

容差模拟电路诊断中故障隔离的几何方法

叶 笠, 王厚军, 叶 芑, 田书林

(电子科技大学自动化工程学院 成都 610054)

【摘要】针对传统故障字典法的3个主要缺陷,建立了以节点电压增量比作为特征向量的故障字典,该字典能对电路中每个元件的硬故障和软故障作出诊断,具有测前模拟次数少、占用存储空间小、诊断范围宽的特点。针对由于元件参数容差导致故障定位难度大的问题,阐述了如何将几何学中的一些观点应用到故障诊断中,并建立了3个故障隔离的几何模型;最后通过实例验证了该诊断理论和方法的正确性和有效性。该方法适用于线性模拟电路。

关键词 模拟电路; 故障诊断; 模型; 容差

中图分类号 TP206

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.01.010

Geometric Methods of Faults Isolation for Analog Diagnosis with Tolerance

YE Li, WANG Hou-jun, YE Peng, and TIAN Shu-lin

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

Abstract A linear analog fault diagnosis approach by means of fault dictionary. is presented to overcome the three major defects in classic fault dictionaries. First, a fault dictionary using node-voltage-deviation-ratio vectors as fault signatures is constructed. The dictionary can detect both the hard and soft faults for each single faulty component in linear circuits, and has some significant features such as less simulation runs, minimal storage space and wide diagnosis scope. Second, how to extend some points of view in geometry to analog fault diagnosis area is discussed, and three geometric models based on the node-voltage-deviation-ratio vectors are designed for faults isolation in case of considering tolerances. Last, two examples are given to verify the methodology. The promising experimental results manifest the correctness and effectiveness of the approach proposed in this paper.

Key words analog circuits; fault diagnosis; modeling; tolerance

自20世纪70年代以来,模拟电路故障诊断得到了广泛的研究并取得了相当的进展^[1-3],其方法通常可以分为两类,即测前模拟诊断(SBT)和测后模拟诊断(SAT)。SBT的典型方法是故障字典法^[4-6],由于简单易行而倍受青睐。其基本思想是首先提取电路(系统)在各种故障状态下的电路特征,然后将特征与故障的一一对应关系列成一个字典。在实际诊断中,只要获取电路(系统)的实时特征,就可以从故障字典中查出对应的故障。经典的故障字典法虽然简单,但也有其固有的缺陷,主要表现:1)限于字典规模而使得预定义的故障有限,从而导致诊断范围有限;2)只能对电路硬故障(开路或短路)进行诊断,而对软故障(元件参数故障)办法不多;3)电路中元件的参数容差普遍存在,导致实际故障很大的模糊性,即故障状态下的电路特征无法与故障字典中的故障

特征一一对应,从而不能唯一定位实际故障。从模拟电路诊断的实践来看,元件容差的问题是导致难以实施正确诊断的最主要因素。处理容差的方法有很多,其中模糊理论作为处理模糊性和不确定性的理想方法^[7],被广泛地应用于模拟电路故障诊断中^[8-13]。但是,几乎所有的模糊故障诊断模型都建立在某一个(些)模糊假设条件之上,由于假设条件自身存在一定的局限性,因此很容易导致诊断结果与实际结果产生偏差,从而产生误判。

针对上述问题,本文首先建立了以节点电压增量比为特征向量的故障字典,使之能够诊断元件参数(0,∞)范围的软硬故障;同时为了克服模糊方法的缺陷,提高诊断率,将几何学中的一些观点扩展到模拟电路故障诊断领域,提出并建立了3种故障隔离的几何模型。

收稿日期: 2009-06-26; 修回日期: 2009-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(60934002); 国家高技术研究发展计划(2006AA06Z222)

作者简介: 叶 笠(1972-),男,博士生,主要从事模拟电路故障诊断、故障诊断与预测、自动测试仪器与仪表方面的研究。

1 故障字典的建立

考察一个由独立源驱动的包含 m 个可测节点和 n 个元件组成的线性电路,所有元件均为其标称值,则电路可由节点电压方程表示,各节点电压用向量表示为 $\mathbf{V}=(V_1, V_2, \dots, V_m)^T$ 。

