

一种片上网络路由测试方法研究

许川佩, 胡 旭

(桂林电子科技大学 电子工程学院, 广西 桂林 541004)

摘 要: 对片上网络路由器的结构进行了分析, 建立了相应的故障模型. 针对此故障模型结合内建自测试, 提出了一种基于量子遗传算法的测试矢量传递路径寻优方法. 该算法具有收敛速度快, 精度高等优点. 最后通过对测试故障覆盖率和测试时间进行分析表明这种测试方法具有较高的故障覆盖率、较少的测试时间.

关键词: 片上网络; 量子遗传算法; 路由; 故障模型

中图分类号: TN47

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2011)07-0205-04

A Research of Network-on-Chip Routers Test

XU Chuan-pei, HU Xu

(School of Electronic Engineering, Guilin University of Electronic, Guilin 541004, China)

Abstract: In this paper, we first analyse the structure of NoC routers and build the fault model of the NoC routers. For this fault model and combining BIST(built-in self-test), we put forward a method to find the best path for test vector transmission based on quantum genetic algorithm. The algorithm has fast convergence rate and high accuracy. Finally, the test fault coverage and test time analysis shows that this test method has a high fault coverage, smaller test time when compared with other test method.

Key words: network-on-chip (NoC); quantum genetic algorithm; router; fault model

1 引言

随着集成电路制造工艺的持续发展, 在一颗芯片可集成数十甚至数百个处理器联合工作的超复杂电路系统. 基于共享总线互连机制的传统片上系统(System-on-Chip, SoC)体系结构将遇到无法逾越的障碍. 在 90 年代末, 提出了一种新的互连结构, 即片上网络(Networks-on-Chip, NoC)^[1-3].

NoC 的测试包括 NoC 本身的测试(路由与通道的测试)和内嵌 IP 核的测试. 针对路由(Router)测试的设计一般有两种思路: 一种是借助测试外壳的设计来达到测试的目的^[4], 另一种思路是在 NoC 中选取一个或多个 Router 与 ATE 相连作为测试访问开关(TAS), 通过一定的路由方法让测试数据通过 TAS 在 NoC 中传输, 然后依据一定的错误控制机制来报错或纠错. 对 Router 的测试主要包括路由逻辑的测试和输入输出缓冲区(FIFO)的测试. 由于

路由逻辑结构简单, 测试较容易, 而 FIFO 在芯片面积开销上占很大的比重, 其数量多, 位置分散, 测试数据存取困难, 所以对 Router 的测试主要是研究对 FIFO 的测试. 对 FIFO 的测试主要有传统的 BIST 测试和 Split 测试^[5]两种方法. 文中提出了一种基于量子遗传算法的路由测试方法. 该方法借助量子遗传算法并结合内建自测试方法, 通过对测试矢量传递路径进行优化选择, 以提高测试的效率.

2 NoC 路由结构分析及故障模型

2.1 NoC 路由结构

路由器是片上系统出现变革的关键部件, 把路由器应用到片上系统上来源于现代互联网的启发, 其作用也和互联网中路由器的作用类似. 文中针对常见的二维片上网络^[6]进行研究, 其路由的内部结构如图 1 所示. 一个完整的路由节点应该包括输入端口、输出端口、路由表、缓存空间、仲裁器等部

分^[7]. 其中 FC 表示流量控制模块,其作用是翻译握手协议和选择写入虚拟通道;FIFO 表示输入数据缓冲模块,主要负责输入数据的接收和暂存;对于平面的路由节点微结构来说,FIFO 应该在有 5 个输入接口中存在,分别代表东、南、西、北和本地 5 个方向.本地方向与本地的 IP 核(Intellectual Property core)通过 NI(Network Interface)相连接.每一个输入接口可以通过其他 4 个非本方向的输出口请求输出数据.路由仲裁控制器用来对请求同一输出端口的不同输入模块进行仲裁.数据交换逻辑主要负责路由器内输入输出数据的交换.

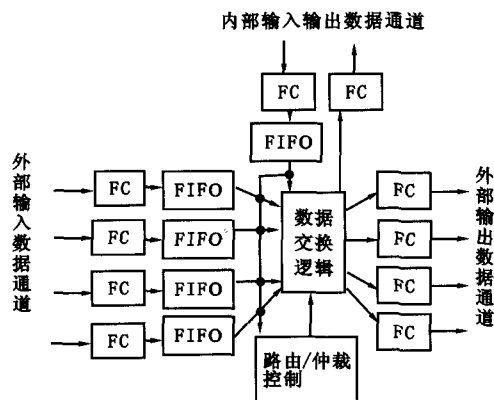


图1 NoC路由内部结构

2.2 NoC路由故障模型

目前对 NoC 路由 FIFO 的测试研究中^[8],通常使用基于双端口 SRAM 的移位型 FIFO 的功能模型和功能故障模型,文中也采用这种 FIFO. 文中在深入分析了 NoC 路由 FIFO 结构的基础上得出 FIFO 的故障模型包括:固定型故障(SAF)、转换故障(TF)、耦合故障(CF)和数据保持故障(DRF)、多端口故障(MPF)、地址解码故障(AF)、控制信号故障等.为了便于计算故障覆盖率,以固定型故障为研究对象.

