

# 具有多时滞的不确定广义 T-S 模糊网络控制系统 的时滞相关稳定性分析

马宝萍, 许 洁, 赵 瑾

(南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 主要针对多时滞的不确定广义 T-S 模糊网络控制系统进行了时滞相关稳定性分析, 给出一种改进型的时滞相关稳定性定理, 不采用模型变换和交叉项的边界技术, 可以得到时滞上界, 使系统对所有容许的不确定性是正则、无脉冲和渐近稳定的. 数值算例说明了结论的有效性.

[关键词] 模糊广义系统, 网络控制, 时滞相关, 线性矩阵不等式

[中图分类号] TP273 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2010)01-0012-05

## Delay-Dependent Robust Stability for Uncertain T-S Fuzzy Descriptor Networked Control System With Multiple Time Delays

Ma Baoping Xu Jie Zhao Jin

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

**Abstract** This paper deals with the problem of delay-dependent stability for T-S fuzzy descriptor networked control systems with multiple state time-delays. Without using model transformation and bounding technique for cross terms, an improved delay-dependent stability criterion is established in terms of strict linear matrix inequalities (LMIs), which ensures that the system is regular, impulse free and asymptotically stable for all admissible uncertainties. With the proposed criteria, we are able to obtain maximum allowable delay bound (MADB) of NCSs. Numerical example shows that the proposed criteria are effective.

**Key words** fuzzy descriptor system, networked control system, delay-dependent, linear matrix inequality (LMI)

通过网络形成的闭环反馈控制系统称为网络控制系统 (NCS)<sup>[1]</sup>. 由于 NCS 具有低成本、高可靠性、诊断和维护方便等特点, 近年来引起了广大学者的关注. 网络控制系统中存在的 3 个主要问题即网络诱导时延、数据丢包和带宽数据包大小的限制. 由于网络诱导时延能够显著地降低系统性能甚至导致系统的不稳定, 因此关于 NCS 的时滞分析也成为近年来的一个研究热点<sup>[1-7]</sup>.

众所周知, 由 Taniguchi<sup>[8]</sup>首次提出的 T-S 模糊模型是由一系列 If-Then 规则描述的非线性模型, 由于能够逼近任意非线性系统, 已被广泛采用. 另一方面, 广义系统能够描述更一般类型的系统, 如电路系统模型、非动态约束等等. 所以, 广义模糊系统的研究有着更重要的意义, 近年来这一课题引起了众多学者的关注. 针对时滞广义模糊系统, 文献 [9] 进行了稳定性分析和  $H_\infty$  控制设计, 文献 [10] 设计了优化的保成本控制器, 其中的时滞均假设为时变单时滞. 本文考虑以广义 T-S 模糊系统作为 NCS 中的被控对象, 并假设时滞为状态项中的定常多时滞, 目前关于这方面的研究还不多见.

时滞广义系统的稳定性定理主要包括时滞相关和时滞无关两类, 通常时滞相关定理的保守性比时滞无关的保守性更弱, 尤其是在时滞较小的情况下. 在工程实际中, 关于时滞上限的信息一般可以获取. 为得到时滞相关的稳定性条件, 目前常用的方法有: 模型变换技术<sup>[11-12]</sup>和交叉项的边界技术. 文献 [13] 提出了一种不采用模型变换技术和交叉项的边界技术的方法, 其优点是降低了保守性, 同时使需求解的 LMI 中

收稿日期: 2009-11-20  
基金项目: 江苏省普通高校自然科学基金计划 (07KJD510109).  
通讯联系人: 马宝萍, 讲师, 研究方向: 广义系统、网络控制. E-mail: mabaoping@njnu.edu.cn

的变量数大大减少. 在此基础上, 本文将该方法推广到多时滞的不确定广义 T-S 模糊网络控制系统中进行稳定性分析.

