

文章编号: 1001-0920(2008)05-0551-04

资源受限的网络控制系统调度

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: 结合具有多控制回路的网络控制系统框架结构, 设计了反馈调度器以实现调度策略. 根据控制性能最优化要求, 分析了系统的可调度性. 通过实时调整各控制回路的采样周期, 采用优先级分配方法, 在线优化多控制回路的网络控制系统性能. 通过对 3 个控制回路组成的网络控制系统进行仿真实验, 验证了可调度分析和调度策略的有效性.

关键词: 网络控制系统; 调度; 采样周期; 优先级

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Scheduling of networked control systems under resource constraints

WANG Jun-bo, XU Bu-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: In terms of the architecture of networked control systems with multi-control loops, a feedback scheduler is designed to implement the scheduling strategy. According to the requirement of control performance optimization, the system schedulability is analyzed. Control performances of networked control systems with multi-control loops can be optimized on-line by adjusting sampling periods of loops and using the priority assignments. The schedulable analysis and scheduling strategy are validated by the simulation of networked control systems with three control loops.

Key words: Networked control systems; Scheduling; Sampling period; Priority

1 引言

在控制网络中, 常常存在多个控制回路共享网络资源的情形, 而有限的网络带宽和通信速率将造成网络资源的分配不均衡、控制性能降低等问题. 如何充分利用有限资源得到最优化的控制性能, 已成为当前网络控制系统研究的一个重要课题.

从实时性角度考虑, 网络调度的任务就是要实现信息的有效传输. 在实时调度范畴内, 已经提出了一些反馈调度算法^[1]. 从控制性能角度, 在现有的网络资源条件下应保持或优化各控制回路的性能. 从资源限制和网络负载的影响考虑, 应能采用一些算法^[2,3]对带宽进行有效分配, 同时确保系统的整体控制性能最优化.

资源受限的网络控制系统调度问题就是建立资源分配与控制性能的关系. 研究表明, 控制任务的有效调度可实现资源的有效分配, 从而提高系统资源

的利用率, 并得到最优化的控制性能.

基于反馈调度的思想, Arzen 等人^[4]将调度与控制性能进行了综合考虑. 通过改变采样时间和控制任务数量, 在线调整任务特性, 使控制性能最优, CPU 资源的利用率趋于或达到理想值. Cervin 等人^[5]采用反馈和前馈调度器来调整控制任务的采样周期, 使控制器的整体性能最优, 有效地实现了资源最优分配. 另外, 文献^[6]虽然采用反馈调度的思想对资源进行了重新分配, 但并没有涉及到每个控制回路的实际性能.

目前, 反馈调度的研究主要集中于 CPU 资源的利用率和系统性能相关性, 很少涉及分布式网络控制系统的网络资源分配问题. 借助多任务调度理论和反馈调度理论, 可有效地分析和研究多控制回路的网络控制系统调度问题^[7]. 例如, 通过一些动态理论和适当采样方法, 可减少总线网络(如 CAN)的

收稿日期: 2007-03-06; 修回日期: 2007-06-14.

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); 广东省自然科学基金项目(06105413).

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与应用等研究.

流量,对带宽进行有效分配^[8].另外,调度算法 RM 在 CAN 总线中的应用^[9],也为本文的研究提供了必要的理论基础.

本文针对多回路的网络控制系统结构,设计了反馈调度器,通过采样周期自适应算法和优先级分配方法对网络资源进行调度,优化系统的控制性能.

2 网络结构及性能指标

2.1 网络控制系统框架结构

在图 1 所示的 CAN 网络控制系统结构中, n 个相互独立的控制回路共享同一总线网络.每个控制回路都由一个传感器节点、一个控制器节点和一个执行器节点组成.

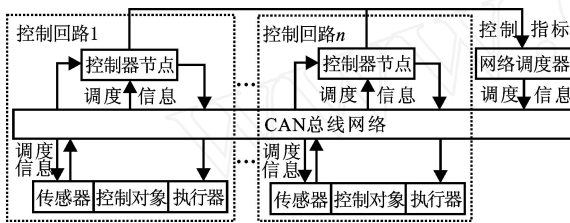


图 1 具有调度器的网络控制系统框架结构

假设所有传感器都是时间驱动的,且所有控制器均采用事件驱动方式,即每个回路的传感器在各采样周期的开始时刻都会对物理对象进行采样,然后将采样数据通过总线发送到控制器.根据接收到的数据,控制器通过相应的控制算法来计算控制信号,并向总线发送控制信号,同时计算控制性能指标,并提供给反馈调度器.执行器根据接收到的控制信号直接作用于控制对象.