假设连接在节点 k 和 $q(k, q=1, 2, \dots, m; k \neq q)$ 之间的某一个元件发生故障,电导值由 Y 变为 $Y + \Delta Y$,从而使电压向量由 \mathbf{V} 变为 $\mathbf{V} + \Delta \mathbf{V}$,且 $\Delta \mathbf{V}=(\Delta V_1, \Delta V_2, \dots, \Delta V_m)^T$ 。根据文献[3],第 $i(i=1, 2, \dots, m)$ 个节点的电压变化值为:

$$\Delta V_i = -(Z_{ik} - Z_{iq}) \frac{\Delta Y}{1 + \delta \Delta Y} (V_k - V_q) \quad (1)$$

式中, $Z_{ij}(i, j=1, 2, \dots, m)$ 是节点阻抗矩阵(节点导纳矩阵 $\mathbf{A}^T \mathbf{Y} \mathbf{A}$ 的逆矩阵)中的元素; $\delta = Z_{kk} - Z_{kq} - Z_{qk} + Z_{qq}$ 。记:

$$\begin{cases} Z_{iY} = -(Z_{ik} - Z_{iq}) \\ V = \frac{\Delta Y}{1 + \delta \Delta Y} (V_k - V_q) \end{cases}$$

则式(1)可改写为:

$$\Delta V_i = Z_{iY} V \quad i=1, 2, \dots, m \quad (2)$$

由式(2), 易得:

$$\Delta \tilde{V}_i = \frac{\Delta V_i}{\sqrt{\sum_{j=1}^m \Delta V_j^2}} = \frac{Z_{iY}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m Z_{jY}^2}} = C_i \quad i=1, 2, \dots, m \quad (3)$$

从式(3)可以看出, C_i 是一个常数,它独立于 ΔY ,即不论故障元件 Y 的变化量有多大,经正规变换后的节点 i 的电压增量 $\Delta \tilde{V}_i$ 始终保持不变,只与电路中所有非故障元件的标称值有关。

由式(3)可进一步得到:

$$\Delta \tilde{V}_i / \Delta \tilde{V}_j = \Delta V_i / \Delta V_j = C_i / C_j = C \quad i, j=1, 2, \dots, m \quad (4)$$

由式(4)可得出结论:线性互易电路中,若只有一个元件的参数发生变化,则不论其变化量有多大,在两测试端的电压变化量的比值是一常数^[14]。

由以上讨论可知, $\Delta \tilde{\mathbf{V}}=(\Delta \tilde{V}_1 \Delta \tilde{V}_2 \dots \Delta \tilde{V}_m)$ 可作为电路单一元件发生故障时的特征向量,称之为“节点电压增量向量”。当电路中任何一个元件出现故障时,不论故障大小,其节点电压增量向量始终是不变的,因而可诊断的故障范围很宽,涵盖了元件参数 $(0, \infty)$ 的变化范围。对于含有 m 个可测节点和 n 个元件的线性电路,可以建立一个如式(5)的 $m \times n$ 维的矩阵,矩阵中的元素 $\Delta \tilde{V}_{ij}(i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$ 表示第 j 个故障元件在第 i 个测试节点上引起的电压增量(经正规变换后),由式(3)计算所得;矩阵中的每一个列向量唯一地表征一个故障元件。

$$\Delta \tilde{\mathbf{V}} = \begin{bmatrix} \Delta \tilde{V}_{11} & \Delta \tilde{V}_{12} & \dots & \Delta \tilde{V}_{1n} \\ \Delta \tilde{V}_{21} & \Delta \tilde{V}_{22} & \dots & \Delta \tilde{V}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta \tilde{V}_{m1} & \Delta \tilde{V}_{m2} & \dots & \Delta \tilde{V}_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

