

文章编号: 1001-0920(2009)07-1050-05

具有传感器故障的网络控制系统保性能可靠控制

朱灵波^{1,2}, 戴冠中¹, 康 军¹, LIN-SHI Xuefang²

(1. 西北工业大学 自动化学院, 西安 710072; 2. 法国国立里昂应用科学学院 安培实验室, 维尔巴纳 69621)

摘要: 基于存在时延和丢包的传输网络环境, 针对具有参数不确定性的网络化控制系统, 研究了其在传感器故障条件下的保性能可靠控制问题. 根据 Lyapunov 稳定性理论和线性矩阵不等式(LMIs)方法, 推导出使闭环网络控制系统在传感器故障条件下渐近稳定且保证综合性能指标满足要求的充分条件, 并利用 LMIs 提出了保性能可靠控制率的设计方法. 该控制算法在提高网络化控制系统可靠性的同时有利于系统综合性能的优化. 数值仿真验证了该方法的可行性和有效性.

关键词: 网络控制系统; 可靠控制; 保性能控制; 线性矩阵不等式

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Guaranteed cost fault-tolerant control of networked control systems with sensor failure

ZHU Ling-bo^{1,2}, DAI Guan-zhong¹, KANG Jun¹, LIN-SHI Xuefang²

(1. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Laboratory Ampere, INSA de Lyon, Villeurbanne 69621, France. Correspondent: ZHU Ling-bo, E-mail: zhulingbo.insa@gmail.com)

Abstract: Based on the network transmission with network-induced delay and packet dropout, guaranteed cost fault-tolerant control for closed-loop networked control systems(NCSs) with sensor failure is studied, aiming at the NCSs with the uncertainty of the parameters matrix, based on Lyapunov stability theory and linear matrix inequalities(LMIs), the sufficient conditions of guaranteed cost control with certain upper bound and fault-tolerant control for the NCS with sensor failure are deduced. The corresponding design method of guaranteed cost fault-tolerant controller is presented by using LMIs. The proposed control algorithm, which improves the reliability of the system, is propitious to optimize the integrative capability of the system. Numerical simulation demonstrates the effectiveness and feasibility of the proposed method.

Key words: Networked control system; Fault-tolerant control; Guaranteed cost control; Linear matrix inequality

1 引言

网络控制系统(NCS)是指通过计算机网络实现闭环控制的系统^[1,2]. 网络控制系统设备繁多、结构复杂、规模庞大,且对安全性、可靠性要求很高. 然而网络控制系统中不仅存在网络诱导延迟与丢包、乱序等事件,还存在执行器或传感器故障,这些因素对系统的动、稳态性能会造成消极影响,甚至导致系统失稳. 因此,近年来网络控制系统的可靠控制已经成为控制领域中的一个新的热点. 文献[3]讨论了具有丢包和延迟的网络控制系统容错控制问题. [4]讨论了具有可变延迟和传感器故障网络控制系统的可靠控制问题. [5]基于 Lyapunov 稳定性定理提出了一

种网络控制系统的可靠控制算法. [6]通过将网络控制系统看作多输入多输出系统,把网络控制系统建模成具有时变传感器故障的系统,根据可靠控制和混合系统理论得到了渐近稳定的充分条件. [7]研究了具有执行器和传感器故障的网络控制系统的可靠控制问题,并得到了其渐近稳定的充分条件. 然而,进行控制系统设计时,在保证系统稳定的基础上,总期望系统能够达到一定的性能指标要求,因此系统的保性能控制研究具有重要的意义. [8-10]研究了具有随机网络诱导时延的网络控制系统的保性能控制问题,并分别得到了在各文献条件下保性能控制器存在的充分条件. [11,12]针对网络时滞、不同步、

收稿日期: 2008-08-06; 修回日期: 2008-12-11.

基金项目: 留学基金委资助项目(2006[3074]); 法国埃菲尔奖学金项目(625637F).

作者简介: 朱灵波(1980—),男,浙江湖州人,中法联合培养博士生,从事网络化控制、嵌入式人工智能的研究;戴冠中(1937—),男,上海人,教授,博士生导师,从事自动控制、信息安全的研究.

丢包等现象,基于 LMI 方法研究了网络化控制系统的 H_∞ 鲁棒控制问题,通过求解线性矩阵不等式得到状态反馈矩阵.[13]研究了不确定网络化控制系统的鲁棒容错控制,采用 Lyapunov 方法给出传感器或执行器失效时系统鲁棒容错控制的充分条件.然而,上述研究均未涉及同时含有延迟和丢包的神经网络控制系统保性能可靠的控制问题.

