

文章编号: 1001-0920(2010)04-0598-07

基于T-S模糊模型的非线性网络化 控制系统的 H_∞ 鲁棒容错控制

李 炜, 蒋栋年

(兰州理工大学 电信学院, 兰州 730050)

摘 要: 针对一类具有参数不确定的非线性网络化控制系统, 同时考虑网络延时和丢包的影响, 基于T-S模糊模型建模, 通过构造Lyapunov-Krasovskii泛函, 推证出了确保非线性网络化控制系统在执行器或传感器发生失效故障时具有 H_∞ 鲁棒完整性的时滞依赖充分条件, 并以求解线性或非线性矩阵不等式的方式给出了控制器的设计方法. 最后, 仿真算例验证了所提方法的可行性和有效性.

关键词: 网络化控制系统; T-S模糊模型; 时滞依赖; 容错控制

中图分类号: TP302.8

文献标识码: A

Robust H_∞ fault-tolerant control for nonlinear networked control system based on Takagi-Sugeno fuzzy model

LI Wei, JIANG Dong-nian

(School of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China.

Correspondent: JIANG Dong-nian, E-mail: dreamjdn@126.com)

Abstract: For a class of nonlinear networked control system (NCS) with parameter uncertainties, considering both network-induced delay and packet dropout in transmission, based on a T-S fuzzy model, and by using Lyapunov-Krasovskii functional, the delay-dependent sufficient condition of robust H_∞ integrity for NCS with failures of actuator and sensor is analyzed. And the robust H_∞ fault-tolerant controller gain can be obtained by solving several linear or nonlinear matrix inequalities. Finally, a simulation example illustrates the effectiveness and the feasibility of the proposed approach.

Key words: Networked control system; T-S fuzzy model; Delay-dependent; Fault-tolerant control

1 引 言

网络化控制系统(NCS)是通过一个实时网络构成的闭环控制系统. 与传统意义上点对点连接的控制系统相比, NCS具有连线少, 成本低, 资源共享, 便于系统安装、维护、扩展和故障诊断等优点^[1,2]. 然而, 由于网络的引入也衍生出诸如数据传输时延、丢包、异步采样、多包传输、时序错乱以及网络调度等新问题^[3]. 此外, NCS不仅规模更加庞大、结构复杂, 而且不确定因素众多, 一旦发生故障, 损失将难以估量. 因此, 使NCS具有容错能力已成为现代网络化控制系统的本征性能所求^[4]. 近年来, NCS的容错研究也越来越受到广泛的关注^[5-7]. 文献[5]针对具有马尔可夫特性时延的NCS, 建立具有时变时延的准T-S模糊模型, 给出了传感器或执行器失效故障时具有鲁棒

完整性的充分条件和容错控制器设计方法; [6]将一类具有时延小于一个采样周期, 并存在丢包的NCS建模为异步动态系统, 研究了传感器或执行器失效时的鲁棒完整性问题; [7]针对一类具有时变时延且有界的不确定NCS, 基于容错控制思想和Lyapunov时延依赖稳定理论, 给出了系统对执行器失效具有完整性的充分条件和控制器的设计方法. 但目前对于NCS的容错控制研究大都基于线性受控对象.

由于T-S模糊模型具有对非线性模型良好的逼近效果, 可通过对T-S线性子系统的设计满足一定性能的控制, 然后在PDC设计框架下构建全局模型, 从而实现以线性系统解决非线性系统控制问题的目标, 使基于T-S模糊模型的控制方法成为解决某些非线性控制问题强有力的工具^[8,9]. 文献[8, 9]基于非线性网

收稿日期: 2009-05-14; 修回日期: 2009-09-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60964003); 甘肃省自然科学基金项目(096RJZA101); 兰州理工大学特色学术梯队基金项目(0950).

作者简介: 李炜(1963—), 女, 西安人, 教授, 从事工业过程先进控制、动态系统的故障诊断与容错控制等研究; 蒋栋年(1984—), 男, 甘肃金昌人, 硕士生, 从事故障诊断与容错控制的研究.

