

改进的等权值抗混淆算法

王力¹, 王燕威², 穆东旭²

(1. 中国民航大学 职业技术学院, 天津 300300;

2. 中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津 300300)

摘要: 针对等权值算法的不足, 将电路板结构信息应用到等权值算法中, 提出了一种基于有限制短路故障关系的改进算法; 通过测试相似组的概念对测试向量进行分组, 将不发生混淆的测试向量分在一组; 利用电路板结构信息建立网络间的有限制短路故障关系图, 利用启发式分组算法将容易发生短路的网络分在同一组内; 将不发生混淆的测试向量组分配给发生短路概率大的网络组, 最后对测试向量集的完备性和紧凑性指标进行折中增加补偿向量; 结果表明: 改进的算法能够减小算法发生征兆混淆的概率, 提高了算法的测试能力。

关键词: 边界扫描; 互连测试; 边界算法; 测试矢量; 故障检测

Improved Equal Weight Anti-aliasing Algorithm

Wang Li¹, Wang Yanwei², Mu Dongxu²

(1. School of Vocational and Technical Engineering, China Civil Aviation University, Tianjin 300300, China;

2. School of Electronic Information and Automation, China Civil Aviation University, Tianjin 300300, China)

Abstract: Aiming at the deficiency of the equal weight algorithm, the circuit structure information is applied to the equal weight algorithm, an improved algorithm based on the limited short-circuit fault relationship is proposed. The test vectors are grouped by the concept of testing similar groups, and the test vectors that do not cause confusion are grouped together. Using the circuit board structure information to establish a limited short-circuit fault between the network diagram, the use of heuristic grouping algorithm will be prone to short-circuit network within the same group. The confusion less test vector group is assigned to the network group with high probability of short circuit, and finally, the completeness and compactness index of the test vector set is compromised to increase the compensation vector. The results show that the improved algorithm can reduce the probability of confusion in the algorithm and improve the testing ability of the algorithm.

Keywords: boundary scan; interconnect test; boundary algorithm; test vector; fault detection

0 引言

在 20 世纪 70 年代中期, 电路板的测试是通过在线测试进行的, 表面贴装技术对板上互连测试造成了更大的困难。为了找到解决测试问题的方案, 一批科学家在 1980 年中组建联合测试行动小组 (JTAG)。1990 年, JTAG 推出了基于边界扫描的测试技术, 被称为 IEEE1149.1 标准^[1]。边界扫描技术的发展带动了边界扫描算法的而不断的发展。

目前国内外相关的边界扫描测试算法很多, 各有其优缺点, 通常可分为三类, 第一类是采用无限制短路故障模型的常规测试算法, 第二类是采用有限制短路故障模型的结构测试算法, 第三类是利用测试过程中所获取的信息对测试向量集进行优化的自适应算法^[2]。本文在分析了常规

测试算法等权值互连测试算法的基础上, 将结构测试算法的思想应用到等权值算法上, 提出了基于有限制短路故障关系的改进等权值互连测试算法。

1 等权值算法

1.1 等权值算法概述

等权值算法在测试向量集的紧凑性和算法检测能力之间进行了合理的折衷, 是由胡政等人提出的^[3]。该算法分配给各网络的测试矢量具备相同的权值 $q, q = \left\lfloor \frac{p}{2} \right\rfloor$, 其中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 代表向下取整, P 代表紧凑性指标。表 1 所示为利用该算法生成的一个测试向量矩阵, $N=9, p=5, q=2$ 。

1.2 等权值算法分析

抗误判定理^[4]: 权值为 W 的一个固定权值诊断算法的测试集 (Matrix of Test Vectors, MTV) 是一个独立的贯序测试向量 (Sequential Test Vector, STV_s) 矩阵。

推论^[4]: 由独立 STV_s 组成的测试集 MTV 对如下故障无征兆误判现象:

1) S-A-0/1, S-D-k;

2) W-A/O。

由于等权值算法生成的测试向量具有固定的权值, 通

收稿日期: 2018-03-05; 修回日期: 2018-03-26。

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合资助项目 (U1733119); 国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合资助项目 (U1333111); 中央高校基本科研业务费项 (3122017107)。