本文研究了具有传感器故障的一类 NCS 模型保性能可靠控制问题.通过 Lyapunov 稳定性理论,得到了该 NCS 模型下的保性能可靠控制渐近稳定的充分条件.数值仿真表明了该方法的可行性和有效性.

2 NCS 模型

假设 NCS 中的传感器是时钟驱动,控制器和执行器是事件驱动,数据传输均为单包传输,则具有参数不确定性的 NCS 系统模型可描述如下^[14]:

$$\dot{x}(t) = \bar{A}x(t) + \bar{B}u(t) = (A + \Delta A)x(t) + (B + \Delta B)u(t). \quad (1)$$

式中: $x(t) \in \mathbb{R}^n$ 为系统状态向量; $u(t) \in \mathbb{R}^m$ 为系统控制输入; $A \in \mathbb{R}^{n \times n}, B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 为已知实常数阵;

$\Delta A, \Delta B$ 为参数不确定连续矩阵且满足范数有界条件,即

$$\|[\Delta A, \Delta B]\| = HF(t)[E_1, E_2]. \quad (2)$$

这里 $F^T(t)F(t) = I; H, E_1, E_2$ 均为适当维数的实常数矩阵.考虑控制器形式为状态反馈模型,即 $u(t) = Fx(t)$.若考虑传感器可能出现故障,可引入故障模型

$$u(t) = KMx(t). \quad (3)$$

其中: $M = \text{diag}(m_1, m_2, \dots, m_n)$ 为传感器故障矩阵,当 $m_i = 0$ 时,表示第 i 个传感器完全失效;当 $m_i = 1$ 时,表示第 i 个传感器正常工作.当第 i 个传感器部分失效时, m_i 为传感器的输出与输入的比值, $m_i > 0, m_i \leq 1$.

为了分析方便,引入如下矩阵:

$$M_u = \text{diag}(m_{u1}, m_{u2}, \dots, m_{un}), m_{ui} \leq 1;$$

$$M_l = \text{diag}(m_{l1}, m_{l2}, \dots, m_{ln}), m_{li} \geq 0;$$

$$M_0 = \text{diag}(m_{01}, m_{02}, \dots, m_{0p}),$$

$$m_{0i} = (m_{ui} + m_{li})/2;$$

$$= \text{diag}(m_{01}, m_{02}, \dots, m_{0p}),$$

$$l_i = (m_{ui} - m_{li})/(m_{ui} + m_{li});$$

$$L = \text{diag}(l_1, l_2, \dots, l_p), l_i = (m_i - m_{0i})/m_{0i};$$

$$i = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

由定义可得

$$M = M_0(I + L),$$

$$\|L\| \leq 1, \text{ 且 } M_l \leq M \leq M_u. \quad (5)$$

文献[9]针对上述模型定义了 NCS 最大容许综合界,即在系统渐近稳定的条件下,若存在一个常数 \max 满足以下不等式:

$$(i_{k+1} - i_k)h + \tau_{k+1} \leq \max, \quad (6)$$

则 \max 为该 NCS 的最大容许综合界.其中: h 为系统的采样周期, $i_k (k = 1, 2, 3, \dots)$ 是一些整数且 $\{i_1, i_2, i_3, \dots\} \subseteq \{0, 1, 2, \dots\}$, τ_{k+1} 是 $i_{k+1}h$ 周期的闭环网络延迟.

式(6)中,当 $i_{k+1} = i_k + 1$ 时,表示数据传输过程中没有发生丢包;当 $i_{k+1} > i_k + 1$ 时,表示发生了丢包现象,连续丢包个数为 $|i_{k+1} - i_k| - 1$;当 $i_{k+1} < i_k$ 时,表示数据包出现错序.如果在网络当中引入错序后主动丢弃数据包机制,则可保证 $i_{k+1} \geq i_k + 1$,丢包个数为 $i_{k+1} - i_k - 1$.显然, \max 综合了网络闭环延迟、连续丢包个数及采样周期等因素.

假设 W 为网络的最大连续丢包个数, τ 为网络的闭环延迟上界,则系统的实际综合界为

$$\max = (W + 1)h + \tau. \quad (7)$$

因 W 为该网络的丢包个数上界,故有

$$(i_{k+1} - i_k)h + \tau_{k+1} \leq \max.$$

在式(1)表示的 NCS 渐近稳定的条件下,如果存在常数 \max 满足下述不等式:

$$\max \leq \tau, \quad (8)$$

则称 \max 为该 NCS 的最大容许综合界.

