

· 自动化技术 ·

模拟故障诊断中的容差处理方法研究

杨成林, 田书林, 龙 兵

(电子科技大学自动化工程学院 成都 610054)

【摘要】基于斜率故障模型的故障诊断方法较好地解决了线性电路的软故障和硬故障诊断问题, 是一种很有价值的故障模型, 但是容差问题使该方法不实用, 基于此, 给出了新的容差处理方法。首先斜率故障模型的公共点(由无故障时两个选定测点的电压值确定)不再是一个定值, 而是在实际电路运行中获得, 它包含了实际电路元件的容差信息。其次, 受容差影响, 元件斜率特征是一个扇形区域, 该扇形区域可以通过计算或者仿真得到。该方法能较好地解决斜率故障模型中的容差问题。

关键词 模拟故障诊断; 模拟故障字典; 故障模型; 容差

中图分类号 TN710

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.01.009

Research on Tolerance Handling Method for Analog Fault Diagnosis

YANG Cheng-lin, TIAN Shu-lin, and LONG Bing

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

Abstract The slope-based fault modeling method is a good solution for soft and hard fault diagnosis problems. But it is not applicable to practical circuit fault diagnosis due to the influence of tolerance. Several tolerance handling methods are given in this paper. First, the public point of slope feature curves is not a fixed value but derived from the actual circuit under test CUT. Hence, the tolerance information is contained in the public point. Secondly, due to the influence of tolerance, the slope feature of a potential fault component is not a sole value but a fan-shaped area. This fan-shaped area can be obtained by using either analytical method or simulated method. The proposed methods solve the tolerance influence of slope-based fault diagnosis methods.

Key words analog fault diagnosis; analog fault dictionary; fault model; tolerance

1 斜率故障模型简介

故障字典法是一种测前仿真方法, 是最实用、成熟的故障诊断方法。传统的故障字典法一般只考虑电路中的单故障和硬故障。文献[1]针对线性无容差模拟电路, 提出了一种能够同时诊断电路软故障和硬故障的节点电压灵敏度序列故障字典法, 该方法定性地利用节点电压之间的大小关系诊断单故障。文献[2]构造了节点电压灵敏度权序列故障字典。文献[3]提出了线性容差模拟电路的节点电压灵敏度序列比值故障特征, 使之在理论上能处理受容差影响的模拟电路故障诊断, 但未构造故障字典。文献[4]进一步研究提出了斜率故障模型, 提取电路中元件的斜率故障特征构造软故障字典。而文献[5]分析了当某个或某一组元件参数发生变化时, 电路中若

干节点电压增量之间的关系方程是一个齐次线性方程, 将线性相关系数比作为故障特征, 能够同时诊断电路中的多故障和软故障, 其实为斜率故障模型的推广。在电路无容差时, 斜率故障模型较好地解决了模拟故障诊断的软故障诊断问题, 但是没有解决好容差问题。容差问题是普遍存在的, 尽管文献[4-5]运用最短距离法处理该问题, 但正如本文所证明的, 该方法实际应用效果较差, 在电路变复杂时甚至得到错误结果。斜率故障模型的详细推导过程和诊断方法可以参见文献[4,6], 电路的斜率故障特征可以用下面的公式进行计算^[4,6]:

$$k = (V_2 - V_{20}) / (V_1 - V_{10}) \quad (1)$$

式中, V_{10} 、 V_{20} 为电路无故障时选定测点(t_1 和 t_2)测点选择问题不在本文的讨论范围, 可以参考文献[7-12]上的电压值; V_1 、 V_2 为电路发生故障后测点

收稿日期: 2009-07-31; 修回日期: 2010-03-22

基金项目: 国家自然科学基金(60934002); 教育部博士点基金(20070614018)

作者简介: 杨成林(1978-), 男, 博士生, 主要从事模拟电路可测试性设计、测试与诊断方面的研究。

(t_1 和 t_2)上的电压值。

假定图1中4条曲线分别为某线性电路中4个元件 x_i 、 x_j 、 x_m 、 x_n 的斜率故障特征直线。可以看出, 每条直线由公共点(V_{10}, V_{20})和斜率 k 两个要素确定。

