

基于结点电压增量的模拟电路多故障诊断方法研究

许 军, 张耀辉, 陈圣俭

(装甲兵工程学院, 北京 100072)

摘 要: 针对模拟电路多故障诊断中经常可能遇到的可测点不足和测试量受限的问题, 提出了基于结点电压增量的模拟电路多故障诊断方法. 推导了基于 4 个测试点电压增量的双故障诊断方程, 给出了诊断流程和仿真实例. 理论分析和实验结果表明, 该方法可用于线性模拟电路的多故障诊断, 对硬故障和软故障均有效, 在可测点不足和测试量受限的条件下具有优越性, 适合大规模线性模拟电路的多故障诊断和测试.

关键词: 模拟电路; 故障诊断; 多故障; 结点电压增量

中图分类号: TN711

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2015)02-0138-04

Study on the Analog Circuit Multi-fault Diagnosis Based on Node Voltage Increments

XU Jun, ZHANG Yao-hui, CHEN Sheng-jian

(Armored Force Engineering Institute, Beijing 100072, China)

Abstract: For the test nodes shortfall and the test variable conditionality in the analog circuit Multi-fault diagnosis, a analog circuit Multi-fault diagnosis method is brought forward based on node voltage increments. The equation of double-fault diagnosis is deduced using 4 test node voltage increments, and that the diagnosis flow and examples are explained in this paper. The theory analysis and the experimental result show that the new method can diagnose Multi-fault of linear circuits, and is effective hard-fault and soft-fault. The method has an advantage in the condition of the test nodes shortfall and the test variable conditionality, and adapts to large-scale linear analog circuit Multi-fault diagnosis and testing.

Key words: analog circuit; fault diagnosis; multi-fault; node voltage increments

1 引言

多故障、软故障、非线性和容差等问题一直是模拟电路故障诊断的难点和热点^[1]. 目前, 解决这类问题的方法大致分为两类: 一类是基于电网络理论的诊断方法^[2-4], 主要通过建立和解算电路的诊断方程, 根据计算结果确定电路的故障元件; 另一类是基于人工智能和现代信号处理技术的诊断方法^[5-10], 主要通过运用人工神经网络、支持向量机、信息融合和小波变换等方法, 根据诊断系统的输出确定电路的故障元件. 其中, 基于电网络理论的诊断方法不针对具体电路, 通用性较强, 但其效果很大程度上取决

于电路诊断方程的优劣和测试向量的特点与数量. 当被测电路规模大、可测点不足或测试量受限(如: 只能获得测试点电压信号, 不能提供支路电流)时, 该方法的计算量较大、可行性较差; 基于人工智能的诊断方法无需建立电路的诊断方程, 较好地解决了基于电网络理论诊断方法的问题, 但需要对电路的故障样本进行测试或模拟, 并对诊断系统进行多次训练, 其效果与故障样本的数量、代表性和诊断系统的训练量密切相关. 当被测电路种类多、变化多时, 该方法的适应性不够.

本文以基于电网络理论的诊断方法为基础, 降低对可测点数量和测试量特性的约束, 在只有少量

收稿日期: 2014-04-10; 修回日期: 2014-06-02

基金项目: 国家自然科学基金项目“基于边界扫描技术的混合信号系统机内自测试研究”(61179001)

测试点和测试点电压信号的条件下,提出基于结点电压增量的模拟电路多故障诊断方法,并以双故障为例,推导线性模拟电路的诊断方程。

2 双故障诊断方程

假设电路有 N 个独立结点、 M 个支路,各支路元件的导纳参数为 $y_k (k = 1, 2, \dots, M)$,则由电路理论可以写出电路的结点电压方程为

$$Y \dot{V}_n = \dot{I}_{sn} \quad (1)$$

式中, Y 为结点导纳矩阵, $\dot{V}_n$ 为结点电压列向量 ($n = 1, 2, \dots, N$), $\dot{I}_{sn}$ 为独立电源激励的流入各结点的电流列向量。当其系数行列式 $\det(Y) \neq 0$ 时,由Cramer 法则,可得线性电路结点 n 的电压为