若以节点1为参考节点将式(5)作变换,可得:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & \dots & F_{1n} \\ F_{21} & F_{22} & \dots & F_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ F_{m1} & F_{m2} & \dots & F_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, $F_{ij} = \frac{\Delta \tilde{V}_{ij}}{\Delta \tilde{V}_{1j}} = \frac{\Delta V_{ij}}{\Delta V_{1j}}$, $i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$ 。

矩阵 \mathbf{F} 即是故障字典,字典中的每个列向量称为相对于节点1的“节点电压增量比向量”,同样可唯一地表征一个故障元件(参考节点可在测试节点中任选)。

将式(5)变换为式(6)的目的是为了测量与计算的方便。建立字典时,只需首先获得电路中所有元件标称值时各节点的电压 V_i^n ,然后对每个元件逐一任意改变其参数大小(如2倍于标称值),测量各节点电压 V_i^f ,并计算出其相对于标称值时的电压增量 $(\Delta V_i = V_i^f - V_i^n)$,最后计算出各节点电压增量相对于参考节点电压增量的比值,即可建立如式(6)的故障字典。与传统故障字典法相比,本文的方法具有如下优点:1)对于各元件的各种故障只需建立一个统一的特征值,拓宽了诊断范围;2)建立字典时只需仿真各元件的任意一种故障情况,极大地减少了测前模拟次数,并降低计算量及复杂度,从而缩短了建立字典的时间;3)某个元件的多个故障情况只需存储一个特征向量,有效地减小了故障字典规模。

2 故障隔离的几何模型

如前所述,由于元件参数容差的存在,使得实际故障诊断时所测得的故障特征向量与故障字典中的各特征向量不可能一一对应,所以故障定位的目标就是要在字典中找到一个与实际故障特征向量最为相似的故障向量。从几何学的观点来看,有3个几何量可以衡量两个几何图形之间的关系,分别是两点之间的距离、二相交直线的夹角和二相交平面的夹角。可以将上述几何学理论扩展到故障诊断中。

故障字典中的各特征向量都可以和实际特征向量构成一个向量对。就每个向量对而言,以字典中的第 $j(j=1, 2, \dots, n)$ 个特征向量 $(F_{1j} F_{2j} \dots F_{mj})^T$ 和实际特征向量 $(A_1 A_2 \dots A_m)^T$ 所构成的向量对为例,从 m 个可测节点中任意选取其中的两个构成一个节点平面,平面的总数为 C_m^2 。例如:选取节点 i 和节点 $k(i, k=1,$

$2, \dots, m; i \neq k$)可以构成 (N_i, N_k) 节点平面, 那么, 该平面上的两个点 (F_{ij}, F_{kj}) 和 (A_i, A_k) 随即被确定。进一步地, 两条分别通过它们并交于原点的直线 $y = \frac{F_{kj}}{F_{ij}}x$ 和 $y = \frac{A_k}{A_i}x$ 相应地也被确定。在这个节点平面上就可以通过计算两点间的距离、两相交直线的夹角来衡量向量对中的两个向量在该平面上的相似程度。由于一个平面上的信息量是非常有限的, 因此仅在一个平面上进行判断, 精确度往往不高, 所以应考虑在所有节点平面上分别计算它们的相似度然后取平均值作为最终的衡量依据。

类似地, 也可以选取所有可测节点中的任意3个构成一个节点空间, 节点空间的总数为 C_m^3 , 并在节点空间中运用相应的几何方法而得出结论。

2.1 PPD(Point-Point-Distance)模型

考虑由字典中第 $j(j=1, 2, \dots, n)$ 个特征向量 $(F_{1j}, F_{2j}, \dots, F_{mj})^T$ 和实际特征向量 $(A_1, A_2, \dots, A_m)^T$ 组成的向量对, 选择节点 i 和节点 $k(i, k=1, 2, \dots, m; i \neq k)$ 组成的节点平面 (N_i, N_k) 。向量对中的两个向量在该平面上确定的两个点的坐标分别是 (F_{ij}, F_{kj}) 和 (A_i, A_k) , 如图1所示。

