文章编号:1000 - 582X(2004)05 - 0021 - 04

基于 TS 模型的时滞模糊混沌控制系统的稳定性分析*

李传东[1,2], 廖晓峰[2], 邓绍江[2]
(1. 重庆大学 数理学院, 重庆 400030; 2. 重庆大学 计算机学院, 重庆 400030)

摘　要:研究了基于 TS 模型的时滞模糊混沌控制系统的指数稳定性问题。对一大类时滞混沌系统的受控系统,采用并行分散补偿技术,设计了线性反馈模糊控制器。然后,利用 Lyapunov - Krasovskii 泛函方法,结合线性矩阵不等式和微分不等式技术,对常量时滞和变量时滞的模糊混沌控制系统,提出了控制器的指数稳定性条件,并给出了相应的控制律。由于所有结果都采用线性矩阵不等式的形式给出,因此,稳定性条件和控制律易于数值计算。

关键词:T - S 模糊模型;混沌;模糊控制;指数稳定性;线性矩阵不等式

中图分类号:O231　　**文献标识码**:A

由于模糊控制具有很强的处理不确定、非线性和干扰的能力,近年来,模糊控制技术被越来越多地应用到混沌控制领域[1-7],提出了许多基于 TS 模型的系统化的模糊控制器设计方法[2-7]。其基本思想是:将复杂系统或混沌系统表示成一系列局部线性的子系统,每个子系统表示复杂系统在局部区域内的动态行为,然后集成这些子系统以构建全局非线性模糊模型。在此基础上,应用模糊系统的控制理论求得模糊控制器。通过模糊控制系统的稳定性分析,求得模糊控制器参数。由于指数稳定性分析,尤其是时滞模糊控制系统的指数稳定分析的复杂性,在当前的文献中,人们总是通过渐进稳定性分析找到合适的控制参数。但在实际控制应用中,人们希望控制系统的过渡过程尽可能短,因此,要求控制系统指数稳定是十分必要的。笔者采用时滞神经网络指数稳定性的分析方法,详细分析了带常量时滞和变量时滞的 TS 模糊反馈控制模型的指数稳定性,分别得到了指数稳定控制器存在的充分条件,并给出了相应的控制律。

1　基于 T - S 模糊时滞模型的混沌反馈控制

考虑以下模糊时滞模型

$$R^i: \text{IF } M_{i1} \text{ is } F_{i1} \text{ and} \cdots \text{and } M_{in} \text{ is } F_{in}$$

$$\text{THEN } \dot{x}(t) = A_i x(t) + A_{di} x(t-\tau) + B_i u(t), i = 1,2,\cdots,m \quad (1)$$

其中,$x(t)$ 为系统状态变量,$x(t-\tau)$ 表示系统滞后状态,$\tau > 0$ 为时滞。当 τ 为常数时,称模型(1)是常时滞的,否则称为变时滞的。$u(t)$ 表示外部输入,是系统的控制项。

假设 $u(t) = 0$ 时,模型(1)表示时滞模糊混沌系统。显然,模型(1)可用来表示一大类形如 $\dot{x}(t) = f(x(t), x(t-\tau))$ 的时滞混沌系统的受控系统。取系统的初始条件为 $x(\theta) = \phi(\theta), \theta \in [-\tau, 0]$,并令 $\|\phi\| = \sup\theta \in [-\tau, 0] \|\phi(\theta)\|$。采用并行分散补偿技术,取模糊反馈控制器为如下形式:

$$R^i: \text{IF } M_{i1} \text{ is } F_{i1} \text{ and} \cdots \text{and } M_{in} \text{ is } F_{in}$$

$$\text{THEN } u(t) = K_i x(t).\ i = 1,2,\cdots,m \quad (2)$$

其中,K_i 称为分散补偿增益矩阵。由(1)和(2)可得闭环模糊时滞系统:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{m} h_i h_j [(A_i + B_i K_j) x(t) + A_{di} x(t-\tau)] \quad (3)$$

