

具有多传输通道系统的网络化预测控制

宋洪波^{1†}, 刘国平²

(1. 浙江财经大学 信息学院, 浙江 杭州 310018; 2. 英国南威尔士大学 先进技术学院, 南威尔士 CF37 1DL)

摘要: 本文研究了一类具有多传输通道网络化系统的控制问题, 基于网络化预测控制方法, 提出了一种改进型的分布式预测补偿方式, 从而更有效地利用反馈数据来提高控制系统的性能. 对闭环网络化预测控制系统进行分析, 得到其稳定性条件, 特别地, 在模型精确已知和多传输通道的时延为定常的情况下, 该条件将会退化为本地控制的闭环系统稳定性条件. 上述结论的好处是网络化预测控制系统中状态观测器和控制器的设计可以参考本地控制. 通过球杆系统算例验证本文所提方法的正确性和有效性.

关键词: 网络化控制系统; 网络化预测控制; 多传输通道; 分布式时延

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Networked predictive control for systems with multiple communication channels

SONG Hong-bo^{1†}, LIU Guo-ping²

(1. College of Information, Zhejiang University of Finance and Economics, Hangzhou Zhejiang 310018, China

2. Faculty of Advanced Technology, University of South Wales, Pontypridd CF37 1DL, UK)

Abstract: This paper investigates the control for a class of networked systems with multiple communication channels. Based on the networked predictive control strategy, a modified compensation scheme with distributed prediction is proposed to make better use of the feedback information for improving the control performance. Stability analysis is carried out for the closed-loop networked predictive control system and the stability condition is derived. Particularly, when the system model is accurate and the multiple distributed delays are constant, the stability condition is degenerated to that of the local control. This result is helpful in the design of networked predictive control systems since the observer and controller gain matrices can be designed according to the local control requirements and without considering the network. A ball-and-beam system example is given to illustrate the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Key words: networked control systems; networked predictive control; multiple communication channels; multiple distributed delays

1 引言(Introduction)

通过网络形成闭环的控制系统称为网络化控制系统, 相对于传统的点对点控制系统, 由于其具有连线少、灵活性高、成本低和维护方便等优点, 因此在工业界得到了越来越广泛的关注^[1]. 然而, 在带来上述优点的同时, 将网络引入闭环给网络化控制系统的分析与设计带来了新的困难, 包括时延、丢包、多传输通道和量化等. 在存在上述网络诱导因素的情况下, 如何设计控制器保证闭环网络化控制系统的稳定性及性能成为了控制界的热点研究方向之一^[2-3].

时延是引起网络化控制系统性能下降甚至失稳的重要原因之一, 现有文献已提出很多有效的处理时延

问题的方法, 它们一般首先将时延的影响建模到闭环系统中, 进而采用时滞系统方法、切换系统方法和随机系统方法等进行稳定性分析和控制器设计^[2]. 然而, 这样的处理方式被动地接受时延影响, 因此具有一定的保守性. 文[4-5]提出了一种主动补偿时延的网络化预测控制方法, 该方法的主要思想是通过模型预测对象将来的动态, 进而通过设计控制策略补偿时延的作用, 并利用网络有时间戳和一个数据包传输多个传感量或者控制量的特点处理随机时延和丢包, 取得了很好的控制效果. 在稳定性分析上, 文[6]得到了在定常时延情况下, 闭环网络化预测控制系统与本地控制的稳定性条件相同的结论. 相关的网络化预测控制的

收稿日期: 2014-09-27; 录用日期: 2015-04-20.

[†]通信作者. E-mail: di7ganshb@163.com.

国家自然科学基金项目(61304040), 浙江省自然科学基金项目(LQ13F030005)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (61304040), National Natural Science Foundation of Zhejiang Province (LQ13F030005).

研究结果可参见文 [7-10].

在对象物理覆盖范围较大的情况下, 网络化控制系统的传感器和执行器往往需要通过多个网络节点与控制器进行通信, 这类系统称为多传输通道网络化控制系统, 其多个传输通道的时延情况可能不同, 即具有分布式时延. 相对于单个时延, 具有分布式时延的网络化控制系统更难处理^[11]. 可以通过队列的方式将分布式时延转化为单个时延^[12], 然而这样的处理方式并没有完全利用现有的数据. 文 [13-14] 研究了具有多反馈通道系统的网络化预测控制问题, 但其均假设前向通道为理想. 为此, 本文将研究具有多传输通道系统的网络化预测控制问题, 主要是提出了一种改进型的分布式预测补偿方式, 从而提高了系统的控制性能, 并给出了闭环网络化预测控制系统的稳定性分析, 最后通过球杆系统的例子验证所提分布式网络化预测控制方法的有效性.

