

# 线性模拟电路软故障建模与诊断策略

高 昕, 王厚军, 刘 震

(电子科技大学自动化工程学院 成都 611731)

**【摘要】**针对线性模拟电路软故障诊断问题, 提出了一种新的基于解析模型的方法。该方法利用硬故障电压值, 构建电路的阻抗-电压方程, 以便计算线性模拟电路软故障时系统输出电压, 从而形成用于软故障诊断的故障特征向量。该文首先讨论了电路阻抗参数连续变化时, 单软故障建模和模拟电路可测性分析的基本结论; 其次以多故障中最常见的双故障为例, 亦给出了由阻抗-电压方程确立的软故障电压建模; 最后形成了相应的故障定位定值策略。在交流信号激励下的例子电路中进行建模与诊断分析, 结果表明, 提出的软故障建模与诊断策略运行有效, 结果准确。

**关键词** 模拟电路; 故障诊断; 故障特征; 软故障建模; 可测性分析

**中图分类号** TP206

**文献标志码** A

**doi:**10.3969/j.issn.1001-0548.2015.03.014

## A Novel Soft-Fault Modeling and Diagnosis Method in Linear Analog Circuit

GAO Xin, WANG Hou-jun, and LIU Zhen

(School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

**Abstract** In order to solve the problem of soft fault diagnosis in linear analog circuit, this paper proposes a new analytic model-based method. By using hard-fault voltage value, the impedance-voltage equation is constructed for calculating the circuit output voltage when soft-fault happens and therefore forming the fault characteristic vector for soft-fault diagnosis. The single-fault modeling and testability analysis of circuits are discussed in the condition that the impedance parameter is continuously changed. Taking the most common multiple soft fault-double faults as example, the soft-fault model derived from the impedance-voltage equation is presented. At last, a strategy to determine fault location and identify fault component values is formed. The soft-fault modeling and diagnosis are demonstrated through an example circuit which is driven by an alternating signal. The result shows that the proposed soft-fault modeling and diagnosis algorithm run effectively, and can obtain the accurate fault diagnosis results.

**Key words** analog circuits; fault diagnosis; fault signature; soft-fault modeling; testability analysis

模拟电路故障诊断一直是故障诊断领域的热点, 80%的故障发生在模拟电路<sup>[1]</sup>, 测试时间开销更高达总测试时间的80%<sup>[2]</sup>。

模拟电路的故障诊断充满难点: 1) 模拟元件参数连续变化, 连续故障特征建模非常困难; 2) 尽管目前有许多方法, 如基于时频分析、谐波分析的故障诊断、基于知识技术的故障诊断应用<sup>[3-9]</sup>, 但它们或涉及复杂的时频域计算, 或必须先进行特征遴选, 且还需寻优到合适的分类器参数。

事实上, 电压和电流就是最有效的故障特征量, 且电压测量更为简单。如文献<sup>[10]</sup>提出了一种利用电压偏差量构建统一故障特征, 进行诊断的策略。本文以阻抗参数为故障参数, 电压测值为故障特征,

讨论线性模拟电路的故障特征建模与软故障诊断。

## 1 电路故障特征

### 1.1 单故障特征方程

如图1所示, 线性电路网络的输入激励为独立电压源 $U_i$ ; 输出端口 $P_o$ 测得电压 $U_o$ 。故障元件 $X$ 支路电压为 $U_x$ 。依据叠加定理<sup>[1]</sup>, 有:

$$U_o = a_x U_x + a_i U_i = a_x U_x + U_o(x^0) \quad (1)$$

式中,  $a_i U_i$ 是元件 $X$ 短路时,  $U_i$ 激励下 $P_o$ 端口上的输出电压, 记为 $U_o(x^0)$ ;  $a_x U_x$ 是 $U_i$ 被短路, 等效端口激励源 $U_x$ 对 $P_o$ 端口电压的影响;  $a_i$ 与 $a_x$ 是传递系数(常数)。

根据戴维宁定理, 有:

收稿日期: 2014-05-05; 修回日期: 2014-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(61271035, 61201009)

作者简介: 高昕(1981-), 男, 博士生, 从事故障检测、诊断与可测性分析的研究。

$$U_x = U_{oc}^x \frac{Z_x}{Z_x + Z_o} \quad (2)$$

式中,  $U_{oc}^x$  是元件  $X$  支路开路电压;  $Z_x$  是  $X$  支路阻抗;  $Z_o$  是当  $X$  支路开路相应的端口阻抗。有:

$$U_o(x^\infty) = U_o(x^0) + \alpha_x U_{oc}^x \quad (3)$$

式中,  $U_o(x^\infty)$  是元件  $X$  开路,  $P_o$  上的输出电压值。

综合式(1)~式(3), 有:

$$Z_x = -Z_o \frac{U_o - U_o(x^0)}{U_o - U_o(x^\infty)} \quad (4)$$

设  $X$  支路阻抗标称值为  $Z_x^r$ , 故障阻抗值为  $Z_x^f$ , 对应电压输出为  $U_o(x^r)$ 、 $U_o(x^f)$ , 有定理 1。

