第 24 卷 第 7 期 控 制 与 决 策 2009 年 7 月
Vol. 24 No. 7 Control and Decision Jul. 2009

文章编号: 1001-0920(2009)07-1070-04

一类不确定离散切换模糊时滞系统的鲁棒非脆弱控制

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

摘 要: 针对一类不确定离散切换模糊时滞系统,研究了在控制器增益存在摄动情况下的稳定性问题. 利用切换技术和多 Lyapunov 函数方法,并以矩阵不等式形式给出了非脆弱状态反馈控制器存在的充分条件和切换律设计. 最后通过数值仿真算例验证了设计方法的有效性和可行性.

关键词: 切换模糊系统; 不确定时滞系统; 非脆弱控制; 离散系统; Lyapunov 函数
中图分类号: TP273 **文献标识码**: A

Robust non-fragile control for a class of uncertain discrete switched fuzzy systems with time-delay

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

Abstract: This paper investigates the problems of non-fragile control for a class of uncertain discrete switched fuzzy control systems with time-delay. A sufficient condition for the existence of non-fragile state-feedback controllers and the switching law are proposed based on switching and multiple Lyapunov functions technique. The corresponding results are all formulated in terms of matrix inequalities. Finally, an illustrative example shows the feasibility and the effectiveness of the proposed approach.

Key words: Switched fuzzy systems; Uncertain time-delay systems; Non-fragile control; Discrete systems; Lyapunov functions

1 引 言

实际控制系统中,A/D 转换、数据处理、传输和执行机构等都会带来一定的延时,同时各种误差、外界干扰的影响也是普遍存在的,从而使系统存在着时滞和不确定性,而时滞和不确定往往会直接影响系统的稳定性. 近年来人们对不确定时滞系统的稳定性问题进行了广泛的研究[1-3]. 切换模糊系统是采用模糊方法建模,同时系统中又含有离散的切换信号的新型控制系统. 关于切换模糊系统的研究取得了一些成果[4,5].

系统中使用的控制器由于本身性能衰减、计算机的内存、字长的限制和转换误差、外界干扰等原因,不可避免地存在着控制器参数摄动. 目前关于非脆弱控制器设计问题的研究取得了丰硕成果[6-10]. 但关于不确定离散切换模糊时滞系统非脆弱控制问题的研究尚未见报道.

与一般切换系统的研究情形一样,各个子系统都不稳定时,仍可能通过适当的切换律设计而获得稳定[3],从而增强了系统稳定条件的可解性.

本文针对一类不确定离散切换模糊时滞系统,考虑在控制器增益存在摄动的情况下,给出非脆弱状态反馈控制器存在的充分条件和切换策略. 最后的仿真例子表明了方法的有效性和可行性.

2 问题描述

考虑子系统全是不确定模糊时滞系统的切换系统,即

R^i_σ: if $z_1(k)$ is $M^i_{\sigma 1}$ $\cdots$ and $z_p(k)$ is $M^i_{\sigma p}$,

then $x(k+1)$ =

收稿日期: 2008-04-14; **修回日期**: 2008-10-01.
基金项目: 国家自然科学基金项目(60874024, 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、智能控制系统的研究; 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.

$$(A_{\sigma} + \Delta A_{\sigma})x(k) + (A_{d\sigma i} + \Delta A_{d\sigma i})x(k-d) + (B_{\sigma} + \Delta B_{\sigma})u_{\sigma}(k),$$
$$x(k) = \Psi(k),\ k \in [-d,0],\ i = 1,2,\cdots,N_{\sigma}. \quad (1)$$

其中：$M_{\sigma j}^{i}$ 是模糊集合；$z(k) \in R^{p}$ 是模糊前件变量；$x(k) \in R^{n}$，$u_{\sigma}(k) \in R^{m}$；A_{σ}，$A_{d\sigma i}$，B_{σ} 是适当维数的常数矩阵；ΔA_{σ}，$\Delta A_{d\sigma i}$，ΔB_{σ} 是适当维数的时变矩阵，表示系统中的不确定；d 为延时时间；$\Psi(k)$ 表示状态变量的初始函数；$\sigma = \sigma(x(k)) \in M = \{1,2,\cdots,l\}$ 是分段常值函数，表示依赖于状态的切换信号. 设 Ω_1，Ω_2，$\cdots$，Ω_l 是 R^{n} 的一个分割，即 $\bigcup_{i=1}^{l}\Omega_i = R^{n}\backslash\{0\}$，且 $\Omega_i \cap \Omega_j = \Phi$，$i \neq j$，切换信号可完全由函数