## 1 问题描述

NCS 中由网络引起的时滞包括两部分, 即由传感器到控制器的时滞  $\tau_{sc}$  和由控制器到执行器的时滞  $\tau_{ce}$ . 文献 [3] 对多输入多输出的网络控制系统中的时滞进行分析后, 将 NCS 中的时滞综合为状态项中的多时滞. 众所周知, 在建立模型时由于环境噪声、参数渐变等因素, 很难得到精确的数学模型. 因此, 本文考虑如式 (1) 所示的多时滞不确定广义 T-S 模糊网络控制系统, 其中第  $i$  条模糊规则的定义为:

规则  $i$  If  $x_1(t)$  is  $M_{i1}$  and  $x_2(t)$  is  $M_{i2}$ , Then

$$\begin{aligned} E\dot{x}(t) &= (A_i + \Delta A_i)x(t) + \sum_{k=1}^N (A_{dik} + \Delta A_{dik})x(t - \tau_k), \\ y(t) &= C_i x(t), \end{aligned}$$

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}, \quad t \in [-\tau, 0], \quad i = 1, 2, \dots, r. \quad (1)$$

其中,  $M_{ik}$ ,  $M_{ip}$  为模糊集合;  $r$  为规则数;  $x \in R^n$  为状态向量;  $y \in R^m$  为输出向量;  $x_1(t) \sim x_p(t)$  为前提变量, 并假设前提变量与控制向量  $u(t)$  不相关.  $\tau_k (k = 1, 2, \dots, N)$  为未知的定常时滞, 且  $0 < \tau_k < \tau$ , 为时滞上界.  $E \in R^{n \times n}$ , 且  $0 < \text{rank } E = q < n$ .  $A_i, A_{dik}, C_i$  为已知的适当维数的常数阵.  $\Delta A_i, \Delta A_{dik}$  为范数有界的不确定性, 形如:

$$\begin{bmatrix} \Delta A_i & \Delta A_{dik} \end{bmatrix} = D_i F_i \begin{bmatrix} M_i & N_{ik} \end{bmatrix}, \quad F_i^T F_i = I. \quad (2)$$

其中,  $D_i, M_i, N_{ik}$  为已知的实数阵,  $F_i$  为未知实数阵.

为分析方便, 首先忽略式 (1) 中的不确定项, 按照模糊规则的合成法, 将式 (1) 中的各子系统进行模糊混合后, 得到全局模型为:

$$\begin{aligned} E\dot{x}(t) &= A(t)x(t) + \sum_{k=1}^N A_{dk}(t)x(t - \tau_k), \\ y(t) &= C(t)x(t). \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{其中, } A(t) = \sum_{i=1}^r h_i(\tau(t))A_i, \quad A_{dk}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(\tau(t))A_{dik}, \quad C(t) = \sum_{i=1}^r h_i(\tau(t))C_i.$$

$$h_i(\tau(t)) = w_i(\tau(t)) / \sum_{i=1}^r w_i(\tau(t)), \quad w_i(\tau(t)) = \prod_{k=1}^p M_{ik}(\tau(t)), \quad M_{ik}(\tau(t)) \text{ 是变量 } \tau(t) \text{ 在 } M_{ik} \text{ 中的}$$

隶属度. 因此  $h_i(\tau(t))$  可看作每条规则的归一化权重, 且  $\sum_{i=1}^r h_i(\tau(t)) = 1$ .

接下来给出几个相关的定义和引理, 考虑如下的定常时滞广义系统.

$$E\dot{x}(t) = Ax(t) + \sum_{k=1}^N A_{dk}x(t - \tau_k). \quad (4)$$

定义 1<sup>[14]</sup> (1) 如果  $\det(sE - A) \neq 0$  矩阵对  $(E, A)$  是正则的.

(2) 如果  $\deg(\det(sE - A)) = \text{rank } E$ , 矩阵对  $(E, A)$  是无脉冲的.

定义 2<sup>[14]</sup> 给定  $\tau > 0$ , 对于满足  $0 < \tau_k < \tau$  的任意定常时滞  $\tau_k$ , 如果矩阵对  $(E, A)$  和  $(E, A_{dk})$  是正则、无脉冲的, 则广义系统 (4) 是正则、无脉冲的.

