

文章编号: 1001-0920(2013)01-0095-05

具有有界时滞的网络控制系统的镇定

唐晓铭, 丁宝苍

(重庆大学 自动化学院, 重庆 400044)

摘要: 针对具有有界时滞且时滞上界大于一个采样周期的网络控制系统, 研究了系统建模和状态反馈镇定问题. 在分析有界时滞的所有可能性的基础上, 提出一种能够用于处理时变控制律问题的网络控制系统数学模型, 进而将该系统的镇定问题转化为镇定一系列模型的鲁棒控制问题. 根据Lyapunov方法, 给出了保证闭环系统稳定的状态反馈控制器. 仿真算例验证了所提出方法的有效性.

关键词: 网络控制系统; 时滞; 状态反馈; 镇定

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Stabilization of networked control systems with bounded time delays

TANG Xiao-ming, DING Bao-cang

(College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China. Correspondent: DING Bao-cang, E-mail: baocang.ding@gmail.com)

Abstract: For the networked control systems, in which the bounded time delays occur and the upper bound is longer than a sampling period, the modeling and the state feedback control are studied. By analyzing all the possibilities of the bounded time delays, a model of networked control systems is proposed, which can be used to deal with the problem of time varying control law. The stabilization of this system is transformed into the robust stabilization of a set of systems. The state feedback controller is given according to the Lyapunov method, which guarantees the stability of the closed-loop system. A simulation example illustrates the effectiveness of the proposed method.

Key words: networked control systems; time delays; state feedback; stabilization

0 引言

网络控制系统(NCS)是一种空间分布式控制系统,其控制回路中的传感器、控制器、执行器由有限带宽的通信网络相连接^[1].与传统的控制系统相比,NCS具有可靠性高、易于维护和扩展、能实现信息共享和远程控制等优点^[2].

虽然NCS具有上述诸多优点,但是网络所特有的属性也给控制系统带来了不可忽视的负面影响,其中最主要的是网络时滞.网络时滞不仅会降低系统的控制性能,甚至会破坏系统的稳定性^[3].近年来,很多学者研究了具有时滞的NCS的控制器设计和稳定性分析问题.文献[4]针对具有随机时滞且时滞小于一个采样周期的NCS,分析了系统的稳定性并给出了随机最优控制器的设计方法.文献[5]将文献[4]的结果推广到网络时滞

大于一个采样周期的情况.文献[6]针对网络时滞确定且状态反馈增益固定的情况,用混杂系统的方法研究了系统的稳定性.文献[7]考虑具有参数不确定性的线性离散对象,建立了具有两个跳变参数的马尔科夫链跳变线性系统模型,并分析了系统的随机稳定性.文献[8]同样考虑具有参数不确定性的线性离散对象,建立了基于状态观测器的NCS扩展状态空间模型,并设计了NCS的保成本容错控制器.然而,对于网络时滞的处理,文献[7-8]采用了附加假设的方法,即假设网络仅存在于单个传输通道中.文献[4-6,9,10]则将两个通道的时滞有条件地合并为输入滞后,在闭环系统中则体现为状态滞后.这两种处理方式都使NCS的建模与分析得到了根本性的简化.合并两个通道时滞的做法已经能够处理多数的控制问题,但对于具有时变控制器的情况

收稿日期: 2011-09-06; 修回日期: 2011-11-03.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60934007, 60874046); 中央高校基本科研业务费项目(CDJXS10171101); 重庆大学“211工程”三期创新人才培养计划建设项目(S-09108).

作者简介: 唐晓铭(1984—),男,博士生,从事网络控制、预测控制的研究; 丁宝苍(1972—),男,教授,博士生导师,从事网络控制、预测控制等研究.

(如预测控制), 合并的条件并不成立, 而附加假设的方法不能完全描述 NCS, 有失一般性.

本文在不作上述假设的情况下, 针对具有时变控制器的 NCS 提出了一种新的建模与分析方法. 分别分析两个通道时滞对闭环系统的影响, 建立了具有有界时滞且时滞上界大于一个采样周期的 NCS 模型. 根据 Lyapunov 方法, 给出了闭环系统的稳定性条件. 通过引入一组矩阵并经过相关变换得到了基于线性矩阵不等式的控制器设计方法.