根据采样周期选择算法和优先级分配方法,反馈调度器分析系统信息,制定相应的决策,为各控制回路提供调度信息.调度信息采用广播报文的方式发送.各传感器将根据调度信息调整采样周期,同时,传感器和控制器都将选择优先级.

反馈调度器可作为系统的周期性任务来执行.信息发送周期和计算时间都是可选的.较短的周期会很好地控制资源利用率,但占用的可用资源较多.较长的周期占用的资源较少,但会导致调度器对实际网络负载变化的响应迟缓.

2.2 性能指标

通常,资源分配时需考虑两点:1) 采用最小化或最大化的目标函数描述采样周期和控制性能之间的关系,采样周期的变化将直接影响每个控制对象的动态性能;2) 调度算法给实时系统带来的约束条件,在约束条件下,分析可调度性.

成本函数必须能反映对象的响应特性,且检验控制性能.反馈调度的目标是使整个控制性能最优

化.传统上,采用对象响应与给定值的偏差以及减少偏差所消耗的能量来反映控制性能.在本文中,为了方便,每个控制回路的成本函数表示为

$$J_i = \int_{k=0}^n |e(k)| dt. \quad (1)$$

偏差越小,控制性能越好.控制性能的最大化就是要使成本函数最小.由图 1 可知,成本函数不仅与各报文的传输时间相关,还与反馈调度器的信息传输间隔有关,所以,整体控制性能的最大化的求解问题可表示为

$$\min J = \sum_{i=1}^n J_i(T_i, T_s), \quad (2)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{T_i} = \sum_{i=1}^n \bar{U}_i \leq U_a. \quad (3)$$

其中: C_i 是报文 i 的传输时间; T_i 是任务 i 的采样周期,即周期性报文 i 的发送周期或非周期性报文 i 传输的平均间隔时间; \bar{U}_i 是报文 i 的平均利用率; U_a 是期望的总线利用率.

不管 U_a 取何值,都要以控制性能最大化为目标.但 U_a 太高,可能造成系统出现短暂的无法调度; U_a 太低,则可能浪费有限资源.在实际应用中, U_a 应小于或接近 1.

根据 RM 和 EDF 调度理论,对网络控制系统可调度理论进行扩展,得到定理 1.

定理 1 如果所有任务都是独立的,且满足

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{C_i}{T_i} + \frac{I_i}{T_{in}} \right) \leq 1, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

则具有固定优先级的网络具有可调度性.其中: T_{in} 是报文不可访问网络的平均时间间隔; C_i 是各报文在总线上的传输时间; T_i 是任务 i 的采样周期或报文 i 的传输间隔.

3 调度策略

3.1 采样周期算法的影响

通常,如果控制器参数依赖于采样周期,则控制器应根据当前周期实时调节其参数.大量的在线计算将占用太多的系统计算资源,因此应尽可能地减少采样周期算法的计算量.

采样周期直接影响总线利用率,采样周期越长,总线利用率越低.相对而言,减少了总线上报文的冲突,从而减小了报文的等待时延,将避免较大的网络时延,有助于改善控制质量.相反,采样周期越短,总线的利用率越高,各节点的报文可能被延迟发送,加大网络时延,从而影响控制性能.

为减小采样周期算法对控制系统的性能影响,可选择适当采样周期来调整采样时间,该方法已应用于 CAN 网络^[10],这是研究 CAN 网络资源调度的

理论基础.

3.2 采样周期自适应算法

对于每个回路而言,采样周期都会影响系统性能,甚至造成系统的不稳定现象.通常,通过修改控制器参数或改变控制策略,可达到系统稳定.但在实际条件下,不易实现.从资源使用的角度来看,期望各回路占用较少的资源,并通过对传输信息的调度使系统的整体控制性能达到最优.虽然采样周期加大,会影响单个控制回路的性能,但适当的采样周期算法将使多控制回路的系统具有可调度性,这对于有限资源的利用具有重要意义.

本文采用自适应算法,其基本思想是:当网络状态处于过载时,通过增加采样周期使系统具有可调度性.当网络状态处于低载时,尽可能地降低采样周期以得到较好的控制性能.反馈调度器将计算各控制回路的采样周期,并以 T_s 为周期发送调度报文,通知各节点进行有效更新.

当采样周期越小时,网络的利用率就越高,同时,节点的 CPU 利用率也会提高.当采样周期接近某个最小值时,CPU 可能不堪重负,将使系统无法正常工作,控制性能较差.当采样周期较大时,对象的响应不能实时反映对象的实际状态,所以控制性能也较差.