**定理 1** 特征方程。源元件  $Z_x^r$  故障, 端口  $P_o$  的故障电压为:

$$U_o(x^f) = U_o(x^\infty) + \frac{U_o(x^\infty) - U_o(x^0)}{\alpha Z_x^f - 1} \quad (5)$$

发生软故障时, 会有  $0 < Z_x^f < \infty$ , 并有

$$\alpha = \frac{1}{Z_x^r} \frac{U_o(x^r) - U_o(x^0)}{U_o(x^r) - U_o(x^\infty)}$$

证明: 由式(4)可知:

$$\frac{Z_x^f}{Z_o} \Big/ \frac{Z_x^r}{Z_o} = \left[ \frac{U_o(x^f) - U_o(x^0)}{U_o(x^f) - U_o(x^\infty)} \right] \Big/ \left[ \frac{U_o(x^r) - U_o(x^0)}{U_o(x^r) - U_o(x^\infty)} \right] \quad (6)$$

式(6)整理, 得证定理 1。

定理 1 指出: 基于硬故障电压数值与标称参数下的电压输出, 可建立起单软故障的连续参数模型, 并有元件  $X$  故障定值方程为:

$$\frac{Z_x^f}{Z_x^r} = -\frac{U_o(x^f) - U_o(x^0)}{U_o(x^f) - U_o(x^\infty)} \times -\frac{U_o(x^r) - U_o(x^\infty)}{U_o(x^r) - U_o(x^0)}$$

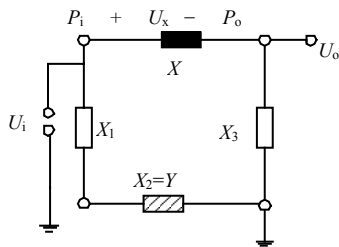


图1 单故障时的线性电路网络

## 1.2 双故障特征方程

双故障是最常见的多故障类型。设元件  $X$ 、 $Y$  故障, 式(4)变为式(7), 式(5)变为式(8):

$$\frac{Z_x^f}{Z_o(Z_y^f)} = \frac{U_o(x^f, y^f) - U_o(x^0, y^f)}{U_o(x^f, y^f) - U_o(x^\infty, y^f)} \quad (7)$$

$$U_o(x^f, y^f) = \frac{\alpha(Z_y^f) Z_x^f U_o(x^\infty, y^f) - U_o(x^0, y^f)}{\alpha(Z_y^f) Z_x^f - 1} \quad (8)$$

式中,  $U_o(x^\infty, y^f)$  与  $U_o(x^0, y^f)$  为  $X$  开路(或短路), 而元件  $Y$  有故障阻抗  $Z_y^f$  时, 端口  $P_o$  的输出电压;  $U_o(x^r, y^f)$  为元件  $Y$  有故障阻抗  $Z_y^f$ , 其他元件标称值时,  $P_o$  的输出电压;  $\alpha(Z_y^f)$  为:

$$\alpha(Z_y^f) = \frac{1}{Z_x^r} \frac{U_o(x^r, y^f) - U_o(x^0, y^f)}{U_o(x^r, y^f) - U_o(x^\infty, y^f)} \quad (9)$$

由式(7)~式(9), 可以得到:

$$U_o(x^f, y^f) = U_o(x^\infty, y^f) + \frac{U_o(x^\infty, y^f) - U_o(x^0, y^f)}{\frac{Z_x^f}{Z_x^r} \frac{U_o(x^r, y^f) - U_o(x^0, y^f)}{U_o(x^r, y^f) - U_o(x^\infty, y^f)} - 1} \quad (10)$$

式中,  $U_o(x^r, y^f)$ 、 $U_o(x^0, y^f)$ 、 $U_o(x^\infty, y^f)$  分别为:

1)  $U_o(x^r, y^f)$ 。

$$U_o(x^r, y^f) = \frac{\alpha_y Z_y^f U_o(x^r, y^\infty) - U_o(x^r, y^0)}{\alpha_y Z_y^f - 1} \quad (11)$$

式中,  $\alpha_y = \frac{1}{Z_x^r} \frac{U_o(x^r, y^r) - U_o(x^r, y^0)}{U_o(x^r, y^r) - U_o(x^r, y^\infty)}$ 。

