

一种有限扫描操作测试压缩方法

刘煜坤¹, 孙超², 张礼勇¹

(1. 哈尔滨理工大学测控技术及通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 哈尔滨工业大学自动化测试与控制研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对集成电路测试时间长, 导致测试费用高的问题, 提出了一种基于有限扫描操作的扫描电路静态测试压缩方法. 利用有限扫描操作代替全扫描操作, 用有限扫描操作合并测试对, 通过减少移位操作次数减少测试时间. 同时, 将启发式方法用于限制候选测试对数量, 给候选测试对进行排序, 降低计算复杂度, 加速压缩过程. 基准电路实验结果表明, 相同故障覆盖率下, 本方法所需平均测试时间仅为典型方法的50%左右.

关键词: 测试应用时间; 有限扫描操作; 静态测试压缩; 启发式方法

中图分类号: TP302 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2009)02-0373-05

Novel approach to test compaction based on limited scan operation

LIU Yu-kun¹, SUN Chao², ZHANG Li-yong¹

(1. College of Measure-Control Tech. and Communication Eng., Harbin Univ. of Sic. and Tech., Harbin 150080, China; 2. Automatic Test and Control Institute of HIT., Harbin 150001, China)

Abstract: According to the problem of the significant increasing testing cost of VLSI caused by the significant increase in testing time, this paper proposes a novel approach to test compaction for scan circuits that use limited scan operations instead of full scan operations between test pairs. This leads to very aggressive compaction on the test application time cost under the same fault coverage. The experimental result of benchmark circuits shows that the test application time cost of the proposed method is about 50% that of the conventional methods.

Key Words: test application time; limited scan operation; static test compaction; heuristic methods

集成电路规模的不断扩大使电路测试所需数据急剧增加, 而自动测试设备 ATE (Automatic Test Equipment) 的传输带宽又较为有限, 导致测试费用随测试时间增加而迅速增加. 如何在高故障覆盖率下有效减少测试时间成为降低测试费用的重要因素^[1-4]. 目前用于解决这一问题的 TRP (Test Resource Partitioning) 技术^[1] 主要包括: (1) 测试集压缩, 对自动测试生成过程 ATPG (Automatic Test Pattern Generation) 生成的测试集进行压缩, 通过减少测试集中测试向量个数减少测试时间, 包括两种典型方法^[2-5]; (2) 内建自测试 BIST (Built In Self Test), 把测试向量产生模块和测试响应分析模块全部移入待测电路内部, 有效减少了测试电路对测试仪器的依赖, 但此方法仅适用于已具有 BIST 结构的电路; (3) 测试数据压缩, 用编码对已知测试集进行数据压缩, 通过减少测试数据量减少测试时间和测试所需存储器容量, 主要包括 Golomb 编码、FDR 编码、VIHC 编码等^[6-10].

TRP 技术中的测试集压缩被认为是一种有效减少测试向量的方法. 典型的测试集压缩分为动态测试压缩和静态测试压缩, 动态测试压缩在测试生成过程中进行^[5], 静态测试压缩在测试生成过程后进行, 独立于测试生成过程^[2-4]. 由于动态测试压缩生成的每个测试都带有一个 scan-in 操作, 一个输入向量和一个 scan-

收稿日期: 2008-08-05

基金项目: 国家重点实验室基金资助(51487020104)

作者简介: 刘煜坤(1978-), 女, 哈尔滨理工大学讲师, 哈尔滨理工大学博士研究生, E-mail: liuyk_2003@hotmail.com.

out 操作,每个输入向量前后的扫描操作,使动态压缩过程所需测试应用时间仍然很长,因此,静态测试压缩就显得十分必要.典型静态测试压缩通过将测试集中的部分测试对直接合并,去掉测试对间扫描操作减少测试应用时间,但能够直接进行合并的测试对往往十分有限.因此,为进一步减少测试应用时间,笔者提出了一种用有限扫描操作代替全扫描操作,用有限扫描操作合并测试对的静态测试压缩方法,通过减少测试对间移位操作次数减少测试应用时间.同时,启发式方法被用于限制候选测试对数量和给候选测试对排序,降低计算复杂度,加速压缩过程.基准电路实验结果表明,应用该方法减少测试应用时间效果十分显著.文中以单扫描链路为例进行介绍,给出的过程同样适于多扫描链路.