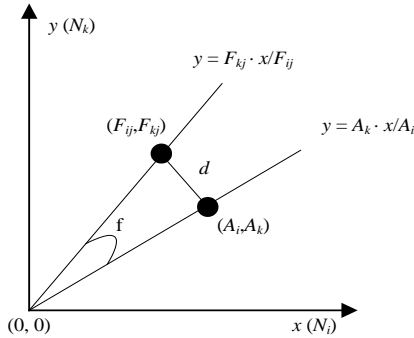


图1 (N_i, N_k) 平面上的模型

图中的两点间的距离为 d , 记作:

$$d_{F_j}(N_i, N_k) = \sqrt{(F_{ij} - A_i)^2 + (F_{kj} - A_k)^2} \quad (7)$$

$i, k = 1, 2, \dots, m; i \neq k; j = 1, 2, \dots, n$

同理, 可得其余节点平面上的相应两点间的距离值, 进一步可求得其平均值 $\bar{d}_{F_j}, j = 1, 2, \dots, n$ 。 \bar{d}_{F_j} 刻画了故障特征向量 F_j 与实际故障特征向量的相似程度, 其值越小, 则二向量的相似程度越高。

2.2 LLA(Line-Line-Angle)模型

如图1所示, 由向量对中各向量所确定的通过原点的二相交直线夹角的余弦为:

$$\cos \varphi_{F_j}(N_i, N_k) = \frac{1 + \frac{A_k}{A_j} \frac{F_{kj}}{F_{ij}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{A_k}{A_j}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{F_{kj}}{F_{ij}}\right)^2}}$$

$$i, k = 1, 2, \dots, m; i \neq k; j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

同理可求得其余节点平面上对应二相交直线的夹角余弦值和它们的平均值 $\overline{\cos \varphi_{F_j}}, j = 1, 2, \dots, n$ 。与PPD模型中的 \bar{d}_{F_j} 相反, $\overline{\cos \varphi_{F_j}}$ 值越大, 则说明二向量的相似度越高。

2.3 PPA(Plane-Plane-Angle)模型

向量对由 $(F_{1j}, F_{2j}, \dots, F_{mj})^T$ 和 $(A_1, A_2, \dots, A_m)^T$ 组成, 节点空间为 $(N_i, N_k, N_l), i, k, l = 1, 2, \dots, m; i \neq k \neq l$ 。如图2所示, 由向量对中各向量确定的平面分别为:

$$\frac{x}{F_{ij}} + \frac{y}{F_{kj}} + \frac{z}{F_{lj}} - 1 = 0 \text{ 和 } \frac{x}{A_i} + \frac{y}{A_k} + \frac{z}{A_l} - 1 = 0$$

图2中二平面夹角的余弦为:

$$\cos \varphi_{F_j}(N_i, N_k, N_l) = \frac{(F_{ij} \times A_i)^{-1} + (F_{kj} \times A_k)^{-1} + (F_{lj} \times A_l)^{-1}}{\sqrt{F_{ij}^{-2} + F_{kj}^{-2} + F_{lj}^{-2}} \times \sqrt{A_i^{-2} + A_k^{-2} + A_l^{-2}}} \quad (9)$$

$i, k, l = 1, 2, \dots, m; i \neq k \neq l; j = 1, 2, \dots, n$

同理可求得其余节点空间中相应相交平面夹角的余弦和它们的平均值 $\overline{\cos \varphi_{F_j}}, j = 1, 2, \dots, n$, 其值越大, 二向量的相似度越高。