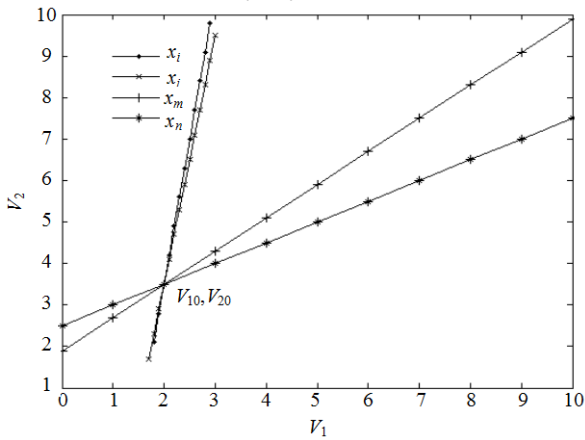


图1 斜率故障特征

本文从两方面解决容差问题: 给出具体电路 (V_{10}, V_{20}) 的确定方法及潜在故障元件斜率特征区域的解析方法和仿真方法。

2 公共点的确定方法

如图2所示, (V_{10}, V_{20}) 为电路无容差时的公共点位置, 经过该点的两条直线分别为 x_m 、 x_n 的理论斜率特征曲线。无容差情况下电路发生故障, (V_i, V_j) 为故障电压, 由于(V_i, V_j) 在 x_m 的特征曲线上, 很容易判断故障元件为 x_m 。电路存在容差时, 假如公共点(V_{10}, V_{20}) 上移至(V'_{10}, V'_{20}), 且此时测得故障电压仍为(V_i, V_j)。如图2所示, 同时经过(V'_{10}, V'_{20}) 和(V_i, V_j) 两点的直线为 x_n , 所以故障元件不是 x_m 而是 x_n 。如果采用式(1)的传统诊断方法, 将得到故障元件是 x_m 的错误结论。事实上, 当故障电路电压在(V_i, V_j) ~ (V'_{10}, V'_{20}) 之间变化时, 采用文献[4]中的最小直线距离法, 得到结果都是错误的。

两个电路结构和元件标称值完全相同的电路, 由于元件容差的存在, 其输出参数并不完全相同。在电路使用过程中, 这些模拟元件的参数值是无法精确得到的。但是当某一具体电路工作稳定后, 这些元件的参数在一定时间内又可以认为是固定的。基于此, 式(1)中的(V_{10}, V_{20}) 不再是无容差时的理想值, 而是在电路无故障且工作稳定时记录下来的实际值。值得指出的是, 具有相同电路结构和元件标称值的两个实际电路的(V_{10}, V_{20}) 点是不同的, 需要在电路运行过程中测定。由于测点是在电路设计阶段就设置好的, 所以在电路运行时监测测点上的电压

是可行的, 即用实测(V'_{10}, V'_{20}) 值替代理想(V_{10}, V_{20}) 值计算故障特征:

$$k = (V_2 - V'_{20}) / (V_1 - V'_{10}) \quad (2)$$

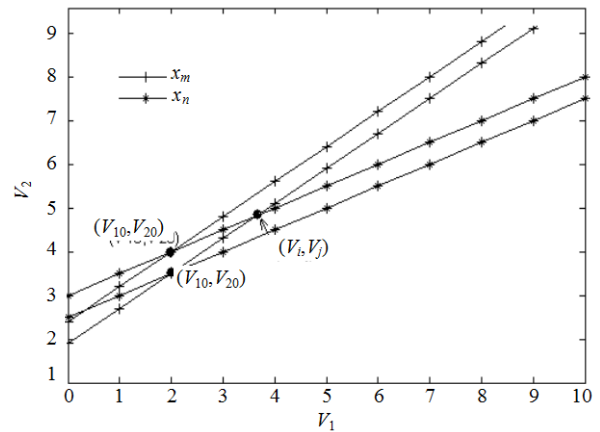


图2 容差对故障特征的影响(V_{10}, V_{20})

3 斜率特征区域的确定方法

根据式(2)无法确定一个元件的斜率特征在其他元件容差影响下的变化范围, 只有得到由其他元件参数表示的斜率表达式, 才可能获得故障元件的准确斜率特征范围。

3.1 解析方法

图3所示是一个简单分压电路, 但是 t_1 和 t_2 处的电压与输入电压的关系函数不易直接写出。可以利用现有的符号网络分析工具SNAP得到电路传输函数, 但是不能得到各个元件的斜率特征表达式。