其中,

* 收稿日期:2003 - 12 - 23
基金项目:国家自然科学基金(60271019),教育部博士点专项基金(20020611007),重庆市科委应用基础研究基金(7370),重庆大学基础与应用基础研究基金(713411003)。
作者简介:李传东(1969 -),男,山东嘉祥人,重庆大学讲师,在读博士研究生,主要从事神经网络稳定性、混沌动力学、混沌密码学、混沌同步及其应用等方面的研究。

$$h_i(M)=\frac{\prod_{l=1}^{n}\mu F_{il}(M_{il})}{\sum_{i=1}^{m}(\prod_{l=1}^{n}\mu F_{il}(M_{il}))} \tag{4}$$

μF_{il} 为第 i 条规则中状态 M_{il} 对模糊子集 F_{il} 的隶属度。

2 常时滞系统的指数稳定性分析

定义 1 对系统(3),如果存在正数 $\varepsilon>0,r(\varepsilon)>1$,使得对任意 $t>0$ 总有下式成立:

$$\|x(t)\| \leqslant r(\varepsilon)\|\phi\| e^{-\varepsilon t} \tag{5}$$

则称系统(3) 指数稳定,ε 称为系统(3) 的指数收敛率。其中,$\|\cdot\|$ 表示欧几里德范数。

假设零点为系统的平衡点。当 τ 为正常数时得到如下的稳定性条件和相应的控制律:

定理1 假设 τ 为正常数,如果存在两个对称正定矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 和 $\boldsymbol{S}$,实矩阵 $\boldsymbol{M}_j$ 以及正常数 $\varepsilon>0$ 使得,对任意的 $i,j=1,2,\cdots,m$,都有下述 LMI 成立:

$$\begin{bmatrix} 2\varepsilon \boldsymbol{Q}+\boldsymbol{S}+\boldsymbol{Q}A_i^T+\boldsymbol{M}_j^TB_i^T+A_i\boldsymbol{Q}+B_iM_j & A_{di}\boldsymbol{Q} \\ \boldsymbol{Q}A_{di}^T & -e^{-2\varepsilon\tau}S \end{bmatrix}<0 \tag{6}$$

则模糊系统(3) 指数稳定于零平衡点,相应的分散补偿增益矩阵为 $\boldsymbol{K}_j=M_j\boldsymbol{Q}^{-1}$,并且系统状态满足下面的不等式:

$$\|x(t)\| \leqslant \frac{1}{\sqrt{\lambda_m(Q^{-1})}}\begin{bmatrix}\lambda_M(Q^{-1})+ \\ \frac{1}{2\varepsilon}\lambda_M(Q^{-1}SQ^{-1})\end{bmatrix}^{\frac{1}{2}}\|\phi\| e^{-\varepsilon t} \tag{7}$$

其中,$\lambda_m(\cdot),\lambda_M(\cdot)$ 分别表示相应矩阵的最小和最大特征值。

证:构造如下 Lyapunov - Krasovskii 泛函:

$$V(t)\equiv V(x(t))=e^{2\varepsilon t}x^T(t)Px(t)+\int_{t-\tau}^{t}e^{2\varepsilon\theta}x^T(\theta)Rx(\theta)d\theta \tag{8}$$

其中,P,R 为正定对称矩阵。显然,$V(t)\geqslant 0$ 并且等号成立当且仅当 $x(t)=0$。沿系统(3) 的轨迹对(8) 式求 Dini 导数,得

$$\begin{aligned}\dot V(t) &= e^{2\varepsilon t}\Big\{2\varepsilon x^T(t)Px(t)+\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m}h_ih_j[x^T(t)H_{ij}^T+ \\ &\quad x^T(t-\tau)A_{di}^T]Px(t)+x^T(t)Rx(t)+ \\ &\quad \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m}h_ih_jx^T(t)P[H_{ij}x(t)+A_{di}x(t-\tau)]- \\ &\quad e^{2\varepsilon\tau}x^T(t-\tau)Rx(t-\tau)\Big\}= \\ &e^{2\varepsilon t}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m}h_ih_j[x^T(t)(2\varepsilon P+H_{ij}^TP+PH_{ij}+R)x(t)+ \\ &\quad x^T(t)PA_{di}x(t-\tau)+x^T(t-\tau)A_{di}^TPx(t)- \\ &\quad e^{-2\varepsilon\tau}x^T(t-\tau)Rx(t-\tau)= \\ &e^{2\varepsilon t}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m}h_ih_j\cdot[x^T(t)x^T(t-\tau)]\sum\begin{bmatrix}x(t)\\x(t-\tau)\end{bmatrix}\end{aligned} \tag{9}$$