1 问题描述

符号描述如下: \mathbf{R}^n 表示 n 维实空间, I 表示相应维数的单位阵, 对于向量 x 和正定矩阵 W 有 $\|x\|_W^2 := x^T W x$.

NCS 如图 1 所示. 图 1 中: $k \geq 0$ 表示采样时刻, $u(k) \in \mathbf{R}^m$ 和 $x(k) \in \mathbf{R}^n$ 分别表示系统输入和可测系统状态, $\hat{u}(k) \in \mathbf{R}^m$ 和 $\hat{x}(k) \in \mathbf{R}^n$ 分别表示控制器输出和控制器输入. 假设被控对象为如下线性离散时不变系统:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k), \quad k \geq 0, \quad (1)$$

其中 A, B 是相应维数的定常矩阵.

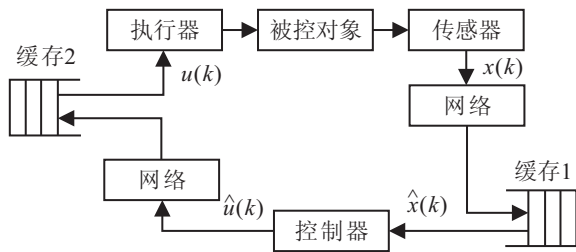


图 1 网络控制系统

假设传感器为时间驱动, 控制器和执行器为事件驱动. 传感器和控制器在每个采样时刻都发送数据, 且数据以单包形式传输. 缓存 1 (缓存 2) 在每个接收到新数据的时刻都向控制器 (执行器) 发送其接收到数据的信号. 一旦控制器收到信号, 则立即从缓存 1 中读取最新到达的数据并计算控制作用. 一旦执行器收到信号, 则立即从缓存 2 中读取最新到达的数据并更新系统输入. 如果控制器没有收到信号, 则控制器仅发送上一时刻的控制作用而不作计算. 如果执行器没有收到信号, 则采用上一时刻的控制作用作为系统输入 (由零阶保持器实现).

假设 1 NCS 中的传感器、控制器、执行器、缓存 1 和缓存 2 是时钟同步的.

注 1 控制器和执行器为事件驱动是针对控制器和执行器收到缓存器发送的信号而言的.

对于从传感器到控制器的数据传输过程, 在处理网络时滞的同时还考虑了时序错乱的情况. 假设传感

器在 k 时刻发送的数据在 j_k 时刻到达缓存 1, 则可得序列 $\hat{\mathcal{J}} := \{\hat{j}_1, \hat{j}_2, \dots\}$. 由于时序错乱的影响, $\hat{\mathcal{J}}$ 中各元素未必使得 $\hat{j}_1 \leq \hat{j}_2 \leq \dots$ 成立. 对于时序错乱, 通过引入排序因子 $\text{ord}\{\cdot\}$ 来处理.

定义 1 $\text{ord}\{\cdot\}$ 称为排序因子. 排序因子在不增加或减少任何元素的情况下, 对原有整数序列按从小到大的顺序进行排序, 并将得到的序列称为有序序列.

