

结合预确定距离的 BIST 测试矢量优化

谈恩民, 詹 琰

(桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004)

摘 要: 在分析和介绍了海明距离与笛卡尔距离的基础上, 通过改进细胞自动机生成的测试矢量间的链接性, 提出了结合预确定距离的测试矢量优化方法. 该方法通过设计最大海明距离和笛卡尔距离构造预确定距离序列, 并利用遗传算法的全局寻优得到最佳预确定测试序列. 通过 ISCSA'85 实验结果表明, 该方法生成的预确定测试矢量比 LFSR-CA 结构的测试方法有更高的故障覆盖率和测试效率, 在检测难测故障中效果更明显.

关键词: 海明距离; 笛卡尔距离; 预确定距离序列; 内建自测试; 遗传算法

中图分类号: TP391.76

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2011)09-0043-04

Optimization of BIST Test Vectors with Pre-determined Distance

TAN En-min, ZHAN Yan

(School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: To analyze both hamming distance and cartesian distance, by improved the test sequences' relevance by the classical cellular automate (CA), optimization of BIST test vectors with pre-determined distance is proposed. The method through achieving maximum of the Hamming distance and pre-setting Cartesian distance to generate pre-determined distance test sequences, then gaining the best pre-determined test sequences by the global optimization operation of genetic algorithm. The results of ISCSA'85 experiment indicates that, the pre-determined test vectors generated by this testing method has higher fault coverage ratio and test efficiency than LFSR-CA structure, which makes the method in testing is more effective in testing hard-detected faults.

Key words: Hamming distance; Cartesian distance; pre-determined distance test sequence; built in self-test; genetic algorithm

1 引言

在采用可测试性技术 (Design for Testability, DFT) 的方法中, 内建自测试 (Built in Self-test, BIST) 技术对解决由集成电路规模增大导致数据量增大、生成测试码开销大和提高测试速度方面占据很大的优势, 成为超大规模集成电路测试的一个解决方法之一.

BIST 主要由测试码发生器 TPG、被测电路 CUT 和内测试回答鉴定器 ATE 组成. 线性移位寄存器 (LFSR) 和细胞自动机 (Cellular Automata, CA) 是作为两种经典的测试码发生器, 存在测试矢

量巨大、故障覆盖率低、测试功耗过高等问题. 文献 [1-4] 均利用 CA 产生测试矢量. 文献 [1] 使用针对随机向量难测故障的测试向量作为种子, 测试矢量较长; 文献 [2] 改进了测试矢量间的链接性, 提高了故障覆盖率, 但测试效率比较低; 文献 [3-4] 只是对奇数位矢量进行了取反得到偶数位矢量, 矢量间的链接性比较小.

文中在上述几种方案的基础上, 提出了基于预确定距离序列的 BIST 测试优化方法.

2 海明距离和笛卡尔距离

预确定距离测试序列 (PDDTS), 是一个测试序

列,每次在选择一个新的测试码时都包含一个最大海明距离 MTHD 和一个预先确定的笛卡尔距离的测试序列。

海明距离为 $HD(A, B)$: 对于两个测试码 $A = (a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n)$ 和 $B = (b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_n)$ 之间对应的不同二进制位个数。而一个测试码序列的总海明距离 (THD) 为测试码 a_i 与测试码 a_i 序列中之前的测试码之间海明距离的总和。

例如, $A = (a_1, a_2, a_3, a_4) = (1110, 0001, 1010, 0101)$ 序列中, $THD(a_1) = 0, THD(a_2) = 4, THD(a_3) = 4, THD(a_4) = 8$ 再如: $B = (b_1, b_2, b_3, b_4) = (1110, 0000, 1010, 1111)$ 序列中, $THD(a_1) = 0, THD(a_2) = 3, THD(a_3) = 4, THD(a_4) = 7$ 。

如上两组测试序列, A 序列总的海明距离都是大于 B 序列总的海明距离。仔细观察会发现 A 为逆随机测试序列。因为逆随机测试序列中的每一个测试矢量的补码也在该测试序列中, 所以逆随机测试序列满足了测试序列的总的海明距离最大^[3-4]。因此, 文中采用逆随机测试序列直接求测试集的最大海明距离。

笛卡尔的相关定义^[3,5]:

定义 1 测试码 $A = (a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n)$ 和测试码 $B = (b_1, b_2, \dots, b_j, \dots, b_n)$ 之间的笛卡尔距离

$$CD(A, B) = \sqrt{|a_1 - b_1| + |a_2 - b_2| + \dots + |a_n - b_n|}$$

定义 2 一个测试码序列的总笛卡尔距离 (TCD) 定义为测试码 t_i 与测试码序列中 t_i 之前的测试码之间笛卡尔距离的总和, 即 $TCD(t_i) = \sum_{j=1}^{i-1} CD(t_i, t_j)$ 。

定义 3 测试集 S 的最大总笛卡尔距离 (MTCD) 定义为, 选择测试集中每一个所有可能的测试码 t_i , 使得 t_i 与之前已选择的测试码序列 $t_1, t_2, \dots, t_{i-1}$ 之间的总笛卡尔距离达到最大值, 即 $MTCD(t_i) = \max\{TCD(t_i) = \sum_{j=1}^{i-1} CD(t_i, t_j)\}$ 。

由于测试集的测试矢量比较多, 逐一计算矢量间的笛卡尔距离的工作量将非常大。文中采用了一个折中的方法, 预先确定一个笛卡尔距离。

3 PDDTS 测试序列优化设计

基于线性移位寄存器 (LFSR) 和细胞自动机 (CA) 作为两种伪随机生成结构, 在 BIST^[6-7] 加权伪随机生成中有较多的应用。LFSR 虽然结构简单,

硬件开销小, 但冗余性大; 而 CA 连接关系简单、随机性很强。尤其在 VLSI 中, 一维 CA 阵列具有的局部互联的反馈通路结构, 较 LFSR 更规则^[1]。因此文中采用 CA 结构生成伪随机测试矢量

CA 结构产生的测试序列的位流互相关性很好, 但测试矢量间的链接关系小。由于测试矢量间的故障覆盖率与测试码之间的距离有关。本文在文献^[3]提出的软硬件测试中的预确定距离测试基础上, 提出在内建自测试中构建预确定距离, 提高故障覆盖率; 并利用遗传算法全局寻优特性缩短测试长度, 提高测试效率。整个设计框图如图 1 所示。

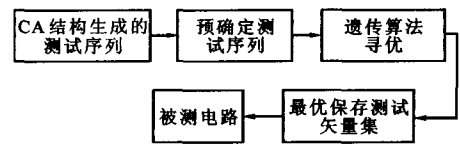


图 1 测试序列生成框图

3.1 构造 PDDTS 测试序列

在预确定距离测试中, 总是选择总距离最大的测试码来进行测试, 以便使得该测试码所检测到的故障与先前码所检测到的故障尽可能的不同。为了得到距离最大的 PDDTS 测试序列, 采用如下策略:

(1) 计算 CA 生成的任意两个测试矢量间的最大海明距离 S , 预设海明距离为 $\sqrt{S}$;

(2) 采用逆随机测试序列获取最大海明距离。

具体实现方法为:

通过对测试序列集依次进行下标编号。对下标编号为奇数的测试矢量分别取下标编号为偶数的反, 下标为偶数的编号之间取预先确定的笛卡尔距离。PDDTS 设计步骤如下:

步骤 1: 对 CA 结构生成的测试矢量下标编号 $T = (t_0, t_1, \dots, t_{2n-2}, t_{2n-1})$;

步骤 2: 取测试矢量 T 中 $t_{2i} (i = 1, 2, \dots, n-1)$, 使 $TCD(t_{2i}) \geq \sqrt{TMHD}$, 同时 $t_{2i} = \bar{t}_{2i}$;

步骤 3: 重复步骤 2, 直到 T 中的所有矢量都处理完毕。如图 2 所示。

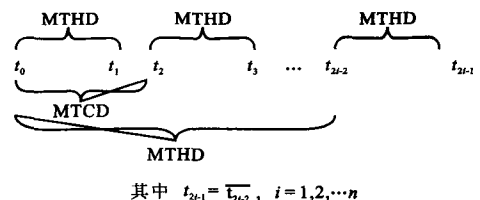


图 2 PDDTS 设计示意图

表 1 给出了 PDDTS 排序过程。其中, $TCD(t_2) = \sqrt{3} + \sqrt{2} = 3.146$ 。

表 1 获取 PDDTS 实例

矢量排序	测试序列 $T = (t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5)$
原始序列	00000,11100,11011,00001,00011,01011
MTCD 序列	00000,10011,00011,11100,00001,01011
PDDTS	00000,11111,00011,11100,00001,11110

根据最大似能原理,若两个测试码间的距离越大,那么能检测到的故障覆盖数就越多.反之,如果两个测试码之间的距离足够小,那么它们可能检测到几乎相同的故障.表 1 表明,PDDTS 序列较原始序列大大改变了测试码间的距离.

