

改进 MT 模型的互连线串扰故障检测

孙 元, 颜学龙, 李 鹏

(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: 针对片上系统 IP 核间互连线串扰故障的检测问题, 提出了一种新的激励检测模型—改进型 MT 模型. 改进型 MT 模型建立在传统的 MT 串扰故障检测模型基础上, 对 MT 模型存在的大量矢量冗余进行精简. 该模型通过对种子的筛选及施加, 在改进的边界扫描单元构架产生全部的测试矢量. 改进型 MT 模型在保证 100% 故障覆盖率的前提下, 通过软件仿真及数据比较, 验证了改进型 MT 模型的可行性及高效性.

关键词: 串扰故障; 互连; MT 模型; 片上系统; 矢量冗余

中图分类号: TN303

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2013)10—0134—04

Crosstalk-induced Delay Faults Detection Based on Improved MT Mode

SUN Yuan, YAN Xue-long, LI Peng

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

Abstract: A new incentive detection model—the improved Multiple Transition (MT) fault model is proposed for the detection problem of crosstalk faults of IP core interconnect of system-on-chip. The improved MT fault model is built on the traditional MT fault model and compacting a large number of vector redundancy. The enhanced boundary-scan generate all the test vectors by screening and applying the seeds. The improved fault MT model makes sure its fault coverage is 100%. The results of software simulation and data comparison prove that the improved MT fault model is feasible and high efficiency.

Key words: crosstalk; interconnect; MT fault model; System-on-Chip; vector redundancy

1 引言

随着电路系统向着高密度、高速度的方向发展, 数字信号速率达到 Gbps, 高速电路中信号传输衰减和噪声传播等问题日益严重, 引发了严重的信号完整性问题^[1-3]. 针对信号完整性问题引发的串扰故障, 国内外一些学者已经提出了许多串扰故障激励检测模型. Cuvillo 等提出的最大激励串扰故障 (Maximal Aggressor Fault, MAF) 测试模型^[4], 得到的测试矢量集能够全部覆盖电容性串扰故障. 然而, 一些非 MAF 模型测试激励却产生了更为严重的串扰故障. 针对 MAF 模型的不完备性, Mohmmad. H 提出多重跳度 (Multiple Transition, MT) 故障模型^[5], 它同时考虑了交叉耦合电容和电感对互连线的影响, 可以确保潜在的信号完整性故障被

全部检测出来. 然而该模型的测试矢量数目庞大, 存在大量的矢量冗余. HT 模型^[6]是针对 MT 故障模型的冗余性, 提出的一种精简模型. 它通过对互连总线信号完整性故障发生原理的分析, 认为互连线的寄生电容和寄生电感具有对称的特性.

本文提出改进型 MT 模型, 将精简对象归纳为两类—尖峰故障和延时故障. 通过改进的边界寄存器产生改进型 MT 模型的测试矢量, 利用软件仿真在测试效率上进行分析计算, 验证在不降低故障覆盖率的前提下, 改进型 MT 模型使用较少的测试矢量能够完成对串扰故障的全部检测.

2 MT 模型与 HT 模型

2.1 MT 模型

MT 模型针对的串扰故障主要有 4 类, 即正向

尖峰脉冲、负向尖峰脉冲、正跳变延时、负跳变延时。MT 模型对测试矢量集的定义为:施加在攻击线上的测试矢量对必须同时发生翻转,而施加在受害线上的激励可以保持静态或翻转。三线系统中,中间线为 V 线(受害线),其余为 A 线(攻击线)的 MT 模型测试矢量集如表 1 所示。

表 1 MT 模型测试矢量集

正向尖峰	负向尖峰	上升时延	下降时延
000,101	010,111	000,111	010,101
001,100	011,110	001,110	011,100
100,001	110,011	100,011	110,011
101,000	111,010	101,010	111,000

MT 模型具有 100%故障覆盖率, n 线系统所需要的种子数为 $n \times 2^{n-1}$, 矢量数为 $n \times 2^{n+1}$, 采用 PG-BSC(改进的边界扫描单元)产生测试矢量时,施加的时钟(update)数为: $5n \times 2^{n-1}$ 。

