

文章编号: 1001-0920(2009)05-0680-07

针对时间距离约束的网络化控制系统带宽调度策略

康 军, 戴冠中, 牛 云

(西北工业大学 自动化学院, 西安 710072)

摘 要: 网络化控制系统是一种具有时间距离约束的硬实时系统. 根据该特点, 在深入分析网络化控制系统时间距离约束关系的基础上, 提出一种针对时间距离约束的网络化控制系统带宽调度策略. 该策略能够更有效地与网络化控制系统的控制算法相配合, 同时兼顾控制系统控制性能和网络服务质量, 优化系统总体性能. 最后通过仿真实例说明了该策略的有效性.

关键词: 网络化控制系统; 网络带宽调度策略; 时间距离约束; 控制系统性能质量; 网络服务质量

中图分类号: TP393; TP202 **文献标识码:** A

Scheme of bandwidth scheduling for networked control systems in accordance with temporal distance constraint

KANG Jun, DAI Guan-zhong, NIU Yun

(College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China. Correspondent: KANG Jun, E-mail: kangjun-1@263.net)

Abstract: Networked control system (NCS) is a hard real-time system with temporal distance constraint. According to this characteristic, through researching deeply the characters of NCS with temporal distance constraint, a scheme of bandwidth scheduling in accordance with temporal distance constraint is proposed. Moreover, the scheme can cooperate with current networked control algorithms more effectively, guarantee the quality of control performance (QoP) and the quality of network service (QoS) and optimize the whole performance of NCS. Simulation results show the effectiveness of the proposed scheme.

Key words: Networked control system; Scheme of bandwidth scheduling; Temporal distance constraint; Quality of control performance; Quality of network service

1 引 言

近年来,网络化控制系统(NCS)已成为控制领域中一个新的研究方向,在先进飞行器、机器人、过程控制等诸多领域均有成功应用的实例^[1]. NCS是在网络环境中构建的自动控制系统,其中系统的反馈量和控制量数据均通过网络进行传输. 根据对控制系统的期望控制系统性能质量(QoP)指标要求,并结合应用的控制算法,控制系统将对其数据传输产生实时性约束条件(即网络服务质量(QoS)需求);而对于多节点共享且资源有限的网络,通过其资源调度机制合理分配网络资源则是满足相应的网络QoS需求的重要手段. 若满足控制系统的网络QoS需求,则满足了控制系统实时性要求,也就保证了控制系统的性能要求. 然而,如果控制系统的网络QoS需求超过了网络的承受能力,则控制系统的

QoP将无法保证,甚至造成系统不能被镇定;若网络能满足控制系统对网络QoS的需求,但网络资源的利用率却较低,则又会造成网络资源的浪费(主要是指网络带宽资源). 因此,为了提高NCS系统总体性能,NCS的网络带宽调度策略应能和控制算法有效配合,根据NCS产生的网络QoS约束条件与网络带宽可调度的条件,合理分配网络带宽,提高网络带宽资源的利用率.

目前针对NCS网络带宽调度策略的相关研究成果已有一些. Hong等^[2]借助“窗口”的概念,提出针对循环服务的NCS多控制闭环采样周期调度算法,并建立了NCS控制系统性能与网络性能间的约束关系,该算法已应用到了CAN总线网络中^[3]. 进一步,Hong^[4-6]研究了针对周期数据、偶发实时数据和普通数据等3类数据的带宽配置策略,该算法

收稿日期: 2008-02-25; 修回日期: 2008-04-14.

作者简介: 康军(1975—),男,陕西咸阳人,博士生,从事基于网络环境的复杂控制系统的研究;戴冠中(1937—),男,上海人,教授,博士生导师,从事现代控制理论、计算机控制技术等研究.

虽然在保证系统性能的同时提高了带宽资源利用率,却没有从优化的角度对带宽资源的使用加以考虑. Raja 等^[6]提出优先级循环服务和动态时间窗的带宽配置策略,以保证周期数据的实时性要求,并提高带宽利用率. 基于时滞系统稳定性的研究, Park^[7]导出了确保系统稳定的最大允许时延的计算方法,并采用与 Hong 类似的方法研究了 WorldFIP 的带宽配置算法,其中周期数据采用 EDF 调度策略. 白涛等^[8]基于 Hong 的周期数据的窗口模型,提出了以网络节点划分时段、非周期数据动态共享时间窗的带宽资源配置策略. 该网络带宽资源配置策略在满足系统实时性和网络稳定性的同时,有效地降低了系统对于非紧急数据缓冲容量的要求,并具有较高的网络资源利用率.