1 测试压缩基本思想

以文献[5]中已包含动态测试压缩的组合测试集为初始测试集进行静态测试压缩.初始测试集中每个测试 t_i 均由全扫描输入向量 $I_{S_i,0}$,输入向量和最终状态 L_{S_i} 构成.测试过程中,移位输入下一个测试的全扫描输入操作 $I_{S_{i+1},0}$ 时,前一个测试的最终状态 L_{S_i} 就被扫描输出,若能将两次测试间的全扫描操作用有限扫描操作代替,用有限扫描操作将测试 t_i 和测试 t_j 合并为新测试 t_k ,就可以通过减少测试间的移位操作次数减少测试应用时间,这就是笔者的基本思想.同时,为实现测试集无损压缩,合并产生的新测试 t_k 只有在整体故障覆盖率不变时才能替换 t_i 和 t_j ,但这并不表示 t_k 必须检测 t_i 和 t_j 检测的所有故障,只要保证 t_i 和 t_j 可检测但 t_k 无法检测的非特征故障能被测试集中其他测试检测即可,即 t_k 必须检测 t_i 和 t_j 的所有特征故障.对已知故障集,那些只能被 t 检测而其他测试无法检测的故障称为测试 t 的特征故障.测试 t 的特征故障可通过二次检测故障仿真获得.在测试 t 的故障仿真过程中,若某故障被检测到两次便将其排除,那些仿真过程只检测到一次的故障即为该测试的特征故障^[5].

下面举例说明测试合并过程:设电路有 3 个输入端,5 个触发器,测试 $t_i = (11011[5], < 101 >, 10100)$ 和 $t_j = (11100[5], < 111 >, 00110)$ 中,第一项为全扫描输入向量,[] 中数字为输入该向量所需移位次数,<> 中为输入向量,最后一项为测试最终状态.用移位数为 2 的有限扫描操作将 t_i 和 t_j 合并为新测试 $t_k = (11011[5], < 101 >, 11100[2], < 111 >, 00100)$,可以看出 $I_{S_j,0}$ 作为新测试的一部分被保留,[] 中数字 2 表示该处为有限扫描操作,移位数为 2.11100 的前两位 11 是用于合并 t_i 和 t_j 的有限扫描操作的扫描输入向量,应用 t_k 后到达状态为 11101,该状态是对 t_i 的最终状态 $L_{S_i} = 10100$ 移位两次并插入 $I_{S_j,0}$ 的前两位 11 得到的,是 L_{S_i} 的移位状态 L'_i .

由于测试集中任意两测试与任意移位数组合都可能产生能够检测参与合并两测试所有特征故障的新测试,因此考虑所有可能性,基于有限扫描操作的测试压缩过程应包括如下步骤.

(1) 以包含动态测试压缩的组合测试集 T_S 为初始测试集.

(2) 对 $S = 0, 1, \dots, L-1$ (S 为有限扫描操作移位数, L 为扫描链长度),对 T_S 中每个测试对 (t_1, t_2) 进行以下操作:

(a) 用 S 移位有限扫描操作合并 (t_1, t_2) ,得到 $t_{1,2}(S)$;

(b) 令 $T_S = (T_S - \{t_1, t_2\}) \cup \{t_{1,2}(S)\}$;

(c) 若 T_S 可检测所有 T_S 检测故障,令 $T_S = T_S$,继续(2);

(d) 否则,放弃 T_S ,保留 T_S .

测试压缩过程中新生成测试还可与测试集中其他测试进行合并,直到再没测试对可以合并时过程结束.对带有 N 测试的测试集 T_S ,可能通过上述步骤合并的测试对总数为 $N(N-1)$,有限扫描操作移位数有 L 种选择,因此初始状态就存在 $N(N-1)L$ 个候选测试对.压缩过程中,若测试 t_1 和 t_2 被移位数为 S 的有限扫描操作合并为测试 $t_{1,2}(S)$,就去掉含有 t_1 或 t_2 的测试对,加入带有 $t_{1,2}(S)$ 的测试对,将后面需要考虑的测试对减少为 $(N-1)(N-2)L$.由于成功合并次数最多为 $N-1$,整个压缩过程最多可能有 $\sum_{i=1}^{N-1} L(N-i+1)(N-i)$ 个候选测试对,该数字往往过大而无法适应实际需求,因此笔者引入启发式方法对候选测试对数量进行限制,降低计算复杂度,实现适应实际需求的测试压缩过程.