络化控制系统, 采用T-S模糊模型进行建模, 分别讨论了非线性NCS同时存在丢包和时延的保性能控制和 H_∞ 控制问题, 但均未涉及到系统中的元件故障。

本文针对一类具有参数不确定的非线性网络化控制系统, 同时考虑网络延时和丢包的影响, 基于T-S模糊模型建模, 在传感器或执行器发生失效故障情形下, 采用时滞依赖的方法, 通过构造Lyapunov-Krasovskii泛函和引入松弛矩阵变量, 得到了保守性较小的NCS H_∞ 鲁棒完整性设计准则. 并以求解线性或非线性矩阵不等式的方式, 给出了容错控制器参数的设计方法. 本文还进一步研究了系统具有 H_∞ 鲁棒完整性条件下, 数据最大允许传输间隔和扰动抑制率的优化方法。

2 问题描述

假设非线性NCS受控对象可由如下T-S模糊模型描述:

R^i : if $\theta_1(t)$ is N_{i1} and \dots $\theta_g(t)$ is N_{ig} , then

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= (A_i + \Delta A_i)x(t) + (B_i + \Delta B_i)u(t) + B_{1i}w(t), \\ z(t) &= C_i x(t) + D_i u(t), \quad i = 1, 2, \dots, r. \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $x(t) \in R^n$ 为状态向量; $u(t) \in R^m$ 为控制向量; $w(t) \in L_2$ 为不确定外部扰动; $z(t) \in R^{n_z}$ 为对象输出; A_i, B_i, B_{1i}, C_i 和 $D_i (i = 1, 2, \dots, r)$ 为具有适当维数的常数矩阵; r 为模糊规则数; $N_{is} (s = 1, 2, \dots, g)$ 为模糊集; $\theta_1(t), \theta_2(t), \dots, \theta_g(t)$ 为模糊规则的前件变量; $\Delta A_i, \Delta B_i$ 为范数有界的时变参数不确定性矩阵, 且满足

$$[\Delta A_i, \Delta B_i] = D \Delta(t) [E_{ai}, E_{bi}]. \quad (2)$$

这里: D, E_{ai}, E_{bi} 为已知常实矩阵; $\Delta(t)$ 为未知时变实值连续矩阵函数, 其元素Lebague可测, 且满足 $\Delta^T(t)\Delta(t) \leq I$.

通过使用单点模糊产生器、乘积推理以及中心平均模糊消除器, 上述的模糊逻辑控制系统可写为

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^r h_i(\theta(t)) [(A_i + \Delta A_i)x(t) + \\ &\quad (B_i + \Delta B_i)u(t) + B_{1i}w(t)], \\ z(t) &= \sum_{i=1}^r h_i(\theta(t)) [C_i x(t) + D_i u(t)]. \end{aligned} \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} h_i(\theta(t)) &= \mu_i(\theta(t)) / \sum_{i=1}^r \mu_i(\theta(t)), \\ \mu_i(\theta(t)) &= \prod_{s=1}^g M_{is}(\theta_s(t)), \end{aligned}$$

这里 $M_{is}(\theta_s(t))$ 为前件变量 $\theta_s(t)$ 对应于模糊值 M_{is} 的隶属度. 假定 $\mu_i(\theta(t)) \geq 0, \sum_{i=1}^r \mu_i(\theta(t)) \geq 0$, 可得

$$h_i(\theta(t)) \geq 0, \sum_{i=1}^r h_i(\theta(t)) = 1 \quad (i = 1, 2, \dots, r).$$

对NCS作如下假设: 传感器节点为时间驱动, 控制器和执行器节点由事件驱动, 数据均采用单包传输, 且无时序错乱。

对于同时考虑丢包和时延的NCS, 根据文献[8-10], 假定两个采样数据包分别在 $t_k + \tau_k$ 和 $t_{k+q} + \tau_{k+q}$ 时刻到达控制器. $q = 1$ 时, 在传输间隔 $[t_k, t_{k+1} + \tau_{k+1}]$ 内没有数据包丢失; $q > 1$ 时, $q - 1$ 个数据包在传输间隔 $[t_k, t_{k+q} + \tau_{k+q}]$ 内丢失, 如图1所示。

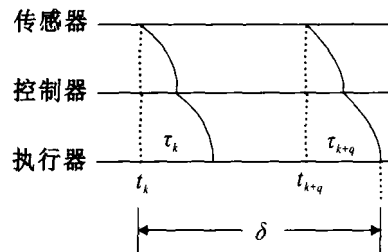


图1 NCS控制信号时序图

在反馈控制系统中, 采样数据在一个采样周期内传输对控制系统的稳定是很重要的; 然而在工程中, 在系统稳定的前提下, 数据包允许在一个有界的时间范围内传输. 因此, 这里引入最大允许传输间隔 $\delta > 0$, 即是确保系统在稳定条件下数据包传输的时间间隔上界。