引理 1<sup>[14]</sup> 对给定对称矩阵  $P$ , 矩阵  $A$  和  $A_{dk}$ ,

$$P + A^T P + \sum_{k=1}^N A_{dk}^T P + P^{-1} A_{dk} A_{dk}^T < 0$$

对任何  $\tau$  满足  $\tau > 0$  都成立的充分必要条件是存在标量  $\gamma > 0$  使得:

$$P + A^T P + \sum_{k=1}^N A_{dk}^T P + P^{-1} A_{dk} A_{dk}^T < 0$$

不失一般性, 假设式 (3) 中的

$$E = \begin{bmatrix} I_q & 0 \\ 0 & \theta \end{bmatrix}, \quad A(t) = \begin{bmatrix} A_{11}(t) & A_{12}(t) \\ A_{21}(t) & A_{22}(t) \end{bmatrix}, \quad A_{dk}(t) = \begin{bmatrix} A_{dk}^{11}(t) & A_{dk}^{12}(t) \\ A_{dk}^{21}(t) & A_{dk}^{22}(t) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

及 
$$\boldsymbol{x}(t)=\begin{bmatrix}x_1(t)\\x_2(t)\end{bmatrix}.$$

其中  $\boldsymbol{A}_{11}\in\mathbb{R}^{q\times q}$ ,  $\boldsymbol{A}_{dk}^{11}\in\mathbb{R}^{q\times q}$  且  $\boldsymbol{x}_1\in\mathbb{R}^q$ . 为简便起见, 下文中分别用  $\boldsymbol{A}$ ,  $\boldsymbol{A}_{dk}$ ,  $\boldsymbol{C}$  代替式 (5) 中的  $\boldsymbol{A}(t)$ ,  $\boldsymbol{A}_{dk}(t)$ ,  $\boldsymbol{C}(t)$ .

2 主要结果

首先给出一个关于系统 (3) 的时滞相关稳定性定理.

定理 1 对任意给定的定常时滞  $\tau_k$  满足  $0<\tau_k<\tau$  ( $\tau$  为已知), 系统 (3) 是正则、无脉冲和渐近稳定的, 如果存在维数适当的矩阵:

$$\boldsymbol{P}=\begin{bmatrix}P_{11}&0\\P_{21}&P_{22}\end{bmatrix},\quad P_{11}>0,\quad Q_k>0,\quad \boldsymbol{Z}_k=\begin{bmatrix}Z_k^{11}&Z_k^{12}\\*&Z_k^{22}\end{bmatrix},\tag{6a}$$

$$\boldsymbol{Y}_k=\begin{bmatrix}Y_k^{11}&\bar{\boldsymbol{0}}\\Y_k^{21}&\boldsymbol{0}\end{bmatrix},\quad \boldsymbol{Y}_{k1}=\begin{bmatrix}Y_k^{11}\\Y_k^{21}\end{bmatrix},\quad \boldsymbol{W}_k=\begin{bmatrix}W_k^{11}&\bar{\boldsymbol{0}}\\W_k^{21}&\boldsymbol{0}\end{bmatrix},\quad \boldsymbol{W}_{k1}=\begin{bmatrix}W_k^{11}\\W_k^{21}\end{bmatrix},\tag{6b}$$

使下列 LM 成立

$$\boldsymbol{E}^T\boldsymbol{P}=\boldsymbol{P}^T\boldsymbol{E}=\boldsymbol{0},\tag{7}$$

$$\boldsymbol{P}^T\boldsymbol{A}+\boldsymbol{A}^T\boldsymbol{P}<\boldsymbol{0},\tag{8}$$

$$\boldsymbol{k}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{Y}_k+\boldsymbol{Y}_k^T+\boldsymbol{Q}_k+\boldsymbol{A}^T\boldsymbol{Z}_k\boldsymbol{A}-\boldsymbol{P}^T\boldsymbol{A}_{dk}-\boldsymbol{Y}_k+\boldsymbol{W}_k^T+\boldsymbol{A}^T\boldsymbol{Z}_k\boldsymbol{A}_d&-\boldsymbol{Y}_{k1}\\\ast&-\boldsymbol{Q}_k-\boldsymbol{W}_k-\boldsymbol{W}_k^T+\boldsymbol{A}_d^T\boldsymbol{Z}_k\boldsymbol{A}_d&-\boldsymbol{W}_{k1}\\\ast&\ast&-\boldsymbol{Z}_k^{11}\end{bmatrix}<\boldsymbol{0},\tag{9}$$

