

文章编号: 1001-0920(2011)03-0469-04

一类切换模糊时滞组合系统的分散镇定

刘毅^a, 孙丽颖^b

(辽宁工业大学 a. 计算中心, b. 电气工程学院, 辽宁 锦州 121001)

摘要: 提出了切换模糊时滞组合系统模型, 并研究了状态和互联项具有时滞情况下的分散镇定问题. 当每个互联子系统系统中的每个切换子系统具有有限个备选的状态反馈控制器, 且单一控制器均不能保证系统稳定的情况下, 利用多 Lyapunov 函数方法给出了时滞相关的矩阵不等式条件和分散切换律设计方法, 使系统在所提出的分散切换律和分散控制器下渐近稳定. 仿真结果表明了所提出方法的有效性.

关键词: 切换组合系统; 模糊控制; 时滞相关; 多 Lyapunov 函数

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Decentralized stabilization for a class of switching fuzzy time-delay composite systems

LIU Yi^a, SUN Li-ying^b

(a. Computing Center, b. Electric Engineering College, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China.

Correspondent: LIU Yi, E-mail: lgliuyi@163.com)

Abstract: A model of switching fuzzy time-delay composite systems is presented, and the decentralized stabilization problem is studied for the states and interconnected terms with time-delay. When every switching subsystem of every interconnected subsystem has finite states feedback controllers in a given set of controllers and none of the individual controllers can make the systems stable, the matrix inequalities conditions of delay dependent and the decentralized switching laws design method are provided by using multiple Lyapunov functions method, such that the systems are asymptotically stable under the proposed decentralized switching laws and decentralized controllers. The simulation results show effectiveness of the design method.

Key words: switching composite system; fuzzy control; delay dependent; multiple Lyapunov functions

1 引言

在实际控制系统中存在许多由若干个相互关联的子系统构成的组合系统, 如电力系统、计算机网络、经济系统、复杂生产过程计算机控制系统等. 组合系统的分散控制是比较可靠、有效的控制方式之一, 受到了许多学者的关注^[1-3]. 另一方面, 切换系统是一类重要的混杂系统, 这类系统稳定控制问题的研究已经取得了丰硕成果^[4-7]. 如果一个组合系统的每个子系统都是切换系统, 则称之为切换组合系统. 这是一类新型的控制系统, 有着广泛的实际背景, 比如进行飞行表演的多架飞机的转向系统和十字路口的交通信号灯组等都是切换组合系统的具体实例. 有关切换组合系统控制问题的研究, 文献 [8-9] 利用共

同 Lyapunov 函数方法和多 Lyapunov 函数方法给出了线性切换组合系统的分散切换律设计, 但关于非线性切换组合系统镇定问题的研究结果却很少见. 文献 [10] 提出了切换模糊组合系统的模型, 分别利用单 Lyapunov 函数和多 Lyapunov 函数方法给出了切换模糊组合系统的分散切换律设计, 并给出了在分散控制器下的镇定条件, 但文中没有考虑系统存在时滞情况下的镇定问题.

对于存在时滞的非线性切换组合系统, 如果互联子系统系统中的每个切换子系统采用模糊 T-S 模型建模, 则称这类系统为切换模糊时滞组合系统. 本文主要研究状态和互联项同时具有时滞的切换模糊组合系统的稳定控制问题, 提出了切换模糊时滞组合系统模型,

收稿日期: 2009-12-16; 修回日期: 2010-04-02.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61074014); 辽宁省自然科学基金项目(20102093, 20092195); 辽宁省博士启动基金项目(20101047); 辽宁省教育厅创新团队项目(LT2010050).

作者简介: 刘毅(1969-), 男, 教授, 博士, 从事切换系统、智能控制等研究; 孙丽颖(1972-), 女, 副教授, 博士, 从事电力系统非线性控制、鲁棒控制的研究.

并利用多 Lyapunov 函数方法, 给出了使系统渐近稳定的时滞相关条件和分散切换律设计. 最后通过数值仿真例子验证了结论的有效性.