2 启发式方法的引入

为限制测试压缩过程的候选测试对数量,降低计算复杂度,引入基于特征 Hamming 距离的启发式方法对候选测试对进行筛选和基于传统 Hamming 距离的启发式方法对候选测试对进行排序,以对压缩过程建立尽可能少且合理排序的候选测试对列表。

为计算特征 Hamming 距离,首先给出扫描输入向量特征值,测试 t_i 中扫描输入向量 $\mathbf{I}_{S_{i,0}}$ 的特征值是 $\mathbf{I}_{S_{i,0}}$ 中用于检测 t_i 特征故障所必需的值. 求解方法为:对 $\mathbf{I}_{S_{i,0}}$ 的每一位,弹出该位值(使其无效),对 t_i 的特征故障进行故障仿真,若所有特征故障都被检测,将当前位标志为非特征值位,否则,将当前位标志为特征值位,回置该位值. 得到测试 t_i 的扫描输入向量 $\mathbf{I}_{S_{i,0}}$ 特征值,即可给出特征 Hamming 距离定义。

定义 1 能被 S 移位有限扫描操作合并的测试对 t_i 和 t_j 的特征 Hamming 距离是对 $\mathbf{I}_{S_{j,0}}$ 的特征值位, t_j 的扫描输入向量 $\mathbf{I}_{S_{j,0}}$ 与应用 t_k 后到达状态之间相异位个数,即 $\sum_{n=1}^m \mathbf{I}_{S_{j,0}}(n) \oplus \mathbf{L}_{S_j}^i(n)$, m 为 $\mathbf{I}_{S_{j,0}}$ 特征值数。

可以看出,若测试对特征 Hamming 距离大于 0,则相应特征值位在应用 S 移位有限扫描操作后到达状态无法与 t_j 的扫描输入状态保持一致,合并后丢失检测 t_j 特征故障的可能性增加,因此,规定只有特征 Hamming 距离为 0 的测试对才能作为相应移位数下的候选测试对。

定义 2 能被 S 移位有限扫描操作合并的测试对 t_i 和 t_j 的传统 Hamming 距离是对 $\mathbf{I}_{S_{j,0}}$ 的所有位, t_j 的扫描输入向量 $\mathbf{I}_{S_{j,0}}$ 与应用 t_k 后到达状态之间相异位的个数,即 $\sum_{n=1}^L \mathbf{I}_{S_{j,0}}(n) \oplus \mathbf{L}_{S_j}^i(n)$, L 为扫描链长度。

可以看出,若测试对传统 Hamming 距离较小,则合并后产生新测试仍能检测 t_j 检测故障的可能性较大,因此,规定传统 Hamming 距离较小的测试对优先级较高,列在候选测试对列表较靠前的位置。

3 测试压缩过程

这部分给出对测试压缩基本思想引入启发式方法实现的静态测试压缩过程. 对含有动态测试压缩的初始测试集 T_S 中测试对 t_i 和 t_j , 在任意移位数 p 下, ($S_{\min,p} \leq S \leq S_{\max,p}$), 首先计算 t_i 的扫描输入向量特征值, t_i 和 t_j 特征 Hamming 距离及传统 Hamming 距离, 然后根据计算结果选出候选测试对并排序, 建立候选测试对列表 P_L , 最后在所有测试对都加入列表后开始测试压缩过程, 直到再没有测试对可以合并为止, 测试压缩过程结束. 为提高运行效率, 将长度为 L 的扫描链分为 W 区间进行, 基于有限扫描的测试压缩过程如下:

- (1) 由组合测试生成过程得到含有动态测试压缩的初始测试集 T_S ;
- (2) 对 T_S 执行二次检测故障仿真, 得到全部特征故障;
- (3) 对 $p = 0, \dots, W - 1$,
 - (A) 根据特征故障获取 T_S 中各测试特征值.
 - (B) 令 $P_L = \emptyset$.
 - (C) 对 $S = S_{\min,p}, \dots, S_{\max,p}$,
 - (a) 对每个测试对 (t_m, t_n) , $t_m, t_n \in T_S$, 若 (t_m, t_n) 对移位数 S 的特征 Hamming 距离为 0, 将 (t_m, t_n, S) 加入 P_L 列表.
 - (b) 当 P_L 为非空时,
 - ① 从 P_L 中删除元素 (t_i, t_j, S') ,
 - ② 合并 t_i 和 t_j 得到 t_k , 移位数为 S' ,
 - ③ 令 $T_S = (T_S - \{t_i, t_j\}) \cup \{t_k\}$,
 - ④ 若 T_S 可检测 T_S 的所有故障,
 - 令 $T_S = T_S$
 - 再对 T_S 执行二次检测故障仿真

• 更新 P_L .

