

引用格式:周继芹,王晶,高岚,等. 基于网络演算的动态可重构总线建模及关键参数确定[J]. 微电子学与计算机, 2021, 38(5):30-36. [ZHOU J Q, WANG J, GAO L, et al. UM-BUS modeling and key parameters determination based on network calculus[J]. Microelectronics & Computer, 2021, 38(5):30-36.]

基于网络演算的动态可重构总线建模及关键参数确定

周继芹^{1,2}, 王 晶¹, 高 岚³, 张伟功^{1,4}

(1 首都师范大学 信息工程学院, 北京 100048; 2 首都师范大学 数学与科学学院, 北京 100048;

3 北京成像理论与技术高精尖创新中心, 北京 100048; 4 高可靠嵌入式系统技术北京市工程技术研究中心, 北京 100048)

摘 要: 嵌入式系统在使用 UM-BUS 总线时, 总线仲裁时隙大小、协议包大小等关键参数对总线性能有很大的影响; 必须通过数学模型建立与仿真分析等手段确定总线关键参数, 确保总线传输时延满足系统的实时性需求. 本文针对 UM-BUS 总线的实时性进行了建模和分析, 利用网络演算理论建立了总线系统数据服务模型, 得出了数据传输时延上界的解析结果表达式, 给出了一个典型的无人艇控制系统实例, 确定了最优的关键参数设置. 通过仿真分析结果与实验统计结果的对比, 验证了模型的准确性.

关键词: 动态可重构总线; 网络演算; 仲裁时隙; 传输时延

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2021)05-0030-06

UM-BUS modeling and key parameters determination based on network calculus

ZHOU Ji-qin^{1,2}, WANG Jing¹, GAO Lan³, ZHANG Wei-Gong^{1,4}

(1 College of Information Engineering, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

2 School of Mathematical Sciences, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

3 Beijing Advanced Innovation Center for Imaging Theory and Technology, Capital Normal University,

Beijing 100048, China; 4 Beijing Engineering Research Center of High Reliable Embedded System,

Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: When UM-BUS is used in embedded system, the BUS arbitration time slot size, protocol packet size and other key parameters have a great impact on the performance of the BUS. The key parameters of the BUS must be determined by means of mathematical model establishment and simulation analysis to ensure that the transmission delay of the BUS can meet the real-time requirements of the system. In this paper, the real-time performance of UM-BUS is modeled and analyzed, the data service model of the BUS system is established by using the network calculus theory, and the analytical result expression of the upper bound of the data transmission delay is obtained. A typical example of unmanned vehicle control system is given, and the optimal key parameter Settings are determined. The accuracy of the model is verified by comparing the simulation results with the experimental statistical results.

Key words: dynamic reconfiguration serial bus; network calculus; arbitration slot; transmission delay

收稿日期: 2020-07-28; 修回日期: 2020-09-07

基金项目: 国家自然科学基金(61741211, 61772350); 北京市高水平教师队伍建设计划(CIT&TCD201704082); 北京市科技新星计划项目(Z181100006218093); 北京未来芯片技术高精尖创新中心科研基金项目(KYJJ2018008)

1 引言

动态可重构总线(UM-BUS)是一种新型的高可靠嵌入式系统专用总线,具备高速、高可靠、小尺寸、易于扩展等特征,可广泛应用于航空航天、汽车、船舶等领域的嵌入式控制系统中^[1-2]. UM-BUS 总线通过时隙令牌轮转方式进行总线仲裁,仲裁时隙大小、协议包数据长度等参数设计对总线实时性有很大的影响,建立总线传输时延的评估与分析模型,得到传输时延与总线参数之间的量化关系,这对于优化总线关键参数设计,推动其工程化应用有重要的指导作用. 网络演算^[3]作为一种对网络进行定量分析的理论工具,能够建立业务流的准确模型以及得到各 QoS 参数的精确边界,已被广泛研究并应用于对时间要求比较苛刻的多种场合,成为嵌入式系统流量控制、调度、QoS 等性能分析的一个新兴的重要手段^[4-7]. 本文利用网络演算理论对 UM-BUS 总线的传输时延进行建模分析,通过仿真分析得出传输时延与协议包长度、仲裁时隙、通道数等参数的关系,从而确定易于工程实现的总线参数配置,为 UM-BUS 总线在实际嵌入式系统中的应用提供必要的理论支撑和技术指导.