2 问题描述

考虑由 N 个子系统互联而成的非线性组合系统, 其中第 k 个互联子系统由 M_k 个子系统相互切换产生. 系统模型描述如下:

$$\begin{aligned} \dot{x}_k(t) = & f_{1\sigma_k}^k(x_k(t)) + f_{2\sigma_k}^k(x_k(t - d_{\sigma_k}(t))) + \\ & g_{\sigma_k}^k(x_k(t))u_{\sigma_k}^k(t) + \sum_{h=1, h \neq k}^N [f_{1h\sigma_k}^k(x_h(t)) + \\ & f_{2dh\sigma_k}^k(x_h(t - d_{\sigma_k}(t)))]. \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $x_k(t) \in R^n$ 为第 k 个互联子系统的状态向量, $k \in \underline{N} = \{1, 2, \dots, N\}$; $\sigma_k \in \underline{M}_k = \{1, 2, \dots, M_k\}$ 为切换信号, 是依赖于时间或状态的分段常值函数; $u_{\sigma_k}^k(t) \in R^{q_k}$ 为控制向量; $f_{1\sigma_k}^k(x_k(t))$, $f_{2\sigma_k}^k(x_k(t))$, $g_{\sigma_k}^k(x_k(t))$, $f_{1h\sigma_k}^k(x_h(t))$, $f_{2dh\sigma_k}^k(x_h(t))$ 为非线性函数; $f_{1h\sigma_k}^k(x_h(t))$ 和 $f_{2dh\sigma_k}^k(x_h(t))$ 为第 h 与第 k 个互联子系统之间的关联项; $d_{\sigma_k}(t)$ 为时滞时间, 且 $|\dot{d}_{\sigma_k}(t)| \leq d < 1$.

利用 T-S 模型在合适的工作点对系统 (1) 进行局部线性化, 可得

$$\begin{aligned} R_{k\sigma_k}^i : \text{if } z_1^k(t) \text{ is } M_{\sigma_k 1}^i \dots \text{ and } z_p^k(t) \text{ is } M_{\sigma_k p}^i, \text{ then} \\ \dot{x}_k(t) = A_{\sigma_k i}^k x_k(t) + A_{d\sigma_k i}^k x_k(t - d_{\sigma_k}(t)) + \\ B_{\sigma_k i}^k u_{\sigma_k}^k(t) + \sum_{h=1, h \neq k}^N [R_{h\sigma_k i}^k x_h(t) + \\ R_{dh\sigma_k i}^k x_h(t - d_{\sigma_k}(t))], \\ x_k(t) = \Psi(t), t \in [-\tau, 0], 0 \leq d_{\sigma_k}(t) \leq \tau. \end{aligned} \quad (2)$$

其中: $z(t) \in R^p$ 为模糊前件变量, 可以是系统的可测变量或状态变量; $A_{\sigma_k i}^k$, $A_{d\sigma_k i}^k$, $B_{\sigma_k i}^k$, $R_{h\sigma_k i}^k$ 和 $R_{dh\sigma_k i}^k$ 为适当维数的常数矩阵; $R_{h\sigma_k i}^k$ 和 $R_{dh\sigma_k i}^k$ 表示第 h 与第 k 个互联子系统之间的关联项.

采用单点模糊化、乘积推理及平均加权反模糊化, 可得到系统的全局模糊模型为

$$\begin{aligned} \dot{x}_k(t) = & \sum_{i=1}^{r_{\sigma_k}} \mu_{\sigma_k i}^k(z(t)) \left\{ A_{\sigma_k i}^k x_k(t) + A_{d\sigma_k i}^k x_k(t - \right. \\ & d_{\sigma_k}(t)) + B_{\sigma_k i}^k u_{\sigma_k}^k(t) + \sum_{h=1, h \neq k}^N [R_{h\sigma_k i}^k x_h(t) + \\ & R_{dh\sigma_k i}^k x_h(t - d_{\sigma_k}(t))] \left. \right\}. \end{aligned} \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} \mu_{\sigma_k i}^k(z(t)) = & \prod_{j=1}^p M_{\sigma_k i j}^k(z_j(t)) / \sum_{i=1}^{r_{\sigma_k}} \prod_{j=1}^p M_{\sigma_k i j}^k(z_j(t)), \\ 0 \leq & \mu_{\sigma_k i}^k(z(t)) \leq 1, \sum_{i=1}^{r_{\sigma_k}} \mu_{\sigma_k i}^k(z(t)) = 1, \end{aligned}$$