3 NCS 的保性能可靠控制

设 NCS 中的全部状态可测,其余假设同式(1),则考虑传感器故障的 NCS 系统模型如下:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \bar{A}x(t) + \bar{B}KMx(i_k h) = \\ &(A + \Delta A)x(t) + (B + \Delta B)KMx(i_k h), \\ x(t) &= (t, t_0 -)x(t_0 -) \triangleq (t), \\ &t \in [t_0 - , t_0]. \end{aligned} \quad (9)$$

其中: $(t, t_0 -)$ 是 $(t, t_0 -) = (A + \Delta A)(t, t_0 -)$, $t \in [t_0 - , t_0]$ 的解; $\Delta A, \Delta B$ 如式(2)所示.

对闭环系统(9),定义系统性能指标如下:

$$\begin{aligned} J &= \int_{t_0}^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)]dt = \\ &\int_{t_0}^{\infty} x^T(t)Qx(t)dt + \\ &\sum_{k=1}^{\infty} \int_{i_k h}^{i_{k+1} h} x^T(i_k h)(KM)^T R KMx(i_k h)dt, \end{aligned} \quad (10)$$

其中 Q 和 R 为给定的正定对称加权矩阵.

定义 1 对于系统(9),在给定 $\gamma > 0$ 及 M_0 的情况下,存在控制率 $u(t) = Kx(t)$ 在性能指标 J 下渐近稳定(J 具有确定上界),则称控制率 $u(t) = Kx(t)$ 是系统(9)在综合界 \max 下的保性能可靠控制

率.

引理 1^[15] 对任意矩阵 $Z_b, Y_b \in R^n$, 正定矩阵 $X_b \in R^{n \times n}$, 有

$$- 2 Z_b^T Y_b + Z_b^T X_b Z_b + Y_b^T X_b^{-1} Y_b.$$

引理 2^[16] 对于适当维数的矩阵 D_c, E_c, F_c , 其中 $F_c = \text{diag}(F_{c1}, F_{c2}, \dots, F_{cr})$, 即 F_c 可拆分为 r 个矩阵, 且 $F_{ci}^T F_{ci} = I, i = 1, 2, \dots, r$, 则对任意 $\mu = \text{diag}(\mu_1 I, \mu_2 I, \dots, \mu_r I) > 0, \mu_i (i = 1, \dots, r)$ 为一个标量, 有

$$D_c F_c E_c + E_c^T F_c^T D_c^T + D_c + D_c^T + E_c^T \mu^{-1} E_c.$$

引理 3^[17] 令 $Y_d = Y_d^T, H_d, F_d, E_d$ 是具有适当维数的矩阵, 则 $Y_d + H_d F_d E_d + E_d^T F_d^T H_d^T < 0 (F_d^T F_d < 0)$ 成立的充要条件是存在标量 $\mu > 0$ 使得

$$Y_d + \mu H_d H_d^T + \mu^{-1} E_d^T E_d < 0.$$

定理 1 对于给定的 M_0 及标量 $\mu_i (i = 2, 3), r > 0$. 如果存在 $\mu > 0$, 且具有适合维数的对称正定矩阵 $X, Y, \bar{N}_i (i = 1, 2, 3)$ 满足

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \tilde{\mu}_{11} & * \\ \tilde{\mu}_{21} & \tilde{\mu}_{22} \end{bmatrix} < 0, \\ (\mu_{k+1} - \mu_k) h + \mu_{k+1}, k = 1, 2, \dots, n; \end{cases} \quad (11)$$

$$\tilde{\mu}_{11} = \begin{bmatrix} \mu_{11} & * & * & * & * \\ \mu_{21} & \mu_{22} & * & * & * \\ \mu_{31} & \mu_{32} & \mu_{33} & * & * \\ \bar{N}_1^T & \bar{N}_2^T & \bar{N}_3^T & - \tilde{S} & * \\ B^T & \mu_2 B^T & \mu_3 B^T & 0 & - \tilde{R}_0^{-1} \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\mu}_{21} = \begin{bmatrix} 0 & Y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y & 0 & 0 & 0 \\ X^T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ E_1 X^T & E_2 Y & 0 & 0 & E_2 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\mu}_{22} = \text{diag}\{-\tilde{R}_0, -R^{-1}, -Q^{-1}, -I\},$$

