

运用赋值相异生成高效率测试图形

雷绍充, 梁峰

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对传统算法中赋值相异导致测试生成失败的问题, 提出新的解决思路, 利用赋值相异信息确认故障效应传播路径, 以确保每次测试生成成功. 与传统方法不同的是, 新方法通过对故障传播函数的分析, 总结出支配故障传播的规律, 即故障传播不仅仅受线确认条件约束, 还受敏化路径的拓扑结构的约束, 线确认和蕴涵所导致的赋值相异有助于建立敏化正确的故障传播路径. 进而提出自湮没和它湮没的概念和分析方法, 并发展为运用赋值相异信息来确认故障效应传播路径的方法. 新方法可生成精简的、故障覆盖率高的测试图形, 并尽可能多地检测多重故障. 基于 ISCAS85 Benchmark 的实验结果表明, 新方法的测试数据长度和故障覆盖率均优于 Synopsys Tetramax 等现有方法.

关键词: 赋值相异; 测试生成; 敏化路径; 湮没

中图分类号: TN407; TP391.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)02-0195-05

Using Assignment Inconsistence to Generate High Efficient Test Patterns

Lei Shaochong, Liang Feng

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To solve the problem that assignment inconsistence leads to failure of test generation in traditional algorithms, a novel method is developed to identify the correct paths for propagating fault effects by assignment inconsistence and ensure that every test generation is successful. In the method, the rules that dominate the fault propagation are summarized through analyzing fault propagation functions, namely, the faults propagation not only is constrained by line justification, but also depends on the topologies of the sensitized paths. It is found that the assignment inconsistence caused by the line justification and implication is helpful for creating sensitized paths. Moreover, the concept and analyzing method of self-masking and other-masking are presented. The proposed method can generate simplified test patterns with high fault coverage, and can detect multiple faults as many as possible. Experimental results based on ISCAS85 benchmark show that the length of test data and coverage of the proposed method are superior to those of existing methods available.

Keywords: assignment inconsistence; test generation; sensitized path; masking

多年来, 各种自动测试图形生成 (Automatic Test Pattern Generation, ATPG) 方法得以发展和应用, 其共同特色是能够生成非常简短的、与电路规模无关的测试图形, 有效地减少测试时间和测试功耗. 基于 ATPG 测试图形的压缩方法也一直是研究和发展的热点, 但随着超大规模集成电路 (VLSI) 集

成度和复杂度的提高, 传统的 ATPG 方法遇到障碍^[1-5], 主要表现为:

(1) 赋值相异, 即线确认条件和故障激活条件对电路中同一根线赋值矛盾^[2];

(2) 自湮没, 即分支可以传播故障效应, 但根节点不能传播故障效应^[3];

(3)多路径敏化困难,即一些故障需要多路径敏化才可检测得到^[4];

(4)多余的测试生成,即对同一根线重复赋值^[5].

上述问题导致测试生成时间剧增,甚至无法进行.各种解决向后追踪中赋值相异问题的方法,如 Satisfiability (SAT) 技术^[1,6-8]、全局蕴涵技术^[9]、Success-Driven Learning 方法^[10]和预分析^[11]等得以发展,可更好地确认传播路径,但是这些方法仍然不能保证每次测试生成的成功.

由于无扇出电路中每一个线确认问题都能独立求解,而测试生成的不确切性都出现在重聚的扇出电路中,因此本文重点是研究重聚的扇出电路中测试生成的确切性问题,首先从理论上探索多故障多路径传播的可能性,证明确切性,最终形成确保故障效应传播的判断方法.

1 完全线确认条件下故障的多路径敏化条件

研究的前提是敏化路径为完全确认的,即敏化路径上的每一个门的控制输入都满足线确认条件.定义开关函数

$$F(\mathbf{X}) = f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$$

式中: n 为原始输入个数; x_i 为自变量, $i \in (1, n)$, $x_i \in (1, 0)$; $\mathbf{X}$ 为测试图形; F 为电路实现的函数.当其他变量值不变,仅 x_i 的逻辑值变化时,上式可简写成

$$F(x_i) = f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$$

$$\text{或 } F(\bar{x}_i) = f(x_1, \dots, \bar{x}_i, \dots, x_n)$$

式中: x_i 与 $\bar{x}_i$ 为逻辑反的关系.