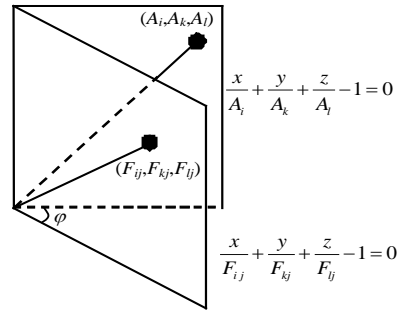


图2 (N_i, N_k, N_l) 空间中的模型

3 故障诊断实例及分析

3.1 诊断步骤说明

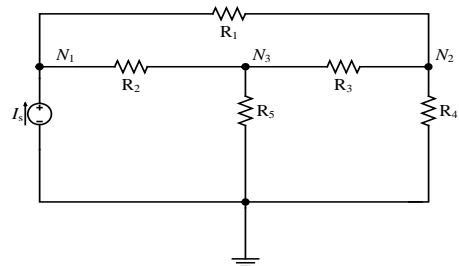


图3 测试电路1

为了说明本文的诊断方法, 首先用一个简单的电路说明具体诊断步骤。被测电路采用文献[12]中的电路, 如图3所示, 共有5个电阻和3个可测节点。 $I_s = 1 \text{ A}$, 各电阻标称值为 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 1 \Omega, R_5 = 0.5 \Omega$, 容差均为10%。

3.1.1 测前模拟步骤

1) 定义故障集 $FR=(FR_1, FR_2, FR_3, FR_4, FR_5)$;

2) 测量各元件在标称值时各节点电压值 $V^n = (V_1^n, V_2^n, V_3^n) = (0.846\ 2\ V, 0.384\ 6\ V, 0.307\ 7\ V)$;

3) $i=1$, 将 R_i 值增大到 $2R_i$ 并测量各节点电压 $V^i = (V_1^i, V_2^i, V_3^i)$;

4) 计算 $\Delta V^i = V^i - V^n$, 再按式(4)计算相应节点电压增量比值, 并作为字典的第 i 个列向量;

5) $i=i+1$, 重复步骤3)和步骤4), 直到 $i=5$ 。

经上述步骤建立的故障字典为:

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -0.333\ 33 & 0.285\ 72 & 3.999\ 99 & 1.4 & 0.75 \\ 0.166\ 67 & -0.142\ 86 & -1.999\ 99 & 0.6 & 1.25 \end{bmatrix}$$

3.1.2 故障诊断步骤

1) 测量各可测节点电压 $V=(V_1, V_2, V_3)$; 2) 计算 $\Delta V = V - V^n$, 再按式(4)计算得到实际节点电压增量比向量 A ; 3) 选择前述模型中的一种, 将字典中各列向量逐一与 A 比较, 相似度最大的即为故障。

现假定 R_4 为故障元件, 其值从 $1\ \Omega$ 变化至 $4\ \Omega$, 实际测得的各节点电压为 $V=(1.05\ V, 0.617\ 1\ V, 0.419\ 6\ V)$, 由式(4)计算的故障特征向量为:

$$A = (1\ 1.139\ 51\ 0.542\ 84)^T$$

不难看出, 实际故障特征向量与字典中的各列向量都不相同, 因此使用前述模型对其进行诊断, 本文以PPD模型为例, 其余类推。

由于被测电路只有3个可测节点, 因而可确定3个节点平面 (N_1, N_2) 、 (N_2, N_3) 、 (N_1, N_3) 。首先考虑由字典中第一个特征向量 F_{i1} 和 A 组成的向量对。在节点平面 (N_1, N_2) 、 (N_2, N_3) 、 (N_1, N_3) 上相应两点间的距离分别为:

$$d_{F_1}(N_1, N_2) = \sqrt{(A_{11} - F_{11})^2 + (A_{21} - F_{21})^2} = 1.472\ 839$$

$$d_{F_1}(N_2, N_3) = \sqrt{(A_{21} - F_{21})^2 + (A_{31} - F_{31})^2} = 1.521\ 463$$

$$d_{F_1}(N_1, N_3) = \sqrt{(A_{11} - F_{11})^2 + (A_{31} - F_{31})^2} = 0.381\ 571$$

距离平均值为:

$$\bar{d}_{F_1} = (1.472\ 839 + 1.521\ 463 + 0.381\ 571) / 3 = 1.125\ 3$$

表1 图3电路诊断结果

模型	FR ₁	FR ₂	FR ₃	FR ₄	FR ₅
PPD	1.125 3	0.881 1	3.079 9	0.192 6	0.631 3
LLA	0.648 0	0.751 0	0.487 8	0.997 8	0.912 4
PPA	0.608 1	0.488 2	0.118 8	0.998 2	0.870 0

