文章编号: 1001-0920(2008)04-0445-05

一类切换模糊时滞系统的状态反馈控制

刘 毅, 赵 军
(东北大学 a. 信息科学与工程学院, b. 教育部暨辽宁省流程工业综合自动化重点实验室, 沈阳 110004)

摘　要: 针对切换模糊时滞系统,根据平行分布补偿算法,设计了模糊状态反馈控制器. 使用切换技术及单Lyapunov函数和多 Lyapunov 函数方法,给出了这一类切换模糊时滞系统渐近稳定的充分条件及切换律. 仿真结果表明了方法的有效性.

关键词: 切换系统; 模糊控制; 时滞系统; 状态反馈; Lyapunov 函数
中图分类号: TP273　**文献标识码**: A

State feedback control for a class of switching fuzzy time-delay systems

LIU Yi, ZHAO Jun
(a. College of Information Science and Engineering, b. Key Laboratory of Process Industry Automation of Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110004, China. Correspondent: LIU Yi, E-mail: lgliuyi@163.com)

Abstract: State-feedback and switching law are designed for a class of switching fuzzy systems with time-delay. Sufficient conditions for asymptotic stability are presented by using single Lyapunov function and multiple Lyapunov functions. State-feedback gains and switching laws are designed by the parallel distributed compensation(PDC). A numerical example shwos the effectiveness of the proposed design method.

Key words: Switching systems; Fuzzy control; Time-delay; State feedback; Lyapunov functions

1 引　言

近年来,作为重要的智能控制方法,模糊系统理论和方法的研究受到了广泛重视. T-S 模型是模糊系统中最有效的系统模型,基于此模型的模糊系统稳定性等研究取得了丰硕成果[1-4]. 另一方面,切换系统是一类重要的混杂系统,它有十分广泛的应用背景和重要的理论研究价值,这方面的研究也取得了丰硕成果[5-8]. 如果一个系统用模糊方法建模,即描述为一个模糊系统,同时系统中又含有离散动态,如离散切换信号,则这类系统就成为切换模糊系统. 关于这类新型的控制系统的研究成果还很少见[9-12].

在实际控制系统中,由于测量数据的转换、处理和传输等原因,系统中时滞的存在是极其普遍的,如计算机控制系统、通信系统、电力系统等. 由于系统中出现时滞是系统不稳定和性能变坏的一个主要原因,近年来人们对时滞系统的稳定性问题进行了广泛的研究,并取得了很多有价值的结果[13-15]. 但切换模糊时滞系统的稳定性问题研究还很有限,因此,研究切换模糊时滞系统的稳定性问题具有重要的理论和现实意义.

本文基于模糊 T-S 模型,根据模糊平行分布补偿算法(PDC),设计了切换模糊时滞系统的状态反馈控制器;分别利用单 Lyapunov 函数方法和多 Lyapunov 函数方法,给出了切换模糊时滞系统的稳定条件和切换律;最后通过数值仿真例子验证了结论的有效性.

2 问题描述

考虑子系统全是模糊时滞系统的切换系统,描述如下:

R_σ^i: if $z_1(t)$ is $M_{\sigma 1}^i$ and $\cdots$ and $z_p(t)$ is $M_{\sigma p}^i$, then

$$\dot{x}(t) = A_{\sigma i}x(t) + A_{h\sigma i}x(t-h) + B_{\sigma i}u_\sigma(t),$$
$$x(t) = \Psi(t),\ t \in [-h, 0],$$
$$i = 1, 2, \cdots, N_\sigma. \tag{1}$$

其中: $M_{\sigma j}^i$ 是模糊集合; $z(t) \in R^p$ 是模糊前件变量,

收稿日期: 2007-05-15; **修回日期**: 2007-09-24.
基金项目: 国家自然科学基金项目(60574013).
作者简介: 刘毅(1969—),男,辽宁北镇人,教授,博士生,从事切换系统、智能控制的研究; 赵军(1957—),男,辽宁海城人,教授,博士生导师,从事复杂非线性系统、切换系统等研究.