由 $\text{ord}\{\cdot\}$ 可得到有序序列 $\bar{\mathcal{J}} := \{\bar{j}_1, \bar{j}_2, \dots\} = \text{ord}\{\hat{\mathcal{J}}\}$. 由于网络时滞的影响, 在一个采样周期内, 缓存 1 有可能收到多个数据, 对两个不相等的正整数 a, b , 可能出现 $\bar{j}_a = \bar{j}_b$ 的情况. 这时, 必存在对应元素 $\hat{j}_{k_a} \in \hat{\mathcal{J}}, \hat{j}_{k_b} \in \hat{\mathcal{J}}$ 使得 $\hat{j}_{k_a} = \bar{j}_a, \hat{j}_{k_b} = \bar{j}_b$. 为此规定: 如果 k_a 时刻发送的数据先于 k_b 时刻发送的数据到达缓存 1, 则在 $\bar{\mathcal{J}}$ 中 \bar{j}_a 位于 \bar{j}_b 之前. 由于控制器只取最新到达的数据, $\bar{\mathcal{J}}$ 中只有一部分元素影响控制器. 定义有序序列 $\dot{\mathcal{J}} := \{\dot{j}_1, \dot{j}_2, \dots\}$, 使其满足: 1) $\dot{\mathcal{J}} \subseteq \bar{\mathcal{J}}$; 2) 对于 $\bar{\mathcal{J}}$ 中的任意相邻元素 $\bar{j}_a, \bar{j}_{a+1}, \bar{j}_{a+2}, a > 0$, 如果 $\bar{j}_{a+1} - \bar{j}_a \geq 0$ 且 $\bar{j}_{a+2} - \bar{j}_{a+1} \geq 1$, 则 $\bar{j}_{a+1} \in \dot{\mathcal{J}}$; 否则 $\bar{j}_{a+1} \notin \dot{\mathcal{J}}$. 特别地, 如果 $\bar{j}_2 - \bar{j}_1 \geq 1$, 则 $\bar{j}_1 \in \dot{\mathcal{J}}$. 有序序列 $\dot{\mathcal{J}}$ 即为影响控制器的时间序列.

例 1 图 2 是数据传输过程的例子. 其中

$$\hat{\mathcal{J}} = \{1, 2, 2, 5, 7, 6, 7, 8, 9, 9, 11, 11, \dots\},$$

$$\bar{\mathcal{J}} = \{1, 2, 2, 5, 6, 7, 7, 8, 9, 9, 11, 11, \dots\},$$

$$\dot{\mathcal{J}} = \{1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 11, \dots\}.$$

显然, 控制器没有用到数据 $x(1), x(4), x(8), x(10)$.

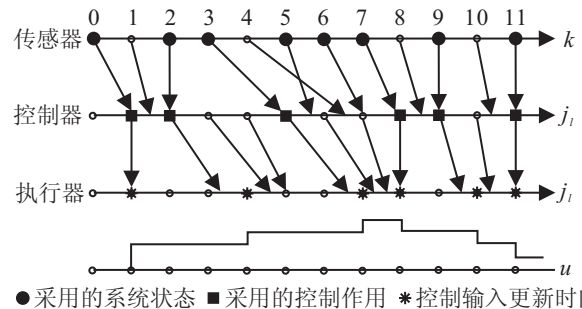


图 2 数据传输过程举例

令 $d_1 := \max_{j_i \in \dot{\mathcal{J}}} (j_{i+1} - j_i)$ 为数据从传感器到控制器的时滞上界. 如果 $d_1 = 1$, 则表示数据没有时滞. 控制器在每个 j_i 时刻计算控制作用 $\hat{u}(j_i)$, 当 k 满足 $j_i \leq k < j_{i+1}$ 时, 发送 $\hat{u}(k) = \hat{u}(j_i)$ 到传输网络. 假设数据在从控制器到缓存 2 的传输中没有时序错乱. 令 $\bar{\mathcal{I}} := \{\bar{i}_1, \bar{i}_2, \dots\}$ 为数据从控制器到达缓存 2 的时间序列. 显然, 对于任何 $\bar{i}_i \in \bar{\mathcal{I}}$, 存在 $j_{q_i} \in \dot{\mathcal{J}}$, 使得 $u(\bar{i}_i)$ 即为 $\hat{u}(j_{q_i})$. 由于存在网络时滞, 在一个采样周期内缓存 2 可能收到多个数据, 而执行器只取最新的数据更新系统输入, $\bar{\mathcal{I}}$ 中只有一部分元素影响执行器. 定义有序序列 $\dot{\mathcal{I}} = \{\dot{i}_1, \dot{i}_2, \dots\}$, 使其满足:

1) $\dot{\mathcal{I}} \subseteq \bar{\mathcal{I}}$;

2) 对于 $\bar{\mathcal{I}}$ 中的任意相邻元素 $\bar{i}_b, \bar{i}_{b+1}, \bar{i}_{b+2}, b > 0$, 如果 $\bar{i}_{b+1} - \bar{i}_b \geq 0$ 且 $\bar{i}_{b+2} - \bar{i}_{b+1} \geq 1$, 则 $\bar{i}_{b+1} \in \dot{\mathcal{I}}$; 否则 $\bar{i}_{b+1} \notin \dot{\mathcal{I}}$. 特别地, 如果 $i_2 - i_1 \geq 1$, 则 $i_1 \in \dot{\mathcal{I}}$. 有序序列 $\dot{\mathcal{I}}$ 即为影响执行器的时间序列.

