

文章编号: 1001-0920(2007)04-0448-05

CAN 报文实时性分析及在线评估

王俊波, 胥布工

(华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广州 510640)

摘要: 结合 CAN 总线的位填充机制和最坏情况下的报文延迟时间的数学模型, 针对周期性报文, 提出基于主节点的报文调度方式, 给出了该调度方式下的报文响应时间数学模型. 通过 CAN 总线系统实验平台, 对 CAN 报文的实际长度进行检测和分析, 并对符合 SAE 标准的报文实时性进行了分析和评估. 实验表明, 基于主节点的调度方式保证了 CAN 报文的实时性, 使得系统具有可调度性.

关键词: CAN; 延迟时间; 位填充; 报文调度

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Analysis and online evaluation of CAN message real-time performance

WANG Jun-bo, XU Bur-gong

(College of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China.

Correspondent: WANG Jun-bo, E-mail: wjbwy@163.com)

Abstract: According to the bit stuffing mechanism of the CAN bus and the worst-case message response time models, a master-based message scheduling method is presented for periodic messages. The message response time model based on this method is given. By using the experiment platform based on the CAN system, the actual length of CAN messages is measured and analyzed. The real-time performance of the messages based on the SAE benchmark is analyzed and evaluated. The experiments show that the master-based scheduling method ensures the real-time performance of the CAN messages and makes the system schedulable.

Key words: CAN; Latency time; Bit stuffing; Message scheduling

1 引言

CAN 总线是一种适用于分布式控制系统的现场总线, 具有通用的开发工具、高可靠性能、低成本和良好的协议特性等优点, 已广泛应用于汽车应用和自动化工业环境^[1]. 当前, 随着 CAN 总线在工业领域的应用不断加深以及分布式实时系统日益复杂, CAN 总线的实时性以及可调度性成为应用研究中的热点^[2-6].

在实际应用中, 鉴于 CAN 总线仲裁机制以及位填充机制, 虽然无法精确计算报文的响应时间, 但 CAN 是具有可调度性的网络, 可根据不同的调度策略来分析其实时性. 在过去几年内, 已经开展了相关的研究. 英国约克大学对固定优先级调度系统进行了数学分析. 在第 1 届国际 CAN 会议上, 有学者分

析了具有固定优先级的 CAN 仲裁及其应用性^[7]. Tindell 等^[8,9]分析了最坏情况下 CAN 报文的延迟时间计算问题, 建立了延迟时间的数学模型, 并推导了理想化调度的分析模型, 分析了具体应用. Nolte 等^[10]提出了一种最坏情况下 CAN 报文的概率性响应时间. 对最坏情况下的响应时间进行分析时, 采用的是位填充充分布的方法, 而不是采用最坏情况下的位填充计算模型. 根据位填充的所有可能的组合, 得到了最坏情况下的响应时间分布. 他们还提出基于服务器的 CAN 总线调度方案, 用一个调度源来调度整个网络, 为服务器与各用户间提供了带宽隔离和平等性^[11]. 但是, 在 CAN 网络中, 同一时刻多个报文的同时发送会给系统造成严重的阻塞, 降低系统的性能, 使得系统的瞬间负载增加. CAN 总线调

收稿日期: 2006-01-04; 修回日期: 2006-03-13.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60334010); 国家自然科学基金项目(60474047); 高等学校博士学科点专项基金项目(20030561013); 广东省自然科学基金项目(31406).

作者简介: 王俊波(1976—), 男, 河南安阳人, 博士生, 从事网络化控制系统理论与应用的研究; 胥布工(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 从事时滞不确定控制系统的分析与综合、网络化控制系统理论及应用等研究.

度的研究为进一步分析 CAN 总线实时性以及优化 CAN 总线系统提供了基础. 本文借助灵活的通信调度, 对 CAN 实时性进行分析与评估.

2 数学模型

2.1 位填充分析

根据 CAN 协议规范, 连续 6 个相同极性位用于错误和协议控制信号. 为了避免所传送帧中的这些特殊的位模式, CAN 总线发送器只要检测到所发送的位流里有 5 个连续相同极性位, 便自动在所发送的位流中插入一个填充位. 这意味着实际被传送的帧可能比原始帧要长, 在分析时, 需要考虑附加的传送时延.

