文章编号: 1000−8152(2007)06−0886−05

T-S模糊系统的稳定性分析与镇定控制器设计

周林娜, 张庆灵, 胡跃冰, 杨春雨
(东北大学 系统科学研究所, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 应用广义模糊Lyapunov函数方法研究T-S模糊系统的稳定性与控制器设计问题. 首先, 将T-S模糊系统表示成模糊广义系统的形式; 然后利用广义模糊Lyapunov函数得到模糊系统稳定的充分条件, 并且给出基于线性矩阵不等式(LMI)的PDC 控制器设计方法. 该方法与已有的模糊Lyapunov函数方法相比, 计算量小, 并且表达成LMI形式, 容易求解. 最后, 通过例子验证方法的优越性和有效性.

关键词: T-S模糊系统; 稳定性; 广义模糊系统; 模糊Lyapunov函数; LMI; PDC控制器
中图分类号: TP13 **文献标识码**: A

Stability analysis and synthesis of T-S fuzzy systems

ZHOU Lin-na, ZHANG Qing-ling, HU Yue-bing, YANG Chun-yu
(Institute of systems science，Northeastern University，Shenyang Liaoning 110004, China)

Abstract: The problems of stability analysis and controller design of T-S fuzzy systems are investigated by using descriptor fuzzy Lyapunov function approach. Firstly, the T-S fuzzy systems are formulated as fuzzy descriptor systems; Then, by descriptor fuzzy Lyapunov function, a sufficient condition for the fuzzy systems to be stable is derived and an LMI-based parallel distributed compensation(PDC) controller design method is given. Compared with the existing fuzzy Lyapunov function method, the proposed method is simpler and can be formulated into LMIs which can be solved easily. Finally, an example is given to illustrate the advantage and validity of the approach.

Key words: T-S fuzzy systems; stability; descriptor fuzzy systems; fuzzy Lyapunov function; LMI; PDC controller

1 引言(Introduction)

T-S模糊系统自提出以来就引起了国内外控制领域的普遍重视, 许多学者对T-S模糊系统的稳定性进行了研究, 并得到了许多关于系统稳定性的结果[1~7]. 然而, 这些结果大部分都是利用公共Lyapunov函数方法得到的关于T-S模糊系统二次稳定的充分性条件. 由于模糊系统本质上是非线性系统, 因此用单一的Lyapunov函数分析系统的稳定性必定存在很大的保守性. 针对这一问题, 最近, Tanaka等[8~10]对连续模糊系统提出了模糊Lyapunov函数方法, 对隶属函数的导数给出限制, 得到了系统稳定的充分条件, 文献[9]给出了控制器设计方法. 但文献[9]中给出控制器的设计方法不是LMI的, 计算量也很大, 因此在应用上存在很大的局限性.

本文针对这一问题, 将广义系统方法和模糊Lyapunov函数方法结合, 既克服了单一Lyapunov函数方法保守性较大的缺点, 又解决了模糊Lyapunov函数方法计算量过大和难以得到LMI形式结果的问题. 给出了基于LMI的PDC控制器设计方法. 而且, 放松了对隶属函数导数的限制条件.

2 T-S模糊系统(T-S fuzzy systems)

考虑如下T-S模糊系统

$$\dot{x}(t)=\sum_{i=1}^{r}h_i(\xi)(A_ix(t)+B_iu(t)). \tag{1}$$

其中: $x(t)\in\mathbb{R}^n$是状态向量, $u(t)\in\mathbb{R}^m$是控制输入, A_i, B_i是维数适当的常数矩阵, $\xi=[\xi_1\ \cdots\ \xi_p]^{\mathrm{T}}$是前件变量, $\sum\limits_{i=1}^{r}h_i(\xi)=1, 0\leqslant h_i(\xi)\leqslant 1$.