3 NoC路由测试问题描述

3.1 NoC路由测试问题描述

文中的主要测试研究对象为 NoC 路由 FIFO,对于 FIFO 测试,目前研究的也是比较成熟的,常用的测试方法是 March 测试算法,在 NoC 中由于 FIFO 在分散在路由网络中,所以在测试矢量传递的时候要考虑如何传递测试矢量的问题,即如何实现在网络中尽快的测完所有的 FIFO 以及如何在响应输出端进行故障定位,明确是哪个路由的 FIFO 发生了故障.对于如何传递测试矢量和尽快测完所有路由是本文的重点.对于测试矢量生成及测试响

应分析采用内建自测式(BIST)结构,测试图形生成器用简单的状态机和移位寄存器构成并负责生成路由 FIFO 的测试矢量,并替代 March 算法中的“1”,测试矢量取反后替代“0”.测试响应空间压缩器使用 XOR-OR 网络来实现把每个路由器的 FIFO 输出合并为单一序列,测试响应分析器主要由“1”探测器构成,由于每个路由内部所有 FIFO 结构相同,因此在它们无故障时测试响应必定相同,通过输出响应比较就可以确定被测 NoC 有无故障.对于故障定位采用文献[9]所述的方法,文中对每个路由设置两个测试矢量响应比较传递链路,一个行链路,一个列链路,对路由网络的每一行,每一列都设置一个 XOR 比较器,如图 2 所示.图中只给出了一行示意图,其中 TR 表示测试响应空间压缩,当比较器输出响应序列中含有 1 表明该行(列)有路由出错,反之全为 0 表明该行(列)无错.当有错时,结合对应的列(行)就可以定位故障到路由器.

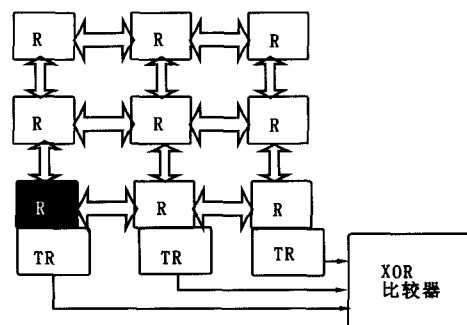


图2 NoC路由测试结构示意图

3.2 NoC路由测试矢量传递问题

在测试模式下,首先应该找到一条最优传递路径,使得测试代价最小,效果最好,最优路径找到后使用特殊的路由分组实现对路由器路由表的设置,当路由器收到分组信息后,将分组中的地址与本地地址比较,如果相同,则设置路由表,当然所有路由表设置完成,测试测试路径建立,可以开始传递测试矢量.

假设 NoC 网络模型表示为图 $G = (V, E)$,其中 V 是图中所有路由节点组成的集合, E 是 NoC 中路由相邻结点间双向链路的集合,每一条边表示两路由节点间的直达通信路径,假设网络是对称的, $s \in V$ 为测试矢量输入源路由结点, $m \in \{V - \{s\}\}$ 为待测路由结点.

(1) 对于任一链路 $l \in E$,定义:

测试矢量传递时间函数: $\text{time}(l)$,表示一个测试矢量在一条链路上传递所花费时间;

覆盖率函数: $\text{cover}(f)$, 表示测试矢量所覆盖的 FIFO 数目。

(2) 对于任一网络节点 $n \in V$, 定义:

测试矢量传递时间函数 $\text{time}(n)$, 表示测试矢量在路由节点中的传递及测试所花费时间。

测试矢量传递路径选择问题可以表示为: 对于给定的路由测试矢量输入源点 $s \in V$, 以所有待测路由结点 m 为终点的集合 M (节点 $m \in M$), 在 NoC 所有路由网络中求解一个最优组播树, 使得测试矢量从源节点出发, 尽量覆盖所有的待测路由 FIFO, 并且满足测试矢量传递时间最短。

约束条件定义:

$$T = \text{time}(l) + \text{time}(n) \quad (1)$$

$$\text{cover}(f) = \frac{\text{test}(f)}{\text{total}(f)} \times 100\% \quad (2)$$

其中, T 为总的测试矢量传递时间, $\text{test}(f)$ 为可测试到的路由 FIFO 个数, $\text{total}(f)$ 为总的 FIFO 个数。