在上述的带宽调度策略中,均认为控制回路的闭环延迟时间是大于采样周期的. 然而,目前的 NCS 控制算法中大多假设闭环延迟时间小于采样周期^[9-14],显然这类 NCS 控制算法与上述带宽调度策略对闭环延迟时间的约定存在着矛盾. 因此,对于应用这类控制算法的 NCS 系统,上述带宽调度策略并不适用. 同时, NCS 产生的网络 QoS 需求是指对各控制回路闭环延迟时间的上限约束条件,根据文献[15]的定义,将这种约束条件称之为时间距离约束,因此 NCS 是一种具有时间距离约束的硬实时系统. 在总结已有研究成果的基础上,本文深入分析了 NCS 的时间距离约束模型的特点,然后基于该模型提出一种针对时间距离约束的 NCS 网络带宽调度策略. 该策略能够更有效地与已有 NCS 控制算法相配合,兼顾控制系统 QoP 和网络 QoS,进而优化 NCS 系统的总体性能. 最后通过仿真实例验证了该策略的有效性.

2 NCS 的时间距离约束模型

Zhang 等^[16]提出了当闭环延迟小于控制系统采样周期时的 NCS 离散化状态空间模型,并讨论了 NCS 的稳定性问题,指出网络闭环延迟是影响 NCS 稳定性以及控制性能 QoP 的重要因素. Dong 等^[17]应用线性矩阵不等式的相关理论,提出了获得保证控制系统位于其稳定域的网络闭环延迟上界的方法,其中网络闭环延迟上界称为 MADB (maximum allowable delay bounds),也就是说当 $MADB < \tau$ 时,控制系统将不能被镇定. 因此, NCS 各控制回路的网络闭环延迟都具有上限约束,只有当全部控制回路的网络闭环延迟均小于其上限约束条件时,才能使 NCS 成为渐近稳定的,进而获得满意的控制 QoP. 各个控制回路对网络闭环延迟上界的约束条件也就是其对网络 QoS 的需求,而有限的网络带宽

资源是由多个控制回路共享使用的,只有通过一定的调度策略来对带宽资源进行合理分配才能满足上述的网络 QoS 需求. 因此, NCS 网络带宽调度策略就是以保证各控制回路的网络闭环延迟约束条件为目标对网络带宽资源进行合理分配的方案.

为了便于对 NCS 网络带宽调度策略的分析,在此定义了 NCS 的时间距离约束模型: 设 NCS 的第 j 条控制回路的网络闭环延迟 $D_j(kh_j)$ 可表示为

$$D_j(kh_j) = \tau_j^*(kh_j) + \tau_j^a(kh_j). \quad (1)$$

其中: $\tau_j^*(kh_j)$ 是反馈量分组的网络传输延迟,即从远端被控单元的反馈量分组释放时刻到控制器成功接收到该分组的时刻的间隔; $\tau_j^a(kh_j)$ 是控制量分组的网络传输延迟,即同周期内控制量分组释放时刻到远端被控单元执行器成功接收到该分组的时刻的间隔(忽略了执行器的响应时间),另外将控制量的计算时间归入 $\tau_j^a(kh_j)$. 第 j 条控制回路的 QoP 直接依赖于 $D_j(kh_j)$ ^[14]. $D_j(kh_j)$ 通常是时变不确定的,直接引入不便于分析. 因为 $D_j(kh_j)$ 存在确定上界 D_j , 在分析过程中可直接将 D_j 代入进行计算,如果此时控制系统性能指标满足要求,则当实际网络闭环延迟在小于 D_j 的范围内变化时,相应的性能指标也能够满足要求.

NCS 可以直接产生各控制回路闭环延迟上界的约束条件^[14],因为各控制回路闭环延迟实质上是两段延迟的总和,即在某个采样周期内的反馈量分组释放时间与控制量分组传输完成时间的间隔. 根据文献[15]中的定义,将对时间间隔上界的约束称为时间距离约束,显然 NCS 就是一种具有时间距离约束的硬实时系统. 因此对于 NCS, 可将第 j 条控制回路对 $D_j(kh_j)$ 上界的约束条件定义为该回路的时间距离约束. 设第 j 条控制回路为 LP_j , 该回路的时间距离约束为 τ_j , 如果该控制回路在各个采样周期内能满足下

$$D_j(kh_j) < \tau_j, \quad k = 1, 2, \dots, \quad (2)$$

则说明该回路满足其延迟距离约束 τ_j . 其中 $D_j(kh_j)$ 表示第 j 条控制回路在第 k 个采样周期内的网络闭环延迟.

假设一个 NCS 系统由控制回路 LP_1, LP_2, \dots, LP_n 组成, 这些回路的时间距离约束分别是 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$, 如果该 NCS 系统中每个回路都满足其时间距离约束, 则说明这个 NCS 带宽调度是可行的. 如果某种网络带宽调度策略能够产生一个可行的调度, 则说明 NCS 系统按照这个调度策略是可调度的. 本文规定按延迟距离约束的大小顺序为控制回路做索引, 即若回路编号 $i < j$, 则必有 $\tau_i < \tau_j$.