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

来刻画，即当 $x(k) \in \Omega_r$ 时 $v_r(x(k)) = 1$. 利用函数 $v_r(x(k))$，整个切换模糊系统(1)可描述为

$$x(k+1) = \sum_{r=1}^{l}\sum_{i=1}^{N_r} v_r(x(k))\mu_{ri}(z(k))[(A_{ri} + \Delta A_{ri})x(k) + (A_{dri} + \Delta A_{dri})x(k-d) + (B_{ri} + \Delta B_{ri})u_r(k)]. \quad (2)$$

其中

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

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

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

对于系统中的不确定作如下假设：

假设 1　本文所考虑的不确定矩阵是模有界的，即

$$[\Delta A_{ri}\quad \Delta B_{ri}\quad \Delta A_{dri}] = D_{ri}F_{ri}(k)[E_{1ri}\quad E_{2ri}\quad E_{dri}].$$

其中：D_{ri} 和 E_{1ri}，E_{2ri}，E_{dri} 是具有适当维数的已知常数矩阵；$F_{ri}(k)$ 是未知的时变矩阵，且满足 $F_{ri}^{\mathrm{T}}(k)F_{ri}(k) \leq I$，$r \in M$，$i = 1,2,\cdots,N_r$.

对于给定的不确定离散切换模糊时滞系统(2)，当控制器增益存在摄动时，状态反馈控制器如下：

$$u_r(k) = -\sum_{i=1}^{N_r}\mu_{ri}(z(k))(K_{ri} + \Delta K_{ri})x(k). \quad (3)$$

其中：K_{ri} 为控制器增益，ΔK_{ri} 为控制器增益摄动. 假设 ΔK_{ri} 满足下面的假定条件：

假设 2　本文考虑控制器增益摄动满足

$$\Delta K_{ri} = H_{ri}R_{ri}(k)G_{ri}. \quad (4)$$

其中：H_{ri} 和 G_{ri} 是具有适当维数的已知常数矩阵；$R_{ri}(t)$ 是未知的时变矩阵，且满足 $R_{ri}^{\mathrm{T}}(k)R_{ri}(k) \leq I$，$r \in M$，$i = 1,2,\cdots,N_r$.

将式(3)代入(2)，得闭环系统方程

$$x(k+1) = \sum_{r=1}^{l}\sum_{i=1}^{N_r}\sum_{j=1}^{N_r} v_r(x(k))\mu_{ri}(z(k))\mu_{rj}(z(k)) \times [(\overline{A_{ri}} - \widetilde{B}_{ri}\overline{K_{rj}})x(k) + \overline{A_{dri}}x(k-d)]. \quad (5)$$

其中

$$\overline{A_{ri}} = A_{ri} + \Delta A_{ri},\ \widetilde{B}_{ri} = B_{ri} + \Delta B_{ri},$$
$$\overline{K_{rj}} = K_{rj} + \Delta K_{rj},\ \overline{A_{dri}} = A_{dri} + \Delta A_{dri}.$$

3　主要结果

本节给出控制器增益存在摄动的不确定离散切换模糊时滞系统的稳定条件. 应用多 Lyapunov 函数方法给出切换律设计，使系统在原点渐近稳定. 为了定理的证明先给出如下引理：

引理 1[11]　对于具有适当维数的矩阵 Q，H 和 E，其中 Q 是对称阵，则对所有满足 $F^{\mathrm{T}}(k)F(k) \leq I$ 的矩阵 $F(k)$，有 $Q + HF(k)E + E^{\mathrm{T}}F(k)^{\mathrm{T}}H^{\mathrm{T}} < 0$，当且仅当存在某个 $\varepsilon > 0$，使得 $Q + \varepsilon^{2}HH^{\mathrm{T}} + \varepsilon^{-2}E^{\mathrm{T}}E < 0$.