$$V_n = D_n / \det(Y) \quad (2)$$

式中, $n = 1, 2, \dots, N$, D_n 是将 $\det(Y)$ 中第 n 列元素用 I_{sn} 向量的各元素替代所得的行列式。

现假设电路中存在双故障,分别是元件 X_a 和 X_b ,则无论 X_a 和 X_b 是电阻、电容、电感或受控源,均可以证明,以元件参数 X_a 和 X_b 为变量的结点 n 的电压为

$$V_n = \frac{e_n X_a X_b + f_n X_a + g_n X_b + h_n}{a X_a X_b + b X_a + c X_b + d} \quad (3)$$

式中, $a, b, c, d, e_n, f_n, g_n, h_n$ 为与 X_a 和 X_b 无关的常量。

由此可分别求出 X_a 和 X_b 发生故障使参数变为 $X_a + \Delta X_a$ 和 $X_b + \Delta X_b$ 时, V_n 的变化量 ΔV_n 为

$$\begin{aligned} \Delta V_n &= \frac{e_n (X_a + \Delta X_a) (X_b + \Delta X_b) + f_n (X_a + \Delta X_a) + g_n (X_b + \Delta X_b) + h_n}{a (X_a + \Delta X_a) (X_b + \Delta X_b) + b (X_a + \Delta X_a) + c (X_b + \Delta X_b) + d} - \\ &\quad \frac{e_n X_a X_b + f_n X_a + g_n X_b + h_n}{a X_a X_b + b X_a + c X_b + d} \\ &= \frac{\beta_n \Delta X_a \Delta X_b + \delta_n \Delta X_a + \eta_n \Delta X_b}{\lambda \lambda_\Delta} \end{aligned} \quad (4)$$

其中,

$$\begin{aligned} \beta_n &= (e_n b - a f_n) X_a + (e_n c - a g_n) X_b + (e_n d - a h_n); \\ \delta_n &= (e_n c - a g_n) X_b^2 + (f_n c + e_n d - b g_n - a h_n) X_b + \\ &\quad (f_n d - b h_n); \end{aligned}$$

$$\eta_n = (e_n b - a f_n) X_a^2 + (g_n b + e_n d - c f_n - a h_n) X_a + (g_n d - c h_n);$$

$$\lambda = a X_a X_b + b X_a + c X_b + d;$$

$$\lambda_\Delta = a (X_a + \Delta X_a) (X_b + \Delta X_b) + b (X_a + \Delta X_a) + c (X_b + \Delta X_b) + d.$$

另外,根据结点电压灵敏度的定义,对式(3)中的 X_a 和 X_b 求偏导,可以得到结点电压 V_n 对 X_a 和 X_b 的灵敏度:

$$\begin{aligned} S_{X_a}^{V_n} &= \frac{\partial V_n}{\partial X_a} \\ &= \frac{(e_n c - a g_n) X_b^2 + (f_n c + e_n d - b g_n - a h_n) X_b + (f_n d - b h_n)}{\lambda^2} \\ &= \frac{\delta_n}{\lambda^2} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} S_{X_b}^{V_n} &= \frac{\partial V_n}{\partial X_b} \\ &= \frac{(e_n b - a f_n) X_a^2 + (g_n b + e_n d - c f_n - a h_n) X_a + (g_n d - c h_n)}{\lambda^2} \\ &= \frac{\eta_n}{\lambda^2} \end{aligned} \quad (6)$$

将式(5)、(6)代入式(4),可得

$$\Delta V_n = \frac{\beta_n}{\lambda \lambda_\Delta} \Delta X_a \Delta X_b + \frac{\lambda}{\lambda_\Delta} S_{X_a}^{V_n} \Delta X_a + \frac{\lambda}{\lambda_\Delta} S_{X_b}^{V_n} \Delta X_b \quad (7)$$

