

# 基于特殊测试点隔离算法的测试节点选择

慕林芳 何玉珠

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院 北京 100191)

**摘要:** 测试点的选择问题作为模拟电路故障诊断的基础性问题,如何找到数目最少的测试点以隔离电路的所有故障成为研究的重点,常用的测试点选择方法大多为故障字典法。研究发现,如果电路中一种特定的故障只能由一个特殊的测试点进行隔离,那么将这种特殊测试点选出可以大大简化故障字典,然后完成剩余有效测试点的选择和冗余测试点的移除,即可选出最优的测试点集合。这种方法称为特殊测试点隔离算法,通过对比实验,发现该算法很好的平衡了测试点选择中对时间和精度的要求,而且具有更高的效率。

**关键词:** 模拟电路;故障字典;特殊测试点隔离;测试点选择

**中图分类号:** TN710 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

## Test point selection based on special test point separation algorithm

Mu Linfang He Yuzhu

(School of Instrumentation and Opto-electronics Engineering, Beijing Hangkong University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** The selection of test points is the basic problem of analog circuit fault diagnosis. How to find the least number of test points to isolate all the fault circuit has become the focus of the study. Commonly used test point selection methods are mostly fault dictionary method. The study found that if a particular fault in the circuit can only be isolated by a special test point, then taking this special test point out can greatly simplify the fault dictionary, by finishing the selection of the remaining valid test points and the removal of redundant test points, the best set of test points can be chosen. This method is called special test point isolation algorithm. Through compared experiment, it is found that the proposed algorithm balances the requirements of time and accuracy in test point selection. What is more, it has a higher efficiency.

**Keywords:** analog circuits; fault dictionary; special test point separation; test point selection

## 1 引言

近年来,随着大规模集成电路的应用,尤其对于应用在精密的航空航天领域,电路中任何一点小的故障都会产生不可预估的损害,而在集成电路中,故障大多发生于模拟电路中,因此,进行模拟电路的诊断技术是非常有必要的。由于模拟电路的激励与响应都是连续量,加之元件存在非线性、容差、反馈等因素<sup>[1-2]</sup>,使得模拟电路的诊断技术发展缓慢。

测试点的选择问题<sup>[3]</sup>作为模拟电路诊断技术的基础,引起了无数国内外学者的研究。Prasad 和 Babu 对测点选择的标准和策略(包含法和排除法)进行了详细讨论,并对基于整数编码故障字典的测试点选择算法进行了总结;Starzyk 等人提出一种基于信息熵标准的测试点选择算法<sup>[4]</sup>,取得了较好的效果;Yang 等人提出一种基于启发式

图搜索的算法来进行测试节点的优选<sup>[5-6]</sup>;黄等人用灰熵关联算法进行了模拟电路测试节点优化选择<sup>[7]</sup>。这类方法统称为迭代法,需要建立整数编码故障字典,运用测试点选择的标准和策略反复迭代,最终找到最优测试节点集合。在很多情况下,模拟电路中的有些故障可以被多个测试节点同时隔离,有些特别的故障却只能被某些特殊测试节点隔离,而这些特殊的测试节点能否有效被选取往往会直接影响测试节点选择算法的效率和精度。本文在研究和总结前人工作<sup>[7]</sup>的基础上,提出了一种基于特殊测试点隔离算法的测试点选择方法。

## 2 算法理论与方法

### 2.1 整数编码故障字典

整数编码技术源于模糊组的概念,对于任何一个可及的测试节点,获取的某种故障的特征信息(比如电压或者电

流)可能很相近,从而导致这些故障在这个测试节点上无法被彻底隔离。如果考虑模拟电路中元器件的容差,那么故障的特征信息就可能是某个区域内随机变化的,有些故障类型的特征信息之间很可能发生重叠和交叉,这些不易区分的故障类型就称为属于同一个模糊组<sup>[8]</sup>。在实际应用中,较为常用的模糊组确定方法是阈值法,即判断两个故障的特征值之差是否小于给定的数值,以判定这两个故障是否属于一个模糊组。这里用到的电压故障阈值通常选取二极管的导通电压 0.7 V。整数编码方法是故障类按照模糊组从 0 开始依次进行编码,属于同一个模糊组的故障类将会拥有相同的整数编码,而通过判别所列出的故障类是否拥有相同的整数编码就能得知故障隔离情况。将故障类型在每个测试点上的整数编码列成一个表格即形成整数编码故障字典<sup>[9]</sup>。