对于 CAN 标准数据帧, 除了数据场部分, 帧起始、仲裁场 (包括标识符和 RTR 位)、控制场和 CRC 序列帧, 共计 34 位, 均以位填充方法进行编码. 其他位场 (CRC 界定符、ACK 场和帧结束) 为固定格式, 即有 10 位不进行位填充. 值得注意的是, 5 个连续位包括所插入的填充位.

假设报文 m 的数据字节数为 S_m , 填充前的位数为 $8S_m + 34 + 10$. 因为在 CAN 帧中只有 $8S_m + 34$ 位用于位填充, 那么位填充后的最坏情况下的报文长度为^[10]

$$8S_m + 34 + 10 + \left\lceil \frac{8S_m + 34 - 1}{4} \right\rceil, \quad (1)$$

这里 $0 \leq S_m \leq 8$, 且为正整数.

2.2 报文延迟时间分析

对 CAN 总线实时性分析时, 涉及到的问题有许多方面, 面临许多困难. Tindell 等^[9] 分析了这些问题的复杂性, 根据固定优先级原则, 分析了 CAN 报文的延迟时间数学模型.

根据截止期单调调度理论, 较低优先级的报文具有较长的截止期. 通过设置报文的仲裁场, 可以直接实现截止期单调优先级分配. 一般情况下, 要给每条报文都设置一个截止期 D_m ; 然后计算出延迟时间 R_m , 判断是否满足了截止期, 即若使报文 m 具有可调度性, 须满足条件 $R_m \leq D_m$.

最坏情况下的延迟时间是排队时间与传输时间的总和^[8], 可表示为

$$R_m = t_m + C_m. \quad (2)$$

其中: t_m 为排队时间, 即从报文排队到赢得仲裁的时间; C_m 为传输时间, 即报文实际传送到总线上所需要的时间.

排队时间是由任意较低优先级报文占用总线的最长时间, 以及报文 m 发送前的所有较高优先级报文排队占用总线的组成. 排队时间可表示为

$$t_m^{n+1} = B_m + \sum_{j \in hp(m)} \left\lceil \frac{t_m^n + J_j + \text{bit}}{T_j} \right\rceil C_j. \quad (3)$$

这里: B_m 是任意较低优先级报文占用总线的最长时间; $hp(m)$ 是比报文 m 具有较高优先级的所有报文集合; t_m 是在赢得仲裁之前, 报文 m 排队的最长时间; J_j 是报文 j 的排队抖动, 即报文标识的产生和报文参与仲裁之间的最长时间.

考虑传输过程中附加的 3 位帧间空间, 得到最坏情况下的报文传输时间 C_m 的表达式为

$$C_m = \left(8S_m + 34 + 13 + \left\lceil \frac{8S_m + 34 - 1}{4} \right\rceil \right) \text{bit}, \quad (4)$$

这里 bit 是总线的位时间. 但是, 报文传输具有随机性, 报文在发送过程中所插入的填充位是不可预知的, 所以用式 (4) 计算的传输时间并不能反映实际的传输时间.

在上述分析中, 没有考虑发送错误帧和重发较高优先级报文时间, 或者说是网络不可访问所需要的时间. 实际上, 这些时间是不可避免的. 为进一步分析 CAN 报文的实时性, Tindell 等^[9] 考虑了因传输错误以及错误恢复过程对报文传送所造成的延迟时间, 定义了错误函数 $E(t)$. 把式 (3) 扩展为

$$t_m^{n+1} = B_m + \sum_{j \in hp(m)} \left\lceil \frac{t_m^n + J_j + \text{bit}}{T_j} \right\rceil C_j + E(t). \quad (5)$$

另外, 反映网络系统特性的一个重要指标是网络负载, 即用于传输报文的时间百分比, 表示为

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{T_i}. \quad (6)$$

其中: n 为报文的数目, C_i 和 T_i 分别是报文 i 的传输时间和周期.