为系统的可测量变量或状态变量;$\sigma \in M = \{1,2,\cdots,l\}$ 是分段常值函数,表示切换信号;$x(t) \in R^n$ 是状态变量;$u_\sigma(t) \in R^m$ 是系统的控制输入;A_σ;$A_{h\sigma i}$,B_σ 是适当维数的常数矩阵;h 表示时滞时间.

本文考虑依赖于状态 $x(t)$ 的切换信号 $\sigma = \sigma(x(t))$. 设$\{\Omega_1,\Omega_2,\cdots,\Omega_l\}$ 是 R^n 的一个分割,即 $\bigcup_{i=1}^{l}\Omega_i = R^n\setminus\{0\}$,且 $\Omega_i \cap \Omega_j = \varnothing, i \neq j$. 当 $x(t) \in \Omega_r$,切换信号为 $\sigma = \sigma(x(t)) = r$. 这一切换信号可完全由函数

$$v_r(x(t)) = \begin{cases} 1, & x(t) \in \Omega_r; \\ 0, & x(t) \notin \Omega_r \end{cases}$$

来刻画,且 $r \in M$. 当且仅当 $\sigma = \sigma(x(t)) = r$ 时,$v_r(x(t)) = 1$. 后面将说明如何构造$\{\Omega_1,\Omega_2,\cdots,\Omega_l\}$,从而设计 σ. 利用函数 $v_r(x(t))$,系统(1) 可以等价地表示为

$$\dot{x}(t) = \sum_{r=1}^{l}\sum_{i=1}^{N_r} v_r(x(t))\mu_{ri}(z(t))[A_{ri}x(t) + A_{hri}x(t-h) + B_{ri}u_r(t)]. \tag{2}$$

其中

$$\mu_{ri}(z(t)) = \frac{\prod_{j=1}^{p} M_{rj}^{i}(z_j(t))}{\sum_{i=1}^{N_r}\prod_{j=1}^{p} M_{rj}^{i}(z_j(t))},$$

$$0 \le \mu_{ri}(z(t)) \le 1, \quad \sum_{l=1}^{N_r}\mu_{ri}(z(t)) = 1,$$

$M_{rj}^{i}(z_j(t))$ 表示 $z_j(t)$ 属于模糊集 M_{rj}^{i} 的隶属度.

3 稳定性分析与切换设计

本节讨论切换模糊时滞系统的稳定性问题. 利用单 Lyapunov 函数和多 Lyapunov 函数方法,设计使系统渐近稳定的切换律,给出切换模糊时滞系统(1) 的稳定性条件.

引理 1[16] 给定适当维数的常值矩阵 X 和 Y,则对适当维数正定矩阵 S 和任意常数 $\varepsilon > 0$,有如下不等式成立:

$$X^{\mathrm T}Y + Y^{\mathrm T}X \le \varepsilon X^{\mathrm T}SX + \varepsilon^{-1}Y^{\mathrm T}S^{-1}Y.$$

3.1 单 Lyapunov 函数方法

令 $\bar{\Lambda}_{ij} \in \gamma_{\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_l}(\Lambda_{1ij},\Lambda_{2ij},\cdots,\Lambda_{lij})$ 表示由参数 $\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_l$ 所确定的 $\Lambda_{1ij},\Lambda_{2ij},\cdots,\Lambda_{lij}$ 的凸组合构成的矩阵束,即

$$\gamma_{\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_l}(\Lambda_{1ij},\Lambda_{2ij},\cdots,\Lambda_{lij}) = \lambda_1\Lambda_{1ij} + \lambda_2\Lambda_{2ij} + \cdots + \lambda_l\Lambda_{lij},$$
$$\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_l \in [0,1],$$
$$\sum_{r=1}^{l}\lambda_r = 1, i,j = 1,2,\cdots,N_r.$$