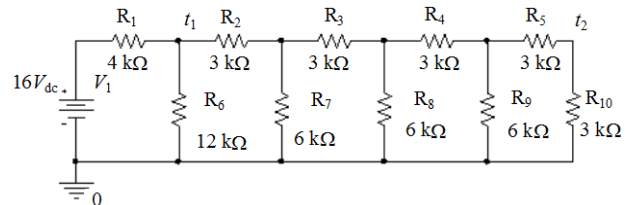


图3 分压电路

3.1.1 理论推导

为了得到斜率特征表达式, 进行如下推导。如图4a所示, 线性时不变电路N的激励为独立源 u_s , V_1 和 V_2 分别代表两个选定测点(t_1 和 t_2) 上的电位, 无源元件 x_j 上的压降为 u_j 。根据替代定理, 元件 x_j 可由一个独立电压源 u_j 代替, 如图4b所示。图4a中的 V_1 和 V_2 值分别与图4b中的 V_1 和 V_2 相等。图4c中, 电路由 u_s 单独供电, 则有:

$$\begin{cases} V'_1 = u_s a_{10} \\ V'_2 = u_s a_{20} \end{cases} \quad (3)$$

式中, a_{10} 是 V'_1 与 u_s 之间的比例系数; a_{20} 是 V'_2 与 u_s 之间的比例系数。

图4d中, 电路由 u_j 单独供电, 则有:

$$\begin{cases} V_1'' = u_j a_{1j} \\ V_2'' = u_j a_{2j} \end{cases} \quad (4)$$

式中, a_{1j} 是 V_1'' 与 u_j 之间的比例系数; a_{2j} 是 V_2'' 与 u_j 之间的比例系数。

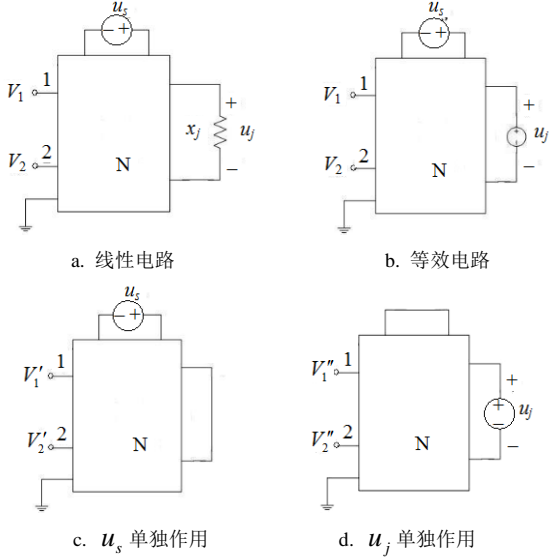


图4 线性网络

比例系数 a_{10} 、 a_{20} 、 a_{1j} 和 a_{2j} 独立于 x_j 的参数值, 它们由N的电路结构、N中的元件参数和 x_j 的位置唯一确定。根据叠加原理有:

$$\begin{cases} V_1 = V_1' + V_1'' = u_s a_{10} + u_j a_{1j} \\ V_2 = V_2' + V_2'' = u_s a_{20} + u_j a_{2j} \end{cases} \quad (5)$$

从式(5)不难得到:

$$u_j = (V_1 - u_s a_{10}) / a_{1j} \quad (6)$$

用式(6)替代式(5)中的 u_j 则有:

$$\begin{aligned} V_2 &= u_s a_{20} + \frac{V_1 - u_s a_{10}}{a_{1j}} a_{2j} \Leftrightarrow \\ V_1 \frac{a_{2j}}{a_{1j}} - V_2 - u_s \frac{a_{10}}{a_{1j}} a_{2j} + u_s a_{20} &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

重写式(7)有:

$$V_1 k_j - V_2 - u_{sj} = 0 \Leftrightarrow V_2 = V_1 k_j - u_{sj} \quad (8)$$

式中, $k_j = \frac{a_{2j}}{a_{1j}}$ 和 $u_{sj} = u_s \frac{a_{10}}{a_{1j}} a_{2j} + u_s a_{20}$ 都与 x_j 的参数大小无关, 由N的电路结构、元件参数和 x_j 的位置唯一确定。 $k_j = a_{2j} / a_{1j}$ 就是本文所需要的表达式。