Pinho 等^[12] 考虑了在网络出现短暂中断的情况下, 总线不可访问和收发器错误的最长时间对网络负载的影响, 将网络负载定义为

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{T_i} + U_{\text{ina}}, \quad (7)$$

U_{ina} 是因错误检测及恢复机制所造成的网络负载.

3 基于主节点的调度方式

在 CAN 通信中, 有多种报文触发方式, 如事件触发、时间触发等. 在此, 本文所提出的方式并不是要改变现有总线驱动方式, 而是要在进行系统设计与优化时, 尽可能考虑如何改善系统的传输效率.

考虑一组周期性的报文, 当所有报文同时发送时, 会造成网络负载瞬间增加, 给系统造成较大的抖动. 另外, 周期性报文可能会因为系统造成较大的抖动而产生较大的延迟时间.

在此, 考虑由主节点来调度报文, 就是由主节点通过广播报文的方式, 分时分组请求 CAN 总线中的报文, 以不同的相位进行传输. 要求主节点增加一

组报文用于调度报文(称这样的一组报文为基本周期报文),并将该报文作为触发报文。

要求主节点有效地调度触发报文,决定何时发送触发报文以及请求哪个节点发送报文。网络中各节点有权来决定是否接收请求。

在这种调度方式下,结合 CAN 报文延迟时间的分析,定义初始相位 ϕ ,即报文 m 触发前的时间长度。在理想情况下,报文 m 的响应时间为

$$R_m = \sum_{i=0}^{\phi} T_{tr} + \sum_{\forall i f(m)} R_j. \quad (8)$$

这里: T_{tr} 为触发报文的基本循环, ϕ 为初始相位, $f(m)$ 是当前相位内的优先级高于报文 m 的所有报文的集合, R_j 是报文 j 的响应时间。例如:在图 1 所示的调度方式中,报文 0 的相位为 0,周期定义为 1。报文 1 的相位为 1,周期定义为 2,依次类推。

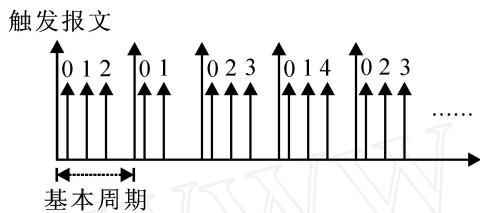


图1 基于主节点的调度方式

通过这种调度方式,在符合 CAN 通信条件的情况下,只要给报文合理分配初始相位,就能灵活地调度报文,从而避免同一瞬间多个报文参与总线仲裁,不易造成报文猝发,有效地降低网络负载或峰值负载。但是,通过主节点的调度传输可能会给系统造成不必要的报文数据字节,会给节点造成不必要的内存空间,而且增加了系统运算开销。这对主节点的整体性能提出了较高的要求,因而要尽可能减少这方面的影响。

在实际应用中,需要配置高性能的节点,提高节点的运算能力及性能。另外,还需要借助报文的标识符信息和数据字节来表示各节点的信息和定时发送相位。比如,具有 8 个数据字节长度的报文 0x01 用于基本周期报文,请求各节点发送报文,可以用数据字节 0 表示所请求的节点,用数据字节 1 表示所分配的相位。

4 报文在线评估

在实际应用中,借助开发工具和实验平台,检测报文的实际填充位和基于主节点的调度方式下的报文响应时间,评估报文实时性。

4.1 实验平台

4.1.1 硬件结构

为了分析和评估 CAN 报文实时性,本文设计了 CAN 总线网络实验平台,如图 2 所示。在该平台中,具有双节点功能的 CAN-AC2-PCI 卡作为主节

点,通过 CAN 总线,与辅助硬件 CANscope 以及其他 CAN 节点相连接。

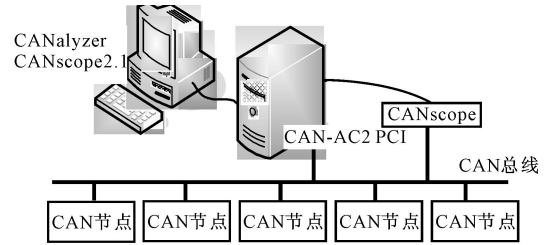


图2 CAN总线网络实验平台

CAN 节点不但要完成程序的设计与运算,还要使整个系统具有诊断和电磁干扰能力,避免一些瞬时现象(如电磁干扰、电源扰动等)及软件错误对节点的影响。另外,要保证 CAN 总线协议的通讯接口和通讯链路可靠性。为此,采用 AT89C51CC01, P82C250 以及 6N137 为主要组件的硬件设计方法,为网络提供了高性能的节点配置。

