

一种自适应动态缓存策略准入控制算法

魏美荣¹, 蒋 林¹, 吕耀刚²

(1 西安邮电学院 电子工程学院, 陕西 西安 710061;

2 西安邮电学院 计算机学院, 陕西 西安 710061)

摘 要: 针对片上网络的死锁问题, 基于虚拟网络的自适应路由算法, 设计了一个完全自适应片上路由器。重点介绍了路由算法及路由器的系统结构, 设计实现了一个低代价、高效的完全自适应路由器, 并在 2D Mesh 拓扑结构下对其性能进行了模拟验证。实验结果表明, 该路由器实现了无死锁的自适应路由, 并提高了网络吞吐量, 降低了平均网络延迟。

关键词: 片上网络; 路由算法; 无死锁; 路由器

中图分类号: TP302; TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)02-0119-05

An Adaptive Dynamic Caching Access Control Algorithmstrategy

WEI Mei-rong¹, JIANG Lin¹, LV Yao-gang²

(1 School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710061, China;

2 School of Computer Science, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710061, China)

Abstract: Due to the deadlock problem of network on chip, the paper designs a fully adaptive router, which based on the adaptive routing algorithms of virtual network. It mainly introduces the structure of the router's archtecture and algorithm. In the end, a high effective and improved performance router is completed, and is simulated in the 2D Mesh topology NoC. It makes the router deadlock-free adaptive routing come true, and improving the network throughput, reducing the average network latency.

Key words: network on chip; routing algorithm; router; deadlock-free

1 引言

随着半导体工艺的不断发展, 现在的片上系统(System-on-Chip, SoC)中可集成一个或多个处理器、模拟电路、存储器、数模混合电路以及各种 IP (Intellectual Properties)核^[1]。随着 SoC 中 IP 核数目的增加, 目前已有的以总线结构为通信基础的多处理器 SoC (MultiProcessor SoC, MPSoC)技术在性能、延时、功耗和可靠性等方面面临巨大的挑战^[2]。好些研究机构借鉴和吸收了计算机网络的思想, 提出了用片上网络(Network on Chip, NoC), 来解决复杂 SoC 面临的各种问题。

NoC 是指一个芯片内集成大量的计算资源、存

储资源以及连接这些资源的通信网络, 片内的通信网络用来实现这些资源之间的高速通信。它采用基于分层方法和包交换来替代原先的传统总线, 实现了处理单元(IP 核)与通信结构(网络)的分离^[3]。NoC 主要由网络接口、路由器和链路三个基础部件组成。其中路由器是 NoC 通信的关键部件, 其数据输出效率直接决定网络的整体性能, 设计开销直接影响整个网络架构的开销。作为 NoC 的核心组件, 片上路由器一直是 NoC 设计和研究的重点。初期的 NoC 为了使设计简单, 主要采用确定性路由算法。随着 NoC 在异构多核处理器等领域的广泛应用, 其网络流量特性多表现为非均匀分布, 简单的确定性路由算法已不能再满足现在的需求。由此看来, 路由

收稿日期: 2011-05-07; 修回日期: 2011-07-12

基金项目: 陕西省“13115”科技创新工程重大科技专项 (2009ZDKG-43); 陕西省教育厅科研计划项目 (2010JK840)

器采用的路由算法决定着路由器的结构和性能^[4], 一个好的路由算法, 能在网络重负载下提高网络的吞吐率, 在网络轻负载下降低网络平均时延, 对网络的性能有着举足轻重的影响^[5].

2 缓存策略的典型算法

2.1 静态门限策略

静态门限(Static Threshold, ST)策略是为每个独立队列设置缓存队列的门限值. 到达信元只有在目的端口的队列长度小于设定门限值的情况下, 才能进入交换机进行缓存^[6]. ST 算法对应着完全划分和部分共享的缓存资源分配策略, 实现时只需要一个队列长度计数器即可, 易于实现. 然而, 由于 ST 算法无论是静态完全划分, 还是静态部分共享都不具有自适应性, 当有多个队列在同一时刻处于活跃状态, 且它们的队列总长度超过了整个缓存空间的缓存能力, 而所有的队列都遵循着自己的门限限制, 这时的另外一些输入队列因为无法得到缓存空间而产生分组丢失, 这最终将导致整个交换机的性能下降; 另外, 当只有少数的队列处于活跃状态, 即所有的队列总长度小于缓存器的缓存能力, 同样由于每一个队列的队长受到各自门限的限制, 因此也使少数的活跃队列也受到其门限的限制而无法利用空闲的缓存空间. 这将使得分组的丢失率上升, 缓存利用率下降.