现假设电路中有 3 个可测结点: $n = i, j, l$, 将其分别代入式(7)可得结点 i, j, l 的电压变化量 $\Delta V_i, \Delta V_j, \Delta V_l$ 。当将 ΔV_i 和 ΔV_j 的表达式分别做移项,并求二者之比(去掉 $\Delta X_a \Delta X_b$ 项)时,可得如下表达式:

$$\frac{\Delta V_i - \frac{\lambda}{\lambda_\Delta} S_{X_a}^{V_i} \Delta X_a - \frac{\lambda}{\lambda_\Delta} S_{X_b}^{V_i} \Delta X_b}{\Delta V_j - \frac{\lambda}{\lambda_\Delta} S_{X_a}^{V_j} \Delta X_a - \frac{\lambda}{\lambda_\Delta} S_{X_b}^{V_j} \Delta X_b} = \frac{\beta_i}{\beta_j} \quad (8)$$

整理式(8)有

$$\begin{aligned} \beta_j \Delta V_i - \beta_i \Delta V_j &= \frac{\lambda}{\lambda_\Delta} (\beta_j S_{X_a}^{V_i} - \beta_i S_{X_a}^{V_j}) \Delta X_a + \\ &\quad \frac{\lambda}{\lambda_\Delta} (\beta_j S_{X_b}^{V_i} - \beta_i S_{X_b}^{V_j}) \Delta X_b \end{aligned} \quad (9)$$

同理,将 ΔV_i 和 ΔV_l 的表达式分别做移项,求二者之比,并整理可得

$$\begin{aligned} \beta_l \Delta V_i - \beta_i \Delta V_l &= \frac{\lambda}{\lambda_\Delta} (\beta_l S_{X_a}^{V_i} - \beta_i S_{X_a}^{V_l}) \Delta X_a + \\ &\quad \frac{\lambda}{\lambda_\Delta} (\beta_l S_{X_b}^{V_i} - \beta_i S_{X_b}^{V_l}) \Delta X_b \end{aligned} \quad (10)$$

再做式(9)与式(10)之比,消去公共项 λ/λ_Δ ,得

$$\begin{aligned} &\frac{\beta_j \Delta V_i - \beta_i \Delta V_j}{\beta_l \Delta V_i - \beta_i \Delta V_l} \\ &= \frac{(\beta_j S_{X_a}^{V_i} - \beta_i S_{X_a}^{V_j}) \Delta X_a + (\beta_j S_{X_b}^{V_i} - \beta_i S_{X_b}^{V_j}) \Delta X_b}{(\beta_l S_{X_a}^{V_i} - \beta_i S_{X_a}^{V_l}) \Delta X_a + (\beta_l S_{X_b}^{V_i} - \beta_i S_{X_b}^{V_l}) \Delta X_b} \end{aligned} \quad (11)$$

整理式(11),得

$$\begin{aligned} &\Delta X_a [(\beta_l S_{X_a}^{V_i} - \beta_j S_{X_a}^{V_l}) \Delta V_i + (\beta_i S_{X_a}^{V_l} - \beta_l S_{X_a}^{V_i}) \Delta V_j + \\ &\quad (\beta_j S_{X_a}^{V_j} - \beta_i S_{X_a}^{V_i}) \Delta V_l] = \\ &\quad \Delta X_b [(\beta_l S_{X_b}^{V_i} - \beta_j S_{X_b}^{V_l}) \Delta V_i + (\beta_i S_{X_b}^{V_l} - \beta_l S_{X_b}^{V_i}) \Delta V_j + \\ &\quad (\beta_j S_{X_b}^{V_j} - \beta_i S_{X_b}^{V_i}) \Delta V_l] \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)的特点是 ΔX_a 和 ΔX_b 分别在等式两边,