2 多传输通道网络化预测控制器的设计 (Design of networked predictive controller with multiple communication channels)

考虑如图 1 所示的多传输通道网络化预测控制系统, 被控对象由如下具有不确定性的线性离散时间状态空间模型描述:

$$\begin{cases} x(k+1) = (A + \Delta A)x(k) + (B + \Delta B)u(k), \\ y(k) = Cx(k), \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x(k) \in \mathbb{R}^n$, $y(k) \in \mathbb{R}^m$ 和 $u(k) \in \mathbb{R}^p$ 分别是对象的状态, 输出和输入向量. A, B 和 C 为具有适当维数的系统名义模型矩阵, ΔA 和 ΔB 为模型不确定性且满足如下条件:

$$[\Delta A \ \Delta B] = EF(k)[G_1 \ G_2], \quad (2)$$

其中: $F^T(k)F(k) \leq I$, I 为适当维数的单位矩阵, E, G_1 和 G_2 为适当维数的矩阵. 记 $y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_m]^T$, $y_i, \forall i \in M$ 为标量, $M = \{1, 2, \dots, m\}$.

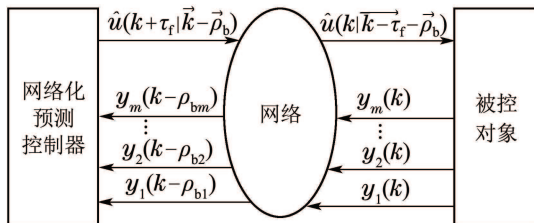


图 1 多传输通道网络化预测控制系统结构图

Fig. 1 Structure of networked predictive control systems with multiple communication channels

对象的输出通过多个反馈通道发送到预测控制器, 计算出控制量后通过一个前向通道传输到对象进行控制. 不失一般性, 假设系统有 m 条反馈通道且 y_i 分

别通过反馈通道 i 传输. 为简便起见, 假设前向通道和反馈通道的时延均有上界, 系统中所有通过网络传输的数据包均有时间戳, 且系统中的网络节点时钟同步. 相对于文 [4-5] 中处理的单传输通道网络化控制系统, 本文所考虑的多通道系统情况在网络节点同步的要求相对较高.

记反馈通道 i 的时延值分别为 ρ_{bi} , $i \in M$, 前向通道的时延为 τ_f . 由于反馈通道时延大小有可能相同, 且预测方式与时延值大小有关, 因此首先重新定义反馈通道的时延, 并将其按大小重新排序. 记反馈通道中的不同时延值的数量为 \bar{m} , 相应的时延值为 τ_{bi} , $i \in \bar{M} = \{1, 2, \dots, \bar{m}\}$, 且满足 $\tau_{b1} < \tau_{b2} < \dots < \tau_{b\bar{m}}$. 记时延大小为 τ_{bi} 的反馈通道的集合为 Q_i .

定义 $\Pi_i \in \mathbb{R}^{m \times m}$ 为反馈通道的选择矩阵. 其中:

$$\begin{aligned} \Pi_i &= \text{diag}\{\delta(i-1), \delta(i-2), \dots, \delta(i-m)\}, \\ \delta(l) &= \begin{cases} 1, & l = 0, \\ 0, & l \neq 0. \end{cases} \end{aligned}$$

网络化预测控制器的作用是通过滞后的分布式对象输出估计出对象将来的状态, 然后进行补偿. 基于具有如下形式的状态观测器:

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1|k) &= A\hat{x}(k|k-1) + Bu(k) + \\ &L(y(k) - \hat{x}(k|k-1)), \end{aligned} \quad (3)$$

其中: 观测器状态 $\hat{x}(k|k-1)$ 为对象状态 $x(k)$ 的观测值, L 为观测器增益矩阵, 可由极点配置等方法设计. 定义误差向量 $e(k) = x(k) - \hat{x}(k|k-1)$, 预测过程可通过如下步骤得到:

在 k 时刻, $\tau_{b\bar{m}}$ 是最大的时延, 则容易看出预测控制器端有滞后的对象输出 $y(k - \tau_{b\bar{m}})$, 采用状态观测器, 将式 (3) 向后平移 $\tau_{b\bar{m}}$ 步可得

$$\begin{aligned} \hat{x}(k - \tau_{b\bar{m}} + 1 | k - \rho_b) &= \\ A\hat{x}(k - \tau_{b\bar{m}} | k - \tau_{b\bar{m}} - 1) &+ \\ Bu(k - \tau_{b\bar{m}}) + LCe(k - \tau_{b\bar{m}}), \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $\hat{x}(\cdot | k - \rho_b)$ 表示基于滞后的分布式数据对于 “.” 时刻的预测量.