如果数据包在 t_k 时刻开始传输, 控制信号将在时刻 $t_k + \tau_k$ 到达受控对象, 则下一个控制信号在 $t_{k+q} + \tau_{k+q}$ 到达受控对象. 如果两个数据包成功传输的最大允许传输间隔是 δ , 则有 $t_{k+q} - t_k + \tau_{k+q} \leq \delta$. 其中: $k = 0, 1, \dots; q = 1, 2, \dots, q_{max}$, q 和 q_{max} 为正整数, 分别表示采样数和 δ 内的最大采样数。

假设系统的所有状态均可以测量, 设计如下状态反馈控制器:

R^i : if $\theta_1(t)$ is N_{i1} and \dots $\theta_g(t)$ is N_{ig} , then

$$u(t) = K_i x(t_k),$$

$$i = 1, 2, \dots, r, t \in [t_k + \tau_k, t_{k+q} + \tau_{k+q}].$$

应用并行分布补偿技术(PDC)可得

$$u(t) = \sum_{i=1}^r h_i(\theta_k(t)) K_i x(t_k),$$

$$t \in [t_k + \tau_k, t_{k+q} + \tau_{k+q}]. \quad (4)$$

其中: $K_i (i = 1, 2, \dots, r)$ 为各模糊子系统的控制器增益; t_k 为采样时刻; $x(t_k)$ 为 t_k 时刻的状态向量, 通过零阶保持器, 因此为分段常数函数。

为证明方便起见, 定义: $x(t) = x, x(t_k) = x_k, h_i(\theta(t)) = h_i, h_i(\theta_k(t)) = h_i^k, z(t) = z, w(t) = w, *$ 代表对称矩阵的对称块. 则闭环非线性NCS可以表示为

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i h_j^k [(A_i + \Delta A_i)x + \\ &\quad (B_i + \Delta B_i)K_j x_k + B_{1i}w], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &M_i(l = 1, 2, 3, 4), \text{ 根据Newton-Leibniz公式可得} \\
 &2[x^T N_1 + x_k^T N_2 + \dot{x}^T N_3] \times \\
 &\left[x - x_k - \int_{t_k}^t \dot{x}(s) ds \right] = 0, \quad (12) \\
 &2\left[x^T M_1 + x_k^T M_2 + \dot{x}^T M_3 + \int_{t_k}^t x(s) ds M_4 \right] \times \\
 &\left[\dot{x} + \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i h_j^k (-(A_i + \Delta A_i)x - (B_i + \right. \\
 &\left. \Delta B_i) LK_j x_k - B_{1i} w) \right] = 0. \quad (13)
 \end{aligned}$$

沿着系统(9)对 $V(t)$ 求导, 并结合式(11)~(13), 引理1和引理2, 可得

$$\begin{aligned}
 \dot{V}(t) &= 2x^T P \dot{x} + \delta \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} Q_1 & Q_2 \\ Q_2^T & Q_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} - \\
 &\int_{t-\delta}^t \begin{bmatrix} x(s) \\ \dot{x}(s) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} Q_1 & Q_2 \\ Q_2^T & Q_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(s) \\ \dot{x}(s) \end{bmatrix} ds + \\
 &2[x^T N_1 + x_k^T N_2 + \dot{x}^T N_3] \left[x - x_k - \int_{t_k}^t \dot{x}(s) ds \right] + 2\left[x^T M_1 + x_k^T M_2 + \dot{x}^T M_3 + \int_{t_k}^t x(s) ds M_4 \right] \left[\dot{x} + \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i h_j^k (-(A_i + \Delta A_i)x - (B_i + \Delta B_i) LK_j x_k - B_{1i} w) \right] + \\
 &\delta \alpha^T(t) \tilde{N} \tilde{Q}^{-1} \tilde{N}^T \alpha(t) - \int_{t-\delta}^t \alpha^T(t) \tilde{N} \tilde{Q}^{-1} \tilde{N}^T \alpha(t) ds + \\
 &z^T z - \gamma^2 w^T w - z^T z + \gamma^2 w^T w < \\
 &\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i h_j^k [\alpha^T(t) (\tilde{\Xi}_0 + \delta \tilde{N} \tilde{Q}^{-1} \tilde{N}^T) \alpha(t) - \\
 &\int_{t_k}^t [\alpha^T(t) \tilde{N} + \beta^T(s) \tilde{Q}] \tilde{Q}^{-1} [\alpha^T(t) \tilde{N} + \\
 &\beta^T(s) \tilde{Q}]^T ds] - z^T z + \gamma^2 w^T w.
 \end{aligned}$$