此时只要再增加 1 个测试点 k , 使其与上述 3 个测试点 i, j, l 中的任意 2 个构成一组, 按照式(8)~(12)的处理方法得到另一个与式(12)形式相同的表达式, 然后再做两个表达式的比, 即可消去 ΔX_a 和 ΔX_b , 得到一个只与测试点电压变化量、结点电压方程相关参数和结点电压灵敏度有关的方程, 用于双故障(X_a 和 X_b 故障)的检测和诊断。

现假设增加 1 个测试点 k , 将其取代上述 3 个测试点 i, j, l 中的 i , 按照与式(8)~(12)同样的处理方法得到如下表达式:

$$\begin{aligned} & \Delta X_a [(\beta_i S_{X_a}^{V_i} - \beta_j S_{X_a}^{V_j}) \Delta V_k + (\beta_k S_{X_a}^{V_k} - \beta_l S_{X_a}^{V_l}) \Delta V_j + \\ & (\beta_j S_{X_a}^{V_j} - \beta_k S_{X_a}^{V_k}) \Delta V_l] = \\ & \Delta X_b [(\beta_j S_{X_b}^{V_j} - \beta_l S_{X_b}^{V_l}) \Delta V_k + (\beta_l S_{X_b}^{V_l} - \beta_k S_{X_b}^{V_k}) \Delta V_j + \\ & (\beta_k S_{X_b}^{V_k} - \beta_j S_{X_b}^{V_j}) \Delta V_l] \end{aligned} \quad (13)$$

做式(12)和式(13)的比, 消去 ΔX_a 和 ΔX_b , 并整理得

$$\varepsilon_1 \Delta V_i \Delta V_j + \varepsilon_2 \Delta V_i \Delta V_l + \varepsilon_3 \Delta V_j \Delta V_k + \varepsilon_4 \Delta V_l \Delta V_k + \varepsilon_5 \Delta V_l \Delta V_j + \varepsilon_6 \Delta V_j^2 + \varepsilon_7 \Delta V_l^2 = 0 \quad (14)$$

其中, $\varepsilon_1 = [\beta_j \beta_l (S_{X_b}^{V_j} S_{X_a}^{V_l} - S_{X_a}^{V_j} S_{X_b}^{V_l}) + \beta_l \beta_k (S_{X_b}^{V_l} S_{X_a}^{V_k} - S_{X_a}^{V_l} S_{X_b}^{V_k}) + \beta_j^2 (S_{X_b}^{V_j} S_{X_a}^{V_k} - S_{X_a}^{V_j} S_{X_b}^{V_k})]$

$\varepsilon_2 = [\beta_j \beta_k (S_{X_b}^{V_j} S_{X_a}^{V_k} - S_{X_a}^{V_j} S_{X_b}^{V_k}) + \beta_j \beta_l (S_{X_b}^{V_j} S_{X_a}^{V_l} - S_{X_a}^{V_j} S_{X_b}^{V_l}) + \beta_j^2 (S_{X_b}^{V_j} S_{X_a}^{V_k} - S_{X_a}^{V_j} S_{X_b}^{V_k})]$

$\varepsilon_3 = [\beta_l \beta_k (S_{X_b}^{V_l} S_{X_a}^{V_k} - S_{X_a}^{V_l} S_{X_b}^{V_k}) + \beta_l \beta_j (S_{X_b}^{V_l} S_{X_a}^{V_j} - S_{X_a}^{V_l} S_{X_b}^{V_j}) + \beta_l^2 (S_{X_b}^{V_l} S_{X_a}^{V_k} - S_{X_a}^{V_l} S_{X_b}^{V_k})]$

