

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.11.018

容差条件下的模拟电路多故障诊断*

董海迪¹ 马瑞萍² 王学进² 刘刚¹

(1. 火箭军工程大学空间工程系 西安 710025; 2. 海军装备研究院 北京 100161)

摘要:针对容差模拟电路多故障诊断问题,提出了包括故障状态检测、故障粗糙集生成和故障元件定位的分步诊断方法。将有限测点的故障状态检测转化为容差约束下的线性规划问题;推导得到故障特征等式并生成故障粗糙集,证明了在容差条件下的故障特征等式中可选用标称参数电路的节点电压;对故障粗糙集中元件参数的偏差限值进行修正,对修正后的电路进行状态检测,实现故障元件定位,并估算故障参数偏差。仿真实例表明,该方法具有较高的诊断准确度和参数辨识精度。

关键词:模拟电路;容差;多故障;线性规划

中图分类号: TN707 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

Multiple-fault diagnosis of analog circuit under tolerance

Dong Haidi¹ Ma Ruiping² Wang Xuejin² Liu Gang¹

(1. Department of Space Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;

2. Naval Academy of Armament, Beijing 100161, China)

Abstract: A novel method consisting of fault detection, rough set generation, element isolation and parameter estimation is presented for multiple-fault diagnosis on analog circuit under tolerance. Firstly, a linear-programming concept is developed to transform the fault detection of circuit with limited accessible terminals for measurement to check existence of a feasible solution under tolerance constraints. Secondly, the fault characteristic equation is deduced to generate a fault rough set. It is proved that the node voltage of nominal circuit can be used in fault characteristic equation under tolerance. Finally, fault detection of circuit with revised deviation restriction for suspected fault components is proceeded to locate faulty elements and estimate their parameters. The diagnosis accuracy and parameter identification precision of the method are verified by simulation results.

Keywords: analog circuit; tolerance; multiple-fault; linear programming

0 引 言

模拟电路故障诊断是电路设计和分析的重要问题^[1-2],主要包括故障状态检测、故障元件定位和故障参数辨识。过去几十年,针对不同类型的电路,开展了大量相关故障诊断方法研究^[3-7]。故障字典法是其中最具有代表性的方法,应用广泛且最具有实用价值^[8-10],但鲜有文献对软故障和容差电路给出系统而有效的处理方法,故其应用受到限制。测点有限条件下的容差电路故障检

测、定位和参数辨识仍然是亟待解决的问题^[11-12]。

文献[10]以节点电压增量比矢量为故障特征对故障元件进行定位,但需要对电路中所有节点进行测试;文献[13]采用线性规划思想对容差模拟电路进行故障诊断,采用穷举法对故障元件进行定位,计算量大且效率低;文献[14]采用微粒群优化方法对容差模拟电路单软故障进行诊断,受限于粒子群算法的全局寻优能力,仅适用于小规模电路。

针对上述问题,本文采用线性规划方法处理电路容差,利用故障字典法进行故障元件初选,最后通过故障验

收稿日期:2017-04 Received Date: 2017-04

* 基金项目:国家杰出青年基金(61025014)、国家自然科学基金(61403399)资助项目

证方法对故障元件进行定位,提出了故障状态检测、故障粗糙集生成和故障定位的分步诊断方法。

1 故障特征提取

考虑含 n 个电阻、电容和电感等元件的线性模拟电路 N , 给电路施加电流源激励 \mathbf{b} , 将各组件作为独立分支考虑, 采用节点方程描述该电路^[11], 得到:

$$\mathbf{Y}_n \mathbf{e} = \mathbf{b} \tag{1}$$

式中: $\mathbf{e} = [e_1 \cdots e_n]^T$, $e_j (j = 1, \dots, n)$ 表示节点与基准零点间的电压; \mathbf{b} 表示电流源激励向量; \mathbf{Y}_n 表示节点导纳矩阵。

假设模拟电路 N 中节点 $k_1 l_1, \dots, k_N l_N$ 间元件的导纳分别由 $Y_{k,l}$ 变为 $Y_{k,l} + \Delta Y_{k,l}$, \dots, Y_{k,l_s} 变为 $Y_{k,l_s} + \Delta Y_{k,l_s}$, 得到扰动电路 \tilde{N} 的导纳矩阵为 $\mathbf{Y}_n + \Delta \mathbf{Y}_n$, 其中:

$$\Delta \mathbf{Y}_n = \mathbf{PSP}^T$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} & k_1 & & l_1 & & & & k_N & & l_N \\ \dots & 1 & \dots & -1 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & & 1 & \dots & -1 & \dots \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{S} = \text{diag}(\Delta Y_{k,l_1}, \dots, \Delta Y_{k,l_s}, \dots)$$

扰动电路 \tilde{N} 的节点电压为:

$$\tilde{\mathbf{e}} = \mathbf{e} + \Delta \mathbf{e} = (\mathbf{Y}_n + \Delta \mathbf{Y}_n)^{-1} \mathbf{b} \tag{2}$$