其中

$$\alpha^T(t) = [x^T, x_k^T, \dot{x}^T, w^T], \beta^T(s) = [x^T(s), \dot{x}^T(s)],$$

$$\tilde{\Xi}_0 = \begin{bmatrix} \Xi_{11} + C_i^T C_i & \Xi_{12} + C_i^T D_i K_j & \Xi_{13} & \Xi_{14} \\ * & \Xi_{22} + (D_i K_j)^T D_i K_j & \Xi_{23} & \Xi_{24} \\ * & * & \Xi_{33} & \Xi_{34} \\ * & * & * & \Xi_{44} \end{bmatrix},$$

$$\tilde{N} = \begin{bmatrix} (A_i + \Delta A_i)^T M_4^T & N_1 \\ K_j^T L^T (B_i + \Delta B_i)^T M_4^T & N_2 \\ -M_4^T & N_3 \\ B_{1i}^T M_4^T & 0 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{Q} = \begin{bmatrix} Q_1 & Q_2 \\ Q_2^T & Q_3 \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned}
 \Xi_{11} &= \delta Q_1 + N_1 + N_1^T - M_1(A_i + \Delta A_i) - \\
 &(A_i + \Delta A_i)^T M_1^T,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Xi_{12} &= -N_1 + N_2^T - M_1(B_i + \Delta B_i) LK_j + \\
 &(A_i + \Delta A_i)^T M_2^T, \\
 \Xi_{13} &= P + \delta Q_2 + N_3^T + M_1 - (A_i + \Delta A_i)^T M_3^T, \\
 \Xi_{14} &= -M_1 B_{1i}, \\
 \Xi_{22} &= -N_2 - N_2^T - M_2(B_i + \Delta B_i) LK_j - \\
 &K_j^T L^T (B_i + \Delta B_i)^T M_2^T, \\
 \Xi_{23} &= M_2 - N_3^T - K_j^T L^T (B_i + \Delta B_i)^T M_3^T, \\
 \Xi_{24} &= -M_2 B_{1i}, \Xi_{33} = \delta Q_3 + M_3 + M_3^T, \\
 \Xi_{34} &= -M_3 B_{1i}, \Xi_{44} = -\gamma^2 I.
 \end{aligned}$$

由前述证明过程可知, 若

$$\tilde{\Xi}_0 + \delta \tilde{N} \tilde{Q}^{-1} \tilde{N}^T < 0 \quad (14)$$

成立, 则有 $\dot{V}(t) < -z^T z + \gamma^2 w^T w$.

应用Schur补定理, 式(14)等价于

$$\begin{aligned}
 \Xi^{(ij)} &= \begin{bmatrix} \Xi_{11} & \Xi_{12} & \Xi_{13} & \Xi_{14} \\ * & \Xi_{22} & \Xi_{23} & \Xi_{24} \\ * & * & \Xi_{33} & \Xi_{34} \\ * & * & * & \Xi_{44} \\ * & * & * & * \\ * & * & * & * \\ * & * & * & * \end{bmatrix} \rightarrow \\
 &\begin{bmatrix} \delta(A_i + \Delta A_i)^T M_4^T & \delta N_1 & C_i^T \\ \delta K_j^T L^T (B_i + \Delta B_i)^T M_4^T & \delta N_2 & K_j^T D_i^T \\ -\delta M_4^T & \delta N_3 & 0 \\ \delta B_{1i}^T M_4^T & 0 & 0 \\ -\delta Q_1 & -\delta Q_2 & 0 \\ * & -\delta Q_3 & 0 \\ * & * & -I \end{bmatrix} < 0. \quad (15)
 \end{aligned}$$

若用 $\Xi_0^{(ij)}$ 表示不含不确定性的 $\Xi^{(ij)}$, 则有 $\Xi^{(ij)} = \Xi_0^{(ij)} + \Delta \Xi^{(ij)}$. 其中

$$\begin{aligned}
 \Delta \Xi^{(ij)} &= \tilde{M}^T [\Delta A_i \ \Delta B_i LK_j \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] + \\
 &[\Delta A_i \ \Delta B_i LK_j \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \tilde{M}, \\
 \tilde{M} &= [-M_1^T \ -M_2^T \ -M_3^T \ 0 \ \delta M_4^T \ 0 \ 0].
 \end{aligned}$$