$$\mu_{11} = \bar{N}_1 + \bar{N}_1^T + A X^T + X A^T + H H^T,$$

$$\mu_{21} = \bar{N}_2 - \bar{N}_1^T + \mu_1 A X^T + Y^T B^T + \mu_2 H H^T,$$

$$\mu_{31} = \bar{N}_3 + \mu_3 A X^T - X + \tilde{P}^T + \mu_3 H H^T,$$

$$\mu_{22} = -\bar{N}_2 - \bar{N}_2^T + \mu_2 B Y + \mu_2 Y^T B^T + \mu_2^2 H H^T,$$

$$\mu_{32} = -\bar{N}_3 - \mu_2 X + \mu_3 B Y + \mu_2 \mu_3 H H^T,$$

$$\mu_{33} = -\mu_3 X - \mu_3 X^T + \tilde{S} + \mu_3^2 H H^T,$$

$$J = \Phi^T(t_0) X^{-1} \tilde{P} X^{-T} \Phi(t_0) +$$

$$\int_{t_0}^{t_0+s} \int_s^{t_0} \Phi^T(v) X^{-1} \tilde{S} X^{-T} \Phi(v) dv ds.$$

则称控制率 $K = Y M_0 X^{-1}$ 是具有传感器故障系统 (9) 的保性能可靠控制率. 其中: $\tilde{P} > 0, \tilde{S} > 0, \tilde{R}_0 > 0$ 并具有适合的维数; * 表示由对称性得到的矩阵块.

证明 构造 Lyapunov-Krasovskii 泛函如下:

$$V(t) = x^T(t) P x(t) + \int_{t-s}^t \int_s^t x^T(v) S \dot{x}(v) dv ds,$$

$$P > 0, S > 0.$$

在区间 $t \in [i_k h + \mu_k, i_{k+1} h + \mu_{k+1})$ 上对 $V(t)$ 求导, 并利用式 (9) 及牛顿-莱布尼兹公式可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & 2 x^T(t) P \dot{x}(t) + 2 [x^T(t) N_1 + x^T(i_k h) N_2 + \\ & \dot{x}(t) N_3] [x(t) - x(i_k h) - \int_{i_k h}^t \dot{x}(s) ds] + \\ & 2 [x^T(t) U_1 + x^T(i_k h) U_2 + \dot{x}(t) U_3] \cdot \\ & [\bar{A} x(t) + \bar{B} M K x(i_k h) - \dot{x}(t)] + \\ & \dot{x}^T(t) S \dot{x}(t) - \int_{t-s}^t \dot{x}^T(s) S \dot{x}(s) ds, \end{aligned} \quad (12)$$

其中 N_i 和 $U_i (i = 1, 2, 3)$ 是具有相应维数的自由阵. 由于 $(i_{k+1} - i_k) h + \mu_{k+1} - \mu_k, k = 1, 2, \dots, n$, 当 $t \in [i_k h + \mu_k, i_{k+1} h + \mu_{k+1})$ 时, 有

$$- \int_{t-s}^t \dot{x}^T(s) S \dot{x}(s) ds - \int_{i_k h}^t \dot{x}^T(s) S \dot{x}(s) ds. \quad (13)$$

应用引理 2 可得

$$\begin{aligned} & - 2 [x^T(t) N_1 + x^T(i_k h) N_2 + \\ & \dot{x}^T(t) N_3] \int_{i_k h}^t \dot{x}(s) ds \\ & + x^T(t) N S^{-1} N^T(t) + \int_{i_k h}^t \dot{x}^T(s) S \dot{x}(s) ds. \end{aligned} \quad (14)$$

其中

$$\begin{aligned} N^T(t) &= [x^T(t), x^T(i_k h), \dot{x}^T(t)], \\ N^T &= [N_1^T, N_2^T, N_3^T]. \end{aligned}$$