$\varepsilon_4 = [\beta_j \beta_k (S_{X_b}^{V_j} S_{X_a}^{V_k} - S_{X_a}^{V_j} S_{X_b}^{V_k}) + \beta_j \beta_l (S_{X_b}^{V_j} S_{X_a}^{V_l} - S_{X_a}^{V_j} S_{X_b}^{V_l}) + \beta_j^2 (S_{X_b}^{V_j} S_{X_a}^{V_k} - S_{X_a}^{V_j} S_{X_b}^{V_k})]$

$\varepsilon_5 = [\beta_j \beta_l (S_{X_b}^{V_j} S_{X_a}^{V_l} - S_{X_a}^{V_j} S_{X_b}^{V_l}) + 2\beta_j \beta_l (S_{X_b}^{V_j} S_{X_a}^{V_k} - S_{X_a}^{V_j} S_{X_b}^{V_k}) + \beta_j \beta_k (S_{X_b}^{V_j} S_{X_a}^{V_k} - S_{X_a}^{V_j} S_{X_b}^{V_k}) + \beta_l \beta_k (S_{X_b}^{V_l} S_{X_a}^{V_k} - S_{X_a}^{V_l} S_{X_b}^{V_k}) + \beta_l \beta_k (S_{X_b}^{V_l} S_{X_a}^{V_j} - S_{X_a}^{V_l} S_{X_b}^{V_j})]$

$\varepsilon_6 = [\beta_l \beta_k (S_{X_b}^{V_l} S_{X_a}^{V_k} - S_{X_a}^{V_l} S_{X_b}^{V_k}) + \beta_l \beta_j (S_{X_b}^{V_l} S_{X_a}^{V_j} - S_{X_a}^{V_l} S_{X_b}^{V_j}) + \beta_l^2 (S_{X_b}^{V_l} S_{X_a}^{V_k} - S_{X_a}^{V_l} S_{X_b}^{V_k})]$

$\varepsilon_7 = [\beta_j \beta_k (S_{X_b}^{V_j} S_{X_a}^{V_k} - S_{X_a}^{V_j} S_{X_b}^{V_k}) + \beta_j \beta_l (S_{X_b}^{V_j} S_{X_a}^{V_l} - S_{X_a}^{V_j} S_{X_b}^{V_l}) + \beta_j^2 (S_{X_b}^{V_j} S_{X_a}^{V_k} - S_{X_a}^{V_j} S_{X_b}^{V_k})]$

式(14)就是基于结点电压增量的双故障诊断方程。

只要元件参数 X_a 和 X_b 偏离正常值, 无论 X_a 和 X_b 的故障是硬故障还是软故障, 故障在测试点 i, j, l, k 产生的电压变化量 $\Delta V_i, \Delta V_j, \Delta V_l, \Delta V_k$ 都满足方程(14)。据此可以得到诊断双故障的方法, 测前以可能的双故障组合或需要诊断的双故障组合的元件参数为变量, 写出电路的结点导纳矩阵, 算出 $\beta_i, \beta_j, \beta_l$ 和 β_k , 并运用电路的仿真分析工具得到各测试点对各元件参数的结点电压灵敏度, 算出各种双故障组合条件下诊断方程的系数 $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_7$ 。诊断时, 测量各测试点的电压, 算出各测试点电压相对正常值的变化量(结点电压增量) $\Delta V_i, \Delta V_j, \Delta V_l, \Delta V_k$, 代入诊断方程(14), 能使方程满足的元件组合就是发生故障的元件。按照同样思路, 将测试点增至 5 个时, 可推导出三故障诊断方程。同理, 适当增加测试点, 还可推导出更多故障的诊断方程, 得到基于结点电压增量的多故障诊断方程。

3 诊断流程与验证

3.1 诊断流程

(1) 测试前, 以需要诊断的双故障组合的元件参数为变量, 写出电路的结点导纳矩阵, 算出 $\beta_i, \beta_j, \beta_l$ 和 β_k , 其中的元件参数 X_a 和 X_b 用标称值代入。