采用 Woodbury 公式^[15] 计算 $(\mathbf{Y}_n + \Delta \mathbf{Y}_n)^{-1}$, 具体公式如下:

$$(\mathbf{A} + \mathbf{PS}^{-1}\mathbf{V})^{-1} = \mathbf{A}^{-1} - \mathbf{A}^{-1}\mathbf{P}(\mathbf{S} + \mathbf{VA}^{-1}\mathbf{P})^{-1}\mathbf{VA}^{-1} \tag{3}$$

取 $\mathbf{A} = \mathbf{Y}_n, \mathbf{P} = \mathbf{P}, \mathbf{S}^{-1} = \text{diag}(\Delta Y_{k,l_1}, \dots, \Delta Y_{k,l_s}), \mathbf{V} = \mathbf{P}^T$, 得到:

$$(\mathbf{Y}_n + \Delta \mathbf{Y}_n)^{-1} = \mathbf{Y}_n^{-1} - \mathbf{Y}_n^{-1}\mathbf{P}(\mathbf{S} + \mathbf{P}^T\mathbf{Y}_n^{-1}\mathbf{P})^{-1}\mathbf{P}^T\mathbf{Y}_n^{-1} \tag{4}$$

为表述方便, 用阻抗矩阵 \mathbf{Z}_n 代替 \mathbf{Y}_n^{-1} :

$$\mathbf{Y}_n^{-1} = \mathbf{Z}_n = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \dots & z_{nn} \end{bmatrix} \tag{5}$$

将式(1)、(4)和(5)代入式(2), 得到扰动电路节点电压增量:

$$\Delta \mathbf{e}_p = - [z_{pk_1} - z_{pl_1} \quad \dots \quad z_{pk_n} - z_{pl_n}] \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\Delta Y_{k,l_1}} + r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{N1} & r_{N2} & \dots & \frac{1}{\Delta Y_{k,l_n}} + r_{NN} \end{bmatrix}^{-1} \cdot [e_{k_1} - e_{l_1} \quad \dots \quad e_{k_n} - e_{l_n}]^T \tag{6}$$

式中: $r_{11}, r_{22}, \dots, r_{NN}$ 表示矩阵 $\mathbf{P}^T \mathbf{ZP}$ 中相应位置的元素。

对于电路双故障诊断, 给扰动电路 \tilde{N} 施加 3 个不同电流源激励 $\mathbf{b}, \mathbf{b}^{(1)}$ 和 $\mathbf{b}^{(2)}$, 由式(6)得到扰动电路节点电压增量方程:

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{e}_p = v_{kl}x + v_{rs}y \\ \Delta \mathbf{e}_p^{(1)} = v_{kl}^{(1)}x + v_{rs}^{(1)}y \\ \Delta \mathbf{e}_p^{(2)} = v_{kl}^{(2)}x + v_{rs}^{(2)}y \end{cases} \tag{7}$$

式中: x, y 表示式(6)中的公共部分。
解方程(7)得到双故障电路的故障特征等式:

$$\frac{v_{rs}^{(1)} - \alpha v_{rs}}{v_{rs}^{(2)} - \beta v_{rs}} = \frac{v_{kl}^{(1)} - \alpha v_{kl}}{v_{kl}^{(2)} - \beta v_{kl}} = \frac{v_{kl}v_{rs}^{(1)} - v_{rs}v_{kl}^{(1)}}{v_{kl}v_{rs}^{(2)} - v_{rs}v_{kl}^{(2)}} \tag{8}$$

式中: $\alpha = \Delta e(1) p / \Delta e_p, \beta = \Delta e(2) p / \Delta e_p$ 。由式(8)可知, 当节点 k/l 和 r/s 连接的元件发生故障时, 在电流源向量 $\mathbf{b}, \mathbf{b}^{(1)}$ 和 $\mathbf{b}^{(2)}$ 激励下, 测点处电压增量的比值与节点 k/l 和 r/s 对应元件的端电压满足式(8)。

2 故障诊断方法

2.1 故障状态检测

对电阻、电容和电感元件, 用参数 $X_{kl} (R_{kl}/C_{kl}/L_{kl})$ 和增量 $\Delta X_{kl} (\Delta R_{kl}/\Delta C_{kl}/\Delta L_{kl})$ 表征其导纳增量, 得到:

$$\begin{cases} \Delta Y_{kl} = \frac{1}{R_{kl} + \Delta R_{kl}} - \frac{1}{R_{kl}} = \frac{-\Delta R_{kl}}{(R_{kl} + \Delta R_{kl})R_{kl}} \\ \Delta Y_{kl} = j\omega \Delta C_{kl} \\ \Delta Y_{kl} = \frac{1}{j\omega(L_{kl} + \Delta L_{kl})} - \frac{1}{j\omega L_{kl}} = \frac{-\Delta L_{kl}}{j\omega(L_{kl} + \Delta L_{kl})L_{kl}} \end{cases} \tag{9}$$