## 2.2 测试点选择的策略和标准

测试点选择的策略主要有包含法、排除法以及这两者的组合。包含法:首先将备选测试点放入备选测试集  $S_{br}$  中,最优测试集  $S_{sy}$  初始为空,按照一定的测试点选择标准从备选测试节点集合  $S_{br}$  中选取一个当前最优的测试节点放入最优测试点集合  $S_{sy}$  中,同时,该测试节点需从备选测试节点集合  $S_{br}$  中删除,如此不断循环选取,直到所有列出的故障都能被集合  $S_{sy}$  中的测试节点隔离(或者故障隔离能力达到最大)。排除法:将所有备选的测试节点都放入最优测试点集合  $S_{sy}$  中,然后根据已选定的测试节点移除标准,从最优测试点集合  $S_{sy}$  中移除当前最不好的那个测试节点,如此不断循环移除,直到故障隔离能力有所下降为止。本文基于这两种方法相结合的方法,采用包含法的模糊组数目最大的标准跟排除法模糊组数目最小的标准进行测试点的选择,及首先用包含法得到最优测试点集合,然后运用排除法从最优测试点集合中移除冗余的测试节点,从得到优化的测试节点集。

## 2.3 特殊测试点隔离

假设某电路的整数编码故障字典如表 1 所示,特殊测试点的隔离方法如下:首先构建一个和故障字典行列数相同的表格并将表格中的数字全部置为 0,其次顺序搜索每个测试点在表中对应的列,如果该模糊组的编码在本列中唯一存在则将相应的位置置为 1,然后将每一个故障类型对应的行相加,将每一行的和放在表格后面的一列  $N$  中,得到特殊测试点的隔离表如表 2 所示。将  $N$  列中数为 1 所对应的特殊测试点选择出来,表 2 中的  $\{n_1, n_2, n_3\}$  即为特殊测试点。

## 2.4 算法描述

基于特殊测试点隔离法的测试点选择算法的总体思路:首先对被测电路进行仿真确定其整数编码故障字典,然后对整数编码故障字典进行特殊测试点的隔离得到特殊测试点,将特殊测试点放入最优测试集测  $S_{sy}$  并判断其隔离能力,如果最优测试集能隔离所有故障则算法进入下一步,

表 1 整数编码故障字典

故障类型	测点 $n_1$	测点 $n_2$	测点 $n_3$	测点 $n_4$
f1	0	1	2	2
f2	0	3	2	2
f3	3	2	1	0
f4	4	2	0	1
f5	2	1	2	3
f6	0	3	4	2
f7	1	4	3	4
f8	0	1	0	1
f9	0	0	0	2

表 2 特殊测试点隔离表

故障类型	测点 $n_1$	测点 $n_2$	测点 $n_3$	测点 $n_4$	$N$
f1	0	0	0	0	0
f2	0	0	0	0	0
f3	1	0	1	1	3
f4	1	0	0	0	1
f5	1	0	0	1	2
f6	0	0	1	0	1
f7	1	1	1	1	4
f8	0	0	0	0	0
f9	0	1	0	0	1

否则按包含法的选择标准选出最优测试集,然后用根据排除法的标准进行冗余测试点的剔除,最终得到最有测试点集合。

### 2.4.1 算法步骤算法具体执行如下

1):针对被测模拟电路,运用电路仿真工具在各个测试点进行仿真得到包含所有故障类型(包括无故障),建立故障类型和测试点对应的整数编码故障字典,并将最优测试集  $S_{sy}$  初始为空集,所有备选测试点放入集合  $S_{br}$  中。

2):按照特殊测试点隔离的方法对整数编码故障字典进行搜索,构建特殊测试点隔离表。

3):找出  $N$  列中值为 1 所对应的测试点,组成特殊测试点集合放入最优测试点集合  $S_{sy}$  中,并将特殊测试点从备选测试集中  $S_{br}$  删除。

4):判断最优测试集的故障隔离能力,如果最优测试集可以隔离所有故障或故障无法用现有测试点隔离则算法停止,否则进行下一步。

5):将整数编码故障字典中能被最优测试集隔离的故障行删除,同时将最有测试点集合中各测试点对应的列删除,得到简化的整数编码故障字典。

6):采用包含法的模糊组数目最大的测试点选择标准,从集合  $S_{br}$  中选择最佳测试节点放入  $S_{sy}$  中,将所能隔离的故障行和对应的测试点列删除,返回 4)。

7):采用排除法的模糊组数目最小的测试点选择标准,从最优测试集中删除一个最差测试点  $n_i$ 。

8):判断最优测试集  $S_{zy}$  的故障隔离能力,如果删除  $n_i$  不影响最优测试集的隔离能力,则说明是  $n_i$  冗余测试点,否则如果最优测试集的隔离能力降低则将其放回最优测试集  $S_{zy}$  中。