作者简介: 王力 (1973-), 男, 重庆市人, 硕士生导师, 教授, 主要从事机载电子系统故障诊断方法与技术方向的研究。

过上述的抗误判定理和推论可以得出该算法不存在征兆误判。等权值算法和改良计数算法具有相同的紧凑性指标, 并且具备较强的故障检测能力^[3]。等权值算法减少了征兆误判的出现, 但是征兆混淆率还是较高, 并且征兆混淆主要发生在相似的 STV 之间^[5]。以表 1 中测试矩阵为例说明, 假设 n_3 和 n_7 短路在一起, n_4 和 n_6 也短路在一起, 它们的贯序测试响应向量 (Sequential Response Vector, SRV) 均为 11011, 无法判断是哪两组网络之间发生短路, 即发生混淆。等权值算法同传统的改良计数算法、WOA 算法在测试生成的过程中均未能充分利用电路板的结构信息^[3], 即该算法的前提仍然是假设电路板中的所有网络均可能发生短路故障。

表 1 等权值算法测试矩阵

网络	PTV				
	V1	V2	V3	V4	V5
N1	1	1	0	0	0
N2	1	0	1	0	0
N3	1	0	0	1	0
N4	1	0	0	0	1
N5	0	1	1	0	0
N6	0	1	0	1	0
N7	0	1	0	0	1
N8	0	0	1	1	0
N9	0	0	1	0	1

2 算法改进思路及过程

2.1 算法改进思路

产生误判和混淆需要同时满足两个条件: 1) 算法生成的测试向量本身存在发生征兆误判和征兆混淆的可能; 2) 分配到发生短路网络上的 STV 能够满足征兆误判和征兆混淆的发生条件^[8]。因此, 有两种避免发生误判和混淆的方法: 第 1 种, 提高算法生成的测试向量自身抗误判和抗混淆的能力; 第 2 种, 在算法生成测试向量不变的条件下, 为网络分配 STV, 使误判和混淆发生条件不满足, 从而降低误判和混淆的发生概率。以表 1 说明, 如果把 n_2 和 n_3 的 STV 互换, 则 n_3 和 n_7 短路的 SRV 为 11101, n_4 和 n_6 短路的 SRV 为 11011, 则不发生混淆。因此, 若是能够对 STV 进行分组, 将不易发生混淆的 STV 分在一组。同时利用电路板的结构信息对电路板网络进行适当分组, 将发生短路概率大的网络分在一组。最后将把不易发生混淆的 STV 组分配发生短路概率大的网络组, 从概率的角度上则可以降低误判和混淆发生的可能性。

目前边界扫描测试算法优化包括两类典型的问题, 第一类是满足完备性指标寻找紧凑性指标最小的测试向量集, 第二类是确定紧凑性指标寻找完备性指标最佳的测试向量集^[6]。因此目前的算法优化方向主要集中在如何在紧凑性

和完备性指标之间折中, 寻求征兆误判和征兆混淆率低的测试向量集, 而利用电路板结构信息优化测试向量的方法较少。

2.2 算法改进过程

如前面章节中所述, 分组的目标是将不发生混淆的 STV 分在一组, 同时将易发生短路故障的网络尽可能分在同一组内。因此优化分组的过程主要分为两步, 即首先是对 STV 分组, 然后对电路板网络进行分组。

2.2.1 STV 分组

通过对表 1 的 STV 进行分析可以发现, 由于分配给各网络的 STV 具有相同的权值, 网络 N_1 、 N_2 、 N_3 和 N_4 的第 1 位相同, 第 2 至 5 位是移位“1”序列。同样 N_5 、 N_6 和 N_7 的前两位相同, 第 3 至 5 位是移位“1”序列, 因此我们可以定义测试相似组对 STV 进行分组。

定义 1 (测试相似组^[9]) 测试相似组是指组内的测试向量前 i 位值相同, $i+1$ 位至最后位由移位“1”算法组成。

对紧凑性指标为 P , 权值为 $q = \left\lfloor \frac{P}{2} \right\rfloor$ 的 STV, 每个分组中的网络数目为 $S_i = \left(\left(P - \left\lfloor \frac{P}{2} \right\rfloor + 1 \right) - i \right)$, 其中 i 为相应的组编号。