仅考虑单个元件参数在容差范围内扰动, 由式(6)得到:

$$\Delta \mathbf{e}_p = - (z_{pk} - z_{pl}) \frac{\Delta Y_{kl}}{1 + \delta \Delta Y_{kl}} (e_k - e_l) \tag{10}$$

式中: $\delta = z_{kk} - z_{kl} - z_{lk} + z_{ll}$ 。
容差条件下 $\Delta X_{kl} \rightarrow 0$, 将式(9)代入式(10)得到:

$$\frac{\partial \mathbf{e}_p}{\partial X_{kl}} = - (z_{pk} - z_{pl}) v_{kl}, \Delta \mathbf{e}_p = \frac{\partial \mathbf{e}_p}{\partial X_{kl}} \Delta X_{kl} \tag{11}$$

考虑电路中所有元件参数在容差范围内扰动, 由式(11)得到:

$$y_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \quad i = 1, 2, \dots, m \tag{12}$$

式中: y_i 表示第 i 个测点处测量值与标称参数下测量值的偏差, x_j 表示第 j 个元件的参数偏差, a_{ij} 表示第 i 个测点处电压 e_i 对第 j 个元件参数的电压灵敏度, m 表示测点总数。

在交流电路中, 采用相量复数形式表征测点电压及其偏差, 式(12)修正为:

$$\begin{aligned}
 y_i &= \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \quad i = 1, 2, \dots, 2m \\
 y_1 &= \operatorname{Re}(\Delta e_1), y_2 = \operatorname{Im}(\Delta e_1), \dots \\
 a_{1j} &= \operatorname{Re}\left(\frac{de_1}{dX_j}\right), a_{2j} = \operatorname{Im}\left(\frac{de_1}{dX_j}\right), \dots
 \end{aligned} \tag{13}$$

其中, $\operatorname{Re}(\cdot)$ 表示取复数的实部; $\operatorname{Im}(\cdot)$ 表示取复数的虚部; de_i/dX_j 表示第 i 个测点处电压对第 j 个元件参数的灵敏度。

容差模拟电路正常状态下的元件参数偏差满足 $-\varepsilon_j^- \leq x_j \leq \varepsilon_j^+$ ($j = 1, \dots, n$), 其中 ε_j^+ 和 $-\varepsilon_j^-$ 分别表示参数容差的上下限值。判断方程(12)解中所有参数偏差是否在容差范围内即可定位到故障元件。在有限测点条件下 ($m < n$), 方程(12)存在多解, 无法准确诊断出故障。因此, 考虑将电路状态故障检测转化为容差约束下的线性规划问题求解。

引入变量 $\tilde{x} = x_j + \varepsilon_j^-$, 代入方程(12), 得到:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n a_{ij}\tilde{x}_j = y_i + \sum_{j=1}^n a_{ij}\varepsilon_j^- & (i = 1, \dots, m) \\ 0 \leq \tilde{x}_j \leq \varepsilon_j^+ + \varepsilon_j^- \end{cases} \tag{14}$$

方程(14)存在非负解表示电路测点处电压偏差能够仅由参数容差引起, 电路状态正常; 方程(14)无解则表示电路中存在故障元件。为判断方程(14)解的存在性, 采用单纯形法^[16]的第一阶段方法进行求解。引入人工变量 z_i , 得到辅助线性规划方程:

$$\begin{aligned}
 \min Z &= \sum_{i=1}^m z_i \\
 \text{s. t. } &\sum_{j=1}^n a_{ij}\tilde{x}_j + z_i = y_i + \sum_{j=1}^n a_{ij}\varepsilon_j^- \\
 0 &\leq \tilde{x}_j \leq \varepsilon_j^+ + \varepsilon_j^-
 \end{aligned}$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\Delta v_{kl}^{(1)} - \alpha \Delta v_{kl}}{\Delta v_{kl}^{(2)} - \beta \Delta v_{kl}} &= \frac{\Delta v_{kl} \frac{v_{kl}^{(1)}}{v_{kl}} - \alpha \Delta v_{kl}}{\Delta v_{kl} \frac{v_{kl}^{(2)}}{v_{kl}} - \beta \Delta v_{kl}} = \frac{v_{kl}^{(1)} - \alpha v_{kl}}{v_{kl}^{(2)} - \beta v_{kl}} \\ \frac{\Delta v_{rs}^{(1)} - \alpha \Delta v_{rs}}{\Delta v_{rs}^{(2)} - \beta \Delta v_{rs}} &= \frac{\Delta v_{rs} \frac{v_{rs}^{(1)}}{v_{rs}} - \alpha \Delta v_{rs}}{\Delta v_{rs} \frac{v_{rs}^{(2)}}{v_{rs}} - \beta \Delta v_{rs}} = \frac{v_{rs}^{(1)} - \alpha v_{rs}}{v_{rs}^{(2)} - \beta v_{rs}} \\ \frac{\Delta v_{kl} \Delta v_{rs}^{(1)} - \Delta v_{rs} \Delta v_{kl}^{(1)}}{\Delta v_{kl} \Delta v_{rs}^{(2)} - \Delta v_{rs} \Delta v_{kl}^{(2)}} &= \frac{\Delta v_{kl} \Delta v_{rs} \frac{v_{rs}^{(1)}}{v_{rs}} - \Delta v_{rs} \Delta v_{kl} \frac{v_{kl}^{(1)}}{v_{kl}}}{\Delta v_{kl} \Delta v_{rs} \frac{v_{rs}^{(2)}}{v_{rs}} - \Delta v_{rs} \Delta v_{kl} \frac{v_{kl}^{(2)}}{v_{kl}}} = \frac{v_{kl} v_{rs}^{(1)} - v_{rs} v_{kl}^{(1)}}{v_{kl} v_{rs}^{(2)} - v_{rs} v_{kl}^{(2)}} \end{aligned} \right. \tag{19}$$