则由式 (12) ~ (14) 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) & \leq \begin{bmatrix} \mu_{11} & * & * \\ \mu_{21} & \mu_{22} & * \\ \mu_{31} & \mu_{32} & \mu_{33} \end{bmatrix} (t) - \\ & x^T(t) Q x(t) - x^T(i_k h) (K M)^T R K M x(i_k h); \end{aligned} \quad (15)$$

$$\mu_{11} = N_1 + N_1^T + U_1 \bar{A} + \bar{A}^T U_1^T + Q,$$

$$\mu_{21} = N_2 - N_1^T + U_2 \bar{A} + (K M)^T \bar{B}^T U_1^T,$$

$$\mu_{31} = -N_2 - N_2^T + U_2 \bar{B} K M +$$

$$(K M)^T \bar{B}^T U_2^T + (K M)^T R K M,$$

$$\mu_{32} = N_3 + U_3 \bar{A} - U_1^T + P^T,$$

$$\mu_{33} = -N_3 - U_2^T + U_3 \bar{B} K M,$$

$$\mu_{33} = -U_3 - U_3^T + S,$$

其中 $\bar{N}^T = [N_1^T, N_2^T, N_3^T, 0]$. 而

$$\bar{N}^T = \tilde{\mu} + \begin{bmatrix} L^T & L \end{bmatrix};$$

$$\tilde{\mu} = \begin{bmatrix} \tilde{\mu}_{11} & * & * & * & * \\ \tilde{\mu}_{21} & \tilde{\mu}_{22} & * & * & * \\ \tilde{\mu}_{31} & \tilde{\mu}_{32} & \tilde{\mu}_{33} & * & * \\ N_1^T & N_2^T & N_3^T & - S & * \\ 0 & K M & 0 & 0 & - R^{-1} \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\mu}_{11} = N_1 + N_1^T + U_1 \bar{A} + \bar{A}^T U_1^T + Q,$$

$$\begin{aligned} \tilde{2}_1 &= N_2 - N_1^T + U_2 \bar{A} + (KM_0)^T \bar{B}^T U_1^T, \\ \tilde{2}_2 &= -N_2 - N_2^T + U_2 \bar{B} KM_0 + (KM_0)^T \bar{B}^T U_2^T, \\ \tilde{3}_1 &= N_3 + U_3 \bar{A} - U_1^T + P^T, \\ \tilde{3}_2 &= -N_3 - U_2^T + U_3 \bar{B} KM_0, \\ \tilde{3}_3 &= -U_3 - U_3^T + S, \\ &= [0 \quad KM_0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0], \\ \bar{1} &= [\bar{B}^T U_1^T \quad \bar{B}^T U_2^T \quad \bar{B}^T U_3^T \quad 0 \quad 0], \\ - &\tilde{+} \quad R_0 \quad \bar{1}^T \quad + \quad \bar{1}^T R_0^{-1} \end{aligned}$$

令 $\tilde{+} \quad R_0 \quad \bar{1}^T \quad + \quad \bar{1}^T R_0^{-1}$ ，经整理后得

$$= \begin{bmatrix} 11 & * & * & * & * \\ 21 & 22 & * & * & * \\ 31 & 32 & 33 & * & * \\ N_1^T & N_2^T & N_3^T & -S & * \\ \bar{B}^T U_1^T & \bar{B}^T U_2^T & \bar{B}^T U_3^T & 0 & -R_0^{-1} \end{bmatrix};$$

$$\begin{aligned} 11 &= N_1 + N_1^T + U_1 \bar{A} + \bar{A}^T U_1^T + Q, \\ 21 &= N_2 - N_1^T + U_2 \bar{A} + (KM_0)^T \bar{B}^T U_1^T, \\ 22 &= -N_2 - N_2^T + U_2 \bar{B} M_0 K + (KM_0)^T \bar{B}^T U_2^T + \\ &\quad (KM_0)^T R KM_0 + (KM_0)^T R_0^{-1} {}^2 KM_0, \\ 31 &= N_3 + U_3 \bar{A} - U_1^T + P^T, \\ 32 &= -N_3 - U_2^T + U_3 \bar{B} KM_0, \\ 33 &= -U_3 - U_3^T + S, \\ < 0 &\Leftrightarrow \tilde{+} \quad \bar{1}^T F \quad e \quad + \quad \bar{1}^T F^T \quad a < 0, \\ a &= [H^T U_1^T \quad H^T U_2^T \quad H^T U_3^T \quad 0 \quad 0], \\ e &= [E_1 \quad E_2 \quad KM_0 \quad 0 \quad 0 \quad E_2], \\ U_1 &= U, \quad U_2 = \mu_2 U, \quad U_3 = \mu_3 U, \quad X = U^{-1}, \\ Y &= KM_0 X^T, \quad \tilde{P} = X P X^T, \quad \bar{N}_i = X N_i X^T, \\ \bar{U}_i &= X U_i X^T, \quad S = X S X^T, \quad \tilde{R}_0 = X R_0 X^T. \end{aligned} \quad (16)$$

对式(16)两边分别左乘,右乘 $\text{diag}\{X, X, X, X, X, X, X, X\}$ 及其转置可得式(11).