根据定义可将表 1 的测试矢量集分为三个测试相似组, 如表 2 所示。由于每个测试相似组中, 相异部分由移位“1”序列组成, 所以相似组内不会产生征兆混淆, 不同的测试相似组之间才会产生征兆混淆。

表 2 测试相似组

	网络	PTV				
		V1	V2	V3	V4	V5
相似组 1	N1	1	1	0	0	0
	N2	1	0	1	0	0
	N3	1	0	0	1	0
	N4	1	0	0	0	1
相似组 2	N5	0	1	1	0	0
	N6	0	1	0	1	0
	N7	0	1	0	0	1
相似组 3	N8	0	0	1	1	0
	N9	0	0	1	0	1

2.2.2 电路板网络分组

1) 建立有限制短路故障关系图

研究表明, 电路板的管脚之间距离的长短会对管脚之间发生短路的概率产生影响。这种影响关系可以采用衰减函数来描述, 如公式 (1)^[7]:

$$T(p_m, p_n) = \begin{cases} T_0 \times A^{[1-\frac{L}{L_m}]} & L_0 \leq L \leq L_m \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

其中: p_m 和 p_n 代表两个任意的管脚, L_0 代表两个管脚间的最小距离 (取决于制造工艺), L_m 代表管脚间发生短路的最大可能物理距离, L 为任意两管脚间的实际距离, T_0 为

最邻近的两个管脚间发生短路的可能性，A 为远大于 1 的衰减系数，代表相对于管脚距离的增大短路的概率衰减大小。通过衰减函数可以看出来，不同的网络之间短路的概率不同，因此电路板网络之间的短路故障是有限制。

网络由相互连接的多个焊点构成，网络之间发生短路的可能性为各焊点短路的可能性的概率和，网络之间发生短路故障的可能性为：

$$\beta(n_i, n_j) = 1 - \prod_{\substack{p_m \in n_i \\ p_n \in n_j}} (1 - T(P_m, P_n)) \quad (2)$$

将式子展开，并忽略无穷小项，可得网络之间的短路概率 e_{ij} ：

$$e_{ij} = \beta(n_i, n_j) = \sum_{\substack{p_m \in n_i \\ p_n \in n_j}} T(P_m, P_n) \quad (3)$$

网络之间发生短路的可能性可以通过上式进行计算，给定阈值 ∂_{T_s} (不同的电路板阈值 ∂_{T_s} 的选取不同)。当 $e_{ij} < \partial_{T_s}$ 时，可认为网络之间会发生短路。当 $e_{ij} \geq \partial_{T_s}$ 时，认为网络之间不会发生短路。

通过上述计算方法，获取各网络之间的短路概率，在此基础上，建立网络短路关系图 $G = (V, E)$ ，其中 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, $E = e_{ij}$ 。其中 v_i 表示网络， $E = e_{ij}$ 表示 v_i 与 v_j 之间短路概率，图 1 是某电路板的网络短路关系图^[7]，下章节中将用此短路故障图为研究对象进行网络分组。图中 N_i 代表网络，图中网络间的权值代表短路概率， β 是与电路板制造工艺有关的常数，图中权值为 0 的网络之间的边进行了省略。

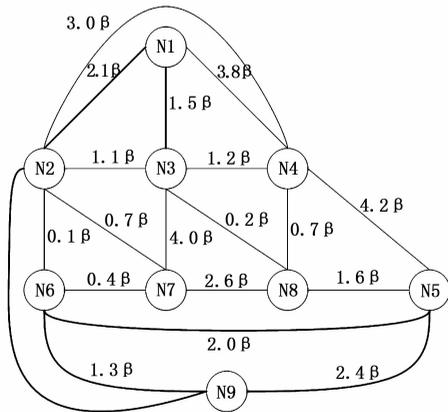


图 1 某电路板的有限网络短路关系图

2) 网络分组

通过对图 1 的电路板的网络短路关系图的分析，可以将其等价为一个具有 n 个节点的无向完全图 $G(V, E)$ ，其中 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 代表网络， $E = e_{ij}$ 代表权值，即网络间短路概率。对于该无向完全图 G ，边集 E 的权值之和是个常数，因此将网络分组问题转换为无向完全图 G 的分割问题。即为求满足不同子图间的边权值之和最大值的分割，即满足公式 (4)：

$$\max \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \sum_{k=1}^k e_{ij} \quad (4)$$