由式(19)推导得到:

$$\frac{(v_{rs}^{(1)} + \Delta v_{rs}^{(1)}) - \alpha(v_{rs} + \Delta v_{rs})}{(v_{rs}^{(2)} + \Delta v_{rs}^{(2)}) - \beta(v_{rs} + \Delta v_{rs})} = \frac{(v_{kl}^{(1)} + \Delta v_{kl}^{(1)}) - \alpha(v_{kl} + \Delta v_{kl})}{(v_{kl}^{(2)} + \Delta v_{kl}^{(2)}) - \beta(v_{kl} + \Delta v_{kl})} = \frac{(v_{kl} + \Delta v_{kl})(v_{rs}^{(1)} + \Delta v_{rs}^{(1)}) - (v_{rs} + \Delta v_{rs})(v_{kl}^{(1)} + \Delta v_{kl}^{(1)})}{(v_{kl} + \Delta v_{kl})(v_{rs}^{(2)} + \Delta v_{rs}^{(2)}) - (v_{rs} + \Delta v_{rs})(v_{kl}^{(2)} + \Delta v_{kl}^{(2)})} \tag{20}$$

对比式(20)和(8), 得出结论: 容差条件下的故障特

$$\tilde{x}_j \geq 0, z_i \geq 0 \quad (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n) \tag{15}$$

当方程(15)存在最小目标值 $Z \approx 0$, 表示电路未发生故障, x_j 表示对应第 j 个元件的参数偏差; 当方程(15)无解或最小目标值 $Z > 0$, 表示电路元件发生了故障, 需进一步进行故障定位。

2.2 故障粗糙集生成

考虑实际电路中元件参数存在容差, 等式(8)不会严格成立。在有限测点条件下, 实际电路中所有元件的端电压也无法全部测量得到。

在式(10)中, 假设 ΔY_{kl} 表示元件导纳 Y_{kl} 的实际值与标称值间的偏差(在容差范围内), v_{kl} 和 $v(1)_{kl}$ 的增量分别为:

$$\begin{cases} \Delta v_{kl} = \Delta e_k - \Delta e_l = -\delta \frac{\Delta Y_{kl}}{1 + \delta \Delta Y_{kl}} v_{kl} \\ \Delta v_{kl}^{(1)} = \Delta e_k^{(1)} - \Delta e_l^{(1)} = -\delta \frac{\Delta Y_{kl}}{1 + \delta \Delta Y_{kl}} v_{kl}^{(1)} \end{cases} \tag{16}$$

由式(16)得到:

$$\frac{\Delta v_{kl}}{\Delta v_{kl}^{(1)}} = \frac{v_{kl}}{v_{kl}^{(1)}} = \frac{v_{kl} + \Delta v_{kl}}{v_{kl}^{(1)} + \Delta v_{kl}^{(1)}} \tag{17}$$

逐次考虑各个元件的参数存在容差, 等式(17)保持成立。电路双故障诊断中, 给电路 N 施加 3 个不同电流源激励 $\mathbf{b}, \mathbf{b}^{(1)}$ 和 $\mathbf{b}^{(2)}$, 由式(17)得到:

$$\begin{cases} \frac{\Delta v_{kl}}{\Delta v_{kl}^{(1)}} = \frac{v_{kl}}{v_{kl}^{(1)}}, \frac{\Delta v_{kl}}{\Delta v_{kl}^{(2)}} = \frac{v_{kl}}{v_{kl}^{(2)}} \\ \frac{\Delta v_{rs}}{\Delta v_{rs}^{(1)}} = \frac{v_{rs}}{v_{rs}^{(1)}}, \frac{\Delta v_{rs}}{\Delta v_{rs}^{(2)}} = \frac{v_{rs}}{v_{rs}^{(2)}} \end{cases} \tag{18}$$

将式(18)代入式(8), 得到:

