: \mu_{F_i}(x) \in [0, 1] \quad (8)$$

无容差条件下, 当 $\angle(\Delta V, S_{x_i}^V)$ 为0时, 即 ΔV 与 $S_{x_i}^V$ 的方向完全重合, 判定函数的值为1, 则可以判定元件*i*发生故障。容差条件下, 由式(8)可知 ΔV 为各元件参数的加权和, 而故障元件的参数变化量相对值较大, 其余元件的参数在容差范围内的变化量相对值较小。当满足:

$$\mu_{F_i}(x) = \max\{\mu_{F_1}(x), \mu_{F_2}(x), \dots, \mu_{F_K}(x)\} \quad (12)$$

则认为被测电路处于故障状态 F_i , 即与 ΔV 夹角最小的 $S_{x_i}^V$ 所对应的 F_i 被判定为被测电路的故障状态。该算法以 ΔV 与 $S_{x_i}^V$ 的向量方向是否相同为判定依据, 同时兼顾了不同元件参数变化量到 ΔV 的权重, 适合在容差条件下进行故障定位。可以看出该算法的计算量较小, 对故障电路的在线诊断有一定的价值。

4 诊断方法实现及仿真验证

针对线性电路, 采用本文提出的方法进行故障诊断的具体步骤如下:

- (1) 选择测试点, 并测量无故障电路的测试点电压向量;
- (2) 通过计算或者仿真得到各元件参数到测试点的电压灵敏度向量, 建立故障字典;
- (3) 测量故障电路的测试点电压向量, 与无故障电路的测试点电压向量比较得到测试点电压向量的变化量 ΔV ;
- (4) 根据式(10)计算 ΔV 与故障字典中各元素的判据函数值, 最大值所对应的元件即为故障诊断结果。

本文对ITC'97 Benchmark电路中的连续时间状态可变滤波器进行了仿真验证, 如图5所示。采用1 V直流激励, 以 $N_1 \sim N_6$ 为测试点, 电路中 R_1 、 R_2 和 R_5 的故障特征向量具有相同的方向; R_6 和 R_7 的故障特征向量具有相同的方向。因而建立新的故障特征子集为:

$$E_1 = \{F_1, F_2, F_3\}, E_2 = \{F_3\}, E_3 = \{F_4\}, E_4 = \{F_6, F_7\}$$

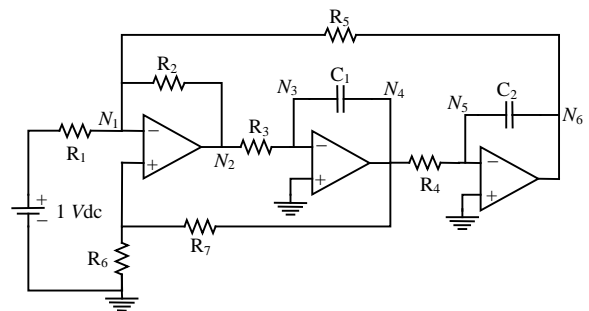


图5 连续时间状态可变滤波器

当 R_3 发生故障时, 设其电阻值增加100%, 而其余电阻值在10%容差范围内随机变化。在PSpice软件中采用 Monte-Carlo 仿真得到测试点电压向量为 $V + \Delta V$, 计算各状态的判定函数如表1所示。可以看出, 在无容差和有容差条件下, 故障 $E_2 = \{F_3\}$ 都可以准确定位。

当 R_2 发生故障时, 设其电阻值增加100%, 而其余电阻值在10%容差范围内随机变化, 得到如表2所示的判定结果。可以看出, 在无容差和有容差条件

下, 故障子集 $E_1 = \{F_1, F_2, F_5\}$ 可以被准确定位。

此外, 实验证明将图5所示电路中的直流激励源改为电压为1 V, 频率为500 Hz的交流激励源, 用相同的方法也可以实现10%容差条件下 C_1 和 C_2 的故障诊断, 本文不再赘述。