例 2 续例 1. 另知

$$\bar{\mathcal{I}} = \{1, 4, 5, 5, 7, 8, 8, 8, 10, 11, 11, \dots\},$$

$$\dot{\mathcal{I}} = \{1, 4, 5, 7, 8, 10, 11, \dots\}.$$

显然, 执行器没有采用控制作用 $\hat{u}(3), \hat{u}(6), \hat{u}(7), \hat{u}(10)$.

令 $d_2 := \max_{i_l \in \dot{\mathcal{I}}} (i_{l+1} - i_l)$ 为数据从控制器到执行器的时滞上界. 如果 $d_2 = 1$, 则表示数据没有时滞.

假设 2 从传感器到控制器以及从控制器到执行器都存在无穷多个没有传输时滞的采样时刻.

定义 2 有界时滞过程定义为

$$\{\eta(j_i) := j_{i+1} - j_i | j_i \in \dot{\mathcal{J}}\}, \quad (2)$$

$$\{\rho(i_i) := i_{l+1} - i_l | i_l \in \dot{\mathcal{I}}\}, \quad (3)$$

其中 $\eta(j_i)$ 和 $\rho(i_i)$ 分别从有限集合 $\mathcal{D}_1 := \{1, 2, \dots, d_1\}$ 和 $\mathcal{D}_2 := \{1, 2, \dots, d_2\}$ 中任意取值.

对于数据传输过程, 未必有 $j_2 \leq i_2, j_3 \leq i_3, j_4 \leq i_4, \dots$ 成立. 对于任意 $i_l \in \dot{\mathcal{I}}$, 将 $\dot{\mathcal{J}}$ 中的对应元素记为 j_{e_l} . 显然, 对于 $\dot{\mathcal{J}}$ 中的某些元素 $j_h, \dot{\mathcal{I}}$ 中没有元素与之对应, 因此, $\dot{\mathcal{J}}$ 中只有一部分元素影响闭环系统. 由于存在网络时滞, 执行器连续收到的若干数据 $\{u(i_l), u(i_{l+1}), \dots, u(i_{l+c}), c > 0\}$ 可能是同一时刻计算的, 在这种情况下, $\{u(i_{l+1}), \{u(i_{l+2}), \dots, u(i_{l+c})\}$ 不影响闭环系统. 因此, $\dot{\mathcal{I}}$ 中只有一部分元素影响闭环系统. 这两部分元素可由如下 3 条规则确定:

1) 对于 $\dot{\mathcal{I}}$ 中的若干个相邻元素 $i_l, i_{l+1}, \dots, i_{l+c}, c > 0$, 若与之对应的为同一个 j_{e_l} , 则删除 $\dot{\mathcal{I}}$ 中元素 $i_{l+1}, i_{l+2}, \dots, i_{l+c}$;

2) $\dot{\mathcal{I}}$ 中的剩余元素组成新的有序序列 $\mathcal{I} = \{i_1, i_2, \dots\}$;

3) i_1, i_2, \dots 的各对应元素 j_{e_l} 组成新的有序序列 $\mathcal{J} = \{j_1, j_2, \dots\}$.

有序序列 \mathcal{J}, \mathcal{I} 即为实际影响闭环系统的时间序列, 且对所有的 $r \geq 1$ 满足 $j_r \leq i_r$. 若 $i_r = i_s$, 则 $j_r = j_s$.

例 3 续例 1. 易知

$$\mathcal{J} = \{1, 2, 5, 8, 9, 11, \dots\}, \mathcal{I} = \{1, 4, 7, 8, 10, 11, \dots\}.$$

控制器在 $k = 6$ 和 $k = 7$ 时刻发送的控制作用没有被执行器采用, 故 $\hat{u}(6)$ 和 $\hat{u}(7)$ 不影响闭环系统. 执行器在 $k = 5$ 和 $k = 4$ 时刻收到了相同的控制作用 $\hat{u}(2)$, 故 $u(5)$ 不影响闭环系统.