定理 1　假设存在同时非负或同时非正实数 $\beta_{r\lambda}(r,\lambda = 1,2,\cdots,l)$，及一组正数 ε_{1rij}，ε_{2rij}，ε_{3rij}，ε_{4rij}，使得矩阵不等式

$$\begin{bmatrix} \Theta_{11} + \sum_{\lambda=1,\lambda\neq r}^{l}\beta_{r\lambda}(P_\lambda - P_r) & * & * & * & * \\ \Theta_{21} & \Theta_{22} & * & * & * \\ \Theta_{31} & 0 & \Theta_{33} & * & * \\ \Theta_{41} & 0 & 0 & \Theta_{44} & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \Theta_{55} \end{bmatrix} < 0 \quad (6)$$

有对称正定解矩阵 P_r，S_r. 其中

$$\Theta_{11} = -2P_r + 2S_r + \overline{G}_{rij},$$
$$\Theta_{21} = E_{1ri} - \alpha_{rj}E_{2ri}B_{rj}^{\mathrm{T}}P_r,$$
$$\Theta_{22} = -\varepsilon_{1rij}^{2}I + \varepsilon_{3rij}^{2}E_{2ri}H_{rj}(E_{2ri}H_{rj})^{\mathrm{T}},$$
$$\Theta_{31} = E_{1rj} - \alpha_{ri}E_{2rj}B_{ri}^{\mathrm{T}}P_r,$$
$$\Theta_{33} = -\varepsilon_{1rij}^{2}I + \varepsilon_{3rij}^{2}E_{2rj}H_{ri}(E_{2rj}H_{ri})^{\mathrm{T}},$$
$$\Theta_{41} = A_{ri} - \alpha_{rj}B_{ri}B_{rj}^{\mathrm{T}}P_r + A_{rj} - \alpha_{ri}B_{rj}B_{ri}^{\mathrm{T}}P_r,$$
$$\Theta_{44} = -P_r^{-1} + \varepsilon_{1rij}^{2}\overline{D_{rij}} + \widetilde{H}_{rij},$$
$$\Theta_{55} = \begin{bmatrix} -2S_r + \varepsilon_{2rij}^{2}\overline{E}_{drij} & * \\ A_{dri} + A_{drj} & -P_r^{-1} + \varepsilon_{2rij}^{2}\overline{D_{rij}} \end{bmatrix},$$
$$\overline{D_{rij}} = D_{ri}D_{ri}^{\mathrm{T}} + D_{rj}D_{rj}^{\mathrm{T}},$$
$$\overline{E}_{drij} = E_{dri}^{\mathrm{T}}E_{dri} + E_{drj}^{\mathrm{T}}E_{drj},$$

$$\overline{G}_{rij} = \varepsilon_{3rij}^2 (G_{ri}^{\mathrm{T}} G_{ri} + G_{rj}^{\mathrm{T}} G_{rj}) + \varepsilon_{4rij}^2 (G_{ri}^{\mathrm{T}} G_{ri} + G_{rj}^{\mathrm{T}} G_{rj}),$$

$$\widetilde{H}_{rij} = \varepsilon_{4rij}^2 [(B_{rj} H_{ri})(B_{rj} H_{ri})^{\mathrm{T}} + (B_{ri} H_{rj})(B_{ri} H_{rj})^{\mathrm{T}}],$$

则存在非脆弱状态反馈控制器(3) 和切换律 $\sigma = \sigma(x(k))$,其中

$$K_{ri} = \alpha_{ri} B_{ri}^{\mathrm{T}} P_r \tag{7}$$

使得系统(1) 在原点是渐近稳定的. * 表示对称位置矩阵块的转置.