压缩过程通过在 T_S 中插入 t_k 获得 T'_S , 并用 t_i 和 t_j 检测故障对 T'_S 进行仿真. 故障仿真过程分两步进行:

第 1 步, t_k 对 t_i 和 t_j 的所有特征故障进行仿真, 若 t_k 未能检测 t_i 和 t_j 的所有特征故障, 仿真过程结束; 只有在 t_k 检测到 t_i 和 t_j 所有特征故障时才进行第 2 步;

第 2 步, 对由 t_k 开始到 T'_S 中最后一个测试为止的部分测试集 T'_S 进行 t_i 和 t_j 的非特征故障仿真, t_k 之前出现的测试不检测 t_i 或 t_j 检测故障, 因此无需仿真. 若 T'_S 可检测 t_i 和 t_j 所有非特征故障, T'_S 就作为新的 T_S 测试集, 反之, 则放弃 T'_S , 保留 T_S , 开始合并下一测试对.

4 实验结果

这部分以 ISCAS'89 基准电路为对象, 将本方法的结果与几种典型方法的结果进行比较.

表 1 为本方法与初始动态压缩测试集参数比较表. 第 2 列为压缩后测试应用时间比, 第 3 列为压缩后存储器用量比, 第 4 列为本测试压缩过程运行时间, 运行环境为 SUNU80(450M * 2/2G/36G).

表 1 测试参数比较表

电路	测试应用时间比	存储器用量比	运行时间/s	电路	测试应用时间比	存储器用量比	运行时间/s
s208	0.58	0.73	0.4	s526	0.43	0.50	3
s298	0.37	0.47	0.7	s641	0.41	0.75	1.6
s382	0.57	0.62	1.2	s820	0.41	0.85	6.9
s386	0.46	0.70	1.6	s953	0.08	0.42	18.2
s400	0.56	0.61	1.4	s1488	0.32	0.75	15.2
s420	0.61	0.74	1.4	s13207	0.31	0.38	3937
s444	0.47	0.53	1.4	s15850	0.59	0.62	1354.3
s510	0.29	0.74	4				

表 2 为本方法与几种典型方法的测试应用时间比较表. 其中, 测试应用时间根据 $\sum_{i=1}^{N-1} (S_i + 1) + L$ 算出, N 为输入向量个数, S_i 为应用第 i 个输入向量所需移位数, L 为电路全扫描操作移位数. 初始测试集测试应用时间通过令 $S_i = L, 1 \leq i \leq N$ 获得, 压缩后 S_i 为 0 到 L 之间的值. 第 2 列为故障覆盖率, 从表 2 可以看出, 由于压缩过程没有改变测试集中输入向量个数, 而是减少了扫描操作数及扫描操作移位数, 故障覆盖率没有出现下降, 实现了无损压缩. 第 3 列为初始动态压缩测试集测试应用时间, 第 4 列为本方法所需测试应用时间, 后面分别为文献[2-4]中的典型方法所需测试应用时间.

表 2 测试应用时钟周期数比较表

电路	故障覆盖率	初始动态压缩测试集	笔者所提方法的过程压缩后	文献[2]	文献[3]	文献[4]
s208	100	251	146		336	171
s298	100	374	138	216	362	194
s382	100	571	327	473	697	339
s386	100	496	227		369	272
s400	98.6	549	309	433	667	
s420	100	747	453		1057	550
s444	97.1	549	260		1197	285
s510	100	384	113		977	
s526	99.8	1121	482	884	1886	688
s641	100	459	187	263	211	260
s820	100	569	234	390	1019	295
s953	100	2309	186		1268	252
s1488	100	713	227	502		292
s13207	98.5	158119	49428			
s15850	96.7	58603	34639			

从表 2 可以看出本方法对 s208, s298, s382, s386, s400, s420, s444, s510, s526, s641, s820, s953 和 s1488