3 针对时间距离约束的网络带宽调度策略

设NCS有 M 条控制回路,网络带宽为 B ,各控制回路周期分组均采用固定长度为 l 的单包传输,则每个周期分组的传输时间长度为 $L(L=l/B)$.网络中每个分组的传输都会消耗的最大服务开销时间为 w ,则每个周期分组的传输处理时间为 $LS(LS=L+w)$.在此定义时间窗口 w 为1个 LS 长度,即在一个窗口中有且仅有一个周期数据包传输.对于任一对控制回路,当 $i < j$ 时,如果 $t_j = t_i + 2(j-i)w$ ($i = 2iw, i, j \in Z^+$),则称NCS各个控制回路的时间距离约束是协调的.对于协调的控制回路时间距离约束,其第 i 号控制回路的 t_i 等于 $2i$ 个周期分组的传输处理时间之和,而 t_j 则等于在 t_i 的基础上延长 $2(j-i)$ 个周期分组的传输处理时间的总和.对于具有任意时间距离约束 t_1, t_2, \dots 的系统,可首先将其时间距离约束转换成协调的 t_1, t_2, \dots ,并满足 $t_i \leq t_i$.显然当系统满足协调的时间距离约束时,即满足原任意时间距离约束.设本文所讨论的NCS的控制回路时间距离约束均为协调的.

在NCS中,网络传输的不仅包括周期数据而且还有偶发数据和非周期数据.偶发数据主要是报警信号或紧急操作指令信号,其产生具有突发性,传输要求准确无误,数据长度一般较短,数据量相对较少,对带宽的占用率较低,传输有严格的时延限制,要求预留带宽,并且偶发数据具有比周期数据和非周期数据更高的优先级.偶发数据的传输处理时间为 LS_c ($LS_c = L_c + w$, L_c 表示偶发数据单元传输时间长度,即 $L_c = l_c/B$,其中 l_c 表示偶发数据单元的长度).设在一个采样周期 h 内可处理的偶发数据包数量可表示成 $Num_c = \sum_{i=1}^{N_c} m_i^c$.其中 N_c 为可发送偶发数据的节点数, m_i^c 表示偶发数据节点缓冲队列中数据包的个数.则 Num_c 应满足如下约束条件:

$$Num_c \leq [(h - 2MLS) / LS_c]. \quad (3)$$

为了便于分析,假设偶发数据的产生服从平均到达速率为 λ_c 的泊松分布,则该系统的可靠性为 $(1 - \rho_c)$,其中 ρ_c 满足

$$\left(h \sum_{i=1}^{N_c} \lambda_c^i \right)^{Num_c} e^{-h \sum_{i=1}^{N_c} \lambda_c^i} / Num_c! < \rho_c. \quad (4)$$

非周期数据包括用户编程数据、组态数据、用于监控和统计的数据报表文件、控制程序、数据库管理信息等.其产生是随机的,对时延的要求并不严格.非周期数据使用的是前两类数据的剩余带宽,其数据长度一般较长,数据量较大,通常需要采用分片传输方式.设有 N_a 个节点可发送非周期数据,则在

1个周期内,各个非周期数据传输节点可获得的非周期数据的传输处理时间片满足下述约束:

$$LS_a \leq (h - 2MLS - Num_c LS_c) / N_a, \quad (5)$$

其中 LS_a 为单周期内非周期数据传输节点获得的非周期数据传输处理时间.因此在单个周期内,相应节点获得的对非周期数据的实际传输时间长度为 $L_a = LS_a - w$,则非周期数据的分片长度即为 $l_a = L_a B$.设第 i 号节点每次产生的非周期数据平均长度为 M_{ia} ,且其非周期数据的产生服从平均到达速率为 λ_{ia} 的泊松分布,则每次产生的非周期数据需要分成 $[M_{ia}/l_a]$ 个分片.因此非周期数据总平均到达速率 λ_a 为

$$\lambda_a = [M_{ia}/l_a] \lambda_{ia}. \quad (6)$$

通过以上分析并根据文献[18],可得出NCS网络系统的可调度性条件为

$$\begin{cases} (2MLS + Num_c LS_c) < h, & (7) \\ LS_c \sum_{i=1}^{N_c} \lambda_c^i + LS_a \sum_{i=1}^{N_a} \lambda_a^i + ((2MLS)/h) < 1. & (8) \end{cases}$$

针对时间距离约束的带宽调度策略如下所述(控制回路传感器为时间驱动、控制器与执行器为事件驱动,忽略数据计算时间与执行器件响应时间):设网络能够支持基于静态优先级的传输信道竞争机制,如CAN总线网络;令所有偶发数据单元优先级高于周期数据单元,同时所有非周期数据单元优先级均低于前两类数据单元;对于所有偶发数据单元,网络节点编号越小则优先级越高;对于所有非周期数据单元,网络节点编号越小则优先级越高;NCS中各控制回路的周期数据包括反馈信号数据单元和控制信号数据单元,令控制回路编号越大则反馈信号数据单元优先级越大,而控制信号数据单元优先级越低,且所有控制信号数据单元优先级低于反馈信号数据单元优先级.