2.2 动态门限策略

动态门限(Dynamic Threshold, DT)策略是基于共享存储器模式的分组交换方式^[7]提出了在多个物理端口之间公平分配缓存资源的方案, 如公式所示.

$$\begin{cases} T(t) = \alpha * (B - Q(t)) = \alpha * (B - \sum_i Q^i(t)) \\ Q^i(t) \leq T(t) \text{ 时允许的接收该分组} \end{cases} \quad (1)$$

式中, B 代表系统总的缓存容量, $Q^i(t)$ 为端口 i 的队列长度, $Q(t)$ 为当前系统总的队列长度, 即为在 t 时刻总的缓存空间占用量, $T(t)$ 来表示端口在 t 时刻的控制门限, α 为动态缓存门限比例因子. 从公式可以看出, 动态门限算法根据系统的缓存状态动态的调整控制门限, 门限的大小与当前系统中空闲缓存资源成正比, 当端口占用的缓存空间超过控制门限时, 将阻塞该端口, 丢弃后来的分组, 不允许其接收更多的到达分组.

2.3 成比例丢失率控制算法

成比例丢失率控制(Proportional loss ratio,

PLR)算法是基于成比例区分服务模型提出来的^[8] 目的是通过队列管理算法在不同等级类别之间保证稳定的相对丢失率, 既满足如下公式:

$$\frac{\bar{l}_i}{l_j} = \frac{\sigma_i}{\sigma_j} (1 \leq i, j \leq N) \quad (2)$$

式中, $\bar{l}_i$ 为第 i 类服务的平均分组丢失率, 而 σ_i 则为相应的控制因子. 考虑到服务等级随着序号的增加而提高, 应该满足关系 $\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_N > 0$.

PLR 算法有两种形式: PLR(∞) 和 PLR(M), 两者在统计分组丢失率的时间区间上有所不同, 前者统计整个算法运行期间内不同服务类别的丢失率, 而后者只关心最近一段时间的情况. PLR 算法采取选择性丢弃策略, 为每个服务类别保存丢失率的估计值 l_i , 在到达分组将使得缓存空间溢出的时候, 选择使比率 l_i/σ_i 最小的类别并丢弃其中的一个分组.

2.4 动态部分缓冲共享算法

动态部分缓冲共享(Dynamic Partial Buffer Sharing, DPBS)算法^[9]是在基于静态门限的 PBS 算法的基础上将门限值动态化, 更能适应网络流量的变化, 提高缓存资源的利用率, 也解决了 PBS 算法的参数难以优化设定的问题; 同时, 在对流量统计特性已知的情况下, 可以提供对不同服务类别的区分服务.

假设系统的队列缓存空间最多可以容纳 N 个分组, 同时假设所有到达分组都属于 D 个分组丢弃优先级, 则相应设定 D 个丢弃门限 $TH_d (1 \leq d \leq D)$, 并且满足关系 $0 \leq TH_1 \leq \dots \leq TH_{D-1} \leq TH_D = N$. 优先级为 d 的到达分组, 当且仅当其进入队列后队列长度超过相应丢弃门限值 TH_d 时, 即满足条件 $qlen > TH_d$ 时才可以进入队列, 否则将被丢弃. 而一旦分组进入队列后, 将不会被后续到达的分组推出队列.