如果式(11)成立,则闭环系统(10)是渐近稳定的.结合式(11)与式(15),当 $t \in [i_k h + \tau_k, i_{k+1} h + \tau_{k+1})$ 时,可得

$$x^T(t) Q x(t) + x^T(i_k h) (KM)^T S K M x(i_k h) < \dot{V}(t). \quad (17)$$

再由 $\int_{k=1}^{i_{k+1} h + \tau_{k+1}} [i_k h + \tau_k, i_{k+1} h + \tau_{k+1})$, 可得

$$J = \int_{t_0} x^T(s) Q x(s) ds + \int_{k=1}^{i_{k+1} h + \tau_{k+1}} x^T(i_k h) (KM)^T R K M x(i_k h) ds < V(t_0). \quad (18)$$

定理得证.

式(12)是一个线性矩阵不等式,可使用 Matlab 的 LMI 工具箱求解.在定理 1 中,参数 μ_2, μ_3 决定了

和 K . 根据文献[18]中的搜索算法,容易获得网络控制系统的最大容许综合界.

4 数值仿真

为了验证本文的方法,做了数值仿真.参数不确定的系统模型为

$$\dot{x}(t) = (A + \Delta A) x(t) + (B + \Delta B) u(t). \quad (19)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} -1.5 & 2 \\ -4 & -3 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 4 & 1 \end{bmatrix}, \\ \Delta A = 0.01, \quad \Delta B = 0.01.$$

其余参数为

$$H = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}, \quad E_a = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}, \\ E_b = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}, \quad F(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

式(10)中的保性能指标为

$$Q = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}, \quad S = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}.$$

为了说明本文方法,选择 $M = M_u = M_l =$ 下界,通常情形 $M = (M_l, M_u)$ 以及 $M = M_l = M_u =$ 上界 3 种情况分别加以讨论,如表 1 所示.系统的初始状态为 $[2.4417; 0]$.

表 1 系统情形参数表

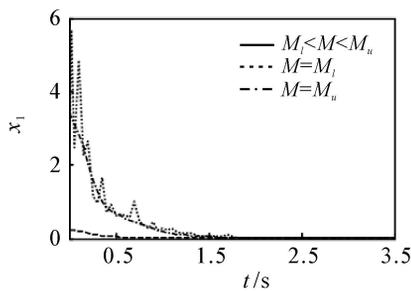
组数	M_l	M_u
下界	$[0.1 \ 0; 0 \ 0.1]$	$[0.1 \ 0; 0 \ 0.1]$
通常情形	$[0.1 \ 0; 0 \ 0.1]$	$[1.4 \ 0; 0 \ 1.5]$
上界	$[1.4 \ 0; 0 \ 1.5]$	$[1.4 \ 0; 0 \ 1.5]$

使用 Matlab LMI 工具箱的 feasp 求解器可求得具有传感器故障系统(9)的保性能可靠控制器如表 2 所示.

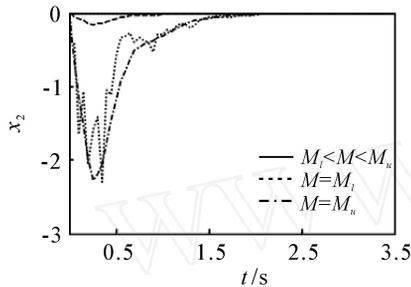
表 2 在各种情况下的系统保性能可靠控制器参数

组数	μ_2/μ_3	K	\bar{J}
下界	0.1112 5.63/0.89	$\begin{bmatrix} -5.4600 & -7.7409 \\ 1.1967 & -1.8963 \end{bmatrix}$	0.3686
通常情形	0.1112 5.63/0.89	$\begin{bmatrix} -0.7207 & -0.9703 \\ 0.01615 & -0.2363 \end{bmatrix}$	0.3686
上界	0.1112 5.63/0.89	$\begin{bmatrix} -0.3858 & -0.5176 \\ 0.0866 & -0.1259 \end{bmatrix}$	0.3686

仿真的实际时间为 15 s,但为了更清晰地表示 4 组数据的动态曲线,在此只截取了前 3.5 s.由图 1 可看出,加入故障举证的上界和下界时,系统的响应较为平稳,而加入通常情形的传感器故障后,系统的初始状态响应均出现了较大的抖动,但在本文方法的控制率下系统仍然渐近稳定且满足保性能条件.