4.1.2 软件说明

软件 CANscope2.1 是德国 Vector 公司开发的分析实际 CAN 报文的有效工具,用于在线记录与评估总线上的电平信号和总线的差分信号,检测 CAN 报文实际帧格式和实际的填充位。

软件 CANalyzer 是德国 Vector 公司开发的基于 CAN 总线系统的标准工具,用于分析、测试、仿真与产生总线上的报文^[13]。在 CAPL 浏览器中,用 CAPL 语言来编写应用程序。通过应用程序,主节点处理所有接收或发送的报文,实现对总线的监控与检测,并完成网络报文的调度任务。

4.2 位填充检测

采用 CANscope 对总线进行实时检测时,触发方式设置为单次触发,触发源为报文 0x700。报文触发后,在软件 CANscope 浏览窗内显示实际报文的位序列以及填充位序列,如图 3 所示。结果显示,该报文的数据字节为 8,分别为 01H, 02H, 03H, 04H, 05H, 06H, 07H, 08H。在报文传送过程中,插入了 10 个填充位,传输时间为 121 个位时间。但是,根据最坏情况下的数学模型,填充位的数目为 $(34 + 8 * 8 - 1) / 4 = 24.25$ 。传输时间为 135 个位时间。若采用最坏情况下的数学模型进行报文延迟时间分析,就会造成 14 个位时间的差。

同样,触发源为报文 0x12 时,结果显示报具有 8 个数据字节,分别为 FFH, 12H, 15H, 15H, 14H, 12H, 01H, 00H。根据实际检测到的位序列,填充位只有 4 位,传输时间为 115 个位时间。而最坏情况下的填充位的数目仍为 24,传输时间仍为 135 个位时间,那么在这种情况下,就会造成 20 个位时间

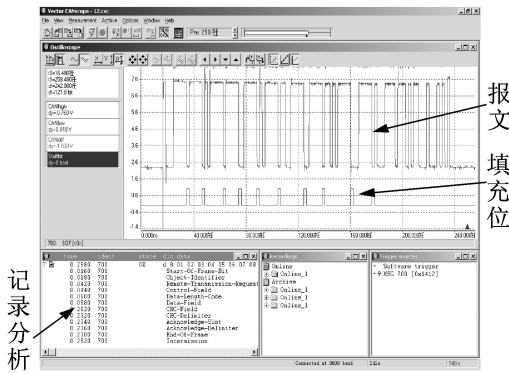


图 3 实际报文的位序列及填充位序列

差.若波特率设置为 500 kbps,那么就会造成 0.04 ms 的时间差.

在理想情况下,位填充的计算能够反映 CAN 通讯的实时特性.但在实际分析中,尤其是实时性要求较高的场合,要尽可能地考虑实际报文对信息传输的影响.

4.3 实验结果

实验目的就是要对网络中实际报文的响应时间及整体性能进行评估.在实验过程中,波特率分别设置为 125 kbps,250 kbps 和 500 kbps. CAN 控制器的时钟频率为 12 MHz.实验采用的报文符合汽车工程协会(SAE)提供的多路通信技术标准^[14].

通过上述实验平台,可以直观地分析和计算实际报文的传输时间和报文的响应时间,采用 DM 方法对表 1 中所检测的报文的优先级进行分配.