2.2 HT 模型

HT 模型根据互连线寄生电容和寄生电感的产生具有对称的特性,得到了信号完整性问题的对称性规律^[6]:距离 V 线相同距离的 A 线上发生的相同信号翻转对 V 线上传输的信号的完整性影响是相同的。例如三线系统中中间线为受害线时,施加测试矢量对 P1 (0 0 1, 1 0 0) 以及测试矢量对 P2 (1 0 0, 0 0 1) 对 V 线上信号的完整性影响效果是同样的。HT 模型在测试矢量集中使用具有本身对称性的测试矢量和非本身对称性的测试矢量去除冗余的部分,因此使用 HT 模型测试一个 N 总线系统所有的信号完整性故障所需的测试矢量数为: $n \times (2^n + 2^{\frac{n+1}{2}})$ 。HT 模型以文献[7]仿真结果为依据,选择临近被测 V 线的 k ($k \leq m$ 或 $k \ll m$) 根信号线作为施加影响的 A 线。

3 冗余分析

MT 模型解决了串扰故障 MAF 模型故障覆盖率较低的问题,不仅包含了 MAF 故障的测试集,而且包含所有产生较大串扰效应的非 MAT 测试向量对。但是 MT 模型在提供了 100%故障覆盖率的同时,也存在大量的测试矢量冗余。

在 MT 模型中,存在许多测试矢量对(V_1, V_2), 它的向量 V_2 和其他测试矢量对的向量 V_1 相同,可以将这两组测试矢量对合并,生成包含 3 个矢量的矢量组,它可以连续激励串扰缺陷两次,同时某些矢

量对可以同时激活多根受害线上的串扰缺陷。但是在原始的故障检测模型中,这些测试矢量对被多次重复的应用^[8]。测试矢量冗余情况可以根据以下两方面进行分析:

(1)不同受害线的时延故障测试矢量冗余。由于 MT 模型的时延故障测试矢量产生机理是受害线和攻击线同时发生跳变,但并没有对正向跳变还是负向跳变进行要求,因此相同的时延故障测试矢量可以同时激励不同受害线的时延故障。例如表 1 中测试上升时延故障的测试矢量对 $P(000,111)$,不仅是中间线为受害线的时延故障测试激励,同时可以测试第一根线和第二根线为受害线时的时延故障。

(2)中间向量相同的测试矢量冗余:如表 1 中测试尖峰故障的测试矢量对 $P_1(000,101)$ 和 $P_2(101,000)$,测试矢量对 P_1 的向量 V_2 和测试矢量对 P_2 的矢量 V_1 相同,存在向量冗余。可以将双矢量的向量组 P_1, P_2 变成三向量的一个矢量组 $P(000,101,000)$ 或 $(101,000,101)$;测试时延故障时,测试矢量对 $Q_1(000,111)$ 和 $Q_2(111,000)$,中间测试矢量相同,可以精简为三矢量的测试矢量组 $Q(000,111,000)$ 或 $(111,000,111)$ 。

4 改进型 MT 模型

改进型 MT 模型在时延故障和尖峰故障两方面面对传统 MT 模型进行精简。通过对不同的故障模型种子的选拔,最终得到了改进模型的测试矢量集。本文提出了 N 线系统的具体改进方法,并针对奇数线系统和偶数线系统进行验证。

4.1 N 线系统

改进 1:针对时延故障的矢量冗余精简。时延故障测试矢量集的产生机理是受害线与攻击线同时发生翻转。根据产生机理,当测试时延故障时,所有传输线均可视为受害线。为此,可将所有传输线同时翻转的测试矢量集,做为所有受害线的时延故障测试矢量集。而具有相同矢量的测试矢量组可以精简为一个三矢量的矢量组。种子的选择与矢量变化如下:

- (1)找到所有传输线可能的跳变情况。
- (2)总有两个测试矢量,它们的所有信号跳变相反,从中选择一个作为测试时延故障的种子。例如三线系统的 001 与 110,选择其中的一个 001 或 100。
- (3)所有的种子跳变两次得到全部的测试矢量组。

改进 2:针对尖峰故障—尖峰故障的测试矢量集的产生机理是受害线保持不变,攻击线同时翻转。

根据第二类矢量冗余分析,将两个具有相同矢量的矢量对精简为一个三矢量的尖峰测试矢量组.种子的选择与矢量变化如下:

(1)选定要检测的对象为第 i 根受害线.受害线保持不变,其余传输线作为攻击线.