第9步:循环7和8至最优测试集  $S_{zy}$  中每个测试点都被检查完。

注意:在算法的3)中,利用特殊测试点隔离选出所有特殊测试节点并放入集合  $S_{zy}$  中,这一步是算法的关键步骤,可以简化整数编码故障字典,在某些特殊情况下很可能通过这一步就能得到最终解,从而及大地提高算法的效率。

2.4.2 算法时间复杂度

算法2)需要构建跟原来整数编码故障字典相同的行多一列,假设故障数为  $F_A$ ,测试点数为  $N_B$  为,由于需要对全表的搜索,则算法复杂度为  $O(F_A(N_B + 1))$ 。

算法3)设放入最有测试集的测试点个数为  $a$ ,所能隔离的故障数为  $b$ ,则算法复杂度为  $O(F_A(N_B + 1))$ 。特别当  $b = F_A$  的时候,算法结束,极大的提高了计算效率。

算法5)删除选中的测试点列和其所隔离的故障行,则时间复杂度:  $O(F_A) + O(a + c) = O(F_A) + O(m)$  其中  $c$  为下一步选入最优测试集点数,  $m$  为最优测试点总数。

算法6)在迭代的过程,设选入最优测试集  $S_{zy}$  的测试点数为  $c$ ,则根据分析迭代计算时间复杂度:  $O((F_A - b) \cdot x' \log(F_A - b))$  其中:

$$x' = (N_B - a) + (N_B - a - 1) + (N_B - a - 2) \dots + (N_B - a - b + 1)。$$

算法7)~9)删除冗余测试点时间复杂度为:  $O(F_A m \log F_A)$ 。

算法总时间复杂度为上述之和,经过简化后得到算法的总时间复杂度为:  $O(F_A m N_B \log F_A)$ 。

3 仿真实验

为了验证本文所提出的算法的有效性,本文分别采用带通滤波器和负反馈滤波电路进行验证。电路采用 PSpice 仿真,算法采用 MATLAB 编程实现。

带通滤波器是被一些文献验证的典型模拟电路,激励信号选用 1 kHz 4 V 的正弦波。电路总共设置 11 个备选测试节点  $n_1 \sim n_{11}$ , 19 种不同的故障类型(包括无故障情况)  $f_1 \sim f_{19}$ 。得到其整数编码故障字典后用本文的算法第3步选出特殊测试点为  $\{n_5, n_8, n_9\}$ , 删出其对应的测试点列和能隔离的故障行得到如表3所示简化故障字典,可以看出原来的整数编码故障字典得到大大的简化。经算法第6步本文选  $n_1, n_{11}$  加入最优测试集,经算法7~9步删除冗余测试点  $n_8$  得到最后最优测试集  $\{n_1, n_5, n_9, n_{11}\}$ , 与其他方法的结果一致。

表3 带通滤波器电路简化的整数编码故障字典

故障类型	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_6$	$n_7$	$n_{10}$	$n_{11}$
$f_1$ (无故障)	3	2	2	3	3	4	1	1
$f_2$ ( $R_1$ 开路)	0	0	0	0	0	0	1	7
$f_4$ ( $R_2$ 开路)	1	0	0	0	0	0	1	7
$f_9$ ( $R_5$ 短路)	3	2	2	3	0	0	1	7
$f_{15}$ ( $R_9$ 开路)	3	2	2	3	3	4	1	0
$f_{16}$ ( $R_9$ 短路)	3	2	2	3	3	4	1	8
$f_{18}$ ( $R_{11}$ 开路)	3	2	2	3	3	4	2	3

负反馈滤波电路激励信号选用 1 kHz 7 mV 的正弦波。该电路总共有 10 个备选测试节点  $n_1 \sim n_{10}$ , 35 种不同的故障类型(包括无故障情况)  $f_1 \sim f_{35}$ 。选择使用直流电压响应和交流电压响应共同构建整数编码故障字典<sup>[10]</sup>。经本文算法选出的特殊测试点集合  $\{n_1, n_4, n_9, n_{19}, n_{20}\}$ , 然后经算法迭代与冗余测试点删除得到最优测试点集如表4所示。