同理, 可得 $\bar{d}_{F_2} = 0.8811$, $\bar{d}_{F_3} = 3.0799$, $\bar{d}_{F_4} = 0.1926$, $\bar{d}_{F_5} = 0.6313$ 。显见, \bar{d}_{F_4} 值最小, 因

此, F_4 与实际故障特征向量最相似, 即 R_4 是故障元件。所有模型的诊断结果如表1所示, 表中, $R_4=4\ \Omega$, $V=(1.05\ V, 0.617\ 1\ V, 0.419\ 6\ V)$ 。

3.2 诊断实例分析

电路如图4所示, $R_1=R_2=R_3=R_4=R_5=10\ k\Omega$, $R_6=3\ k\Omega$, $R_7=7\ k\Omega$, $C_1=C_2=20\ nF$, 各元件容差为5%, 共7个测试节点($N_1 \sim N_7$)。以PSPICE为工具做如下实验(各次实验分别测试3种模型, 次数均为100次): 实验1~4的输入为 $V_i=1\ V\ DC$, 故障集为 $R_1 \sim R_7$; 实验5的输入为 $V_i=500\ Hz\ 1\ V\ AC$, 故障集为 $C_1 \sim C_2$ 。实验正确率如表2所示。

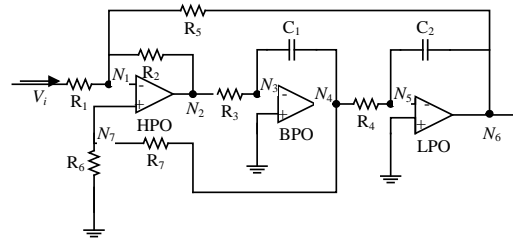


图4 测试电路2

表2 图4电路实验结果

表2a 实验5: $V_i = 500\ Hz, 1\ V\ AC, F = \{C_1, C_2\}$

故障	模型	参数减小	参数增大
C ₁	PPD	87	81
	LLA	87	81
	PPA	87	81
C ₂	PPD	84	85
	LLA	84	85
	PPA	84	85

表2b $V_i = 1\ V\ DC, F = \{R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7\}$

故障	模型	实验1	实验2	实验3	实验4
R ₁	PPD	100	100	93	85
	LLA	100	100	93	85
	PPA	100	100	93	85
R ₂	PPD	100	100	88	79
	LLA	100	100	88	79
	PPA	100	100	88	79
R ₃	PPD	100	100	90	92
	LLA	100	100	90	92
	PPA	100	100	90	92
R ₄	PPD	100	100	96	94
	LLA	100	100	96	94
	PPA	100	100	96	94
R ₅	PPD	100	100	81	84
	LLA	100	100	81	84
	PPA	100	100	81	84
R ₆	PPD	100	100	87	91
	LLA	100	100	87	91
	PPA	100	100	87	91
R ₇	PPD	100	100	92	83
	LLA	100	100	92	83
	PPA	100	100	92	83

实验1 单一元件短路的硬故障诊断。每个电阻元件取其短路情况, 其余元件在容差内随机变化。

实验2 单一元件开路的硬故障诊断。每个电阻元件取其开路情况, 其余元件在容差内随机变化。

实验3 单一元件参数减小的软故障诊断。每个电阻元件分别在 $(0, 0.95R_j)$ 内随机取值, 其余元件在容差内随机变化。

实验4 单一元件参数增大的软故障诊断。每个电阻元件分别在 $(1.05R_j, 2R_j)$ 内随机取值, 其余元件在容差内随机变化。

实验5 将输入激励换成500 Hz 1 V AC, 对 C_1 和 C_2 做与实验3和实验4相同的软故障诊断。

从表2的结果可以看出: 1) 所有模型的诊断结果均一致; 2) 对元件硬故障的诊断率很高, 达100%; 3) 对元件参数故障的诊断率相对较低, 原因是当元件参数在其容差许可值的边缘变化时, 即电路处于正常状态与故障状态临界点时较难判断, 但当参数值超过其标称值的 $\pm 20\%$ 后诊断率就很高, 可达90%以上。在实际故障诊断中, 当可测节点数目较多时, 只需要选取所有 C_m^2 个节点平面或 C_m^3 个节点空间中的一部分即可得出较为理想的结果, 可使计算复杂度大为降低。对于如何选择可测节点是进一步研究的课题。