命题 1 对于有界时滞过程 (2) 和 (3), 必有

$$i_r - k_{j_r} \in \mathcal{D}_3, \quad (4)$$

$$i_{r+1} - i_r \in \mathcal{D}_4. \quad (5)$$

其中: $\mathcal{D}_3 := \{0, 1, \dots, d_1 + d_2\}$, $\mathcal{D}_4 := \{1, 2, \dots, d_1 + d_2\}$, 控制器在 j_r 时刻收到的数据发送至 k_{j_r} 时刻.

证明 由定义 2, 数据在两个通道中传输的时滞上界为 $d_1 + d_2$, 可知式 (4) 成立. 执行器在 i_r 和 i_{r+1} 间接收数据的最差情况为 $\{i_r, i_{l+1}, i_{l+2}, \dots, i_{l+d_1-1}, i_{r+1}\}$, 其中 $i_r = i_{l_1}, i_{r+1} = i_{l_1+d_1}$. 即执行器连续收到 $d_1 - 1$ 个同一时刻计算的控制作用, 由此可得

$$i_{r+1} - i_{l+1} \in \mathcal{D}_1. \quad (6)$$

又由式 (3) 可得

$$i_{l+1} - i_r \in \mathcal{D}_2. \quad (7)$$

由式 (6) 和 (7) 可知 (5) 成立. \square

2 网络控制系统的镇定

考虑形如 $\hat{u} = K\hat{x}$ 的状态反馈控制器, 其中 K 为状态反馈增益. 由 $u(i_r) = \hat{u}(j_r) = K\hat{x}(j_r) = Kx(k_{j_r})$ 和序列 \mathcal{I}, \mathcal{J} , 对于所有的 $k \geq i_1$, 系统闭环模型为

$$x(k+1) = A^{k-i_r+1}x(i_r) + B_{k-i_r+1}Kx(k_{j_r}), \quad (8)$$

其中: $i_r \leq k < i_{r+1}, i_r \in \mathcal{I}, B_j = \sum_{s=0}^{j-1} A^s B, j \geq 1$. 选取如下扩展状态变量:

$$z(k) =$$

$$[x(k)^T x(k-1)^T x(k-2)^T \dots x(k-d_1-d_2)^T]^T,$$

考虑时滞的所有可能性, 系统 (8) 可改写为

$$z(i_{r+1}) = \Phi(i_r)z(i_r).$$

$$\Phi(i_r) = \sum_{p \in \mathcal{D}_4} \sum_{t \in \mathcal{D}_3} \omega_p(i_r) \kappa_t(i_r) \Phi_{pt}.$$

$$\omega_p(i_r) = \begin{cases} 1, & i_{r+1} - i_r = p; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$$\kappa_t(i_r) = \begin{cases} 1, & i_r - k_{j_r} = t; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (9)$$

其中

$$\Phi_{pt} = [\phi_{pt}^T \ [I \ 0]^T]^T \in \mathbf{R}^{(d_1+d_2+1)n \times (d_1+d_2+1)n}.$$

$$\phi_{pt} = [\phi_{pt}^1 \ \phi_{pt}^2 \ \dots \ \phi_{pt}^{d_1+d_2+1}] \in \mathbf{R}^{(pn) \times (d_1+d_2+1)n}.$$

$$\phi_{pt}^s \in \mathbf{R}^{(pn) \times n}, s \in \{1, 2, \dots, d_1 + d_2 + 1\}.$$

$$\phi_{p0}^s =$$

$$\begin{cases} 0, & s \neq 1; \\ \begin{bmatrix} A^p + B_p K \\ A^{p-1} + B_{p-1} K \\ \vdots \\ A^{\max\{1, p-d_1-d_2\}} + B_{\max\{1, p-d_1-d_2\}} K \end{bmatrix}, & s = 1. \end{cases}$$

$$\phi_{pt}^s = 0, t \neq 0, s \neq \{1, t+1\}.$$

$$[\phi_{pt}^1 \ \phi_{pt}^{t+1}] = \begin{bmatrix} A^p & B_p K \\ A^{p-1} & B_{p-1} K \\ \vdots & \vdots \\ A^{\max\{1, p-d_1-d_2\}} & B_{\max\{1, p-d_1-d_2\}} K \end{bmatrix}, t \neq 0.$$

对于稳定性分析而言, 系统(9)与(8)是等价的.

