

基于符号方法的模拟电路可测度分析

郑致刚¹, 娄伟²

(1. 海军航空工程学院 控制工程系, 山东 烟台 264001; 2. 山东农业大学 机械与电子工程学院, 山东 泰安 271018)

摘要: 现有电路可测度符号分析方法在低可测度电路故障诊断中没有考虑元件故障模糊组的影响。可测度分析时需要计算所有元件参数组合的可测度, 但实质上其中部分参数组合的可测度是相同的, 不必重复计算。鉴于上述问题, 在可测度符号分析方法的基础上, 提出根据系数依赖矩阵划分元件故障模糊组, 将各个模糊组中的元件参数赋值后计算电路可测度。该方法减少了符号法可测度分析的计算量, 适用于模拟电路的自动测试与故障诊断。

关键词: 模拟电路; 可测度; 符号分析; 诊断方程; 系数依赖矩阵; 模糊组

中图分类号: TP301.6

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2011)06-0080-05

Analysis of Analog Circuit Testability Based on Symbolic Method

ZHENG Zhigang¹, LOU Wei²

(1. Department of Control Engineering, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai, Shandong 264001, China;

2. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Agriculture, Taian, Shandong 271018, China)

Abstract: The current symbolic testability analysis method doesn't consider the influence of ambiguous groups in the failure diagnostic of low testability circuit. The testability of all components parameters combinations is computed in the analysis of testability, but in fact the testability of some parameter combinations is equal and no need to compute repeatedly. For this reason, on the basis of symbolic method of testability a coefficient dependence matrix was proposed to divide fault ambiguous groups of components, and then, the testability was computed after assigning the components in every ambiguous group. The proposed method reduces testability computation load and is suited to test the analog circuit automatically and diagnose the faults.

Key words: analog circuit; testability; symbolic analysis; diagnostic equation; coefficient dependence matrix; ambiguous group

模拟电路测试中经常面临的一个问题,就是在被测电路中如何选择测试点才能最大限度辨识被测电路中所有元件的参数。可测度是描述被测电路元件参数可解程度的一个定量系数,可以作为选择测试节点的一种量化指标^[1]。

目前常用的电路可测度概念是由 Saeks 等^[2]提出的,他将电路的非线性故障诊断方程的可解性定义为电路可测度。可测度的计算最初使用数字计算方法^[3],但是这种方法在计算过程中会引入舍入误差,有时得到的结果并不准确。文献[4]中并没有直接进行数值计算,而是通过电路的非线性诊断方程得到参数符号形式的雅可比矩阵,由于可测度与元件参数值无关,所以将得到的雅可比矩阵中各参数符号赋以简单整数值后,即可通过计算矩阵的秩得到电路可测度,这种方法虽然计算简单,但并没有完全消除可能出现的计算误差。

本研究在已有的可测度符号分析方法^[5-7]基础上,针对低可测度电路故障诊断中元件参数的可解性问题,提出根据基本项系数依赖矩阵划分元件故障模糊组,然后,通过对故障模糊组元件参数赋值来计算电路

收稿日期: 2011-08-25

基金项目: 军队装备维修改革项目。

作者简介: 郑致刚(1974—),男,辽宁阜新人,工程师,博士研究生,主要从事装备智能故障诊断方面的研究。

E-mail: zzg1974@126.com.

的可测度。该方法既具有符号法计算简单、结果准确的特点,又降低了元件参数求解中可能出现的参数组合的数量,简化了电路的可测度计算,便于模拟电路的自动测试。

1 模拟电路可测度分析

1.1 可测度分析符号法的基本概念

一般情况下,线性时不变电路可以表示为关于复变量 s 的矩阵方程形式^[5]:

$$\mathbf{A}(\mathbf{p}, s) \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{y}(\mathbf{p}, s) \\ \mathbf{E}(\mathbf{p}, s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(s) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