4 结 论

本文将节点电压增量比向量作为故障特征建立的故障字典, 克服了传统字典不能对软故障进行诊断和诊断范围有限的缺陷; 针对由于元件容差而使故障定位难的问题, 将几何学的观点应用于模拟电路故障诊断, 提出并建立了3个故障隔离的几何模型; 最后用实例证明了本文诊断理论和所建模型的正确性和有效性。实验结果证明本文方法在对线性容差模拟电路进行故障诊断时有较高的诊断率。

参 考 文 献

- [1] MILOR L S. A tutorial introduction to research on analog and mixed-signal circuit testing[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, 1998, 45(10): 89-1407.
- [2] LIU Ruyi-wen, VISVANATHAN V. Sequentially linear Fault diagnosis: Part-I theory[J]. IEEE Trans Circuits Sys, 1979, CAS-26(7): 490-495.
- [3] TADEUSIEWICZ M, HALGAS S, KORZYBSKI M. An algorithm for soft-fault diagnosis of linear and nonlinear circuits[J]. IEEE Trans Circuits Sys I, 2002, 49: 1648-1653.
- [4] LIN P M, ELOHERIFIF Y S. Analog circuits fault dictionary - new approaches and implementation[J]. Int J Circuit Theory Appl, 1985, 13(2): 149-172.
- [5] RUTKOWSKI G. The DC fault dictionary - a neural network approach[C]//Proc 12th ECCTD. Istanbul: [s.n.], 1995: 295-298.
- [6] LI Feng, WOO Peng-yung. The invariance of node-voltage sensitivity sequence and its' application in a unified fault detection dictionary method[J]. IEEE Trans Circuits Sys I, 1999, 46: 1222-1227.
- [7] FANG Lei, ZHANG Huan-chun, JING Ya-zhi. A new fuzzy adaptive genetic algorithm[J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2005, 3(1): 57-59, 71.
- [8] EL-GAMAL M A, ABDULGHAFOR M. Fault isolation in analog circuits using a fuzzy inference system[J]. Computers and Electrical Engineering, 2003, 29: 213-229.
- [9] LEE J, BEDROSIAN S D. Fault isolation algorithm for analog electronic systems using the fuzzy concept[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, 1979, 26(5): 18-22.
- [10] TORRALBA A, CHAVEZ J, FRANQUELO LG. Fault detection and classification of analog circuits by means of fuzzy logic based techniques[C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems. [S.l.]: IEEE, 1990, 18: 28-31.
- [11] ABDULGHAFOR M, EL-GAMAL M A. A fuzzy logic system for analog fault diagnosis[C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems. [S.l.]: IEEE, 1996: 97-100.
- [12] WANG Peng, YANG Shi-yuan. A new diagnosis approach for handling tolerance in analog and mixed-signal circuits by using fuzzy math[J]. IEEE Trans Circuits Sys I, 2005, 52(10): 2118-2127.
- [13] 雷霖, 代传龙, 王厚军, 等. 粗糙集-神经网络集成的WSN节点故障诊断[J]. 电子科技大学学报, 2008, 37(4): 565-568.
LEI Lin, DAI Chuan-long, WANG Hou-jun, et al. Fault diagnosis of node in WSN based on integration of rough sets and neural network[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2008, 37(4): 565-568.
- [14] 崔蕊, 罗先觉, 邱关源. 一种基于聚类神经网络的模拟电路故障诊断方法[J]. 西安工业学院学报, 1996, 16(2): 106-109.
CUI Chun, LUO Xian-jue, QIU Guan-yuan. Analog fault diagnosis approach based on a clustering NN[J]. Journal of Xian Institute of Technology, 1996, 16(2): 106-109.

编辑 漆蓉