电路的测试结果都明显优于典型方法. 对大规模电路, 也起到了十分显著的压缩作用, 如对 s13207, 含有动态测试压缩的初始测试集包含 235 个测试, 需要 236 个全扫描操作, 压缩后仅需要 2 个全扫描操作和 226 个有限扫描操作, 测试应用时间仅为初始测试集的 31%. 从存储器需求来看, 初始状态下 s13207 电路候选测试对个数为 $N(N-1)L = 36\,788\,310$, 引入启发式方法对候选测试对数量限制并合理排序后, 实际处理测试对个数仅为 6753 (约为总数的 0.018%). 表 2 结果表明, 相同故障覆盖率下, 本压缩过程平均测试应用时间仅为典型方法的 50% 左右, 压缩效果明显.

5 结 论

针对扫描电路如何在高故障覆盖率下减少测试应用时间问题, 提出了一种基于有限扫描操作的扫描电路静态测试压缩方法, 将两测试间全扫描操作用有限扫描操作代替, 用有限扫描操作将测试 t_i 和 t_j 合并为新测试 t_k , 通过减少测试间的移位操作次数减少测试应用时间. 同时引入基于特征 Hamming 距离和传统 Hamming 距离的启发式方法限制候选测试对数量和给候选测试对排序, 降低计算复杂度, 加速压缩过程. 实验结果表明, 笔者提出方法在相同故障覆盖率下测试应用时间明显少于典型方法.

参考文献:

- [1] Wurtenberger A, Rosinger P, Chakrabarty K, et al. Cost Model Driven Test Resource Partitioning for SoCs [J]. *Electronics Letters*, 2006, 42 (16):915-916.
- [2] Pomeranz I, Reddy S M. Static Test Compaction for Full-scan Circuits Based on Combinational Test Sets and Non-scan Sequential Test Sequences [C]//16th International Conference. New Delhi: VLSI Design, 2003: 335-340.
- [3] Das S R, Assaf M H, Petriu E M, et al. Fault Simulation and Response Compaction in Full Scan Circuits Using HOPE [J]. *Instrumentation and Measurement*, 2005, 54(6): 2310-2328.
- [4] Lin Xijiang, Rajsiki J, Pomeranz I, et al. On Static Test Compaction and Test Pattern Ordering for Scan Designs [C]//Test Conference. Tokyo: 2001 Proceedings International, 2001: 1088-1097.
- [5] Xiang Dong, Li Kaiwei, Fujiwara H, et al. Generating Compact Robust and Non-Robust Tests for Complete Coverage of Path Delay Faults Based on Stuck-at Tests [C]//Computer Design. San Jose CA USA: International Conference ICCD, 2006: 446 -451.
- [6] 梁华国, 蒋翠云. 基于交替与连续长度码的有效测试数据压缩和解压 [J]. *计算机学报*, 2004, 27(4): 548-554.
Liang Huaguo, Jiang Cuiyun. Efficient Test Data Compression and Decompression Based on Alternation and Run Length Codes [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2004, 27(4): 548-554.
- [7] 韩银和, 李晓维. 测试数据压缩和测试功耗协同优化技术 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2005, 117(16): 1307-1311.
Han Yinhe, Li Xiaowei. Co-optimization for Test Data Compression and Test Power [J]. *Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics*, 2005, 117(16):1307-1311.
- [8] 胡兵, 陈光禹, 谢永乐. 基于变移霍夫曼编码的 SOC 测试数据压缩 [J]. *仪器仪表学报*, 2005, 26(11): 1114-1118.
Hu Bing, Chen Guang ju, Xie Yong le. System-on-a-chip Test Data Compression Based on Huffman Shift Codes [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, 26(11): 1114-1118.
- [9] 方建平, 郝跃. 一种有效的片上系统测试数据压缩算法 [J]. *西安电子科技大学学报*, 2006, 33(1):1-10.
Fang Jianping, Hao Yue. Study of an Efficient SOC Test Vector Compression Scheme [J]. *Journal of Xidian University*, 2006, 33(1):1-10.
- [10] 齐利敏, 刘文耀, 吕大伟. 基于分形的快速压缩编码方法 [J]. *西安电子科技大学学报*, 2008, 35(3):373-376.
Qi Limin, Liu Wenyao, Lü Dawei. Faster Compress Coding Arithmetic Based on Fractal [J]. *Journal of Xidian University*, 2008, 35(3): 373-376.

(编辑: 高西全)