其中: $\mathbf{p} = (p_1, p_2, \dots, p_q)^T$ 表示系统元件参数组成的向量; $\mathbf{y}(\mathbf{p}, s) = [y_1(\mathbf{p}, s), y_2(\mathbf{p}, s), \dots, y_{ny}(\mathbf{p}, s)]^T$ 表示输出测试节点的电压或电流组成的向量; $\mathbf{E}(\mathbf{p}, s) = [E_1(\mathbf{p}, s), E_2(\mathbf{p}, s), \dots, E_{nl}(\mathbf{p}, s)]^T$ 表示不可及测试节点的电压或电流; $\mathbf{A}(\mathbf{p}, s)$ 是电路的特征矩阵, $\mathbf{x}(\mathbf{p}, s) = [x_1(\mathbf{p}, s), x_2(\mathbf{p}, s), \dots, x_{nx}(\mathbf{p}, s)]^T$ 表示输入节点的电压或电流向量。假定电路中各元件参数取标称值,电路的故障诊断方程与每一个输出测试节点的电路传递函数可以表示为

$$h_i^{(j)}(\mathbf{p}, s) = \frac{y_i^{(j)}(\mathbf{p}, s)}{x_j(s)} = (-1)^{i+j} \cdot \frac{\det \mathbf{A}_{ij}(\mathbf{p}, s)}{\det \mathbf{A}(\mathbf{p}, s)}. \quad (2)$$

其中: $\mathbf{A}_{ij}(\mathbf{p}, s)$ 表示 $\mathbf{A}(\mathbf{p}, s)$ 关于第 i 行 j 列元素的余子式, $y_i^{(j)}$ 是与输入 $x_j(s)$ 对应的第 i 个输出,电路的故障诊断方程的数目等于输入节点数与输出节点数的乘积。电路的可测度 T 定义为故障诊断方程的雅可比矩阵 $\Phi(s)$ 中最大线性无关列的数目,即 $T = \text{rank } \Phi(s)$ 。雅可比矩阵 $\Phi(s)$ 的每一个元素都可以表示为复变量 s 的多项式形式,在向量 \mathbf{p} 的标称值 \mathbf{p}_0 附近展开的雅可比矩阵为

$$\Phi(s) = [\Phi_{rk}(s)] = \left[(-1)^{i+j} \frac{\partial}{\partial k} \left(\frac{\det \mathbf{A}_{ij}(\mathbf{p}, s)}{\det \mathbf{A}(\mathbf{p}, s)} \right) \right]_{\mathbf{p}=\mathbf{p}_0} = \frac{\mathbf{P}(s)}{(\det \mathbf{A}(\mathbf{p}_0, s))^2}. \quad (3)$$

其中:

$$\mathbf{P}(s) = \begin{bmatrix} p_{11}(s) & p_{12}(s) & \cdots & p_{1q}(s) \\ p_{21}(s) & p_{22}(s) & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ p_{l1}(s) & \cdots & \cdots & p_{lq}(s) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$p_{rk}(s) = b_{rk}^{(0)} + b_{rk}^{(1)}s + \cdots + b_{rk}^{(d)}s^d, \quad d = \max[\deg p_{11}(s), \deg p_{12}(s), \dots, \deg p_{1q}(s)]. \quad (5)$$

式(4)中, $\mathbf{P}(s)$ 为多项式矩阵,所以可测度与 $\mathbf{P}(s)$ 的线性无关列的数目相同,但是通过式(4)进行可测度计算并不方便,特别是当电路规模较大的时候,而且使用数字计算的方法还会造成一定的误差。矩阵 $\mathbf{P}(s)$ 的线性无关列的数目与其多项式矩阵函数的系数组成的矩阵 \mathbf{B} 的秩相等,即 $\text{rank } \mathbf{P}(s) = \text{rank } \mathbf{B}$,其中:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11}^{(0)} & b_{12}^{(0)} & \cdots & b_{1q}^{(0)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ b_{11}^{(d)} & b_{12}^{(d)} & \cdots & b_{1q}^{(d)} \\ b_{21}^{(0)} & b_{22}^{(0)} & \cdots & b_{2q}^{(0)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ b_{l1}^{(0)} & b_{l2}^{(0)} & \cdots & b_{lq}^{(0)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ b_{l1}^{(d)} & b_{l2}^{(d)} & \cdots & b_{lq}^{(d)} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