征等式在选用标称参数下的节点电压时保持成立。

在式(8)中,取 $F = (v_{kl} v_{rs}^{(1)} - v_{rs} v_{kl}^{(1)}) / (v_{kl} v_{rs}^{(2)} - v_{rs} v_{kl}^{(2)})$ 表示特征值, $f_1(k) = (v_{rs}^{(1)} - \alpha v_{rs}) / (v_{rs}^{(2)} - \beta v_{rs})$, $f_2(k) = (v_{kl}^{(1)} - \alpha v_{kl}) / (v_{kl}^{(2)} - \beta v_{kl})$ 。对于电路 N ,在标称参数下施加3个不同电流源 $\mathbf{b}, \mathbf{b}^{(1)}$ 和 $\mathbf{b}^{(2)}$ 激励,测量得到 $(e_p, e_p^{(1)}, e_p^{(2)}, v_{rs}, v_{kl}, v_{rs}^{(1)}, v_{rs}^{(2)}, v_{kl}^{(1)}, v_{kl}^{(2)})$,计算特征值 F 。

给扰动电路 \tilde{N} 施加3个不同电流源激励 $\mathbf{b}, \mathbf{b}^{(1)}$ 和 $\mathbf{b}^{(2)}$,测量得到 $(\tilde{e}_p, \tilde{e}_p^{(1)}, \tilde{e}_p^{(2)})$ 。大规模电路中存在大量故障特征值,计算得到的 $f_1(k)$ 和 $f_2(k)$ 与故障特征值 F 越接近,则对应元件发生故障的可能性越大。采用式(21)计算 s_p 来衡量电路中元件组合发生故障的可能性, s_p 越小表示元件发生故障的可能性越大。按故障发生概率大小对所有的元件组合进行排序,得到故障粗糙集 d 。

$$s_p = |f_1(k)/F + F/f_1(k) - 2| + |f_2(k)/F + F/f_2(k) - 2| \quad (21)$$

2.3 故障隔离定位

当元件发生故障时,方程(15)无解或最小目标值 $Z > 0$,对疑似故障元件 k 和 l 的参数偏差限值 $(-\varepsilon_k^-, \varepsilon_k^+)$ 和 $(-\varepsilon_l^-, \varepsilon_l^+)$ 进行修正,考虑到方程(12)成立的条件是元件参数偏差变化较小,因此假定本文方法能诊断线性电路元件参数偏差在30%以内的软故障,得到修正后的偏差限值为 $(-\gamma_k^-, \gamma_k^+)$ 和 $(-\gamma_l^-, \gamma_l^+)$,代入方程(15)得到:

$$\begin{aligned} \min Z &= \sum_{i=1}^m z_i \\ \text{s. t. } &\sum_{j=1}^n a_{ij} \tilde{x}_j + \tilde{x}_k + \tilde{x}_l + z_i = y_i + \sum_{j=1}^n a_{ij} \varepsilon_j^- + \gamma_k^- \\ 0 &\leq \tilde{x}_j \leq \varepsilon_j^+ + \varepsilon_j^- \\ 0 &\leq \tilde{x}_k \leq \gamma_k^+ + \gamma_k^- \\ 0 &\leq \tilde{x}_l \leq \gamma_l^+ + \gamma_l^- \\ \tilde{x}_j &\geq 0, \tilde{x}_k \geq 0, \tilde{x}_l \geq 0, z_i \geq 0 \\ (i &= 1, \dots, m; j = 1, \dots, n, j \neq k, l) \end{aligned} \quad (22)$$

若修正后的方程(22)存在最小目标值 $Z \approx 0$,则表示元件 k 和 l 确实发生故障,方程解 $(-\varepsilon_k^-)$ 和 $(-\varepsilon_l^-)$ 表示故障元件 k 和 l 的参数偏差量。逐次选取故障粗糙集 d 中元素,直至找到满足方程(22)存在最小目标值 $Z \approx 0$ 的元件组合,并利用方程解计算参数偏差。电路中存在更多故障的诊断过程与此类似。

2.4 故障诊断算法

对测点有限条件下的容差模拟电路,采用故障状态检测、故障粗糙集生成和故障定位的分步法进行故障诊断,具体步骤如下。

1) 标准输出电压、参数灵敏度和节点电压获取。对拓扑结构和标称参数已知的模拟电路,在 PSPICE 中对标准参数电路 N 进行仿真试验。分别施加电流源 $\mathbf{b}, \mathbf{b}^{(1)}$ 和 $\mathbf{b}^{(2)}$ 激励,测量标准输出电压 $(e_p, e_p^{(1)}, e_p^{(2)})$,参数灵敏度

$(a_{ij}, a_{ij}^{(1)}, a_{ij}^{(2)})$ 和节点电压 $(v_{rs}, v_{kl}, v_{rs}^{(1)}, v_{rs}^{(2)}, v_{kl}^{(1)}, v_{kl}^{(2)})$ 。

2) 故障状态检测。对实际电路 \tilde{N} ,分别施加电流源 $\mathbf{b}, \mathbf{b}^{(1)}$ 和 $\mathbf{b}^{(2)}$ 激励,测量得到节点电压 $(\tilde{e}_p, \tilde{e}_p^{(1)}, \tilde{e}_p^{(2)})$ 。采用 LINDO 软件对方程(15)进行求解,若存在最小目标值 $Z \approx 0$,则得出电路元件无故障结论,更新 STEP1 中标准输出电压 $(e_p, e_p^{(1)}, e_p^{(2)})$,诊断过程结束;否则转步骤3)。