3 算法描述

3.1 基本思想

目前, 虚通道虫孔交换结构是片上网络路由器比较典型的虫孔交换结构. 本文根据这种结构特点, 提出了一种片上路由器自适应动态缓存策略准入控制的路由算法技术, 并设计了这种自适应片上路由器, 其内部结构包括虚通道, 路由单元, 交换分配模块, 交叉开关与输出模块. 每个物理通道是由 4 个虚通道组成, 每个虚通道是用于存储传输中的数据信

息,由先进先出(FIFO)缓冲器构成;路由单元主要为输入的数据信息选择输出链路并相应地进行开关置位,即实现路由算法;交换分配器用来产生数据信息通过数据路径时所需的控制信息;输出模块和交叉开关主要作用将路由器的输入缓冲器连接到输出缓冲器并将数据输出^[5].

3.2 具体算法

为了适应多业务的需求,本文在基于动态缓存门限算法基础上提出一种基于数据缓存策略的准入控制算法——自适应动态门限缓存策略的准入控制算法.该算法提出了支持不同业务的需求,将不同的业务划分成不同的优先级,为低优先级分组提供一定的缓存资源,使其总能够后的一定的服务,对于各优先级缓存门限的调整是根据各优先级分组在整个缓存中占用的情况来实现的.在该算法中假设如下:

整个缓存空间为 B , 由 N 个端口共享使用. 将整个缓存空间划分为 N 部分, 大小分别为 b_i , $i=1, 2, \dots, N$, 则有 $\sum_{i=1}^N b_i = B$. 每个端口分组到达的平均速率为 λ_i , 端口输出的速率为 μ_i . 分组到达速率为 λ_i 的队列平均忙期为 $1/(1-\lambda_i)$.

到达的每个端口的分组有 P 个优先级, 分别为

0 到 $P-1$, 其中第 0 个表示优先级最高的而 $P-1$ 表示优先级最低的.

将输入端口 i 的优先级为 P 的分组占用的缓存空间定义为 $Q_p^i(t)$, 即在 t 时刻该端口 i 的队列中, 优先级为 p 的分组的个数. 每个输入端口都会有 p 个优先级队列, 将整个缓存中优先级为 p 的分组所占用整个缓存的空间定义为 $Q_p(t)$, 即在整个缓存空间中队列优先级为 p 的分组个数 $Q_p(t) = \sum_{i=1}^N Q_p^i(t)$. 在整个缓存中定义 $Q^i(t)$ 为在 t 时刻输入端口 i 的队列长度, 则在该端口中优先级为 p 的总的分组个数为 $Q^i(t) = \sum_{p=0}^{P-1} Q_p^i(t)$, 所以在整个系统中所有队列长度总和为 $Q(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{p=0}^{P-1} Q_p^i(t)$.

4 算法仿真与分析

4.1 仿真建模

该自适应动态缓存策略模型的结构框图如图 1 所示, 主要包括优先级判别模块、端口统计模块, 门限比较模块和门限调整模块.