由此可得

$$\Xi_0^{(ij)} + \Phi^T \Delta(t) H + H^T \Delta^T(t) \Phi < 0. \quad (16)$$

其中

$$\begin{aligned}
 \Phi &= \\
 &[-D^T M_1^T \ -D^T M_2^T \ -D^T M_3^T \ 0 \ \delta D^T M_4^T \ 0 \ 0], \\
 H &= [E_{ai} \ E_{bi} LK_j \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0].
 \end{aligned}$$

根据引理3可得

$$\Xi_0^{(ij)} + \varepsilon_{ij}^{-1} \Phi^T \Phi + \varepsilon_{ij} H^T H < 0. \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \Psi_{13} &= P + \delta Q_2 + N_3^T + \varepsilon_1 Y - \varepsilon_3 Y^T A_i^T, \\ \Psi_{14} &= -\varepsilon_1 B_{1i}, \\ \Psi_{22} &= \\ & - N_2 - N_2^T - \varepsilon_2 B_i K_j F M^{-T} - \varepsilon_2 M^{-1} F^T K_j^T B_i^T, \\ \Psi_{23} &= \varepsilon_2 Y - N_3^T - \varepsilon_3 M^{-1} F^T K_j^T B_i^T, \\ \Psi_{24} &= -\varepsilon_2 B_{1i}, \Psi_{33} = \delta Q_3 + \varepsilon_3 Y + \varepsilon_3 Y^T, \\ \Psi_{34} &= -\varepsilon_3 B_{1i}, \Psi_{44} = -\gamma^2 I. \end{aligned}$$

则存在状态反馈控制律(4)使不确定NCFS(22)渐近稳定, 且扰动抑制率为 γ , 也即对传感器失效故障系统具有 H_∞ 鲁棒完整性. 控制器增益矩阵可通过 $K_j = X_j Y^{-1}$ 求得.

注3 定理2中所得到的条件不是严格的LMI条件, 使得式(23)成为非凸问题, 因此不能直接采用LMI的方法求解. 将式(23)的求解转化为对下述非线性最小化问题的求解:

$$\begin{aligned} & \min_{\delta}(\gamma), \\ & \text{s.t. 式(23), } \delta > 0, P > 0, Q_1 > 0, Q_2 > 0; \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} & \min_{\gamma}(1/\delta), \\ & \text{s.t. 式(23), } \gamma > 0, P > 0, Q_1 > 0, Q_2 > 0. \end{aligned} \quad (25)$$

求解该非线性优化问题的步骤如下:

Step1: 选取 $M^{-1} = \lambda I$, 其中 $\lambda > 0$ 为充分大的常量, 设 $s = 1$.

Step2: 使用Step1中选取的 M^{-1} 求解优化问题(24), (25).

Step3: 令 $M^{-1} = Y^T$, 重新求解优化问题(24), (25), $s = s + 1$.

Step4: 判断条件: 若 $|\delta_s - \delta_{s-1}| < \xi$, 或 $|\gamma_s - \gamma_{s-1}| < \xi$, 其中 ξ 为预先选定的充分小量, 则停止; 否则, 返回Step2.

4 仿真研究

考虑文献[13]的非线性系统模型, 选用模糊隶属度函数为 $M_1(x_2) = \sin^2 x_2$ 和 $M_2(x_2) = \cos^2 x_2$.

假设 $w(t) = 0.2 \cos(2\pi t) \exp(-t)$. 则有

R^1 : if x_2 is about M_1 , then

$$\dot{x} = (A_1 + \Delta A_1)x + (B_1 + \Delta B_1)u + B_{11}w;$$

R^2 : if x_2 is about M_2 , then

$$\dot{x} = (A_2 + \Delta A_2)x + (B_2 + \Delta B_2)u + B_{12}w.$$

其中

$$\begin{aligned} A_1 &= \begin{bmatrix} -3 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, & A_2 &= \begin{bmatrix} -2 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \\ B_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -0.5 \end{bmatrix}, & B_2 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}, \quad C_2 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix},$$

$$D_1 = D_2 = I, \quad B_{11} = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B_{12} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

矩阵 $\Delta A_i, \Delta B_i (i = 1, 2)$ 满足条件2), 且

$$D = \begin{bmatrix} 0.31 & 0.1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \Delta(t) = \begin{bmatrix} \sin t & 0 \\ 0 & \cos t \end{bmatrix},$$

$$E_{ai} = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad E_{bi} = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2.$$

针对执行器正常和各种失效故障情形, 其中: $L_0 = \text{diag}(1, 1)$, $L_1 = \text{diag}(0, 1)$ 及 $L_2 = \text{diag}(1, 0)$ 分别表示执行器正常、执行器1和2发生完全失效故障. 根据定理1, 取 $\varepsilon_1 = 0.2, \varepsilon_2 = 1, \varepsilon_3 = 1.05, \varepsilon_4 = 0.025$.