定理 1 对于切换模糊时滞系统(1),若存在 $\bar{\Lambda}_{ij} \in \gamma_{\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_l}(\Lambda_{1ij},\Lambda_{2ij},\cdots,\Lambda_{lij})(i,j = 1,2,\cdots,N_r)$ 和对称正定矩阵 P,S 以及一组正数 $\alpha_{rj}(r = 1,2,\cdots,l)$,使得矩阵不等式

$$\bar{\Lambda}_{ij} + S < 0 \tag{3}$$

成立,其中

$$\Lambda_{rij} = A_{ri}^{\mathrm T}P + PA_{ri} - \alpha_{rj}PB_{rj}B_{ri}^{\mathrm T}P - \alpha_{rj}PB_{ri}B_{rj}^{\mathrm T}P + PA_{hri}S^{-1}A_{hri}^{\mathrm T}P,$$

则存在状态反馈控制器

$$u_r(t) = -\sum_{r=1}^{l}\sum_{i=1}^{N_r}v_r(x(t))\mu_{ri}(z(t))K_{ri}x(t),$$
$$K_{ri} = \alpha_{ri}B_{ri}^{\mathrm T}P, r = 1,2,\cdots,l, i = 1,2,\cdots,N_r \tag{4}$$

和切换律 $\sigma = \sigma(x(t)) \in M = \{1,2,\cdots,l\}$,使得系统(1) 的闭环系统在原点是渐近稳定的.

证明 由式(3) 可知,对于任意的 $i,j = 1,2,\cdots,N_r$,存在 $\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_l \in [0,1]$,且 $\sum_{r=1}^{l}\lambda_r = 1$,使得

$$\sum_{r=1}^{l}\lambda_r(\Lambda_{rij} + S) < 0, \tag{5}$$

则 $\forall x(t) \neq 0$,有

$$\sum_{r=1}^{l}\lambda_r x^{\mathrm T}(t)(A_{ri}^{\mathrm T}P + PA_{ri} - \alpha_{rj}PB_{rj}B_{ri}^{\mathrm T}P - \alpha_{rj}PB_{ri}B_{rj}^{\mathrm T}P + PA_{hri}S^{-1}A_{hri}^{\mathrm T}P + S)x(t) < 0,$$

且至少存在一个 $r \in M$,使得

$$\Omega_r = \{x(t) \in R^n \mid x^{\mathrm T}(t)(A_{ri}^{\mathrm T}P + PA_{ri} - \alpha_{rj}PB_{rj}B_{ri}^{\mathrm T}P - \alpha_{rj}PB_{ri}B_{rj}^{\mathrm T}P + PA_{hri}S^{-1}A_{hri}^{\mathrm T}P + S)x(t) < 0, \forall x(t) \neq 0\},$$

则 $\bigcup_{r}\Omega_r = R^n\setminus\{0\}$. 构造集合 $\tilde{\Omega}_1 = \Omega_1$,$\tilde{\Omega}_2 = \Omega_2 - \Omega_1$,$\cdots$,$\tilde{\Omega}_r = \Omega_r - \bigcup_{i=1}^{r-1}\Omega_i$,显然有 $\bigcup_{i=1}^{l}\tilde{\Omega}_i = R^n\setminus\{0\}$,且 $\tilde{\Omega}_i \cap \tilde{\Omega}_j = \varnothing, i \neq j$.

构造切换律 $\sigma(x(t)) = r$,当 $x(t) \in \tilde{\Omega}_r$ 时,$r \in M$. 取 Lyapunov 函数

$$V(x(t)) = x^{\mathrm T}(t)Px(t) + \int_{t-h}^{t}x^{\mathrm T}(\tau)Sx(\tau)\mathrm{d}\tau, \tag{6}$$

则

$$\dot{V}(x(t)) = \sum_{r=1}^{l}\sum_{i=1}^{N_r}\sum_{j=1}^{N_r}v_r(x(t))\mu_{ri}(z(t))\mu_{rj}(z(t)) \times \{x^{\mathrm T}(t)[(A_{ri} - B_{ri}K_{rj})^{\mathrm T}P + P(A_{ri} - B_{ri}K_{rj})]x(t) +$$

$x^{\mathrm{T}}(t-h)A_{hri}^{\mathrm{T}}Px(t)+x^{\mathrm{T}}(t)PA_{hri}x(t-h)+x^{\mathrm{T}}(t)Sx(t)-x^{\mathrm{T}}(t-h)Sx(t-h)\}$.