Step1: 对于具有 M 条控制回路的NCS系统($M \leq [h/2LS]$),令 $w = LS = LS_c$,对各控制回路的时间距离约束 t_1, t_2, \dots, t_M 进行协调化处理,使其满足

$$t_{i+1} = t_i + 2w, \quad i = 1, 2, \dots, M, \quad (9)$$

其中 t_1 为最小回路时间距离约束,满足约束条件 $t_1 \leq 2w + Num_c w$.然后判断系统是否满足式(7)和(8),若满足则进行下一步,否则表示当前系统是不可调度的,需要对网络参数进行调整.

Step2: 确定各控制回路反馈信号数据单元的初始相位.第 M 号回路最先释放其反馈信号数据单元,初始相位 $\theta_M = 0$,第 $M-1$ 号回路反馈信号数据单元的初始相位 $\theta_{M-1} = w$,第 i 号回路的初始相位为 $\theta_i = (M-i)w$.每个反馈信号数据单元占用1个

窗口单位 w , 即当从反馈信号数据单元释放时刻开始, 经 1 个窗口单位 w 的延迟后, 若仍没有收到, 则认为该数据单元丢失. 对所有周期数据单元均不进行超时重传处理, 当各控制回路反馈信号数据单元初始相位确定完毕后, 各控制回路开始按其各自的初始相位顺序释放反馈信号数据单元.

Step3: 当控制器收到各控制回路反馈信号数据单元后计算对应的控制量并放入缓存, 当 1 号回路的反馈信号数据单元被接收并计算出其控制量后, 开始发送各回路控制信号数据单元, 按回路序号从 1 号回路开始顺序发送, 每个控制信号数据单元也占用 1 个窗口单位 w .

Step4: 在 1 个采样周期内, 当各回路的周期数据发送完毕后(即 $T_k + 2MLS$ 时刻) 允许顺序释放非周期数据(其中 T_k 表示第 k 个采样周期的起始时刻), 各非周期数据传输节点的释放时刻为

$$t_i = T_k + 2MLS + (i - 1)LS_a, \quad i = 1, 2, 3.$$

其中 i 表示非周期数据传输节点编号; LS_a 为各非周期数据传输节点获得的处理非周期数据的时间片长度, 满足式(5)的约束条件. 同时限制非周期数据的平均产生速率满足式(6)的约束条件. 此时 NCS 系统的网络带宽利用率为

$$U = U_c + U_a + U_p = \sum_{i=1}^{N_c} LS_c \frac{i}{h} + 2MLS/h + \sum_{k=1}^{N_a} LS_a \frac{k}{h}. \quad (10)$$

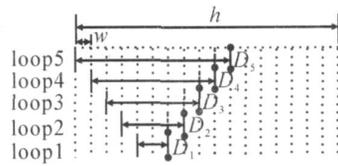
为了进一步说明上述带宽调度策略, 图 1 给出了一个具有 5 个控制回路 NCS 单周期网络带宽配置的示例, 其中 D_j 为控制回路 $L P_j$ 的实际闭环延迟.

定理 1 对于具有 M 条控制回路的 NCS 系统, 在满足式(5)和(6)的条件下, 对于具有形如式(9)所描述的时间距离约束, 按上述网络带宽调度策略是可调度的, 即可以使得全部控制回路的闭环延迟时间均小于其时间距离约束, 其中 $M \in [h/2LS]$.

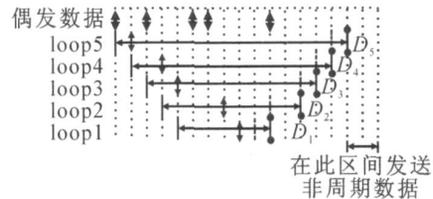
证明 非周期数据只在所有周期数据发送完毕之后才释放并且优先级均低于周期数据, 因此不会影响周期数据的发送.

当系统满足式(5)和(6)时, 在 1 个采样周期 h 内可发送的偶发数据包数量必满足式(3), 即在 1 个 h 内至多有 Num_c 个偶发数据包需要发送.