$M_{\sigma_k i j}^k(z_j(t))$ 表示 $z_j(t)$ 属于模糊集 $M_{\sigma_k i j}^k$ 的隶属度; r_{σ_k} 为第 k 个互联子系统中第 σ_k 个切换子系统的模糊规则数.

3 主要结果

对于切换模糊时滞组合系统 (3), 很难保证存在使其稳定的分散状态反馈控制器. 本文假定每个切换子系统具有有限个备选的状态反馈控制器, 并且每个单一的控制均不能保证其对应的子系统渐近稳定. 要解决的问题是, 设计依赖于系统状态的分散切换律

$$\sigma(x(t)) = [\sigma_1(x_1(t)) \quad \sigma_2(x_2(t)) \quad \dots \quad \sigma_N(x_N(t))]^T, \quad (4)$$

使得系统 (3) 渐近稳定.

假设系统 (3) 的备选控制器中, 第 σ_k 个切换子系统的模糊状态反馈控制器为

$$u_{\sigma_k}^k(t) = - \sum_{i=1}^{r_{\sigma_k}} \mu_{\sigma_k i}^k(z(t)) K_{\sigma_k i}^k x_k(t), \quad (4)$$

其中 $K_{\sigma_k i}^k$ 为反馈增益矩阵.

将式 (4) 代入 (3), 得闭环系统

$$\begin{aligned} \dot{x}_k(t) = & \sum_{i=1}^{r_{\sigma_k}} \sum_{j=1}^{r_{\sigma_k}} \mu_{\sigma_k i}^k(z(t)) \mu_{\sigma_k j}^k(z(t)) \left\{ [A_{\sigma_k i}^k - \right. \\ & B_{\sigma_k i}^k K_{\sigma_k j}^k] x_k(t) + A_{d\sigma_k i}^k x_k(t - d_{\sigma_k}(t)) + \\ & \left. \sum_{h=1, h \neq k}^N [R_{h\sigma_k i}^k x_h(t) + R_{dh\sigma_k i}^k x_h(t - d_{\sigma_k}(t))] \right\}. \end{aligned} \quad (5)$$

引理 1 [11] 给定适当维数的矩阵 X 和 Y , 则对于适当维数的正定矩阵 S 及任意常数 $\varepsilon > 0$, 有不等式 $X^T Y + Y^T X \leq \varepsilon X^T S X + \varepsilon^{-1} Y^T S^{-1} Y$ 成立.

定理 1 假设存在同时非负或同时非正的常数 $\beta_{k\sigma_k \eta_k}^k$ ($k = 1, 2, \dots, N$, $\sigma_k, \eta_k = 1, 2, \dots, M_k$ 且 $\eta_k \neq \sigma_k$) 及对称正定矩阵组 $P_{\sigma_k}^k, W_{\sigma_k}^k, Q_{\sigma_k}^k$, 使得矩阵不等式组

$$\begin{bmatrix} \psi_{\sigma_k i j}^{k11} + \sum_{\eta_k=1, \eta_k \neq \sigma_k}^{M_k} \beta_{k\sigma_k \eta_k}^k (P_{\eta_k}^k - P_{\sigma_k}^k) & * \\ \psi_{\sigma_k i j}^{k21} & \psi_{\sigma_k i j}^{k22} \end{bmatrix} < 0 \quad (6)$$