由于 $\tau_{b(\bar{m}-1)}$ 是仅次于 $\tau_{b\bar{m}}$ 的第 2 大时延, 因此, 对于 $t = \tau_{b(\bar{m}-1)}, \tau_{b(\bar{m}-1)} + 1, \dots, \tau_{b\bar{m}} - 1$, 预测控制器具有除了时延为 $\tau_{b\bar{m}}$ 的通道所传输的对象输出外的其他输出, 即 $y_j(k - t), j \in \bar{Q}_{\bar{m}-1}, \bar{Q}_{\bar{m}-1} = \bigcup_{l=1}^{\bar{m}-1} Q_l$. 以此类推可得, 对于 $t = \tau_{bi}, \tau_{bi} + 1, \dots, \tau_{b(i+1)} - 1, i = 1, 2, \dots, \bar{m} - 1$, 预测控制器具有 $y_j(k - t), j \in \bar{Q}_i, \bar{Q}_i = \bigcup_{l=1}^i Q_l$. 由假设可知时延为定常, 预测控制器端可以获知这些时刻作用于对象的控制量, 因此可得预测过程如下:

$$\hat{x}(k - \tau_{bi} + 1 | k - \rho_b) =$$

$$A^{\tau_{b(i+1)}-\tau_{bi}}\hat{x}(k-\tau_{b(i+1)}+1|\vec{k}-\vec{\rho}_b)+\sum_{j=\tau_{bi}}^{\tau_{b(i+1)}-1}A^{j-\tau_{bi}}(Bu(k-j)+L\bar{\Pi}_iC\bar{e}(k-j)), \quad (5)$$

其中:

$$\begin{aligned} \bar{\Pi}_i &= \sum_{l \in \bar{Q}_i} \Pi_l, \quad i = 1, 2, \dots, \bar{m} - 1, \\ \bar{e}(k-t) &= x(k-t) - \hat{x}(k-t|\vec{k}-\vec{\rho}_b), \\ t &= \tau_{b1}, \tau_{b1}+1, \dots, \tau_{b\bar{m}}-1. \end{aligned}$$

由于 τ_{b1} 是最小的时延,因此预测控制器没有 $y(k-t)(t=1,2,\dots,\tau_{b1}-1)$ 的信息,因此预测过程如下:

$$\begin{aligned} \hat{x}(k|\vec{k}-\vec{\rho}_b) &= \\ A^{\tau_{b1}-1}\hat{x}(k-\tau_{b1}+1|\vec{k}-\vec{\rho}_b) &+ \\ \sum_{j=1}^{\tau_{b1}-1} A^{j-1}Bu(k-j). \end{aligned} \quad (6)$$

前向通道存在 τ_f 步时延,显然预测控制器没有 $y(k+j), j=0,1,\dots,\tau_f-1$,此时虽然 $u(k+j)$ 还没有实施,但由时延为定常可知这些控制量已确定并在 $k+j$ 时刻作用于对象.因此预测过程如下:

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+\tau_f|\vec{k}-\vec{\rho}_b) &= \\ A^{\tau_f}\hat{x}(k|\vec{k}-\vec{\rho}_b) + \sum_{j=0}^{\tau_f-1} A^jBu(k+j). \end{aligned} \quad (7)$$

通过式(5)–(7)可得 $\hat{x}(k+\tau_f|\vec{k}-\vec{\rho}_b)$ 的表达式,基于该预测状态计算出的控制量将在 $k+\tau_f$ 时刻作用于对象,将其左平移 τ_f 步得到

$$\begin{aligned} \hat{x}(k|\vec{k}-\tau_f-\vec{\rho}_b) &= \\ A^{\bar{\tau}_m-1}\hat{x}(k-\bar{\tau}_m+1|\vec{k}-\tau_f-\vec{\rho}_b) &+ \\ \sum_{i=1}^{\bar{m}-1} \sum_{j=\bar{\tau}_i}^{\bar{\tau}_{i+1}-1} A^{j-1}L\bar{\Pi}_iC\bar{e}(k-j) &+ \\ \sum_{j=1}^{\bar{\tau}_m-1} A^{j-1}Bu(k-j), \end{aligned} \quad (8)$$

其中: $\bar{\tau}_i = \tau_{bi} + \tau_f, i = 1, 2, \dots, \bar{m} - 1$. 得到对象的预测状态后,采用状态反馈得到控制量为

$$u(k) = -K\hat{x}(k|\vec{k}-\tau_f-\vec{\rho}_b), \quad (9)$$

其中 K 为状态反馈控制器增益矩阵.由前向通道时延为 τ_f ,则所得的控制量 $u(k)$ 在 k 时刻到达对象端并作为该时刻的控制输入.

3 稳定性分析(Stability analysis)

本节将首先得到闭环的具有多传输通道网络化预测控制系统,进而对其进行稳定性分析.