4 基于量子遗传算法的 NoC 路由测试矢量传递路径选择

量子遗传算法是基于量子计算原理的一种进化算法^[10], 它建立在量子状态矢量表示的基础上, 用量子比特的几率幅表示染色体的编码, 使得一条染色体可以表达多个态的叠加, 并利用量子逻辑门实现染色体的更新操作, 从而实现目标的优化求解。该算法具有种群规模小、收敛速度较快、全局寻优能力强等特点。NoC 路由测试中, 选择最优测试矢量传递路径问题是 $N-P$ 问题, 可以用量子遗传算法得到最优解。量子遗传算法流程图如图 3 所示。

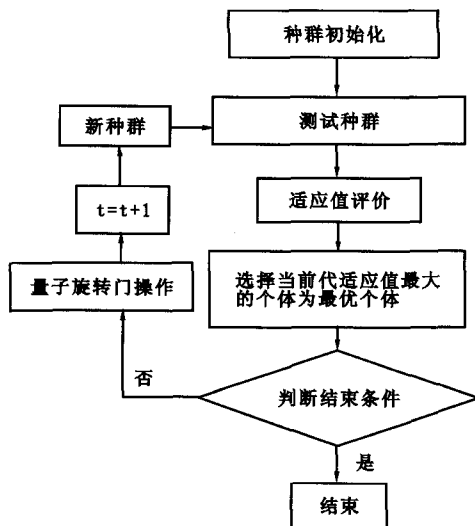


图3 量子遗传算法流程图

4.1 量子比特编码

量子遗传算法首先要对要解决的问题进行参数编码, 在求解问题时要把问题的解空间表示为某个有限长度的串, 编码的好坏直接决定了如何进行群体的更新和更新运算的效率。在 NoC 路由测试矢量传递路径选择问题中, 路由结点信息用量子比特来描述。设二维 NoC 中有 N 个路由结点, 其中选择一个路由结点 s 为测试矢量输入结点, 如图 4 测试矢量传递示意图所示。矢量生成后输入到此结点, 剩下 $N-1$ 个结点假设为目的结点, 所有的测试矢量将通过这个源结点, 传递到剩下的 $N-1$ 个结点里, 设每个结点 i 的路径集合为 $D_i = \{P_i^1, P_i^2, \dots, P_i^k\}$, 则所有的 $N-1$ 个结点中每个里面选取一个路径, 可以组成一个组播树。

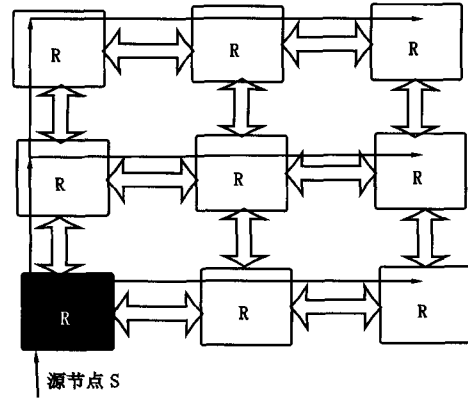


图4 测试矢量传递路径示意图

根据测试要求, 文中编码方式为: 染色体采用量子比特序列编码, 编码长度为 E , 每个基因 (即每个量子比特) 对应 $G(V, E)$ 中一条边。一个量子比特可以表示 0 状态、1 状态以及 0、1 之间的任意叠加态, 用 α, β 表示。其中 α 和 β 分别是 0 状态和 1 状态的几率幅, 且 $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ 。上面已假设本系统研究对象 NoC 其路由结点数为 N , 设定初始化包含 m 个个体的种 $p(t) = \{p_1^t, p_2^t, \dots, p_m^t\}$ 群, 其中 p_j^t ($j = 1, 2, \dots, m$) 为种群第 t 代的第 j 个个体, 其染色体编码方式为:

$$p_j^t = \begin{bmatrix} \alpha_{j1}^t & \alpha_{j2}^t & \dots & \alpha_{jm}^t \\ \beta_{j1}^t & \beta_{j2}^t & \dots & \beta_{jm}^t \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, α_{jn}^t 和 β_{jn}^t 分别表示种群第 t 代的第 j 个个体, 路由网络中第 n 条边的权值为 0 和 1 的几率幅, $n = 1, 2, \dots, E$ 。解空间采用二进制串编码, 长度为 E 。解中编码位对应染色体的基因和 $G(V, E)$ 中的边, 值为 0 或 1, 表示 $G(V, E)$ 中的对应边在或不在对应的路径上, 对染色体进行测量得到解。测量过程如下: 随机产生一个数 r ($0 < r < 1$), 对染色体的每一个

基因 $\begin{vmatrix} \alpha \\ \beta \end{vmatrix}$, 若 $r < \alpha$, 则该基因测量结果为 0, 置解的对应位为 0, 否则置为 1. 种群中全部染色体的所有基因 $(\alpha_{ji}, \beta_{ji})$ 都被初始化为 $(\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}})$, 这意味着一个染色体所表达的是其全部可能状态的等概率叠加. 初始种群产生后, 经过一系列评价更新操作, 找到符合条件的最优解, 进而找到检测 NoC 路由 FIFOs 的最优测试矢量传递路径, 使得测试时间最小, 故障覆盖率最大.