(a) 未加故障的系统状态响应



(b) 加入故障举证的系统状态响应

图1 系统初始状态响应曲线

5 结论

本文研究了具有传感器故障的一类带有参数不确定的网络控制系统的保性能可靠控制问题. 在描述参数不确定性时引入自由矩阵, 同时以最大容许综合界表述 NCS 对网络延迟和丢包的容忍度, 建立了具有传感器故障的 NCS 模型. 利用 Lyapunov 稳定性理论和 LMI 方法推导出该模型下保性能可靠控制的渐近稳定的充分条件, 并通过求解线性矩阵不等式组方便地得到保性能可靠控制的控制率. 数值仿真的结果验证了该方法的可行性和有效性.

参考文献(References)

- [1] Lius A, PanosAntsaklis. Stability of model-based networked control systems with time-varying transmission times [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2004, 49(9): 1562-1572.
- [2] Yoo Ho-jun, Ryu Hee-seob, Yoo Kyung-sang, et al. Compensation of networked control systems using LMI-Based delay-dependent optimization method [J]. Science, 2002, 16(8): 364-369.
- [3] Huang H, Han X D, Ji X P. Fault-tolerant control of networked control system with packet dropout and transmission delays [C]. Networking, Sensing and Control. Sanya, 2008: 325-329.
- [4] Ren J, Li C W, Zhao D Z. Fault-tolerant control of networked control system with time-varying transmission times [C]. Proc of Sixth Int Conf on Machine Learning Cybernetics. Hong Kong, 2007: 545-549.
- [5] Zheng Y, Fang H J. Robust fault tolerant control of networked control system with time-varying delays [J].

- J of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(8): 804-807.
- [6] Fan W H, Cai H, Chen Q W, et al. Fault-tolerant control of MIMO networked control systems [J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(5): 879-882.
- [7] Li W, Li Y J, Liu W R. Robust fault tolerant control of networked control system based on LMI method [J]. J of Air Force Engineering University, 2007, 8(4): 27-31.
- [8] Wang Y F, Wang C H, Xu H. Guaranteed cost control with random communication delays via jump linear system approach [C]. Proc of the Int Conf Control, Automation, Robotics and Vision. Piscataway: IEEE, 2004: 298-303.
- [9] Li S B, Wang Z, Sun Y X. Guaranteed cost control of networked control systems: An LMI approach [C]. Proc of the First Int Conf on Embedded Software and Systems. Berlin: Springer-Verlag, 2005: 130-136.
- [10] 马卫国, 邵诚. 网络化系统的状态反馈保性能控制 [J]. 信息与控制, 2007, 36(3): 340-344.
(Ma W G, Shao C. State feedback guaranteed cost control of networked systems [J]. Information and Control, 2007, 36(3): 340-344.)
- [10] 姜培刚, 姜偕富, 李春文, 等. 基于 LMI 方法的网络化控制系统的 H_∞ 鲁棒控制方法 [J]. 控制与决策, 2004, 19(1): 17-21.
(Jiang P G, Jiang J F, Li C W, et al. Robust H_∞ control for the networked control systems based on LMI [J]. Control and Decision, 2004, 19(1): 17-21.)
- [12] Yue D, Han Q L, Lam James. Networked-based robust H_∞ control of systems with uncertainty [J]. IEEE Trans on Automatica, 2005, 41(1): 999-1007.
- [13] 郑英, 方华京. 不确定网络化控制系统的鲁棒容错控制 [J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(8): 804-807.
(Zhen Y, Fang H J. Robust fault tolerant control of networked control system with time-varying delays [J]. J of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(8): 804-807.)
- [14] 岳东, 彭晨. 网络控制系统得分析与综合 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 37-39.
(Yue D, Peng C. Analysis and integration of networked control systems [M]. Beijing: Science Press, 2007: 37-39.)
- [15] 贾新春, 郑南宁, 张元林. 线性不确定时滞系统的可靠保性能鲁棒控制 [J]. 自动化学报, 2003, 29(6): 971-975.
(Jia X C, Zheng N N, Zhang Y L. Reliable guaranteed cost robust control for linear uncertain time-delay systems [J]. Acta Automatica Sinica, 2003, 29(6): 971-975.)