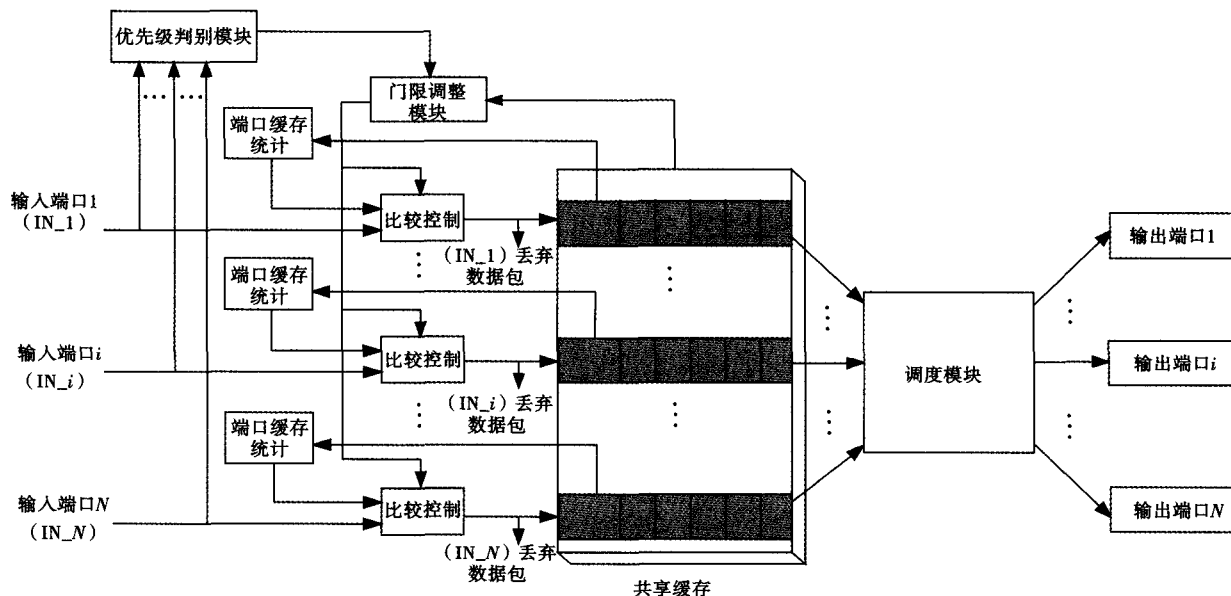


图1 自适应动态缓存门限模型

优先级判别模块: 主要是对于新到达的分组进行优先级判别, 进行相应优先级缓存门限的比较控制.

端口统计模块: 主要是完成各端口缓存占用情况的统计, 并对端口中的相应优先级分组占用缓存

情况进行统计.

门限比较模块: 包含两种比较情况, 在优先级判别模式开启时, 进行各优先级对应的缓存门限; 在优先级判别模式未开启时, 只针对一般的分组进行缓存门限比较, 来判断该到达的分组是否准入.

门限调整模块:同样也包含两种调整情况,在优先级判别模式开启时,根据端口统计模块对不同优先级占用整个缓存资源的统计情况对相应优先级的缓存门限进行相应的调整;在优先级判别模式未开启时,只是根据各个端口统计模块针对该端口一般的分组占用整个缓存资源的统计情况进行缓存门限的调整。

采用 SystemVerilog 语言对静态门限算法、动态门限算法和本文提出的自适应动态缓存门限算法进行仿真建模.该仿真模型重点在于算法的实现方法和性能优化上进行研究分析.三种算法可以公用自适应动态缓存门限算法模型,结构如图 2 所示.在仿真过程中对于静态门限算法和动态门限算法在模型中不需要开启优先级判别模块,对于静态门限算法的门限比较模块只需将缓存门限值修改为固定之即可。

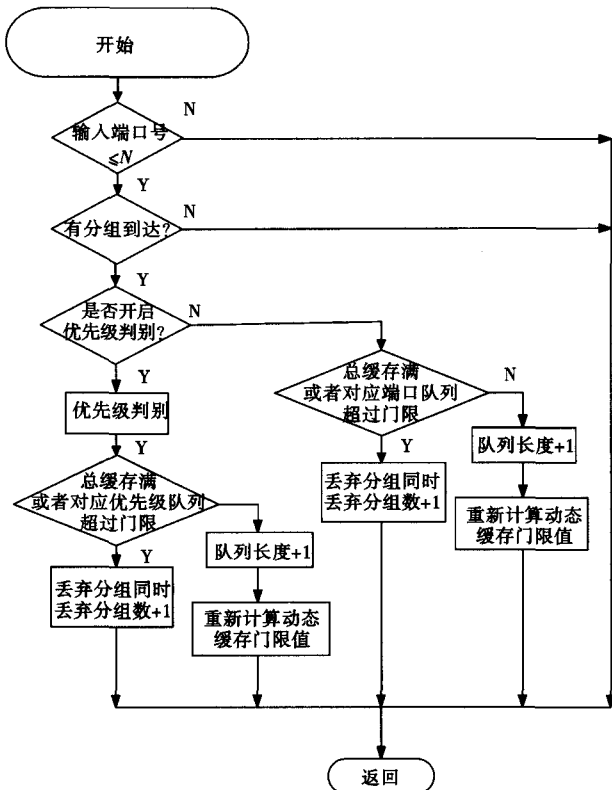


图 2 自适应动态缓存门限模型实现流程图

4.2 性能分析

通过缓存利用率、分组丢失率和吞吐量对文中提出的算法进行仿真分析.在仿真中为了体现自适应动态缓存门限算法对于不同优先级业务的处理能力,将引入用于支持可变速率实时业务,为满足动态变化的实时查询业务 rtPS(real-time pollong service)和支持非实时无任何速率和时延抖动要求的尽