$k=1,2,\dots,N.$

其中,  $\boldsymbol{A}_d=\sum_{k=1}^N\boldsymbol{A}_{dk}$

证明 针对系统 (3) 构造 Lyapunov-Krasovskii 函数如下:

$$\boldsymbol{V}(\boldsymbol{x}_t)=\boldsymbol{V}_1(\boldsymbol{x}_t)+\boldsymbol{V}_2(\boldsymbol{x}_t)+\boldsymbol{V}_3(\boldsymbol{x}_t),$$

其中,  $\boldsymbol{V}_1(\boldsymbol{x}_t)=\boldsymbol{x}^T(t)\boldsymbol{E}^T\boldsymbol{P}\boldsymbol{x}(t)$ ,  $\boldsymbol{V}_2(\boldsymbol{x}_t)=\int_{t-\tau_k}^t\boldsymbol{x}^T(s)\boldsymbol{Q}_k\boldsymbol{x}(s)\mathrm{d}s,$

$$\boldsymbol{V}_3(\boldsymbol{x}_t)=\int_{t-\tau_k}^t\boldsymbol{x}^T(s)\boldsymbol{E}^T\boldsymbol{Z}_k\boldsymbol{E}\boldsymbol{x}(s)\mathrm{d}s,$$

其中,  $\boldsymbol{E}^T\boldsymbol{P}=\boldsymbol{P}^T\boldsymbol{E}=\boldsymbol{0}$ ,  $\boldsymbol{Z}_k, \boldsymbol{Q}_k$  为待定的对称正定矩阵.

沿系统 (3) 求取  $\boldsymbol{V}(\boldsymbol{x}_t)$  的导数, 可得:

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{V}}_1(\boldsymbol{x}_t)&=\dot{\boldsymbol{x}}^T(t)\boldsymbol{E}^T\boldsymbol{P}\boldsymbol{x}(t)+\boldsymbol{x}^T(t)\boldsymbol{E}^T\dot{\boldsymbol{P}}\boldsymbol{x}(t)=2\boldsymbol{x}^T(t)\boldsymbol{P}^T\boldsymbol{E}\dot{\boldsymbol{x}}(t)=\\&2\boldsymbol{x}^T(t)\boldsymbol{P}^T\left\{\begin{bmatrix}A_{11}+A_{11}^{11}\\A_{21}+A_{21}^{11}\end{bmatrix}\boldsymbol{x}_1(t)+\begin{bmatrix}A_{12}\\A_{22}\end{bmatrix}\boldsymbol{x}_2(t)-\boldsymbol{S}_1+\boldsymbol{S}_2\right\}=\\&2\boldsymbol{x}^T(t)\boldsymbol{P}^T\left\{\begin{bmatrix}A_{11}+A_{11}^{11}\\A_{21}+A_{21}^{11}\end{bmatrix}\boldsymbol{x}_1(t)+\begin{bmatrix}A_{12}\\A_{22}\end{bmatrix}\boldsymbol{x}_2(t)\right\}+2\boldsymbol{x}^T(t)(\boldsymbol{S}_3-\boldsymbol{P}^T\boldsymbol{S}_1)+2\boldsymbol{S}_4-\\&(\dot{2\boldsymbol{x}^T(t)\boldsymbol{S}_3}+2\boldsymbol{S}_4)+2\boldsymbol{x}^T(t)\boldsymbol{P}^T\boldsymbol{S}_2=\\&2\boldsymbol{x}^T(t)\boldsymbol{P}^T\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t)+\sum_{k=1}^N\int_{t-\tau_k}^t\{2\boldsymbol{x}^T(t)\boldsymbol{Y}_k\boldsymbol{x}(t)+2\boldsymbol{x}^T(t)(\boldsymbol{P}^T\boldsymbol{A}_{dk}-\boldsymbol{Y}_k+\boldsymbol{W}_k^T)\boldsymbol{x}(t-\tau_k)-\\&2\boldsymbol{x}^T(t-\tau_k)\boldsymbol{W}_k\boldsymbol{x}(t-\tau_k)-2\boldsymbol{x}^T(t)\boldsymbol{Y}_{k1}\boldsymbol{x}_1(t-\tau_k)-2\boldsymbol{x}^T(t-\tau_k)\boldsymbol{W}_{k1}\boldsymbol{x}_1(t-\tau_k)\}\mathrm{d}s.\end{aligned}$$

