

基于开环排队网络的异步流水线性能分析方法

王 蕾, 王志英, 戴 葵, 龚 锐, 李 勇

(国防科学技术大学计算机学院, 长沙 410073)

摘要: 讨论了采用阻塞排队网络对异步流水线电路进行建模和性能分析的一种基于最大熵方法(MEM)的近似分析算法, 并使用该算法对32位的异步乘法器进行了性能建模和分析, 分析结果和Modelsim模拟的结果进行比较, 误差较小, 证明该算法能够有效地进行异步流水线电路的性能建模和分析。

关键词: 异步流水线; 阻塞排队网络; 开环排队网络; 最大熵方法; 性能评测

Method of Open Queuing Network Based for the Performance Evaluation of Asynchronous Pipelines

WANG Lei, WANG Zhiying, DAI Kui, GONG Rui, LI Yong

(School of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

【Abstract】 A analysis method of finite open queuing network based on the maximum entropy method (MEM) is presented. This algorithm is used to evaluate the performance of an asynchronous 32-bits pipeline multiplier. The result of the algorithm is compared with the result of Modelsim simulation of the multiplier. The percentage error is small. So the algorithm is proved to be effective for the performance evaluation of asynchronous pipelines.

【Key words】 Asynchronous pipeline; Queuing network with blocking; Open queuing network; Maximum entropy method; Performance evaluation

1 概述

集成电路工艺现在已经进入深亚微米时代, 随着同步集成电路主频的增加, 时钟扭曲、时钟功耗、电磁辐射等问题越来越难解决。异步集成电路作为一个有效的解决途径, 有了长足的发展。流水线是集成电路中常用的电路结构, 异步流水线电路使用握手信号来控制前后流水段中数据的流动, 各流水段的延迟可能不等, 其性能取决于流水线中数据的个数和流水线的结构, 相比同步流水线电路, 性能建模和分析都有很大的难度。

国际上对异步流水线环的性能分析开展了一些研究, 文献[1]在假设所有操作的时间都为固定值的情况下, 计算异步流水线环的吞吐率。文献[2]分析了所有操作的速度服从指数分布的异步流水线环的性能。Aiguo Xie和Peter Beere^[3]分析了任意延迟分布情况下异步系统的性能。现在主流的性能分析大部分采用Petri网进行建模, 使用Petri网的衍生工具进行分析, 建模深入到系统内部的信号级。由于存在大量的状态变量, 因此这类方法往往在分析大系统时会出现状态爆炸问题。

排队网络是有效的系统级建模方法, 广泛应用于计算机系统、通信系统和制造系统等的性能建模和分析。异步流水线采用握手方式进行控制, 相对于同步流水线, 可以更加贴切地使用排队网络进行建模。排队网络中节点对任务的处理速度就是对异步流水线中流水段的延迟进行建模。排队网络的拓扑结构对应异步流水线中流水段的连接关系。

本文介绍一种异步流水线电路的阻塞开环排队网络的建模和分析方法, 并以一个异步乘法器为实例, 验证了该性能分析方法的有效性。

2 模型假设和参数定义

同步流水线和异步流水线的示意图见图1。图1(b)中的CTL是异步电路中重要的电路, 实现事件“与”的逻辑。

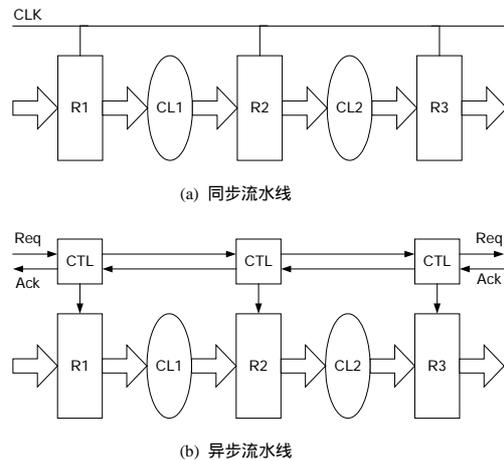


图1 同步流水线和异步流水线

同步流水线的重要性能参数包括时钟频率和流水线的延迟, 后者可以通过流水线的段数和周期时间(时钟频率的倒数)的乘积得到。对于异步流水线, 周期时间和延迟同样是主要的性能参数, 这里周期时间指的是流水线中相邻事件的平均