力而为业务 BE(best effort)两个不同优先级的业务模式.为了保证 rtPS 业务的时延和时延抖动指标,将该业务设定为高优先级业务,优先级为 0;将 BE 业务设定为敌优先级业务,优先级为 1.

在仿真实验中整个缓存容量 $B=2\text{ MB}$,输入输出端口数均设定为 $N=64$,分组长度为 128 B 的占有所有分组的 80%左右,分组长度为 64 B 的占有所有分组的 15%,其他分组长度占 5%的概率.静态门限算法中采用的门限为固定值 6 kB,动态门限算法中的 α 取固定值 1.图 3 所示为三种缓存算法的丢包率比较情况,从图中可以看出对于静态门限算法的丢包率最高,动态门限算法的丢包率次之,本文提出的自适应动态门限算法丢包率最低,体现出自适应动态门限算法有效地利用了缓存资源,为到达的分组降低了丢包率。

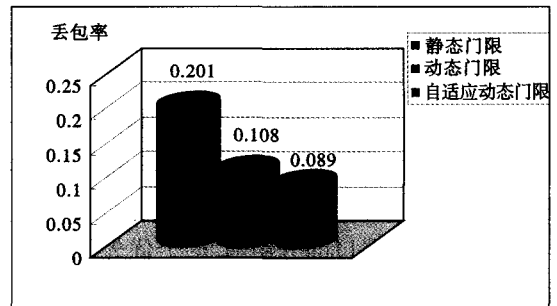


图 3 丢包率比较情况

图 4 所示为三种缓存算法网络吞吐量的比较,可以看出在负载为 0.1 的时候三种算法的吞吐量基本上差不多.当负载量达到 0.2 的时候静态门限算法的吞吐量已经达到一个稳定值.而此时动态门限算法的吞吐量远远高于静态门限算法的吞吐量,自适应动态缓存门限算法的网络吞吐量在总的趋势上要优于动态门限算法。

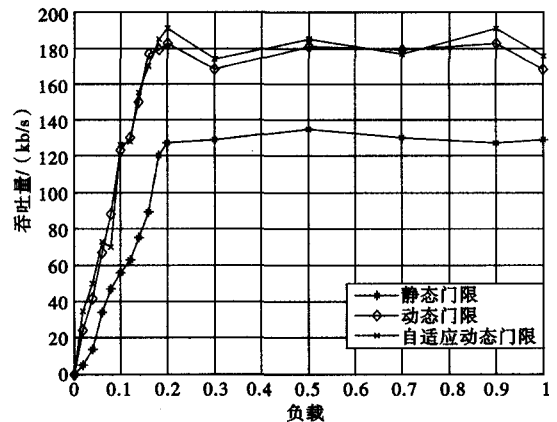


图 4 网络吞吐量在负载增大时的变化曲线

图5所示为三种算法的缓存利用率比较情况,从图中很明显地看到动态门限算法的缓存利用率要高于静态门限算法缓存利用率,自适应的动态门限算法的利用率相比动态门限算法的利用率略高一点。