其中,$\sum=\begin{bmatrix}2\varepsilon P+R+H_{ij}^TP+PH_{ij} & PA_{di} \\ A_{di}^TP & -e^{2\varepsilon\tau}R\end{bmatrix}$,$H_{ij}=A_i+B_iK_j$。令 $\boldsymbol{Q}=P^{-1}$,$S=QRQ$,则

$$\begin{bmatrix}Q & \\ & Q\end{bmatrix}\sum\begin{bmatrix}Q & \\ & Q\end{bmatrix}=$$

$$\begin{bmatrix}2\varepsilon\boldsymbol{Q}+S+\boldsymbol{Q}A_i^T+\boldsymbol{M}_j^TB_i^T+A_i\boldsymbol{Q}+B_i\boldsymbol{M}_j & A_{di}\boldsymbol{Q} \\ \boldsymbol{Q}A_{di}^T & -e^{-2\varepsilon\tau}S\end{bmatrix}<0 \tag{10}$$

由于 P 的正定性,式(10) 等价于(6)。从而,$\dot V(t)\leqslant 0$。于是,

$$e^{2\varepsilon t}\lambda_m(P)\|x(t)\|^2\leqslant V(t)\leqslant V(0) \tag{11}$$

而

$$\begin{aligned}V(0) &= x^T(0)Px(0)+\int_{-\tau}^{0}e^{2\varepsilon\theta}x^T(\theta)Rx(\theta)\mathrm{d}\theta\leqslant \\ &\lambda_M(P)\|\phi\|^2+\lambda_M(R)\|\phi\|^2\int_{-\tau}^{0}e^{2\varepsilon\theta}\mathrm{d}\theta\leqslant \\ &\Big[\lambda_M(P)+\frac{1}{2\varepsilon}\lambda_M(R)\Big]\|\phi\|^2\end{aligned} \tag{12}$$

由式(11) 和(12) 立即可推出结论(7)。定理得证。

3 变时滞系统的指数稳定性分析

假设时滞 $\tau=\tau(t)$ 有界,即存在常数 $\bar\tau>0$ 使得对任意的时刻 $t>0,\tau(t)\leqslant\bar\tau$。根据时变时滞的可微性,分两种情况加以讨论:

(i) $\tau=\tau(t)$ 可微,并且 $\dot\tau(t)\leqslant p<1$,其中 p 为常数。

(ii) $\tau=\tau(t)$ 不一定可微,但存在常数 $\bar\theta\in[\bar\tau,2\bar\tau]$,使得当 $t\leqslant\bar\theta$ 时,$t-\tau(t)\leqslant\bar\tau$;而当 $t\geqslant\bar\theta$ 时,$t-\tau(t)\geqslant\bar\tau$。

对情况(i),有如下结论:

定理2 假设 $\tau=\tau(t)$ 可微,并且存在常数 p 使得 $\dot\tau(t)\leqslant p<1$ 总成立。如果存在两个对称正定矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 和 $\boldsymbol{S}$,实矩阵 $\boldsymbol{M}_j$ 以及正常数 $\varepsilon>0$ 使得,对任意的 $i,j=1,2,\cdots,m$,都有下述 LMI 成立:

$$\begin{bmatrix}2\varepsilon\boldsymbol{Q}+S+\boldsymbol{Q}A_i^T+\boldsymbol{M}_j^TB_i^T+A_i\boldsymbol{Q}+B_iM_j & A_{di}\boldsymbol{Q} \\ \boldsymbol{Q}A_{di}^T & -e^{-2\varepsilon\tau}(1-\dot\tau)S\end{bmatrix}<0 \tag{13}$$

则模糊系统(3) 指数稳定于零平衡点,相应的分散补

偿增益矩阵为$K_j = M_j Q^{-1}$，并且对任意的$t > 0$，系统状态满足下面的不等式：

$$\| x(t) \| \leq \frac{1}{\sqrt{\lambda_m(Q^{-1})}} \begin{bmatrix} \lambda_M(Q^{-1}) + \\ \frac{1}{2\varepsilon}\lambda_M(Q^{-1}SQ^{-1}) \end{bmatrix}^{\frac{1}{2}} \| \phi \| e^{-\varepsilon t} \tag{14}$$