2 理论基础

2.1 UM-BUS 总线技术

UM-BUS 总线采用总线型拓扑结构,支持最多 30 个节点直接连接到总线上,如图 1 所示. UM-BUS 的节点设备分为主节点和从节点两种类型,其中主节点是通信过程的发起者,从节点是通信过程的响应者,根据接收到的主节点命令完成相应的数据传输操作. UM-BUS 使用多通道并发传送方式,这些并发通道同时又互为冗余备份,最多支持 32 通道并发传输与动态冗余.

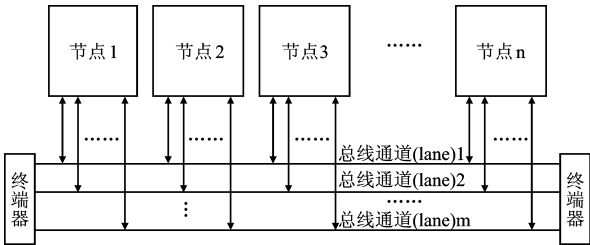


图 1 UM-BUS 总线拓扑结构

2.2 网络演算

网络演算是构建在最小加代数上一门确定性排队系统理论^[8],用于分析计算机网络中的流量控制、调度以及延迟等网络特性,得到相应的量化指标^[9].

采用网络演算对计算机网络进行建模分析时,首先要建立数据流的到达曲线和传输设备的服务曲线,通过推导它们之间的内在关系得到所需要的量化性能参数,如积压和延时等,进而得到网络延时、队列长度、有效带宽等确定性边界.

定义 1(到达曲线):对于一个数据流 A ,如果存在定义在 $t \geq 0$ 上的广义增函数 α ,即 $\alpha \in F$,对所有的 $s \leq t$,都满足:

$$R(t) - R(s) \leq \alpha(t - s) \tag{1}$$

那么我们说数据流 A 具有到达曲线 α .

定义 2(服务曲线):对于一个系统 S , R 和 R^* 分别是数据流在接受 S 服务时的输入和输出函数,如果存在 $\beta \in F$, $\beta(0) = 0$,并且 $R^* \geq R \otimes \beta$,那么我们说系统 S 为数据流提供服务曲线 β .

3 UM-BUS 总线系统建模

3.1 UM-BUS 网络模型

根据 UM-BUS 总线的传输特征以及嵌入式控制系统的应用需求,本文建立了图 2 所示的网络模型. 该模型以 UM-BUS 总线网络为核心,部署了多个主节点和从节点,提供实时和非实时服务. 其中主节点是系统的核心处理单元,完成应用任务执行、调度管理、系统控制等功能,从节点连接不同传感器或执行器,负责数据采集和伺服控制等功能,异构网络转换节点实现与其它系统之间的互联互通、资源共享和互操作. 在该模型中,数据流可能在主节点之间、主节点和从节点之间、主节点和异构网络转换节点之间以及从节点和异构网络转换节点之间流动,这些数据流可能是实时数据流,也可能是非实时数据流. 在实时嵌入式系统中,各种控制数据和非控制数据、实时数据和非实时数据将共存于同一网络,如果重要数据的传输实时性得不到保证,将给系统的运行和控制带来较大的安全隐患.

3.2 流量模型

为满足嵌入式系统的任务需求,UM-BUS 总线网络中有众多不同类型的数据流,包括:(1)安全保障数据,主要是故障监测设备发出的保护、报警等信息,数据量小,但实时性要求很高;(2)周期采样数据,主要是各种传感器定期发送给主节点的采样数据或状态信息,其特点是数据产生稳定、数据量大、实时性要求高,消耗了网络中的主要带宽资源;(3)外部交互数据,主要是跟其它系统之间的交互信息,数据量不大,实时性要求也相对较低;(4)系统维护数据,主要是多个主节点之间进传递的信息,发生频率低,但数据量较大,属于非实时数据流.