2)  $U_o(x^0, y^f)$ 。元件  $X$  短路, 元件  $Y$  的标称阻抗  $Z_y^r$  和其他元件也取标称数值, 端口  $P_o$  电压数值为  $U_o(x^0, y^r)$ ; 保持元件  $X$  为短路状态, 短路元件  $Y$ , 端口  $P_o$  电压数值为  $U_o(x^0, y^0)$ ; 保持元件  $X$  为短路状态, 开路元件  $Y$ , 测得端口  $P_o$  电压数值为  $U_o(x^0, y^\infty)$ ; 代入式(12)、式(13)求取  $U_o(x^0, y^f)$ , 有:

$$\alpha_y' = \frac{1}{Z_y^r} \frac{U_o(x^0, y^r) - U_o^f(x^0, y^0)}{U_o(x^0, y^r) - U_o^f(x^0, y^\infty)} \quad (12)$$

$$U_o(x^0, y^f) = \frac{\alpha_y' Z_x^f U_o(x^0, y^\infty) - U_o(x^0, y^0)}{\alpha_y' Z_x^f - 1} \quad (13)$$

同理,  $U_o(x^\infty, y^f)$  为:

$$U_o(x^\infty, y^f) = \frac{\alpha_y'' Z_x^f U_o(x^\infty, y^\infty) - U_o(x^\infty, y^0)}{\alpha_y'' Z_x^f - 1} \quad (14)$$

式中,  $\alpha_y'' = \frac{1}{Z_y^r} \frac{U_o(x^\infty, y^r) - U_o^f(x^\infty, y^0)}{U_o(x^\infty, y^r) - U_o^f(x^\infty, y^\infty)}$ 。

元件  $X$  的故障定值方程为:

$$\frac{Z_x^f}{Z_x^r} = \frac{(U_o(x^f, y^f) - U_o(x^0, y^f))(U_o(x^r, y^f) - U_o(x^\infty, y^f))}{(U_o(x^f, y^f) - U_o(x^\infty, y^f))(U_o(x^r, y^f) - U_o(x^0, y^f))} \quad (15)$$

同理可得到元件  $Y$  的定值方程。它们被总结到

定理 4 中。

以上推导表明, 已知标称值时的电压与元件硬故障组合引起的电压, 即可进行双软故障特征建模。

## 2 线性模拟电路故障诊断

利用已建立起的单(双)故障电压特征方程, 讨论两方面的内容: 1) 模糊组的划分; 2) 综合模糊故障元件组的结果进行单(双)软故障诊断。

### 2.1 模糊组的划分

根据文献[12], 得到模糊组定义 1。

**定义 1** 模拟电路  $D$  阶模糊组定义。对于一组元件集合  $X_1, X_2, \dots, X_D$ , 参数值为  $x_1, x_2, \dots, x_D$ 。它们构成  $D$  阶模糊组的充分必要条件是: 对于任意  $d < D$  个元件的任一故障阻抗参数组合  $x_1^f, x_2^f, \dots, x_d^f$ , 端口  $P_0$  的电压测量值为  $U_0^F$ 。必存在着由剩下的  $D-d$  个元件组成的至少一组参数组合  $x_{D_1}^f, x_{D_2}^f, \dots, x_{D-d}^f$ , 所引起的端口  $P_0$  的电压值  $U_0^F = U_0^F$ , 有:

$$U_0^F(x_1^f, \dots, x_d^f, x_{D_1}, \dots, x_{D-d}) = U_0^F(x_1, \dots, x_d, x_{D_1}^f, \dots, x_{D-d}^f) \quad (16)$$

式中, 参数值  $x_1, x_2, \dots, x_d, x_{D_1}, x_{D_2}, \dots, x_{D-d}$  为分别不等于  $x_1^f, x_2^f, \dots, x_d^f, x_{D_1}^f, x_{D_2}^f, \dots, x_{D-d}^f$  的常数。

所以若元件  $X_1$  与  $X_2$  分别单故障时, 对应的故障电压特征曲线重合, 则它们必属同一故障模糊元件组。定理 2 给出故障曲线重合的判别方法。

**定理 2** 单故障曲线重合的判定方法。一对元件  $X_1$  与  $X_2$ , 其单故障曲线重合的充分必要条件是故障曲线有 3 个共同交点或总存在一对故障元件阻抗值  $Z_{x_1}^F$ , 满足:

$$Z_{x_1}^F = \frac{U(x_2^0) - U(x_1^0)}{\alpha_{x_1}(U(x_2^0) - U(x_1^0))}, Z_{x_2}^F = \frac{U(x_1^0) - U(x_2^0)}{\alpha_{x_2}(U(x_1^0) - U(x_2^0))} \quad (17)$$

证明: 由定理 1, 元件  $X$  的故障特征方程由任意 3 个已知的阻抗与由此引起的电压唯一决定。所以, 若两条故障电压曲线有 3 个交点则必会重合,  $X_1$  与  $X_2$  属于同一故障模糊组。