3) 故障粗糙集生成。选用 STEP1 中的标准输出电压 $(e_p, e_p^{(1)}, e_p^{(2)})$,采用式(18)计算所有元件组合发生故障概率并进行逆序排列,得到故障粗糙集 d 。

4) 故障定位。逐次选取集合 d 中元素,采用2.3节方法进行故障状态检测,直至找到故障元件,并对其参数偏差进行估算,诊断过程结束。

3 实例验证

3.1 直流电路故障诊断

采用文献[13]中的线性直流电路进行仿真验证,电路如图1所示。元件参数标称值如图中所示。假设所有元件的参数容差在其标称值5%以内,分别在1/2/3点施加幅值为1A的直流电流源激励,同时在1/2/3测点处进行电压测量。考虑以下几种状态。

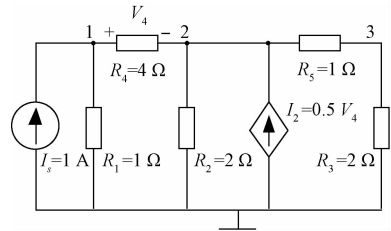


图1 直流电路
Fig.1 DC circuit

状态1(容差条件下无故障):电路中各元件参数取值为 $R_1 = 1.05 \Omega, R_2 = 1.96 \Omega, R_3 = 2.04 \Omega, R_4 = 4.08 \Omega, R_5 = 0.96 \Omega$ 。方程(15)存在最小目标值 $Z = 0.0001$,因此得出电路无故障结论,计算得到元件电阻值分别为 $R_1 = 1.05 \Omega, R_2 = 1.96 \Omega, R_3 = 2.04 \Omega, R_4 = 4.08 \Omega, R_5 = 0.96 \Omega$ 。

状态2(无容差条件下 $R_1 R_3$ 故障): $R_1 = 1.2 \Omega, R_3 = 1.65 \Omega$,其余参数取值为标称值。方程(15)无解,取 d 中前3项 ($d \leq 4.01$) 生成故障粗糙集 $(R_1 R_3, R_2 R_4, R_1 R_5)$,采用2.3节方法排除了 $R_2 R_4$ 和 $R_1 R_5$,诊断出 $R_1 R_3$ 发生故障,计算电阻值为 $R_1 = 1.19 \Omega, R_3 = 1.59 \Omega$ 。

状态3(容差条件下 $R_1 R_3$ 故障): $R_1 = 1.2 \Omega, R_3 = 1.65 \Omega$,其余参数取值与状态1中相同。方程(15)无解,取 d 中前3项 ($d \leq 4.04$) 生成故障粗糙集 $(R_1 R_3, R_2 R_4, R_1 R_5)$,采用2.3节方法排除了 $R_2 R_4$ 和 $R_1 R_5$,诊断

出 $R_1 R_3$ 发生故障, 计算电阻值为 $R_1 = 1.19 \Omega$, $R_3 = 1.60 \Omega$ 。

状态 4 (无容差条件下 $R_2 R_4$ 故障): $R_2 = 1.6 \Omega$, $R_4 = 4.8 \Omega$, 其余参数取值为标称值。方程 (15) 无解, 取 d 中前 3 项 ($d = 4.00$) 生成故障粗糙集 ($R_1 R_2, R_2 R_4, R_1 R_4$), 采用 2.3 节方法排除了 $R_1 R_2$ 和 $R_1 R_4$, 诊断出 $R_2 R_4$ 发生故障, 计算电阻值为 $R_2 = 1.52 \Omega$, $R_4 = 4.69 \Omega$ 。

状态 5 (容差条件下 $R_2 R_4$ 故障): $R_2 = 1.6 \Omega$, $R_4 = 4.8 \Omega$, 其余参数取值与状态 1 中相同。方程 (15) 无解, 取 d 中前 3 项 ($d = 4.00$) 生成故障粗糙集 ($R_1 R_2, R_2 R_4, R_1 R_4$), 采用 2.3 节方法排除了 $R_1 R_2$ 和 $R_1 R_4$, 诊断出 $R_2 R_4$ 发生故障, 计算电阻值为 $R_2 = 1.52 \Omega$, $R_4 = 4.73 \Omega$ 。

3.2 交流电路故障诊断

采用文献 [11] 中的线性交流电路进行仿真验证, 电路如图 2 所示。元件参数标称值如图中所示。假设所有元件的参数容差在其标称值 5% 以内, 分别在 1/4/8 点施加频率 10 kHz, 幅值为 5、0.5 和 0.5 mA 的交流电流源激励, 同时在 1/4/8 测点处进行电压测量。考虑以下几种状态。