其中,

$$\begin{bmatrix}A_{11}^{11}&A_{12}^{11}\\A_{21}^{11}&A_{22}^{11}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}A_{dk}^{11}&A_{dk}^{12}\\A_{dk}^{21}&A_{dk}^{22}\end{bmatrix}_{k=1}^N,\quad \boldsymbol{S}_1=\sum_{k=1}^N\int_{t-\tau_k}^t\begin{bmatrix}A_{dk}^{11}\\A_{dk}^{21}\end{bmatrix}\boldsymbol{x}_1(s)\mathrm{d}s.$$

$$S_2 = \sum_{k=1}^N \int_{t-k}^t \begin{bmatrix} A_{dk}^{12} \\ A_{dk}^{22} \end{bmatrix} x_2(t-k) dt, \quad S_3 = \sum_{k=1}^N \int_{t-k}^t \begin{bmatrix} Y_k^{11} \\ Y_k^{21} \end{bmatrix} x_1(t-k) dt, \quad S_4 = \sum_{k=1}^N \int_{t-k}^t \begin{bmatrix} W_k^{11} \\ W_k^{21} \end{bmatrix} x_1(t-k) dt.$$

$$V_2(x_t) = \sum_{k=1}^N (x^T(t) Q_k x(t) - x^T(t-k) Q_k x(t-k)) =$$

$$\sum_{k=1}^N \int_{t-k}^t (x^T(t) Q_k x(t) - x^T(t-k) Q_k x(t-k)) dt.$$

$$V_3(x_t) = \sum_{k=1}^N \left\{ \int_{t-k}^t (x^T(t) E^T Z_k E x(t) - x^T(t-k) E^T Z_k E x(t-k)) dt \right\} =$$

$$\sum_{k=1}^N \int_{t-k}^t \left\{ \left( A(t)x(t) + \sum_{k=1}^N A_{dk}(t)x(t-k) \right)^T Z_k \left( A(t)x(t) + \sum_{k=1}^N A_{dk}(t)x(t-k) \right) - x^T(t-k) E^T Z_k E x(t-k) \right\} dt.$$

则:

$$V(x_t) = V_1(x_t) + V_2(x_t) + V_3(x_t) = x^T(t) P x(t) + \sum_{k=1}^N \int_{t-k}^t x^T(t-k) Q_k x(t-k) dt. \quad (10)$$

其中,  $P = P^T A + A^T P$ ,

$$(t-k) = \begin{bmatrix} x^T(t) & x^T(t-k) & x_1^T(t-k) \end{bmatrix}^T,$$

$$k = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ * & k_{22} & k_{23} \\ * & * & k_{33} \end{bmatrix}, \quad k_{11} = k_1 + k A^T Z_k A, \quad k_{12} = \int_{t-k}^t k_2 + k A^T Z_k A_d, \\ k_{13} = \int_{t-k}^t k Y_{k1}, \quad k_{22} = \int_{t-k}^t k_3 + k A_d^T Z_k A_d, \quad k_{23} = \int_{t-k}^t k W_{k1}, \quad k_{33} = \int_{t-k}^t k Z_k^{11}. \quad (11)$$

根据 Lyapunov-Krasovskii 稳定性定理, 如果  $\lambda_k < 0$  且  $\lambda_k \neq 0$  则对任何  $(t-k) \geq 0$   $V(x_t) < 0$  因此无约束系统 (3) 是渐近稳定的.