成立. 其中

$$\begin{aligned} \psi_{\sigma_k i j}^{k11} = & (A_{\sigma_k i}^k - B_{\sigma_k i}^k K_{\sigma_k j}^k)^T P_{\sigma_k}^k + P_{\sigma_k}^k (A_{\sigma_k i}^k - \\ & B_{\sigma_k i}^k K_{\sigma_k j}^k) + \tau (A_{\sigma_k i}^k - B_{\sigma_k i}^k K_{\sigma_k j}^k)^T W_{\sigma_k}^k \times \\ & (A_{\sigma_k i}^k - B_{\sigma_k i}^k K_{\sigma_k j}^k) + 2(N-1) P_{\sigma_k}^k P_{\sigma_k}^k + \\ & 2(N-1) \tau^2 (A_{\sigma_k i}^k - B_{\sigma_k i}^k K_{\sigma_k j}^k)^T W_{\sigma_k}^k W_{\sigma_k}^k \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (A_{\sigma_k i}^k - B_{\sigma_k i}^k K_{\sigma_k j}^k) + 3 \sum_{h=1, h \neq k}^N (R_{k\sigma_k i}^h)^T R_{k\sigma_k i}^h + \\
 & Q_{\sigma_k}^k + \tau \sum_{m=1, m \neq k}^N \sum_{n=1, n \neq k}^N (R_{k\sigma_k i}^m)^T W_{\sigma_k}^k R_{k\sigma_k i}^n, \\
 & \psi_{\sigma_k ij}^{k21} = \\
 & (A_{d\sigma_k i}^k)^T P_{\sigma_k}^k + \tau (A_{d\sigma_k i}^k)^T W_{\sigma_k}^k (A_{\sigma_k i}^k - B_{\sigma_k i}^k K_{\sigma_k j}^k) + \\
 & \tau \sum_{m=1, m \neq k}^N \sum_{n=1, n \neq k}^N (R_{dk\sigma_k i}^m)^T W_{\sigma_k}^k R_{k\sigma_k i}^n, \\
 & \psi_{\sigma_k ij}^{k22} = \\
 & (A_{d\sigma_k i}^k)^T W_{\sigma_k}^k A_{d\sigma_k i}^k - (1-d)Q_{\sigma_k}^k + \\
 & 2(N-1)\tau^2 (A_{d\sigma_k i}^k)^T W_{\sigma_k}^k W_{\sigma_k}^k A_{d\sigma_k i}^k + \\
 & \sum_{h=1, h \neq k}^N [2(R_{dk\sigma_k i}^h)^T R_{dk\sigma_k i}^h + (R_{k\sigma_k i}^h)^T R_{k\sigma_k i}^h] + \\
 & \tau \sum_{m=1, m \neq k}^N \sum_{n=1, n \neq k}^N (R_{dk\sigma_k i}^m)^T W_{\sigma_k}^k R_{dk\sigma_k i}^n.
 \end{aligned}$$

则在备选控制器(4)下, 存在分散切换律使得系统(3)渐近稳定.

证明 不失一般性, 假设 $\beta_{\sigma_k \eta_k}^k \geq 0$, 则显然对于任意 $x_k(t) \in R^n \setminus \{0\}$, 存在一个 $\sigma_k \in M_k$, 使得

$$x_k^T(t)(P_{\eta_k} - P_{\sigma_k})x_k(t) \geq 0, \forall \eta_k \in \underline{M}_k,$$

从而由矩阵不等式(6)可得

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} x_k(t) \\ x_k(t-d_{\sigma_k}(t)) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \psi_{\sigma_k ij}^{k11} & * \\ \psi_{\sigma_k ij}^{k21} & \psi_{\sigma_k ij}^{k22} \end{bmatrix} \times \\
 & \begin{bmatrix} x_k(t) \\ x_k(t-d_{\sigma_k}(t)) \end{bmatrix} < 0. \tag{7}
 \end{aligned}$$