令元件  $X_1$ 、 $X_2$  阻抗值分别为  $Z_{x_1}$  和  $Z_{x_2}$ , 当故障曲线重合时, 由式(5), 有:

$$U_0 = \frac{\alpha_{x_1} Z_{x_1} U_0(x_1^\infty) - U_0(x_1^0)}{\alpha_{x_1} Z_{x_1} - 1} = \frac{\alpha_{x_2} Z_{x_2} U_0(x_2^\infty) - U_0(x_2^0)}{\alpha_{x_2} Z_{x_2} - 1} \quad (18)$$

令  $Z_{x_1} = 0$ , 带入式(18)有  $Z_{x_2} = Z_{x_2}^F$ , 反之亦然。

**推论 1** 阻容元件单故障曲线重合的解析判

定。不失一般性, 令元件  $X_1$  与  $X_2$  分别为电阻和电容, 式(17)的条件转化为:

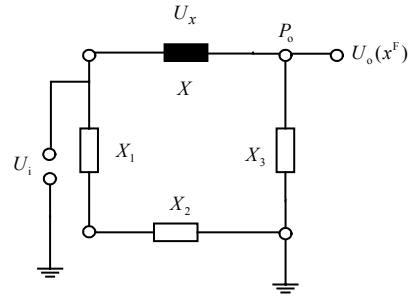
$$\text{Im}\{Z_{x_1}^F\}, \text{Re}\{Z_{x_2}^F\} = 0, \text{Re}\{Z_{x_1}^F\} \geq 0, \text{Im}\{Z_{x_2}^F\} \leq 0 \quad (19)$$

### 2.2 模拟电路软故障诊断

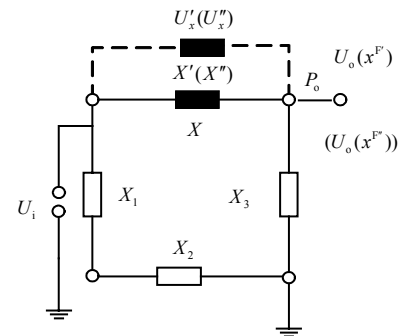
单故障与双故障诊断的流程分为两步: 先确定可疑的故障源范围, 然后再故障定位定值。

#### 2.2.1 模拟电路单软故障诊断

通过测量端口  $P_0$  电压, 执行算法 1 则可得到单故障源。软故障诊断时的线性电路网络如图 2 所示。



a. 单激励下的电路响应



b. 添加辅助支路后的电路网络

图2 软故障诊断时的线性电路网络

算法 1 单软故障时的电路故障诊断过程。

1) 根据模糊故障元件组的划分, 在每个模糊故障元件组中选取一个代表潜在故障源。若同一模糊组中存在一个电阻(电容)元件, 各选一个代表元件。

2) 依次代入这些代表潜在故障源的硬故障  $P_0$  端口电压, 与测得的端口  $P_0$  输出到式(6)中, 求解对应阻抗值, 软故障值存在并合理, 则对应元件作为可疑故障元件。位于同一模糊故障元件组中的元件构成一个可疑单故障源组  $X_1, X_2, \dots, X_\lambda$ , 其可能的元件故障值为  $Z_{x_1}^F, Z_{x_2}^F, \dots, Z_{x_\lambda}^F$ 。

3) 给定一可疑故障元件  $X = X_1$ , 式(6)已求得其故障阻抗为  $Z_{x_1}^F$ 。如图 2b 所示分别添加辅助支路阻抗  $X'$  或  $X''$  ( $Z_{x'} \neq Z_{x''}$ ), 在对应  $X$  元件支路端口上实现阻抗变换: 有等效的并联阻抗值  $Z_{//}^F = Z_{x'} // Z_{x_1}^F$ ,  $Z_{//}^F = Z_{x''} // Z_{x_1}^F$ 。此时重测  $P_0$  端口电压为  $U_0(x^F)$  和

$(U_o(x^{F^r}))$ , 有:

$$U_o(x^{F^i}) = U_o(x^\infty) + [U_o(x^\infty) - U_o(x^0)] / (\alpha Z_{//}^i - 1) \quad (20)$$

$$U_o(x^{F^r}) = U_o(x^\infty) + [U_o(x^\infty) - U_o(x^0)] / (\alpha Z_{//}^r - 1) \quad (21)$$

若满足式(20)和式(21), 则元件  $X$  定位为故障元件, 且参数已通过步骤 2) 得到。式(20)和式(21)的左边为图 2b 测试架构下的实测电压, 右边为图 2b 测试架构下输出电压的理论值, 两者相等则说明故障元件  $X = X_1$ 。