系统(1) 的自治系统为

$$\dot{x}(t)=\sum_{i=1}^{r}h_i(\xi)A_ix(t). \tag{2}$$

为了分析系统(2)的稳定性, 文献[9]引入如下假设条件:

假设 1[9]

$$|\dot{h}_\rho(\xi)|\leqslant\phi_\rho,$$

其中$\phi_\rho\geqslant 0,\ \rho=1,2,\cdots,r$.

收稿日期: 2006−04−03; 收修改稿日期: 2006−11−14.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60574011); 辽宁省自然科学基金资助项目(20052022).

利用如下形式模糊Lyapunov函数

$$V(x,\xi)=\sum_{\rho=1}^{r}h_\rho(\xi)x^{\mathrm{T}}(t)P_\rho x(t), \tag{3}$$

其中$P_\rho>0$, 文献[9]给出了系统(2)稳定的条件.

引理 1 [9]　如果存在常数$\phi_1,\phi_2,\cdots,\phi_r$, 使假设1成立, 且存在矩阵$P_i$, $i=1,2,\cdots,r$满足下面的LMIs:

$$\begin{aligned}&P_i>0, i=1,2,\cdots,r,\\&\sum_{\rho=1}^{r}\phi_\rho P_\rho+\frac{1}{2}\{A_j^{\mathrm{T}}P_i+P_iA_j+A_i^{\mathrm{T}}P_j+P_jA_i\}<0,\\&i\leqslant j=1,2,\cdots,r,\end{aligned}$$

那么模糊系统(2)是稳定的.

对于引理1, 显然, ϕ_ρ越小越容易得到可行解, 而假设1决定了$\phi_\rho\geqslant 0$, 而且对$\dot{h}_\rho(\xi)$的上下界都有限制, 在此对假设1进行了放松, 给出如下假设:

假设 2

$$\dot{h}_k(\xi)\leqslant\varphi_k,$$

其中$\varphi_k, k=1,\ 2,\ \cdots,\ r$是常数.

利用文献[11]中的广义系统方法, 把系统(1)改写为如下模糊广义系统形式

$$E\dot{x^*}(t)=\sum_{i=1}^{r}h_i(\xi)(A_i^*x^*(t)+B_i^*u(t)),$$

其中:

$$E=\begin{bmatrix}I&0\\0&0\end{bmatrix},\ A_i^*=\begin{bmatrix}0&I\\A_i&-I\end{bmatrix},\ B_i^*=\begin{bmatrix}0\\B_i\end{bmatrix},$$

$$x^*(t)=[x(t)^{\mathrm{T}}\ y(t)^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}, y(t)=\dot{x}(t),$$

系统(2)可改写为

$$E\dot{x^*}(t)=\sum_{i=1}^{r}h_i(\xi)A_i^*x^*(t). \tag{4}$$

考虑广义模糊Lyapunov函数

$$V(x,\xi)=\sum_{k=1}^{r}h_k(\xi)x^{*\mathrm{T}}(t)P(\xi)x^*(t). \tag{5}$$

其中

$$P(\xi)=\begin{bmatrix}\sum_{k=1}^{r}h_k(\xi)P_{1k}&0\\P_2&P_3\end{bmatrix},$$

$P_{1k}>0$. 设$P_k^*=\begin{bmatrix}P_{1k}&0\\P_2&P_3\end{bmatrix}$, 则有

$$\begin{aligned}V(x,\xi)=x^{*\mathrm{T}}(t)E\sum_{k=1}^{r}h_k(\xi)P_k^*x^*(t)=\\x^{\mathrm{T}}(t)\sum_{k=1}^{r}h_k(\xi)P_{1k}x(t).\end{aligned}$$

利用广义Lyapunov函数(5)给出如下定理:

定理 1　如果存在常数$\varphi_1,\varphi_2,\cdots,\varphi_r$使假设2成立, 且存在矩阵$P_{1i}(i=1,2,\cdots,r), P_2, P_3$使下面的LMIs

$$\begin{aligned}&P_{1i}>0, i=1,2,\cdots,r,\\&\begin{bmatrix}Q_{1i}+\sum_{k=1}^{r}\varphi_kP_{1k}&Q_{2i}^{\mathrm{T}}\\Q_{2i}&Q_3\end{bmatrix}<0, i=1,2,\cdots,r\end{aligned}$$

成立, 其中: $Q_{1i}=A_i^{\mathrm{T}}P_2+P_2^{\mathrm{T}}A_i, Q_{2i}=P_{1i}-P_2+P_3^{\mathrm{T}}A_i, Q_3=-P_3-P_3^{\mathrm{T}}$那么模糊系统(2)是稳定的.

