

CAN总线调度算法研究综述

陈丹丹¹, 夏立¹, 王海峰²

(1. 海军工程大学 电气与信息工程学院, 湖北 武汉 430033; 2. 海军91663部队 装备质量控制室, 山东 青岛 266011)

摘要: 针对各类数据对网络的不同需求, 从调度算法研究的目的出发, 分别从提高实时性、确定性、公平性、控制性等角度, 对现有的基于CAN的协议和调度算法进行归纳总结, 并对各种调度算法的特点进行分析和比较, 指出各自的优缺点。

关键词: CAN总线; 调度; 实时性; 网络控制系统

中图分类号: TP393.14

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2007)05-0051-04

Overview on Scheduling Algorithms of CAN

Chen Dandan¹, Xia Li¹, Wang Haifeng²

(1. School of Electric and Information Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Equipment Section of Quality Controlling, Naval Unit No.91663, Qingdao Shandong 266011, China)

Abstract: From the research purpose of scheduling algorithm, it shows different angles in different requirements of its data in improving real-time, determinacy, fairness, controlling performance. A summarization is made based on current scheduling algorithms of CAN. Then, it points out advantages and disadvantages according to the analysis and comparison of all kinds of scheduling algorithms.

Key words: CAN; scheduling; real-time; networked control systems

0 引言

CAN总线起源于20世纪80年代初, 最早是用来解决汽车内部的复杂硬信号接线。由于其低成本、高可靠性、抗干扰能力强等特点, 现已在汽车工业、航天工业、数控机床等领域的控制系统中广泛应用^[1]。CAN总线是基于事件触发机制的多主系统, 其MAC层协议采用非破坏性逐位仲裁技术, 最大带宽只有1 Mb/s, 无法满足网络中各类数据的需求。如何在CAN的基础上采用新的调度算法改进CAN协议, 使其更好地满足消息传输的实时性与可预测性要求成为目前研究的热点。

CAN网络中传输的消息根据其时间约束主要分为硬实时消息、软实时消息和非实时消息。硬实时消息

主要包括各种突发性消息(报警消息等), 该类消息必须在截止期内完成传输; 软实时消息主要指周期性控制消息, 允许偶尔超过截止期完成消息的传输; 非实时消息如组态数据、部分系统状态监视数据等, 这类消息对时间要求不高, 但一般数据量较大。

调度主要指各类数据传输的先后次序以及传输间隔等。调度的目的是如何在网络带宽有限的情况下, 合理分配带宽资源, 提高网络利用率, 满足网络中各类数据的不同需求。研究内容包括如何使紧急数据满足实时性要求; 控制数据如何确定其传输周期、传输顺序等, 使整个控制系统的控制性能最优; 非实时数据如何在不影响实时数据传输的前提下, 保证其公平性等问题。

收稿日期: 2007-07-18

作者简介: 陈丹丹(1981-), 女, 黑龙江鹤岗人, 海军工程大学博士研究生, 主要研究方向为网络控制系统, 现场总线技术; 夏立(1964-), 男, 湖北武穴人, 海军工程大学教授, 博士生导师, 主要从事智能工程技术, 电力系统网络及智能化监控管理技术的研究。

1 基于实时性的调度

从实时性的角度，基于优先级的调度算法具有最快的响应时间。CAN 总线采用非破坏性逐位仲裁技术，当总线上传输的消息发生冲突时，依靠优先级仲裁。所以，CAN 本身是典型的基于优先级调度的协议。Tindell 等^[2-4]从固定优先级调度响应时间的角度对 CAN 报文帧的可调度性进行了分析。

由于固定优先级调度对网络利用率较低，有许多学者将最早截止期优先 (EDF) 动态优先级调度算法应用到 CAN 网络^[5-8]，得出该类动态调度算法在网络负载较小的情况下具有较好的调度行为。文献^[9]提出了一种担保型 EDF 调度算法的实现方法，整个系统在“带宽预定阶段”和“消息传输阶段”进行切换，在调度消息之前增加了带宽预定阶段，这样会增加额外开销时间，但是保证了硬实时消息的可靠传输。

为了充分利用固定优先级调度和动态调度的优点，Zuberi 等^[10]在 CAN 网中采取 MTS (Mixed Traffic Scheduler) 分级调度机制，对不同实时性要求 (高速、低速、非实时) 的数据分别按 EDF+DM, DM, FP 设定相应优先级，获得了比 DM 更高的可调度性，比 EDF 更少的开销。类似地，吕伟杰等^[11]利用 EDF 调度硬实时消息，利用 RM 调度软实时和非实时消息，提高了网络带宽利用率，降低了网络延时，提高了电动汽车的整体性能。