由式(4),并根据引理 1,可得

$$\dot V(x(t))\le\sum_{r=1}^{l}\sum_{i=1}^{N_r}\sum_{j=1}^{N_r}v_r(x(t))\mu_{ri}(z(t))\mu_{rj}(z(t))\times[x^{\mathrm{T}}(t)(A_{ri}^{\mathrm{T}}P+PA_{ri}-\alpha_{rj}PB_{rj}B_{ri}^{\mathrm{T}}P-\alpha_{rj}PB_{ri}B_{rj}^{\mathrm{T}}P+PA_{hri}S^{-1}A_{hri}^{\mathrm{T}}P+S)x(t)].$$

由此可知,在设计的切换律下,$\dot V(x(t))<0$, $\forall x(t)\ne0$. 即系统(1)的闭环系统在原点渐近稳定. □

定理 1 保证了系统(1)的全局渐近稳定性,同时也给出了控制器和切换律设计. 下面将定理 1 的稳定性条件转换为求解线性矩阵不等式问题. 对式(3)分别左乘和右乘矩阵 $X=P^{-1}$,并令 $W=XSX$,利用矩阵的 Schur 补性质,得到

$$\sum_{r=1}^{l}\lambda_r(XA_{ri}^{\mathrm{T}}+A_{ri}X-\alpha_{rj}B_{rj}B_{ri}^{\mathrm{T}}-\alpha_{rj}B_{ri}B_{rj}^{\mathrm{T}}+A_{hri}S^{-1}A_{hri}^{\mathrm{T}}+W)=$$

$$\sum_{r=1}^{l}\lambda_r\begin{bmatrix}XA_{ri}^{\mathrm{T}}+A_{ri}X-\alpha_{rj}B_{rj}B_{ri}^{\mathrm{T}}-\alpha_{rj}B_{ri}B_{rj}^{\mathrm{T}}+W & A_{hri}\\ A_{hri}^{\mathrm{T}} & -S\end{bmatrix}<0. \tag{7}$$

对式(7)分别左乘和右乘对角矩阵 $\mathrm{diag}[I\quad X]$,得 LMI

$$\sum_{r=1}^{l}\lambda_r\begin{bmatrix}XA_{ri}^{\mathrm{T}}+A_{ri}X-\alpha_{rj}B_{rj}B_{ri}^{\mathrm{T}}-\alpha_{rj}B_{ri}B_{rj}^{\mathrm{T}}+W & A_{hri}X\\ XA_{hri}^{\mathrm{T}} & -W\end{bmatrix}<0. \tag{8}$$

3.2　多 Lyapunov 函数方法

定理 2　对于切换模糊时滞系统(1),若存在同时非负或同时非正实数 $\beta_{r\lambda}(r=1,2,\cdots,l,\lambda=1,2,\cdots,N_r)$,正定矩阵 P_r,S_r 和一组正数 $\alpha_{rj}(j=1,2,\cdots,N_r)$,使得矩阵不等式

$$A_{ri}^{\mathrm{T}}P_r+P_rA_{ri}-\alpha_{rj}P_rB_{rj}B_{ri}^{\mathrm{T}}P_r-\alpha_{rj}P_rB_{ri}B_{rj}^{\mathrm{T}}P_r+P_rA_{hri}S_r^{-1}A_{hri}^{\mathrm{T}}P_r+S_r+\sum_{\lambda=1,\lambda\ne r}^{l}\beta_{r\lambda}(P_\lambda-P_r)<0 \tag{9}$$

成立,则存在状态反馈控制器

$$u_r(t)=-\sum_{r=1}^{l}\sum_{i=1}^{N_r}v_r(x(t))\mu_{ri}(z(t))K_{ri}x(t),$$
$$K_{ri}=\alpha_{ri}B_{ri}^{\mathrm{T}}P_r,\ r=1,2,\cdots,l,\ i=1,2,\cdots,N_r \tag{10}$$

和切换律 $\sigma=\sigma(x(t))\in M=\{1,2,\cdots,l\}$,使得系统(1)的闭环系统在原点是渐近稳定的.

