

时间触发CAN总线系统的建模与性能分析

刘鲁源, 王晓欣, 马津艳

(天津大学电气与自动化工程学院 天津 南开区 300072)

【摘要】时间触发机制的引入提高了CAN总线对实时周期性消息的处理能力,然而系统中的非周期性消息具有迸发性、不可预知性和类型复杂的特点,对其传输性能的分析较为困难。该文利用确定随机Petri网理论建立了时间触发CAN总线系统的模型,通过仿真对异步相中非周期性消息传输进行吞吐量和平均延时等性能分析,得出了相应的量化规律,其结论对时间触发CAN总线系统的分析与设计具有指导意义。

关键词 CAN总线; 事件触发; 确定与随机Petri网; 时间触发
中图分类号 TP202 文献标识码 A

Modeling and Performance Evaluation of Time-Triggered CAN Bus

LIU Lu-yuan, WANG Xiao-xin, MA Jin-yan

(School of Electrical Engineering & Automation, Tianjin University Nankai Tianjin 300072)

Abstract Time-triggered mechanisms improve the ability of Controller Area Network (CAN) bus to deal with the time-critical periodic messages. However, the non-periodic messages have the burst and unpredictable characteristics with complex types. Therefore, it's difficult to analyze their transfer performance. To resolve this problem, a multi-nodes model of time-triggered CAN system is proposed, which is based on deterministic and stochastic Petri net. Through the simulation of the non-periodic messages in asynchronous part, relative performances including the throughput, the average packet delay and the quantitative laws are obtained. These performance are very useful to the analysis and design of the time-triggered CAN systems.

Key words CAN bus; event-triggered; deterministic and stochastic Petri net; tim-triggered

CAN (Controller Area Network:ISO,1993) 总线是专门为传输短小、实时的控制消息而设计的,广泛应用于小范围分布式实时系统中。它在媒体访问控制(Medium Access Control,MAC)层采用非破坏性位仲裁的载波监听(Carrier Sense Multiple Access with Nondestructive Bitwise Arbitration,CSMA/NBA)机制,本质上是以事件触发为基础的总线系统。传统的、单一的事件触发方式已经不能很好地满足硬实时系统对时间约束的要求,具体表现在:(1)消息的调度不可预测与管理;(2)网络资源利用率低,造成网络带宽的浪费。为了改善CAN总线的性能,ISO11898-4在网络协议栈中的会话层引入时间触发机制,形成了性能更好的时间触发CAN(Time-triggered CAN, TTCAN)协议^[1]。时间触发机制的引入为CAN总线扩充了一系列的新特性,避免了在某些硬实时环境下原始的CAN协议具有的局限性,提高了消息传输的可靠性、确定性、复合性和同步质

量,为实现分布式实时应用提供了一种鲁棒性能很好的解决方案。

1 时间触发CAN总线系统

时间触发CAN总线系统的实质是时分多路访问(Time Division Multiple Access, TDMA)传输机制,如图1所示。作为TTCAN协议的一种特例,将时间触发机制中的基本周期分为同步相和异步相,在同步相的时间窗口内传输预先规划好的周期消息,使其行为具有确定性;异步相是TTCAN中仲裁窗口的合并,用以响应具有事件触发特性的非周期性消息,保留CAN总线的灵活性。图中, T_M 为矩阵周期; T_1 为基本周期。在一个矩阵周期中所有的周期性消息至少被传输一次,系统运行的过程就是 T_M 的重复过程。同步相中安排 γ 个窗口,每个窗口对应一个长度为 L_P 的周期消息,基本周期中同步相所占比例为 $K=\gamma L_P/T_1$ 。基本周期的余下部分为异步相,用于以事件触发的方式处理非周期消息,它们按一定的优

收稿时间:2005-06-23

基金项目:天津市重大科技攻关资助项目(023183611)