证　对式(5)给出的Lyapunov函数求导, 根据式(4), 假设2和$P_{1i}>0$可得

$$\begin{aligned}&\dot{V}=\\&\sum_{i=1}^{r}h_i(\xi)x^{*\mathrm{T}}(A_i^{*\mathrm{T}}P(\xi)+P^{\mathrm{T}}(\xi)A_i^*+E\dot{P}(\xi))x^*=\\&\sum_{i=1}^{r}h_i(\xi)x^{*T}(A_i^{*T}P(\xi)+\\&P^{\mathrm{T}}(\xi)A_i^*+E\sum_{k=1}^{r}\dot{h}_k(\xi)P_k^*)x^*=\\&\sum_{i=1}^{r}h_i(\xi)x^{*\mathrm{T}}\begin{bmatrix}Q_{1i}+\sum_{k=1}^{r}\dot{h}_k(\xi)P_{1k}&Q_{2i}^{\mathrm{T}}\\Q_{2i}&Q_3\end{bmatrix}x^*\leqslant\\&\sum_{i=1}^{r}h_i(\xi)x^{*\mathrm{T}}\begin{bmatrix}Q_{1i}+\sum_{k=1}^{r}\varphi_kP_{1k}&Q_{2i}^{\mathrm{T}}\\Q_{2i}&Q_3\end{bmatrix}x^*<0,\end{aligned}$$

系统(2)的稳定性得证.　　证毕.

与式(3)中的模糊Lyapunov函数相比, 式(5)给出的广义模糊Lyapunov函数引入了松弛变量P_2和P_3, 利用它来分析原T-S模糊系统的稳定性, 所得结果LMI个数比引理1少, 更重要的是P_{1k}与A_i没有相乘的关系, 这样可以得到基于LMI的PDC控制器设计方法.

在$\dot{h}_i(\xi)$满足如下假设的时候, 可以将定理1进一步化简.

假设 3[11]

$$\dot{h}_k(\xi)\leqslant v_kh_k(\xi),$$

其中$v_k, k=1,\ 2,\ \cdots,\ r$是常数.

定理 2[11]　如果存在常数$v_1,v_2,\cdots,v_r$使假设3成立, 且存在矩阵$P_{1i}, i=1,2,\cdots,r$,P_2,P_3使下面的LMIs

$$\begin{aligned}&P_{1i}>0,\ i=1,2,\cdots,r,\\&\begin{bmatrix}A_i^{\mathrm{T}}P_2+P_2^{\mathrm{T}}A_i+v_iP_{1i}&Q_{2i}^{\mathrm{T}}\\Q_{2i}&Q_3\end{bmatrix}<0,\ i=1,2,\cdots,r\end{aligned}$$

成立, 其中Q_{2i}, Q_3与定理1中相同, 那么模糊系统(2)是稳定的.

3 模糊系统的控制器设计(Controller design of fuzzy systems)

以上给出了T-S模糊系统稳定性的判别条件, 下面将讨论T-S模糊系统的镇定控制器设计方法. 考虑PDC控制器

$$u(t)=\sum_{i=1}^{r}h_i(\xi)K_ix^*(t),$$

其中: $K_i=[K_{1i}\ 0], K_{1i}\in\mathbb{R}^{m\times n}$. 因此

$$u(t)=\sum_{i=1}^{r}h_i(\xi)K_{1i}x(t). \tag{6}$$

将控制器(6)代入系统(1)得闭环系统

$$\dot{x}(t)=\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}h_i(\xi)h_j(\xi)(A_i+B_iK_{1j})x(t). \tag{7}$$