(2) 运用电路的仿真分析工具得到 4 个测试点对各元件参数的结点电压灵敏度 $S_{X_a}^{V_i}, S_{X_b}^{V_i}, S_{X_a}^{V_j}, S_{X_b}^{V_j}$ 。

(3) 算出诊断方程的系数 $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_7$ 。

(4) 诊断时, 测量各测试点的电压, 算出各测试点电压增量 $\Delta V_i, \Delta V_j, \Delta V_l, \Delta V_k$ 。

(5) 将各测试点电压增量代入诊断方程(14), 能使方程满足的元件组合就是发生故障的元件。

3.2 仿真实验

例: 图 1 为 D/A 转换中常见的倒 T 形电阻网络。现假设需要诊断的双故障组合可能为 $R_2 R_3, R_8 R_9$ 和 $R_{14} R_{15}$ 。当 R_2 和 R_3 的阻值均偏离正常值(例如: R_2 由 10 k Ω 变为 100 k Ω 、 R_3 由 20 k Ω 变为 2 k Ω)时, 用双故障诊断方程进行故障诊断。

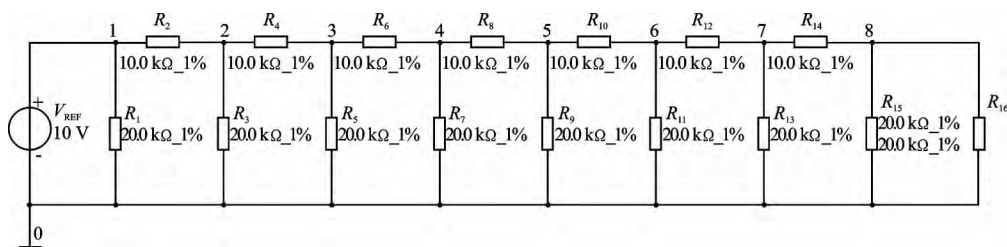


图 1 倒 T 形电阻网络

首先,选择 2、3、4、5 号结点为测试点.然后,以 R_2 和 R_3 为变量,写出电路的结点导纳矩阵,算出 β_2 、 β_3 、 β_4 和 β_5 ,对应表 1 的第 2 列.同理,分别以其他双故障组合的元件参数为变量,写结点导纳矩阵,算出相应的 β_2 、 β_3 、 β_4 和 β_5 ,对应表 1 的第 3、4 列.

第二步,运用电路的仿真分析工具得到各测试点对各元件参数的结点电压灵敏度 $S_{X_k}^{V_2}$ 、 $S_{X_k}^{V_3}$ 、 $S_{X_k}^{V_4}$ 、 $S_{X_k}^{V_5}$,结果见表 2.

表 2 各测试点对各元件参数的结点电压灵敏度

R_k	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8
$S_{R_2}^{V_2}$	0	-0.000 25	6.25E-05	6.25E-05	1.56E-05	1.56E-05	3.91E-06	3.91E-06
$S_{R_3}^{V_2}$	0	-0.000 12	3.12E-05	-9.4E-05	3.91E-05	3.91E-05	9.77E-06	9.77E-06
$S_{R_4}^{V_2}$	0	-6.2E-05	1.56E-05	-4.7E-05	1.95E-05	-4.3E-05	2.05E-05	2.05E-05
$S_{R_5}^{V_2}$	0	-3.1E-05	7.81E-06	-2.3E-05	9.77E-06	-2.1E-05	1.03E-05	-2.1E-05
R_k	R_9	R_{10}	R_{11}	R_{12}	R_{13}	R_{14}	R_{15}	R_{16}
$S_{R_9}^{V_2}$	9.77E-07	9.77E-07	2.44E-07	2.44E-07	6.1E-08	6.1E-08	1.53E-08	1.53E-08
$S_{R_{10}}^{V_2}$	2.44E-06	2.44E-06	6.1E-07	6.1E-07	1.53E-07	1.53E-07	3.81E-08	3.81E-08
$S_{R_{11}}^{V_2}$	5.13E-06	5.13E-06	1.28E-06	1.28E-06	3.2E-07	3.2E-07	8.01E-08	8.01E-08
$S_{R_{12}}^{V_2}$	1.04E-05	1.04E-05	2.59E-06	2.59E-06	6.48E-07	6.48E-07	1.62E-07	1.62E-07

