

基于云量子进化算法的 NoC 资源内核测试优化研究

许川佩, 李素娟

(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: 针对片上网络中资源内核数量不断增多, 提出了一种基于云量子进化算法优化选取测试端口对资源内核进行并行测试的方法, 以降低资源内核测试时间. 首先用云模型对量子进化算法进行改进; 然后在片上网络测试功耗限制下确定测试端口对数, 利用云量子进化算法优化选取最优端口位置, 实现对资源内核的并行测试; 此方法可以有效地减少测试时间, 且网络规模越大效果越好; 同时, 与量子进化算法相比, 云量子进化算法有更好的稳定性.

关键词: 片上网络; 测试优化; 并行测试; 云量子进化算法

中图分类号: TP306

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2013)12-0117-04

Research on Optimal Test of NoC Resource Cores Based on Cloud Quantum Evolution Algorithm

XU Chuan-pei, LI Su-juan

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

Abstract: For the increasing number of the NoC resources cores, a method of NoC resources cores parallel test with cloud quantum evolutionary algorithm optimally selecting test ports was proposed, in order to reduce the test time of these cores. Firstly, improving quantum evolution algorithm with cloud model is proposed. Then the method is presented to determin the maximum of test ports with system limited power, select the most optimal location of ports with cloud quantum evolutionary algorithm, and test cores in parallel through multi test ports. The method is effective to reduce the test time of NoC resource cores, and the effect will be better in larger network; at the same time, compared with quantum evolutionary algorithm, the cloud quantum evolutionary algorithm has better stability.

Key words: NoC; test optimization; parallel test; cloud quantum evolution algorithm

1 引言

随着 NoC 资源内核数量的增多, 如何在短时间内完成资源内核测试成为了亟待解决的问题. 文献[1]中给出一种基于 NoC 重用测试机制的资源内核测试策略, 但是没有考虑到测试过程中功耗限制的问题. 文献[2]中虽然提出了功耗限制下基于分组交换协议和 NoC 重用测试机制的资源内核测试策略, 但并未对端口位置的选择给出相应的方法. 文献[3]中考虑功耗因素, 在所有核并行测试时间最短的前提下, 选取总体测试代价最小的测试输入/输出端口

位置, 但仅针对规模不大的 NoC 体系结构进行了验证.

本文针对 2D-mesh 结构的 NoC, 采用 NoC 重用测试访问机制和 XY 路由方式, 利用系统限制功耗确定最大测试端口对数, 借鉴云模型云滴的随机性和稳定倾向性特点, 对量子进化算法进行改进, 利用云量子进化算法选择最佳端口位置, 并行测试资源内核, 减少总测试时间.

2 NoC 资源内核并行测试分析

NoC 中丰富的片上资源为并行测试提供了条

收稿日期: 2013-01-20; 修回日期: 2013-03-19

基金项目: 国家自然科学基金(60766001)

件,包括大量互不交叉的互连线、支持大数据量传输的数据包交换机制等。

本文拟采用重用 NoC 作为 TAM 的方式实施并行测试.图 1 中给出两对测试端口 c5/c1、c9/c4,在 XY 路由方式下,分别同时对两个内核 c1、c6 进行测试.然而,在测试过程中,若对并行测试端口数目不加限制,则会带来测试资源冲突、测试功耗过大等不良影响;而测试端口的具体位置不同,每个核的测试路径、每对端口分配的核都会有所不同,进而影响整体测试时间.因此,在测试功耗限制下,确定测试端口对数和选取最佳测试端口位置使得总测试时间最少,是本文研究的主要内容。

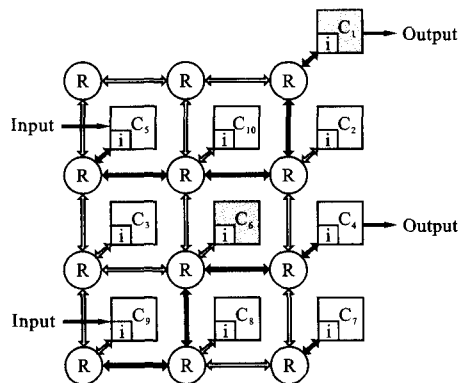


图 1 d695 基准电路的 2D 网格结构

多端口资源内核测试示意图

(其中 R 表示路由节点, C 表示资源内核, i 为本地接口, 箭头表示互连线)

3 云量子进化算法相关理论

3.1 云理论

常用的云模型有一维正态云模型及二维正态云模型,其数学特征由三类参数,期望 Ex 、熵 En 、超熵 He 表示.一维正态云模型的特征示意如图 2(a)所示,由图可知,期望 Ex 为最能代表定性概念的中间值,为云模型的重心;熵 En 表示云滴距离中心值 Ex 的离散范围;超熵 He 是熵的不确定度,即熵的熵,反映了云模型中数值的凝聚程度^[4].三个数学参数相结合,一起描绘了自然界中数值范围的模糊性和随机性.二维以一维云模型为基础,描述两个定性概念与定量关系之间的复杂转换.图 2(b)为二维云模型特征示意图。