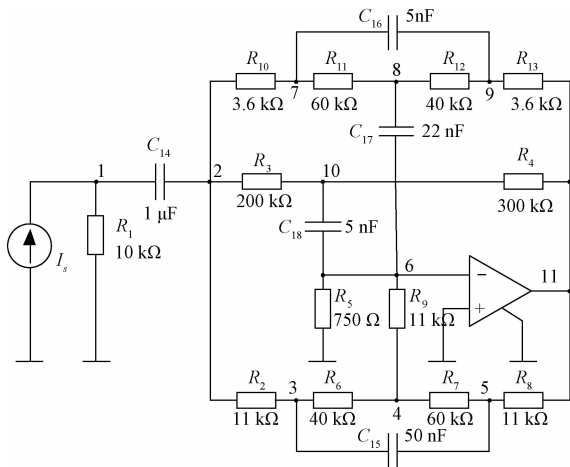


图 2 交流电路

Fig. 2 AC circuit

状态 1 (容差条件下无故障): 电路中各元件参数取值为 $R_1 = 9.9 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 10.5 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 195 \text{ k}\Omega$, $R_4 = 289 \text{ k}\Omega$, $R_5 = 726 \Omega$, $R_6 = 39 \text{ k}\Omega$, $R_7 = 59.5 \text{ k}\Omega$, $R_8 = 10.5 \text{ k}\Omega$, $R_9 = 11.4 \text{ k}\Omega$, $R_{10} = 3.76 \text{ k}\Omega$, $R_{11} = 59.9 \text{ k}\Omega$, $R_{12} = 40 \text{ k}\Omega$, $R_{13} = 3.54 \text{ k}\Omega$, $C_{14} = 1.04 \text{ nF}$, $C_{15} = 49 \text{ nF}$, $C_{16} = 4.8 \text{ nF}$, $C_{17} = 22.6 \text{ nF}$, $C_{18} = 4.9 \text{ nF}$ 。方程 (15) 存在最小目标值 $Z = 0.0004$, 因此得出电路无故障结论, 计算得到元件参数值分别为 $R_1 = 9.85 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 10.65 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 196.5 \text{ k}\Omega$, $R_4 = 285.8 \text{ k}\Omega$, $R_5 = 787.5 \Omega$, $R_6 = 39.97 \text{ k}\Omega$, $R_7 = 57.0 \text{ k}\Omega$, $R_8 = 10.45 \text{ k}\Omega$, $R_9 = 11.4 \text{ k}\Omega$, $R_{10} = 3.75 \text{ k}\Omega$, $R_{11} = 60.97 \text{ k}\Omega$, $R_{12} = 39.6 \text{ k}\Omega$, $R_{13} =$

$3.46 \text{ k}\Omega$, $C_{14} = 1.05 \text{ nF}$, $C_{15} = 52.5 \text{ nF}$, $C_{16} = 4.89 \text{ nF}$, $C_{17} = 22.6 \text{ nF}$, $C_{18} = 4.87 \text{ nF}$ 。

状态 2 (无容差条件下 $R_2 C_{16}$ 故障): $R_2 = 8.5 \text{ k}\Omega$, $C_{16} = 6 \text{ nF}$, 其余参数取值为标称值。方程 (15) 无解, 取 d 中前 30 项 ($d \leq 4.01$) 生成故障粗糙集 ($R_2 C_{16}$ 在第 2 位), 采用 2.3 节方法排除了其他元件组合, 诊断出 $R_2 C_{16}$ 发生故障, 计算参数值为 $R_2 = 8.84 \text{ k}\Omega$, $C_{16} = 6.02 \text{ nF}$ 。

状态 3 (容差条件下 $R_2 C_{16}$ 故障): $R_2 = 8.5 \text{ k}\Omega$, $C_{16} = 6 \text{ nF}$, 其余参数取值与状态 1 中相同。方程 (15) 无解, 取 d 中前 35 项 ($d \leq 4.01$) 生成故障粗糙集 ($R_2 C_{16}$ 在第 16 位), 采用 2.3 节方法排除了其他元件组合, 诊断出 $R_2 C_{16}$ 发生故障, 计算参数值为 $R_2 = 8.33 \text{ k}\Omega$, $C_{16} = 5.85 \text{ nF}$ 。

状态 4 (无容差条件下 $R_7 C_{18}$ 故障): $R_7 = 50 \text{ k}\Omega$, $C_{18} = 6.2 \text{ nF}$, 其余参数取值为标称值。方程 (15) 无解, 取 d 中前 30 项 ($d \leq 4.01$) 生成故障粗糙集 ($R_7 C_{18}$ 在第 21 位), 采用 2.3 节方法排除了其他元件组合, 诊断出 $R_7 C_{18}$ 发生故障, 计算参数值为 $R_7 = 48.18 \text{ k}\Omega$, $C_{18} = 6.04 \text{ nF}$ 。