该问题是带权无向图的 k -最大割问题，是 NP-hard 问题，目前没有多项式时间内的精确求解算法^[11]。对于具有大规模网络的电路板来说，需要采用一种能够在较短的时间内获得较好的网络分组策略的方法。因此本文采用启发式分组算法。

算法的思想是，首先计算各网络之间的权值矩阵 D ，然后计算单个网络与其他所有网络的权值之和，根据权值之和对网络进行降序排序，选择权值之和最少的分组构造初始分组，最后再对分组结果进行优化。

对于给定的分组数 k ，启发式算法的主要步骤如下：

a) 计算网络之间的权值矩阵 D 。

b) 对于每一个网络 v_i ，计算其与其它所有网络的权值之和 $e_i = \sum e_{ij}$ ，并根据 e_i 对网络进行降序排序。依据排序结果顺次对网络进行分组。

c) 对于待分组的网络 v_i ，分别计算各分组中已有网络与 v_i 的权值之和 e_i^l ($l = 1, \dots, k$)，将 v_i 分入 e_i^l 最小的组中。直到全部网络分组完毕，得到一个初始的分组。

d) 对分组进行优化。检查是否存在网络 v_i ，将其从当前分组移动到另一分组时，总的权值会下降。如果存在则对 v_i 行移动，直到找不到在这样的网络。

通过章节 2.2 中的电路板网络分组算法对图 1 所示的电路板网络短路关系图进行分组，最终分组结果为 $G_1 = \{n_4, n_1, n_8, n_6\}$, $G_2 = \{n_5, n_7, n_9\}$, $G_3 = \{n_2, n_3\}$ 。

2.2.3 STV 补偿

网络分组结果与章节 2.2.1 的 STV 分组结果结合，得到优化后的测试矩阵如表 3 所示。

表 3 优化后的测试矩阵

网络		测试相似组	PTV				
			V1	V2	V3	V4	V5
G1	N4	组 1	1	1	0	0	0
	N1		1	0	1	0	0
	N8		1	0	0	1	0
	N6		1	0	0	0	1
G2	N5	组 2	0	1	1	0	0
	N7		0	1	0	1	0
	N9		0	1	0	0	1
G3	N2	组 3	0	0	1	1	0
	N3		0	0	1	0	1

考虑到网络分组只是将短路概率大的网络分在同一组，而不同的网络组之间仍存在短路的可能，为了减少组间可能出现混淆，可以通过增大测试向量集的紧凑指标，从而达到完备性指标提高。由于走步“1”算法是完备性算法，可以选择走步“1”序列作为补充向量，为了满足向量的紧凑性指标要求，补充向量的个数应尽可能少，因此可以选

择组间走步“1”序列, 补充向量的个数与测试相似组的个数相同。表 4 为最终改进后的等权值测试向量集。

3 改进的算法分析

改进的等权值算法的测试向量集如上表所示, 改进的算法的紧凑性指标为 $(P+N)$, 其中 N 为测试相似组的数目。与等权值算法相比, 紧凑性指标提高了, 表 5 给出了不同网络下数目下, 两种算法的紧凑性指标。

表 4 最终改进后的测试矩阵

网络	测试相似组	PTV					补充向量		
		V1	V2	V3	V4	V5			
G1	N4	1	1	0	0	0	1		
	N1	1	0	1	0	0	1		
	N8	1	0	0	1	0	1		
	N6	1	0	0	0	1	1		
G2	N5	0	1	1	0	0		1	
	N7	0	1	0	1	0		1	
	N9	0	1	0	0	1		1	
G3	N2	0	0	1	1	0			1
	N3	0	0	1	0	1			1