4) 可疑故障源不为实际故障, 回到步骤 3), 否则结束。

$$\begin{bmatrix} \frac{Z_{x_1}^F}{Z_{x_1}^r} \\ \frac{Z_{x_2}^F}{Z_{x_2}^r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(U_o(x_1^F, x_2^F) - U_o(x_1^0, x_2^F))(U_o(x_1^r, x_2^F) - U_o(x_1^\infty, x_2^F))}{(U_o(x_1^F, x_2^F) - U_o(x_1^\infty, x_2^F))(U_o(x_1^r, x_2^F) - U_o(x_1^0, x_2^F))} \\ \frac{(U_o(x_1^F, x_2^F) - U_o(x_2^0, x_1^F))(U_o(x_2^r, x_1^F) - U_o(x_2^\infty, x_1^F))}{(U_o(x_1^F, x_2^F) - U_o(x_2^\infty, x_1^F))(U_o(x_2^r, x_1^F) - U_o(x_2^0, x_1^F))} \end{bmatrix} \quad (22)$$

式中,  $U_o(x_1^r, x_2^F)$ 、 $U_o(x_2^r, x_1^F)$  由式(11)决定, 其中的未知数为  $Z_{x_1}^F$ 、 $Z_{x_2}^F$ ;  $U_o(x_1^F, x_2^F)$  为端口  $P_0$  当前测得电压数值;  $U_o(x_1^0, x_2^F)$ 、 $U_o(x_2^0, x_1^F)$  通过在保证元件  $X_1$ 、 $X_2$  所在支路端口等势(端口电压降为0)的情况下, 测量  $P_0$  输出电压得到;  $U_o(x_1^\infty, x_2^F)$ 、 $U_o(x_2^\infty, x_1^F)$  的测估由定理6决定。

**定理 5** 测估  $U_o(x_1^0, x_2^F)$ 。(辅助激励法) 设输入  $U_i$  激励下, 元件  $X_1$  与  $X_2$  (支路) 故障值分别为  $Z_{x_1}^F$ 、 $Z_{x_2}^F$ 。端口  $P_0$  的故障电压为  $U_o^F$ , 元件  $X_1$  支路电压为  $U_{x_1}$ 。在  $X_1$  支路并入辅助激励后,  $X_1$  支路上的电压降  $U'_{x_1} = 0 \neq U_{x_1}$  此时, 端口  $P_0$  的故障电压为  $U_o(x_1^0, x_2^F)$ 。

证明: 由叠加定理, 且令  $U'_{x_1} = 0$  可得:

$$U_o(x_1^0, x_2^F) = U_o(x_1^\infty, x_2^F) + a_{x_1} U'_{x_1}, \text{ 得证。}$$

**定理 6** 测估  $U_o(x_1^\infty, x_2^F)$ 。(辅助支路法) 在输入激励  $U_i$  激励下, 元件  $X_1$  与  $X_2$  (支路) 故障值分别为  $Z_{x_1}^F$ 、 $Z_{x_2}^F$ 。端口  $P_0$  的故障电压为  $U_o^F$ ;  $X_1$  支路上加入类似于图 2b 的辅助支路(阻抗  $Z_{x_1}^a$ ),  $P_0$  电压  $U_o^F$ 。

$Z_{//} = Z_{x_1}^F // Z_{x_1}^a$ , 得到:

$$U_o(x_1^\infty, x_2^F) = \frac{U_o^F + (U_o^F - U_o^0)}{1 - \frac{Z_{//}^F}{Z_{x_1}^F} \left( \frac{U_o^F - U_o(x_1^0, x_2^F)}{U_o^F - U_o(x_1^\infty, x_2^F)} \right)} \quad (23)$$

证明: 由式(7), 有:

$$Z_{//} = -Z_o(Z_{x_2}^F) \frac{U_o^F - U_o(x_1^0, x_2^F)}{U_o^F - U_o(x_1^\infty, x_2^F)} \quad (24)$$

## 2.2.2 模拟电路双软故障诊断

双软故障的定位定值需要排除一些不可能的故障元件组合。定理 3 给出一种值得注意的典型情况。

**定理 3** 可疑双软故障元件定位。电路发生双软故障, 利用端口  $P_0$  电压  $U_o(x^F)$  和式(5), 求得所有可疑单故障源组。若存在至少一个阶数  $\rho \geq 2$  的可疑单故障源组, 则在相应可疑单故障源组中存在着  $C_\rho^2$  个双软故障元件组合属于可疑双软故障元件。

**定理 4** 电路双软故障元件定值方程。利用式(15), 且元件  $X_1$  与  $X_2$  是可疑双软故障元件, 其元件定值由式(22)决定:

$$Z_{x_1}^F = -Z_o(Z_{x_2}^F) \frac{U_o^F - U_o(x_1^0, x_2^F)}{U_o^F - U_o(x_1^\infty, x_2^F)} \quad (25)$$