注 2 由定义 2 和命题 1 易知, 在模型(9)中, $\nu_r - k_{j_r} = t$, $t \in \mathcal{D}_3$ 表示时滞的各种可能性. 对于 \mathcal{J} 中任意相邻元素 j_r, j_{r+1} , 若满足 $k_{j_r} > k_{j_{r+1}}$, 则表示系统状态在传输过程中发生了时序错乱.

注 3 模型(8)与合并两个通道时滞所得的模型 $x(k+1) = Ax(k) + BKx(k-\tau)$ ($k > 0$, $0 \leq \tau \leq \tau_{\max}$) 是截然不同的. 模型(8)中的控制律表达方式 $u(\nu_r) = \hat{u}(j_r) = K\hat{x}(j_r) = Kx(k_{j_r})$ 可用于处理时变控制律问题. 文献[11]探讨了在采用预测控制时, 必须分别考虑两个通道数据丢包的原因. 因此, 本文基于文献[11]的这一观点, 建立了可处理时变控制律问题的 NCS 新模型(8)和(9).

注 4 当两个通道都有时序错乱时, 可如下处理: 首先, 分别得到序列 $\hat{\mathcal{J}}$, 有序序列 $\bar{\mathcal{J}} = \text{ord}\{\hat{\mathcal{J}}\}$ 和 $\dot{\mathcal{J}}$; 然后, 用同样的方法得到序列 $\hat{\mathcal{I}}$, 有序序列 $\bar{\mathcal{I}} = \text{ord}\{\hat{\mathcal{I}}\}$ 和 $\dot{\mathcal{I}}$; 最后, 通过扩展 3 条规则, 得到实际影响闭环系统的序列 \mathcal{I} 和 \mathcal{J} . 但是, 由于从控制器到执行器存在时序错乱, $\nu_r \in \mathcal{I}$ 的对应元素不再是 $j_r \in \mathcal{J}$, 而是 $\{j_{r-d_2}, j_{r-d_2+1}, \dots, j_r, j_{r+1}, \dots, j_{r+d_2}\}$ 中的某一个, 这将增加系统的不确定性, 需在模型(9)中引入第 3 个组合系数. 控制器在每个采样时刻都发送数据的做法, 对从控制器到执行器存在时序错乱时是有效的. 对于时序错乱, 也可通过在执行器端引入具有选择功能的逻辑零阶保持器来处理^[12-13].

定理 1 如果存在正定对称矩阵 P , 使得

$$\Phi_{pt}^T P \Phi_{pt} - P < 0, p \in \mathcal{D}_4, t \in \mathcal{D}_3 \quad (10)$$

成立, 则具有有界时滞的 NCS(9) 是渐近稳定的.

证明 构造如下形式的 Lyapunov 函数:

$$V(z(\nu_r)) = z^T(\nu_r) P z(\nu_r). \quad (11)$$

由式(9)和(11)易知, 式(10)可保证对于所有的 $z(\nu_r) \neq 0$, $V(z(\nu_{r+1})) - V(z(\nu_r)) < 0$ 成立, 因此, 闭环系统(9)是渐近稳定的. \square

控制目标为设计合适的状态反馈控制律渐近镇定系统(9), 因此定义 $Q = P^{-1}$, $K = YG^{-1}$ 和

$$G_{pt} = \begin{bmatrix} G_{pt}^{1,1} & G_{pt}^{1,2} & \dots & G_{pt}^{1,d_1+d_2+1} \\ G_{pt}^{2,1} & G_{pt}^{2,2} & \dots & G_{pt}^{2,d_1+d_2+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{pt}^{d_1+d_2+1,1} & G_{pt}^{d_1+d_2+1,2} & \dots & G_{pt}^{d_1+d_2+1,d_1+d_2+1} \end{bmatrix},$$

$$G_{pt}^{t+1,s} = G, s \in \{1, 2, \dots, d_1 + d_2 + 1\},$$

其中 G_{pt} 中的所有分块矩阵维数相等.