(2)受害线相同,攻击线信号正好相反的两个测试矢量只选择一个.

(3)受害线与攻击线的信号都相反的两个测试矢量只选择一个.

(4)通过(2)、(3)的筛选,得到测试尖峰故障的种子.种子的受害线每跳变一次,攻击线跳变三次,1个种子共得到六个测试矢量.

4.2 改进型 MT 模型 N 线系统的参数计算

由上节的筛选方法得到种子数 C :

$$C = C_p + C_q = (n+2)2^{n-2} \quad (1)$$

式中, C_p 表示改进 1 的种子数, C_q 表示改进 2 的种子数.

根据改进 1 和改进 2 不同的矢量变化情况,所需要的测试矢量数 S 和施加的 update 数 U 计算公式如下:

$$S = S_p + S_q = C_p + 2C_q = (n+1)2^{n-1} \quad (2)$$

$$U = U_p + U_q = 3C_p + 6C_q = 3(3n+3)2^{n-1} \quad (3)$$

式中, S_p 表示改进 1 的测试矢量数, S_q 表示改进 2 的测试矢量数, U_p 表示改进 1 的 update 数, U_q 表示改进 2 的 update 数.

4.3 奇线系统与偶线系统实例证明

4.3.1 三线系统的改进型 MT 模型:

改进 1:三线系统的时延故障可以精简成四个三矢量的矢量组:(000,111,000)、(001,110,001)、(010,101,010)、(100,011,100).若三线系统的时延故障种子选择为:000,001,010,100.那么测试矢量变化:000→111→000,001→110→001,010→101→010,100→011→100.

改进 2:选定第二根传输线为受害线.矢量组精简为:(000,101,000)、(001,100,001)、(010,111,010)、(011,110,011).若选择测试串扰故障的种子为:000,001.那么测试矢量变化:000→101→000→111→010→111,001→100→001→110→001→110.

4.3.2 四线系统的改进型 MT 模型

改进 1:针对时延故障种子的选择.

(1)选择矢量 0000 作为种子施加.

(2)选择有一个是 1,其他为 0(或者有一个是 0 其它为 1)的测试矢量.

(3)选择有两个是 1,其他为 0 的测试矢量,传输线信号相反的两个测试矢量只选择一个作为种子施加.

改进 2:针对尖峰故障种子的选择.

(1)选择 0000 作为尖峰故障的种子.

(2)选择受害线的信号为 0,攻击线中有一条与受害线信号不同的测试矢量作为尖峰故障的种子.若选定要检测的对象为第三根受害线,则种子为:0001,1000,0100.

5 MT 改进模型的生成构架与实现

5.1 测试矢量的生成构架

IEEE Std 1500 测试壳的边界扫描寄存器(WBR)主要由边界扫描单元(BSC)组成,为了实现测试激励和测试响应的移位、更新和捕获等功能.^[9-10]本文在文献[5]基础之上将 PGBSC 单元稍作改进,作为改进型 MT 模型测试矢量的硬件实现.

边界扫描技术的核心思想是所有寄存器串接起来构成了一个可以串行移位的边界扫描^[11-12].多个 PGBSC 单元构成的边界扫描链,可以针对包括串扰故障的互连测试故障模型进行多线系统扫描.改进的 PGBSC 单元,具体实现如图 1 所示.