证：构造 Lyapunov - Krasovskii 泛函：

$$V(t) \equiv V(x(t)) = e^{2\varepsilon t} x^T(t) P x(t) + \int_{t-\tau(t)}^{t} e^{2\varepsilon\theta} x^T(\theta) R x(\theta) d\theta$$

类似于定理 1 的证明过程，可得定理 2 的结论。

对情况(ii)，采用微分不等式技术得到了如下结论。

定理 3　假设存在常数$\bar\theta \in [\bar\tau, 2\bar\tau]$，使得当$t \leq \bar\theta$时，$t - \tau(t) \leq \bar\tau$；而当$t \geq \bar\theta$时，$t - \tau(t) \geq \bar\tau$。如果存在相同的对称正定矩阵$Q$，实矩阵$M_j$以及正常数$k > 0$使得，对任意的$i, j = 1, 2, \cdots, m$，都有下式成立：

$$2kQ + QA_i^T + M_j^T D_i + A_i Q + B_i M_j < 0 \tag{15}$$

并且存在常数$\varepsilon < 0$使得

$$d = \frac{\gamma}{k - \varepsilon} \sum_{i=1}^{m} h_i \| A_{di} \| e^{\varepsilon \bar\tau} < 1 \tag{16}$$

则模糊系统(3) 指数稳定于零平衡点，相应的分散补偿增益矩阵为$K_j = M_j Q^{-1}$，并且对任意的$t > 0$，系统状态满足下面的不等式：

$$\| x(t) \| \leq \frac{1}{1 - d} \Psi_0 e^{-\varepsilon(t - \bar\tau)} \tag{17}$$

其中，$\gamma = \dfrac{\lambda_M(Q^{-1})}{\lambda_m(Q^{-1})}$，

$$\Psi_0 = \left[\sqrt{\gamma} + \gamma \sum_{i=1}^{m} h_i \| A_{di} \| \frac{e^{k\bar\tau}}{k}\right] \| D \|,$$

$$\| D \| = \max\{ \| \phi \|, \sup_{t \in [0, \bar\tau]} \| x(t) \| \}。$$

证：构造 Lyapunov - Krasovskii 泛函：

$$V(t) \equiv V(x(t)) = x^T(t) P x(t) \tag{18}$$

其中，P为正定对称矩阵。显然，$V(t) \geq 0$并且等号成立当且仅当$x(t) = 0$。沿系统(3) 的轨迹对(18) 式求 Dini 导数，得

$$\begin{aligned} \dot V(t) &= \dot x^T(t) P x(t) + x^T(t) P \dot x(t) = \\ &\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} h_i h_j [x^T(t)(H_{ij}^T P + P H_{ij}) x(t) + \\ &2x^T(t) P A_{di} x(t - \tau)] = -2kV(t) + \\ &\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} h_i h_j [x^T(t)(H_{ij}^T P + P H_{ij} + P H_{ij} + \\ &2kP) x(t) + 2x^T(t) P A_{di} x(t - \tau)] \end{aligned}$$

令$\sum = H_{ij}^T P + P H_{ij} + 2kP, Q = P^{-1}$，

由式(15) 知，$\sum < 0$。从而，

$$\begin{aligned} \dot V(t) &\leq -2kV(t) + 2\sum_{i=1}^{m} h_i x^T - A_{di} x(t - \tau) \leq \\ &-2kV(t) + 2\lambda_M(P) \sum_{i=1}^{m} h_i \| A_{di} \| \| x(t) \| \| x(t - \tau) \| \end{aligned} \tag{19}$$

由式(19) 可得

$$\begin{aligned} V(t) &\leq V(\bar\tau) e^{-2k(t - \bar\tau)} + 2\lambda_M(P) \sum_{i=1}^{m} h_i \| A_{di} \| \cdot \\ &\int_{\bar\tau}^{t} e^{-2k(t-\theta)} \| x(\theta) \| \| x(\theta - \tau(\theta)) \| d\theta \leq \\ &\lambda_M(P) \| D \|^2 e^{-2k(t - \bar\tau)} + 2\lambda_M(P) \sum_{i=1}^{m} h_i \| A_{di} \| \cdot \\ &\int_{\bar\tau}^{t} e^{-2k(t-\theta)} \| x(\theta) \| \| x(\theta - \tau(\theta)) \| d\theta \end{aligned} \tag{20}$$