证明　不失一般性,假设 $\beta_{r\lambda}\ge0$,显然对任意 $x(t)\in R^n\backslash\{0\}$,至少存在一个 $r\in M$ 使得 $x^{\mathrm{T}}(t)(P_\lambda-P_r)x(t)\ge0$, $\forall\lambda\in M$,则由矩阵不等式(9)可知

$$x^{\mathrm{T}}(t)(A_{ri}^{\mathrm{T}}P_r+P_rA_{ri}-\alpha_{rj}P_rB_{rj}B_{ri}^{\mathrm{T}}P_r-\alpha_{rj}P_rB_{ri}B_{rj}^{\mathrm{T}}P_r+P_rA_{hri}S_r^{-1}A_{hri}^{\mathrm{T}}P_r+S_r)x(t)<0,$$
$$i,j=1,2,\cdots,N_r.$$

令 $\Omega_r=\{x(t)\in R^n\mid x^{\mathrm{T}}(t)(P_\lambda-P_r)x(t)\ge0,\ \forall x(t)\ne0,\lambda\in M 且 \lambda\ne r\}$,则 $\bigcup_r\Omega_r=R^n\backslash\{0\}$.

构造集合 $\tilde\Omega_1=\Omega_1$, $\tilde\Omega_2=\Omega_2-\tilde\Omega_1$, $\cdots$, $\tilde\Omega_r=\Omega_r-\bigcup_{i=1}^{r-1}\tilde\Omega_i$,显然有 $\bigcup_{i=1}^{l}\tilde\Omega_i=R^n\backslash\{0\}$,且 $\tilde\Omega_i\cap\tilde\Omega_j=\varnothing$, $i\ne j$.

构造切换律 $\sigma(x(t))=r$,当 $x(t)\in\tilde\Omega_r$ 时, $r\in M$. 取 Lyapunov 函数为

$$V_r(x(t))=x^{\mathrm{T}}(t)P_rx(t)+\int_{t-h}^{t}x^{\mathrm{T}}(\tau)S_rx(\tau)\mathrm{d}\tau, \tag{11}$$

则

$$\dot V_r(x(t))=\sum_{r=1}^{l}\sum_{i=1}^{N_r}\sum_{j=1}^{N_r}v_r(x(t))\mu_{ri}(z(t))\mu_{rj}(z(t))\times\{[x^{\mathrm{T}}(t)(A_{ri}-B_{ri}K_{rj})^{\mathrm{T}}P_r+P_r(A_{ri}-B_{ri}K_{rj})]x(t)+x^{\mathrm{T}}(t-h)A_{hri}^{\mathrm{T}}P_rx(t)+x^{\mathrm{T}}(t)P_rA_{hri}x(t-h)+x^{\mathrm{T}}(t)S_rx(t)-x^{\mathrm{T}}(t-h)S_rx(t-h)\}.$$

由式(10),并根据引理 1,可得

$$\dot V_r(x(t))\le\sum_{r=1}^{l}\sum_{i=1}^{N_r}\sum_{j=1}^{N_r}v_r(x(t))\mu_{ri}(z(t))\mu_{rj}(z(t))\times[x^{\mathrm{T}}(t)(A_{ri}^{\mathrm{T}}P_r+P_rA_{ri}-\alpha_{rj}P_rB_{rj}B_{ri}^{\mathrm{T}}P_r-\alpha_{rj}P_rB_{ri}B_{rj}^{\mathrm{T}}P_r+P_rA_{hri}S_r^{-1}A_{hri}^{\mathrm{T}}P_r+S_r)x(t)].$$

由此可知,在设计的切换律下,$\dot V_r(x(t))<0$, $\forall x(t)\ne0$. 即系统(1)的闭环系统在原点渐近稳定. 当 $\beta_{r\lambda}\le0$ 时,同理可证. □

