

文章编号: 1001-2486(2003)01-0088-03

## 模拟电路中非零交叉情况下故障最小范围的确定方法\*

李义府<sup>1</sup>, 谢宏<sup>2</sup>, 蔡自兴<sup>1</sup>, 李文华<sup>3</sup>(1. 中南大学信息科学与工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410082;  
3. 第一军医大学生物医学工程系, 广东广州 510515)

**摘要:** 为确定模拟电路非零交叉情况下故障元件存在范围, 提出了一种  $K$  故障下诊断的新方法。它是一种确定故障元件存在的最小范围的方法, 即在十分现实的  $K$  故障下, 确定能代表电路所有元件并给出在  $K$  故障假设下的最优可测试元件组, 使故障定位工作只局限于该组元件。通过可测试值计算和规范式不确定性组与最优可测试成分组的确定, 可以诊断故障元件的范围。

**关键词:** 可测试值; 不确定性组; 故障定位; 最优可测试成分

**中图分类号:** TM13 **文献标识码:** B

## Method for Determining the Minimum Existent Range of Fault Elements for Non-null Intersection in Analog Circuits

LI Yi-fu<sup>1</sup>, XIE Hong<sup>2</sup>, CAI Zi-xing<sup>1</sup>, LI Wen-hua<sup>3</sup>(1. College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;  
2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;  
3. Department of Biomedical Engineering, No. 1 Army Medical University, Guangzhou 510515, China)

**Abstract:** A method for determining the minimum existent range of fault elements for non-null intersection in analog circuit is presented. By assuming the quite realistic  $K$ -fault hypothesis, an optimum set of testable elements that represent all the circuit elements is determined. Therefore the work for the fault location can only operate in the elements of this group. So the method constitutes the first step in the development of whatever procedure for the fault location of analog linear circuits.

**Key words:** testability measure; ambiguity groups; fault location; optimum set of testable component

本文研究模拟线性电路中  $K$  故障假设下确定非零交叉情况故障元件最小范围的一种方法。  $K$  故障假设故障的数目  $K$  不大于可测试值  $T$ 。本方法所提出的步骤与故障定位无关, 具体步骤如下:

## 1 建立网络函数, 确定规范式不确定组

故障诊断方程是一种描述电路的网络函数, 可测试值  $T$  是与故障诊断方程相联系的雅可比矩阵的线性独立的最大列数。为了计算可测试值, 将频率值固定, 所得到的雅可比矩阵的秩对所有潜在故障参数值(除了那些为代数变化的参数值)均为常数。应用该法时虽然可测试值与成分值无关, 但处理起来非常困难, 为此引入网络函数  $h_l(p, s)$ 。

$$h_l(p, s) = \frac{N_l(p, s)}{D(p, s)} = \sum_{i=0}^{n_l} \frac{a_i^{(l)}(p)}{b_m(p)} \cdot s^i \left[ s_m + \sum_{j=0}^{m-1} \frac{b_j(p)}{b_m(p)} \cdot s^j \right], l = 1, \dots, Y \quad (1)$$

式中  $p = (p_1, p_2, \dots, p_R)^T$ , 为潜在故障参数矢量,  $Y$  为方程总数。由故障诊断方程的系数对潜在故障电路参数求导, 得到可测试矩阵  $B$ , 它不依赖复频率  $s$ , 可测试值  $T$  等于矩阵  $B$  的秩。

当可测试矩阵  $B$  确定后, 可测试值  $T$  的计算由矩阵  $B$  的三角化来完成。显然, 对于相应的模拟线性故障诊断方程, 由雅可比矩阵提供的全部信息可以从矩阵  $B$  中得到<sup>[1~5]</sup>。当可测试矩阵  $B$  中有  $j$  列

\* 收稿日期: 2002-09-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(69974043); 湖南省自然科学基金资助项目(98JJY20062)

作者简介: 李义府(1946—), 男, 教授。

线性相关,则与该 $j$ 列相应的 $j$ 个成分构成一个 $j$ 阶不确定性组。当电路中的一组测试点选定后,通过判断矩阵 $B$ 中线性相关的列,可以确定该电路的不确定性组数。当一个不确定性组不包含其他不确定性组数时,则被称为规范式不确定性组。当可测试矩阵 $B$ 中的 $K$ 列线性相关和该 $K$ 列中每一子集线性无关时,则与该 $K$ 列相应的 $K$ 个成分构成了一个规范式 $K$ 阶不确定性组。与上述相关的一个要点是:规范式不确定性组的阶 $\leq$ 可测试值 $+1$ 。联合那些至少具有一个公共元件的规范式不确定性组数,则得到由 $m$ 个元件构成的一个 $m$ 阶全局不确定性组。显然,对一个规范式不确定性组,当它与其他任何规范式不确定性组无公共成分时,可以认为它是一个全局的不确定性组。一组 $n$ 元件,当与其相应的可测试性矩阵 $B$ 的列数不属于任何不确定性组时,则构成了一组 $n$ 阶真实可测试元件组,显然,真实可测试成分的数目不能大于可测试值 $T$ 。

## 2 非零交叉情况下最优可测成分组的确定

当一组成分能代表所有电路成分,并给出 $K$ 故障假设下故障诊断的惟一解时,则该成分组称为最优可测试成分。当一个电路所有规范式不确定值存在公共元件时,称为非零交叉情况,否则为零交叉情况。

### 2.1 非零交叉情况下最优可测试成分组的确定

要确定最优可测试成分组,必须考虑全局不确定组。在这个过程中计算可测试值 $T$ 、确定所有规范式不确定性组及真实可测试值具有重要的意义。确定最优可测试成分组<sup>[3~7]</sup>的步骤如下:

- (1) 计算电路可测试值 $T$ ;
- (2) 确定所有规范式不确定性组;
- (3) 确定所有全局不确定性组;
- (4) 确定真实可测试组;
- (5) 作出具有 $K \leq K_a - 2$ 和最小规范式不确定性组的阶数为 $K_a$ 的 $K$ 故障假设;
- (6) 选择属于真实可测试组的成分;
- (7) 对每一全局不确定组,最多选择 $(K_i - 2)$ 个成分作为相应全局不确定性组的代表(其中 $K_i$ 为构成第 $i$ 个全局不确定组的规范式不确定性组中的最小阶数)。

当最小的规范式不确定性组的阶大于或等于 $(K + 2)$ 时,则存在一组最优可测试成分;若有一组为2阶的规范式不确定性组时,则不存在最优组。然而,当最优组存在时,它也不是惟一的;仅当可测试值 $T$ 为最大时,最优组才具有惟一解。按上述过程,属于真实可测试组的每一元件代表它自己本身,而每一规范式不确定性组所选择的元件代表相应的规范式不确定性组的所有元件。当故障数 $K$ 是事先选定和可测试成分最优组不存在(例如当出现二阶规范式不确定性组时,无论 $K$ 为何值,最优组不存在)时,对于阶数小于或等于 $(K + 1)$ 的规范式不确定性组,仅有一个元件必须选择,而对于真实可测试组和具有阶数大于或等于 $(K + 2)$ 的规范式不确定性组,必须应用步骤(6)及(7)。

### 2.2 应用实例

如图1所示的Tw $\theta$  Thomas滤波器。

在本电路中选择电压 $V_a$ 和 $V_b$ 作为测试点,通过模拟电路非零交叉情况最优可测试成分程序模块运行,计算结果如下:

可测试值 $T = 4$ ; 电路总元件数 $= 8$ ; 规范式不确定组数为7,这些规范式不确定组为:

$(G_2, G_3), (G_2, G_4), (G_2, C_2), (G_3, G_4), (G_3, C_2), (G_4, C_2), (G_1, G_5, G_6, C_1)$ 。

它属于非零交叉情况。在此情况下,全局不确定组数为2,它们是:(1) $G_2, G_3, G_4, G_2$ 及(2) $G_1, G_5, G_6, C_1$ 。

必须提出的是:第(2)组也是一个规范式不确定组。这里不存在真实可测试组,因为可测试值 $T = 4$ ,在 $K = 4$ 的故障假设条件下,可以得到一个解。但是,由于规范式不确定组的最小阶是2,而且这里

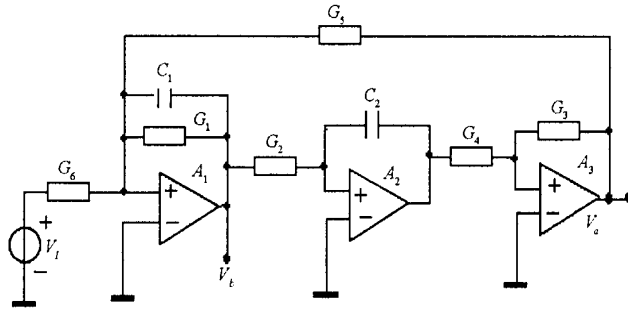


图1 Tw-Thomas 滤波器

Fig. 1 Tw-Thomas wave filtering circuit

不存在一组最优可测试成分, 所以它不是惟一解。按照前述非零交叉情况, 选择作为代表电路成分的元件, 仅能在第一个全局不确定组中选一个元件和在第二个全局不确定组中选两个元件。

如果设故障数  $K=2$ , 而且与定位方法无关, 若所得的解是属于第二个全局不确定组的两个成分, 则问题有惟一解, 而且能够确定故障位置。

### 3 结论

本方法通过计算电路可测试值  $T$ 、确定规范式不确定组 and 选择可测试成分等提出了确定非零交叉情况下一组最优可测成分的新方法。当一组最优成分不确定时, 所采用的方法允许选择所有电路成分的元件, 并且提出的选择过程故障定位阶段与所采用的方法无关。一旦选择代表所有电路成分的元件后, 研究故障成分就等同于选择故障定位方法。当确定最优可测试成分后, 便可确定故障元件的最小范围, 从而快速地找到模拟电路的故障范围, 恢复系统的工作。

### 参考文献:

- [1] Luchetta A, Mantti S, Picilli M C. A Windows Package for Symbolic and Numerical of Analog Circuit [J]. In Proc Electrosoft' 96 San Miniato, Italy, May 1996: 115- 123.
- [2] Liberatore A, Luchetta A, Mantti S, Picilli M C. A New Symbolic Program Package for the Interactive Design of Analog Circuits [J]. In IEEE Int, Symp, Circuit system, ISCAS' 95 Seattle, WA May 1995: 2209- 2212.
- [3] Stenbakken G N. Ambiguity Groups and Testability [J]. IEEE Trans. Instrum. Meas. 1989, IM- 38: 941- 947.
- [4] Camassi R. Analog Network Testability Measurement [J]. IEEE Trans. Instrum. Meas. 1991, I40: 930- 935.
- [5] Liberatore A. A New Efficient Method for Analog Circuit Testability Measurement [J]. In Proc. IEEE Instruments Measurement Technology Conf, IMTC' 94, Hamamatsu, Japan, May 1994: 193- 196.
- [6] 何怡刚, 罗先觉, 邱关源. 一种新的模拟电路故障诊断方法[J]. 微电子学报, 1996, 20(4): 230- 234.
- [7] 杨士元. 模拟系统的故障诊断与可靠性分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.