令 $\Omega_{\sigma_k}^k = \{x_k(t) \in R^n | x_k^T(t)(P_{\eta_k} - P_{\sigma_k})x_k(t) \geq 0, \forall x_k \neq 0\}$, 则对于任意 $k \in \underline{N}$, 有 $\bigcup_{\sigma_k} \Omega_{\sigma_k}^k = R^n \setminus \{0\}$. 构造集合

$$\begin{aligned}
 & \tilde{\Omega}_1^k = \Omega_1^k, \dots, \tilde{\Omega}_{M_k}^k = \Omega_{M_k}^k - \bigcup_{i=1}^{M_k-1} \tilde{\Omega}_i^k, \text{ 则显然有 } \bigcup_{i=1}^{M_k} \tilde{\Omega}_i^k \\
 & = R^n \setminus \{0\}, \text{ 且 } \tilde{\Omega}_i^k \cap \tilde{\Omega}_j^k = \Phi, i \neq j. \text{ 设计切换律} \\
 & \sigma_k(x_k(t)) = i, x_k(t) \in \tilde{\Omega}_i^k. \tag{8}
 \end{aligned}$$

取 Lyapunov 函数

$$\begin{aligned}
 V(x(t)) = & \sum_{k=1}^N \left[x_k^T(t) P_{\sigma_k}^k x_k(t) + \right. \\
 & \int_{-\tau}^0 \int_{t+\theta}^t \dot{x}_k^T(s) W_{\sigma_k}^k \dot{x}_k(s) ds d\theta + \\
 & \left. \int_{t-d_{\sigma_k}(t)}^t x_k^T(s) Q_{\sigma_k}^k x_k(s) ds \right], \tag{9}
 \end{aligned}$$

考虑引理1, 沿系统(3)的轨线对时间 t 的导数为

$$\begin{aligned}
 \dot{V}(x(t)) = & \\
 & \sum_{k=1}^N [2x_k^T P_{\sigma_k}^k \dot{x}_k(t) + \tau \dot{x}_k^T(t) W_{\sigma_k}^k \dot{x}_k(t) -
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \int_{-\tau}^0 \dot{x}_k^T(t+\theta) W_{\sigma_k}^k \dot{x}_k(t+\theta) d\theta + \\
 & x_k^T(t) Q_{\sigma_k}^k x_k(t) - (1-d_{\sigma_k}(t)) \times \\
 & x_k^T(t-d_{\sigma_k}(t)) Q_{\sigma_k}^k x_k(t-d_{\sigma_k}(t))] \leq \\
 & \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{r_{\sigma_k}} \sum_{j=1}^{r_{\sigma_k}} \mu_{\sigma_k i}^k(z(t)) \mu_{\sigma_k j}^k(z(t)) \times \\
 & \begin{bmatrix} x_k(t) \\ x_k(t-d_{\sigma_k}(t)) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \psi_{\sigma_k ij}^{k11} & * \\ \psi_{\sigma_k ij}^{k21} & \psi_{\sigma_k ij}^{k22} \end{bmatrix} \times \\
 & \begin{bmatrix} x_k(t) \\ x_k(t-d_{\sigma_k}(t)) \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

由分散切换律设计和式(7)可知, $\dot{V}(x(t)) < 0$. 因此, 由多 Lyapunov 函数技术可知系统(3)是渐近稳定的.

当 $\beta_{\sigma_k \eta_k}^k \leq 0$ 时, 同理可证.

