Pure Mathematics 理论数学, 2021, 11(4), 461-471
Published Online April 2021 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/pm
https://doi.org/10.12677/pm.2021.114059

Hans汉斯

不确定广义T-S模糊系统的稳定性分析与容错控制

赵红飞，苏晓明*

沈阳工业大学理学院，辽宁 沈阳
Email: *suxm@sut.edu.cn, 2429639621@qq.com

收稿日期：2021年3月6日；录用日期：2021年4月7日；发布日期：2021年4月14日

摘 要

本文研究了具有不确定参数的广义T-S模糊系统的稳定性问题，以及存在外界扰动的鲁棒控制问题。通过引入故障作为一种辅助状态向量，采用 H_∞ 技术进行分析，尽量减少扰动对状态估计误差的影响，运用LMI方法，设计状态反馈控制器，求得增益矩阵，使系统即使存在故障或干扰的情况下仍能稳定的运行，并具有很好的鲁棒性。本文给出了使系统稳定的充分条件，最后，通过MATLAB进行仿真算例，验证所得结果的有效性。

关键词

广义T-S模糊系统，不确定时滞系统，鲁棒 H_∞ 控制，线性矩阵不等式

Stability Analysis and Fault-Tolerant Control of the Uncertain Descriptor T-S Fuzzy Systems

Hongfei Zhao, Xiaoming Su*

School of Science, Shenyang University of Technology, Shenyang Liaoning
Email: *suxm@sut.edu.cn, 2429639621@qq.com

Received: Mar. 6th, 2021; accepted: Apr. 7th, 2021; published: Apr. 14th, 2021

Abstract

This paper studies the stability of generalized T-S fuzzy systems with uncertain parameters and the robust control problems with external disturbances. By introducing faults as an auxiliary state

*通讯作者。

文章引用: 赵红飞, 苏晓明. 不确定广义 T-S 模糊系统的稳定性分析与容错控制[J]. 理论数学, 2021, 11(4): 461-471.
DOI: 10.12677/pm.2021.114059

vector, H_∞ technology is used for analysis to minimize the impact of disturbances on state estimation errors. Using the LMI method, the state feedback controller is designed to obtain the gain matrix, so that even if the system is faulty or disturbed under the circumstances, it can still run stably and has good robustness. This paper gives the sufficient conditions to make the system stable. Finally, the validity of the results is verified by a MATLAB simulation example.

Keywords

Descriptor T-S Fuzzy Systems, Uncertain Time-Delay Systems, Robust H_∞ Control, Linear Matrix Inequalities

1. 引言

1985 年，Takagi 和 Sugeno [1]最早给出了 T-S 模糊系统模型的建立方法，并将其推广到一般的非线性系统中。1995 年，Wang 等[2]提出了基于 takagi-sugeno 模糊模型的非线性的 PDC 方法，此方法用于一类全局稳定的非线性系统。1999 年，考虑到广义在控制中的实际应用，结合 T-S 模糊模型，Taniguchi T [3]等人提出并概括了广义 T-S 模糊系统的定义，推导并用线性矩阵不等式表示了广义系统的六种稳定条件，并将稳定性分析问题转化成用 Lyapunov 函数描述动力系统稳定性问题。自此，广义 T-S 模糊系统的研究得到各界学者的关注。

目前为止，针对离散广义 T-S 模糊系统稳定性分析的成果远不及对连续系统的研究，文献[4]研究了离散的广义 T-S 模糊系统的稳定性的充分条件，并对离散系统下的镇定性做出了解释说明。文献[5]通过 Lyapunov 函数设计自适应控制器，使得在保持稳定条件的情况下，预测器状态和辅助状态渐近收敛至系统状态，满足以线性矩阵不等式(LMI)形式表示的依赖于延迟的稳定性条件，还可以确保闭环控制系统的输入到状态稳定性。Cao [6]在 2000 年首次研究非线性 T-S 模糊时滞系统，给出了以非线性时滞系统的稳定模糊控制器为目标的连续时滞系统和离散时滞系统的时滞模型的稳定性条件。文献[7]-[13]给出了可控性和观察性，极点配置，稳定性分析，稳定技术以及包括鲁棒性方面在内的结果。

“容错”是指系统能够容忍出现故障，并仍能正常运作的能力。检测和隔离发生故障，保留容错控制律，保持系统的稳定性和性能[14]至关重要。1986 年，文献[15]正式提出“容错控制”的定义，奠定了容错控制在系统控制领域的地位。文献[16]概括了完整性控制的概念与意义，它标志着容错控制问题的清晰化与简单化。文献[17]发表了第一篇专门论述容错控制的论文，其主要研究了系统的镇定性问题。文献[18]研究了一类具有扰动的时变系统以及出现执行器饱和的鲁棒容错控制问题。书《Fault-tolerate control》[19]一书中介绍了容错控制的原理，其主要重点是用于连续过程和离散事件系统的 FTC，故障识别，容错控制器。文献[20]运用李雅普诺夫函数，在具有外界扰动的情况下，设计了观测器状态反馈控制器，并使其具有完整性。文章[21] [22]给出了不确定广义系统分别在执行器或传感器故障下的鲁棒容错控制。在广义系统的容错控制中，文献[23]中提出了鲁棒耗散容错控制来补偿执行器故障的影响。在文章[24]中，设计了一种基于分离特性的可重构的模糊容错控制器，利用模糊广义学习观测器给出的重构补偿执行器故障对系统性能的影响。