针对网络控制系统中存在多类数据的情况，双优先级 DPP (Dual-Priority Protocol) 动态调度算法^[12]把优先级范围划分为“低硬实时”、“软实时”和“高硬实时”，对于新产生的硬实时消息，先把其放在“低硬实时”优先级队列中，让软实时消息先发送，只有当硬实时消息变得紧急时，再将其优先级提高到“高硬实时”优先级，这样可以减少软实时消息 (控制消息) 的平均响应时间。

2 基于时间确定性的调度

由于 CAN 总线报文传输采用事件触发方式传输，在大量报文竞争总线时，优先级低的报文可能会有较大的时延。为了克服 CAN 的缺点，提供较强的时间确定性，出现了基于时间触发的 CAN 总线协议 TT-CAN^[13]。它不改变标准 CAN 协议，而是在它的基础上的高层协议，是一种基于表的分布式静态调度算法的协议。

TT-CAN 协议基于时间触发的调度表称为系统矩阵，如图 1。

系统矩阵分为若干个基本周期，在一个基本周期中划分 3 个时间窗口 (互斥窗口、仲裁窗口、自由窗口)。每个基本周期开始于一个参考消息 (TM)，并以

下一个参考消息的开始作为结束。系统矩阵可以满足实际应用中包含多个控制环或任务周期性变化的需求。TT-CAN 通过周期性发送参考消息达到对总线节点的时钟同步，在 TT-CAN 中不存在网络管理主节点，节点通过扫描自身保存的调度表 (发送时刻、接收时刻、周期) 来完成消息传输，所以可以提供可预测的延迟时间。



图 1 TT-CAN 中系统矩阵
Fig. 1 System matrix in TT-CAN

像 TT-CAN 这种基于表的调度算法特别适合于周期性消息的传输 (或者把非周期性消息转变为周期性消息)。根据消息的时间特性，利用调度算法构造一张表，该表中说明每个消息的起始传输时刻和传输周期，系统根据该表实现了对系统中所有消息的调度管理。它提供了较高的可预测性但很不灵活，因为如果消息的时间特性发生变化，就必须对调度表进行重构。为了有更大的灵活性，Almeida 等^[14,15]提出基于计划表的动态调度协议 FTT-CAN。它采用同步相和异步相双相基本循环，如图 2。

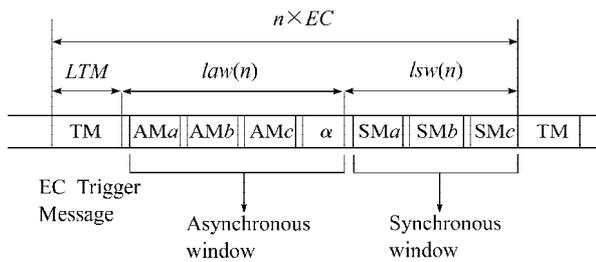


图 2 FTT-CAN 的基本周期
Fig. 2 Elementary cycle in FTT-CAN

FTT-CAN 将周期消息和非周期消息进行隔离，适合于总线上有控制、监测、管理等多类型消息的分布式应用环境。在线周期触发中心调度器中的调度表长度与各控制回路的周期无关，避免了周期互质造成的调度表过大的问题。另外，计划表在线动态构造，比 TT-CAN 有更好的灵活性。

3 基于公平性的调度

FTT-CAN 减少了周期消息和非周期消息的抖动，但非周期消息的公平性较差。对于此问题，Nolte 等^[16-18]

将基于服务器的调度算法应用于CAN网络(其中,服务器是指控制访问共享资源的概念实体)。他在文献[18]中提出 S^3 -CAN (simple server-scheduled CAN) 和 PS^2 -CAN (periodic server-scheduled CAN) 2种调度算法,并进行了最坏响应时间分析。基于服务器的调度算法利用中心媒质访问服务器(M-server)调度一系列网络服务器(N-servers)。M-server负责跟踪每个N-server的状态,并为它们分配带宽。它估计N-server是否有消息发送,根据N-server的截止期使用EDF来选择EC(基本循环周期)中发送消息的N-servers,发送TM(包括可以在EC中发送的N-servers)。收到TM后,N-server在各自的CAN控制器中将消息排队。EC中的消息根据CAN的固定优先级调度,依次发送,最后,M-server发送STOP(优先级最低)。当M-server读到STOP,得知EC中的消息发送完毕,重新开始发送新的TM。与FTT-CAN不同的是基于服务器的调度算法中周期与非周期消息通过服务器联合调度,而不是各自占用独立的窗口,如图3。