3.1.2 运用SNAP获得斜率表达式的方法

如前所述, a_{1j} 是 V_1'' 与 u_j 之间的比例系数, 即 a_{1j} 是图4d所示电路中 t_1 点的电压放大倍数 K_v , 而

a_{2j} 是该图电路中 t_2 点的电压放大倍数。为了得到某被测电路中各个元件 x_j 的斜率特征, 可以先按照图4d作变换, 然后用SNAP的 K_v 功能选项得到 a_{1j} 和 a_{2j} 的表达式, 从而获得 x_j 的斜率故障表达式 k_j 。如为了得到图3所示电路中 R_1 的斜率特征, 在SNAP软件中按照图4d变换电路, 即 R_1 用一个等效独立电源“In”代替, 短路输入16 V直流电压源, 然后在 t_1 放置输出“Out”, 如图5所示。

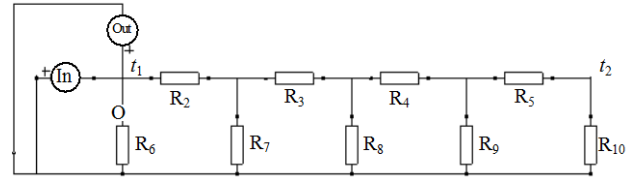


图5 变换电路

运行 K_v 功能得到 $a_{11} = -1$ 。同样, 当输出端“Out”放置于 t_2 时, 运行 K_v 得到 a_{21} 的表达式, 从而 R_1 的斜率特征 k_1 可由下式算出:

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{a_{21}}{a_{11}} = (R_7 R_8 R_9 R_{10}) / (R_7 R_8 R_9 R_{10} + R_5 R_7 R_8 R_9 + \\ &R_4 R_7 R_8 R_{10} + R_4 R_7 R_8 R_9 + R_4 R_5 R_7 R_8 + R_3 R_7 R_9 R_{10} + \\ &R_3 R_7 R_8 R_{10} + R_3 R_7 R_8 R_9 + R_3 R_5 R_7 R_9 + R_3 R_5 R_7 R_8 + \\ &R_3 R_4 R_7 R_{10} + R_3 R_4 R_7 R_9 + R_3 R_4 R_5 R_7 + R_2 R_8 R_9 R_{10} + \\ &R_2 R_7 R_9 R_{10} + R_2 R_7 R_8 R_{10} + R_2 R_7 R_8 R_9 + R_2 R_5 R_8 R_9 + \\ &R_2 R_5 R_7 R_9 + R_2 R_5 R_7 R_8 + R_2 R_4 R_8 R_{10} + R_2 R_4 R_8 R_9 + \\ &R_2 R_4 R_7 R_{10} + R_2 R_4 R_7 R_9 + R_2 R_4 R_5 R_8 + R_2 R_4 R_5 R_7 + \\ &R_2 R_3 R_9 R_{10} + R_2 R_3 R_8 R_{10} + R_2 R_3 R_8 R_9 + R_2 R_3 R_5 R_9 + \\ &R_2 R_3 R_5 R_8 + R_2 R_3 R_4 R_{10} + R_2 R_3 R_4 R_9 + R_2 R_3 R_4 R_5) \end{aligned} \quad (9)$$

用同样方法可以得到其他元件 $R_2 \sim R_{10}$ 的斜率特征表达式。

3.1.3 求解故障特征区域

由于 $R_2 \sim R_{10}$ 的参数值存在容差(假定容差 $\alpha = 10\%$), 所以 R_1 的斜率特征 k_1 会在一定范围($k_{1\min} \sim k_{1\max}$)变化。下面给出求 $k_{1\min}$ 和 $k_{1\max}$ 的方法。

当 $R_3 \sim R_{10}$ 不变, R_2 在容差范围内变化(用变量 x_2 表示)时, 则根据式(9)有:

$$k_1 = c / (a x_2 + b) \quad (10)$$

式中, $c = R_7 R_8 R_9 R_{10}$; a 和 b 分别为合并式(9)分母项后得到的常数。式(10)表明 k_1 为单减函数, 所以当 $R_2 = R_2(1 - \alpha)$ 时 k_1 取得最大值, $R_2 = R_2(1 + \alpha)$ 时 k_1 取得最小值。同样可以获得 $R_3 \sim R_{10}$ 参数变化对 k_1 的影响, 从而算出 $k_{1\min}$ 和 $k_{1\max}$ 。本例中, 代入图3中的参数值和容差 α , 得到 $k_{1\min} \approx 0.05$, $k_{1\max} \approx 0.08$ 。用同样方法可以得到所有元件的斜率特征区域, 结果如表1所示。表1显示, 除 R_1 和 R_6 外, 其他故障均具