图6所示为到达在分组中有优先级的情况下动态门限算法和自适应动态门限算法的丢包率比较情况。图6(a)所示为采用动态门限算法时到达分组在

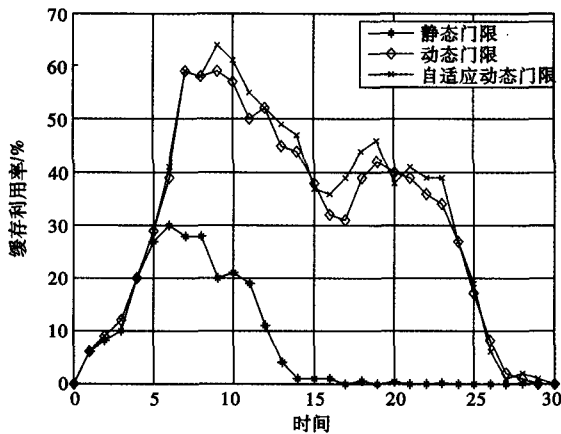
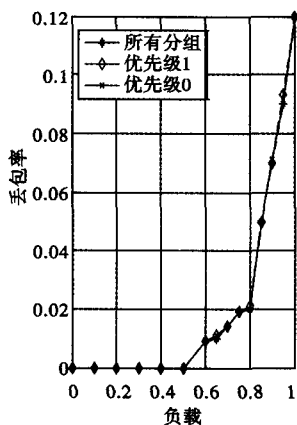
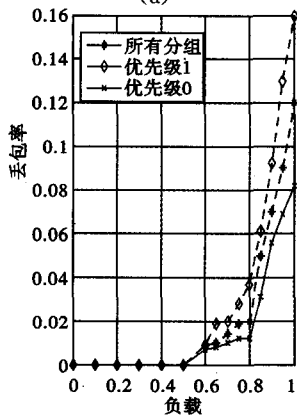


图5 缓存利用比较曲线图



(a)



(b)

图6 有优先级时动态门限算法与自适应动态门限算法的丢包率比较曲线图

随着负载增大时的丢包率,可以看出在采用动态门限算法时所有分组的丢包率基本一样.主要是由于动态门限算法对于优先级的分组处理方式和一般的分组处理方法是一样的.图6(b)所示为采用自适应动态门限算法时到达分组在随着负载增大时的丢包率,很明显地看出该算法对于不同的优先级的丢包率有所不同,优先级低的分组丢包率明显增大而优先级高的分组丢包率降低了,这是由于将优先级低的缓存资源化分给了优先级高的分组。

5 结束语

文中基于虚拟网络设计并实现了一个的自适应片上路由器,其采用自适应动态缓存的虚拟路由算法,用 Verilog 语言描述电路,并给出 SystemVerilog 搭建仿真平台的流程.在 FPGA 开发板上对电路进行了功能验证,并在 2D mesh 拓扑结构下对其性能进行了模拟验证,实验结果表明,采用该算法的路由器可有效避免网络的死锁和拥塞,降低了网络延迟和提高了网络吞吐量。

参考文献:

- [1] Benini L, De Micheli G. Powering networks on chips: energy-efficient and reliable interconnect design for Socs [C]//Proc the 14th Int Symp on System Synthesis. NY, USA: ACM press, 2001:33-38.
- [2] Horowitz M, Dally W. How scaling will change processor architecture [C]//Digest of Technical Papers. ISSCC. 2004 IEEE International Solid-State Circuits Conference. 2004:132-133.
- [3] Hu J, Marculescu R. Energy and performance-aware mapping for regular NoC architectures [J]. IEEE Trans on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2005:551-562.
- [4] Lin chuang, Li Yin. Dynamic partial buffer sharing scheme: Proportional packet loss rate [C]// International Conference on Communication Technology (IC-CT2003), Beijing, China: IEEE, 2003: 255-258.
- [5] 吕耀刚, 蒋林. 一种完全自适应片上路由器的设计 [J]. 微电子学与计算机, 2011, 28(7).
- [6] Hahne E L, Choudhury A K. Dynamic queue length thresholds for multiple loss priorities [J]. IEEE/ACM Trans NETWORKING, 2002, 10(3): 368-380.
- [7] 林闯, 单志广, 任丰原. 计算机网络的服务质量(QoS) [M]. 北京, 清华大学出版社, 2004.