表1 R_3 故障诊断结果

	无容差	有容差1	有容差2	有容差3	有容差4	有容差5
μ_{F_1}	0.367 9	0.338 8	0.413 4	0.350 0	0.353 0	0.319 6
μ_{F_2}	0.367 9	0.338 8	0.413 4	0.350 0	0.353 0	0.319 6
μ_{F_3}	1.000 0	0.961 2	0.940 0	0.976 0	0.980 0	0.936 4
μ_{F_4}	0.146 4	0.132 2	0.168 3	0.137 7	0.139 2	0.122 8
μ_{F_5}	0.367 9	0.338 8	0.413 4	0.350 0	0.353 0	0.319 6
μ_{F_6}	0.331 0	0.304 7	0.371 9	0.314 9	0.317 6	0.287 1
μ_{F_7}	0.331 0	0.304 7	0.371 9	0.314 9	0.317 6	0.287 1

表2 R_2 故障诊断结果

	无容差	有容差1	有容差2	有容差3	有容差4	有容差5
μ_{F_1}	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
μ_{F_2}	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
μ_{F_3}	0.367 9	0.367 9	0.367 9	0.367 9	0.367 9	0.367 9
μ_{F_4}	0.313 5	0.313 5	0.313 5	0.313 5	0.313 5	0.313 5
μ_{F_5}	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
μ_{F_6}	0.716 5	0.716 5	0.716 5	0.716 5	0.716 5	0.716 5
μ_{F_7}	0.716 5	0.716 5	0.716 5	0.716 5	0.716 5	0.716 5

5 结 论

本文证明了节点电压灵敏度向量的方向与故障元件位置之间的关系, 将模拟电路中元件某一参数变化量的无穷多种可能性用节点电压灵敏度向量方向表示, 大大降低了模拟电路中元件故障特征的复杂程度。结合节点电压灵敏度向量与节点电压变化量之间的关系, 以节点电压灵敏度向量为故障特征建立故障字典。提出了一种以节点电压变化量向量与故障特征向量夹角为判定依据, 兼顾元件参数变化量的判定函数, 仅以较小的计算量解决了10%容差条件下的单一软故障诊断问题。与文献[4-6]中的方法相比, 具有在相同容差条件下诊断更准确的特点, 与文献[7-9]中的方法相比, 则具有计算量小的优点。然而, 多故障条件下的诊断问题和测试点的选择问题还需要更加深入的研究。

特别感谢IEEE终生会士、美国圣母大学刘瑞文教授对本文研究工作和论文的指导。

参 考 文 献

- [1] BANDLER J W, SALAMA A E. Fault diagnosis of analog circuits[J]. Proceedings of the IEEE, 1985, 73(8): 1279-1325.
- [2] LIU Ruy-wen. Analog fault diagnosis-a new circuit theory [C]//Proc 1983 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Newport Beach, CA: IEEE, 1983: 931-939.
- [3] 杨士元. 模拟系统的故障诊断与可靠性设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
YANG Shi-yuan. Fault diagnosis and design for reliability of analog system[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993.
- [4] LI Feng, WOO Peng-yung . The invariance of node-voltage sensitivity sequence and its application in a unified fault detection dictionary method[J]. IEEE Transaction on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications, 1999, 46(10): 1222-1227.
- [5] 谭阳红, 何怡刚. 模拟电路故障诊断的新故障字典法[J]. 微电子学, 2001, 31(4): 252-254.
TAN Yang-hong, HE Yi-gang. A new fault dictionary method for fault diagnosis of analog circuit[J]. Microelectronics, 2001, 31(4): 252-254.
- [6] WANG Peng, YANG Shi-yuan. A new diagnosis approach for handling tolerance in analog and mixed-signal circuits by using fuzzy math[J]. IEEE Transaction on Circuits and Systems-I: Regular Papers, 2005, 52(10): 2118-2127.
- [7] HE Y, SUN Y. Neural network-based L1-norm optimisation approach for fault diagnosis of nonlinear circuits with tolerance[J]. IEE Circuit Devices System, 2001, 148(4): 223-228.
- [8] HE Y, TAN Y, SUN Y. Wavelet neural network approach for fault diagnosis of analogue circuits[J]. IEE Circuits Devices System, 2004, 151(4): 379-384.
- [9] AMINIAN M, AMINIAN F. A modular fault-diagnostic system for analog electronic circuits using neural networks with wavelet transform as a preprocessor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(5): 1546-1554.
- [10] KAMINSKA B, ARABI K, BELL I, et al. Analog and mixed-signal benchmark circuits-first release[C]//IEEE International Test Conference. Washington D C: IEEE, 1997: 183-190.

编辑 漆 蓉