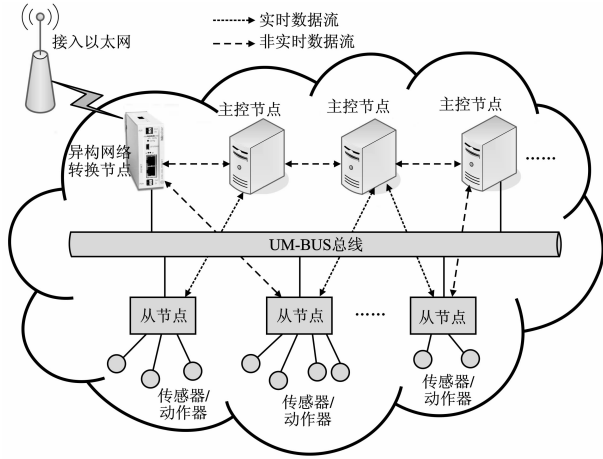


图2 UM-BUS 总线网络模型

由上述分析可以看出,在建立流量模型时,需要重点关注周期性数据。对于其它非周期性数据流,可以认为在截止期限内不会连续发生,将其截止期限看作产生周期,这样在建模分析时就可以将所有数据流都当成周期性数据流进行处理。

假设 UM-BUS 总线系统中有 N 个主节点 $\{S_1, S_2, \dots, S_N\}$, 主节点 S_i 可产生 N_i 个周期性消息, 其优先级分别是 $0 \sim N_i - 1$, 其中 0 为最高优先级, $N_i - 1$ 为最低优先级。消息 $M_{j,i}$ 是主节点 S_i 产生的任意消息, 其优先级是 j , $0 \leq j \leq N_i - 1$, 发送周期为 $T_{j,i}$, 数据长度为 $L_{j,i}$, 则消息 $M_{j,i}$ 的输入函数为:

$$R_{j,i}(t) = \lfloor t / T_{j,i} \rfloor \cdot L_{j,i} \quad (2)$$

根据定义 1, 本文采用漏桶算法模型 $\gamma_{r,b}$ 来描述消息 $M_{j,i}$ 的到达过程, 其到达曲线为:

$$\alpha_{j,i}(t) = L_{j,i} + (L_{j,i} / T_{j,i}) \cdot t \quad (3)$$

即数据流 $M_{j,i}$ 产生的突发数据量为 $b_{j,i} = L_{j,i}$, 并且在较长时间的平均数据到达速率为 $r_{j,i} = L_{j,i} / T_{j,i}$ 。

消息 $M_{j,i}$ 的发送会受到主节点 S_i 中高优先级消息的影响, 由式(2)和(3)可推导出该类消息集合的输入累积函数和到达曲线, 输入累积函数为:

$$\bar{R}_{j,i}(t) = \sum_{z=0}^{j-1} R_{z,i}(t) = \sum_{z=0}^{j-1} \lfloor t / T_{z,i} \rfloor \cdot L_{z,i} \quad (4)$$

到达曲线为:

$$\bar{\alpha}_{j,i}(t) = \sum_{z=0}^{j-1} L_{z,i} + \sum_{z=0}^{j-1} (L_{z,i} / T_{z,i}) \cdot t \quad (5)$$

3.3 服务模型

在 UM-BUS 系统中, 多个主节点采用可变时隙方式进行仲裁, 仲裁时隙分为基本时隙和扩展时隙两种, 分别用 T_s 和 ET_s 表示, 其中 T_s 为固定的时间长度, 而 ET_s 为一次完整通信过程和一个基本时隙