表4 对比实验结果

算法	最优测试节点集 $S_{zy}$	最优测试节点个数	时间/s
Starzyk	$n_1, n_3, n_4, n_5, n_7,$ $n_9, n_{14}, n_{15}, n_{18}, n_{20}$	10	0.14
Yang	$n_1, n_3, n_4, n_5, n_7,$ $n_9, n_{13}, n_{18}, n_{20}$	9	0.13
穷举法	$n_1, n_3, n_4, n_5, n_7, n_9,$ $n_{13}, n_{18}, n_{20}$	9	74.29
本文算法	$n_1, n_3, n_4, n_5, n_9, n_{13},$ $n_{18}, n_{19}, n_{20}$	9	0.08

通过上表可以看出,本文算法和 Yang 的算法以及穷举法可找出最优测试集,其它算法没有找出最优测试集,在算法所消耗的时间上,穷举法所需的时间远远大于其它算法,而本论文提出的新算法所耗费的时间是最少的。

4 结 论

本文所提出的特殊测试点隔离算法在测试点选择方面的具有很高的效率和准确性,而且计算时间最优,相比于其他算法体现出了优越性。凡基于整数编码故障字典的测试点选择问题,基本上都可以用本文提出的方法求出最优测试点集合。但算法依赖测点选择标准,易陷入局部最优的问题。

参考文献

[1] 李焱骏,王厚军,周龙甫,等. 容差条件下的模拟电路故障诊断方法[J]. 电子科技大学学报,2010,39(3):

- 384-387.
- [2] 金倬彦,李锋.容差模拟电路复杂故障的测试与诊断[J].复旦学报:自然科学版,2008,47(6):781-785.
- [3] 王亮,刘光斌.模拟电路故障诊断测试节点优选新算法[J].微计算机信息,2009,25(13):1-4.
- [4] STARZYK J A, LIU D, LIU Z H. Entropy-based optimum test nodes selection for analog fault dictionary techniques [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2004, 53 (3): 74-761.
- [5] 杨成林,田书林,龙兵,等.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.
- [6] YANG C H, TIAN S L, LONG B. Application of heuristic graph search to test point selection for analog fault dictionary techniques [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(7): 2145-2158.
- [7] 黄亮,侯建军,刘颖,等.基于灰关联熵的模拟电路测试点优选算法[J].电子测量与仪器学报,2009,23(9):27-32.
- [8] 张屹,魏学业,蒋海峰.一种新的模拟电路故障模糊集确定算法[J].测试技术学报,2008,22(1):70-73.
- [9] 王阳,王琳,王学伟,等.一种模拟电路故障字典的改进方法[J].北京化工大学学报:自然科学版,2011,38(2):129-133.
- [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.

### 作者简介

慕林芳,硕士研究生,主要研究方向为军工武器的自动化检测与故障诊断。

E-mail:931915440@qq.com

何玉珠(通讯作者),教授、博士/硕士生导师,主要研究方向为复杂电子系统的故障检测和诊断技术,特别是武器装备(飞机、导弹等)的检测与性能评估技术。

E-mail:heyuzhuhe@buaa.edu.cn

(上接第92页)

- [15] SANZ J, NAVARRO J, ARBUÉS A, et al. The Transcriptional regulatory network of, mycobacterium tuberculosis[J]. Plos One, 2011, 6 (7):418-418.
- [16] SIERRA N, MAKITA Y, DE HOON M, et al. DBTBS: a database of transcriptional regulation in Bacillus subtilis containing upstream intergenic conservation information [J]. Nucleic Acids Research, 2008, 36(suppl 1): D93-D96.
- [17] CANTONE I, MARUCCI L, IORIO F, et al. A yeast synthetic network for in vivo assessment of reverse-engineering and modeling approaches[J]. Cell, 2009, 137(1): 172-181.
- [18] SCHAFFTER T, MARBACH D, FLOREANO D. GeneNetWeaver: in silico benchmark generation and performance profiling of network inference methods[J]. Bioinformatics, 2011, 27 (16): 2263-2270.

### 作者简介

刘飞,1981年出生,讲师,研究方向为计算生物信息学。

E-mail:bwlif@163.com

(上接第100页)

- [9] 冯丽丽.区域地磁场协和样条模型研究[D].北京:中国地震局地球物理研究所,2015.
- [10] 王仕成,刘元元,孙渊.基于Legendre函数的超高阶次地磁场建模方法[J].中国惯性技术学报,2012,20(3):333-338.
- 管雪元(通讯作者),硕士,高级工程师,主要研究方向为测试计量技术及仪器。

E-mail:njust\_gxy@163.com

李文胜,硕士研究生,主要研究方向为测试计量技术。

### 作者简介

杨梦雨,硕士研究生,主要研究方向为导航。