3.2 遗传算法对测试序列寻优

遗传算法(Genetic Algorithm,GA)的运算对象借鉴了生物学的染色体和基因等概念,将决策变量的值作为运算对象,映射为编码.仿照达尔文的进化论,对映射后的物种按照决策者的方式进行选择、交叉、变异等运算得到决策者需要的优良物种^[8].

文中对构造的 PDDTS 采用遗传算法全局空间搜索,得到最佳的测试种群.遗传算法中的控制参数设为:种群规模 100,最大进化代数 10000,交叉概率 0.8,变异概率 0.01.该过程的实现流程图 3 所示.

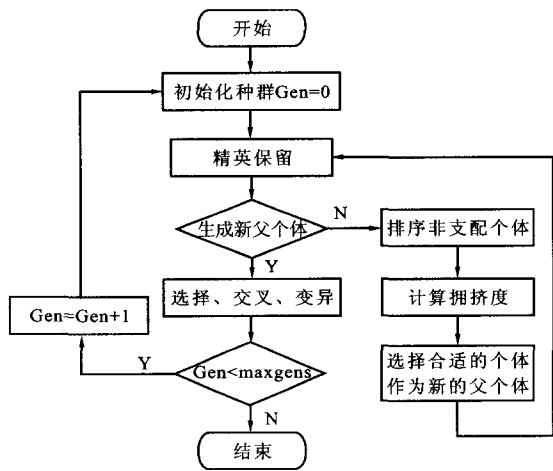


图 3 遗传算法的流程图

(1) 初始化种群

实数编码 CA 规则,构造种群中的每个染色体,然后,初始化种群 $pop(t), x(i)$ 为个体 x 的第 i 个染色体.

(2) 适应度评估

适应度的设计是基于 Pareto 排序方法计算.通过计算 $x(i)$ 的目标函数值,根据目标函数值进行排序 $rank(x)$,将当前个体中目标函数靠前的设为 1,从中选择排序靠前的个体.适应度计算公式为:

$$eval(x) = rank(\min \sum_{i=1}^n |x(i)_{act} - x(i)_{des}|)$$

其中, $x(i)_{act}$ 是个体 $x(i)$ 的实际权重值, $x(i)_{des}$ 是个体 $x(i)$ 的期望权重值.

(3) 遗传算子

① 选择算子

采用锦标赛选择.根据适应度值 $eval(x)$ 的大小,在父代和子代个体中选出比较优秀的个体.具有相同 Pareto 排序的个体得到相同的复制概率.

② 交叉算子

采用二进制交叉中的多点交叉.从选择的个体中随机选择一个作为父个体 Parent1,再随机选择一个作为父个体 Parent2,然后确定双亲的染色体上交叉的位置,互换得到新的个体.

③ 变异算子

采用二进制变异.为了保证遗传算法的有效性,使遗传算法具有局部的随机搜索能力,同时使得遗传算法保持种群的多样性,以防出现非成熟收敛,变异概率取的较小.

(4) 精英保留

将上面过程后形成的新种群与旧种群合并成一个新的种群.

(5) 判断是否满足终止条件,否就返回步骤 (2),若是就结束程序.

4 仿真实验

为了验证文中方法的有效性,通过仿真实验将其与使用 LFSR 和加权 CA 共同生成的测试矢量^[7]进行对比验证.仿真实验是在如下环境下进行的:实验对象采用 ISCAS'85 基准电路,测试工具为 atlanta、fsim,计算机环境是 CPU 为 Intel Pentium (R) 4 CPU 2.66GHz,内存为 1GB,编程工具为 VC6.0.

实验过程如下:首先通过 C 语言编程模拟 CA 结构生成测试矢量,即初始化种群,再对种群个体 PDDTS 算法实现,计算适应度值.然后通过遗传算法中的选择、交叉、变异生成新的种群,对满足条件的个体精英保留.最后利用 fsim 软件把测试集施加到 ISCAS'85 基础电路上进行测试.