对式 (11) 运用 Schur 补定理, 再根据式 (9) 和 Schur 补定理, 针对任何满足  $0 < k < \infty$  的  $k$  都有:

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ * & k_{33} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A^T & -Y_{k1} \\ A_d^T & -W_{k1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_k & 0 \\ 0 & (Z_k^{11})^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & A_d \\ -Y_{k1}^T & -W_{k1}^T \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ * & k_{33} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A^T & -Y_{k1} \\ A_d^T & -W_{k1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_k & 0 \\ 0 & (Z_k^{11})^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & A_d \\ -Y_{k1}^T & -W_{k1}^T \end{bmatrix} < 0$$

于是, 对任意  $0 < k < \infty$ , 当式 (9) 成立时,  $\lambda_k < 0$

定理 1 给出了系统 (3) 的时滞相关渐近稳定性定理, 基于该定理通过求解下面的优化问题:

$$\begin{cases} \min 1/\alpha \\ s.t. P, Q_k, Z_k, Y_k, W_k, (7), (8), (9). \end{cases} \quad (12)$$

能够得到保证系统 (3) 渐近稳定且保守性更低的最大允许时滞上限. 式 (12) 是一个凸优化问题, 可以通过 MATLAB 中的 LMIToolbox 进行有效求解.

在定理 1 的基础上, 下面给出多时滞不确定广义 T-S 模糊网络控制系统的渐近稳定性定理.

**定理 2** 具有形如式 (2) 所示不确定性的系统 (1) 是正则、无脉冲和渐近稳定的, 如果存在如式 (6) 所示的矩阵  $P_k, Q_k, Z_k, Y_k, W_k, Y_{k1}, W_{k1}$  和标量  $\alpha_i > 0$  满足

$$E^T P = P^T E = 0 \quad (13)$$

$$P^T A + A^T P < 0 \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} + M_i^T N_{ik} & -Y_1 & A^T Z & P D_i \\ * & k_{13} + N_{ik}^T N_{ik} & -W_1 & A_d^T Z & 0 \\ * & * & -Z_k^{11} & 0 & 0 \\ * & * & * & -Z & Z D_i \\ * & * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0 \quad i = 1, 2, \dots, r, \quad k = 1, 2, \dots, N. \quad (15)$$

其中,

$$k1 = Y_k + Y_k^T + Q_k + M_i^T M_i, \quad k2 = P^T A_{dk} - Y_k + W_k^T, \quad k3 = -Q_k - W_k - W_k^T$$
$$A_d = \sum_{k=1}^N A_{dk}.$$

根据定理 1和引理 1, 不难得到定理 2, 故证明过程略去. 同理, 最大允许时滞上限 可通过求解类似式 (12) 的优化问题得到.

3 实例

为说明本文提出方法的有效性, 下面给出一个数值算例. 考虑如下所示的多时滞不确定广义 T-S模糊网络控制系统, 假设  $x_1$ 可在线测量.

$$\text{If } x_1 \text{ is } P, \text{ then } Ex(t) = (A_1 + A_1)x(t) + \sum_{k=1}^2 (A_{d1k} + A_{d1k})x(t - k),$$
$$\text{If } x_1 \text{ is } N, \text{ then } Ex(t) = (A_2 + A_2)x(t) + \sum_{k=1}^2 (A_{d2k} + A_{d2k})x(t - k), \tag{16}$$

其中模糊集合  $P$  和  $N$  的隶属函数分别为:  $h_1(x_1) = 1 - \frac{1}{1 + e^{-2x_1}}, \quad h_2(x_1) = \frac{1}{1 + e^{-2x_1}}.$