因为 $LS_c = LS = w$, 对于单回路系统, 当 $M = 1$ 时, 由式(9)可得 $D_1 = 2w + wNum_c < h$. 根据调度策略, 该回路反馈信号数据单元的初始相位 $\phi_1 = 0$. 反馈信号数据单元优先权低于所有偶发数据包, 当反馈信号数据单元被释放时同时有偶发数据包被释放, 则需延迟发送.



(a) 仅存在周期性数据时单周期内的网络带宽配置策略



(b) 同时存在偶发、周期性和非周期性数据时单周期内的网络带宽配置策略

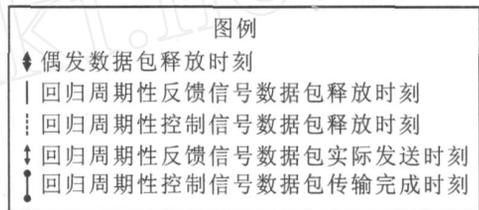


图 1 网络带宽配置策略举例

单周期内最多有 Num_c 个偶发数据单元, 最坏情况下即在周期数据单元发送期间 Num_c 个偶发数据全被释放, 则反馈信号数据单元最多延迟 $wNum_c$ 后获得发送权, 或控制包最多滞后 $wNum_c$ 后获得发送权. 而反馈信号数据单元本身占用 1 个 w , 该回路控制数据包发送同样也占用 1 个 w , 所以最坏情况下该回路的闭环延迟时间为 $D_i^{max} = 2w + wNum_c$, 即 $D_i^{max} = 1$. 该回路的实际闭环延迟时间为 D_i , $D_i^{max} = 1$.

设对于具有 i 条回路的 NCS 系统, 当 $M = i$ 时上述命题成立, 则当 $M = i + 1$ 时, 单周期内有 Num_c 个偶发数据包且第 $i + 1$ 回路延迟距离约束为 $t_{i+1} = t_i + 2w = 2(i + 1)w + wNum_c$, 该回路的初始相位 $\phi_{i+1} = 0$. 又因为该回路反馈信号数据单元优先级高于第 i 号回路反馈信号数据单元, 从而使得第 $i + 1$ 号回路的反馈信号数据单元总是较第 i 号回路优先发送, 另外该回路控制信号数据单元优先级低于第 i 号回路的控制信号数据单元, 从而使得第 $i + 1$ 号回路的控制信号数据单元总是较第 i 号回路迟后发送. 最坏情况下即在周期数据发送期间偶发数据全部被释放, 则该回路反馈信号数据单元最多滞后 $wNum_c$ 后获得发送权, 或控制信号数据单元最多滞后 $wNum_c$ 后获得发送权. 因为第 i 回路时间距离约束为 $t_i = 2iw + wNum_c$, 且其闭环延迟时间满足 $D_i < t_i$, 所以最坏情况下第 $i + 1$ 号回路的最大闭环延

延迟时间为 $D_{i+1}^{\max} = 2(i+1)w + w\text{Num}_c$, 即 $D_{i+1}^{\max} =$
 $i+1$. 对于第 $i+1$ 号回路的实际闭环延迟时间为
 $D_{i+1} \quad D_{i+1}^{\max} = i+1$.

由定理1可知, 当满足式(7)和(8)条件且回路
 数 $M \in [h/2LS]$ 时, NCS 可以通过上述带宽调度策
 略满足各回路时间距离约束. 在实际应用中还需要
 一种方法, 可以直接根据 NCS 网络参数以及各回路
 时间距离约束条件来判断该系统是否是可调度的,
 即 NCS 带宽调度策略的可调度性分析算法.

定理2(可调度性分析算法) 已知 NCS 共有
 M 条控制回路, 其网络带宽为 B , 偶发数据包长度为
 l_c , 周期数据包长度为 l_p , NCS 各控制回路的采样周
 期为 h , 各回路时间距离约束 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_M$ 满足式
 (9) 的协调化条件, 则当系统满足式(8)与(14)时,
 该系统根据本文所提出的带宽调度策略是可调度
 的.

$$2l \sum_{i=1}^M 1/\tau_i + l_c \text{Num}_c / h < B. \quad (11)$$

证明 由式(11)可得

$$2(LSh) \sum_{i=1}^M 1/\tau_i + \text{Num}_c LSc < h. \quad (12)$$

$\forall i (i = 1, 2, \dots, M), h > \tau_i$, 即 $h/\tau_i > 1$, 可得

$$\sum_{i=1}^M h/\tau_i > M,$$

$$2(LSh) \sum_{i=1}^M 1/\tau_i + \text{Num}_c LSc >$$

$$2MLS + \text{Num}_c LSc.$$

由式(12)可得 $2MLS + \text{Num}_c LSc < h$. 当系统满
 足式(11)时必然满足式(7). 又由定理1的结论可
 知, 此时基于本文所提出的带宽调度策略可以使各
 个控制回路的闭环延迟时间小于时间距离约束, 即
 此时系统是可调度的.