对应的广义模糊系统为

$$E\dot{x}^*(t)=\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}h_i(\xi)h_j(\xi)G_{ij}^*x^*(t), \tag{8}$$

其中$G_{ij}^*=A_i^*+B_i^*K_j$. 对于闭环系统(7)的稳定性给出如下定理:

定理 3 如果存在常数$\varphi_1,\varphi_2,\cdots,\varphi_r$使假设2成立, 且存在矩阵$P_{1i}(i=1,2,\cdots,r),P_2,P_3$满足下面的不等式:

$$\begin{cases}P_{1i}>0, i=1,2,\cdots,r,\\ \begin{bmatrix}N_{1ij}+\sum\limits_{k=1}^{r}\varphi_kP_{1k} & N_{2ij}^{\mathrm T}\\ N_{2ij} & N_3\end{bmatrix}<0,\\ i\leqslant j=1,2,\cdots,r,\end{cases} \tag{9}$$

其中:

$$N_{1ij}=\frac{1}{2}(G_{ij}^{\mathrm T}P_2+P_2^{\mathrm T}G_{ij}+G_{ji}^{\mathrm T}P_2+P_2^{\mathrm T}G_{ji}),$$
$$N_{2ij}=\frac{1}{2}(P_{1i}+P_3^{\mathrm T}G_{ij}+P_{1j}+P_3^{\mathrm T}G_{ji})-P_2,$$
$$N_3=-P_3-P_3^{\mathrm T},$$

那么模糊系统(7)是稳定的.

证 对式(5)给出的Lyapunov函数求导, 根据式(8)和假设2可得

$$\dot{V}=\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}h_i(\xi)h_j(\xi)x^{*\mathrm T}\times\begin{bmatrix}N_{1ij}+\sum\limits_{k=1}^{r}\dot{h}_k(\xi)P_{1k} & N_{2ij}^{\mathrm T}\\ N_{2ij} & N_3\end{bmatrix}x^*\leqslant$$
$$\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}h_i(\xi)h_j(\xi)x^{*\mathrm T}\times\begin{bmatrix}N_{1ij}+\sum\limits_{k=1}^{r}\varphi_kP_{1k} & N_{2ij}^{\mathrm T}\\ N_{2ij} & N_3\end{bmatrix}x^*<0,$$

闭环系统(7)的稳定性得证. 证毕.

下面给出基于LMI的PDC控制器设计方法.

定理 4 如果存在常数$\varphi_1,\varphi_2,\cdots,\varphi_r$使假设2成立, 且存在矩阵$X_{1i},M_i,i=1,2,\cdots,r$, X_2满足下面的LMIs:

$$X_{1i}>0, i=1,2,\cdots,r,$$
$$\begin{bmatrix}\Lambda_{1ij} & \Lambda_{2ij}^{\mathrm T}\\ \Lambda_{2ij} & \Lambda_3\end{bmatrix}<0,\ i\leqslant j=1,2,\cdots,r, \tag{10}$$

其中:

$$\Lambda_{1ij}=\frac{1}{2}(X_2^{\mathrm T}A_i^{\mathrm T}+A_iX_2+M_j^{\mathrm T}B_i^{\mathrm T}+B_iM_j+X_2^{\mathrm T}A_j^{\mathrm T}+A_jX_2+M_i^{\mathrm T}B_j^{\mathrm T}+B_jM_i)+\sum_{k=1}^{r}\varphi_kX_{1k},$$
$$\Lambda_{2ij}=\frac{1}{2}(A_iX_2+B_iM_j+X_{1i}^{\mathrm T}+A_jX_2+B_jM_i+X_{1j}^{\mathrm T})-X_2,$$
$$\Lambda_3=-X_2-X_2^{\mathrm T},$$

那么模糊系统(7)是稳定的, 且$K_{1i}=M_iX_2^{-1}$.