开关函数 $F(\mathbf{X}) = f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$ 对变量 x_i 的差分定义为

$$\frac{\partial F(\mathbf{X})}{\partial x_i} = F(x_i) \oplus F(\bar{x}_i) \quad (1)$$

式中: $\oplus$ 表示异或运算.

1.1 根节点故障的双路径敏化条件

不失一般性,两扇出分支的重聚电路可简化成图1所示模型,为便于论述,本文把节点(函数)名称与节点(函数)值用同一符号表示,按论述内容自然区别看待.例如,当论及“根节点 a ”,是节点名称为 a ,而当论及“ $a=1$ ”,则是对节点 a 赋值1.

根节点 a 的 $s-a-0$ ($s-a-1$) 故障激活条件为 $a=1$ (或 $a=0$),若选择双路径 $a-b-F_1-y$ 和 $a-c-F_2-y$ 敏化,则在满足完全线确认条件下故障效

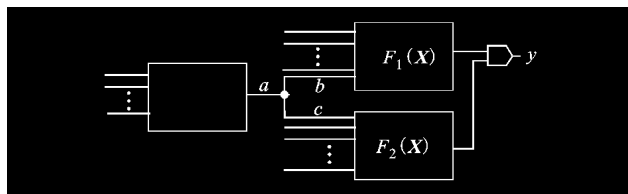


图1 两扇出分支的重聚电路简化模型

应还应沿各个单路径传播,即

$$\frac{\partial F_1(a)}{\partial a} = \frac{\partial F_2(a)}{\partial a} = 1 \quad (2)$$

故障效应观察的条件应是电路有故障时的输出与电路无故障时的输出不同

$$y(a) \oplus y(\bar{a}) =$$

$$(F_1(a)F_2(a) \oplus (F_1(\bar{a})F_2(\bar{a}))) = 1$$

最终得

$$F_1(a) \odot F_2(a) = 1 \quad (3)$$

式中: $\odot$ 表示异或运算.类似地,对于或门、与非、或非、异或门和同或门等组合逻辑门的重聚电路,同样可以得到关系式(3).

结论1 对于根节点 a 的两扇出分支的重聚电路,假定扇出分支的开关函数分别为 F_1 和 F_2 ,且它们分别满足完全线确认条件,则故障可沿双路径传播的条件与重聚的门电路的结构无关,只需符合关系式 $F_1(a) \odot F_2(a) = 1$.

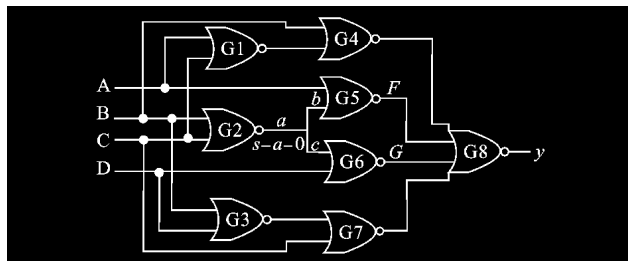
如图2所示,著名的 Schneider 反例电路中,根节点 a 的 $s-a-0$ 故障可根据激活条件和式(3)得

$$a = \overline{B+C} = 1$$

$$\overline{(A+\bar{a})(D+\bar{a})} = 1$$

式中: A, B, C, D 为原始输入.

满足上述方程的 BC 和 AD 值均为 00,经过验证知其为故障 $a(s-a-0)$ 的测试图形.同理可得 $ABCD$ 取值为 0110 是故障 $a(s-a-1)$ 的测试图形.本例比 PODEM 等算法的效率要高得多.