4 仿真实例

为了进一步说明针对时间距离约束的网络带
 宽调度策略的有效性, 给出一个数字仿真实例. 设
 该 NCS 有 3 条控制回路即 6 个节点, 其中控制回路 1,
 2, 3 分别表示为 (1, 2), (3, 4), (5, 6). 设在网络中
 传输的各类数据的缓冲队列的容量充分大, 系统中
 有 3 个节点可以发送偶发数据, 3 个节点可以发送非
 周期数据包. 系统的采样周期为 $h = 100$ ms.

各个控制回路的被控对象状态空间模型为

1 号回路

$$\dot{x}_1(t) = \begin{bmatrix} 1.3 & 1.1 \\ 0.5 & 1.4 \end{bmatrix} x_1(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 6 \end{bmatrix} u_1(t); \quad (13)$$

2 号回路

$$\dot{x}_2(t) = \begin{bmatrix} 1.2 & 1.0 \\ 0.4 & 1.1 \end{bmatrix} x_2(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 6 \end{bmatrix} u_2(t); \quad (14)$$

3 号回路

$$\dot{x}_3(t) = \begin{bmatrix} 1.3 & 1.1 \\ 0.3 & 1.2 \end{bmatrix} x_3(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 6 \end{bmatrix} u_3(t). \quad (15)$$

应用文献[16]提出的 NCS 被控对象状态空间
 模型离散化方法将其离散化, 其中离散化状态空间
 模型中引入了传输时延参数和被控对象广义状态向
 量 $Z(kh) = (X^T(kh), U^T((k-1)h))^T$, h 表示采样
 周期. 各回路均采用 DLQR(discrete linear
 quadratic regulator) 控制算法, 控制系统性能指标为

$$J(kh) = \text{sum}(x^T Qx + u^T Ru + 2x^T Nu), \quad (16)$$

其中 Q, R, N 分别为给定的控制系统性能参数.

表1和表2给出了该 NCS 与带宽调度相关的系
 统参数. 由表1可知 1 个窗口单位为 $w = 2$ ms, 根据
 文献[14]所提出的方法, 通过计算可得到各回路实
 际的时间距离约束为 $[\tau_1, \tau_2, \tau_3] = [10$ ms,
 20 ms, 40 ms]. 为了应用本文所提出的带宽调度策
 略, 首先根据式(12)对各控制回路的实际时间距离
 约束进行谐调化处理可得

$$[\tau_1, \tau_2, \tau_3] = [10$$
 ms, 14 ms, 16 ms].

表1 网络带宽调度策略仿真实验的控制回路参数

	The 1st loop	The 2nd loop	The 3rd loop
采样周期 h /ms	100		
期望性能指标	3		
性能参数	$Q = I, R = I, N = 0$		

表2 网络带宽调度策略仿真实验

名称	数据
网络带宽 B /kb/s	500
偶发数据包长度 l_p /bits	800
周期数据包长度 l_c /bits	800
偶发数据包平均到达速率 λ /ms ⁻¹	0.001
各节点非周期数据的平均数据 长度($M_i^a, i = 2, 4, 6$)/kbits	19.6
各节点非周期数据的平均到达 速率($\lambda_a, i = 2, 4, 6$)/ms ⁻¹	0.005
服务开销时间 τ /ms	0.4

将单周期允许发送的偶发数据包最大数量限
 定为 $\text{Num}_c = 3$, 显然满足式(3). 此时可以检验系统
 的可靠性, 将相关参数代入式(4), 计算可得系统可
 靠性为 99.67%.

由式(5)可知, 各非周期数据发送节点在单周
 期内可以获得的传输时间长度为 $LSa = 27$ ms, 即各
 节点单周期内可发送的非周期数据段长度为 $l_a =$

13.3 kb/s, 则对于每个非周期数据要平均分成 2 个数据段传送. 由式 (6) 可知 $i_a = 0.01 \text{ ms}^{-1}$, 又因为 $i_c = 0.001 \text{ ms}^{-1}$, 通过验算可知满足式 (8) 条件. 再将上述参数代入式 (7), 可得

$$2l \sum_{i=1}^M 1/i + l_c \text{Num}_c/h =$$

$$398.29 \text{ kb/s} < 500 \text{ kb/s},$$

即系统满足可调度性条件. 将相关参数代入式 (10) 可得网络带宽利用率为 93.6%, 可见此时的网络带宽得到了比较充分的利用.