(下转第 128 页)

$$\int_0^1 \xi^T(t, \alpha) T \xi(t, \alpha) d\alpha - \int_0^1 \phi^T(t, \alpha) d\alpha R_d \int_0^1 \phi(t, \alpha) d\alpha \}$$

其中

$$S^T(t, \alpha) = \xi^T(t) [D^s + (1-2\alpha)D^a],$$

$$\eta^T(t, \alpha) = [S^T(t, \alpha), \phi^T(t, \alpha)].$$

经计算可得

$$E\{\mathcal{N}(t) - 2z^T(t)u(t) - \gamma u^T(t)u(t)\} \leq S^T(t)$$

$$\Psi_1 S(t) \quad (19)$$

其中

$$S(t) = [\xi^T(t) \int_0^1 \phi^T(t, \alpha) d\alpha]^T$$

且

$$\Psi_1 = \begin{bmatrix} \Psi + 1/3 D^s T (D^a)^T & D^s \\ (D^s)^T & -R_d - Z_d \end{bmatrix}$$

由 Schur 补引理可知, 式(8)等价于 $\Psi_1 < 0$. 由 $dV(t)$ 的定义可知

$$E\{dV(t) - 2z^T(t)u(t)dt - \gamma u^T(t)u(t)dt\} \leq 0 \quad (20)$$

若 $Z_k > 0, k = 0, 1, \dots, N$, 且式(9)成立, 则 Lyapunov 泛函 $V(t)$ 满足 $V(t) \geq \lambda \|x(t)\|^2, \lambda > 0$ [7] ([14], P. 185).

对于任意的 $t_p > 0$, 将式(20)的两边关于 t 从 0 到 t_p 积分, 则在零初始条件下, 有

$$2E\left\{\int_0^{t_p} z^T(s)u(s)ds\right\} \geq -\gamma E\left\{\int_0^{t_p} u^T(s)u(s)ds\right\} \quad (21)$$

由定义 1 知, 随机神经网络(1)是无源的

4 结束语

本文研究了一类具有离散时滞和分布式时滞的随机神经网络的无源性分析问题. 基于离散化 Lyapunov-Krasovskii 泛函方法和随机系统的无源性理论, 得到了神经网络的时滞依赖无源性条件. 利用

本文方法可进一步研究更为一般的具有混合时滞的随机神经网络,

参考文献:

- [1] Cao J D, Yuan K, Li H X. Global asymptotical stability of recurrent neural networks with multiple discrete delays and distributed delays [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2006, 17(6): 1646-1651.
- [2] Li C, Liao X. Passivity analysis of dynamic neural networks with time delay [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II, 2005, 52(8): 471-475.
- [3] Song Q, Liang J, Wang Z. Passivity analysis of discrete-time stochastic neural networks with time-varying delays [J]. Neurocomputing, 2009, 72(7-9): 1782-1788.
- [4] Xu S, Zheng W X, Zou Y. Passivity analysis of neural networks with time-varying delays [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II, 2009(56): 325-329.
- [5] Chen B, Li H, Lin C, Zhou Q. Passivity analysis for uncertain neural networks with discrete and distributed time-varying delays [J]. Physics Letters A, 2009, 373(14): 1242-1248.
- [6] Li H, Gao H, Shi P. New passivity analysis for neural networks with discrete and distributed delays [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2010, 21(11): 1842-1847.
- [7] Gu K, Kharitonov V, Chen J. Stability of time-delay systems [M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2003.

作者简介:

张振娟 女, (1965—), 硕士, 副教授, 硕士生导师. 研究方向为信号处理.

(上接第 123 页)

- [8] Dovrolis C, Ramanathan P. Proportional differentiated services, partII: loss rate differentiation and packet Dropping [C] // Proc IWQos2000, Pitts burgh, PA: IEEE, 2000: 52-61.
- [9] Lin chuang, Li Yin. Dynamic partial buffer sharing scheme: proportional packet loss rate [C] // International Conference on Communication Technology (IC-

CT2003), Beijing, China: IEEE, 2003: 255-258.

作者简介:

魏美荣 女, (1984—), 硕士研究生. 研究方向为集成电路设计.

蒋林 男, (1970—), 博士, 教授, 硕士生导师. 研究方向为专用集成电路设计.

吕耀刚 男, (1985—), 硕士研究生. 研究方向为集成电路设计.