的总和。在系统运行过程中, 如果没有总线占用需求, 则按照基本时隙进行轮转, 主节点要占用总线时, 需等待其对应时隙到来, 将基本时隙扩展为一个通信时间片, 通信完成后, 重新按基本时隙轮转。

用 AC 表示一个仲裁周期, 假设 UM-BUS 总线系统中有 N 个主节点, 当主节点 S_i 要发送消息 $M_{j,i}$ 时, 此消息进入第 i 个时隙的等待队列。在最坏情况下, 主节点 S_i 要等待 $N - 1$ 个扩展时隙后, 才能使用总线, 因此, 消息 $M_{j,i}$ 的等待时间为:

$$T_c = ET_s \cdot (N - 1) \quad (6)$$

假设总线单通道速率为 r_s , 通道数共有 V 条, 则总线带宽为 $B = r_s \cdot V$, 所以在在一个仲裁周期内的服务曲线为:

$$\beta^1(t) = B \cdot [t - T_c]^+ \quad (7)$$

根据 UM-BUS 总线协议包的定义, 消息 $M_{j,i}$ 在发送过程中要拆分成总线协议包的形式, 按照时隙轮转算法依次在循环推进的各个仲裁周期内将协议包发送出去。将第 n 个仲裁周期的服务曲线记为 $\beta^n(t)$, 该曲线可以通过将 $\beta^1(t)$ 沿时间轴平移 $n - 1$ 个仲裁周期得到, 即:

$$\beta^n(t) = \beta^1(t - (n - 1) \cdot AC) \quad (8)$$

由此可知, UM-BUS 总线的实际服务曲线为分段线性形式, 如图 3 所示, 根据网络演算的线性转化原理, 服务曲线为网络为数据流提供服务的能力下界。在建立服务模型时, 将分段形式线性化之后得到服务曲线 $\beta(t)$, UM-BUS 总线的服务过程可用速率 - 延时模型来描述, 其中延时为 T_c , 服务速率为:

$$R_c = B \cdot ET_s / AC \quad (9)$$

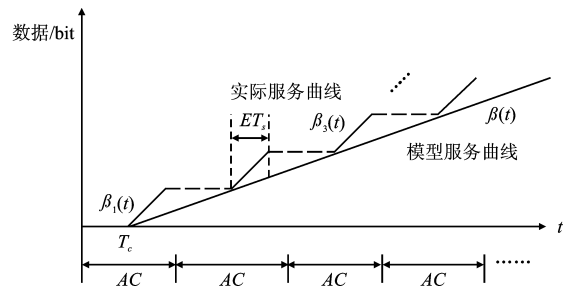


图3 UM-BUS 总线服务模型

通过上述分析, 如果主节点 S_i 产生的数据流只有消息 $M_{j,i}$, 则 UM-BUS 总线为消息 $M_{j,i}$ 提供服务的初始服务曲线为:

$$\beta_{j,i}(t) = \max\{R_c \cdot (t - T_c), 0\} \quad (10)$$

由公式(5)和(10)可以推导出在嵌入式控制系统的多任务环境中, UM-BUS 总线为消息 $M_{j,i}$ 提供服务的最终服务曲线为:

$$\bar{\beta}_{j,i}(t) = \max \left\{ (R_c - \bar{r}_{j,i}) \cdot \left\lceil t - \frac{R_c \cdot T_c + \bar{b}_{j,i}}{R_c - \bar{r}_{j,i}} \right\rceil, 0 \right\}$$

(11)

3.4 时延边界模型

(1) 总线传输时延上界

由消息 $M_{j,i}$ 的初始服务曲线 $\beta_{j,i}(t)$ 和到达曲线 $\alpha_{j,i}(t)$ 推导出总线传输时延的上界为:

$$\begin{aligned} D_{\max,M_{j,i}} &= \frac{L_{j,i}}{R_c} + T_c \\ &= \frac{AC \cdot L_{j,i}}{B \cdot ET_s} + ET_s \cdot (N - 1) \end{aligned}$$

(12)