表 1 实验所采用的报文

报文 ID	报文	数据长度 字节	周期 ms	截止期 ms	实测报文 长度/位
400	1	2	5.0	5.0	68
450	2	6	5.0	5.0	97
510	3	8	5.0	5.0	122
520	4	8	5.0	5.0	116
530	5	8	5.0	5.0	115
540	6	8	10.0	10.0	118
600	7	1	10.0	10.0	59
650	8	3	10.0	10.0	63

实验 1 通过远程请求报文发送的方式,以报文标识符作为触发条件,对报文的实际长度进行检测,检测结果如表 1 所示.根据实测报文长度,得到报文在总线上的传输时间,例如,波特率为 500 kbps 的条件下,报文 1 和 2 的传输时间分别为 0.136 ms 和 0.194 ms.

实验 2 在 $t=0$ 时刻,同时释放表 1 中各报文,检测报文的响应时间.实验结果如图 4 所示,在波特率为 500 kbps 时,虽然各节点报文的响应较为迅速,但是各节点间抖动大,对系统影响较大,出现低优先级报文抢先情况.例如,报文 2 的响应时间是

1.62 ms,而报文 3 是 0.42 ms.这说明报文 3 在仲裁过程中,抢先发送,造成了较大的抖动.在波特率为 125 kbps 时,报文 8 的响应时间已超出其截止期,说明该报文在现有条件下不能满足可调度性条件.

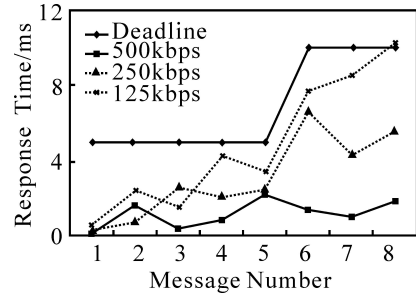


图 4 周期性报文同时发送的响应时间

由 CANalyzer 软件反馈的总线统计显示,在波特率为 500 kbps,250 kbps 和 125 kbps 的情况下,总线负载分别为 24.45%,48.23%和 89.45%,峰值负载达到了 22.45%,48.36%和 91.48%.结果表明,在波特率较小时,总线负载较大,这对于实时总线网络是不适宜的.

实验 3 根据基于主节点的调度方式,仍按上述条件的总线参数对系统进行分析.报文在波特率为 125 kbps,250 kbps 和 500 kbps 情况下的实时性,如图 5 所示.显然,报文没有出现明显的抖动,满足报文的实时调度条件,系统具有可调度性.

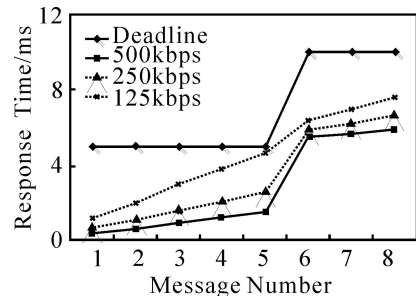


图 5 基于主节点的调度的报文响应时间

与实验 2 的检测结果相比,在同一波特率条件下,该实验中的报文响应时间有增大的情况.例如,在 250 kbps 的情况下,报文 1 和报文 8 的响应时间分别为 0.732 ms 和 6.692 ms;而在实验 2 中,报文 1 和报文 8 的响应时间仅为 0.14 ms 和 4.68 ms,这是因为系统需要传输触发报文,增加了额外的报文开销.

由 CANalyzer 软件反馈的总线统计显示,在波特率为 500 kbps,250 kbps 和 125 kbps 的情况下,总线负载分别为 3.51%,8.23%和 15.01%,峰值负载分别为 3.75%,8.36%和 15.32%.总线利用情况得到较大的改善.

综上分析,根据通信要求,合理选择通讯波特率

以及传输周期,避免实时性报文因超出截止期而被迫放弃,造成较大的传输时延.同时,通过合理的计划调度或灵活的触发方式,尽可能减少总线上多个报文的冲突,保证 CAN 报文实时性.

5 结 语

本文针对 CAN 报文实时性问题,提出了基于主节点的调度方式,给出了报文响应时间数学模型.该调度方式减少了周期性报文的冲突,改善了系统性能,且易于实现.通过实验平台,检测了报文的实际填充位,分析了在不同条件下报文的响应时间和总线负载,从而验证了所提出调度方式的有效性及应用性.