证 对式(9)取$P_3=P_2$, 左右分别乘

$$\begin{bmatrix}P_2^{-\mathrm T} & 0\\ 0 & P_2^{-\mathrm T}\end{bmatrix},\begin{bmatrix}P_2^{-1} & 0\\ 0 & P_2^{-1}\end{bmatrix},$$

设$X_2=P_2^{-1}$, $X_{1i}=X_2^{\mathrm T}P_{1i}X_2$, $M_i=K_{1i}X_2$即可得到式(10). 证毕.

在假设3成立的条件下, 定理4可以简化为如下定理:

定理 5 如果存在常数$v_1,v_2,\cdots,v_r$使假设3成立, 且存在矩阵$X_{1i},M_i,i=1,2,\cdots,r$, X_2使下面的LMIs

$$X_{1i}>0, i=1,2,\cdots,r,$$
$$\begin{bmatrix}\Pi_{1ij} & \Pi_{2ij}^{\mathrm T}\\ \Pi_{2ij} & \Pi_3\end{bmatrix}<0,\ i\leqslant j=1,2,\cdots,r$$

成立, 其中

$$\Pi_{1ij}=\frac{1}{2}(X_2^{\mathrm T}A_i^{\mathrm T}+A_iX_2+M_j^{\mathrm T}B_i^{\mathrm T}+B_iM_j+X_2^{\mathrm T}A_j^{\mathrm T}+A_jX_2+M_i^{\mathrm T}B_j^{\mathrm T}+B_jM_i+v_iX_{1i}+v_jX_{1j}),$$
$$\Pi_{2ij}=\frac{1}{2}(A_iX_2+B_iM_j+X_{1i}^{\mathrm T}+A_jX_2+B_jM_i+X_{1j}^{\mathrm T})-X_2,$$
$$\Pi_3=-X_2-X_2^{\mathrm T},$$

那么模糊系统(7)是稳定的, 且$K_{1i}=M_iX_2^{-1}$.

下面, 考虑模糊系统隶属函数性质, 对定理4的

条件进一步放松. 由于$\sum\limits_{i=1}^{r} h_i(\xi) = 1$, 对其两边求导得$\sum\limits_{i=1}^{r} \dot{h}_i(\xi) = 0$. 因此有$\dot{h}_r(\xi) = -\sum\limits_{i=1}^{r-1} \dot{h}_i(\xi)$. 利用这一性质, 那么可以得到如下定理:

定理 6　如果存在常数$\varphi_1, \varphi_2, \cdots, \varphi_{r-1}$使$\dot{h}_k < \varphi_k$,$k = 1, 2, \cdots, r-1$成立, 且存在矩阵$X_{1i}, M_i, i = 1, 2, \cdots, r$和$X_2$满足下面的LMIs:

$$X_{1r} > 0,$$

$$X_{1r} < X_{1k},\ k = 1, 2, \cdots, r-1, \tag{11}$$

$$\begin{bmatrix} \varOmega_{1ij} & \varOmega_{2ij}^{\mathrm{T}} \\ \varOmega_{2ij} & \varOmega_3 \end{bmatrix} < 0,\ i \leqslant j = 1, 2, \cdots, r, \tag{12}$$

其中:

$$\varOmega_{1ij} = \frac{1}{2}(X_2^{\mathrm{T}} A_i^{\mathrm{T}} + A_i X_2 + M_j^{\mathrm{T}} B_i^{\mathrm{T}} + B_i M_j + X_2^{\mathrm{T}} A_j^{\mathrm{T}} + A_j X_2 + M_i^{\mathrm{T}} B_j^{\mathrm{T}} + B_j M_i) + \sum_{k=1}^{r-1} \varphi_k (X_{1k} - X_{1r}),$$

$$\varOmega_{2ij} = \frac{1}{2}(A_i X_2 + B_i M_j + X_{1i}^{\mathrm{T}} + A_j X_2 + B_j M_i + X_{1j}^{\mathrm{T}}) - X_2,$$

$$\varOmega_3 = -X_2 - X_2^{\mathrm{T}},$$

那么模糊系统(7)是稳定的, 且$K_{1i} = M_i X_2^{-1}$.