式(24)和式(25)相除, 整理, 得证。

综上所述, 得到算法 2。

算法 2 双软故障时的电路故障诊断。

1) 根据定理 3, 由故障模糊组划分与双故障假设确定可疑故障元件。

2) 由定理 5 和定理 6 确定  $U_o(x_1^0, x_2^F)$ 、 $U_o(x_2^0, x_1^F)$ 、 $U_o(x_1^\infty, x_2^F)$ 、 $U_o(x_2^\infty, x_1^F)$ , 代入定理 4, 式(22)是关于  $Z_{x_1}^F$ 、 $Z_{x_2}^F$  的非线性方程组。

3) 用 MATLAB 求解非线性方程, 定值故障元件值  $Z_{x_1}^F$ 、 $Z_{x_2}^F$ 。若元件值满足  $Z_{x_1} = Z_{x_1}^F \neq Z_{x_1}^r$ ,  $Z_{x_2} = Z_{x_2}^F \neq Z_{x_2}^r$ , 找到故障元件, 算法结束。否则考查其他可疑双故障元件, 执行步骤 2) 和步骤 3)。

## 2.2.3 容差环境下的故障诊断

在容差环境下, 式(20)和式(21)的判别条件变为式(26)和式(27), 其中  $\varepsilon' > 0$ ,  $\varepsilon'' > 0$ 。公式左边差值越小, 元件  $X$  越有可能是故障元件。

$$\left\| U_o(x^{F^i}) - \left( U_o(x^\infty) + \frac{U_o(x^\infty) - U_o(x^0)}{\alpha Z_{//}^i - 1} \right) \right\| < \varepsilon' \quad (26)$$

$$\left\| U_o(x^{F^r}) - \left( U_o(x^\infty) + \frac{U_o(x^\infty) - U_o(x^0)}{\alpha Z_{//}^r - 1} \right) \right\| < \varepsilon'' \quad (27)$$

故障源  $X$  定位后, 分别添加辅助支路  $X'$ 、 $X''$ 、 $X'''$  ( $Z_{x'} \neq Z_{x''} \neq Z_{x'''}^*$ ), 在  $X$  元件支路端口上实现阻抗变换: 有等效并联阻抗值  $Z_{//}^i = Z_{x'} // Z_{x'}^F$ ,  $Z_{//}^r = Z_{x''} // Z_{x''}^F$ ,  $Z_{//}^* = Z_{x'''} // Z_{x'''}^F$ 。则有:

$$U_o^T(x^F) = U_o^T(x^\infty) + [U_o^T(x^\infty) - U_o^T(x^0)] / (\alpha^T Z_{II}' - 1) \quad (28)$$

$$U_o^T(x^{F'}) = U_o^T(x^\infty) + [U_o^T(x^\infty) - U_o^T(x^0)] / (\alpha^T Z_{II}'' - 1) \quad (29)$$

$$U_o^T(x^{F''}) = U_o^T(x^\infty) + [U_o^T(x^\infty) - U_o^T(x^0)] / (\alpha^T Z_{III}' - 1) \quad (30)$$

式中,  $U_o^T(x^F)$ 、 $U_o^T(x^{F'})$ 、 $U_o^T(x^{F''})$  为图 2b 的测试架构下, 受容差影响的电路中的实测电压值。据此求解得  $U_o^T(x^\infty)$ 、 $U_o^T(x^0)$ 。并由  $\alpha^T = \alpha^T(U_o^T(x^\infty), U_o^T(x^0), U_o^T(x^F))$  求得  $U_o^T(x^F)$  值 ( $\alpha^T$  意义与式(5)中的参数  $\alpha$  相同)。得到的数值替换式(6)相应部分值, 进行单故障诊断。考虑电路容差双故障诊断, 算法2结束条件变为:

$$Z_{x_1}^F \notin [Z_{x_1}^I(1-\delta), Z_{x_1}^I(1+\delta)]$$

$$Z_{x_2}^F \notin [Z_{x_2}^I(1-\delta), Z_{x_2}^I(1+\delta)]$$

式中,  $\delta$  为受容差影响而非故障原因产生的元件参数微小变化。

### 3 实例验证

图 3 所示的电路中有元件标称值:  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 3 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_4 = 4 \text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 5 \text{ nF}$ ,  $R_5 = 6 \text{ k}\Omega$ ,  $C_2 = 5 \text{ nF}$ 。测试激励  $U_i = \sqrt{2} \sin(2\pi \times 30 \times 10^3 t + 0)$ , 幅度为  $\sqrt{2} \text{ V}$ , 其相量  $U_i = 1.000 + i0.000 = 1.000e^{i0.000}$ 。若元件参数为标称值,  $P_o$  端口信号的相量  $U_o^I = 1.627 - i0.255$ 。