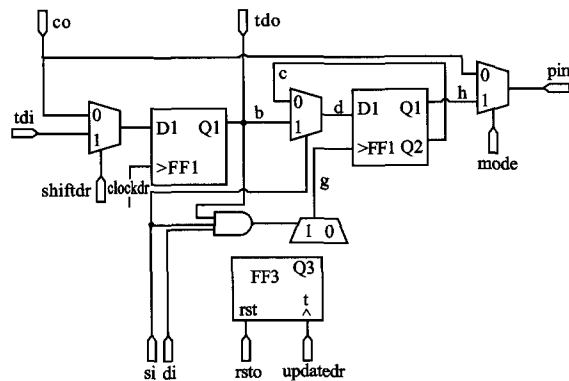


图 1 改进的 PGBSC 单元原理图

5.2 改进的 PGBSC 单元的测试矢量生成

为了符合改进型 MT 模型测试矢量的生成要求,改进的 PGBSC 单元在两方面进行改进:

(1)增加了 di 选择信号,用于对时延故障和尖峰故障两种故障测试方式进行选择.

(2)为实现精简后的三矢量组的产生,将原本的二分频器变为四分频器,确保了测试尖峰故障时受害线每翻转一次,攻击线翻转三次.

改进的 PGBSC 单元在三种模式下工作:

(1)时延故障检测模式:di=0 时选择时延故障

模式, tdi 端输入时延故障种子. 当 $si=0$ 时储存输入的数据, $si=1$ 时在时钟信号 updatedr 下发生信号翻转. 时钟信号跳变两次产生全部的测试矢量, 在 pin 端输出.

(2)尖峰故障检测模式: $di=1$ 时选择尖峰故障模式. tdi 端输入受害线选择信号和种子, $si=0$ 时存储数据, si 为 1 时信号翻转. 由受害线选择信号选择 FF2 的时钟周期. 受害线信号每翻转一次, 攻击线翻转三次, 测试矢量在 pin 端输出.

(3)非完整性检测模式: 作为传统的边界寄存器工作在正常模式.

6 仿真结果与比较

6.1 仿真结果

本文采用 Quartus ii 软件对三线系统进行时序仿真, 改进型 MT 模型的测试矢量的生成分为两部分: 尖峰故障矢量生成及时延故障矢量生成.

三线系统时延故障施加四个种子: 000、001、010、100. 每施加一次种子, 信号翻转两次, 产生全部的时延故障测试矢量. 时序仿真图如图 2 所示.

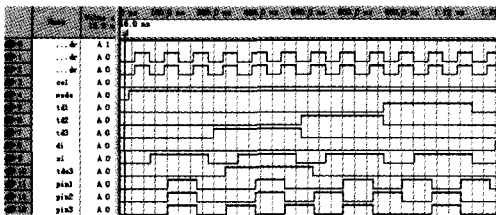


图 2 时延故障矢量产生时序仿真

中间线为受害线时的选择信号为 010. 施加尖峰故障的种子: 000, 001. 每施加一个种子, 受害线翻转一次, 攻击线翻转五次. 时序仿真图如图 3 所示.

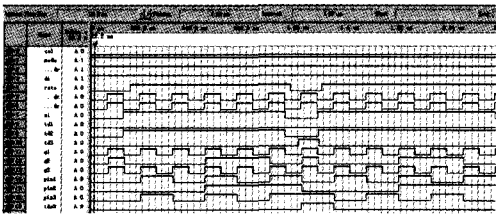


图 3 尖峰故障矢量产生时序仿真

6.2 本文提出的模型与 MT、HT 模型的效率比较

本文改进的 MT 模型与传统 MT 模型、HT 模型在不同总线系统所需测试矢量数的比较如表 2 所示.

从表 2 中可以看到, 本文改进的 MT 模型在故障覆盖率为 100% 的前提下, 测试速率提高, 施加的测试矢量减少. 而且随着 N 线系统的复杂性增加, 精简的效果越明显.

表 2 改进型 MT 模型与传统 MT 模型的比较

所需矢量数	三线系统	四线系统	五线系统
MT	48	128	320
HT	36		200
本文	16	40	96

7 结束语

本文所提出的模型对对称和非对称的传输线系统都具有适用性和普遍性. 改进型模型在保证不改变原有故障覆盖率的条件下, 减少测试矢量的产生, 进一步缩短串扰测试的时间, 降低了测试成本, 体现了改进型 MT 模型的高效性. 为片上系统的高速互连信号完整性问题的发展提供了一定的理论基础和技术支持.