表 3 不同故障组合条件下的诊断方程系数

$X_a X_b$	$R_2 R_3$	$R_8 R_9$	$R_{14} R_{15}$
ϵ_1	4.0 E+4	-2.21 E+6	2.96 E-3
ϵ_2	-8.0 E+4	1.08 E+6	-1.45 E-3
ϵ_3	-4.0 E+5	4.87 E+2	-1.37 E-3
ϵ_4	8.0 E+5	-2.38 E+2	6.69 E-4
ϵ_5	-4.0 E+4	-4.1 E+5	5.07 E-3
ϵ_6	2.0 E+4	-6.96 E+5	-2.96 E-3
ϵ_7	0	-5.3 E+3	-1.77 E-3

当 R_2 由 10 k Ω 变为 100 k Ω 、 R_3 由 20 k Ω 变为 2 k Ω 时,测量各测试点的电压,算出各测试点的电压增量分别为: $\Delta V_2 = 4.82$ V、 $\Delta V_3 = 2.41$ V、 $\Delta V_4 = 1.21$ V、 $\Delta V_5 = 0.603$ V. 将 ΔV_2 、 ΔV_3 、 ΔV_4 、 ΔV_5 代入诊断方程 (14): $\epsilon_1 \Delta V_2 \Delta V_3 + \epsilon_2 \Delta V_2 \Delta V_4 + \epsilon_3 \Delta V_3 \Delta V_5 + \epsilon_4 \Delta V_4 \Delta V_5 + \epsilon_5 \Delta V_4 \Delta V_3 + \epsilon_6 \Delta V_3^2 + \epsilon_7 \Delta V_4^2 \approx 0$. 其中, $\epsilon_1 \sim \epsilon_7$ 的值分别取自表 3 所示的不同故障组合时的值.

计算结果显示,只有将 $R_2 R_3$ 对应的 $\epsilon_1 \sim \epsilon_7$ 代入方程时能使方程成立,由此可判断发生故障的元件组合是 R_2 和 R_3 ,诊断结果与假设相符.

4 结束语

本文针对模拟电路多故障诊断难题,提出了基于结点电压增量的多故障诊断方法,推导了基于 4 个测试点电压增量的双故障诊断方程,给出了诊断

第三步,将前二步结果代入计算 $\epsilon_1 \sim \epsilon_7$ 的表达式,算出诊断方程的系数 $\epsilon_1 \sim \epsilon_7$,结果见表 3.

表 1 不同故障组合条件下的 β_2 、 β_3 、 β_4 、 β_5

$X_a X_b$	$R_2 R_3 (E+9)$	$R_8 R_9 (E+8)$	$R_{14} R_{15} (E+6)$
β_2	-4.0	1.42	1.20
β_3	-2.0	3.56	6.20
β_4	-1.0	7.27	1.27
β_5	-0.5	-7.44	2.28

流程和仿真实例.按照同样思路,将测试点增至 5 个时,可推导出三故障诊断方程.同理,可得到 n 故障的诊断方程.虽然当电路规模较大时,诊断方程会相应复杂,但由于该方法的计算量基本都在测试前,且只需待诊断元件的正常参数,无需其故障参数,所以在有计算机辅助运算的条件下该方法的可行性较好.理论分析和实验结果表明,该方法可用于线性模拟电路的多故障诊断,且对硬故障和软故障均有效,在可测点受限条件下具有一定的优越性.