4.2 目标函数的构造

适应度函数是算法与具体应用问题的连接通道, 是用来衡量群体中各个个体优劣的一个重要尺度, 它的构造直接影响解决问题的效率. 根据本系统的特性定义目标函数如下:

$$f(p) = \frac{w_1}{T} + w_2 \text{cover}(f) \quad (4)$$

其中, T 表示 NoC 中路由 FIFO 的总测试矢量传递时间, $\text{cover}(f)$ 表示故障覆盖率. 其中, w_1 和 w_2 参数的倾斜权值, $0 \leq w_1, w_2 \leq 1$, $w_1 + w_2 = 1$. 适应值越大, 解越好.

5 实验结果与分析

文中实验源代码采用 C 语言编写, 利用 Visual C++ 6.0 环境编译仿真, 硬件采用文献 2 相同的配置. 选取 3×3 , 4×4 , 5×5 共三组 NoC 进行模拟仿真实验. 对于各组实验, 分别考察本文提出的基于量子遗传的路径选择算法对 NoC 路由 FIFO 测试的影响并将其结果和文献[2]方法做比较. 软件仿真结果如表 1 所示. 其中 cover 表示故障覆盖率.

从表 1 中可以看出, 实验结果表明, 对于相同规模的 NoC 结构, 文中方法在测试时间差不多的情况下, 故障覆盖率上有所提高, 证明了本算法的可行性和有效性.

表 1 算法实验结果性能比较

序号	文中方法		文献[2]方法	
	test time(s)	cover (%)	test time(s)	cover (%)
3×3	9 071	100	9 087	98.82
4×4	9 427	100	9 451	98.93
5×5	11 156	100	11 206	98.93

6 结束语

文中分析了片上网络路由器的内部结构, 给出

了路由器内部 FIFO 故障模型, 提出了基于量子遗传算法的 NoC 路由 FIFO 测试矢量传递路径寻优方法. 实验数据分析表明, 相对现有的测试方法, 文中方法在 NoC 路由 FIFO 测试中, 在测试时间相差不大的情况下得到了较高的故障覆盖率. 因此应用到 NoC 路由测试上有一定的价值.

参考文献:

- [1] 高明伦, 杜高明. NoC: 下一代集成电路主流设计技术[J]. 微电子学, 2006, 36(4): 461~466
- [2] Alexander MA, Briao E. A scalable test strategy for network-on-chip routers[C]// International Test Conference, Austin TX; IEEE, 2005: 599~608.
- [3] 欧阳一鸣, 齐芸, 梁华国. 片上网络互联的划分测试[J]. 电子测量与仪器学报, 2009(11): 101~107
- [4] Tran X T, Thonnar Y. A design-for-test implementation of an asynchronous network-on-chip architecture and its associated test pattern generation and application [C]// International Symposium on Networks-on-Chip, Newcastle University; IEEE, 2008: 149~158
- [5] Cristian G, Pande P, Wang B SH. Methodologies and algorithms for testing switch-based NoC interconnects [C]// International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems, Washington; IEEE, 2005: 238~246
- [6] 丁帅, 吴宁, 葛芬. 片上网络路由单元的系统级建模研究[J]. 微电子学与计算机. 2009; (1): 94~95.
- [7] 赵建武, 师奕兵, 王志刚. 片上网络 FIFOs 的内建自测试方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2009(8): 1768~1772.
- [8] Grecu C, Pande P, Wang B SH. Methodologies and algorithms for testing switch-based NoC interconnects[C]// Proceedings of the 2005 20th IEEE International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems (DFT'05), 2005: 201~209.
- [9] Arabi K. Logic BIST and Scan Test Techniques for Multiple Identical Blocks. [J] IEEE VLSI Test Symposium, 2002: 60~68.
- [10] 杨俊安, 庄镇泉. 量子遗传算法研究现状[J]. 计算机科学. 2003(30): 13~43.

作者简介:

许川佩 女, (1968—), 教授, 硕士生导师. 研究方向为集成电路测试及嵌入式系统.

胡旭 男, (1983—), 硕士. 研究方向为集成电路测试技术.