对于预测控制器端有 $y(k-t)(t=1,2,\dots,\bar{\tau}_m)$ 的情况,容易看出,观测器状态将为

$$\hat{x}(k|k-1) =$$

$$A^{\bar{\tau}_m-1}\hat{x}(k-\bar{\tau}_m+1|k-\bar{\tau}_m) + \sum_{j=1}^{\bar{\tau}_m-1} A^{j-1}(Bu(k-j) + LCe(k-j)). \quad (10)$$

由式(8)减去式(10)可得,

$$\begin{aligned} \hat{x}(k|\vec{k}-\tau_f-\vec{\rho}_b) - \hat{x}(k|k-1) &= \\ \sum_{i=1}^{\bar{m}-1} \sum_{j=\bar{\tau}_i}^{\bar{\tau}_{i+1}-1} A^{j-1}L\bar{\Pi}_iC\bar{e}(k-j) &- \\ \sum_{j=1}^{\bar{\tau}_m-1} A^{j-1}LCe(k-j). \end{aligned} \quad (11)$$

考虑 $\bar{e}(k-t)$ 与 $e(k-t), t = \bar{\tau}_1, \bar{\tau}_1+1, \dots, \bar{\tau}_m-1$ 的关系.首先由式(4)可得

$$\bar{e}(k-\bar{\tau}_m+1) = e(k-\bar{\tau}_m+1). \quad (12)$$

由式(5)和式(10)可分别得到

$$\begin{aligned} \bar{e}(k-\bar{\tau}_m+2) &= \\ (A-L\bar{\Pi}_{\bar{m}-1}C)\bar{e}(k-\bar{\tau}_m+1) &+ \\ \Delta Ax(k-\bar{\tau}_m+1) + \Delta Bu(k-\bar{\tau}_m+1), \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} e(k-\bar{\tau}_m+2) &= \\ (A-LC)e(k-\bar{\tau}_m+1) &+ \\ \Delta Ax(k-\bar{\tau}_m+1) + \Delta Bu(k-\bar{\tau}_m+1). \end{aligned} \quad (14)$$

式(13)减式(14)得到,

$$\begin{aligned} \bar{e}(k-\bar{\tau}_m+2) &= \\ e(k-\bar{\tau}_m+2) + \Lambda_{\bar{m}-1}e(k-\bar{\tau}_m+1), \end{aligned} \quad (15)$$

其中 $\Lambda_{\bar{m}-1} = L(I - \bar{\Pi}_{\bar{m}-1})C$.进而容易得到对于 $\bar{\tau}_{\bar{m}-1}-1 \leq t \leq \bar{\tau}_m-2$,有

$$\begin{aligned} \bar{e}(k-t) &= \\ e(k-t) + \sum_{j=t+1}^{\bar{\tau}_m-1} (\Lambda_{\bar{m}-1})^{j-t} e(k-j). \end{aligned} \quad (16)$$

类似地,递推可以得到对于 $\bar{\tau}_i-1 \leq t \leq \bar{\tau}_{i+1}-2, i = 1, 2, \dots, \bar{m}-2$,有

$$\begin{aligned} \bar{e}(k-t) &= \\ e(k-t) + \sum_{j=t+1}^{\bar{\tau}_i-1} (\Lambda_i^{j-t} \prod_{l=i}^{\bar{m}-1} \Lambda_l^{\bar{\tau}_{l+1}-\bar{\tau}_l}) e(k-j), \end{aligned} \quad (17)$$

其中 $\Lambda_i = L(I - \bar{\Pi}_i)C$.为表述方便,记

$$\bar{e}(k-t) = \sum_{j=t}^{\bar{\tau}_m-1} \Phi_{tj}e(k-j), \quad (18)$$

其中:

$$\Phi_{tj} = \begin{cases} 0, & t > j, \\ I, & t = j, \\ A_{\bar{m}-1}^{j-t}, & \tau_{\bar{m}-1}-1 \leq t \leq \tau_{\bar{m}}-2, \\ A_i^{j-t} \prod_{l=i}^{\bar{m}-1} \Lambda_l^{\bar{\tau}_{l+1}-\bar{\tau}_l}, & \bar{\tau}_i-1 \leq t \leq \bar{\tau}_{i+1}-2, \\ & i = 1, 2, \dots, \bar{m}-2. \end{cases}$$

将式(18)代入式(11), 并通过整理可得,

$$\hat{x}(k|\overrightarrow{k - \tau_{\bar{r}} - \bar{\rho}_b}) - \hat{x}(k|k - 1) = \Upsilon, \quad (19)$$