参考文献:

- [1] Tadeusiewicz M, Halgas S. Multiple fault diagnosis in analogue circuits[J]. IEEE Circuit Theory and Design, 2005(3): 205-208.
- [2] 汪鹏,杨士元.电压增量的线性相关性及其在电路测试中的应用[J].清华大学学报:自然科学版,2007,47(7):1245-1248.
- [3] 安群香,谢平阳.大规模容差模拟电路多故障诊断法[J].电子测量技术,2007,30(2):78-80.
- [4] 李纪敏,尚朝轩,孟宪国.模拟线性电路的多故障诊断方法[J].火力与指挥控制,2009,34(7):175-180.
- [5] 吴正苗,彭敏放,谭虎,等.基于 SOFM 网络和异质信息融合的模拟电路诊断[J].微电子学与计算机,2011,28(11):160-164.

(下转第 147 页)

- using deep belief networks[J]. IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing, 2012, 20(1): 14-22.
- [7] 周长建, 司震宇, 邢金阁. 基于 Deep Learning 网络态势感知建模方法研究[J]. 东北农业大学学报, 2013, 44(5): 144-149.
- [8] 杨奎元. 基于深层结构的图像内容分析及其应用[D]. 合肥: 中国科技大学计算机学院, 2012.
- [9] Taylor G W, Sigal L, Fleet D J, et al.. Dynamical binary latent variable models for 3D human pose tracking [C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Francisco: IEEE, 2010: 631-638.
- [10] 刘建伟, 刘媛, 罗雄麟. 玻尔兹曼机研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2014, 51(1): 1-16.
- [11] 林妙真. 基于深度学习的人脸识别研究[D]. 大连: 大连理工大学计算机学院, 2013.
- [12] G E Hinton. A practical guide to training restricted boltzmann machines[R]. Toronto: Machine Learning Group University of Toronto, 2010, 129-136.
- [13] Ruslan Salakhutdinov, G E Hinton. Replicated Softmax: an undirected topic model[C]// Advances in neural information processing systems. Vancouver: IEEE, 2009: 1607-1614.
- [14] R Salakhutdinov, G E Hinton. Deep boltzmann machines[C]// Proceeding of the International Conference on Artificial Intelligence and Statistics. Vancouver: IEEE, 2009: 448-455.
- [15] Lee H, Ekanadham C, Ng A. Sparse deep belief net model for visual area V2[C]// Advances in neural information processing systems. Vancouver: IEEE, 2007: 873-880.
- [16] G. E. Hinton. Training products of experts by minimizing contrastive divergence[J]. Neural Computation, 2002, 14(8): 1711-1800.
- [17] Hoyer P. Non-negative matrix factorization with sparseness constraints[J]. Journal of Machine Learning Research, 2004, 5(12): 1457-1469.

作者简介:

张立民 男,(1966-),博士,教授.研究方向为盲信号处理、军用仿真技术.

刘凯 男,(1986-),博士研究生.研究方向为智能信息处理、军用仿真技术. E-mail:848297582@qq.com

(上接第 141 页)

- [6] 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.
- [7] Wang A, Liu J. A novel fault diagnosis of analog circuit algorithm based on incomplete wavelet packet transform and improved balanced binary-tree SVM [J]. Bio-Inspired Computational Intelligence and Applications, 2007(1):482-493.
- [8] 马超, 陈西宏, 邓均明,等. 模拟电路故障诊断的信息融合新方法[J]. 微电子学与计算机, 2011, 28(4): 9-17.
- [9] 连可, 王厚军, 龙兵. 基于 SVM 的模拟电子系统多故障诊断研究 [J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(6): 1029-1034.
- [10] 李云红, 谭阳红. 基于小波包与量子神经网络的容差模拟电路的软故障诊断 [J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(5): 187-192.

作者简介:

许军 女,(1961-),博士,教授.研究方向为模拟电路故障诊断、信号检测与估计等. E-mail:xj719222@sohu.com