矩阵 $\mathbf{P}(s)$ 的系数矩阵 \mathbf{B} 中的元素都是元件参数变量的函数,因为可测度与元件参数的取值无关,所以可以将这些参数变量赋予简单的整数值来计算电路可测度,因此,符号分析法可以简化可测度的计算,同时减少计算过程中的舍入误差。文献[8]对可测度计算做了进一步简化,设诊断方程的各项系数分别对每个元件参数变量求偏导,得到的结果形成矩阵 \mathbf{B}_c ,则电路的可测度等于矩阵 \mathbf{B}_c 的秩。为了说明方便,以单输入单输出为例,设电路的故障诊断方程为

$$h(p, s) = \frac{\sum_{i=0}^n a_i(p) \cdot s^i}{\sum_{j=0}^{m-1} b_j(p) \cdot s^j + s^m} = \frac{N(p, s)}{D(p, s)}, \quad (7)$$

则矩阵 B_C 的表达式为

$$B_C = \begin{bmatrix} \frac{\partial a_0}{\partial p_1} & \frac{\partial a_0}{\partial p_2} & \cdots & \frac{\partial a_0}{\partial p_q} \\ \frac{\partial a_1}{\partial p_1} & \frac{\partial a_1}{\partial p_2} & \cdots & \frac{\partial a_1}{\partial p_q} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial a_n}{\partial p_1} & \frac{\partial a_n}{\partial p_2} & \cdots & \frac{\partial a_n}{\partial p_q} \\ \frac{\partial b_0}{\partial p_1} & \frac{\partial b_0}{\partial p_2} & \cdots & \frac{\partial b_0}{\partial p_q} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial b_{m-1}}{\partial p_1} & \frac{\partial b_{m-1}}{\partial p_2} & \cdots & \frac{\partial b_{m-1}}{\partial p_q} \end{bmatrix} \circ \quad (8)$$

这样,在已知电路诊断方程的情况下,求解矩阵 B_C 的秩是通常计算可测度的方法。

1.2 元件故障模糊组的划分与可测度计算

文献[5]—文献[7]在使用参数符号方法对低可测度电路进行故障诊断时,由于诊断方程数目小于元件数目,所以需要假定部分参数取元件的标称值,然后计算电路的可测度,因此,在计算时需要对电路中每组不同的参数组合进行可测度计算,而实际上由于元件故障模糊组的影响,一些参数组合的可测度计算是重复的。为了减少计算量,本研究提出了基本项系数依赖矩阵的概念,并根据该矩阵的性质划分元件模糊组。由于同一模糊组内的元件故障无法唯一确定,所以,将该模糊组内的元件赋予标称值后计算的可测度等于所有包含该模糊组的参数组合的值,这些参数组合的可测度就不必再计算。

1) 已知系统的诊断方程为

$$h(p, s) = \frac{\sum_{i=0}^n a_i(p) \cdot s^i}{\sum_{j=0}^m b_j(p) \cdot s^j}, \quad (9)$$

将式(9)中 $a_i(p)$ 与 $b_j(p)$ 化简为不含分式的整式形式,文献[9]中已经证明传递函数中多项式关于 s 的系数符号表达式是电路中各元件参数的乘积和的形式,所以 $a_i(p)$ 与 $b_j(p)$ 写成

$$a_i(p) = \sum_{r=1}^u c_r \left(\prod_{r \in R} p_r \right), b_j(p) = \sum_{t=1}^v c_t \left(\prod_{t \in T} p_t \right). \quad (10)$$

其中: c 为常数, R 和 T 是集合 $\{1, 2, \dots, q\}$ 的任意子集, q 为电路中元件数目, u 和 v 分别表示乘积项的数目。

2) 根据诊断方程 s 项的子项系数,建立表示元件参数与传递函数系数之间关系的系数依赖矩阵

$$D = \begin{matrix} & c_1 & \cdots & c_l \\ p_1 & [d_{11} & \cdots & d_{1l}] \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ p_q & [d_{q1} & \cdots & d_{ql}] \end{matrix} \circ \quad (11)$$

其中: $p_i (i = 1, 2, \dots, q)$ 表示电路中第 i 个元件参数, $c_j (j = 1, 2, \dots, l)$ 是 s 项的第 j 个子项系数,如果参数 p_i 出现在子项系数 c_j 中,则 $d_{ij} = 1$, 否则 $d_{ij} = 0$ 。系数依赖矩阵中若元件 p_i 的第 i 行与元件 p_j 的第 j 行元素相同,则说明这两个元件参数同时出现在各项系数中,此时在系数项中用新参数 $p_{q+1} = p_i \cdot p_j$ 代替原来这两个元件参数,同理,当 D 中存在任意相同行时,用新的参数 p_c 表示这些行对应的组合参数。子项系数矩阵化简后,将子项的系数依赖矩阵中属于同一基本项的各子项系数合并得到基本项的系数依赖矩阵。