G1~G8 为或非门

图2 Schneider 反例电路

1.2 根节点故障的多路径敏化条件

式(3)可写成如下逻辑等效式

$$F_1(a) F_2(a) = F_1(a) + F_2(a) \quad (4)$$

如图3所示,对于3条和2条以上的敏化路径,假定实现的函数分别为 $F_1, F_2, F_3, \dots$,类似于式(3)的推导,可以推导出根节点 a 的故障多路径敏化条件为

$$F_1(a)F_2(a)F_3(a)\cdots = F_1(a) + F_2(a) + F_3(a) + \cdots \quad (5)$$

结论2 对于根节点 a 的多扇出分支的重聚电路,假定扇出分支的开关函数分别为 $F_1, F_2, F_3, \dots$,且它们分别满足完全线确认条件,则根节点故障可多路径传播的条件为式(5).研究式(5)可以得出

$$F_1(a=1) = F_2(a=1) = F_3(a=1)\cdots = 1(\text{或}0) \\ \text{或 } F_1(a=0) = F_2(a=0) = F_3(a=0)\cdots = 1(\text{或}0)$$

要满足这样的条件,开关函数 $F_1, F_2, F_3, \dots$ 的值要保持一致性,对应的传播路径上的逻辑门也须对称,即(或、与)非门的个数必须同为奇数或偶数.如图4中节点 S 的故障,不能通过双路径 $S-D-E-G-Z$ 和 $S-C-F-Z$ 来传播其效应,因路径上的门不具有对称性.

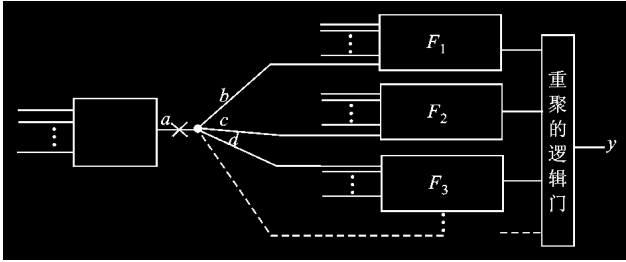


图3 单一故障多路径敏化示意图

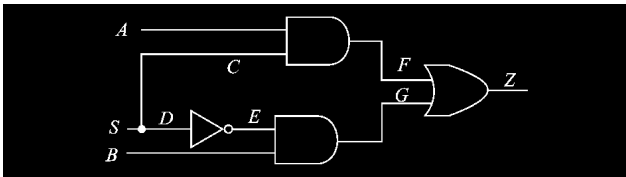


图4 二选一电路

结论3 具有一定结构规律的电路,才可能实现重聚的扇出电路根节点故障的双路径或多路径传播.

重聚的扇出电路的测试生成是组合电路测试生成的最大难点所在,而大多数算法力图完整地解决这一问题,结论3从理论上分析出完全线确认条件下要传播根接点的故障的电路应具有的特征,证明了根节点故障效应多路径传播的条件.

1.3 重聚的多重故障的多路径敏化条件

以上研究的是单故障路径敏化方法,还存在多根线固定于同一逻辑值,即多重固定型故障(multi-

ple stuck at, MSA). 如图5, a_1 和 a_2 为两重 MSA 故障,假定重聚的扇出分支实现的函数分别为 $F_{11}, F_{12}, F_{13}, \dots$ 和 $F_{21}, F_{22}, F_{23}, \dots$, 根据故障敏化条件和类似于式(3)的推导,可以得出

$$F_{11}(a)F_{12}(a)F_{13}(a)\cdots F_{21}(a)F_{22}(a)F_{23}(a)\cdots = F_{11}(a) + F_{12}(a) + F_{13}(a) + \cdots + F_{21}(a) + F_{22}(a) + F_{23}(a)\cdots \quad (6)$$