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_1 = \begin{bmatrix} -0.9 & 0.3 \\ 0 & -0.4 \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} -0.4 & 0 \\ 0.4 & -0.9 \end{bmatrix}, \quad A_{d11} = \begin{bmatrix} 0.1 & -0.1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$
$$A_{d12} = \begin{bmatrix} 0.2 & -0.1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_{d21} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0.1 & 0.2 \end{bmatrix}, \quad A_{d22} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0.2 & 0.1 \end{bmatrix},$$
$$\begin{bmatrix} A_i & A_{di} \end{bmatrix} = D_i F_i \begin{bmatrix} M_i & N_i \end{bmatrix}, \quad F_i^T F_i = I, \quad i = 1, 2$$
$$D_1 = D_2 = I, \quad M_1 = M_2 = \begin{bmatrix} 0.06 & 0 \\ 0 & 0.08 \end{bmatrix}, \quad N_{11} = N_{12} = \begin{bmatrix} 0.04 & 0 \\ 0 & 0.06 \end{bmatrix}, \quad N_{21} = N_{22} = \begin{bmatrix} 0.06 & 0 \\ 0 & 0.03 \end{bmatrix}.$$

根据本文的定理 2, 应用 MATLAB LM IToolbox求解优化问题, 可得系统 (16) 是正则、无脉冲和渐近稳定的. 对任何时滞  $k$  满足  $k \leq 0.6361, k = 1, 2$ . 图 1给出了状态  $x_1$ 和  $x_2$ 在初始条件  $(t) = [-2.4 \quad 1.3]^T, (t) \in [-, 0], = 0.6361$  下的响应曲线 (其中  $x_1 = 0.52, x_2 = 0.47$ ), 由图可见系统为渐近稳定.

4 结论

本文针对具有多时滞的不确定广义 T-S模糊网络控制系统进行了时滞相关稳定性分析, 考虑状态项中的时滞为定常多时滞, 给出了时滞相关稳定性定理, 并通过求解优化问题可得到时滞上限. 数值算例说明了该结论的有效性. 本文的有关结果可进一步用于保成本及  $H^\infty$  控制律的设计.

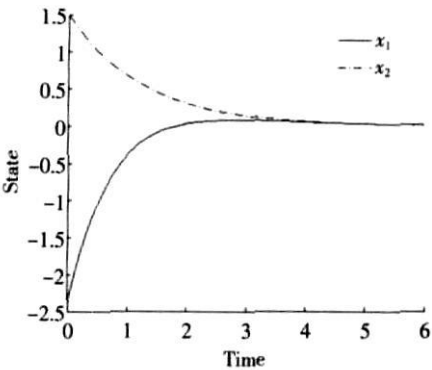


图 1 状态响应曲线  
Fig.1 Simulation results of  $x_1$  and  $x_2$

[参考文献] (References)

[ 1 ] Walsh G C, Ye H, Bushnell L. Stability analysis of networked control systems[ C ] // Proceedings of American Control Conference, San Diego, California. Vd. 4, 1999: 2876-2880.

[ 2 ] Zhang W, Branicky M S, Phillips S M. Stability of networked control systems[ J]. IEEE Control System Magazine, 2001, 21 ( 1): 84-99.

[ 3 ] Walsh G C, Ye H, Bushnell L. Stability analysis of networked control systems[ J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, 10( 3): 438-446.

[ 4 ] 樊卫华, 蔡骅, 陈庆伟. 时延网络控制系统的稳定性[ J]. 控制理论与应用, 2004, 21 ( 6): 880-884.

Fan Weihua, Cai Hua, Chen Qingwei. Stability of networked control system with time delay[ J]. Control Theory and Applications, 2004, 21( 6): 880-884. ( in Chinese )

(下转第 58 页)