3) 设诊断方程的分母与分子中 s 项的系数个数为 u , 则电路的可测度 $T \leq u$, 设电路中含 v 个元件, 在低可测度电路中 $u < v$, 此时由于未知数的个数大于基本项系数的个数, 必须假定 $v - u$ 个元件参数已知, 然后求解其他 u 个元件参数是否能唯一确定。以前的方法在选择 $v - u$ 个已知元件时采用排列组合的方法, 当某些参数组合包含模糊组时, 这一类的可测度实质上是相同的, 所以本研究首先选择电路的 $v - u$ 阶模糊组, 将 $v - u$ 阶模糊组中的元件参数作为已知量计算可测度, 这样可以减少不必要的参数组合计算。若元件组属于 r 阶模糊组, 则矩阵 D 中该元件的参数行满足 $\sum_i d_{ij} \neq 1, j = 1, 2, \dots, r$, 若元件组的参数行 $\sum_i d_{ij} = 1, j = 1, 2, \dots, r$, 则其中不可能包含模糊组。根据该性质可以进行模糊组的划分。

4) 将 $v - u$ 个元件参数赋以任意数值后得到新的诊断方程, 新方程的雅可比矩阵的秩即电路的可测度。

2 电路分析示例

利用本研究提出的方法分析图 1 所示电路的可测度。该电路的故障诊断方程为

$$h(p, s) = \frac{G_3 C_1 G_1}{C_4 G_1 G_2 + (C_4 C_3 G_2 + C_4 C_2 G_2 + C_4 G_2 C_1)s + (C_4 C_3 C_1 + C_4 C_2 C_1)s^2}, \quad (12)$$

设分子中常数子项为 n_0 , 分母中常数子项为 d_0 , 分母中 s 的 1 次幂项系数包含 3 个子项分别为 d_1^1, d_1^2, d_1^3 , 分母中 s 的 2 次幂项系数包含 2 个子项分别为 d_2^1, d_2^2 , 则子项参数依赖矩阵为

$$D = \begin{bmatrix} n_0 & d_0 & d_1^1 & d_1^2 & d_1^3 & d_2^1 & d_2^2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{matrix} \quad (13)$$

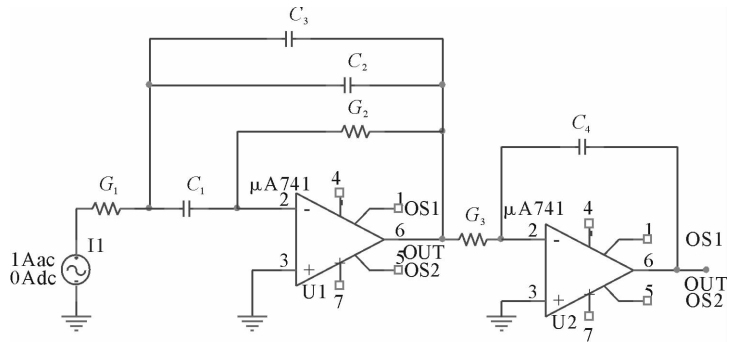


图 1 示例电路图

Fig. 1 An example of the circuit

子项参数依赖矩阵中无相同的行, 说明子项系数不需化简, 由于该方程的可测度必然 ≤ 3 , 诊断方程中有 7 个元件参数, 因此, 选择 4 阶模糊组计算电路可测度。因为 $d_{21} + d_{24} + d_{25} + d_{27} = 2$, 所以元件组合 (C_1, G_1, G_3, C_4) 可以构成 4 阶模糊组, 因此设参数 $C_1 = G_1 = G_3 = C_4 = 1$, 则诊断方程变为

$$h(p, s) = \frac{1}{G_2 + (C_3 G_2 + C_2 G_2 + G_2)s + (C_2 + C_3)s^2}, \quad (14)$$

该诊断方程的雅可比矩阵为

$$B_C = \begin{bmatrix} \partial/\partial C_2 & \partial/\partial C_3 & \partial/\partial G_2 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ G_2 & G_2 & C_3 + C_2 + 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