根据定理 1 中的稳定性条件, 可得到如下的具有有界时滞的 NCS 的可镇定性结论.

定理 2 考虑离散时间系统(1), 对于有界时滞过程(2)和(3), 如果存在矩阵 Y, G_{pt}, G, Q , 使得

$$\begin{bmatrix} G_{pt}^T + G_{pt} - Q & G_{pt}^T \Phi_{pt}^T \\ \Phi_{pt} G_{pt} & Q \end{bmatrix} > 0, p \in \mathcal{D}_4, t \in \mathcal{D}_3 \quad (12)$$

成立, 则控制器 $K = YG^{-1}$ 可渐近镇定闭环系统(9).

证明 在式(10)的两端分别左乘 G_{pt}^T , 右乘 G_{pt} , 由 $Q = P^{-1}$ 和 Schur 补引理可证明定理 2 成立. \square

注 5 在应用定理 2 的过程中, 应注意式(12)中 $\Phi_{pt} G_{pt}$ 的所有乘积项 KG 应转化为 Y .

注 6 本文的主要结论可方便地推广到连续时间系统情形. 对于处理连续时间系统, 只需适当地选择采样周期, 并在相邻的采样周期间作积分运算.

注 7 此处以预测控制为例, 简要说明将本文的建模与分析方法用于处理时变控制律问题的方法. 预测控制的特色在于滚动优化和处理物理约束. 在每个 j_l 时刻, 控制器事先并不知道当前时刻 j_l 是否为影响闭环系统的序列 \mathcal{J} 中的一个, 但是控制器假设 $j_l = j_{s_l}$, $s_l \geq 1$, 则闭环系统状态预测值为

$$x(k+1|j_l) = A^{k-\nu_{s_l}+\tau+1} x(\nu_{s_l}+\tau|j_l) + B_{k-\nu_{s_l}+\tau+1} K(j_l) x(k_{j_{s_l}+\tau}|j_l), \\ \nu_{s_l}+\tau \leq k < \nu_{s_l}+\tau+1, \tau \geq 0.$$

分别分析两个通道时滞的所有可能性, 网络预测控制综合可归结为求解一个满足若干约束的 min-max 优化问题. 在每个 j_l 时刻, 控制器求解该优化问题得到控制作用 $\{\hat{u}(j_l), \hat{u}(j_{s_l+1}|j_l), \dots\}$. 当 k 满足 $j_l \leq k < j_{l+1}$ 时, 控制器发送 $\hat{u}(j_l)$. 若不分别考虑两个通道时滞对闭环系统的影响, 则控制器不能作 $j_l = j_{s_l}$, $s_l \geq 1$ 的假设, 也无法得到形如 $u(\nu_{s_l}+\tau|j_l) = K(j_l) \times x(k_{j_{s_l}+\tau}|j_l)$ 的控制律表达方式, 进而造成控制器在在线求解过程中因违反约束而导致优化问题不可行. 由此可见, 本文采用的方法满足网络预测控制综合方法(具有稳定性和可行性保证的预测控制)的客观要求, 这与已有文献中仅研究网络预测控制设计方法(不必保证稳定性和可行性)有本质的区别.

3 仿真例子

考虑如下线性离散时不变系统:

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} 1 & 0.1 \\ 0 & 0.99 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.0787 \end{bmatrix} u(k),$$

初始状态为 $x(0) = [0.01 \ 0]^T$. 两个通道的时滞上界

为 $d_1 = d_2 = 2$. 根据定理 2, 求解式 (12) 可得

$$G = \begin{bmatrix} 0.0117 & -0.0038 \\ -0.0023 & 0.0076 \end{bmatrix},$$

$$Y = [-0.0031 \quad -0.0066],$$

进而求得状态反馈增益 $K = [-0.4878 \quad -1.1182]$. 仿真结果如图 3 和图 4 所示.