图 4 为 C432 电路测试结果图.表 2 为文中方法与 LFSR-CA 结构生成的测试矢量方法的对比数据表.图 5、图 6 为表 2 的效果图.

图 4 分别给出了 C432 电路的基本输入输出端口数、门数、测试长度和故障覆盖率等.清晰直观的

观测测试结果,记录结果并与 LFSR-CA 比较.



图 4 C432 电路测试结果图

表 2 LFSR-CA 与 PDDTS 的测试矢量数及故障覆盖率的比较

ISCAS'85	加权 LFSR-CA		文中测试序列	
	测试 矢量数	故障 覆盖率	测试 矢量	故障覆 盖率%
C432	1 038	97.082%	224	97.710
C880	2 018	96.832%	824	97.862
C1355	1 025	97.967%	636	98.032
C1908	1 021	97.067%	810	97.021
C6288	1 023	99.46%	560	98.561

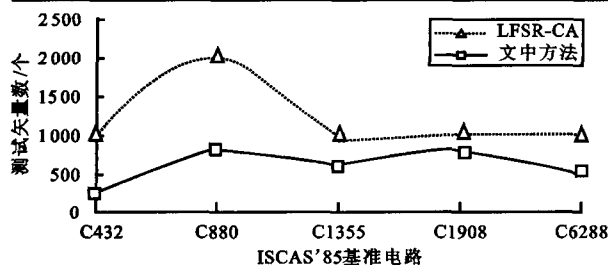


图 5 不同测试电路下的测试矢量数

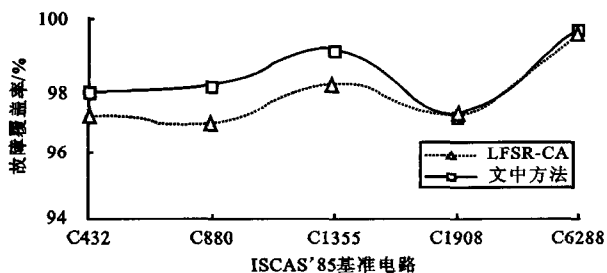


图 6 不同测试电路下的故障覆盖率

图 6 的故障覆盖率是在图 5 给出的测试矢量下得到的结果. 由以上实验结果可以看出, 在不同测试电路下基于加权 LFSR-CA 与文中测试序列相比,

文中的设计方法明显的缩短了测试长度, 提高了故障覆盖率, 提高了测试效率.

5 结束语

文中通过对现有的测试生成结构分析与研究, 结合 CA 结构测试生成优点, 提出基于预确定距离序列. 再通过 GA 寻找最佳测试矢量集的 BIST 测试优化方法, 改善了经典的 LFSR 结构和 CA 结构生成的测试矢量间的链接性, 并通过实验验证该方法缩短测试长度的同时提高了故障覆盖率.

下一步的工作在进一步分析实验结果的基础上, 结合功耗、测试调度等问题实现 BIST 多目标优化设计.

参考文献:

- [1] 谢永乐, 孙秀斌, 王玉文, 等. 数字集成电路的混合模式内建自测试方法[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(9): 1138~1141.
- [2] 谢永乐, 陈光巨. 数字系统单加权集下的随机测试生成方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002(5): 471~474.
- [3] 朱经纷, 徐拾义. 软硬件测试中预确定距离测试[J]. 计算机科学, 2009(5): 133~137.
- [4] Xu Shiyi. Maximum distance testing [C]//Proceeding of the 11th IEEE ATS'02, USA: Guam, 2002: 15~20.
- [5] 蒋继刚. 一种基于多目标遗传算法的 CA 加权测试生成方法[J]. 国外电子测量技术, 2010(4): 25~27.
- [6] 何蓉晖, 李晓维, 宫云战. 一种低功耗 BIST 测试产生器方案[J]. 微电子学与计算机, 2003, 20(2): 36~39.
- [7] 谈恩民, 叶宏. 基于低功耗及加权优化的 BIST 测试生成器设计实现[J]. 微电子学与计算机, 2006, 23(12): 26~29.
- [8] 崔逊学. 多目标进化算法及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 1~269.

作者简介:

谈恩民 男, (1966—), 博士, 教授. 研究方向为计算机辅助测试、集成电路可测性设计等.

詹琰 女, (1986—), 硕士研究生. 研究方向为计算机辅助测试、集成电路可测性设计.