然而, 根据文献 [2,4-8] 所提出的带宽调度策略, 当各回路闭环延迟界 $[\tau_1, \tau_2, \tau_3] = [10 \text{ ms}, 20 \text{ ms}, 40 \text{ ms}]$ 时, 基本采样周期 $T_1 = (\tau_1 + L)/3 = 4 \text{ ms}$. 以 1 个基本采样周期为 1 个窗口, 则 1 个窗口的容量为 $r = \lfloor T_1 / (L + \tau_1) \rfloor = 1$. 另由该带宽调度策略中对采样周期的谐调化条件可得 $T_2 = 8 \text{ ms}, T_3 = 16 \text{ ms}$, 此时系统对窗口容量的实际需要为 $a = \sum_{i=1}^3 T_i / T_i = 3.5 > r$, 所以该 NCS 系统是不可调度的, 这也说明上述带宽调度策略在实际应用中存在一定局限性.

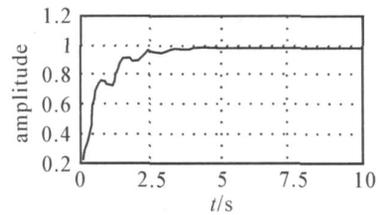
根据本文提出的针对时间距离约束的带宽调度策略, 可判定该 NCS 系统是可调度的, 基于 True Time-1.4 工具箱 [19] 设计了仿真测试系统. 经过仿真 (仿真时间设置为 30 s), 其系统性能仿真测试结果如表 3 和表 4 所示, 各控制回路的单位阶跃响应如图 2 所示. 其中对于各个控制回路的广义闭环离散状态空间方程可得: 回路 1 的闭环极点分别为 0.8693, 0.6301, 0; 回路 2 的闭环极点分别为 0.8750, 0.6360, 0; 回路 3 的闭环极点分别为 0.8622, 0.6344, 0. 可见此时各控制回路闭环极点均小于 1, 故系统渐近稳定. 通过测试结果可知, 本文提出的带宽调度策略能保证各控制回路的闭环传输延迟具有确定上界且均小于其各自的时间距离约束, 与理论分析结果基本一致. 同时, 此 NCS 系统的控制性能也满足期望性能指标要求.

表 3 系统性能仿真测试结果 (网络性能)

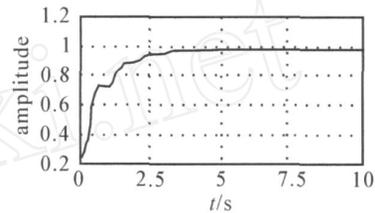
参数名称	测试结果	
	平均值	最大值
1 号控制回路闭环传输延迟/s	0.00404	0.006
2 号控制回路闭环传输延迟/s	0.00806	0.01
3 号控制回路闭环传输延迟/s	0.01207	0.014
偶发数据传输延迟/s	0.00937	0.0276
非周期数据传输延迟/s	13.763	29.876
非周期数据传输节点缓存队列长度	13.3	19

表 4 系统性能仿真测试结果 (控制系统性能)

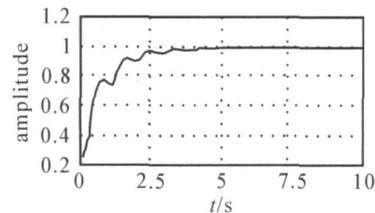
参数名称	测试结果
1 号控制回路实际性能指标	2.7920
2 号控制回路实际性能指标	2.8442
3 号控制回路实际性能指标	2.8841



(a) 1号控制回路



(b) 2号控制回路



(c) 3号控制回路

图 2 各控制回路的单位阶跃响应

5 结 论

本文提出的针对时间距离约束的网络带宽调度策略是一种适用于 NCS 的网络资源调度策略, 能够与目前常见的基于闭环延迟时间小于采样周期的假设条件设计的 NCS 控制算法有效配合, 直接以保证控制系统的时间距离约束为调度目标, 在使网络具有高的带宽资源利用率的条件下, 能够满足各个控制回路对网络 QoS 的要求, 从而进一步保证了控制系统 QoP 满足需要. 可见本文所提出的带宽调度策略兼顾了控制系统 QoP 与网络 QoS, 为优化 NCS 系统总体性能提供了实现条件. 最后通过仿真实验说明了本调度策略的有效性.

参考文献 (References)

[1] Tipsuwan Y, Chow M Y. Control methodologize in networked control system [J]. Control Engineering Practice, 2003, 10(11): 1099-1111.
 [2] Hong Seong Park. Scheduling algorithm of data sampling times in the integrated communication and control systems [J]. IEEE Trans on Control System Technology, 1995, 3(2): 225-231.