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90407022)

作者简介: 王 蕾(1977 -), 女, 博士生, 主研方向: 计算机系统结构, 微处理器设计, 异步电路设计技术; 王志英, 博士、教授、博导; 戴 葵, 博士、副教授; 龚 锐、李 勇, 博士

收稿日期: 2005-10-13 **E-mail:** wanglei@chiplight.com.cn

间隔, 延迟的定义和同步流水线相同。由于异步流水线中各流水段的延迟可能不同, 对周期时间的计算和延迟的计算要比同步电路复杂很多。

异步流水线可以建模为开环的排队网络, 输入弧和输出弧分别对应异步流水线的输入端和输出端。我们在对异步流水线进行性能分析时通常假设环境是理想的, 也就是一旦流水线可以接受新的数据, 外部立刻输入一个有效数据, 且流水线输出端的接收器的缓冲是无限的。

如图 1(b)所示的异步流水线可以建模为图 2 所示的串行开环排队网络。由于异步流水线中锁存器的数目是有限的, 建模得到了有限缓冲开环排队网络。异步流水线中, 数据在某个流水段完成处理, 如果后继流水段的缓冲为满, 则数据在前一个流水段等待, 对应的有限缓冲排队网络的阻塞方式为服务后阻塞(blocking after service, BAS)方式。



图 2 串行开环排队网络

假设外部到达间隔时间和排队网络节点的平均处理速率都服从通用指数分布(Generalized Exponential, GE 分布), GE 分布如图 3 所示。



图 3 GE 分布

GE 的分布形式如下:

$$F(t) = 1 - \tau e^{-\sigma t}, \quad t \geq 0, \quad \tau = \frac{2}{C^2 + 1}, \quad \sigma = w$$

其中 $1/v$ 是平均值, C^2 是方差。之所以选择 GE 分布, 是因为对分析对象的实际到达时间间隔或者服务时间的测量是有限的, 通常只有到达间隔时间的平均值和方差可信。GE 分布是一种用于估计已知平均值和方差的任意分布的非常有用的分析模型。

我们对异步流水线建模得到的 $GE/GE/c_i/N_i$ 阻塞开环排队网络的符号的含义如下:

- C_i 节点 i 中同构服务器的个数, $C_i \geq 1$ 。
- N_i 队列 i 的容量, 包括 C_i 个服务器, $N_i \rightarrow +\infty$ 或者 $N_i < +\infty$ 。
- μ_i 节点 i 的平均服务速率。
- C_{si} 节点 i 服务时间的方差。
- λ_{oi} 总外部到达速率, 队列 o 代表外部环境。
- C_{oi} 外部到达间隔时间的方差。
- a_{ij} 转换概率, 任务在节点 i 处完成服务, 进入节点 j 的概率, $j=1,2,\dots,M$ 。
- a_{io} 在节点 i 处完成服务, 离开排队网络的概率。
- π_{ij} 在节点 i 处完成服务的任务, 被节点 j 阻塞的概率, $j \neq i$, (如果 $j=0$ 或者 $j \neq 0$ 且 $N_i \rightarrow +\infty$ 则 $\pi_{ij} = 0$)。
- π_{oi} 从外部到达节点 i 的任务被阻塞的概率, 即节点 i 处于状态 N_i , (如果 $N_i \rightarrow +\infty$, 则 $\pi_{oi} = 0$) 的概率。

π_{ci} 在节点 i 处完成服务的任务被节点 i 的下游节点阻塞的概率, 也就是: $\pi_{ci} = \sum_{j \in D_i} a_{ij} \pi_{ij}$, 其中 D_i 是节点 i 的下游节点集合。

M 排队网络的节点数。

3 基于 MEM 的近似分析算法

求解有限容量的排队网络的确切解由于计算复杂而很难进行, 因此国际上提出了很多近似分析或者数值求解的方法。最大熵方法(Maximum Entropy Method, MEM)是 Kouvatso 提出的一种采用最大熵方法来求解 $GE/GE/c/N$ 排队网络的估计算法。本文使用文献[4]提出的一种基于 MEM 的近似分析算法, 通过在排队网络中可能会出现阻塞的路径上增加假想的无限容量的节点, “保持节点”, 再对得到的网络应用 MEM 算法计算稳态概率, 进而求出阻塞概率和平均队长等性能参数。这个过程是迭代进行的, 当迭代收敛, 算法就结束。