3.2 云量子进化算法

鉴于云模型在定性概念与定量数值表示间转换中的优良特性,云量子进化算法在定性知识的指导下能自适应控制搜索范围,避开局部最优解,稳定地进行寻优,因此本文将用于优化选取测试端口

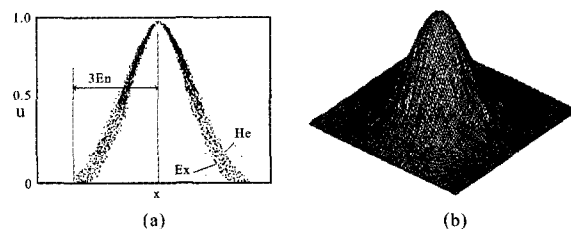


图 2 云模型特征示意图

位置。

3.2.1 种群初始化和量子种群基因云的定性进化策略

对于 m 维复杂寻优问题,利用正态云随机产生初始种群, $p(0) = \{p_1^0, p_2^0, \dots, p_n^0\}$, 其中 n 是种群的规模, $p_j^0 (j = 1, 2, \dots, n)$ 为初始种群中一个个体,可按照式(1)表示:

$$p_j^0 = \begin{Bmatrix} x_{j1}^0 & x_{j2}^0 & \dots & x_{jm}^0 \\ \alpha_{j1}^0 & \alpha_{j2}^0 & \dots & \alpha_{jm}^0 \\ \beta_{j1}^0 & \beta_{j2}^0 & \dots & \beta_{jm}^0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中, x 为复杂问题自变量向量, m 为量子位数目即所求解问题的维数,三倍体染色体的等位基因由 x 的一个分量 x_{ji}^0 和一对量子比特概率幅 $[\alpha_{ji}^0 \ \beta_{ji}^0]^T$ 组成,染色体长度由 m 决定, α_{ji}^0 和 β_{ji}^0 满足归一化条件。

定义一个基因云,采用云模型建立一个种群中所有个体相同基因位的基因值的分布特征云的模型.基因云是一个种群中个体基因值的定性表示,反映了种群基因的整体统计特征^[5].第 k 代种群的第 i 个基因位的基因云记为 $C = (Ex_i, En_i, He_i)$.这样,进化过程中可通过调整种群基因云的参数 Ex_i 、 En_i 、 He_i 来优化子代种群产生的策略。

3.2.2 云模型量子门自适应调整策略

针对一般量子旋转门调整策略易收敛于局部极点,且收敛速度慢等问题,对量子旋转门调整策略进行改进,利用进化方程自动调整量子门的旋转角的大小和方向.量子旋转门按照下式更新个体:

$$\begin{bmatrix} \alpha'_{ji} \\ \beta'_{ji} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{ji}) & -\sin(\theta_{ji}) \\ \sin(\theta_{ji}) & \cos(\theta_{ji}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_{ji} \\ \beta_{ji} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$[\alpha_{ji} \ \beta_{ji}]^T$ 为个体 j 中第 i 个基因位的概率幅, $[\alpha'_{ji} \ \beta'_{ji}]^T$ 为量子门更新后的概率幅, θ_{ji} 为量子门旋转角.旋转角的大小和方向由下式中的进化方程来确定:

$$\theta = En_i \cdot (p_i - x_i) + Ex_i \cdot (p - x_i) + He_i \cdot (p_j - x_i) \quad (3)$$

式中, Ex_i 、 En_i 、 He_i 第 i 个基因的基因云的特征值; p

为全局极值; p_i 为个体所在种群极值; p_j 为邻域种群极值^[5].

4 基于云量子进化算法 NoC 资源内核测试优化方法

针对测试输入/输出端口对 NoC 资源内核测试时间的影响,本文设计了一种测试策略:对于 $M \times N$ 规模 2D-mesh 结构的 NoC 系统,待测资源内核为 N_c 个,采用基于 NoC 重用的测试机制和 XY 路由方式,在系统限制功耗条件下确定测试端口对数和位置,在基于待测核优先权的测试调度方法^[6]下,依据测试路径较短和避免资源冲突的原则为每对端口分配待测核,多对端口同时开始对所分配的核依次进行测试;测试矢量以数据包的形式传送至待测核完成测试并输出.

该策略约束条件有:

(1)每个内核只需被测试一次,测试不能中途停止.

(2)一旦某个内核正在测试,它所占有的测试资源必须等到该核的测试完成才释放.

(3)对于不同的资源内核,在同一测试时间段上不能出现测试资源冲突.