下面将定理 2 的稳定性条件转换为求解线性矩阵不等式问题. 对式(9)分别左乘和右乘矩阵 $X_r=P_r^{-1}$,并利用矩阵的 Schur 补性质,得到

$$X_rA_{ri}^{\mathrm{T}}+A_{ri}X_r-\alpha_{rj}B_{rj}B_{ri}^{\mathrm{T}}-\alpha_{rj}B_{ri}B_{rj}^{\mathrm{T}}+A_{hri}S_r^{-1}A_{hri}^{\mathrm{T}}+W_r-\sum_{\lambda=1,\lambda\ne r}^{l}\beta_{r\lambda}X_r+\sum_{\lambda=1,\lambda\ne r}^{l}\beta_{r\lambda}X_rP_\lambda X_r=$$

$$\begin{bmatrix}\Pi_{rij} & A_{hri} & X_r & \cdots & X_r\\ A_{hri}^{\mathrm{T}} & -S_r & 0 & \cdots & 0\\ X_r & 0 & -\beta_{r1}^{-1}X_1 & \cdots & 0\\ \cdots & \cdots & \cdots & \ddots & \cdots\\ X_r & 0 & 0 & \cdots & -\beta_{rl}^{-1}X_l\end{bmatrix}<0. \tag{12}$$

其中

$$\Pi_{rij}=X_rA_{ri}^{\mathrm{T}}+A_{ri}X_r-\alpha_{rj}B_{rj}B_{ri}^{\mathrm{T}}-$$

$$\alpha_{rj} B_{ri} B_{rj}^{\mathrm{T}} + W_r - \sum_{\lambda=1,\lambda\neq r}^{l} \beta_{r\lambda} X_r,$$

$$W_r = X_r S_r X_r,\ X_\lambda = P_\lambda^{-1},\ \lambda = 1,2,\cdots,l.$$

对式(12)分别左乘和右乘对角矩阵 $\mathrm{diag}[I\ \ X_r\ \ I\ \ \cdots\ \ I]$,得 LMI

$$\begin{bmatrix} \Pi_{rij} & A_{hri} X_r & X_r & \cdots & X_r \\ X_r A_{hri}^{\mathrm{T}} & -W_r & 0 & \cdots & 0 \\ X_r & 0 & -\beta_{r1}^{-1} X_1 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \ddots & \cdots \\ X_r & 0 & 0 & \cdots & -\beta_{rl}^{-1} X_l \end{bmatrix} < 0. \tag{13}$$

4 仿真例子

考虑下面的切换模糊时滞系统:

R_1^1: if $z_1(t)$ is M_{11}^1, then

$$\dot{x}(t) = A_{11} x(t) + A_{h11} x(t-h) + B_{11} u_1(t);$$

R_1^2: if $z_1(t)$ is M_{11}^2, then

$$\dot{x}(t) = A_{12} x(t) + A_{h12} x(t-h) + B_{12} u_1(t);$$

R_2^1: if $z_1(t)$ is M_{21}^1, then

$$\dot{x}(t) = A_{21} x(t) + A_{h21} x(t-h) + B_{21} u_2(t);$$

R_2^2: if $z_1(t)$ is M_{21}^2, then

$$\dot{x}(t) = A_{22} x(t) + A_{h22} x(t-h) + B_{22} u_2(t).$$

其中

$$A_{11} = \begin{bmatrix} 1 & 0.6 \\ 0 & -2.5 \end{bmatrix},\ A_{12} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & -7.3 \end{bmatrix},$$

$$A_{21} = \begin{bmatrix} 2 & 4.5 \\ 10.5 & -6.9 \end{bmatrix},\ A_{22} = \begin{bmatrix} 0.7 & 3.4 \\ 9.1 & -8.7 \end{bmatrix},$$

$$A_{h11} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.1 \\ 0.2 & -0.1 \end{bmatrix},\ A_{h12} = \begin{bmatrix} 1.1 & 0.3 \\ 2.1 & 0.5 \end{bmatrix},$$

$$A_{h21} = \begin{bmatrix} 1.3 & 0.2 \\ 0.3 & -0.5 \end{bmatrix},\ A_{22} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.2 \\ 1.5 & 0.8 \end{bmatrix},$$

$$B_{11} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.1 \end{bmatrix},\ B_{12} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.2 \end{bmatrix},$$

$$B_{21} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.5 \end{bmatrix},\ B_{22} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.6 \end{bmatrix}.$$