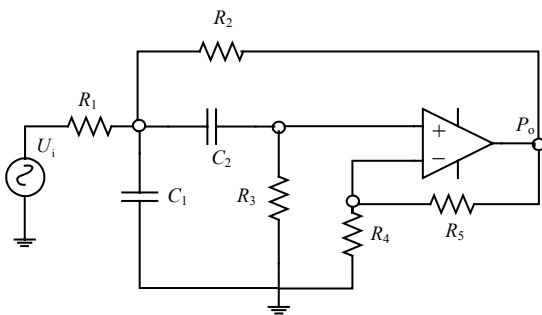


图3 滤波器电路交流测试

#### 3.1 模拟电路软故障建模验证

单故障或双故障时, 式(5)和式(10)为故障特征方程。代入元件故障值  $X = R_1 = 2 \text{ k}\Omega$ , 得到  $P_o$  端口电压输出值和特征建模的一个验证: 因为  $U_o(x^0) = 1.951 + i1.035$ ;  $U_o(x^\infty) = 0.000 + i0.000$ , 由式(5)得到  $U_o^F = 0.999 - i0.500$ , 与实际值吻合。双故障  $X_1 = C_1 = 10 \text{ nF}$ ,  $X_2 = R_3 = 4 \text{ k}\Omega$ , 根据信息:

$$U_o(x_1^I, x_2^0) = 0.000 + i0.000$$

$$U_o(x_2^I, x_1^0) = 0.000 + i0.000$$

$$U_o(x_1^I, x_2^\infty) = 1.098 - i2.070$$

$$U_o(x_2^I, x_1^\infty) = 1.666 + i1.179$$

$$U_o(x_1^0, x_2^0) = 0.000 + i0.000$$

$$U_o(x_1^\infty, x_1^0) = 0.000 + i0.000$$

$$U_o(x_1^\infty, x_2^\infty) = 6.000 \times 10^5 - i1.128$$

$$U_o(x_1^0, x_2^\infty) = 0.000 + i0.000$$

由式(10)~式(15), 解出端口  $P_o$  电压相量为  $0.799 - i0.980$ , 与实际值吻合。

用定理 2 及推论, 分析给定元件是否属于同一故障模糊组, 如判断  $R_4$ 、 $R_5$  同属于一故障模糊组: 由式(31)与推论 1,  $R_4$ 、 $R_5$  属于同一故障模糊组, 可用文献[13]的判断方法验证其准确性。

$$Z_{x_1}^F = Z_{R_4}^F = 0 \geq 0, \quad Z_{x_2}^F = 0 \geq 0 \quad (31)$$

#### 3.2 含容差时的模拟电路软故障诊断

不失一般性, 在元件容差  $\pm 1\%$  的电路中进行单(双)软故障诊断讨论。

单软故障时, 受容差影响的  $P_o$  端口电压为  $U_o^F = 3.793 - i0.913$ ,  $R_4$ 、 $R_5$  都可能为故障源。假设  $R_5$  ( $R_4$ ) 为故障源, 在其支路上并联  $R_o = 1 \text{ k}\Omega$  或  $R_o = 2 \text{ k}\Omega$ , 测得  $P_o$  端口电压为  $0.754 - i0.097$ ,  $0.979 - i0.134$  ( $-9.264 - i2.172$ ,  $-1.595 - i2.909$ )。

用式(26)和式(27)中的差值计算比较有:

$$\|(-9.264 - i2.172) - (-9.476 - i2.228)\| <$$

$$\|(-9.264 - i2.172) - (0.631 - i0.077)\|$$

$$\|(-1.595 - i2.909) - (0.002 - i2.977)\| <$$

$$\|(-1.595 - i2.909) - (0.757 - i0.096)\|$$

所以,  $X = R_4$  为故障源。再并入  $R_o = 5 \text{ k}\Omega$ , 测得

$U_o^{F''} = 7.536 - i3.050$ 。用式(28)~(30)计算  $U_o^T(x^\infty)$ 、 $U_o^T(x^0)$ 、 $U_o^T(x^F)$  的数值 ( $0.491 - i0.059$ ,  $-2.970 - i0.000$ ,  $1.623 - i0.259$ ), 替换式(6)相应部分, 求解出  $R_4 = 2.000 \text{ k}\Omega$ , 定值相对偏差定义: (估计故障值-实际故障值)/实际故障值的绝对值, 这里为  $0.0\%$ 。

双软故障时, 容差影响下的  $P_o$  电压相量输出  $U_o^T(x_1^F, x_2^F) = 1.634 - i1.326$ 。用定理 4~6 求得:

$$U_o^T(x_1^0, x_2^F) = 0.000 + i0.000$$

$$U_o^T(x_1^\infty, x_2^F) = 0.492 - i0.063$$

$$R_4 = 1.998 \text{ k}\Omega < 4 \text{ k}\Omega \times (1 - 1\%)$$

$$C_1 = 9.999 \text{ nF} > 5 \text{ nF} \times (1 + 1\%)$$

算法 2 结束。实际故障值  $R_4 = 2.000 \text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 10.000 \text{ nF}$ , 定值相对偏差为  $0.5\%$ 、 $0.01\%$  (最大定值相对偏差  $0.5\%$ )。