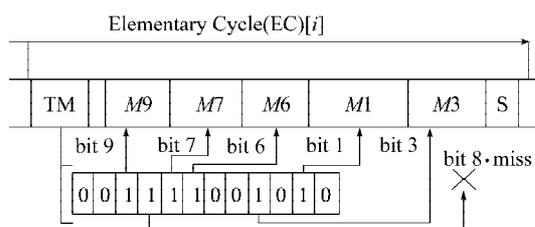


图3 基于服务器调度CAN的基本周期

Fig. 3 Elementary cycle in server-scheduled CAN

M-server负责跟踪每个N-server的状态,并为它们分配带宽。它估计N-server是否有消息发送,根据N-server的截止期使用EDF选择EC(基本循环周期)中发送消息的N-server,发送TM(包括可以在EC中发送的N-servers)。收到TM后,N-server在各自的CAN控制器中将消息排队。EC中的消息根据CAN的固定优先级调度,依次发送,最后,M-server发送STOP(优先级最低)。当M-server读到STOP,得知EC中的消息发送完毕,重新开始发送新的TM。

CAN的基于服务器调度算法最大的优点是而非周期消息提供了很好的服务(实时性和公平性)。它的缺点是CAN本身的标识符在报文响应时间中不再起决定作用,而这同时简化了标识符的分配,又可以方便地与已有的系统兼容。

另外,关于消息的公平性,Cena等人^[19]提出MUST (medium utilization state tracking),利用CAN网的广播信息,确定当前网络数据竞争的最低优先级,从而实现CAN网的循环竞争。平均划分同类优先级数据间的带宽,避免了因优先级的设定和更新造成的优先级

倒置现象。该方法在网络负载较低时接近CSMA网络;在负载较重时接近令牌轮询网络。

4 基于控制性能的调度

上面的方法能提高CAN总线的实时性、确定性和公平性,但是,将CAN应用于网络控制系统中,还要结合控制系统的需要,设计具体的调度算法,才能提高控制性能。

基于RM优先调度策略,Zhang^[20]研究了在满足RM可调度性和系统稳定性双重约束条件下,采用传输相对误差作为NCS的性能优化指标时,网络化控制系统动态性能达到最优的采样周期优化问题。当不能满足可调度条件时,在保证系统稳定的条件下,通过人为丢包的方式,满足网络资源可调度条件,但并没有给出具体方法。

Coutinhoc^[21]运用遗传算法,研究了CAN型网下NCS采样周期初相与周期抖动的优化调度算法。Hong^[22]针对网络中存在的3种类型数据,给出了CAN总线带宽分配方法。Hong的方法虽然简单,并有效地避免了周期抖动,但却占用了较多的网络带宽资源。白涛^[23]提出基于抖动的带宽优化调度算法,在满足系统动态性能和网络可调度性的约束条件下,确定网络化控制系统中各控制闭环的最优采样周期和最优初相,在兼顾传输抖动对控制闭环动态性能影响的同时,使系统具有较高的带宽资源利用率。

万仁君等^[24]从控制系统稳定性角度出发,利用控制环的最大允许环延时,确定控制环的采样周期,同时,基于时间窗口得出控制环中各个节点的起始传输时刻,最终确定了系统静态调度表的结构。同样,从控制系统稳定性角度出发,刘鲁源等^[25]基于TTCAN协议提出了一种静态调度算法。在基本周期中引入了“同步相”和“异步相”的概念,有效利用了总线带宽并且避免了非周期信息对周期性信息造成的扰动。与Hong的不同在于,没有显式确定系统中所有信息的起始传输时刻,而是只确定了信息的产生时刻,同时利用比率单调法,确定了每个信息的优先级关系。

5 结语

以上对现有的基于CAN的协议和调度算法做了归纳总结,分析了它们各自的优缺点。当然,有很多调度算法不只属于一种类别。CAN总线作为国际上应用较广泛的现场总线,如何进一步提高它的实时性、确定性和公平性,完善CAN的性能;如何兼顾网络服务质量(QoS)和控制系统的性能(QoC),设计调度算法,使其适合于网络控制系统等还有待深入研究。

参考文献:

- [1] 李正军. 现场总线及其应用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [2] Tindell K W, Burns A. Guaranteed Message Latencies for Distributed Safety-Critical Hard Real-Time Control Networks [D]. York: Dept. Comput. Sci. Univ. York, Tech., 1994.
- [3] Tindell K W, Burns A, Wellings A J. Calculating controller area network (CAN) message response times[J]. Control Eng. Pract., 1995, 3 (8): 1163-1169.
- [4] Tindell K W, Hansson H, Wellings A J. Analysing real-time communications: Controller area network (CAN) [C]// Proc. 15th IEEE Real-Time Systems Symp. San Juan: [s.n.], 1994: 259-263.
- [5] Livani M A, Kaiser J, Jia W J. Scheduling hard and soft real-time communication in the controller area network (CAN) [C]// Proc. 23rd IFAC/IFIP Workshop on Real-Time Programming. Shantou: [s.n.], 1998.
- [6] Natale M D. Scheduling the CAN bus with earliest deadline techniques [C]// Proc. 21st IEEE Real-Time Systems Symp. Orlando: [s.n.], 2000: 259-268.
- [7] Zuberi K M, Shin K G. Non-preemptive scheduling of messages on controller area network for real-time control applications [C]// Proc. 1st IEEE Real-Time Technology and Applications Symp. Chicago: [s.n.], 1995: 240-249.
- [8] Santiago Fuster, Francisco Rodríguez, Alberto Bonastre. Software-Based EDF Message Scheduling on CAN Networks [C]// Proceedings of the Second International Conference on Embedded Software and Systems. [s.l.]: [s.n.], 2005.
- [9] Mittal A, Manimaran G, Siva Ram Murthy C. Dynamic real-time channel establishment in multiple access bus networks [J]. Computer Communications, 2003, 26: 113-127.
- [10] Zuberi K M, Shin K G. Design and Implementation of Efficient Message Scheduling for Controller Area Network [J]. IEEE Transactions on Computers, 2000, 49 (2): 182-188.
- [11] 吕伟杰, 刘鲁源, 王毅新. CAN总线混合调度方法在电动汽车控制系统中的应用[J]. 计算机工程, 2006, 32 (9): 216-218.
- [12] Navet N, Song Y Q. Reliability improvement of the dual-priority protocol under unreliable transmission [J]. Control Engineering Practice, 1999, 34: 975-981.
- [13] Leen G, Heffernan D. TTCAN: a new time-triggered controller area network [J]. Microprocessors and Microsystems, 2002, 26 (2): 77-94.
- [14] Almeida L, Fonseca J, Fonseca P. Flexible time-triggered communication on a controller area network [C]// Proc. Work-In-Progress Session RTSS'98 (19th IEEE Real-Time Systems Symp.). Madrid: [s.n.], 1998: 23-26.
- [15] Almeida Luís, Paulo Pedreiras, Fonseca Jos é Alberto G. The FTT-CAN Protocol: Why and How [J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2002, 49 (6): 1189-1201.
- [16] Nolte T, Nolin M, Hansson H. Server-Based Real-Time Scheduling of the CAN Bus [C]// Proc. 11th IFAC Symp. Information Control Problems in Manufacturing. Salvador: [s.n.], 2004.
- [17] Nolte T, Sjödin M, Hansson H. Server-based scheduling of the CAN bus [C]// Proc. 9th IEEE Int. Conf. Emerging Technologies and Factory Automation. Lisbon: [s.n.], 2003: 169-176.
- [18] Nolte T, Nolin M, Hansson H. Real-Time Server-Based Communication With CAN [J]. IEEE Transaction on industrial informatics, 2005, 1 (3): 192-201.
- [19] Cena G, Valenzano A. Achieving round-robin access in controller area networks [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 9 (6): 1202-1213.
- [20] Zhang Wei. Stability Analysis of Networked Control Systems [D]. Cleveland: Department of Electrical Engineering and Computer Science Case Western Reserve University, 2001.
- [21] Coutinho F, Fonseca J, Barreiros J, et al. Using genetic algorithms to reduce jitter in control variables transmitted over CAN [EB/OL]. [2003-09-25]. <http://ieeta.pt/~jaf/papers/Ano2000/icc-coutin.pdf>
- [22] Hong S H, Kim W H. Bandwidth allocation scheme in CAN protocol [J]. IEEE Proceeding on Control Theory Application, 2000, 147 (1): 37-44.
- [23] Bai T, Wu Z M, Yang G K. Optimal Bandwidth Scheduling of Networked Control Systems (NCSs) in Accordance with Jitter [J]. Journal of Zhejiang University (SCIENCE), 2005, 6A (6): 535-542.
- [24] 万仁君, 李斌, 刘鲁源. 基于时间窗口的网络控制系统调度算法 [J]. 制造业自动化, 2004, 26 (6): 37-39.
- [25] 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): 813-816.