要使系统的控制性能保持在期望范围内,必须具有适当的采样周期.因此,在控制规律保持不变的条件下,采样周期需保持在 $[T_{\min}, T_{\max}]$ 范围内.

为减少在线计算所占用的系统计算资源和减小 CPU 的利用率,每次变化的间隔设为 ΔT ,于是在时刻 k 时,第 i 个回路的采样周期便可表示为

$$T_i(k) = T_i(k - 1) + m. \tag{5}$$

其中: $T_i(k) \in [T_{\min}, T_{\max}]$; m 是整数. T_{\min}, T_{\max} 分别为最小和最大允许采样周期,可参考文献[11]所提到的仿真方法确定. m 太大,将造成系统控制性能变化较大,不易实现调度策略; m 太小,将造成调节的时间过长.所以, m 和 ΔT 可根据各回路的实际物理特性进行选择,它们将直接影响控制性能和系统调度的动态特性.

在调度过程中 m 是可变的,且各控制回路不尽相同.如果系统不可调度,则依次增加每个回路的采样周期, m 取正数,使得系统具有可调度性,然后,根据控制性能 J 最小原则,调节各控制回路的采样周期.如果系统是可调度的, m 取负数,减小采样周期,使控制回路具有最优的性能,从而有效地分配资源.

3.3 优先级分配

为保持各控制回路的性能及整个网络控制系统的性能最优,基于优先级倒置的方法和控制性能的

变化,重新分配系统的报文优先级.

首先,采用固定优先级的方法,为各类节点分配优先级:1) 带有调度信息的报文具有较高优先级,且在调度过程中保持较高的优先级,报文的优先级设为 $P_{sch} = a$;2) 控制器发送的报文具有次优先级,定义控制回路 i 的控制器发送的报文优先级为 $P_c(i), P_c(i) \in (a, b]$;3) 传感器发送的报文具有 3 类优先级,定义控制回路 i 的传感器发送的报文优先级为 $P_s(i), P_s(i) \in [b + 1, c]$.这里: $P_{sch}, P_c(i)$ 和 $P_s(i)$ 取正整数,且取值越小,优先级越高; a, b, c 为正整数且 $a < b < c$.

然后,根据 J 值大小,重新分配同类节点的报文优先级.基本原则为: J 值越大,则分配较高优先级,优先级取值越低; J 值越小,则分配较低优先级,优先级取值越高;如果任意两个控制回路的 J 值相同,则不改变现有优先级.

在每次优先级分配时,对 J 值进行排序,各类优先级按 J 值顺序进行排序.例如,如果 $J(i + 1) > J(i) > J(i + 2)$,则 $P_c(i + 1) < P_c(i) < P_c(i + 2)$ 且 $P_s(i + 1) < P_s(i) < P_s(i + 2)$;如果任意两个控制回路 i 和 j 的控制性能相同,即 $J(i) = J(j)$,则保持原优先级不变.

4 仿真实验

考虑由 3 个控制回路组成的网络控制系统,控制对象均采用直流电机模型^[12]

$$G(s) = \frac{1\ 000}{s(s + 1)}. \tag{6}$$

采用 TrueTime1.4 仿真平台,控制器节点的控制算法采用 PID 控制算法^[12].CAN 网络通信波特率设置为 50 Kbps.报文的长度均为 80 位,无丢包现象,且没有总线不可访问的情况,则每个报文的传输时间为 1.6 ms.仿真实验参数如表 1 所示.

表 1 仿真实验参数

T_1/ms	T_2/s	T_3/ms	T_s/s	$\Delta T/\text{ms}$	T_{\min}/ms
9	10	9	2.5	1	0.5
T_{\max}/ms	m	a	b	c	
18	1	1	4	7	

实验 1 未采用调度算法

初始条件下,优先级取值顺序为 $P_c(1) < P_c(2) < P_c(3)$ 和 $P_s(1) < P_s(2) < P_s(3)$.

由定理 1 可知, $\frac{3.2}{9} + \frac{3.2}{9} + \frac{3.2}{10} > 1$,故系统是不可调度的.在现有资源条件下,控制性能无法达到最优化.

如图 2 所示,传感器 1 的报文优先级较高,采样数据能及时发送到控制器 1,使控制回路 1 的控制性



能较好.