综上所述, 定理1成立. \square

4 仿真例子

考虑由2个子系统互联而成, 每个互联子系统又由2个模糊系统切换而产生的切换模糊时滞组合系统

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1(t) = & \begin{bmatrix} \dot{x}_1^1(t) \\ \dot{x}_1^2(t) \end{bmatrix} = \\
 & \sum_{i=1}^2 \mu_{\sigma_1 i}^1(x_1^1(t)) [A_{\sigma_1 i}^1 x_1(t) + A_{d\sigma_1 i}^1 x_1(t-d_{\sigma_1}(t)) + \\
 & B_{\sigma_1 i}^1 u_{\sigma_1}^1(t) + R_{2\sigma_1 i}^1 x_2(t) + R_{d2\sigma_1 i}^1 x_2(t-d_{\sigma_1}(t))], \\
 \dot{x}_2(t) = & \begin{bmatrix} \dot{x}_2^1(t) \\ \dot{x}_2^2(t) \end{bmatrix} = \\
 & \sum_{i=1}^2 \mu_{\sigma_2 i}^2(x_1^2(t)) [A_{\sigma_2 i}^2 x_2(t) + A_{d\sigma_2 i}^2 x_2(t-d_{\sigma_2}(t)) + \\
 & B_{\sigma_2 i}^2 u_{\sigma_2}^2(t) + R_{1\sigma_2 i}^2 x_1(t) + R_{d1\sigma_2 i}^2 x_1(t-d_{\sigma_2}(t))]. \tag{10}
 \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned}
 A_{11}^1 = & \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 2.5 \end{bmatrix}, A_{12}^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1.3 \end{bmatrix}, \\
 A_{21}^1 = & \begin{bmatrix} 1.1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, A_{22}^1 = \begin{bmatrix} 1.5 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
 A_{d11}^1 = & \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.25 \end{bmatrix}, A_{d12}^1 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.13 \end{bmatrix}, \\
 A_{d21}^1 = & \begin{bmatrix} 0.11 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}, A_{d22}^1 = \begin{bmatrix} 0.15 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}, \\
 A_{11}^2 = & \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix}, A_{12}^2 = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 1.5 \end{bmatrix}, \\
 A_{21}^2 = & \begin{bmatrix} 1.2 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, A_{22}^2 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},
 \end{aligned}$$

$$A_{d11}^2 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 0.05 \end{bmatrix}, A_{d12}^2 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 0.15 \end{bmatrix},$$

$$A_{d21}^2 = \begin{bmatrix} 0.12 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}, A_{d22}^2 = \begin{bmatrix} 0.02 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix},$$

$$B_{\sigma_k i}^k = R_{h\sigma_k i}^k = R_{dh\sigma_k i}^k = I,$$

$$\sigma_k = 1, 2, k = 1, 2, i = 1, 2, h \neq k.$$

隶属度函数为

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

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

$$\mu_{11}^2(x_1^2(t)) = \mu_{21}^2(x_1^2(t)) = 1 - 1/(1 + e^{-6x_1^2(t)}),$$

$$\mu_{12}^2(x_1^2(t)) = \mu_{22}^2(x_1^2(t)) = 1/(1 + e^{-6x_1^2(t)}).$$

设计分散切换模糊状态反馈控制器

$$u_{\sigma_k}^k(t) = - \sum_{i=1}^2 \mu_{\sigma_k i}^k(x_1^k(t)) K_{\sigma_k i}^k x_k(t),$$

$$\sigma_k = 1, 2, k = 1, 2.$$

控制器增益矩阵为

$$K_{11}^1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 20.5 \end{bmatrix}, K_{12}^1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 28.5 \end{bmatrix},$$

$$K_{21}^1 = \begin{bmatrix} 29.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}, K_{22}^1 = \begin{bmatrix} 21.5 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix},$$

$$K_{11}^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 26.5 \end{bmatrix}, K_{12}^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 22.5 \end{bmatrix},$$

$$K_{21}^2 = \begin{bmatrix} 22.2 & 0 \\ 0 & 0.2 \end{bmatrix}, K_{22}^2 = \begin{bmatrix} 23.2 & 0 \\ 0 & 0.2 \end{bmatrix}.$$

显然, 式(10)中2个切换子系统任意组合构成的组合系统均不是渐近稳定的. 利用Schur补性质和矩阵变换方法, 将矩阵不等式(6)变换为LMI, 利用Matlab求解, 得正定矩阵

$$P_1^1 = \begin{bmatrix} 4.0101 & 0 \\ 0 & 2.2488 \end{bmatrix}, P_2^1 = \begin{bmatrix} 2.7423 & 0 \\ 0 & 3.1449 \end{bmatrix},$$

$$P_1^2 = \begin{bmatrix} 3.1331 & 0 \\ 0 & 2.5179 \end{bmatrix}, P_2^2 = \begin{bmatrix} 2.0321 & 0 \\ 0 & 3.6577 \end{bmatrix}.$$