(2) 端到端时延上界

基于前面建立的最终服务曲线模型和到达曲线模型,可以计算消息 $M_{j,i}$ 传输的端到端时延上界:

$$\begin{aligned} \bar{D}_{\max,M_{j,i}} &= \frac{L_{j,i}}{R_{j,i}} + D_{j,i} \\ &= \frac{L_{j,i} + (R_c \cdot T_c + \bar{b}_{j,i})}{R_c - \bar{r}_{j,i}} \end{aligned}$$

(13)

4 模型验证及分析

4.1 模型正确性验证

为了验证上述 UM-BUS 网络模型的有效性,本文选取了海洋探测无人艇作为典型任务场景,设计实现了一个包含三个主节点和两个从节点的无人艇控制系统,如图 4 所示. 其中 UM-BUS 总线采用 16 通道并发传输,单通道速率为 100 Mbps,通过 UM-BUS 总线连接了多种类型的传感器和执行器,由主节点 1 和 2 对其进行操作控制,主节点 3 作为异构网络转换节点用于跟其它系统进行通信和信息交互. 以主节点 1 为例,分析其产生消息的端到端时延上界,表 1 列出了消息集合的参数配置情况.

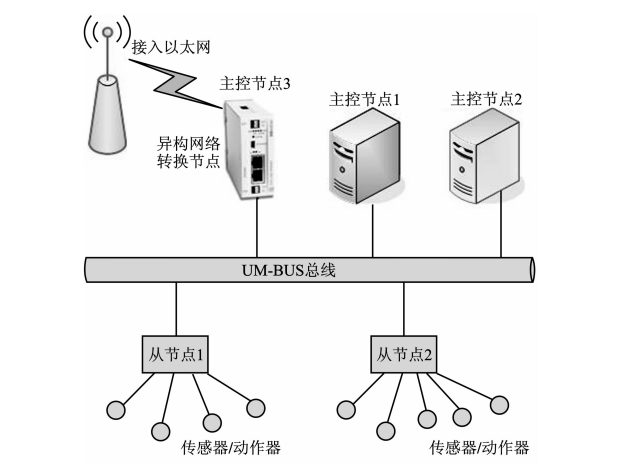


图 4 无人艇控制系统网络结构

表 1 消息参数

消息	类型	目标节点	长度 /byte	周期 /ms	截止期 /ms
M _{0,1}	短包	从控 1	4	/	5
M _{1,1}	短包	从控 2	20	/	5
M _{2,1}	短包	从控 2	32	10	10
M _{3,1}	短包	从控 2	100	10	10
M _{4,1}	短包	从控 1	200	10	10
M _{5,1}	短包	从控 2	500	15	15
M _{6,1}	短包	从控 1	1k	20	20
M _{7,1}	长包	从控 1	4k	50	50
M _{8,1}	短包	主控 2	20	50	50
M _{9,1}	短包	主控 3	20	50	50
M _{10,1}	短包	从控 1	100	50	50
M _{11,1}	短包	从控 2	100	50	50
M _{12,1}	长包	从控 2	600k	100	100
M _{13,1}	长包	主控 3	1k	500	500
M _{14,1}	长包	主控 3	2k	/	1 000
M _{15,1}	长包	主控 2	500k	/	2 000
M _{16,1}	长包	主控 2	1M	/	2 000
M _{17,1}	长包	主控 2	2M	/	5 000

基于上述系统,本文分别采用实验验证和模型仿真两种方式对消息的端到端时延进行了测试和计算,通过对比实验结果和仿真分析结果,验证本文建立的时延上界模型的有效性和准确性. 模型计算结果跟实验测量结果的对比情况如图 5 所示,可以看出,该时延模型的仿真结果与实验结果对比有着较好的一致性,可以准确地反映出 UM-BUS 总线系统的内在特征,由此验证了时延边界模型的有效性.