证明 选取 Lyapunov 函数

$$V(x(k)) = x^{\mathrm{T}}(k) P_r x(k) + \sum_{g=1}^{d} x^{\mathrm{T}}(k-g) S_r x(k-g),$$

则 $V(x(k))$ 的差分为

$$\begin{aligned}
&\Delta V(x(k)) = \\
&x^{\mathrm{T}}(k+1) P_r x(k+1) + \\
&\sum_{g=1}^{d} x^{\mathrm{T}}(k-g+1) S_r x(k-g+1) - \\
&x^{\mathrm{T}}(k) P_r x(k) - \sum_{g=1}^{d} x^{\mathrm{T}}(k-g) S_r x(k-g) = \\
&\sum_{r=1}^{l} \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_r} \sum_{k=1}^{N_r} \sum_{h=1}^{N_r} v_r(x(k)) \mu_{ri}(z(k)) \mu_{rj}(z(k)) \times \\
&\mu_{rk}(z(k)) \mu_{rh}(z(k)) \{ x^{\mathrm{T}}(k) [(\overline{A}_{ri} - \widetilde{B}_{ri} \overline{K}_{rj})^{\mathrm{T}} \times \\
&P_r (\overline{A}_{rk} - \widetilde{B}_{rk} \overline{K}_{rh}) - P_r] x(k) + \\
&2 x^{\mathrm{T}}(k) [(\overline{A}_{ri} - \widetilde{B}_{ri} \overline{K}_{rj})^{\mathrm{T}} P_r \overline{A}_{drk} x(k-d) + \\
&x^{\mathrm{T}}(k-d) \overline{A}_{dri}^{\mathrm{T}} P_r \overline{A}_{drk} x(k-d) + x^{\mathrm{T}}(k) S_r x(k) - \\
&x^{\mathrm{T}}(k-d) S_r x(k-d) \} \leq \\
&\frac{1}{2} \sum_{r=1}^{l} \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_r} v_r(x(k)) \mu_{ri}(z(k)) \mu_{rj}(z(k)) \times \\
&\begin{bmatrix} x(k) \\ x(k-d) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} \Psi_{rij} & 0 \\ 0 & \mathrm{L}_{rij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ x(k-d) \end{bmatrix}.
\end{aligned} \tag{8}$$

其中

$$\Psi_{rij} = (\overline{A}_{ri} - \widetilde{B}_{ri} \overline{K}_{rj} + \overline{A}_{rj} - \widetilde{B}_{rj} \overline{K}_{ri})^{\mathrm{T}} P_r \times (\overline{A}_{ri} - \widetilde{B}_{ri} \overline{K}_{rj} + \overline{A}_{rj} - \widetilde{B}_{rj} \overline{K}_{ri}) - 2P_r + 2S_r,$$

$$\mathrm{L}_{rij} = (\overline{A}_{dri} + \overline{A}_{drj})^{\mathrm{T}} P_r (\overline{A}_{dri} + \overline{A}_{drj}) - 2S_r.$$

由式(8) 可知,若矩阵不等式

$$\begin{bmatrix} \Psi_{rij} & 0 \\ 0 & \mathrm{L}_{rij} \end{bmatrix} < 0 \tag{9}$$

成立,则有 $\Delta V(x(k)) < 0$.

应用 Schur 分解方法,并利用引理 1,可得不等式(9) 成立的充分条件是

$$\begin{bmatrix} \Theta_{11} & * & * & * & * \\ \Theta_{21} & \Theta_{22} & * & * & * \\ \Theta_{31} & 0 & \Theta_{33} & * & * \\ \Theta_{41} & 0 & 0 & \Theta_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \Theta_{55} \end{bmatrix} < 0. \tag{10}$$

不失一般性,假设 $\beta_{r\lambda} \geq 0$,显然对任意 $x(k) \in R^n \backslash \{0\}$,至少存在一个 $r \in M$ 使得 $x^{\mathrm{T}}(k)(P_\lambda - P_r)x(k) \geq 0$, $\forall \lambda \in M$,令

$$\Omega_r = \{ x(k) \in R^n \mid x^T(k)(P_\lambda - P_r)x(k) \geq 0, \ \forall x(k) \neq 0 \},$$

则 $\bigcup_r \Omega_r = R^n \backslash \{0\}$. 构造集合 $\widetilde{\Omega}_1 = \Omega_1, \cdots, \widetilde{\Omega}_r = \Omega_r - \bigcup_{i=1}^{r-1} \widetilde{\Omega}_i, \cdots$,显然有 $\bigcup_{i=1}^{l} \widetilde{\Omega}_i = R^n \backslash \{0\}$,且 $\widetilde{\Omega}_i \cap \widetilde{\Omega}_j = \Phi, i \neq j$.