证　对式(5)给出的Lyapunov函数求导, 并取$P_3 = P_2$可得

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r} h_i(\xi) h_j(\xi) x^{*\mathrm{T}} \times \begin{bmatrix} N_{1ij} + \sum\limits_{k=1}^{r} \dot{h}_k P_{1k} & N_{2ij}^{\mathrm{T}} \\ N_{2ij} & N_3 \end{bmatrix} x^*,$$

其中N_{1ij}, N_{2ij},N_3与定理3中相同. 于是有

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r} h_i(\xi) h_j(\xi) x^{*\mathrm{T}} \times \begin{bmatrix} N_{1ij} + \sum\limits_{k=1}^{r-1} \dot{h}_k(\xi)(P_{1k} - P_{1r}) & N_{2ij}^{\mathrm{T}} \\ N_{2ij} & N_3 \end{bmatrix} x^*.$$

由式(11)和式(12)可得

$$\begin{bmatrix} \varOmega_{1ij} - \sum\limits_{k=1}^{r-1} (\varphi_k - \dot{h}_k(\xi))(P_{1k} - P_{1r}) & \varOmega_{2ij}^{\mathrm{T}} \\ \varOmega_{2ij} & \varOmega_3 \end{bmatrix} < 0.$$

对上式左右分别乘

$$\begin{bmatrix} X_2^{-\mathrm{T}} & 0 \\ 0 & X_2^{-\mathrm{T}} \end{bmatrix},\ \begin{bmatrix} X_2^{-1} & 0 \\ 0 & X_2^{-1} \end{bmatrix},$$

并令$P_2 = X_2^{-1}$, $P_{1i} = X_2^{-\mathrm{T}} X_{1i} X_2^{-1}$, $K_{i1} = M_i X_2^{-1}$可得

$$\begin{bmatrix} N_{1ij} + \sum\limits_{k=1}^{r-1} \dot{h}_k (P_{1k} - P_{1r}) & N_{2ij}^{\mathrm{T}} \\ N_{2ij} & N_3 \end{bmatrix} < 0,$$

因此有$\dot{V}(x, \xi) < 0$. 闭环系统的稳定性得证.

证毕.

在定理6中, 有$r + \dfrac{r(r+1)}{2}$个LMIs, 而在文献[9]的定理3中$r + (r-1)r(r+1)$个矩阵不等式, 定理6中LMIs的最大界数为$2n$, 远小于文献[9]中的$11n$, 因此, 计算量要小的多.

注 1　本文方法依赖于隶属函数导数, 所得结果仅在$\dot{h}_i(\xi)(i = 1, 2, \cdots, r)$存在的情况下有意义.

4　例子(Example)

在这部分, 通过1个例子证明本文给出方法的有效性. 考虑与文献[9]相同的例子:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^{2} h_i(x)(A_i x(t) + B_i u(t)).$$

其中:

$$A_1 = \begin{bmatrix} -5 & -4 \\ -1 & -2 \end{bmatrix},\ A_2 = \begin{bmatrix} -2 & -4 \\ 20 & -2 \end{bmatrix},$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 10 \end{bmatrix},\ B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 3 \end{bmatrix},$$

$$h_1(x) = \frac{1 + \sin x_1}{2},\ h_2(x) = \frac{1 - \sin x_1}{2}.$$

利用与文献[9]相同的方法可求得, 在$|x_i| \leqslant \dfrac{\pi}{2}, i = 1, 2$时, 有$\varphi_1 = 3.44$, 根据定理6利用MATLAB工具箱可解得

$$K_{11} = [1.9792\ \ -0.6368],\ K_{21} = [1.2856\ \ -1.3915].$$

将K_{11},K_{21}代入原系统, 闭环系统在起始状态为$[0.5\ \ -1]^{\mathrm{T}}$时的状态响应见图1.