令

$$\Omega_1^1 = \{x_1 \in R^2 | x_1^T (P_2^1 - P_1^1) x_1 \geq 0, x \neq 0\},$$

$$\Omega_2^1 = \{x_1 \in R^2 | x_1^T (P_1^1 - P_2^1) x_1 \geq 0, x \neq 0\},$$

$$\Omega_1^2 = \{x_2 \in R^2 | x_2^T (P_2^2 - P_1^2) x_2 \geq 0, x \neq 0\},$$

$$\Omega_2^2 = \{x_2 \in R^2 | x_2^T (P_1^2 - P_2^2) x_2 \geq 0, x \neq 0\}.$$

则显然有 $\Omega_1^1 \cup \Omega_2^1 = R^2 \setminus \{0\}$, $\Omega_1^2 \cup \Omega_2^2 = R^2 \setminus \{0\}$. 给出分散切换律

$$\sigma_1(x_1(t)) = \begin{cases} 1, & x_1(t) \in \Omega_1^1; \\ 2, & x_1(t) \in \Omega_2^1 \setminus \Omega_1^1. \end{cases}$$

$$\sigma_2(x_2(t)) = \begin{cases} 1, & x_2(t) \in \Omega_2^2; \\ 2, & x_2(t) \in \Omega_1^2 \setminus \Omega_2^2. \end{cases} \quad (11)$$

仿真结果(见图1)表明, 切换模糊时滞组合系统(10)在所设计的分散切换律下是渐近稳定的.

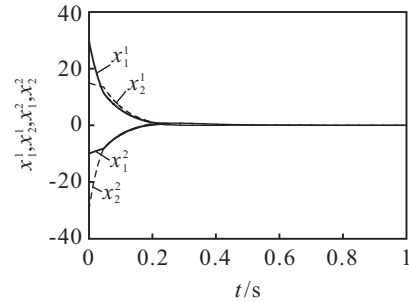


图1 状态曲线

5 结 论

本文研究了切换模糊时滞组合系统的分散控制问题. 基于多Lyapunov函数方法, 给出了分散切换律设计, 并给出了使系统渐近稳定的时滞相关的矩阵不等式条件. 最后以仿真例子验证了所得结论的有效性.

参考文献(References)

- [1] Fu L C. Robust adaptive decentralized control of robot manipulators[J]. IEEE Trans Automatic Control, 1992, 37(1): 106-110.
- [2] Wu H S. Decentralized adaptive robust control for a class of large scale systems with uncertainties in the interconnections[J]. Int J Control, 2003, 76(3): 253-265.
- [3] Tong S C, Li H X, Chen G R. Adaptive fuzzy decentralized control for a class of large-scale nonlinear systems[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, Part B, 2004, 34(1): 770-775.
- [4] Sun Z D. Combined stabilizing strategies for switched linear systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2006, 51(4): 666-674.
- [5] Zhao J, Spong M W. Hybrid control for global stabilization of the cart-pendulum system[J]. Automatica, 2001, 37(12): 1941-1951.
- [6] Cheng D Z, Guo L, Lin Y D, et al. Stabilization of switched linear systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2005, 50(5): 661-666.
- [7] Tanaka K, Iwasaki M, Wang H O. Switching control of an R/C hovercraft: Stabilization and smooth switching[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, Part B, 2001, 31(6): 853-863.
- [8] 孙洪飞, 赵军. 一类切换组合系统的分散反馈镇定[J]. 自动化学报, 2003, 29(1): 149-153.
(Sun H F, Zhao J. Decentralized hybrid feedback stabilization for a class of switched composite system[J]. Acta Automatica Sinica, 2003, 29(1): 149-153.)