算法流程如下:

- 步骤 1 反馈修正, 对每个节点 $i, i=1,2,\dots,M$, 如果 $a_{ij} > 0$, 则

$$\mu_i = \mu_i(1 - a_{ii}),$$

$$C_{si} = a_{ii} + (1 - a_{ii})C_{si},$$

$$a_{ij} = a_{ij}/(1 - a_{ii}),$$

$$a_{ii} = 0.$$
- 步骤 2 初始化 $c_{oi}, \pi_{oi}, \pi_{ij}$, 如果 $N_i \rightarrow +\infty$, 则 $\pi_{oi} = 0$, 计算 $\pi_{oi}: \pi_{oi} = \sum_{j=1}^M a_{ij} \pi_{ij}$ 。
- 步骤 3 在网络中增加“保持节点”, 扩展网络。
- 步骤 4 计算到达间隔时间的平均值和方差, 同时计算各节点服务时间的平均值和方差。
- 步骤 5 使用 MEM 方法, 计算各节点的稳态概率 $p_i(n_i), i=1,2,\dots,M$ 。
- 步骤 6 计算阻塞概率 $\pi_{ij}, \pi_{ci}, \pi_{oi}$ 。
- 步骤 7 重复步骤 4 的计算。
- 步骤 8 节点的到达间隔时间的平均值和方差如果收敛, 算法结束, 否则继续回到步骤 5 执行。

算法的计算主要集中于步骤 5~步骤 7 的循环, 在这个循环中, 计算量最大的操作需要进行 M^2 次乘除法操作, M 是排队网络节点的数目。则该算法的计算复杂性是 $O(kM)^2$, 其中 k 是算法迭代的次数。本文通过对 200 个随机选取的阻塞开环排队网络使用该算法进行计算, 并使用 GPSSH 建模对网络进行模拟, 得到算法分析结果和模拟结果的误差百分比小于 10%。

4 异步乘法器的性能分析

本文分析的异步乘法器的结构如图 4 所示。乘法算法采用 radix-4 的 booth 算法。32 位的乘数分为 4 组, 每次对乘数的 1 组 8 位进行 radix-4 的 booth 译码, 应用于被乘数, 得到 4 个部分积。这 4 个部分积和上一次译码得到的 4 个部分积在流水线的第 2 段进行移位相加, 采用 4-2 压缩阵列完成。在异步乘法器流水线的第 3 段、第 2 段得到的部分和与部分进位通过 64 位的全加器相加得到 64 位的乘法结果。

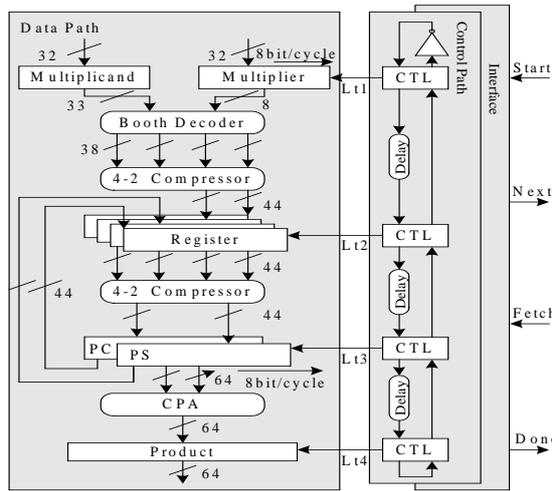


图 4 异步乘法器体系结构

将乘法器的操作抽象为图 5 所示流程图。完成一次乘法操作，需要 4 个相连的 token(代表 4 组部分积)流过流水线，第 1、第 2、第 3 个 token 在节点 2 处完成运算之后，返回节点 2 的输入，和节点 1 计算下一个 token 得到的部分积，一起进入节点 2 中进行计算。第 4 个 token 在节点 2 完成计算之后，直接进入节点 3 完成计算后，1 次乘法操作结束。这样，节点 2 开始操作的时刻是节点 2 完成当前 token 的运算的时刻和节点 1 完成下一个 token 的运算的时刻的最大值，和串连单缓冲的排队网络的前后两个节点的行为一样。这样，异步乘法器可以建模为串行开环排队网络，完成一次乘法操作的时间是第 1 个 token 开始运算到第 4 个 token 完成运算之间的时间。可以计算如下：