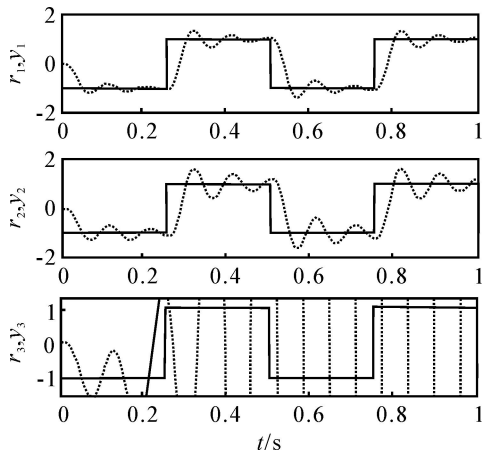


图2 3个控制回路的控制输出响应

由于传感器3的报文优先级设置较低,需等待发送,造成采样数据不能及时到达控制器3,而控制器3向总线上发送数据时,也出现了报文等待发送,造成控制回路3的控制性能较差.

图3给出了各控制回路的调度情况.其中:High = sending, Medium = waiting, Low = idle.可以看出,各控制回路报文传输均出现了等待传输的现象,造成报文的响应时间增加,信息无法及时传递.尤其是控制回路3中各报文的延迟时间较长,控制性能较差.

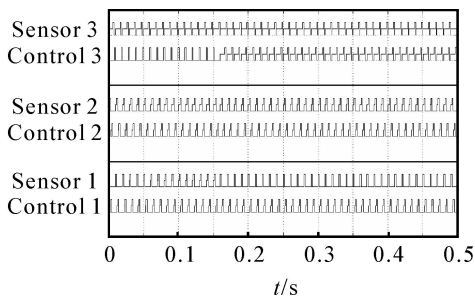


图3 网络中各节点的报文调度

实验2 采用调度算法

在采用调度算法的情况下,虽然3个控制回路的控制效果不完全相同,但各控制系统性能得到了优化,如图4所示.与图2相比,各控制回路的性能得到较大改善.

与图3相比,图5中的各节点的等待传输时间明显减少,也就是说,通过调度减少了各报文冲突的概率,不会产生较大的报文响应时间,报文传输率得到了较大改善.

由上述实验可知,调度后的系统控制性能比调度前的控制性能有了改善.注意,本文并没有考虑实际总线对系统的影响.实际上,由于位填充机制的影响,当报文数据域的数据发生变化时,报文的传输时间是不可预测的.另外,计算时间的不确定性、网络

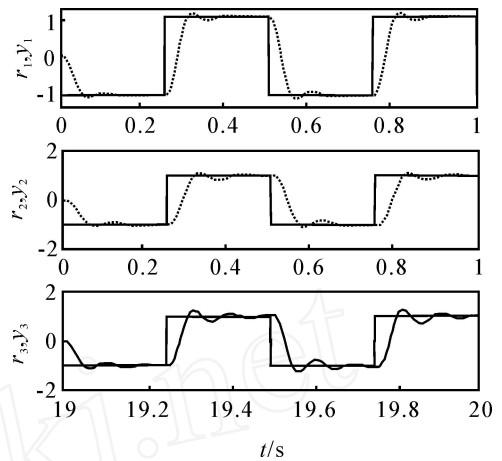


图4 调度后3个控制回路的控制输出响应

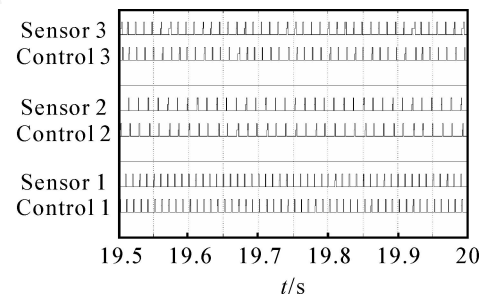


图5 网络中各节点的报文调度

负载的影响、总线不可访问的时间、网络时延具有不确定性等问题都将对系统的控制性能造成较大影响,需进一步研究和探讨.

5 结论

根据所设计的反馈调度器,提出了采样周期的自适应计算方法以及优先分配方案,对资源受限的多控制回路的网络控制系统进行了有效的调度,提高了资源的利用率.所提出的调度策略能在受限的网络资源下,有效地对资源进行分配和利用,并实现多控制回路的性能最优化.

参考文献(References)

- [1] Stankovic J A, Lu C, Son S H, et al. The case for feedback control real-time scheduling [C]. Proc of the 11th Euromicro Conf on Real-time Systems. New York, 1999: 11-20.
- [2] Lu C, Stankovic J A, Tao G, et al. Design and evaluation of feedback control EDF scheduling algorithm [C]. Proc of the IEEE Real-time Systems Symposium. Phoenix, 1999: 56-67.
- [3] El-Sharkawy M. Dynamic real-time scheduling in distributed environments [D]. Maryland: University of Maryland College, 2001.
- [4] Arzen K E, Cervin A, Eker J. An introduction to control and scheduling co-design [C]. Proc of the 39th IEEE Conf on Decision and Control. Sydney, 2000: 4865-4870.