其中:

$$\Upsilon = \sum_{l=\bar{\tau}_1}^{\bar{\tau}_m-1} \Omega(l)e(k-l) - \sum_{l=1}^{\bar{\tau}_m-1} A^{l-1}LCe(k-l),$$

$$\Omega(l) = \sum_{i=1}^{\bar{m}-1} \sum_{j=\bar{\tau}_i}^{\bar{\tau}_{i+1}-1} A^{j-1}L\bar{\Pi}_i C\Phi_{jl}.$$

由式(1)(9)和式(19)可得

$$\begin{aligned} e(k+1) &= x(k+1) - \hat{x}(k+1|k) = \\ &(A - LC)e(k) + \Delta Ax(k) + \Delta Bu(k) = \\ &(A - LC)e(k) + \Delta Ax(k) - \\ &\Delta BK(x(k) - e(k) + \Upsilon) = \\ &(A - LC)e(k) + (\Delta A - \Delta BK)x(k) + \\ &\Delta BK(e(k) + \Upsilon), \quad (20) \\ x(k+1) &= \\ &(A + \Delta A)x(k) + (B + \Delta B)u(k) = \\ &(A + \Delta A)x(k) - (B + \Delta B) \times \\ &K(x(k) - e(k) + \Upsilon) = \\ &(A - BK)x(k) + BK(e(k) + \Upsilon) + \\ &(\Delta A - \Delta BK)x(k) + \Delta BK(e(k) + \Upsilon). \quad (21) \end{aligned}$$

定义状态向量 $\xi(k) = [x^T(k) \ e^T(k) \ \eta^T(k)]^T$, 其中

$$\eta(k) = \begin{bmatrix} e(k-1) \\ e(k-2) \\ \vdots \\ e(k - \bar{\tau}_m + 1) \end{bmatrix}.$$

由式(20)-(21)得到如下闭环网络化预测控制系统:

$$\xi(k+1) = (\Psi + \Delta\Psi)\xi(k), \quad (22)$$

其中:

$$\Psi = \begin{bmatrix} A - BK & BK & BK\Psi_{13} \\ 0_{n \times n} & A - LC & 0_{n \times n(\bar{\tau}_m-1)} \\ 0_{n(\bar{\tau}_m-1) \times n} & \Psi_{32} & \Psi_{33} \end{bmatrix},$$

$$\Psi_{32} = [I_{n \times n} \ 0_{n \times n(\bar{\tau}_m-2)}]^T,$$

$$\Psi_{33} = \begin{bmatrix} 0_{n \times n(\bar{\tau}_m-2)} & 0_{n \times n} \\ I_{n(\bar{\tau}_m-2) \times n(\bar{\tau}_m-2)} & 0_{n(\bar{\tau}_m-2) \times n} \end{bmatrix},$$

$$\Psi_{13} = [\Psi_{131} \ \Psi_{132} \ \cdots \ \Psi_{13\bar{\tau}_m}],$$

$$\Psi_{13i} = A^{i-1}LC, \ i = 1, 2, \dots, \bar{\tau}_1 - 1,$$

$$\Psi_{13i} = A^{i-1}LC - \Omega(i), \ i = \bar{\tau}_1, \bar{\tau}_1 + 1, \dots, \bar{\tau}_m - 1,$$

$$\Delta\Psi = \begin{bmatrix} \Delta A - \Delta BK & \Delta BK & \Delta BK\Psi_{13} \\ \Delta A - \Delta BK & \Delta BK & \Delta BK\Psi_{13} \\ 0_{n(\bar{\tau}_m-1) \times n} & 0_{n(\bar{\tau}_m-1) \times n} & 0_{n(\bar{\tau}_m-1) \times n} \end{bmatrix}.$$

多传输通道网络化预测控制闭环系统模型如式(22)所示, 在给出其稳定性结果之前, 本文先引入如下引理^[15]:

引理 1 对给定的适当维矩阵 Θ_1, Θ_2 和 Θ_3 , 且 $\Theta_1^T = \Theta_1$, 则矩阵不等式

$$\Theta_1 + \Theta_2 F(k)\Theta_3 + \Theta_3^T F^T(k)\Theta_2^T < 0 \quad (23)$$

对所有的 $F^T(k)F(k) \leq I$ 成立当且仅当存在标量 $\beta > 0$ 使得如下矩阵不等式成立:

$$\Theta_1 + \beta\Theta_2\Theta_2^T + \beta^{-1}\Theta_3^T\Theta_3 < 0. \quad (24)$$

定理 1 若存在矩阵 $P > 0$ 和标量 $\beta > 0$ 使得如下矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} -X & X\Psi^T & X\Psi_2^T \\ * & -X + \beta\Psi_1\Psi_1^T & 0 \\ * & * & -\beta I \end{bmatrix} < 0, \quad (25)$$

则闭环系统网络化预测控制系统(22)稳定.