$$T_{mul} = \frac{3}{\lambda} + T \quad (1)$$

其中 $\frac{1}{\lambda}$ 是排队网络的周期时间， T 是排队网络的响应时间，也就是流水线的延迟。

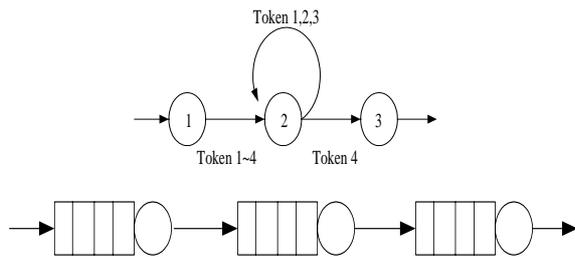


图 5 乘法器建模

乘法器采用 Verilog 语言描述，在华虹 NEC 0.35 的工艺实现。通过对版图提取的网表进行后仿，可以得到乘法器的外部数据的平均到达速率和流水段的平均延迟如表 1 所示。

表 1 乘法器的参数

	外部到达间隔(ns)	流水段 1 (ns)	流水段 2 (ns)	流水段 3 (ns)
平均值	26.085 3	9.000	8.293 5	11.257 5
方差	0.567 6	0.266 7	0.160 9	0.156 7

经过计算，得到平均吞吐率 $\lambda = 0.0383(1/ns)$ ，平均响应时间 $T = 28.311ns$ ，则根据式(1)，计算得到流水线完成一次乘法操作需要 $T_{mul} = 106.685 4ns$ ，和后仿测试得到结果 $T_{bsim} = 111.654ns$ 相比，误差百分比为 4.5%。证明这种使用阻塞开环排队网络进行性能评测的算法是有效的。

5 结束语

本文提出了一种对异步流水线进行性能分析的方法，采用阻塞开环排队网络对异步流水线进行建模，测量得到异步流水线各流水线的处理时间的平均值和方差，再使用基于 MEM 的近似分析算法对得到的排队网络进行分析，得到吞吐率、响应时间、平均队长等性能参数。通过对一个异步流水乘法器进行建模和分析，以及和 Modelsim 后仿的结果相比较，可以看出，该方法对于分析异步流水线的性能是有效的。

参考文献

- 1 Thiele L. On the Analysis and Optimization of Self-timed Processor Arrays[J]. Integration, 1991, 12(2): 167-187.
- 2 Greestreet M R, Steiglitz K. Bubbles Can Make Self-timed Pipeline Fast[J]. Journal of VLSI and Signal Processing, 1990, 2(3): 139-148.
- 3 Xie A, Beerel P A. Symbolic Techniques for Performance Analysis of Timed Systems Based on Average Time Separation of Events[C]. Proc. of Int. Symp. On Advanced Research in Asynchronous Circuits and Systems, 1997-04: 64-75.
- 4 Kouvatso D D, Denazis S G, Georgatsos P. MEM for Arbitrary Exponential Open Networks with Blocking and Multiple Job Classes[C]. proc. of the 7th UK Computer and Telecommunications Performance Engineering Workshop, 1999: 163-178.
- 5 Tahliramani H, Manjunath D, Bose S K. Approximate Analysis of Open Network of GE/GE/m/N Queues with Transfer Blocking[C]. Proc. of the 7th Seventh International Symposium on Modeling Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems, University of Maryland, 1999-10: 164-172.

(上接第 29 页)

参考文献

- 1 Platt J C. Probabilities for Support Vector Machines[M]. Massachusetts: MIT Press, 2000: 61-74.
- 2 Moreira M, Mayoraz E. Improved Pairwise Coupling Classification with Correcting Classifiers[C]. Proc. of the 10th European Conference on Machine Learning, 1998: 160-171.
- 3 Hastie T, Tibshirani R. Classification by Pairwise Coupling[J]. The

Annals of Statistics, 1998, 26(1): 451-471.

- 4 Cocosco C A, Kollokian V, Kwan R K S, et al. BrainWeb: Online Interface to a 3D MRI Simulated Brain Database[C]. Proceedings of the 3rd International Conference on Functional Mapping of the Human Brain, Copenhagen, 1997.
- 5 张翔. 支持向量机及其在医学图像分割中的应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.