当设定 $\gamma = 0.9$ 时, 通过优化可得 $\delta_{\max} = 1.4390$, 即当存在执行器故障和外界扰动时, 若限定扰动抑制率 γ 为0.9, 则系统稳定的最大允许传输间隔为1.4390s; 当 $\delta > \delta_{\max}$ 时, 系统不具有 H_∞ 鲁棒完整性. 在某一实际网络系统中, 若 $\delta = 0.2$ s, 并假设采样周期 $h = 0.05$ s, $\tau_k \in [0, 0.045]$ s, 丢包个数最多为3, 则经优化可得 $\gamma_{\min} = 0.6324$. 此时通过求解LMIs(10)可得

$$K_1 = \begin{bmatrix} -18.8624 & -48.3655 \\ -15.2660 & -39.0000 \end{bmatrix},$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} -10.6121 & -27.3019 \\ -10.3896 & -26.5560 \end{bmatrix}.$$

设系统的初始条件为 $x(0) = [2, 2]^T$, 在执行器正常和发生 L_1 和 L_2 故障情形下, 其状态 x_1, x_2 的零输入响应如图2和图3所示.

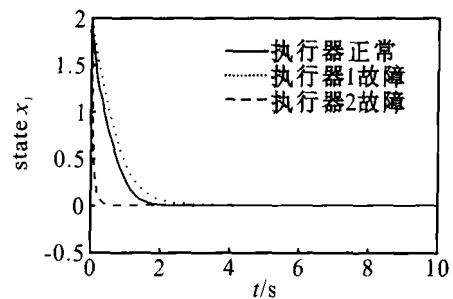


图2 闭环系统状态 x_1 的零输入响应曲线

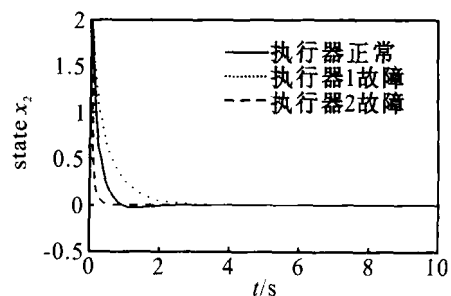


图3 闭环系统状态 x_2 的零输入响应曲线

针对传感器正常和各种失效故障情形, 其中: $F_0 = \text{diag}(1, 1)$, $F_1 = \text{diag}(0, 1)$ 及 $F_2 = \text{diag}(1, 0)$ 分别

表示传感器正常、传感器1和2发生完全失效故障。仍设定 $\gamma = 0.9$ 时, $\delta_{\max} = 1.4876$ 。若 $\delta = 0.2$ s, 根据定理2, 通过优化可得 $\gamma_{\min} = 0.5440$ 。此时求解式(23)可得

$$K_1 = \begin{bmatrix} -1.3915 & 0.7286 \\ -2.2003 & -0.4213 \end{bmatrix},$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} -2.4416 & 0.8584 \\ -1.0398 & -0.7256 \end{bmatrix}.$$

仍设系统的初始条件为 $x(0) = [2, 2]^T$, 在传感器正常和发生 F_1 和 F_2 故障情形下, 其状态 x_1, x_2 的零输入响应如图4, 图5所示。

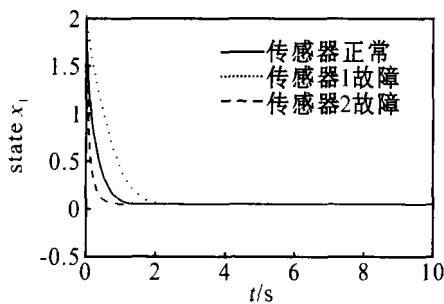


图4 闭环系统状态 x_1 的零输入响应曲线

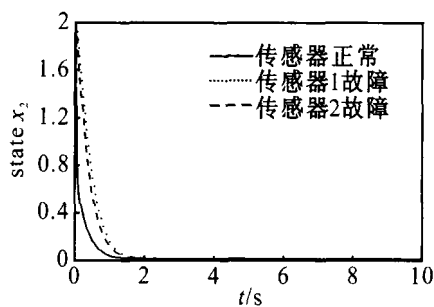


图5 闭环系统状态 x_2 的零输入响应曲线

由仿真结果可知, NCS在发生执行器或传感器失效故障时不仅能渐近稳定, 而且可有效抑制扰动, 表明本文方法对于具有参数不确定的非线性NCS在执行器或传感器发生失效故障时具有 H_∞ 鲁棒完整性。