选取隶属度函数为

$$\mu_{11}(x_1) = \mu_{21}(x_1) = 1 - 1/(1 + \mathrm{e}^{-4x_1}),$$

$$\mu_{12}(x_1) = \mu_{22}(x_1) = 1/(1 + \mathrm{e}^{-4x_1}),$$

选取 $\alpha_{11} = \alpha_{12} = 0.5$, $\alpha_{21} = \alpha_{22} = 2$,解 LMI(13) 得正定矩阵

$$P_1 = \begin{bmatrix} 9.5125 & 0.9337 \\ 0.9337 & 2.0502 \end{bmatrix},$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} 5.7588 & -0.8892 \\ -0.8892 & 2.9908 \end{bmatrix}.$$

令

$$\Omega_1 = \{x(t) \in R^2 \mid x^{\mathrm{T}}(t)(P_2 - P_1)x(t) \geq 0,\ x(t) \neq 0\},$$

$$\Omega_2 = \{x(t) \in R^2 \mid x^{\mathrm{T}}(t)(P_1 - P_2)x(t) \geq 0,\ x(t) \neq 0\},$$

则 $\Omega_1 \cup \Omega_2 = R^2 \backslash \{0\}$. 给出切换律

$$\sigma(x(t)) = \begin{cases} 1, & x(t) \in \Omega_1; \\ 2, & x(t) \in \Omega_2 \backslash \Omega_1. \end{cases}$$

设计相应的状态反馈控制器

$$u_r(t) = -\sum_{r=1}^{2}\sum_{i=1}^{2} v_r(x(t))\mu_{ri}(x_1(t)) K_{ri} x(t).$$

由式(4),得控制器增益

$$K_{11} = [4.8029\ \ 0.5694],$$

$$K_{12} = [4.8496\ \ 0.6719],$$

$$K_{21} = [10.6285\ \ 1.2125],$$

$$K_{22} = [10.4506\ \ 1.8107].$$

选取初始点 $x(0) = [2, -5]^{\mathrm{T}}$,时滞时间 $h = 0.6$ s,利用 Matlab 进行仿真. 图 1 是系统的状态变化曲线,图 2 是切换信号. 由仿真结果可以看出,在所设计的控制器和切换律下,切换模糊时滞系统(14)的闭环系统是渐近稳定的.

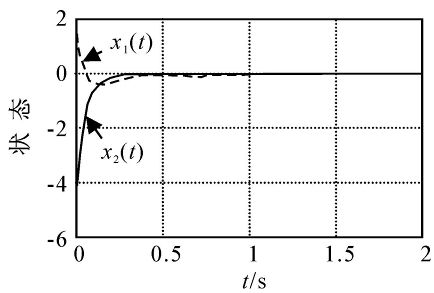

图 1 状态曲线

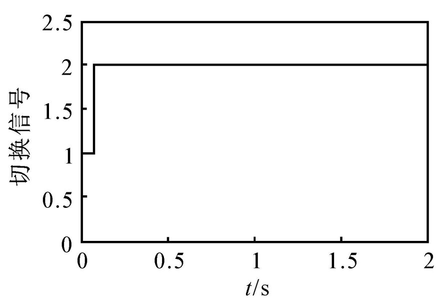

图 2 切换信号

5 结 论

本文研究了切换模糊时滞系统的稳定性问题. 基于单 Lyapunov 函数方法和多 Lyapunov 函数方法,给出了切换模糊状态反馈控制器设计、切换律设计以及使系统渐近稳定的 LMI 条件. 通过数值仿真例子,验证了结论的有效性.

参考文献(References)

[1] Tanaka K, Ikeda T, Wang H O. Robust stabilization of a class of uncertain nonlinear systems via fuzzy control:

Quadratic stabilizability, control theory and linear matrix inequalities[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 1996, 4(1): 1-13.