状态 5 (容差条件下 $R_7 C_{18}$ 故障): $R_7 = 50 \text{ k}\Omega$, $C_{18} = 6.2 \text{ nF}$, 其余参数取值与状态 1 中相同。方程 (15) 无解, 取 d 中前 33 项 ($d \leq 4.01$) 生成故障粗糙集 ($R_7 C_{18}$ 在第 31 位), 采用 2.3 节方法排除了其他元件组合, 诊断出 $R_7 C_{18}$ 发生故障, 计算参数值为 $R_7 = 43.58 \text{ k}\Omega$, $C_{18} = 5.88 \text{ nF}$ 。

4 结论

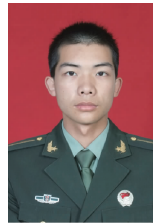
本文提出了一种有限测点条件下的线性模拟电路多故障诊断方法。首先对电路故障状态进行检测, 将测试节点处的输出电压增量与元件参数偏差间关系转化为容差约束下的线性规划问题, 从而将检测电路元件是否发生故障转化为判断线性规划问题是否存在最优解; 采用 Woodbury 公式推导得到故障特征等式, 并证明了容差条件下的故障特征等式在选用标称参数下的节点电压时保持成立, 解决了测点有限条件下节点电压不可测问题; 利用故障特征等式计算元件故障概率, 生成故障粗糙集; 对疑似故障的元件偏差限值修正后的电路进行状态检测, 实现故障的准确定位, 并估算故障参数偏差。直流和交流电路仿真实验验证了方法的有效性。该方法操作简单, 具有较高的诊断准确度和参数辨识精度, 能够很好地应用于有限测点和容差条件下的模拟电路多故障诊断。

参考文献

- [1] KABISATPATHY P, BARUA A, SINHA S. Fault Diagnosis of Analog Integrated Circuits [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2005.

- [2] GIZOPOULOS D. Advances in Electronic Testing: Challenges and Methodologies [M]. Amsterdam: Springer, 2006.
- [3] CUI Y, SHI J, WANG Z. Analog circuits fault diagnosis using multi-valued Fisher's fuzzy decision tree (MFFDT) [J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 2016, 44(1): 240-260.
- [4] 张松兰. 基于自适应粒子群的模拟电路故障诊断 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(6): 901-906.
ZHANG S L. Analog circuit fault diagnosis based on adaptive particle swarm optimization [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(6): 901-906.
- [5] TADEUSIEWICZ M, HAŁGAS S, KUCZYŃSKI A. New aspects of fault diagnosis of nonlinear analog circuits [J]. International Journal of Electronics and Telecommunications, 2015, 61(1): 83-93.
- [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] BHUNIA S, RAYCHOWDHURY A, ROY K. Defect oriented testing of analog circuits using wavelet analysis of dynamic supply current [J]. Journal of Electronic Testing, 2005, 21(2): 147-159.
- [8] 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 SH Y. Fault Diagnosis and Reliability Design of Analog System [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993.
- [9] 张朝龙, 何怡刚, 袁莉芬, 等. 基于核熵成分分析的模拟电路早期故障诊断方法 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(3): 675-684.
ZHANG CH L, HE Y G, YUAN L F, et al. Approach for analog circuit incipient fault diagnosis based on KECA [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(3): 675-684.
- [10] 李旻, 王彩利, 龙兵, 等. 多特征故障字典及其在模拟电路可测性分析中应用 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(3): 368-374.
- LI M, WANG C L, LONG B, et al. Multi-feature fault dictionary and its application in testability analysis for analog circuits [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(3): 368-374.
- [11] TADEUSIEWICZ M, KORZYBSKI M. A method for fault diagnosis in linear electronic circuits [J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 2000, 28(3): 245-262.
- [12] 敖永才, 师奕兵, 张伟, 等. 基于正态商分布的模拟故障容差处理新方法 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(3): 698-706.
AO Y C, SHI Y B, ZHANG W, et al. Research on tolerance processing method for analog circuit soft-fault [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(3): 698-706.
- [13] TADEUSIEWICZ M, HALGAS S, KORZYBSKI M. An algorithm for soft-fault diagnosis of linear and nonlinear circuits [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 2002, 49(11): 1648-1653.
- [14] 周龙甫, 师奕兵, 李焱骏. 容差条件下 PSO 算法诊断模拟电路单软故障方法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(9): 1270-1274.
ZHOU L F, SHI Y B, LI Y J. PSO Method for diagnosis of single soft fault in analog circuit with tolerance [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2009, 21(9): 1270-1274.
- [15] HOUSEHOLDER A S. The theory of matrices in numerical analysis [M]. Courier Corporation, 2013.
- [16] SIERKSMA G. Linear and integer programming: theory and practice [M]. Boca Raton: CRC Press, 2001.

作者简介



董海迪, 分别在 2011、2013 年于第二炮兵工程大学获得学士学位和硕士学位, 现为火箭军工程大学在读博士生, 主要研究方向为模拟电路故障诊断。

E-mail: donghaidi123@163.com

Dong Haidi received B. Sc. and M. Sc. from the Second Artillery Engineering University in 2011 and 2013, respectively. Now he is Ph. D. candidate in the Rocket Force University of Engineering. His main research interest includes analog circuit fault diagnosis.