证 由Lyapunov定理可知, 若存在矩阵 $P > 0$, 使得如下矩阵不等式成立:

$$(\Psi + \Delta\Psi)^T P (\Psi + \Delta\Psi) - P < 0, \quad (26)$$

其中:

$$\Delta\Psi = \Psi_1 F(k)\Psi_2,$$

$$\Psi_1 = [E^T \ E^T \ 0_{n \times n(\bar{\tau}_m-1)}]^T,$$

$$\Psi_2 = [G_1 - G_2K \ G_2K \ G_2K\Psi_{13}],$$

则闭环系统(22)稳定. 根据矩阵不等式(26)的形式可以将其写成如下形式:

$$\begin{bmatrix} -P & \Psi^T \\ * & -P^{-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \Psi_1 \end{bmatrix} F(k)[\Psi_2 \ 0] + \begin{bmatrix} \Psi_2^T \\ 0 \end{bmatrix} F^T(k)[0 \ \Psi_1^T] < 0. \quad (27)$$

由引理1可得式(27)成立当且仅当存在标量 $\beta > 0$ 使得矩阵不等式

$$\begin{bmatrix} -P & \Psi^T \\ * & -P^{-1} \end{bmatrix} + \beta \begin{bmatrix} 0 \\ \Psi_1 \end{bmatrix} [0 \ \Psi_1^T] + \beta^{-1} \begin{bmatrix} \Psi_2^T \\ 0 \end{bmatrix} [\Psi_2 \ 0] < 0 \quad (28)$$

成立. 根据Schur补定理, 再进行一些矩阵运算, 并令 $X = P^{-1}$ 可由式(28)得到式(25). 因此, 若存在矩阵 $P > 0$ 和标量 $\beta > 0$ 使得式(25)成立, 则由Lyapunov定理可知系统(22)稳定. 证毕.

在控制器和观测器增益矩阵 K 和 L 给定的情况下, 显然式(25)对于矩阵变量 X 和变量 β 为线性, 可用线性矩阵不等式技术求解. 因此, 其稳定性很容易判断.

当对象模型精确已知, 即 $\Delta A = 0, \Delta B = 0$ 时, 式

(20)和式(21)分别退化为

$$e(k+1) = (A - LC)e(k), \tag{29}$$

$$x(k+1) = (A - BK)x(k) + BK(e(k) + Y). \tag{30}$$

此时, 相应的闭环网络化预测控制系统为

$$\xi(k+1) = \begin{bmatrix} A - BK & BK & BK\Psi_{13} \\ 0 & A - LC & 0 \\ 0 & 0 & \Omega_{33} \end{bmatrix} \xi(k), \tag{31}$$

其中 $\Psi_{33} = \text{diag}\{A - LC, A - LC, \dots, A - LC\}$.

由闭环系统(31)的表达式可以看出其为上三角块矩阵, 因此它的特征根由对角线上的矩阵块决定, 即 $A - BK$ 和 $A - LC$ 的特征根. 这意味着, 只要设计矩阵 K 和 L 使得 $A - BK$ 和 $A - LC$ 的特征根在单位圆内, 则闭环系统网络化预测控制系统(31)稳定, 这与本地控制的稳定性条件相同. 该结果是文[6]中稳定性结果在多传输通道情况下的推广. 这样的结论使得网络化预测控制策略中观测器和控制器的设计可以参考本地控制, 从而得到了简化.

4 示例(Illustrative example)

考虑文[14]中的球杆系统, 其名义模型矩阵和不确定性结构矩阵如下所示:

$$\begin{cases} A = \begin{bmatrix} 1.139 & 1 & 0 & 0 \\ -0.185 & 0 & 0 & 0 \\ -0.002 & 0 & 1.811 & 1 \\ 0.02 & 0 & -0.811 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0.114 \\ 0.039 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \\ C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} a_1 & 0 \\ a_2 & 0 \\ a_3 & b_3 \\ a_4 & b_4 \end{bmatrix}, G_2 = \begin{bmatrix} d_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \\ G_1 = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_2 & 0 \end{bmatrix}, F(k) = \begin{bmatrix} \sin k & 0 \\ 0 & \sin k \end{bmatrix}. \end{cases} \tag{32}$$