作者简介:刘鲁源(1941-),男,教授,博士生导师,主要从事控制理论与计算机技术及其应用方面的研究。

高级调度策略来竞争异步相的带宽资源。同步相中产生的非周期消息(M_1 、 M_2 、 M_3)将被阻塞,直至异步相到来。这带来了一定延迟,但保证了周期性消息的实时性。

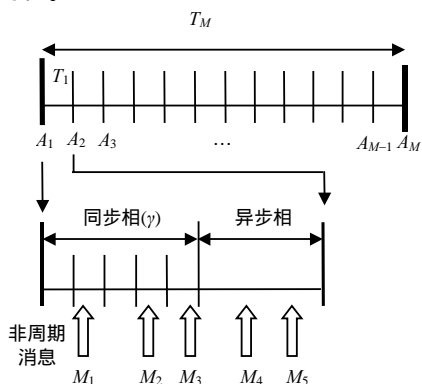


图1 时间触发CAN总线系统中时间轴规划

在时间触发框架下,周期性消息的调度与分析方法在文献[2]中已描述,其基本原理来自于窗口调度算法^[3]。非周期性消息的产生具有偶发性、不可预测性等特点,对其处理方法通常采用以下两种:一种是将其转化为周期性消息^[4],以消息最小到达时间间隔作为周期,以便沿用周期性消息系统可调度分析方法;另一种是认为消息是以某种概率分布到达,并以此为基础研究带宽分配策略^[5]。本文借鉴确定与随机Petri网理论对其进行建模与性能分析,研究异步相中非周期消息传输的实时性、带宽利用率等。

2 时间触发CAN总线系统的建模

Petri网在计算机网络与通信系统建模与性能分析中起着重要作用^[6],确定与随机Petri网(Deterministic and Stochastic Petri Net, DSPN)在广义随机Petri网(General and Stochastic Petri Net, GSPN)的基础上将确定性变迁引入到Petri网中使得其能够更加全面地描述系统的状态及其变化过程,实现对复杂系统的准确建模。

应用确定与随机Petri网理论建立时间触发CAN总线系统模型如图2所示。图中,基本周期由同步相和异步相组成,分别由确定变迁 T_1 、 T_2 表示,其变迁时间为 D_{T_1} 和 D_{T_2} 。瞬时变迁 t_1 、 t_2 为时间轴在同步相和异步相之间的转变过程,库所 P_5 和 P_6 分别表示时间轴处在同步相、异步相的状态。确定变迁 T_4 、 T_6 、 T_8 是数据帧在CAN总线上的传输时间,当总线版本、速率和数据字段长度确定后,是一常值 C 。右边三列分别表示高、中、低三个互斥的优先级消息集,即某一时刻只有一个消息通过仲裁占用总线。

以高优先级消息集为例, P_7 、 T_3 和 P_{10} 组成消息源,指数变迁 T_3 的平均实施速率即消息源的产生速率为 λ_1 ,相应的中、低优先级消息集的产生速率分别为 λ_2 、 λ_3 。库所 P_8 、 P_{13} 和 P_{18} 为消息等待总线仲裁结果的状态,瞬时变迁 t_3 、 t_4 和 t_5 为消息进入总线进行位仲裁的过程,根据模型精简原理将仲裁时间归入到了消息传输时间即 T_4 、 T_6 和 T_8 中^[7]。库所 P_{11} 、 P_{16} 为总线传输状态,当高优先级消息集的库所有标记时,它将通过禁止弧来阻止较低优先级消息集的仲裁瞬时变迁实施。库所 P_9 、 P_{14} 和 P_{19} 表示消息通过仲裁后进入总线的状态,由于CAN总线采用非破坏性位仲裁机制,当低优先级消息集中有消息正在传输时,三个库所将通过禁止弧反向禁止高优先级消息的仲裁瞬时变迁的实施。同步相状态库所 P_5 通过禁止弧来阻止非周期消息仲裁瞬时变迁 t_3 、 t_4 、 t_5 在异步相内实施。异步相状态库所 P_6 中的标记作为确定性变迁 T_4 、 T_6 和 T_8 的一个实施条件,防止非周期消息越界进入异步相。禁止弧权值 K_1 、 K_2 、 K_3 分别表示高、中、低优先级消息集的传输队列长度。