[2] Tong S C, Wang T, Li H X. Fuzzy robust tracking control design for uncertain nonlinear dynamic systems [J]. Int J of Approximate Reasoning, 2002, 9(3): 73-90.

[3] Lo J C, Lin M L. Robust H_∞ nonlinear modeling and control via uncertain fuzzy systems [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2004, 143(2): 189-209.

[4] Tong S C, Li H X. Observer-based robust fuzzy control of nonlinear system with parametric uncertainties[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2002, 131(2): 154-165.

[5] Liberzon D, Morse A S. Basic problems in stability and design of switched systems[J]. IEEE Control System Magazine, 1999, 19(5): 59-70.

[6] Zhao J, Spong M W. Hybrid control for global stabilization of the cart-pendulum system [J]. Atomatica, 2001, 37 (12): 1941-1951.

[7] Zhao J, Nie H. Sufficient conditions for input-to-state stability of switched systems [J]. Acta Automatica Sinica, 2003, 29(2): 252-257.

[8] Shauheen Zahirazami, Idin Karuei, Amir G. Multi-layer switching structure with periodic feedback control[C]. Proc of the 2006 American Control. Chicago. Chicago Minneapolis, 2006: 5425-5431.

[9] Hiroshi O, Kazuo T, Wang H O. Switching fuzzy control for nonlinear systems[C]. Proc of the 2003 IEEE Int Symposium on Intelligent Control. Houston: IEEE, 2003: 281-286.

[10] Kazuo T, Masaaki I, Wang H O. Stability and smoothness conditions for switching fuzzy systems[C]. Proc of the 2000 American Control Conf. Chicago, 2000: 2474-2478.

[11] Hiroshi O, Kazuo T, Wang H O. Switching fuzzy controller design based on switching Lyapunov function for a class of nonlinear systems [J]. IEEE Trans System, Man and Cyber, 2006, 36(1): 13-23.

[12] Yang H, Georgi M Dimirovski, Zhao J. Stability of a class of uncertain fuzzy systems based on fuzzy control switching [C]. Proc of the 2006 American Control Conf. Minneapolis, 2006: 4067-4071.

[13] Ahmadreza Momeni, Amir G Agndam. Switching control for time-delay systems[C]. Proc of the 2006 American Control Conf. Minneapolis, 2006: 5432-5434.

[14] **孙洪飞, 赵军, 高晓东. 带有时滞摄动的线性切换系统的稳定性**[J]. **控制与决策**, 2002, 17(4): 431-434.
(Sun Hong-fei, Zhao Jun, Gao Xiao-dong. Stability of linear switched systems with delayed perturbations[J]. Control and Decision, 2002, 17(4): 431-434.)

[15] **聂宏, 赵军. 一类非线性不确定时滞系统的混杂状态反馈 H_∞鲁棒控制**[J]. **控制理论与应用**, 2005, 22(4): 567-572.
(Nie Hong, Zhao Jun. Hybrid state feedback H-infinity robust control for a class of time-delay systems with nonlinear uncertainties[J]. Control Theory and Applications, 2005, 22(4): 567-572.)

[16] Xie L, De Souza C. Robust H_∞ control for linear systems with norm-bounded time varying uncertainty [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1992, 37(8): 1188-1191.

2008 全国开放式分布与并行计算学术年会征文通知

由中国计算机学会开放系统专业委员会主办、扬州大学住处工程学院承办的“2008 全国开放式分布与并行计算学术年会(DPCS2008)”将于 2008 年 10 月 25 日 - 27 日在江苏省扬州市扬州大学召开. 本次年会录用论文将以正刊方式发表在《微电子学与计算机》第 9 期和第 10 期,欢迎大家积极投稿.

会议网站: http://dpcs2008.yzu.edu.cn

会议承办方联系人和联系电话及 E-mail 信箱:

殷新春: 0514-87973588, 13665292277, xcyin@yzu.edu.cn

李　斌: 0514-87978307, 13056333606, libin@yzu.edu.cn