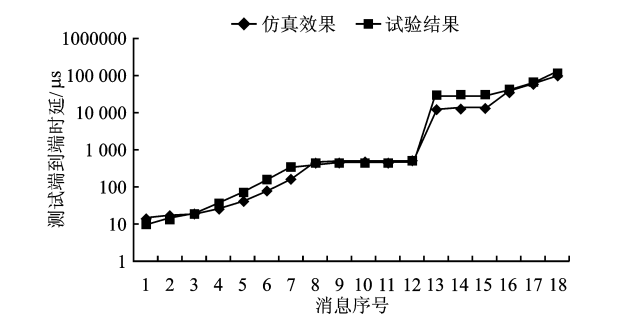


图 5 模型仿真与实际测试端到端时延的比较

4.2 模型仿真分析

通过网络演算的分析方法建立时延边界模型,目的是希望面向嵌入式控制系统的实际应用场景,通过参数的优化设计使得网络性能达到最优,为网

络拓扑参数和总线协议参数的确定提供理论依据。因此,我们基于时延边界模型做了详细的仿真分析,研究总线参数对网络通信性能的影响。

总线传输时延随通道数量的变化情况如图 6 所示,可以看出,随着通道数的增加,消息的最大传输时延呈近似线性化下降趋势,其中长包消息的传输时延受通道数的影响更大,而短包消息由于产生的突发数据量少,受通道数的影响相对较小。

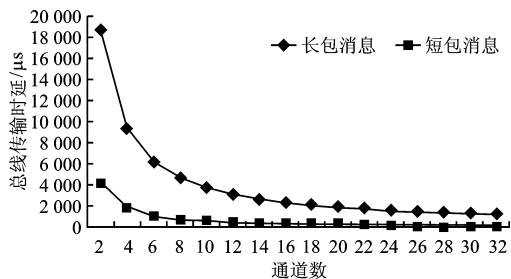


图 6 总线传输时延随通道数量的变化

图 7 反映了网络中包含的主节点数量不同的情况下,总线消息传输时延上界的变化,可以看出,当主节点数量增加时,由于多主仲裁带来的阻塞延时,导致消息的传输延时呈线性增加,其中长包消息受主节点数量的影响更大。

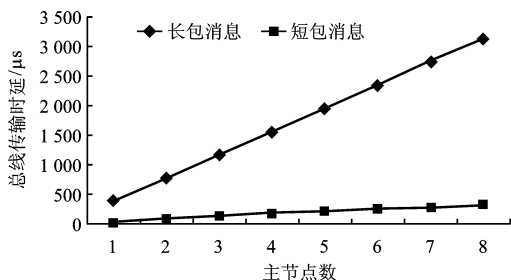


图 7 总线传输时延随主节点数据量的变化

根据上述仿真分析结果,在进行总线参数设计时,需考虑系统的传输时延约束,尤其是长包数据流的传输时延要求,设置系统的主节点数量以及总线通道数。本文根据已建立的数学模型仿真了在无人艇控制系统网络结构下,传输时延与仲裁时隙以及协议包长度之间的关系,如图 8 所示。根据该曲面图,可以在给定传输时延约束下,找到满足约束条件的所有仲裁时隙和协议包长度的可行区间,是针对系统应用需求确定 UM-BUS 总线协议参数设计的重要理论依据。仿真结果表明,针对该典型无人艇控制系统应用场景,考虑易于工程化实现的设计目标,将仲裁时隙设置为 500 ns,协议包长度为 4 096 字节时,系统的实时性能达到最优。