有唯一特征区域, 能被区分。

表1 斜率特征故障字典

故障元件	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5
斜率特征	0.05~ 0.08	-0.18~ -0.08	-0.72~ -0.35	-2.89~ -1.39	-11.82~ -5.53
故障元件	R_6	R_7	R_8	R_9	R_{10}
斜率特征	0.05~ 0.08	0.18~ 0.35	0.70~ 1.42	2.85~ 5.67	11.86~ 22.14

3.1.4 实验验证

表2 含容差的元件参数

元件	$R_1/k\Omega$	$R_2/k\Omega$	$R_3/k\Omega$	$R_4/k\Omega$	$R_5/k\Omega$
参数	4.4	3.1	2.8	2.9	3.3
元件	$R_6/k\Omega$	$R_7/k\Omega$	$R_8/k\Omega$	$R_9/k\Omega$	$R_{10}/k\Omega$
参数	13.1	6.2	5.4	5.8	3.2

通过Pspice仿真, 得到元件无容差且电路无故障时 t_1 和 t_2 上的电压分别为 $(V_{10}, V_{20}) = (8 \text{ V}, 0.5 \text{ V})$ 。随机产生元件容差: 先由计算机产生10个 $-0.1 \sim 0.1$ 之间随机变化的实数, 分别用 $\alpha_1 \sim \alpha_{10}$ 表示, 则图3电路中各个电阻元件参数 R_i 变为 $R_i(1-\alpha)$, 得到元件参数如表2所示(元件参数保留小数点后一位)。按照表2修改电路元件参数, 得到含容差电路的公共点 $(V'_{10}, V'_{20}) = (7.756 \text{ V}, 481.4 \text{ mV})$ 。假定 R_4 发生参数漂移至 $R_4 = 2 \text{ k}\Omega$, 此时测点上电压分别为 $V_1 = 7.728 \text{ V}$, $V_2 = 536.3 \text{ mV}$ 。根据式(1), 用本文方法计算故障特征 $k = \frac{V_2 - V'_{20}}{V_1 - V'_{10}} = \frac{0.5363 - 0.4814}{7.728 - 7.756} \approx -1.96$ 。查表1, $k \approx -1.96$ 属于 R_4 的特征范围, 故障诊断正确。

3.2 仿真方法

当电路较复杂时, 列出式(9)较为困难, 而且SNAP也无法写出符号表达式, 需要用仿真方法计算故障特征。本文的仿真方法是基于理论推导的精确仿真法, 具体推导和实现方法如下。

3.2.1 理论推导

假定 x 为电路N中某一线性元件的参数值, 那么 a_{1j} 和 a_{2j} 满足如下双曲函数关系^[4]:

$$\begin{cases} a_{1j} = \frac{a_1 x + b_1}{x + d} \\ a_{2j} = \frac{a_2 x + b_2}{x + d} \end{cases} \quad (11)$$

则:

$$k_j = \frac{a_{2j}}{a_{1j}} = \frac{a_2 x + b_2}{a_1 x + b_1} \quad (12)$$

式中, a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 均为常数, 且 $x \geq 0$ 。 $a_2 = 0$, $a_1 < 0$ 或者 $a_2 > 0$, $a_1 = 0$ 时, k_j 单增; $a_2 = 0$, $a_1 > 0$ 或者 $a_2 < 0$, $a_1 = 0$ 时, k_j 单减。 $a_2 = 0$, $a_1 = 0$ 时, k_j 单调性与 x 无关; $a_2 \neq 0$, $a_1 \neq 0$ 时, $\frac{\partial k_j}{\partial x} = -\frac{b_2/a_1 - a_2 b_1/a_1 a_1}{(x + b_1/a_1)^2}$ 单增。即无论 a_1 、 a_2 如何取值, 元件 x_j 的斜率特征 k_j 均为N中元素的单调函数。另一方面, 如前所述, 即 a_{1j} 可由图4d所示原理图中 t_1 点的电压除以 u_j 获得, $a_{1j} = V_1''/u_j$, a_{2j} 可由 t_2 点的电压除以 u_j 获得, $a_{2j} = V_2''/u_j$ 。由于 $k_j = a_{2j}/a_{1j}$, 所以有:

$$k_j = V_2''/V_1'' \quad (13)$$

根据 k_j 的单调性和式(13)可以得到下面的算法。

3.2.2 仿真算法

设待求斜率特征元件总数为 C 。

1) 取消激励源(电流源短路, 电压源短路)。

2) 设置元件标号 $j=1$, 如果 $j > C$ 仿真结束, 否则执行如下循环: ① 在Pspice中, 如图4d写网表文件, 用等效源 u_j 代替 j 号元件(网络N中有 $C-1$ 个无源元件)。② 运行Pspice仿真, 得到测点电压值 V_1'' 和 V_2'' , 根据式(13)计算 k_j 值。③ 对于网络N, 设置 $i=1$, $\alpha_i=0.1$, 如果 $j > C-1$, 仿真结束, 否则执行下面循环, 令 $R_i = R_i(1+\alpha_i)$, 运行Pspice仿真, 根据结果和式(13)得到一个 k'_j 值。如果 $k'_j < k_j$, 则设置 $R_i = R_i \frac{1-\alpha_i}{1+\alpha_i}$, $\alpha_i = -\alpha_i$, 且重新运行仿真, 得到 k'_j 值, $k_j = k'_j$, $i = i+1$ 。④ $k_{j\max} = k_j$, 对所有N中的 $C-1$ 个元件设置参数 $R_i = R_i \frac{1-\alpha_i}{1+\alpha_i}$, 运行仿真, 根据仿真结果和式(13)得到的斜率特征即为 $k_{j\min}$ 。

⑤ 对所有N中的 $C-1$ 个元件恢复其标准参数为 $R_i = R_i \frac{1}{1-\alpha_i}$, $j = j+1$ 。

定理 1 仿真算法修改参数的复杂度为 $O(C^2)$ 。

证明 由于元件总数为 C , 所以为了得到 j 号元件的斜率特征 k_{\max} , 需要在步骤③至多修改 $2(C-1)$ 次元件参数; 为了得到 k_{\min} , 需要在步骤④修改 $C-1$ 次元件参数; 为了恢复元件标称值, 需要在步骤⑤中修改 $C-1$ 次元件参数。所以计算一个元件的斜率特征, 需要修改参数 $4(C-1)$ 次。总共有 C

个元件, 所以总的修改次数为 $4C(C-1)$, 即其复杂度为 $O(C^2)$ 。

定理 2 仿真算法仿真次数的复杂度为 $O(C^2)$ 。

证明 为了得到 j 号元件的斜率特征 k_{\max} , 需要在步骤③至多仿真 $2(C-1)$ 次; 为了得到 k_{\min} , 需要在步骤④仿真一次。总共有 C 个元件, 所以总的仿真次数为 $2C(C-1)$, 其复杂度为 $O(C^2)$ 。

由于计算斜率特征只需要仿真得到两个测点的电压值, 仿真时间较短(一般为毫秒级)。如一个含有 100 个元件的线性电路, 假如有 50 个潜在故障源, 那么其仿真次数为 $100 \times 50 = 5\,000$, 仿真时间不会超过 3 min。由于故障字典属于测前仿真方法, 没有实时性要求, 所以这一仿真时间是可以接受的。但如果每次仿真都需要人工参与修改参数、运行仿真和记录仿真结果, 那么该算法是不实用的。为此, 下面给出一种自动仿真方法。

3.2.3 自动化仿真方法

本文给出一种 Matlab 控制 Pspice 的自动仿真方法。3.2.2 部分的仿真算法中, 循环控制部分很容易由 Matlab 编写, 此外, 网表文件(.net)和仿真文件(.cir)都可以用 Matlab 中 fprintf 命令写入。然后, 调用 Pspice 可执行文件运行仿真, 其参数为仿真文件(.cir)。可以用 textread 或其他命令从仿真输出文件(.out)中读入仿真结果(测点电压)、计算斜率特征、根据结果修改参数、写入网表文件(.net)、再仿真。整个过程就是一个无需人工参与的自动化过程。需要指出的是, 建议安装 Orcad 10.0 以上版本, 因为该版本的可执行仿真文件调用起来比以前版本更为方便。