在表 1 的故障态中, 扫描元件故障值  $P$ ,  $P \in$

$[1.5P_n, 2.5P_n] \cup [0.25P_n, 0.5P_n]$ ,  $P_n$  为标称值。任取100个参数故障值, 各取其中100次蒙特卡洛仿真结果。统计表明: 软故障诊断运行有效, 定位准确, 定值相对偏差小于容差引起的元件参数变化1%。

表1 软故障诊断统计

故障元件	端口 $P_0$ 输出电压判断	
	定位准确率/%	最大定值偏差
$R_1$	100	0.0%<1%
$R_3$	100	0.0%<1%
$R_5$	100	0.0%<1%
$C_1$	100	0.0%<1%
$R_1, R_5$	100	0.6%<1%
$R_3, C_1$	100	0.3%<1%

## 4 结 论

本文中基于新提出的计算线性电路单(双)软故障时系统输出电压的方法, 揭示了阻抗参数变化与电路电压响应之间的解析关系, 完成线性模拟电路的软故障电压特征建模。具有如下优势: 1) 在应用中, 最简单的测量值就是故障电压值; 2) 故障电压的解析表达通过有限电压测估获取, 减少仿真次数。

实际的电路仿真表明, 结合特征建模提出的算法为诊断电路阻抗参数变化引起的故障提供了一种新的思路, 且故障定位准确, 定值误差小, 容差问题也能得到很好处理。此外, 本文的基本讨论思路, 可推广到用电流特征完成多阻抗参数故障建模与诊断中去, 这也是将来可供研究的内容。

## 参 考 文 献

- [1] LI Feng, WOO Peng-yung. Fault detection for linear analog IC the method of short-circuit admittance parameters[J]. IEEE Trans CAS I: Fundamental Theory and Applications, 2002, 49(1): 105-108.
- [2] 孙永奎. 基于支持向量机的模拟电路故障诊断方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [3] SUN Yong-kui. Study on fault diagnosis in analog circuit based on support vector machine[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.
- [4] TAN Yang-hong, HE Yi-gang. A novel method for fault diagnosis of analog circuits based on WP and GPNN[J]. International Journal of Electronics, 2008, 95(5): 431-439.
- [5] WANG Yan-bing, WANG Hong, MENG De-yong, et al. Oscillation-based diagnosis by using harmonics analysis on analog filters[C]//2014 International Symposium on VLSI Design, Automation and Test (VLSI-DAT). Hsinchu, Taiwan, China: [s.n.], 2014: 1-4.
- [6] HE Wu-ming, WANG Pei-liang. Analog circuit fault diagnosis based on RBF neural network optimized by PSO algorithm[C]//2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. Changsha: [s.n.], 2010: 628-631.
- [7] LONG Bing, TIAN Shu-lin, WANG Hou-Jun. Diagnostics of filtered analog circuits with tolerance based on LS-SVM using frequency features[J]. Journal of Electronic Testing: Theory and Application, 2012, 28(3): 291-300.
- [8] HAN Han, WANG Hou-jun. A new method for analog circuit fault diagnosis based on testability and chaos particle swarm optimization[J]. J of Convergence Information Technology, 2012, 7(14): 444-453.
- [9] LIU Xiao-qin, WANG Da-zhi. Wavelet neural networks based fault diagnosis of analog circuit[C]//2012 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Taiyuan: [s.n.], 2012: 2234-2239.
- [10] WU Li-feng, ZHENG Xue-yan, GUAN Yong, et al. A survey of fault diagnosis technology for electronic circuit based on knowledge technology[C]//2013 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Guiyang: [s.n.], 2013: 3555-3559.
- [11] TAN Yang-hong, HE Yi-gang, CUI Cun, et al. A novel method for analog fault diagnosis based on neural networks and genetic algorithms[J]. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(11): 2631-2639.
- [12] YANG Cheng-lin, TIAN Shu-lin, LONG Bing, et al. Methods of handling the tolerance and test-point selection problem for analog circuit fault diagnosis[J]. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(1): 176-185.
- [13] CANNAS B, FANNI A, MONTISCI A. Algebraic approach to ambiguity-group determination in nonlinear analog circuits[J]. IEEE Trans on Circuit and System, 2010, 57(2): 438-447.
- [14] 韩涵, 王厚军, 龙兵, 等. 基于改进马氏距离的模拟电路故障诊断方法[J]. 控制与决策[J]. 2013, 28(11): 1713-1717.
- [15] HAN Han, WANG Hou-jun, LONG Bing, et al. Method for analog circuit fault diagnosis based on improved Mahalanobis distance[J]. Control and Decision, 2013, 28(11): 1713-1717.

编辑 漆 蓉