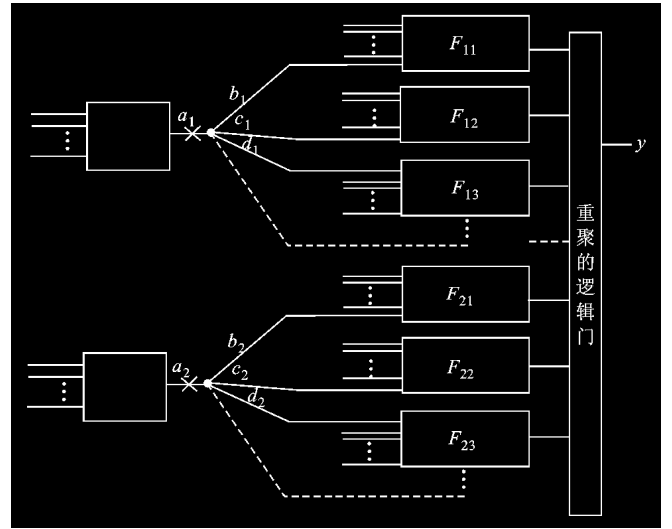


图5 多故障多路径敏化示意图

结论4 对于多重故障 a_1 和 a_2 ,在满足完全线确认条件下故障效应传播的条件为等式(6).

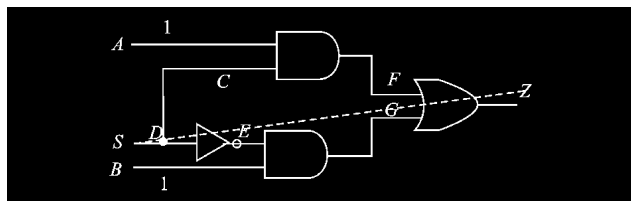
该结论证明了多重故障效应传播的条件,建立了多重故障的测试生成算法理论.

2 部分线确认条件下故障的路径敏化条件

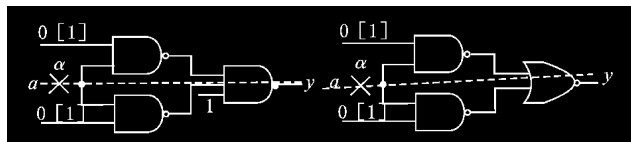
完全靠线确认条件并不能确保故障效应在原始输出可观察到,测试生成最大的难点是无理论依据来判断哪些路径可确切地传播故障效应,导致大量的无效操作.为此本文提出湮没概念,对于故障激活和故障传播条件相矛盾的传播路径,设置线确认条件相反的值,湮没赋值相异的扇出分支.方法有两种,一是故障激活条件就湮没了故障传播效应,称之为“自湮没”,另一种是对敏化路径上的某些门的控制输入置控制逻辑值,称为“它湮没”.典型的自湮没和它湮没方法如图6所示.

3 确切性实现方法

从上面的研究中可以得出,要确定故障效应的成功传播,需要在线确认条件、自湮没方法和它湮没方法之间适当的选择.为便于操作,提出如下概念和

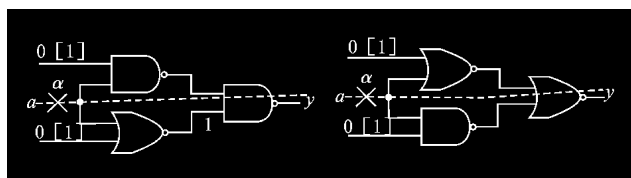


(a) 自湮没



(b) 他湮没 1

(c) 他湮没 2



(d) 他湮没 3

(d) 他湮没 4

图6 湮没方法

术语:

(1) 待定路径, 即从故障源处到重聚的逻辑门的所有路径;

(2) 待确切路径, 即待定路径中符合条件(6)的所有路径;

(3) 待确认路径, 即待定路径中不符合条件(6)的所有路径;

(4) 算子 c , 即 $c \in (1, 0, d, \bar{d})$, d 表示节点无故障时节点逻辑值为 1, 有故障时值为 0, 而 $\bar{d}$ 表示节点无故障时值为 0, 有故障时值为 1.