对图 3 所示电路进行自动化仿真, 得到的斜率特征故障字典与表 1 相同。

4 对比试验

采用图 3 所示电路, 参数如表 2 所示。用 $R_f = 5\text{ k}\Omega$ 作为故障电阻, 逐一替代 $R_2 \sim R_{10}$ (由于 R_1 和 R_6 不能区分, 这里对 R_1 暂不考虑)。每次替代后测出两个测点上的电压值, 然后分别用本文的方法和文献[4]中的最短距离法进行故障诊断, 表 3 列出了两种方法的诊断结果。以 R_2 为例, 当它发生参数故障, 且电阻变为 $5\text{ k}\Omega$ 时, 两个测点上电压分别为 $V_1 = 8.469\text{ V}$, $V_2 = 400.1\text{ mV}$ 。由于含容差时 $(V'_{10}, V'_{20}) = (7.756\text{ V}, 481.4\text{ mV})$, 所以根据式 (2), 有 $k = \frac{V_2 - V'_{20}}{V_1 - V'_{10}} =$

$$\frac{0.4001 - 0.4814}{8.469 - 7.756} \approx -0.114$$

。查表 1 得到 $k \approx -0.11$ 属于

R_2 的特征范围, 故障诊断正确。其他故障时, 计算方法相同, 不再赘述。从表 3 中可以看出本文提出的方法能诊断所有列出的故障。

表 3 实验结果对比

故障	测点电压		故障特征	诊断结果	
	t_1/V	t_2/mV		本文方法	文献[4]方法
$R_2=5\text{ k}\Omega$	8.469	400.1	-0.11	R_2 (正确)	R_2 (正确)
$R_3=5\text{ k}\Omega$	7.974	385.0	-0.44	R_3 (正确)	R_9 (错误)
$R_4=5\text{ k}\Omega$	7.803	388.6	-1.97	R_4 (正确)	R_7 (错误)
$R_5=5\text{ k}\Omega$	7.765	407.5	-8.21	R_5 (正确)	R_7 (错误)
$R_6=5\text{ k}\Omega$	6.137	380.9	0.06	R_6 (正确)	R_6 (正确)
$R_7=5\text{ k}\Omega$	7.615	446.5	0.25	R_7 (正确)	R_6 (错误)
$R_8=5\text{ k}\Omega$	7.742	468.1	0.95	R_8 (正确)	R_6 (错误)
$R_9=5\text{ k}\Omega$	7.749	456.3	3.59	R_9 (正确)	R_7 (错误)
$R_{10}=5\text{ k}\Omega$	7.765	631.1	16.63	R_{10} (正确)	R_3 (错误)

最短距离法中, R_2 对应的特征直线为 $V_2 - 0.5 = 1/8(V_1 - 8)$, 其他元件特征直线也可写出, 具体方法参见文献[4]。表 3 中 R_2 发生参数故障时, 点 (8.469, 0.400 1) 到此直线的距离为 0.041, 为到所有特征直线中最近的一条, 所以诊断为 R_2 , 诊断正确。但是除了 R_2 和 R_6 诊断正确外, 其他故障全部诊断错误。这种最短距离法是不实用的, 尤其当电路变得复杂, 容差会使它失去故障诊断能力。

除了仿真实验, 本文用实际电路进行验证, 电路如图 6 所示, 其原理图和元件标称参数与图 3 相同。由于元件存在容差, 每个元件的精确参数是未知的, 只知道它们在容差范围内。当电路工作稳定后, 测得两个测点上的电压分别为 (8.27 V, 517 mV)。

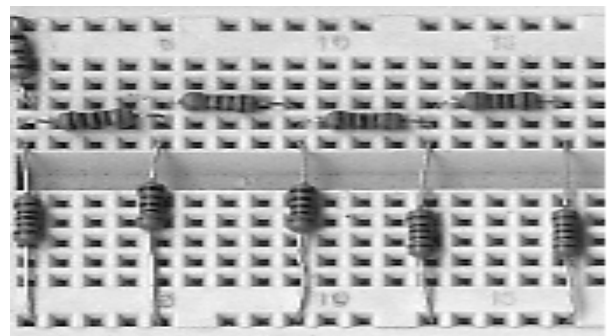


图 6 实际试验电路

用 $R_f = 2\text{ k}\Omega$ 作为故障电阻, 逐一替代 $R_2 \sim R_{10}$ 。每次替代后测出两个测点上的电压值, 然后分别用本文提出的方法和文献[4]中的最短距离法进行故障诊断。表 4 列出了两种方法的诊断结果, 从表不难看出, 本文方法能 100% 诊断故障, 而最短距离法准确性仅为 10% 左右。