构造切换律

$$\sigma(x(k)) = r, \ x(k) \in \widetilde{\Omega}_r. \tag{11}$$

由多 Lyapunov 函数方法和式(6) 可知,不等式(10) 成立,即有 $\Delta V(x(k)) < 0$, $\forall x(k) \neq 0$. 因此,对所设计的非脆弱状态反馈控制器和切换律,系统(1) 的闭环系统在原点是渐近稳定的.

当 $\beta_{r\lambda} \leq 0$ 时同理可证. 综上所述,定理成立. □

4 仿真例子

考虑不确定离散切换模糊时滞系统(1),其中

$$A_{11} = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.1 \\ 0.1 & 0.2 \end{bmatrix}, \ A_{12} = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.2 \\ 0.7 & 0.5 \end{bmatrix},$$

$$A_{21} = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.1 \\ 0.5 & 0.2 \end{bmatrix}, \ A_{22} = \begin{bmatrix} -0.4 & 0 \\ -0.1 & 0.1 \end{bmatrix},$$

$$B_{11} = \begin{bmatrix} 0.2 & -0.1 \\ 0.2 & 0 \end{bmatrix}, \ B_{12} = \begin{bmatrix} 0.3 & -0.2 \\ 0.1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_{21} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.3 \\ 0.3 & 0 \end{bmatrix}, \ B_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 \\ -0.2 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_{d11} = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.4 \\ 0.1 & 0.3 \end{bmatrix}, \ A_{d12} = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.5 \\ 0.7 & 0.1 \end{bmatrix},$$

$$A_{d21} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.6 \\ 0.6 & 0.1 \end{bmatrix}, \ A_{d22} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.4 \\ 0.2 & 0.1 \end{bmatrix},$$

$$D_{1j} = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 \\ 0.2 & 0 \end{bmatrix}, \ D_{2j} = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 \\ 0.1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$E_{11j} = \begin{bmatrix} 0 & 0.1 \\ 0.1 & 0 \end{bmatrix}, \ E_{12j} = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 \\ 0.3 & 0 \end{bmatrix},$$

$$E_{21j} = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 \\ 0.1 & 0 \end{bmatrix}, \ E_{22j} = \begin{bmatrix} 0 & 0.3 \\ 0.3 & 0 \end{bmatrix},$$

$$E_{d1j} = \begin{bmatrix} 0 & 0.1 \\ 0.2 & 0 \end{bmatrix}, \ E_{d2j} = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 \\ 0.1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$H_{1j} = H_{2j} = \begin{bmatrix} 0 & 0.3 \\ 0.3 & 0 \end{bmatrix},$$

$$G_{1j} = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 \\ 0.1 & 0 \end{bmatrix},\ G_{2j} = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 \\ 0.2 & 0 \end{bmatrix},$$

$$F_{ij}(k) = R_{ij}(k) = \begin{bmatrix} \sin k & 0 \\ 0 & \cos k \end{bmatrix},$$

$\sigma = 1,2;\ i,j = 1,2.$

隶属度函数为

$$\mu_{j1}(x_1(k)) = 1 - 1/(1 + e^{-4x_1(k)}),$$

$$\mu_{j2}(x_1(k)) = 1/(1 + e^{-4x_1(k)}),\ j = 1,2.$$

通过矩阵变换,将式(6)变换为LMI,并取$\varepsilon^2_{1rij} = \varepsilon^2_{2rij} = \varepsilon^2_{3rij} = \varepsilon^2_{4rij} = 1$.解得

$$P_1 = \begin{bmatrix} 2.3738 & 0.1145 \\ 0.1145 & 2.4289 \end{bmatrix},$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} 2.4236 & 0.1130 \\ 0.1130 & 2.5320 \end{bmatrix}.$$