表 5 两种算法的紧凑性指标比较

网络数 N	等权值算法	改进的等权值算法
9	5	8
10	5	9
12	6	9
21	7	11

表 6 给出了不同网络下不考虑网络分组情况下的两种算法的征兆误判率和征兆混淆率。但是由于网络的合理分组, 给测试相似组分配了短路概率大的网络组, 因此征兆混淆发生的概率降低, 改进的等权值算法的实际征兆混淆率应比表 6 中的数据远低。

表 6 两种算法的征兆误判率和征兆混淆率

网络数 N	征兆误判率/%		征兆混淆率/%	
	等权值算法	改进的算法	等权值算法	改进的算法
6	0	0	18.3	10.4
7	0	0	2.3	2.0
8	0	0	5.7	4.3
9	0	0	10	6.8
10	0	0	23.1	15.3

4 结论

针对等权值算法在利用电路板结构信息方面的不足, 提出了一种基于网络有限制短路故障关系的改进等权值算法。与等权值算法相比, 本文提出的算法充分利用了电路板结构信息, 通过对测试矢量和电路板网络进行分组, 给

短路故障发生概率高的网络组分配不发生混淆的测试向量组, 虽然不能完全避免混淆的发生, 但是可以从概率的角度降低征兆混淆发生几率, 从而提高等权值算法的测试能力。

参考文献:

- [1] Std I. IEEE Standard Test Access Port and Boundary Scan Architecture [S]. 1990: 1-212.
- [2] 陈圣俭, 姚宗中, 牛春平. 基于电路板结构信息的近似近邻排序网络集生成算法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2006, 20 (2): 43-47.
- [3] 胡 政, 黎琼炜, 温熙森. 边界扫描测试向量生成的抗混淆算法 [J]. 电子测量技术, 1998 (1): 8-12.
- [4] 任哲平, 牛春平. 解决故障征兆误判和混淆的典型互连诊断算法分析 [J]. 车辆与动力技术, 2013 (3): 1-5.
- [5] 杨迪珂, 颜学龙. 边界扫描测试算法的分析与优化 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (5): 4-6.
- [6] 胡 政, 钱彦岭, 温熙森. 边界扫描测试优化算法一极小权值一极大相异性算法 [J]. 测控技术, 2000, 19 (9): 9-11.
- [7] 胡 政, 易晓山, 温熙森. 边界扫描测试信息压缩算法 [J]. 国防科技大学学报, 2000, 22 (2): 101-105.
- [8] 钟 波, 孟晓风, 王琳, 等. 一种改进的 GNS 互连测试算法 [J]. 航空学报, 2009, 30 (4): 713-718.
- [9] 刘 静. 边界扫描测试算法和 BIST 技术的研究与实现 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [10] 陈圣俭, 姚宗中, 牛春平. 基于电路板结构信息的近似近邻排序网络集生成算法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2006, 20 (2): 43-47.
- [11] 赵 超, 王慧强, 林俊宇, 等. 面向高效深度包检测的启发式正则表达式分组算法 [J/OL]. [2017-07-27]. <http://www.arocmag.com/article/02-2018-07-034.html>.
- [12] 刘萌萌, 苏 峰, 宋成军. 装备电子设备边界扫描系列标准及测试性设计技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (2): 8-11.
- [13] Myers M. A Solution for Boundary-scan Test [J]. Asian Electronics Engineer, 1991, 17 (4): 236-241.
- [14] 毕伟镇, 杜舒明. 基于边界扫描的雷达嵌入式测试和诊断技术 [J]. 计算机测量与控制, 2017 (11): 43-46.
- [15] 潘金海, 颜学龙. 基于 1149.7 标准的测试生成方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (8): 5-8.
- [16] 杜 影, 徐鹏程, 李 洋. 一种嵌入式边界扫描测试数据压缩及合成方法 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (3).
- [17] 刘磊峰, 谢永成, 李光升, 等. 基于边界扫描技术的测试性优化方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (8): 2607-2609.
- [18] 陈寿宏, 侯杏娜, 韦翠荣, 等. 基于 SQLite 的边界扫描互连测试矢量生成设计 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (6): 1854-1855.