可见该系统为单输入双输出, 即 $m = 2$, 其中输出 y_1 和 y_2 分别为电机的角度和小球的位置, 输入 u 为电机的输入电压. 假设输出 y_1 和 y_2 分别通过反馈通道1和2传输, 其时延大小分别为 $\rho_{b1} = 2$ 和 $\rho_{b2} = 5$, 前向通道的时延为 $\tau_f = 1$. 由于两个反馈通道时延不同, 因此根据符号表述可知

$$\bar{m} = 2, \tau_{b1} = 2, \tau_{b2} = 5, Q_1 = \{1\}, Q_2 = \{2\}.$$

首先设计本地控制器, 采用极点配置方法, 将系统名义模型的 $A - BK$ 和 $A - LC$ 的特征根分别配置在 $[0.2, 0.3, 0.6 + 0.7i, 0.6 - 0.7i]$ 和 $[0.1, 0.2, 0.3, 0.4]$, 得到状态反馈控制器 K 和状态观测器 L 分别为

$$K = [9.3083 \quad 4.8425 \quad 402.8952 \quad 333.8148],$$

$$L = \begin{bmatrix} 0.6495 & -0.1327 & -0.1023 & 0.0451 \\ -0.0986 & 0.0246 & 1.3005 & -0.7533 \end{bmatrix}^T. \tag{33}$$

对象和观测器的初始状态分别取 $[0.1 \ 0.2 \ 0.1 \ 0.2]^T$ 和 $[0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$. 可以看出式(32)中的不确定矩阵满足 $F^T(k)F(k) \leq I$, 取结构矩阵 E, G_1 和 G_2 中的参数为

$$a_1 = 1.139, a_2 = -0.185, a_3 = -0.002, a_4 = 0.02, \\ b_1 = 1.811, b_2 = -0.811, c_1 = c_2 = d_1 = 0.01,$$

即参数的不确定范围是1%. 仿真中, 对象模型中的取 $F(k) = I$.

接下来验证本文所提的针对多传输通道网络化控制系统所提分布式预测补偿方法的有效性. 首先, 对于不确定对象, 控制器和观测器如式(33)所示, 采用本文所提方法, 根据定理1可得闭环系统稳定. 为了便于比较, 分别采用和不采用分布式网络化预测控制方法, 得到如图2所示的小球的位置 y_2 的状态轨迹图, 可见采用本文所提方法对控制性能有所提高.

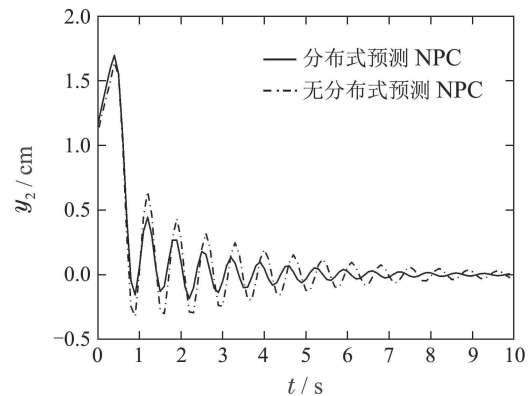


图2 采用和不采用分布式网络化预测控制方法的小球位置状态轨迹

Fig. 2 Trajectory of the position of the ball with and without distributed networked predictive control

其次考虑两个通道时延差与控制性能的关系. 定义 $g = \tau_{b2} - \tau_{b1}$, 取 $\tau_{b2} = 9$, τ_{b1} 分别为 9, 6 和 3, 即 g 分别为 0, 3 和 6 时, y_2 的状态轨迹图如图3所示.

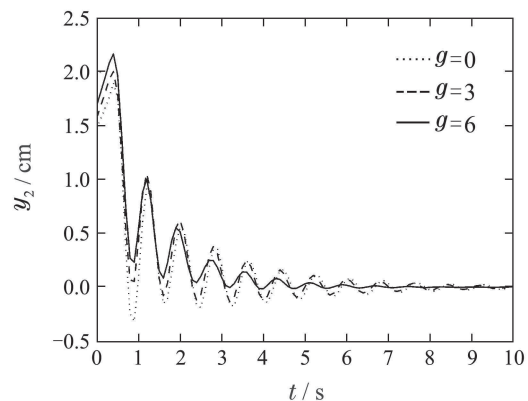


图3 时延差g不同小球位置状态轨迹

Fig. 3 Trajectory of the position of the ball with various delay difference g

最后考虑模型为精确时, 采用分布式网络化预测控制方法的控制性能. 由式(31)(33)可见闭环网络化预测控制系统稳定. 本地控制和采用本文对所提方法得到的状态轨迹如图4所示, 其中后者向左平移了 $\bar{\tau}_2 = 6$ 步, 可见本地控制的性能较好一些, 原因可从式(30)可以看出, 当观测器状态跟上对象状态 $\bar{\tau}_m$ 步后, 即 $e(k-t) = 0, t = 0, 1, \dots, \bar{\tau}_m-1$ 时, 可将闭环方程简化为 $x(k+1) = (A - BK)x(k)$, 这与 $e(k) = 0$ 时的本地控制闭环方程的相同. 记该时刻为 k_1 , 则 $k \geq k_1$ 后, 本地控制和采用分布式网络化预测控制的性能就只取决于 k_1 时刻的对象状态 $x(k_1)$ 和 $A - BK$.