以上测试策略问题可以描述如下:怎样确定测试端口对数并选择测试端口位置,使得在一定功耗限制下所有内核测试完毕时的系统测试时间最小.

4.1 NoC 资源内核测试端口对数及测试评估方程

对于确定的 NoC 系统,测试端口数目过少不能更好优化测试时间,过多则测试功耗会增加.本文在功耗限制下首先确定端口对数:

$$\frac{P}{N_c} \times n_w \leq P_{\max} \quad (4)$$

式中, $P = P_{\text{pass}} + P_{\text{core}}$,

$$P_{\text{pass}} = (\text{num}_{\text{top}} + 1) \times P_{\text{router}} + \text{num}_{\text{top}} \times P_{\text{link}},$$

P 为测试中的总功耗, N_c 为系统中待测核数量, P_{pass} 为测试所有核的路径的总功耗, P_{router} 、 P_{link} 分别表示在路由节点和互联通道上的功耗, num_{top} 表示测试数据所经过的通道数; P_{core} 为所有核的本身测试功耗的总和, $P_{\max}$ 为系统限制最大功耗, n_w 为系统确定的最大端口对数.

对 $M \times N$ 规模的 2D-mesh 结构的 NoC,若测试端口为 n_w 对,每个资源内核都可作为输入输出端口,那么穷举的测试端口可能性就有 $C_{M \times N}^{n_w}$ 个.对于某种测试端口组合,在 XY 路由方式下,根据测试路径较短和避免测试路径冲突原则,总能将所有内核

分配给各端口进行测试,多端口资源内核测试分配示意图如图 3 所示.

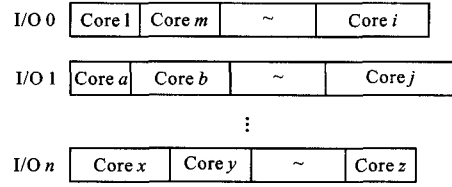


图 3 多端口资源内核测试分配图

本文研究的目的是缩短 NoC 资源内核测试时间,所以以测试时间作为测试评估方程的值.在功耗限制条件下,测试时间越短,说明所得测试方案越合适.由图 3 可知,第 n 对端口的测试时间为

$$T_n = T_{\text{空闲}} + \sum_1^k T_i \quad (5)$$

式中, T_i 是核 i 的测试时间, k 为该端口所测核的数量, $T_{\text{空闲}}$ 为在测试资源冲突时的空闲时间.由图 3 可看出,系统测试时间由测试时间最长的端口决定.在保证系统测试功耗小于 $P_{\max}$ 的前提下, NoC 资源内核测试评估方程为

$$T = \max(T_n) \quad (0 \leq n < n_w) \quad (6)$$

该方程也就是 NoC 资源内核总的测试时间的计算方程.

4.2 基于云量子进化算法 NoC 资源内核测试端口选择

4.2.1 基于云量子进化算法的测试端口选择模型

本文采用整数编码方案,在 2D-mesh NoC 结构下,图 4 为 d695 模型编号示意图,将待测电路建立在二维坐标体系结构下进行编号,用具体的整数 X 、 I 、 O 分别表示待测核、测试输入/输出端口编号.

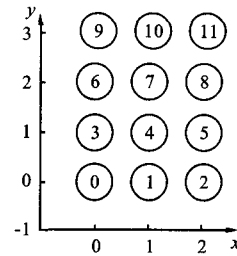


图 4 d695 模型编号示意图

算法中每一个个体代表着一种测试端口组合方案,个体由 $2 \times n_w$ 个整数和相应量子比特的一对概率幅组成,利用如下公式:

$$x_{ij}^t = x_{ij}^{t-1} \cdot (1 + a_{ij}^t) \quad (7)$$

对个体进行观测,观测值按小数点后四舍五入取整,从第 1 个整数观测值开始,每两个观测值作为一对测试端口.例如如下个体:

$$\begin{bmatrix} 8 & 7 & 5 & 1 & 3 & 5 & 11 & 6 \\ -1/\sqrt{2} & -1/2 & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{5} & \sqrt{2}/\sqrt{3} & 1/\sqrt{3} & 0 & -\sqrt{6}/\sqrt{7} \\ 1/\sqrt{2} & \sqrt{3}/2 & 1/\sqrt{2} & 2/\sqrt{5} & 1/\sqrt{3} & \sqrt{2}/\sqrt{3} & 1 & 1/\sqrt{7} \end{bmatrix}$$

根据式(7)可算得观测值分别为 2/4、9/1、5/8、11/0, 表示 4 对测试端口, 其中每一对的前者为输入端口编号, 后者为输出端口编号. 由于每对测试端口有输入、输出端口两个值, 算法采用二维云模型进行建模, Ex_o 、 Ex_i 为种子个体基因中输入、输出端口位置; $En_o = e_o/c_{1o}$ 、 $En_i = e_i/c_{1i}$ 代表基因在进化过程中变异的范围, 其中 e_o 、 e_i 为端口位置可变化的范围; 超熵 $He_o = En_o/c_{2o}$ 、 $He_i = En_i/c_{2i}$ 代表了进化过程中搜索寻优的范围, c_{1o} 、 c_{2o} 、 c_{1i} 、 c_{2i} 为可控参数.