5 结论

本文针对一类具有参数不确定的非线性网络化控制系统, 考虑未知外界扰动的影响和执行器或传感器失效故障, 研究了此类系统的 H_∞ 鲁棒容错控制问题。文中基于T-S模糊模型, 同时考虑网络时变时延和丢包的影响, 通过构造Lyapunov-Krasovskii泛函, 推证出了系统在执行器或传感器发生失效故障时, 非线性网络化控制系统具有 H_∞ 鲁棒完整性的时滞依赖充分条件, 并给出了鲁棒容错控制器的求解方法。进而讨论了容错设计中, 数据传输最大间隔与扰动抑制率的优化问题。由于证明中松弛变量的引入, 所得结果具有较小的保守性。最后, 仿真算例验证了本文方法的可行性和有效性。对于非线性网络化系统鲁棒容错控制的研究, 进一步减少时滞依赖设计准则的保守性和提高容错满意度将是下一步工作。

参考文献(References)

- [1] Zhang W, Branicky M, Phillips S. Stability of networked control systems[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(1): 84-99.
- [2] Walsh G C, Hong Ye, Bushnell L G. Stability analysis of networked control systems [J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2002, 10(3): 438-446.
- [3] 邱占芝, 张庆灵, 刘明. 有时延和数据包丢失的网络控制系统控制器设计[J]. 控制与决策, 2006, 21(6): 625-630.
(Qiu Z Z, Zhang Q L, Liu M. Controller design for networked control systems with time-delay and data packet dropout[J]. Control and Decision, 2006, 21(6): 625-630.)
- [4] Patton R J, Kambhampati C, Casavola A, et al. Fault-tolerance as a key requirement for the control of modern systems[J]. The Int Federation of Automatic Control, 2006, 6(1): 26-36.
- [5] 郑英, 王彦伟, 方华京. 基于T-S模型的网络化控制系统的鲁棒容错控制[J]. 华中科技大学学报, 2008, 36(3): 111-113.
(Zheng Y, Wang Y W, Fang H J. Takagi-Sugeno model-based robust fault-tolerant control of networked control system[J]. J of Huazhong University of Science and Technology, 2008, 36(3): 111-113.)
- [6] Huo Zhihong, Fang Huajing. Research on robust fault-tolerant control for networked control system with packet dropout[J]. J of Systems Engineering and Electronics, 2007, 18(1): 76-82.
- [7] 郭一楠, 张芹英, 巩敦卫, 等. 一类时变时延网络控制系统的鲁棒容错控制[J]. 控制与决策, 2008, 23(6): 689-692.
(Guo Y N, Zhang Q Y, Gong D W, et al. Robust fault-tolerant control of networked control systems with time-varying delays [J]. Control and Decision, 2008, 23(6): 689-692.)
- [8] Zhang Huaguang, Yang Dedong, Chai Tianyou. Guaranteed cost networked control for T-S fuzzy systems with time delays[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 2007, 37(2): 160-172.
- [9] Zhang Huaguang, Yang Jun, Su Chunyi. T-S fuzzy-model-based robust H_∞ design for networked control systems with uncertainties[J]. IEEE Trans on Industrial Informatics, 2007, 3(4): 289-301.
- [10] Yang Dedong, Zhang Huaguang. Robust H_∞ networked control for uncertain fuzzy systems with time-delay[J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(7): 726-730.
- [11] Guan X P, Chen C L. Delay-dependent guaranteed cost control for T-S fuzzy systems with time delays[J]. IEEE Trans on Fuzzy System, 2004, 12(2): 236-249.