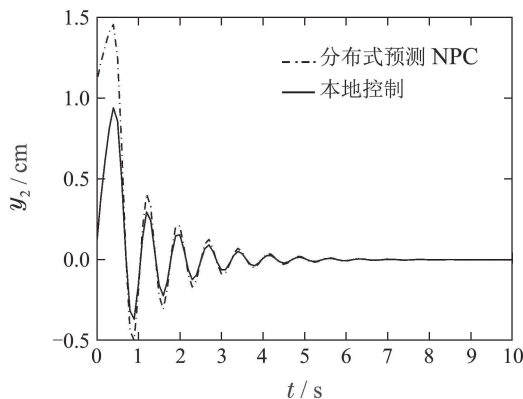


图4 本地控制与采用分布式网络化预测控制方法的小球位置状态轨迹

Fig. 4 Trajectory of the position of the ball with local control and with distributed networked predictive control

因此由图4可见两条曲线衰减振荡的幅度有点区别, 而趋势则完全相同.

5 总结(Conclusions)

本文针对具有多传输通道的不确定网络化控制系统, 提出了分布式网络化预测控制方法. 该方法的特点是利用对象的分布式输出进行预测控制, 从而更有效地利用了对象输出, 达到更好的控制性能. 分别得到了模型为不确定和确定时闭环网络化预测控制系统的稳定性条件. 最后, 采用球杆系统的算例验证本文所提方法的有效性.

参考文献(References):

- [1] ZHANG W, BRANICKY M S, PHILIPS S M. Stability of networked control systems [J]. *IEEE Control System Magazine*, 2001, 21(1): 84 – 99.
- [2] ZHANG L X, GAO H J, KAYNAK O. Network-induced constraints in networked control systems — a survey [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, 9(1): 403 – 416.

- [3] 严怀成, 苏阵阵, 张皓, 等. 具有时变时滞和多包丢失的网络控制系统量化 H_∞ 控制 [J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(4): 469 – 474. (YAN Huaicheng, SU Zhenzhen, ZHANG Hao, et al. Quantized H_∞ control for networked control systems with time-varying delay and multiple packet dropouts [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(4): 469 – 474.)
- [4] LIU G P, MU J X, REES D, et al. Design and stability of networked control systems with random communication time delay using the modified MPC [J]. *International Journal of Control*, 2006, 79(4): 288 – 297.
- [5] LIU G P, XIA Y, CHEN J, et al. Networked predictive control of systems with random network delays in both forward and feedback channels [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, 54(3): 1282 – 1297.
- [6] LIU G P. Predictive controller design of networked systems with communication delays and data loss [J]. *IEEE Transactions on Circuit and Systems, Part 2: Express Briefs*, 2010, 57(6): 481 – 485.
- [7] HU W S, LIU G P, REES D. Event-driven networked predictive control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, 54(3): 1603 – 1613.
- [8] PIN G, PARISINI T. Networked predictive control of uncertain constrained nonlinear systems: recursive feasibility and input-to-state stability analysis [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, 56(1): 72 – 87.
- [9] ONAT A, NASKALI T, PARLAKAY E, et al. Control over imperfect networks: model-based predictive networked control systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(3): 905 – 913.
- [10] ZHANG J H, XIA Y Q, SHI P. Design and stability analysis of networked predictive control systems [J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2013, 21(4): 1495 – 1501.
- [11] LIAN F L, MOYNE J R, TILBURY D M. Modeling and optimal controller design of networked control systems with multiple delays [J]. *International Journal of Control*, 2003, 76(6): 591 – 606.
- [12] LUCK R, RAY A. An observer-based compensator for distributed delays [J]. *Automatica*, 1990, 26(5): 903 – 908.
- [13] ZHAO Y B, KIM J, YANG G H, et al. Model-based compensation for multi-packet transmission in networked control systems [C] // *Proceedings of the 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*. Orlando: IEEE, 2011: 3136 – 3141.
- [14] SONG H B, LIU G P, YU L. Networked predictive control of uncertain systems with multiple feedback channels [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(11): 5228 – 5238.
- [15] XIE L. Output feedback H_∞ control of systems with parameter uncertainty [J]. *International Journal of Control*, 1996, 63(4): 741 – 750.

作者简介:

宋洪波 (1984–), 男, 副教授, 目前研究方向为网络化控制系统和预测控制等, Email: di7ganshb@163.com;

刘国平 (1962–), 男, 教授, 目前研究方向为网络化控制系统、非线性系统的辨识与控制、工业系统的先进控制和多目标优化与控制等, E-mail: guoping.liu@southwales.ac.uk.