令

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

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

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

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

由式(7)得非脆弱反馈控制器增益

$$K_{11} = \begin{bmatrix} 1.9906 & 2.0347 \\ -0.9495 & -0.0456 \end{bmatrix},$$

$$K_{12} = \begin{bmatrix} 2.8944 & 1.1090 \\ -1.8990 & -0.0916 \end{bmatrix},$$

$$K_{21} = \begin{bmatrix} 1.0372 & 1.5644 \\ 1.4541 & 0.0678 \end{bmatrix},$$

$$K_{22} = \begin{bmatrix} -0.0452 & -1.0128 \\ 0.9694 & 0.0452 \end{bmatrix}.$$

选取初始条件为$[0.3,\ -0.1]^{\mathrm{T}}$,时滞时间$d = 1$,利用Mtalab仿真,图1是系统的状态变化曲线.由仿真结果可以看出,在所设计的非脆弱控制器和切换律下,系统(1)的闭环系统是渐近稳定的.

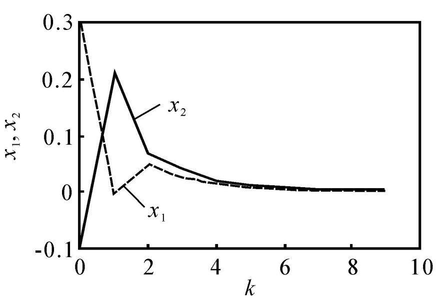

图1　状态曲线

5　结　　论

本文研究了一类离散切换模糊时滞系统的非脆弱控制问题.在不确定矩阵模有界条件下,给出了非脆弱状态反馈控制器的存在条件和切换律设计.通过数值仿真例子,表明了结论的有效性.

参考文献(References)

[1] Huang Y P, Zhou K M. Robust stability of uncertain time-delay systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2000, 45(11): 2169-2173.

[2] Chen W H, Guan Z H, Lu X M. Delay-dependent output feedback guaranteed cost control for uncertain time-delay systems[J]. Automatica, 2004, 40(7): 1263-1268.

[3] 聂宏, 王明顺, 赵军. 线性不确定时滞系统混杂反馈H_∞鲁棒镇定[J]. 控制与决策, 2004, 19(6): 642-646.
(Nie H, Wang M S, Zhao J. Hybrid feedback H_∞ robust stabilization for a class of uncertain linear time-delay systems[J]. Control and Decision, 2004, 19(6): 642-646.)

[4] 杨红, 赵军, 张乐. 一类离散切换模糊系统的稳定性[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(5): 861-865.
(Yang H, Zhao J, Zhang L. Stability of a class of discrete switched fuzzy systems[J]. Control Theory & Applications, 2007, 24(5): 861-865.)

[5] 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.

[6] Yang G H, Wang J L. Non-fragile H_∞ control for linear systems with multiplicative controller gain variations[J]. Automatica, 2001, 37(5): 727-737.

[7] Xu S Y, James Lam, Wang J L, et al. Non-fragile positive real control for uncertain linear neutral delay systems[J]. Systems & Control Letters, 2004, 52(1): 59-74.

[8] 翟丁, 张庆灵, 刘国义, 等. 一类时滞线性系统的鲁棒非脆弱控制器设计[J]. 控制与决策, 2006, 21(5): 559-562.
(Zhai D, Zhang Q L, Liu G Y, et al. Robust non-fragile controller for a class of linear time-delay systems[J]. Control and Decision, 2006, 21(5): 559-562.)

[9] Wang R, Zhao J. Non-fragile hybrid guaranteed cost control for a class of uncertain switched linear systems[J]. J of Control Theory and Applications, 2006, 4(1): 32-37.

[10] Dong Y, James Lam. Non-fragile guaranteed cost control for uncertain descriptor systems with time-varying state and input delays[J]. Optimal Control Applications and Methods, 2005, 26(2): 85-105.

[11] Tong S C, Tang J T, Wang T. Fuzzy adaptive control for multivariable nonlinear systems[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 111(2): 153-167.