将 G_2, C_2, C_3 赋值 1, 则矩阵 B_C 的秩为 2, 因此该参数组合下电路的可测度为 2, C_2 与 C_3 的元件参数无法唯一确定。同理分析其他 4 阶模糊组情况下电路的可测度, 可以避免计算所有参数组合情况的可测度。

3 结束语

因为元件参数符号可以赋予任意数值而不影响可测度数值,所以通过赋予简单的整数值能够避免使用数字算法计算可测度矩阵秩的过程中出现的舍入误差,因而,本研究提出的方法具有符号可测度分析的优点,同时由于使用模糊组减少了需要计算的参数组合,计算速度也得到了提高。提出的参数依赖矩阵方便了模糊组的划分,与符号法相结合,简化了可测度计算。本文主要研究了线性模拟电路的可测度,非线性模拟电路可以在某一工作点附近进行线性化,使用类似线性电路的方法计算可测度,进一步研究的方向是采用多项式逼近非线性函数进行可测度分析。

参考文献:

- [1] GOLONEK T, RUTKOWSKI J. Genetic-algorithm-based method for optimal analog test points selection[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-II; Express Briefs, 2007, 54(2): 117-121.
- [2] SAEKS R, SEN N, CHEN H M S, et al. Fault analysis in electronic circuits and systems[R]. Texas Technique University, Lubbock, Jan, 1978: 26-29.
- [3] CATELANI M, IUCULANO G, Liberatore A, et al. Improvements to numerical testability evaluation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1987, 36: 902-907.
- [4] MANETTI S. New approach to automatic symbolic analysis of electric circuits[J]. IEE Proceedings G: Circuits, Devices & Systems, 1991, 138(1): 22-28.
- [5] GIULIO F, ANTONIO L, STEFANO M, et al. A new symbolic method for analog circuit testability evaluation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1998, 47(2): 554-565.
- [6] CANNAS B, FANNI A, MONTISCI A. Testability evaluation for analog linear circuits via transfer function analysis[C]// Proceeding of IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Kobe, May, 2005: 992-995.
- [7] CANNAS B, FANNI A, MONTISCI A. Algebraic approach to ambiguity-group determination in nonlinear analog circuits [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I, 2010, 57(2): 438-447.
- [8] LIBERATORE A, MANETTI S, PICCIRILLI M C. A new efficient method for analog circuit testability measurement[C]// Proceedings of IEEE Instrument and Measurement Technology Conference. Hamamatsu, May, 1994: 193-196.
- [9] GUO Z, SAVIR J. Analog circuit test using transfer function coefficient estimates[C]// Proceedings of International Test Conference. Charlotte, NC, Sep. 30, 2003: 1155-1163.

(上接第 79 页)

- [6] SHI B, CHIA M Y W. An ultra-wideband CMOS receiver front-end[C]// Proceedings of the 37th European Conference on Wireless Technology. Munich, Oct. 8-10, 2007: 1042-1045.
- [7] FU C T, KUO C N. 3~11 GHz CMOS UWB LNA using dual feedback for broadband matching[C]// Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. San Francisco, June 11-13, 2006: 1-4.
- [8] 黄进芳, 林伟健, 刘荣宜. Op Amp 共享与移除取样保持电路之低功耗管线式 ADC 芯片设计[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2011, 30(2): 70-79.
HUANG Jinfang, LIN Weijian, LIU Ronyi. Design of low power pipelined chips with Op Amp sharing and SHA-less[J]. Shandong University of Science and Technology: Nature Science, 2011, 30(2): 70-79.
- [9] SHI B, CHIA M Y W. A 3-10 GHz 0.13 μm CMOS receiver front-end for MB-OFDM ultra-wide band systems[C]// 2007 IEEE International Conference on Ultra-Wideband. Singapore, Sep. 24-26, 2007: 622-625.
- [10] CHAO S F, KUO J J, LIN C L, et al. A DC-11.5 GHz low-power, wideband amplifier using splitting-load inductive peaking technique[J]. Microwave and Wireless components letters, 2008, 18(7): 482-484.
- [11] SHIM A, LEE J, HAN S K, et al. Advanced communication technology[C]// 10th International Conference on Advanced Communication Technology. Gangwon-Do, Feb. 17-20, 2008: 823-826.