(下转第559页)

综上, 整个不确定脉冲混合系统在定义 1 的意义下是依概率稳定的, 从而控制方法是有效的。

5 结 论

本文针对切换时刻具有脉冲行为、切换律由 Markov 过程决定的一类切换随机系统, 主要利用多 Lyapunov 函数法及 LMI 法研究其随机稳定性。进一步分析了系统的稳定化以及鲁棒稳定性问题, 同时设计脉冲子系统的控制器, 使整个系统依概率稳定。本文的研究工作可进一步推广到时滞、非线性等更为一般的系统。

参考文献(References)

- [1] Brockett R W. Lecture notes on stochastic control, harvard university[M]. Cambridge MA, 1995.
- [2] Kushner H I, Dupuis P. Numerical methods for stochastic control problems in continuous time [M]. New York: Springer-Verlag, 2001.
- [3] Klyatskin V I. Dynamics of stochastic systems [M]. New York: Elsevier, 2005.
- [4] Florchinger P. Lyapunov-like techniques for stochastic stability[J]. SIAM J Control Optimization, 1995, 33(4): 1151-1169.
- [5] Ha'sminskii R Z. Stochastic stability of differential equations [M]. Groningen: Sijthoff and Noordhoff, 1980.
- [6] Costa O L V, Fragoso M D. Stability results for discation rete-time linear systems with Markovian jumping parameters [J]. J Mathematics Analysis Application, 1993, 179(1): 154-178.
- [7] Farias D P, Geromel J C, Do Val J B R, et al. Output feedback control of Markov jump linear systems in continuous-time [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2000, 45(5): 944-949.
- [8] Ji Y, Chizeck H J. Controllability, stabilizability, and continuous-time Markovian jump linear quadratic control [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1990, 35(7): 777-788.
- [9] Mao X. Stability of stochastic differential equations with Markovian switching[J]. Stochastic Processes and Their Applications, 1999, 79(1): 45-67.
- [10] Yuan C, Lygeros J. Stabilization of a class of stochastic differential equations with Markovian switching[J]. Systems and Control Letters, 2005, 54(9): 819-833.
- [11] Xie L, Souza C E D. Criteria for robust stability and stabilization of uncertain linear systems with time delay [J]. Automatica, 1997, 33(9): 1657-1662.
- [12] Lien C H. New stability criterion for a class of uncertain nonlinear neutral time delay systems[J]. Int J System Science, 2001, 32(2): 215-219.
- [13] Battilotti S, Santis A D. Dwell time controllers for stochastic systems with switching Markov chain [J]. Automtica, 2005, 41(6): 923-934.
- [14] Ye H, Michel A N, Hou L. Stability analysis of systems with impulse effects [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1998, 43(12): 1719-1723.
- [15] Xie G, Wang L. Necessary and sufficient conditions for controllability and observability of switched impulsive control systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2004, 49(6): 960-966.
- [16] Xie L. Output feedback H control of systems with parameter uncertainty[J]. Int J Control, 1996, 63(4): 741-750.

(上接第 554 页)

- [5] Cervin A, Eker J, Bernhardsson B, et al. Feedback-feedforward scheduling of control tasks[J]. Real-time Systems, 2002, 23(3): 25-53.
- [6] Eker J, Hagander P, Arzén K E. A feedback scheduler for real time control tasks [J]. Control Engineering Practice, 2000, 8(12): 1369-1378.
- [7] Feng X, Dai X, Wang Z, et al. Feedback based network scheduling of networked control systems [C]. Proc of Int Conf on Control and Automation. Budapest, 2005: 26-29.
- [8] Gravagne A, Davis J M, Dacunha J J, et al. Bandwidth reduction for controller area networks using adaptive sampling [C]. Proc of Int Conf on Robotics and Automation. New Orleans, 2004: 5250-5255.
- [9] Zuberi K M, Shin K G. Design and implementation of efficient message scheduling for controller area network [J]. IEEE Trans on Computers, 2000, 49(2): 182-188.
- [10] Hong S H, Kim W-H. Bandwidth allocation scheme in CAN protocol [J]. IEE Proc — Control Theory Applications, 2000, 147(1): 37-44.
- [11] Montestruque L A, Antsaklis P. Stability of model-based networked control systems with time-varying transmission times [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2004, 49(9): 1562-1572.
- [12] Ohlin M, Henriksson D, Cervin A. TRUETIME 1.4 Reference Manual [M]. Sweden: Lund University, 2006.