定义一个辅助函数$S(t)$如下：

$$S(t) = \begin{cases} \sqrt{\lambda_M(P)} \| D \|, & t \in [0, \bar\tau] \\ \sqrt{\bar S(t)}, & t \geq \bar\tau \end{cases} \tag{21}$$

其中，$\bar S(t) = \lambda_M(P) \| D \|^2 e^{-2k(t - \bar\tau)} + 2\lambda_M(P) \sum_{i=1}^{m} h_i \| A_{di} \| \int_{\bar\tau}^{t} e^{-2k(t-\theta)} \| x(\theta) \| \| x(\theta - \tau(\theta)) \| d\theta$。

由式(20) 和式(21) 可知，

$$S(t) \geq \sqrt{V(t)} \geq \sqrt{\lambda_m(P)} \| x(t) \| \tag{22}$$

根据式(21) 和式(22)，当$t \geq \bar\tau$时，$S(t)$满足下面的微分不等式：

$$\begin{aligned} \dot S(t) &\leq -kS(t) + \frac{\lambda_M(P)}{\sqrt{\lambda_m(P)}} \cdot \\ &\sum_{i=1}^{m} h_i \| A_{di} \| \| x(t - \tau(t)) \| \end{aligned} \tag{23}$$

从而，

$$\begin{aligned} S(t) &\leq \sqrt{\lambda_M(P)} \| D \| e^{-k(t - \bar\tau)} + \\ &\frac{\lambda_M(P)}{\sqrt{\lambda_m(P)}} \sum_{i=1}^{m} h_i \| A_{di} \| \int_{\bar\tau}^{t} e^{-k(t-\theta)} \| x(\theta - \tau(\theta)) \| d\theta \end{aligned} \tag{24}$$

结合式(22)，可得

$$\begin{aligned} \| x(t) \| &\leq \sqrt{\gamma} \| D \| e^{-k(t - \bar\tau)} + \\ &\gamma \sum_{i=1}^{m} h_i \| A_{di} \| \int_{\bar\tau}^{t} e^{-k(t-\theta)} \| x(\theta - \tau(\theta)) \| d\theta \end{aligned} \tag{25}$$

注意到，对$t \in [0, \bar\tau]$，式(17) 显然是成立的。因此，要证明定理结论，只需证明对任意的正数$\sigma > 1$，总有

$$\| x(t) \| < \frac{\sigma}{1 - d} \Psi_0 e^{-\varepsilon(t - \bar\tau)}, t \geq \bar\tau \tag{26}$$

采用反证法。假设存在$t = t_1 \geq \bar\tau, \sigma_0 > 1$使得

$\| x(t_1) \| = \dfrac{\sigma_0}{1-d}\Psi_0 e^{-\varepsilon(t_1-\tau)}$,而当 $\bar{\tau} \leqslant t \leqslant t_1$ 时,总有 $\| x(t) \| \leqslant \dfrac{\sigma_0}{1-d}\Psi_0 e^{-\varepsilon(t-\tau)}$ 下面就 t_1 的取值范围进行讨论:当 $t_1 \in [\tau, \theta]$ 时,由式(25) 知

$$\| x(t_1) \| \leqslant \sqrt{\gamma} \| D \| e^{-k(t_1-\tau)} +$$

$$\gamma \sum_{i=1}^{m} h_i \| A_{di} \| \int_{\tau}^{t_1} e^{-k(t_1-\theta)} \| x(\theta - \tau(\theta)) \| d\theta \leqslant$$

$$\sqrt{\gamma} \| D \| e^{-k(t_1-\tau)} + \gamma \sum_{i=1}^{m} h_i \| A_{di} \| \int_{\tau}^{\theta} e^{-k(t_1-\theta)} \| D \| d\theta \leqslant$$

$$\Psi_0 e^{-k(t_1-\bar{\tau})} < \frac{\sigma_0}{1-d}\Psi_0 e^{-k(t_1-\bar{\tau})} = \| x(t_1) \|$$