表4 对比试验结果

故障	测点电压		故障特征	诊断结果	
	t_1/V	t_2/mV		本文方法	文献[4]方法
$R_2=2\text{ k}\Omega$	7.74	588	-0.13	R_2 (正确)	R_3 (错误)
$R_3=2\text{ k}\Omega$	8.16	574	-0.52	R_3 (正确)	R_7 (错误)
$R_4=2\text{ k}\Omega$	8.23	599	-2.05	R_4 (正确)	R_7 (错误)
$R_5=2\text{ k}\Omega$	8.26	588	-7.10	R_5 (正确)	R_7 (错误)
$R_6=2\text{ k}\Omega$	4.57	286	0.06	R_6 (正确)	R_6 (正确)
$R_7=2\text{ k}\Omega$	7.47	306	0.26	R_7 (正确)	R_7 (错误)
$R_8=2\text{ k}\Omega$	8.07	313	1.02	R_8 (正确)	R_4 (错误)
$R_9=2\text{ k}\Omega$	8.22	307	4.20	R_9 (正确)	R_3 (错误)
$R_{10}=2\text{ k}\Omega$	8.26	366	15.10	R_{10} (正确)	R_3 (错误)

5 结论

本文从两方面消除容差影响：一是公共点在实际电路运行中获得；二是考虑无故障元件含有容差，根据理论推导给出了两种确定斜率特征范围的方法(解析法和仿真法)。给出的容差处理方法使斜率故障模型得以应用于实际。同时为其他故障诊断方法提供了一种精确消除容差影响的思路。

理论上本文提出方法的精度为100%，影响精度的因素主要有：1) 斜率故障方法本身，如果有该方法不能诊断的故障，那无论如何处理容差，这些故障都不能被诊断；2) Pspice仿真精度，如果斜率特征范围是通过3.2部分提供的仿真得到的，那么其精度受Pspice影响；3) 实际诊断过程中的测量精度，当然这个影响因素是所有故障诊断方法都存在的。

另外，本文给出的Matlab控制Pspice运行方法不局限于本文的应用，它能应用于所有的故障字典方法，能实现构建故障字典的自动化。

参 考 文 献

[1] 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.
 [2] 张伟, 许爱强, 陈振林. 模拟电路节点电压灵敏度权序列故障字典法[J]. 电子测量与仪器学报, 2006, 20(4): 46-49.

ZHANG Wei, XU Ai-qiang, CHEN Zhen-lin. Fault dictionary method in analog circuits based on node voltage sensitivity weight sequence[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2006, 20(4): 46-49.

- [3] 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 on Circuits and Systems-I: Regular Papers, 2005, 52: 2118-2127.
 [4] WANG Peng, YANG Shi-yuan. A soft fault dictionary method for analog circuit diagnosis based on slope fault mode[J]. Control and Automation, 2006, 22(6): 1-23.
 [5] 汪鹏, 杨士元. 电压增量的线性相关性及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.
 WANG Peng, YANG Shi-yuan. Circuit tests based on the linear relationships between changes in node voltages[J]. Journal of Tsinghua University (Sci & Tech), 2007, 47(7): 1245-1248.
 [6] ZHOU Long-fu, SHI Yi-bin. A novel method of single fault diagnosis in linear resistive circuit based on slope[C]//ICCCAS. [S.l.]: IEEE, 2008: 1350-1353.
 [7] YANG Cheng-lin, TIAN Shu-lin, LONG Bing. Application of heuristic graph search to test points selection for analog fault dictionary techniques[J]. IEEE Trans Instrum Meas, 2009, 58(7): 2145-2158.
 [8] YANG Cheng-lin, TIAN Shu-lin, LONG Bing. Test points selection for analog fault dictionary techniques[J]. Journal of Electronic Testing: Theory and Application, 2009, 25(2): 157-168.
 [9] 杨成林, 田书林, 龙兵. 基于启发式图搜索的最小测点集优选新算法[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(12): 2497-2503.
 YANG Chenglin, TIAN Shu-lin, LONG Bing. New minimum test points set selection algorithm based on heuristic graph search[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(12): 2497-2503.
 [10] YANG Cheng-lin, TIAN Shu-lin, LONG Bing. Application of rollout strategy to test points selection for integer-coded fault wise table[C]//ICTD. [S.l.]: IEEE, 2009.
 [11] TIAN Shu-lin, YANG Cheng-lin, LONG Bing. Selection of global minimal test points set for integer-coded fault wise table[C]//ICTD. [S.l.]: IEEE, 2009.
 [12] STARZYK J A, LIU Dong, LIU Zhi-hong, et al. Entropy-based optimum test nodes selection for analog fault dictionary techniques[J]. IEEE Trans Instrum Meas, 2004, 53: 754-761.

编辑 漆蓉