参考文献:

[1] Narender Hanchate, Nagarajan Ranganthan. Simultaneous interconnect delay and crosstalk noise optimization through gate sizing using game theory[J]. IEEE Transactions, 2006(55): 1011-1023.

[2] 田雨, 童玲. 微波多层电路过孔散射参数测量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(6): 555-560.

[3] 丁同浩, 李玉山. 传输线耦合下的差分对共模特性分析[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(7): 1485-1492.

[4] Cuvellio M, Dey S, Bai X, et al. Fault modeling and simulation for crosstalk in system-on-chip interconnects[J]. Proceedings of the IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design. Piscataway, N S, USA: press, 1999: 297-303.

[5] Mohammad HT, Nisar Ahmed, Mehrdad Nourani. Testing SoC interconnects for signal integrity using extended JTAG architecture[J]. IEEE Trans CAD of IC and Syst, 2004, 23(5): 800-811.

[6] 张金林, 沈绪榜, 陈朝阳. SoC 中 IP 核间互联总线完整性故障测试模型[J]. 电子科技大学学报, 2007(3): 611-613.

[7] JIN C B. Weighted fuzzy pattern matching[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1988(4): 474-480.

[8] 张颖, 李华伟, 李晓维. SoC 总线串扰的精简 MT 测试集[J]. 计算机辅助设计与图形学报, 2008, 21(4): 474-480.

[9] IEEE Std 1500. IEEE standard testability method for embedded core based integrated circuits[S]. 2005.

(下转第 143 页)

- against passive logging attacks[C]//Proc of the 2003 IEEE Symposium on Security and Privacy, Washington, DC, USA; Computer Society, 2003
- [7] 徐红云, 陈建二, 陈松乔, 等. 匿名通信系统中统计型攻击模型研究[J]. 小型微型计算机系统, 2004, 25(11):1926-1929.
- [8] Stefan Savage, David Wetheral, Anna Karlin, et al. Practical network support for IP traceback, department of computer science and engineering[R]. University of Washington, Seattle, Technical Report UW CSE — 00—02 01.
- [9] Micah Adler, Tradeoffs in probabilistic packet marking for IP traceback[J]. Department of Computer Science, 2001(9):842-851.
- [10] 林闯. 计算机网络和计算机系统的性能评价[M]. 北京:清华大学出版社, 2001.
- [11] Harrison P G, Patel N M. Performance modeling of communication networks and computer architectures [M]. Boston: Addison-wesley, 1993.
- [12] Trivgdi K S. Probability & statistics with reliability, queuing, and computer science application[M]. Boston: Prentice-Hall, 1982.
- [13] Hock N C. Queuing modeling fundamentals[M]. NY: John Wiley&Sons Ltd, 1997.
- [14] Higginbottom G N. Performance evaluation of communication networks[M]. USA: Artech Home, 1998.
- [15] Nico M Van Dijk, Queuing networks and product forms-A system approach[M]. NY: John Wiley&Sons Ltd, 1993.

作者简介:

程昊男, (1976-), 硕士, 高级工程师. 研究方向为网络信息安全及特种通信工程技术.

(上接第 137 页)

- [10] 李广进, 陈圣俭, 牛金涛, 等. 数字 IP 核的 IEEE Std 1500 外壳构架设计研究[J]. 微电子学与计算机, 2012, 29(10):42-47.
- [11] IEEE, IEEE Std 1149. 1- 2001 standard test access port and Boundary-Scan Architecture[s]. New York: IEEE Standard Board, 2001.
- [12] 颜学龙, 胡和娟, 李海辉. 基于 JTAG 的矢量生成型边界扫描架构设计与实现[J]. 微电子学与计算机, 2011,

28(3):31-35.

作者简介:

孙元 (1987-), 硕士. 研究方向为信号完整性、集成电路测试、SOC 测试等.

颜学龙 (1962-), 教授. 研究方向为信号完整性、集成电路测试、SOC 测试等.