参考文献(References)

- [1] Cena G, Valenzano A. Efficient polling of devices in CANopen networks [C]. Proc of the ETFA'03 Conf on Emerging Technologies and Factory Automation. Lisbon, 2003: 123-130.
- [2] Tindell K, Clark J. Holistic schedulability analysis for distributed hard real-time systems[J]. Microprocessors and Microprogramming, 1994, 40(2-3): 117-134.
- [3] Natale M D. Scheduling the CAN bus with earliest deadline techniques [C]. Proc of the 21st IEEE Real-time Systems Symposium. Orlando, 2000: 259-268.
- [4] Pedreiras P, Almeida L. EDF message scheduling on controller area network [J]. Computing and Control Engineering J, 2002, 13(4): 163-170.
- [5] Pinho L M, Vasques F. Timing analysis of reliable real-time communication in CAN networks[C]. Proc of the 13th Euromicro Conference on Real-time Systems. Delft, 2001: 103-114.
- [6] Audsley N, Burns A, Richardson M, et al. Applying new scheduling theory to static priority pre-emptive scheduling[J]. Software Engineering J, 1993, 8(5): 285-292.
- [7] Wolfhard Lawrenz. CAN system engineering from theory to practical applications[M]. German: Springer, 1997.
- [8] Tindell K W, Hansson H, Wellings A J. Analyzing real-time communications: Controller area network (CAN) [C]. Proc of the RTSS'94 Real-time Systems Symposium. San Juan, 1994: 259-263.
- [9] Tindell K, Burns A, Wellings A J. Calculating controller area network (CAN) message response time [J]. Control Engineer Practice, 1995, 3(8): 1163-1169.
- [10] Nolte T, Hansson H, Norstrom C. Probabilistic worst-case response-time analysis for the controller area network[C]. Proc of the 9th IEEE Real-time and Embedded Technology and Applications Symposium. Toronto, 2003: 200-207.
- [11] Nolte T, Sjodin M, Hansson H. Server-based scheduling of the CAN bus[C]. Proc of the ETFA'03 Conf on Emerging Technologies and Factory Automation. Lisbon, 2003: 169-263.
- [12] Pinho L P, Vasques F, Tovar E. Integrating inaccessibility in response time analysis of CAN networks [C]. Proc of the IEEE Int Workshop on Factory Communication Systems. Porto, 2000: 77-84.
- [13] Gamiz J, Samitier J, Fuertes J M, et al. Practical evaluation of messages latencies in CAN [C]. Proc of the ETFA'03 Conf on Emerging Technologies and Factory Automation. Lisbon, 2003: 185-192.
- [14] SAE J2056/1. Class C Application Requirement Considerations [S].

(上接第 447 页)

- [3] Fuh C C, Tsai H H. Control of discrete-time chaotic systems via feedback linearization [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2002, 13(2): 285-294.
- [4] Moez Feki. An adaptive feedback control of linearizable chaotic systems[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2003, 15(5): 883-890.
- [5] 钱俊磊,马晓峰,杨志刚.混沌系统基于 T-S 模糊模型的控制方法[J].系统仿真学报,2005,17(12): 2987-2990. (Qian J L, Ma X F, Yang Z G. Approach of chaotic control based on T-S fuzzy model [J]. J of System Simulation, 2005, 17(12): 2987-2990.)
- [6] Alligood K, Sauer T, Yorke J. Chaos: An introduction to dynamical systems[M]. New York: Springer, 1997.
- [7] Guckenheimer J, Holmes P. Nonlinear oscillations, dynamical systems and bifurcations of vector field[M]. New York: Springer, 1983.
- [8] 马知恩.种群生态学的数学建模与研究[M].合肥:安徽教育出版社,1996. (Ma Z E. Mathematic modeling and studying of population biology [M]. Hefei: Anhui Education Publishing House, 1996.)
- [9] Clark C W. Mathematical bioeconomics: The optimal management of renewable resources [M]. New York: Wiley, 1990.
- [10] Parker T S, Chua L O. Practical numerical algorithms for chaotic systems[M]. New York: Springer, 1989.