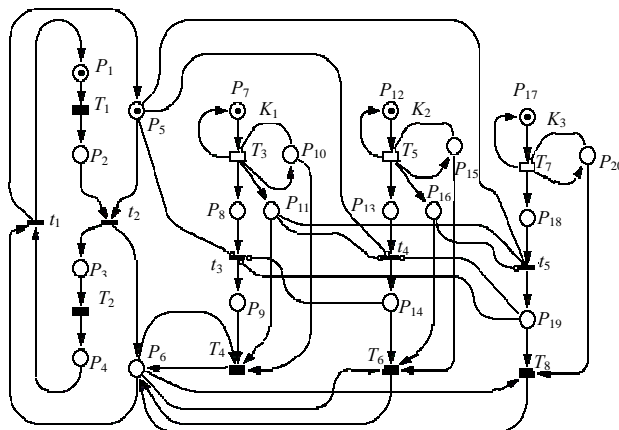


图2 时间触发CAN总线系统模型

3 异步相传输性能分析

选择CAN2.0A总线标准,设总线传输波特率为1 Mb/s,数据段为8 B,则确定变迁 T_4 、 T_6 和 T_8 所对应的实施时间分别为0.000 1 s,且 $T_M=12$ ms、 $K=0.5$ 、 $T_1=2$ ms、 $D_{T_1}=1$ ms、 $D_{T_2}=1$ ms、 $K_1=7$ 、 $K_2=8$ 、 $K_3=1$ 。在DSPNexpress-NG网络仿真环境下运行该模型可得系统吞吐量 S 和平均包延时 D 的量化性能分析^[8]。吞吐量计算公式为:

$$S = \sum_{\substack{m=10,15,20 \\ n=1,2,3}} (1 - E\{\#P_m\}) \lambda_n \quad (1)$$

式中 $E\{\#P_m\}$ 表示库所 P_m 中的平均标记数; n 等于1、2、3时 λ_n 分别表示高、中、低优先级消息集的消息产生速率。CAN总线采用优先级位仲裁机制,优

优先级最低的消息的延迟最能反映系统的传输性能,应用Little公式得到低优先级消息集的消息平均延时计算公式为^[9]:

$$D = E\{\#P_{20}\} / (\lambda_3(1 - E\{\#P_{20}\})) \quad (2)$$

3.1 吞吐量与带宽利用率

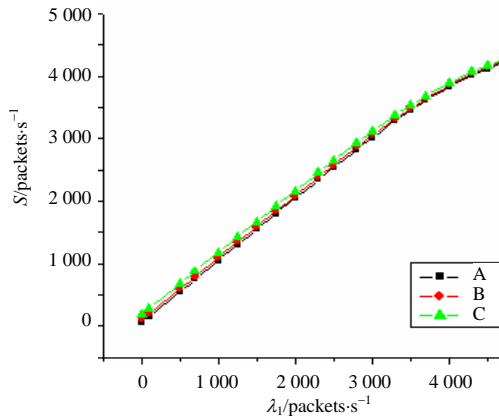


图3 异步相吞吐量曲线 $S \sim \lambda_1$

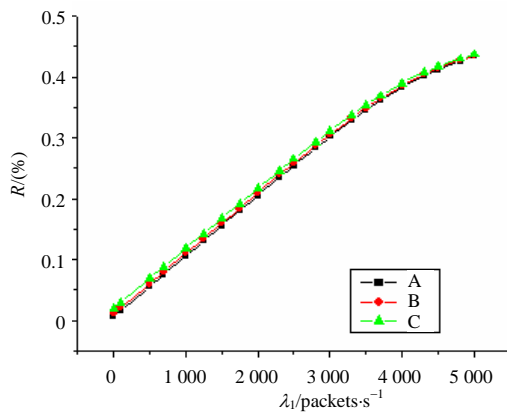


图4 异步相带宽利用率曲线 $R \sim \lambda_1$

在同步相期间,非周期消息在各节点的传输队列中等待,表现为库所 P_{10} 、 P_{15} 、 P_{20} 中的标记个数。时间轴进入异步相后,传输队列中的消息按照优先级进行位仲裁,较高优先级的消息进入总线传输。为研究方便,设中优先级消息集的消息到达速率为 $\lambda_2=100$ packets/s,则非周期消息的吞吐量曲线 $S \sim \lambda_1$ 及带宽利用率曲线 $R \sim \lambda_1$ 分别如图3和图4所示。图中曲线A、B、C分别对应于低优先级消息集的产生速率 λ_3 为50、100、200 packets/s。可见,异步相中非周期消息的吞吐量曲线和带宽利用率曲线的变化趋势相同,都存在着线性变化段和非线性变化段,线性段中吞吐量和带宽利用率随着 λ_1 增加而线性增加。当吞吐量大于3 000 packets/s,即带宽利用率大于30%时,吞吐量和带宽利用率进入非线性增加段,出现了消息丢失现象,且随着 λ_1 增大,吞吐量将最终趋近5 000 packets/s。而带宽利用率将相应趋近

50%,大于5 000 packets/s的消息将被丢弃,这是由基本周期中异步相所占比例 $K=0.5$ 决定的。因此,系统设计时应避免异步相工作在吞吐量曲线的非线性增加段,同时又要兼顾带宽的充分利用。本文中硬实时系统应选择吞吐量在2 000~3 000 packets/s,即非周期消息的带宽利用率在20%~30%。

3.2 消息平均延迟

消息平均延迟是衡量网络系统实时性能的重要指标。以 λ_3 为参变量的非周期性消息的平均延时变化曲线族 $D \sim \lambda_1$ 如图5所示,曲线A、B、C分别对应于 λ_3 为50、100、200 packets/s。

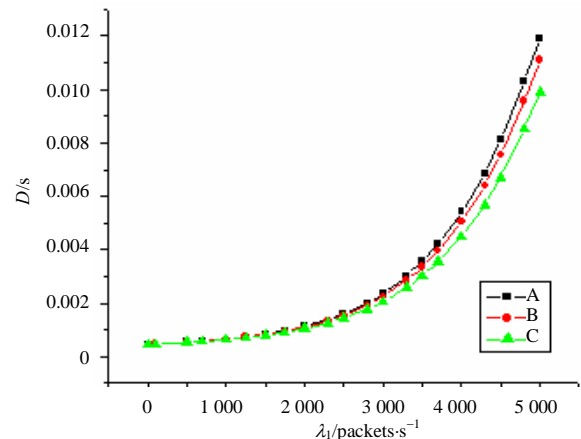


图5 异步相中低优先级消息平均延迟 $D \sim \lambda_1$

从概率角度来说消息到达是随机的,都有被同步相中周期消息阻塞的可能。如图1所示,非周期消息 M_1 、 M_2 、 M_3 被同步相所阻塞而进入相应的消息队列,直到异步相的到来方能进行传输。因此,即使 $\lambda_1=0$ 时,低优先级消息集中的消息传输仍然存在一个较小的延迟值,如图5所示。此外,无论 λ_3 取值如何变化,随着 λ_1 的增大消息平均延迟增大。将图4与图5对照可知,异步相中非周期消息的带宽利用率小于30%时曲线较为平坦,延迟 D 小于2 ms,适合传输硬实时消息;然后延迟值迅速增加,且 λ_3 越小,相应的延时越大,曲线上升速度也越快,传输的实时性下降;当 λ_1 增大至无穷时,低优先级消息被完全阻塞,其延迟为无穷大。因此,在设计硬实时系统的时间触发CAN总线系统的异步相时,应在考虑提高带宽利用率的同时保证总线工作在消息平均延迟曲线的平缓段。