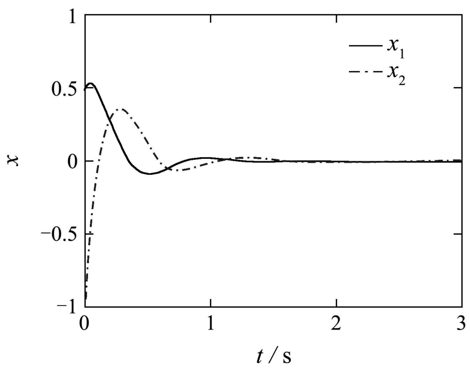

图 1　闭环系统状态响应

Fig. 1　State response of the closed-loop system

用文献[9]中的定理3求解镇定控制器时需要得到$\dot{h}_1$,$\dot{h}_1$的上界和下界, 并且, 需要求解8个阶数为22的双线性矩阵不等式, 而在此只需要得到$\dot{h}_1$的

上界和求解5个阶数为4的LMIs. 因此, 无论是在方法严格性上还是计算量的大小方面, 定理6给出的方法都是优于文献[9]中的定理3的.

5 结论(Conclusion)

本文应用广义模糊Lyapunov方法研究了T-S模糊系统的稳定性分析与镇定控制器设计问题. 即克服了单一Lyapunov函数方法保守性较大的缺点, 又解决了模糊Lyapunov函数方法计算量较大和难以得到LMI形式结果的问题. 最后的例子验证了方法的优越性和有效性.

参考文献(References):

[1] KIM E, LEE H. New approaches to relaxed quadratic stability condition of fuzzy control systems[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2000, 8(5): 523 – 533.

[2] CAO G, REE W, FENG G. Control of nonlinear continuous time systems based on dynamical fuzzy models[J]. *Int J of Systems Science*, 1996, 27(9): 821 – 830.

[3] ZHANG J M, LI R H, ZHANG P A. Stability analysis and systematic design of fuzzy control systems[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2001, 120(1): 65 – 72.

[4] TAKAGI T, SUGENO M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control[J]. *IEEE Trans on Systems, Man,and Cybernetics*, 1985, 15(1): 116 – 132.

[5] TANAKA K, SUGENO M. Stability analysis and design of fuzzy control systems[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1992, 45(2): 135 – 156.

[6] LIU X D, ZHANG Q L. Approaches to quadratic stability conditions and control designs for T-S fuzzy systems[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2003, 11(6): 830 – 839.

[7] LIU X D, ZHANG Q L. New approaches to controller designs based on fuzzy observers for T-S fuzzy systems via LMI[J]. *Automatica*, 2003, 39(9): 1571 – 1582.

[8] TANAKA K, HORI T, WANG H O. A fuzzy Lyapunov approach to fuzzy control system design[C]. *Proc of American Control Conference*. Arlington, VA, USA: IEEE Press, 2001: 4790 – 4795.

[9] TANAKA K, HORI K, WANG H O. A multiple Lyapunov function approach to stabilization of fuzzy control systems[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2003, 11(4): 582 – 589.

[10] CHADLI M, MAQUIN D, RAGOT J. Relaxed stability conditions for Takagi-Sugeno fuzzy systems[C]. *Proc of IEEE Conf on Systems Man and Cybernetics*. Nashville, USA: IEEE Press, 2000: 3514 – 3519.

[11] CAO Y Y, LIN Z L. A descriptor system approach to robust stability analysis and controller synthesis [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2004, 49(11): 2081 – 2084.

作者简介:

周林娜 (1979—), 女, 东北大学博士研究生, 目前研究方向模糊控制, E-mail: ycyyyang@sina.com;

张庆灵 (1956—), 男, 东北大学教授,博士生导师, 目前研究方向为鲁棒控制、广义系统理论、网络控制等, E-mail: qlzhang@mail.neu.edu.cn;

胡跃冰 (1982—), 女, 东北大学硕士研究生, 目前研究方向为模糊控制、鲁帮控制等, E-mail: hohojojo@163.com;

杨春雨 (1979—), 男, 东北大学博士研究生, 目前研究方向为非线性广义系统, E-mail: y_chunyu@sohu.com.