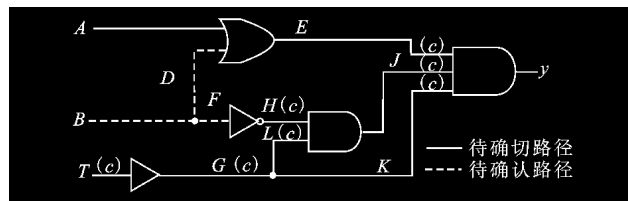
假定从各个故障到重聚的逻辑门的确切路径实现的函数分别为 $P_1, P_2, \dots$, 确认路径实现的函数分别为 $U_1, U_2, \dots$, 则多故障多路径确切传播的条件可用上述概念和术语描述为

$$P_1(c) = P_2(c) = \dots = c(\bar{c}) \quad (7)$$

$$U_1(c)U_2(c)\dots = U_1(c) + U_2(c) + \dots \quad (8)$$

本文的研究问题就转换为: 如何选择尽可能多的确切路径, 尽可能同时满足多个故障效应传播条件, 使得确切路径上算子 c 可以无矛盾地传播到目的门. 如图 7 所示, 待确切路径分别为 $T-G-K$, $T-G-I-J$, $H-J$, $A-E$, 待确认路径为 $B-F-H$ 和 $B-D$, 当 $B=0$ 时, 待确切路径可“确切”地传播沿途各点的故障信息.

现以 ISCAS Benchmark 85/89 电路 C17 为例说明确切路径的分析步骤:

图7 待确切路径、待确认路径和 c 算子传播

(1) 对原始输出为 F 和 G 的与非门的输入分别置信号 c ;

(2) 选择所有的待定路径: $a-j-m-p$, $a-j-n-q$, $b-k-q$, $r-e-k-q$, $r-g-h-j-m-p$, $r-g-h-j-n-q$, $r-g-l-p$, $s-g-h-j-m-p$, $s-g-h-j-n-q$, $s-g-l-p$, $t-l-p$;

(3) 沿每一个待定路径向前追踪 c 或 $\bar{c}$ 信号, 如图 8a;

(4) 向前追踪过程中, 沿路径 $r-e-k-q$, $r-g-h-j-m-p$, $r-g-l-p$ 对信号 e 的赋值矛盾, 确定确认路径 $b-k$, 线确认条件为 $b=0$ “湮没”信号 e , 其他路径则为确切路径, 如图 8b;

(5) 对所有确切路径组成的电路按简单的非扇出组合逻辑电路进行测试生成, 即只对原始输入 a, r, s, t 的故障进行测试生成即可, 可以简单观察出测试图形为 $b=0$, $arst = \{10x1, 1x01, 00x1, 0x01, 0x11\}$;

(6) 对确认路径 $b(r-e)-k-q$ 上的故障进行测试生成, 线确认条件为它湮没 $n=1$, 即 $a=0$, 如图 8c. 同样, 只对原始输入 b, r 的故障进行测试生成, abr 取值为 011 和 010;

(7) 故 C17 的测试图形 $abrst$ 可选为 10100、10010、00101、01111、01101、01000 和 11010.

4 实验

本次实验采用 TMSC 0.18 库和 North Carolina State University 的 ISCAS85 Benchmark Verilog 版本, 借助 Synopsys V-2003.12 的综合分析工具 Design Analyzer 及 ATPG 工具 Tetramax, 在 Sun Blade1000 工作站进行实验, 得到表 1 所示结果.

从表 1 可以分析出, 除 C1908 的故障覆盖率外, 本文方法的测试数据长度和故障覆盖率均优于 Synopsys Tetramax 的, 再与现有资料的测试数据长度和故障覆盖率比较, 本文方法也优于现有其他方法. 进一步分析表明, 基于本文方法的确切性算法的执行时间与电路中门的个数成正比, 而其他算法