(下转第 1058 页)

缓冲算子的作用,分别得到一阶缓冲序列如下:

$$XD_3 = (635.15, 681.82, 732.80, 808.57, 883.36, 957),$$

$$XD_4 = (548.94, 615.39, 677.06, 786.46, 876.62, 957).$$

通过计算得到平均相对误差和一步预测误差的比较结果,如表1所示.

表1 弱化前后模型的平均相对误差和一步预测精度比较

模型	弱化缓冲算子	平均相对误差 / %	一步预测误差 / %
1	无	5.732	11.947
2	XD_3	0.478	3.259
3	XD_4	1.268	0.162

由表1可以看出,对原始序列经过缓冲算子 D_4 作用后,一步预测精度最低,其预测模型为

$$\hat{x}(2001+t) = 5173.731 \times e^{0.112535t} - 4624.7955.$$

2007年上海市互联网用户数的预测值为1081.747万户,与实际值基本吻合.

5 结 论

在缓冲算子的构造过程中,以前都是单独构造.本文首次将缓冲算子的构造与函数联系起来,一次构造一大类缓冲算子.为解决扰动数据序列的建模提供了多种选择,开辟了如何利用函数来构造缓冲算子的新方向.

参考文献(References)

- [1] 刘思峰. 冲击扰动系统预测陷阱与缓冲算子[J]. 华中理工大学学报, 1997, 25(1): 25-27.
(Liu S F. The trap in the prediction of a shock disturbed system and the buffer operator [J]. J of Huazhong University of Science and Technology, 1997, 25(1): 25-27.)
- [2] 党耀国, 刘思峰, 米传民. 强化缓冲算子性质的研究[J]. 控制与决策, 2007, 22(7): 730-734.
(Dang Y G, Liu S F, Mi C M. Study on characteristics of the strengthening buffer operators [J]. Control and Decision, 2007, 22(7): 730-734.)
- [3] 关叶青, 刘思峰. 基于不动点的强化缓冲算子序列及其

应用[J]. 控制与决策, 2007, 22(10): 1189-1192.

(Guan Y Q, Liu S F. Sequence of strengthening buffer operator and it's application based on fixed point [J]. Control and Decision, 2007, 22(10): 1189-1192.)

- [4] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
(Deng J L. Grey theoretical foundation [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002.)
- [5] 党耀国, 刘思峰, 刘斌, 等. 关于弱化缓冲算子的研究[J]. 中国管理科学, 2004, 12(2): 108-111.
(Dang Y G, Liu S F, Liu B, et al. Study on the weakening buffer operators and researches [J]. Chinese J of Management Science, 2004, 12(2): 108-111.)
- [6] 党耀国, 刘斌, 关叶青. 关于强化缓冲算子的研究[J]. 控制与决策, 2005, 20(12): 1332-1336.
(Dang Y G, Liu B, Guan Y Q. Study on the strengthening buffer operators [J]. Control and Decision, 2007, 20(12): 1332-1336.)
- [7] Liu S F. The three axioms of buffer operator and their application [J]. The J of Grey System, 1991, 3(1): 39-48.
- [8] 刘思峰, 党耀国, 方志耕. 灰色系统理论及其应用[M]. 第3版. 北京: 科学出版社, 2004.
(Liu S F, Dang Y G, Fang Z G. Grey system theory and its application [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2004.)
- [9] 刘思峰. 缓冲算子及其应用[J]. 灰色系统理论与实践, 1992, 2(1): 45-50.
(Liu S F. Buffer operator and it's application [J]. Theories and Practices of Grey System, 1992, 2(1): 45-50.)
- [10] Liu S F, Lin Y. An introduction to grey systems: Foundations, methodology and applications [M]. Slippery Rock: IIGSS Academic Publisher. 1998.
- [11] 上海统计局. 上海统计年鉴[M]. 上海: 上海统计出版社, 2008.
(The Shanghai Statistics Bureau. Shanghai statistics yearbook [M]. Shanghai: Shanghai Statistics Publishing House, 2008.)

(上接第1054页)

- [16] Lee Y S, Moon Y S, Kwon W H, et al. Delay-dependent robust H control for uncertain systems with a state-delay [J]. Automatica, 2004, 40: 65-72.
- [17] Mahmoud M S. Robust H control of discrete systems with uncertain parameters and unknown delays [J].

IEEE Trans on Automatica, 2000, 36(4): 627-635.

- [18] Peng C, Yue D. Maximum allowable equivalent delay bound of networked control systems [C]. Proc of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Dalian, 2006: 4547-4550.