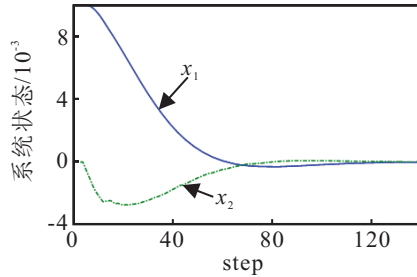


图 3 系统状态响应

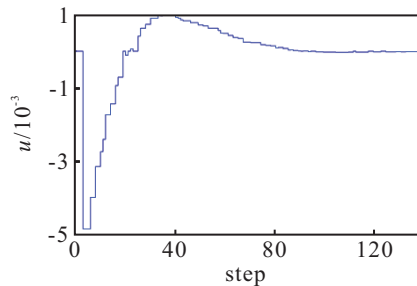


图 4 系统控制输入

由闭环系统的状态响应易知, 对于具有有界时滞的 NCS, 采用本文方法可以使系统稳定.

4 结 论

本文针对具有有界时滞且时滞上界大于一个采样周期的 NCS, 给出了与已有文献中完全不同的系统模型. 基于采用时变控制律的 NCS 不具备合并两个通道时滞的条件的事实, 通过分别分析两个通道时滞对闭环系统的影响, 建立了适用于具有时变控制器的 NCS 模型. 根据 Lyapunov 方法, 分析并给出了系统的稳定性条件和控制器设计方法. 仿真算例验证了新模型的合理性和所给控制方法的有效性.

参考文献(References)

- [1] Hespanha J P, Naghshtabrizi P, Xu Y G. A survey of recent results in networked control systems[J]. Proc of the IEEE, 2007, 95(1): 138-162.
- [2] Walsh G C, Ye H, Bushnell L G. Stability analysis of networked control systems[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2002, 39(3): 438-446.

- [3] 彭晨, 岳东. 网络环境下不确定时滞系统鲁棒 H_∞ 控制[J]. 自动化学报, 2007, 33(10): 1093-1096.
(Peng C, Yue D. Network-based robust H_∞ control of systems with state-delay and uncertainty[J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(10): 1093-1096.)
- [4] Nilsson J, Bernhardsson B, Wittenmark B. Stochastic analysis and control of real-time systems with random time delays[J]. Automatica, 1998, 34(1): 57-64.
- [5] Hu S S, Zhu Q X. Stochastic optimal control and analysis of stability of networked control systems with long delay[J]. Automatica, 2003, 39(11): 1877-1884.
- [6] Zhang W, Branicky M S, Phillips S M. Stability of networked control systems[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(1): 84-99.
- [7] Liu M, Ho D W C, Niu Y G. Stabilization of markovian jump linear system over networks with random communication delay[J]. Automatica, 2009, 45(2): 416-421.
- [8] Li X, Wu X B, Gao J. Observer-based guaranteed cost fault-tolerant controller design for networked control systems[J]. Information Technology J, 2011, 10(2): 394-401.
- [9] Cloosterman M B G, Nathan van de Wouw, Heemels W P M H, et al. Stability of networked control systems with uncertain time-varying delays[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2009, 54(7): 1575-1580.
- [10] Sun Y G, Qin S Y. Stability analysis and controller design for networked control systems with random time delay[J]. Int J of Systems Science, 2011, 42(3): 359-367.
- [11] Ding B C, Tang X M. Designing model predictive control with one free control move for linear systems over networks with bounded packet loss[C]. Proc of the 29th Chinese Control Conf. Beijing: IEEE Control Systems Society, 2010: 3134-3139.
- [12] Xiong J L, Lam J. Stabilization of networked control systems with a logic ZOH[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2009, 54(2): 358-363.
- [13] 彭晨, 田恩刚. 一种改进的具有非理想网络状况的网络控制系统分析与综合方法[J]. 自动化学报, 2010, 36(1): 188-192.
(Peng C, Tian E G. An improved analysis and synthesis approach for networked control systems with non-ideal network quality of services[J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(1): 188-192.)