(下转第609页)

- Papers, 2005, 52(8): 1620-1631.
- [2] Fei Yuan, Ajoy Opal. An efficient transient analysis algorithm for mildly nonlinear circuits[J]. IEEE Trans on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2002, 21(6): 662-673.
- [3] Wei Dong, Peng Li. Hierarchical harmonic-balance methods for frequency-domain analog-circuit analysis [J]. IEEE Trans on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2007, 26(12): 2089-2101.
- [4] Nick Soveiko, Michel S Nakhla. Steady-state analysis of multitone nonlinear circuits in wavelet domain[J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 2004, 52(3): 785-797.
- [5] Michal Tadeusiewicz, Stanislaw Halgas, Marek Korzybski. An algorithm for soft-fault diagnosis of linear and nonlinear circuits[J]. IEEE Trans on Circuits and System – I: Fundamental Theory and Applications, 2002, 49(11): 1648-1653.
- [6] Halgas S. Multiple soft fault diagnosis of nonlinear circuits using the fault dictionary approach [J]. Bulletin of The Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 2008, 56(1): 53-57.
- [7] 殷时蓉, 陈光禔, 谢永乐. Volterra核的测量及在非线性和模拟电路测试中的应用[J]. 控制与决策, 2006, 21(10): 1134-1137.
(Yin S R, Chen G J, Xie Y L. Volterra kernels measurement and its application in nonlinear analog circuits testing [J]. Control and Decision, 2006, 21(10): 1134-1137.)
- [8] 袁海英, 陈光禔, 谢永乐, 等. 基于非线性电路频域核估计和神经网络的故障诊断[J]. 控制与决策, 2007, 22(4): 473-476.
(Yuan H Y, Chen G J, Xie Y L, et al. Fault diagnosis based on neural network and frequency-domain kernel estimation of nonlinear circuit [J]. Control and Decision, 2007, 22(4): 473-476.)
- [9] Toczek W, Zielonko R, Adamczyk A. A method for fault diagnosis of nonlinear electronic circuits[J]. Measurement, 1998, 24(2): 79-86.
- [10] 马红光, 韩崇昭, 孔祥玉, 等. 基于Lyapunov指数的非线性模拟电路故障诊断方法[J]. 电路与系统学报, 2004, 9(4): 71-75.
(Ma H G, Han C Z, Kong X Y, et al. A fault diagnosis approach for nonlinear analog circuits based on Lyapunov exponents[J]. J of Circuits and Systems, 2004, 9(4): 71-75.)
- [11] Mao Xianbai, Wang Liheng, Li Changxi. SVM classifier for analog fault diagnosis using fractal features[C]. Proc of the 2nd Int Symposium on Intelligent Information Technology Application. Shanghai, 2008, 2: 553-557.
- [12] Bacry E, Mu Zzy J. Singularity spectrum of fractal signals [J]. J of Stat Physics, 1993, 70 (34): 635-674.
- [13] Mallat S. Singularity detection a processing with wavelets [J]. IEEE Trans on Information Theory, 1992, 38 (2): 617-643.
- [14] Jaffard S. Wavelet techniques in multifractal analysis[J]. Proc of Symposia Pure Mathematics, 2004, 72(2): 91-152
- [15] Jaffard S, Lashermes B, Abry P. Wavelet leaders in multifractal analysis[M]. Cambridge: Birkhauser, 2006: 219-264.
- [16] Ashvin B Chhabra, Charles Meneveau, Roderick V Jensen, et al. Direct determination of the singularity spectrum and its application to fully developed turbulence [J]. Physical Review A, 1989, 40(9): 5284-5294.
- [17] Kaminska B, Arabi K, Bell I, et al. Analog and mixed-signal benchmark circuits: First release[C]. Proc of Int Test Conf. Washington DC, 1997: 183-190.
- [18] Aminian F, Aminian M. Fault diagnosis of analog circuits using Bayesian neural networks with wavelet transform as preprocessor[J]. J of Electronic Testing: Theory and Applications, 2001, 17(1): 29-36.
- [19] 张维强, 徐晨, 宋国乡. 模拟电路故障诊断的小波包预处理神经网络改进算法[J]. 信号处理, 2007, 23(2): 204-209.
(Zhang W Q, Xu C, Song G X. Two improved neural network algorithms of fault diagnosis for analog circuit based on wavelet packet preprocessing[J]. Signal Processing, 2007, 23(2): 204-209.)

(上接第604页)

- [12] Mahmoud M S. Robust control of discrete systems with uncertain parameters and unknown delay[J]. IEEE Trans on Automatica, 2000, 36(4): 627-635.
- [13] Chen Bing, Liu Xiaoping, Lin Chong, et al. Robust H_∞ control of Takagi-Sugeno fuzzy systems with state and input delays[J]. Fuzzy Sets and System, 2008, 160(4): 403-422.