- [5] 张宇, 吴新, 丛俊, 等. 基于  $-\text{Fe}_2\text{O}_3$  的高梯度磁场中燃煤可吸入颗粒物脱除实验 [J]. 煤炭学报, 2008, 33(6): 685-689.  
Zhang Yu, Wu Xin, Cong Jun, et al. Removal experiment of inhaleable particles emitted from coal combustion with high gradient magnetic field based on  $-\text{Fe}_2\text{O}_3$  [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(6): 685-689. (in Chinese)
- [6] 陈亚非, 高翔, 骆仲决, 等. 金属氧化物对  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  脱硫影响的研究 [J]. 工程热物理学报, 1997, 18(4): 517-520.  
Chen Yafei, Gao Xiang, Luo Zhongyang, et al. Study on the effect of metal oxides on the reactivity of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  in sulfur removal [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1997, 18(4): 517-520. (in Chinese)
- [7] 张云峰, 周钰明, 归柯庭, 等. 磁稳流化床在烟气脱硫技术中的研究 [J]. 锅炉技术, 2003, 34(5): 76-80.  
Zhang Yunfeng, Zhou Yuming, Gui Keting, et al. Studies of the flue gas desulfuration in magnetically stabilized fluidized beds by catalyzed oxidation [J]. Boiler Technology, 2003, 34(5): 76-80. (in Chinese)
- [8] Nova I, Lietti L, Tronconi E, et al. Dynamics of SCR reaction over a  $\text{TiO}_2$ -supported vanadium tungsta commercial catalysts [J]. Catalysis Today, 2000, 60(1-2): 73-82.
- [9] 丛俊. 基于  $-\text{Fe}_2\text{O}_3$  的燃煤  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{NO}_x$  协同脱除促进作用试验研究 [D]. 南京: 东南大学能源与环境学院, 2007.  
Cong Jun. Experimental Investigation into the promoting effect of  $-\text{Fe}_2\text{O}_3$  on removing  $\text{PM}_{10}$  and  $\text{NO}_x$  from flue gas simultaneously [D]. Nanjing School of Energy and Environment, Southeast University, 2007. (in Chinese)
- [10] Lietti L, Alemany J L, Forzatti P, et al. Reactivity of  $\text{V}_2\text{O}_5\text{-WO}_3/\text{TiO}_2$  catalysts in the selective catalytic reduction of nitric oxide by ammonia [J]. Catalysis Today, 1996, 29(1/4): 143-148.
- [11] Lietti L, Nova I, Ramis G, et al. Characterization and reactivity of  $\text{V}_2\text{O}_5\text{-MoO}_3/\text{TiO}_2$  De- $\text{NO}_x$  SCR catalysts [J]. Journal of catalysis, 1999, 187(2): 419-435.

[责任编辑: 严海琳]

(上接第 16 页)

- [5] Branicky M S, Phillips S M, Zhang W. Stability of networked control systems: Explicit analysis of delay [C] // Proceedings of American Control Conference, Chicago Illinois, 2000. 2352-2357.
- [6] Yan H, Huang X, Wang M, Zhang H. Delay-dependent stability criteria for a class of networked control systems with multi-input and multi-output [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2007, 34(3): 997-1005.
- [7] Marieke B G, Nathan Wouw. Stability of networked control systems with uncertain time-varying delays [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54(7): 1575-1580.
- [8] Takagi T, Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1985, 15(1): 116-132.
- [9] Hongbin Z, Yanyan S, Gang F. Delay-dependent stability and  $H^\infty$  control for a class of fuzzy descriptor systems with time-delay [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2009, 160(12): 1689-1707.
- [10] Weihua T, Huaguang Z. Optimal guaranteed cost control for fuzzy descriptor systems with time-varying delay [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2008, 19(3): 584-591.
- [11] Fridman E. Stability of linear descriptor systems with delay: A Lyapunov-based approach [J]. Journal of Math Anal Appl, 2002, 273: 24-44.
- [12] Fridman E, Shaked U.  $H^\infty$  control of linear state-delay descriptor systems: An LMI approach [J]. Linear Alg Appl, 2002, 351: 271-302.
- [13] Shuqian Z, Chenghui Z, Zhaolin C, et al. Delay-dependent robust stability criteria for two classes of uncertain singular time-delay systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2007, 52(5): 880-885.
- [14] Du Z P, Zhang Q L, Li Y. Delay-dependent robust  $H^\infty$  control for uncertain singular systems with multiple state delay [J]. IET Control Theory Appl, 2009, 3(6): 731-740.

[责任编辑: 刘健]