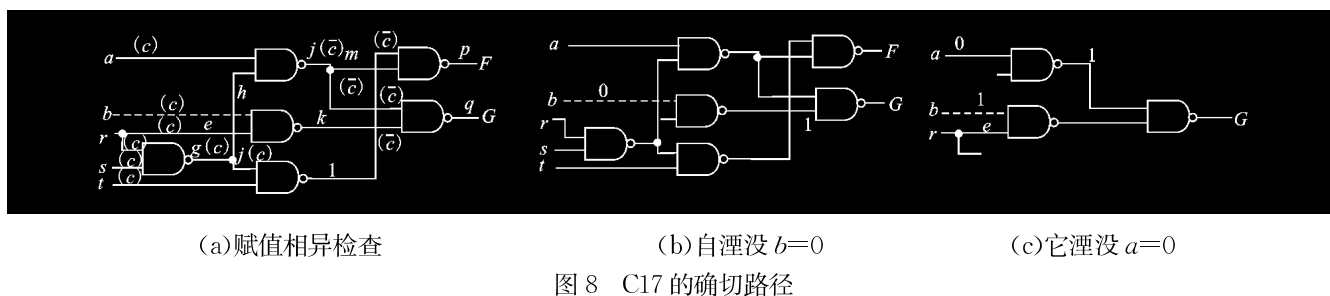


表1 测试效率比较

电路	原始输入/ 个	测试图形数/个		故障覆盖率/%	
		本文方法	ST方法	本文方法	ST方法
C17	5	7	7	100	100
C1908	33	82	99	99.48	100
C432	36	26	85	100	99.17
C5315	178	36	135	100	99.96
C2670	233	43	119	100	100
C3540	50	83	182	100	99.97
C499	41	51	86	100	100
C6288	32	12	83	100	99.96
C7552	207	72	196	100	99.97
C880	60	15	72	100	100
C1355	41	83	131	100	100

注:ST即为 Synopsys Tetramax.

的执行时间与电路中门的个数的平方成正比,因此本文方法可大大降低测试生成时间.

5 结束语

本文在分析重聚的扇出电路的双路径敏化、重聚的扇出电路的多路径敏化、重聚的多重故障的多路径敏化传播函数的基础上,总结故障效应传播的确切性条件,提出了自湮没和它湮没的概念,进而发展了确切性方法,该方法从理论上解决了测试生成算法的一个难题,在实际操作中,能最大可能地检测多重故障,故障覆盖率高.基于本文的理论和方法,可大大加速组合电路的测试生成.

参考文献:

- [1] Lingappan L, Ravi S, Jha N K. Satisfiability-based test generation for nonseparable RTL controller-datapath circuits [J]. IEEE Trans on CAD, 2006, 25 (3): 544-557.
- [2] Mourad S. Principle of testing electronic systems

[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000.

- [3] Bushnell L M, Vishwani D A. Essentials of electronic testing for digital, memory and mixed-signal VLSI circuits [M]. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [4] Amyeen M E, Fuchs W K, Pomeranz I, et al. Fault equivalence identification in combinational circuits using implication and evaluation techniques [J]. IEEE Trans on CAD, 2003, 22(7): 922-936.
- [5] Dwarakanath K N, Blanton R D. Exploiting dominance and equivalence using fault tuples [C] // Proc 20th IEEE VLSI Test Symposium. Los Alamitos, USA: IEEE CS Press, 2002: 269-274.
- [6] Stephan P, Brayton R, Sangiovanni A. Combinational test generation using satisfiability [J]. IEEE Trans on CAD, 1996, 15(8): 1167-1176.
- [7] Junhao S, Görschwin F, Drechsler R, et al. PASSAT: efficient SAT-based test pattern generation for industrial circuits [C] // Proc IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI. Los Alamitos, USA: IEEE CS Press, 2005: 212-217.
- [8] Yang K, Cheng K T, Wang L C. TranGen: a SAT-based ATPG for path-oriented transition faults [C] // IEEE Proc ASP-DAC 2004. Los Alamitos, USA: IEEE CS Press, 2004: 92-97.
- [9] Kameshwar C, Michael S H. Decision selection and learning for an 'all-solutions ATPG engine [C] // Proceedings of International Test Conference. Los Alamitos, USA: IEEE CS Press, 2004: 607-616.
- [10] Lintao Z, Madigan C F, Moskewicz M H, et al. Efficient conflict driven learning in a Boolean satisfiability solver [C] // IEEE/ACM International Conference on Computer Aided Design. Los Alamitos, USA: IEEE CS Press, 2001: 279-285.
- [11] Sheng S, Hsiao M S. Success-driven learning in ATPG for preimage computation [J]. IEEE Design & Test of Computers, 2004, 21(6): 504-512.

(编辑 刘杨)