4.2.2 算法实现流程

算法实现流程如图 5 所示, 将式(6)作为个体评估方程, 主要的操作步骤有初始化种群、个体评估、云模型控制子代种群生成等.

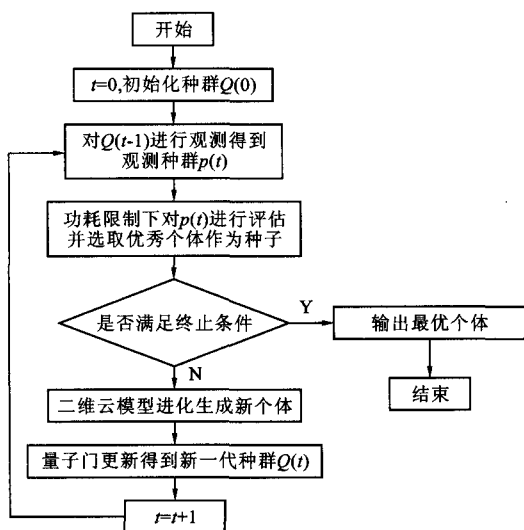


图 5 算法流程图

(1) 初始化种群: 利用二维云模型随机生成 n_o 对不重复的测试输入 / 输出端口值, 利用随机函数生成相应的概率幅, 构成个体, 每一对端口及其概率幅看成个体中的基因. 循环 n (种群大小) 次, 构成初始化种群, 初始化完成.

(2) 个体评估: 在当前端口组合下, 为每个待测核按照 XY 路由算法选择测试路径较短且与其他在测核没有资源冲突的测试端口, 并根据式(6)计算 T_j , T_j 为端口 j 的测试时间. 在选择端口过程中设定时间间隔 $curtime$, $curtime$ 为当前某对端口空闲的时刻, 每个 $curtime$ 时刻计算系统测试功耗, 判断是否超出限制功耗, 若超出, 则丢弃该个体, 利用云模

型重新生成个体; 若没有超出, 根据式(7)计算得到适应值即总的测试时间 T .

(3) 云模型控制子代种群生成: 在上一代种群中选取最优的 n_s 个个体作为种子, 并按测试时间升序排列, 选择种子基因位作为二维云模型的期望值, 按照种子排列顺序生成数量由多到少的新个体, 并进行评估保留优秀个体, 直到生成 n 个个体作为新一代种群的个体; 按照式(2)和(3)更新量子概率幅进而更新种群.

5 结束语

本文通过云量子进化算法优化选取最优测试端口位置, 对 NoC 资源内核实行多端口并行测试, 减少系统测试时间. 实验结果表明, 云量子进化算法比一般量子进化算法在稳定性上有明显优势, 能更稳定地得到最优解; 利用该算法寻求到最优端口位置, 实现 NoC 资源内核并行测试的方法能够有效减少测试时间, 提高测试效率.

参考文献:

- [1] Cota E, Zeferino C, Kreutz M, et al. The impact of NoC reuse on the testing of core-based systems[C]// Proceedings of IEEE VLSI Test Symp Uenlopark, CA: IEEE, 2003: 128-133.
- [2] Cota E, Carro L, Wagner F, et al. Power-aware NoC reuse on the testing of core-based systems[C]// Proceedings of International Test Conference. Charlotte, NC, USA: IEEE, 2003: 612-621.
- [3] 欧阳一鸣, 张岚, 梁华国. 一种时间优化的 NoC 低功耗测试调度方法[J]. 中国科学技术大学学报, 2010, 40(5): 540-545.
- [4] Terry T, Benini L, Micheli. Packetization and routing analysis of on-chip multi processor networks[J]. Journal of System Architecture, 2004, 50(2): 81-104.
- [5] 许波, 彭志平, 余建平. 一种基于云模型的改进型量子遗传算法[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(10): 3685-3686.
- [6] 欧阳一鸣, 冯伟, 梁华国. 功耗限制下的 NoC 测试端口的优化选择方法[J]. 计算机应用, 2008, 28(4): 1026-1031.

作者简介:

许川佩 女, (1968—), 博士, 教授, 硕士生导师. 研究方向为自动测试总线与系统、集成电路测试理论与技术.

李素娟 女, (1985—), 硕士研究生. 研究方向为集成电路测试.