4 结束语

本文采用确定与随机Petri网理论建立了一种时间触发CAN总线系统模型,通过对该模型的异步相中非周期消息传输的仿真,得到吞吐量、带宽利用

率和平均包延迟性能曲线,验证了文献[4]从工程角度所推荐的硬实时CAN系统中总线利用率20%~30%的结论。本文所介绍的时间触发CAN总线系统充分利用时间触发机制与事件触发机制的优点,不仅保证了周期消息的实时传输,而且通过异步相带宽利用率的恰当选择,对实时非周期消息也能满足相应的硬实时需求,整体上提高了带宽利用率。

参 考 文 献

- [1] LEEN G, HEFFERNAN D. TTCAN: a new time-triggered controller area network[J]. *Microprocessors and Microsystems*, 2002, 26(2): 77-94.
- [2] 刘鲁源, 万仁君, 李 斌. 基于TTCAN协议的网络控制系统静态调度算法的研究[J]. *控制与决策*, 2004, 19(7): 813-836.
- [3] SEUNG H H. Scheduling algorithm of data sampling times in the integrated communication and control systems[J]. *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, 1995,

3(2): 225-230.

- [4] KHAWAR M Z, KANG G S. Design and implementation of efficient message scheduling for controller area network[J]. *IEEE Transactions on Computer*, 2000, 49(2): 182-188.
- [5] SEUNG H H, IN-HO C. Experimental evaluation of a bandwidth allocation scheme for foundation fieldbus[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2003, 52(6): 1787-1791.
- [6] 林 闯. 计算机网络与计算机系统性能分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [7] 林 闯. 随机Petri网的分解和压缩技术[J]. *软件学报*, 1997, 8(7): 541-548.
- [8] INDEMANN C. DSPNexpress[EB/OL]. <http://kj.tju.edu.cn/other/DSPNexpress.htm>, 2005-05-20.
- [9] AJ J. The art of computer systems performance analysis: techniques for experimental design, simulation and modeling[M]. New York: Wiley-Interscience, 1991.

编 辑 漆 蓉

(上接第627页)

4 结 论

本文在分析不同BER模式条件下蓝牙网数据传输情况的前提下,提供了一种基于BER模式的数传算法:在数据传输层中依据BER模式的不同状态及时调整数据包传送的模式。通过实验分析,该算法减少了外界环境条件对数据传输的影响,有效地提高了数据传输的效果。

参 考 文 献

- [1] KARN P. MACA: A new channel access method for packet radio[C]// ARRL / CRRL Amateur Radio 9th Computer Networking Conference, ARRL. [S.l.]: [s.n.], 1990: 134-140.

- [2] BHARGHAVAN V, DEMERS A, HENKER S. A media access protocol for wireless LANs[C]//ACM Sigcomm'94. London, UK: [s.n.], 1994.
- [3] BHAGWAT C P P. Highly dynamic destination-sequenced distance vector routing (DSDV) for mobile computers[C]// ACM SIGCOMM'94. [S.l.]: [s.n.], 1994: 234-244.
- [4] RACHID A Y, GEERT H. Polling in bluetooth-a simplified best effort case[C]//CTIT Workshop on Mobile Communications: Polling in Bluetooth-a Simplified Best Effort Case, ISBN 90-3651-546-7, Enschede. Netherlands: CTIT Workshop, 2001.
- [5] CHEN L J, KAPPOR R, SANADIDI M Y, et al. Enhancing bluetooth TCP throughput via link layer packet adaptation [C]// The 2004 IEEE International Conference on Communications (ICC 2004). Pairs, France: [s.n.], 2004.

编 辑 刘文珍