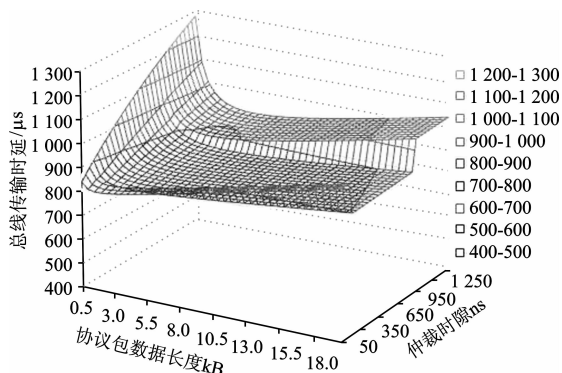


图 8 传输时延与仲裁时隙以及协议包长度三者关系

5 结束语

本文针对 UM-BUS 总线的实时性进行了建模和分析,利用网络演算理论,建立了系统端到端时延边界模型和传输时延边界模型,通过仿真分析结果与实验统计结果的对比,验证了模型的准确性。基于建立的时延边界模型,分析得到了突发数据量、通道数量、主节点数量等总线参数与传输时延的关系。最后,以一个典型的无人艇控制系统为例,绘制了传输时延与仲裁时隙以及协议包大小的约束关系曲面,确定了最优的关键参数设置。本文方法对于面向实时嵌入式系统进行 UM-BUS 总线参数设计以及网络拓扑优化有重要的指导作用。

参考文献:

- [1] 张伟功,周继芹,李杰,等. UM-BUS 总线及接入式体系结构[J]. 电子学报, 2015, 43(9): 1776-1785. DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.09.015. ZHANG W G, ZHOU J Q, LI J, et al. UM-BUS and a plug and play architecture[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(9): 1776-1785. DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.09.015.
- [2] 李超,邱柯妮,张伟功,等. 一种新型的动态可重构总线时间同步方法[J]. 微电子学与计算机, 2016, 33(7): 60-63. LI C, QIU K N, ZHANG W G, et al. A novel time synchronization method for dynamic reconfigurable bus[J]. Microelectronics & Computer, 2016, 33(7): 60-63.
- [3] LE BOUDEC J Y, THIRAN P. Network calculus: a theory of deterministic queuing systems for the internet[M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 2001. DOI: 10.1007/3-540-45318-0.
- [4] 陈克伟,宋小庆,廖自力,等. 基于网络演算的 1553B 总线延迟上界计算方法[J]. 中国电子科学研究院学

- 报, 2019, 14(2): 129-133. DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-5692. 2019. 02. 004.
- CHEN K W, SONG X Q, LIAO Z L, et al. A method for calculating the delay bound of 1553B bus by network calculus[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2019, 14(2): 129-133. DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-5692. 2019. 02. 004.
- [5] GEYER F, CARLE G. The case for a network calculus heuristic: using insights from data for tighter bounds[C]//2018 30th International Teletraffic Congress. Vienna: IEEE, 2018: 43-48. DOI: 10. 1109/ITC30. 2018. 10060.
- [6] ZHU S, SUN Z, LU Y, et al. Centralized QoS routing using network calculus for SDN-based streaming media networks[J]. IEEE Access, 2019, 7: 146566-146576. DOI:10. 1109/ACCESS. 2019. 2943518.
- [7] SONI A, LI X T, SCHARBARG J L, et al. Optimizing network calculus for switched Ethernet network with deficit round robin[C]//2018 IEEE Real-Time Systems Symposium (RTSS). Nashville, TN: IEEE, 2018: 300-311. DOI:10. 1109/RTSS. 2018. 00046.
- [8] LIEBEHERR J. Duality of the max-plus and min-plus network calculus [M]. Boston: Now Publishers Inc. , 2017.
- [9] LONG Y C, LU Z H, SHEN H B. Composable worst-case delay bound analysis using network calculus[J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2018, 37(3): 705-709. DOI:10. 1109/TCAD. 2017. 2729283.

作者简介:

周继芹 女,(1978-),博士研究生. 研究方向为高可靠嵌入式系统.

王 晶 女,(1982-),博士,副研究员. 研究方向为计算机体系结构、智能芯片设计.

高 岚 女,(1987-),博士,讲师. 研究方向为计算机体系结构、GPU 体系结构及编程优化、并行编程模型.

张伟功(通信作者) 男,(1967-),博士,研究员. 研究方向为高可靠计算机体系结构及 SoC 设计、高速高可靠总线技术、计算机容错技术. E-mail:zwg771@cnu. edu. cn.