- [3] Hong Seong Park, Yu Chul Kim. Bandwidth allocation scheme in CAN protocol[J]. IEEE Proc Control Theory and Applications, 2000, 147(1): 37-44.
- [4] Hong Seong Park. Bandwidth allocation scheme for cyclic-service fieldbus networks [J]. IEEE Trans on Machatronics, 2001, 6(2): 197-204.
- [5] Hong Seong Park, Yu Chul Kim. Implementation of a bandwidth allocation scheme in a token-passing fieldbus network [J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(2): 246-251.
- [6] Raja P, Ulloa G. Priority polling and dynamic time-window mechanisms in a multi-cycle fieldbus [C]. CompEuro '93 Computers in Design, Manufacturing and Production Proc. Los Alamitos, 1993: 452-460.
- [7] Park H S, Kim Y H, Kim D-S, et al. A scheduling method for network-based control systems [J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2002, 10(3): 318-330.
- [8] 白涛, 吴智铭, 杨根科. 网络化控制系统带宽配置的一种新策略[J]. 自动化学报, 2004, 30(6): 961-967. (Bai T, Wu Z M, Yang G K. A new scheme of bandwidth allocation for networked control systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2004, 30(6): 961-967.)
- [9] Liou L W, Ray A. A stochastic regulator for integrated communication and control systems [J]. ASME J of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1991, 113(4): 604-611, 619.
- [10] Li Z, Fang H. Fuzzy controller design for networked control system with time-variant delay[J]. J of System Engineering and Electronics, 2006, 1(17): 172-176.
- [11] 张伟勇, 黄德先, 金以慧. 互联网环境下基于预测控制的闭环控制[J]. 控制与决策, 2004, 19(12): 1341-1344. (Zhang W Y, Huang D X, Jin Y H. Predictive control-based closed-loop control under the internet environment[J]. Control and Decision, 2004, 19(12): 1341-1344.)
- [12] Yue D, Han Q L, Lam J. Network-based robust H control of systems with uncertainly [J]. Automatic, 2005, 6(41): 999-1007.
- [13] Qu S, Wang Y. Robust control of uncertain time delay system: A novel sliding mode control design via LMI [J]. J of System Engineering and Electronics, 2006, 3(17): 624-628.
- [14] 彭晨, 岳东. 网络环境下基于网络 QoS 的网络控制器优化设计[J]. 自动化学报, 2007, 33(2): 214-217. (Peng C, Yue D. Network-based optimal controller design based on QoS [J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(2): 214-217.)
- [15] Han C C, Lin K J, Hou C J. Distance-constrained scheduling and its applications to real-time systems[J]. IEEE Trans on Computers, 1996, 7(45): 814-826.
- [16] Zhang W, Branickym S, Philips S M. Stability of networked control system[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(1): 84-99.
- [17] Kim D S, Young Sam Lee, Wook Hyun Kwon, et al. Maximum allowable delay bounds of networked control systems[J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(11): 1301-1313.
- [18] Ibe O C, Cheng X. Stability conditions for multiqueue systems with cyclic service [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1988, 33(1): 102-103.
- [19] Martin Ohlin, Dan Henriksson, Anton Cervin. TRUETIME 1.4-Reference Manual[EB/OL]. <http://www.control.lth.se/user/dan/truetime/download.pike/>, 2006-9.

(上接第 679 页)

- [10] Ferrer G, Swaminathan J M. Managing new and remanufactured products [J]. Management Science, 2006, 52(1): 1-14.
- [11] 葛静燕, 黄培清, 李娟. 社会环保意识和闭环供应链定价策略研究——基于纵向差异模型的研究[J]. 工业工程与管理, 2007, 12(4): 6-10. (Ge J Y, Huang P Q, Li J. Price decision analysis for closed-loop supply chain based on game theory [J]. Industrial Engineering and Management, 2008, 23(1): 111-115.)
- [12] 李新军. 再制造成本随机分布和市场细分的生产优化模型[J]. 中国管理科学, 2007, 15(5): 72-77. (Li X J. Monopoly production optimization model for remanufacturing cost with stochastic distribution and market segmentation [J]. Chinese J of Management Science, 2007, 15(5): 72-77.)
- [13] Ferguson M, Toktay L B. The effect of competition on recovery strategies [J]. Product and Operations Management, 2006, 15(3): 351-368.
- [14] 张维迎. 博弈论与信息经济学[M]. 上海: 上海人民出版社, 1996: 98-167. (Zhang W Y. Game theory and information economic [M]. Shanghai: Shanghai People Press, 1996: 98-167.)
- [15] 泰勒尔. 产业组织理论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1997: 121-156. (Tirole J. The theory of industrial organization [M]. Beijing: Chinese People University Press, 1997: 121-156.)