当 $t_1 \geqslant \bar{\theta}$ 时,由式(25) 知

$$\| x(t_1) \| \leqslant \sqrt{\gamma} \| D \| e^{-k(t_1-\bar{\tau})} +$$

$$\gamma \sum_{i=1}^{m} h_i \| A_{di} \| \int_{\tau}^{t} e^{-k(t_1-\theta)} \| x(\theta - \tau(\theta)) \| d\theta =$$

$$\sqrt{\gamma} \| D \| e^{-k(t_1-\bar{\tau})} + \gamma \sum_{i=1}^{m} h_i \| A_{di} \| \int_{\tau}^{\theta} e^{-k(t_1-\theta)} \| D \| d\theta +$$

$$\gamma \sum_{i=1}^{m} h_i \| A_{di} \| \int_{\theta}^{t} e^{-k(t_1-\theta)} \| x(\theta - \tau(\theta)) \| d\theta <$$

$$\sigma_0 \Psi_0 e^{-k(t_1-\bar{\tau})} + \frac{d\sigma_0}{1-d}\Psi_0 e^{-k(t_1-\bar{\tau})} =$$

$$\frac{\sigma_0}{1-d}\Psi_0 e^{-k(t_1-\bar{\tau})} = \| x(t_1) \|$$

总之,对任意的 $t = t_1 \geqslant \bar{\tau}$,假设不成立。定理证毕。

4 结论

采用并行分散补偿方法,对时滞混沌系统给出了控制器设计,并利用 Lyapunov - Krasovskii 泛函方法、线性矩阵不等式技术和微分不等式技术对模糊控制系统进行了稳定性分析,针对时滞的不同形式分别给出了指数稳定性的充分条件和相应的控制参数。但是需要指出的是,这种设计方法要求存在一个公共的正定矩阵 P 满足所有局部模型所对应的线性矩阵不等式,而实践证明并不是所有的模糊控制系统都能达到这个要求。解决这个问题的一种方法是采用分段 Lyapunov 函数。

参考文献:

[1] SUGENO M, NISHIDA G T. Fuzzy Control of Model Car [J]. Fuzzy Sets Syst. , 1985, 16(5):103 - 113.

[2] CAO S G, REES N W, FENG G. Analysis and Design for a Class of Complex Control Systems , Part I: Fuzzy Modeling and Identification[J]. Automatica, 1997, 33(6): 1 017 - 1 028.

[3] FENG G, CAO S G, REES N W, CHAK C K. Design of Fuzzy Control Systems with Guaranteed Stability[J]. Fuzzy Sets Syst. , 1997, 85(10): 1 - 10.

[4] CAO S G, REES N W, FENG G. Analysis and Design for a Class of Complex Control Systems, Part II: Fuzzy Controller Design[J]. Automatica, 1997, 33(6): 1 029 - 1 039.

[5] TEIXEIRA M C M, ZAK S H. Stabilizing Controller Design for Uncertain Nonlinear Systems Using Fuzzy Models[J]. IEEE Trans. Fuzzy Syst. , 1999, 7(3): 133 - 142.

[6] WANG H, TANANKA K, GRIFFIN M F. An Approach to Fuzzy Control of Nonlinear Systems: Stability and Design Issues[J]. IEEE Trans. Fuzzy Syst. , 1996, 4(2): 14 - 23.

[7] FANG G. An Approach to Adaptive Control of Fuzzy Dynamic Systems[J]. IEEE Trans. Fuzzy Syst. , 2002, 10 (3): 268 - 275.

Exponential Stability Analysis for TS-model-based Fuzzy Chaotic Control Systems With Delays

LI Chuan-dong[1,2], *LIAO Xiao-feng*[2], *DENG Shao-jiang*[2]

(1. College of Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China;
2. College of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The issue of exponential stability for TS-model-based fuzzy chaotic control systems with constant or time-varying delays is investigated. A linear-feedback fuzzy controller is designed using parallel dispersal compensation technique for a large class of chaotic control systems. By means of the Lyapunov-Krasovskii functional approach in combination of the linear matrix inequality and differential inequality techniques, the criteria for exponential stability of the TS-model-based fuzzy controller are derived, and the corresponding control laws are presented. The results are easy to be calculated numerically because of the linear matrix inequalities representation.

Key words: TS fuzzy model; chaos; chaotic control; exponential stability; linear matrix inequality (LMI)

(编辑 吕赛英)