近年来，许多确定或不确定系统中的极点配置和鲁棒 H_∞ 控制问题引起了我们的广泛关注。在文献[25]里，作者研究了在离散正则系统和奇异系统中具有约束的鲁棒 H_∞ 控制。其首先提出了具有 H_∞ 规范函数的二次稳定性的概念，寻求概念的等价条件，它不同于旧的方法：Riccati 方程。论文[26]介绍了不确定广义系统中二次稳定性的概念。设计状态反馈控制器，使得设计的闭环系统是正则、无脉冲并且满足所有确定的闭环极值点。

1990 年，文献[27]采用状态空间的手段，提出了一种时域最优控制方法，用于最坏情况设计，是频域 H_∞ 技术的替代方案，讨论了标准 H_∞ 问题的一般线性二次方程设置。文献[28]研究了不确定广义 T-S 模糊系统的滑模容错控制问题，采用模糊控制系统减少不确定性产生的干扰误差，并利用 Lyapunov 理论证明了闭环系统的是全局有界的。文献[29]为了避免时滞对系统的稳定性以及性能造成干扰和误差，研究了针对一类广义模糊时滞系统的鲁棒稳定性以及控制问题。文献[30]给出了连续系统中具有 H_∞ 范数约束的二次稳定性的概念，以及所需的状态反馈控制器及其代数表达式。

2001 年，文献[10]研究了广义系统的稳定性分析、鲁棒性、最优控制及其应用等问题。文献[31]在前人的基础上研究归纳了广义系统的跟踪控制问题，并提出了具有前件变量的 H_∞ 控制问题。2004 年，文献[32]介绍了模糊控制系统的基本思想和解决方案，着重反映该领域最新的研究成果和发展状态。文献[33]在已有的关于广义系统的鲁棒 H_∞ 控制的研究内容的基础上，进一步讨论了多时滞广义系统的鲁棒 H_∞ 控制问题。在控制系统的设计中，当存在不确定性或者外部干扰时，设计控制系统的鲁棒稳定性很值得研究。

2. 问题描述

建立不确定广义 T-S 模糊系统

$$\begin{aligned}
&R^{\mathrm{i}}:\text{if } \xi_1 \text{ is } M_1^i, \text{ and} \cdots, \text{ and } \xi_n \text{ is } M_n^i, \text{ then}\\
&E\dot{x}(t)=(A_i+\Delta A_i)x(t)+(B_{1i}+\Delta B_{1i})u(t)+B_{2i}\omega(t)\\
&z(t)=C_i x(t)+D_i u(t)
\end{aligned}\tag{1}$$

$\Delta A_i,\Delta B_{1i}$ 为不确定参数的矩阵，且 $[\Delta A_i \quad \Delta B_{1i}]=H_iF_i[E_{ai} \quad E_{1i}]$，$F_i$ 满足 $F_i^{\mathrm{T}}F_i\le I$。假设 $\xi(t)=(\xi_1(t),\xi_2(t),\cdots,\xi_p(t))^{\mathrm{T}}$ 与 $u(t)$ 无关。

系统的全局变量为

$$\begin{aligned}
E\dot{x}(t)&=\sum_{i=1}^{r}h_i(\xi(t))\big[(A_i+\Delta A_i)x(t)+(B_{1i}+\Delta B_{1i})u(t)+B_{2i}\omega(t)\big]\\
z(t)&=\sum_{i=1}^{r}h_i(\xi(t))\big[C_i x(t)+D_i u(t)\big]
\end{aligned}\tag{2}$$

零输入系统为：

$$E\dot{x}(t)=\sum_{i=1}^{r}h_i(\xi(t))(A_i+\Delta A_i)x(t)\tag{3}$$

引理 1 [34]存在定常数矩阵 D,E 和对称矩阵 Y，则

$$Y+DFE+E^{\mathrm{T}}F^{\mathrm{T}}D^{\mathrm{T}}<0\tag{4}$$

对 $\forall F^{\mathrm{T}}F\le I$ 的矩阵 F，当且仅当存在常数 $\varepsilon>0$，使得

$$Y+\varepsilon DD^{\mathrm{T}}+\varepsilon^{-1}E^{\mathrm{T}}E<0\tag{5}$$

以下向量 $a(t)$ 的范数分别定义为 $\|a(t)\|=\sqrt{a^{\mathrm{T}}(t)a(t)},\ \|a(t)\|_2=\int_0^{\infty}a^{\mathrm{T}}(t)a(t)\mathrm{d}t$，并设系统具有零初始

条件 $x(0)=0$。

3. 主要结果

3.1. 不确定广义 T-S 模糊系统的稳定性分析

引理 2 [34]不确定广义 T-S 模糊系统是渐近稳定的，如果存在可逆矩阵 P 和 $\varepsilon_i>0$，使得

$$E^{\mathrm{T}}P=P^{\mathrm{T}}E\geq 0 \tag{6a}$$

$$\begin{bmatrix} A_i^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}A_i+\varepsilon_i H_i H_i^{\mathrm{T}}P & E_{1i}^{\mathrm{T}} \\ E_{1i} & -\varepsilon_i I \end{bmatrix}<0, i=1,2,\cdots,r \tag{6b}$$

接下来设计状态反馈控制器：

$$u(t)=\sum_{i=1}^{r}h_i\left(\xi(t)\right)K_i x(t) \tag{7}$$

将(7)代入到系统(2)中，得到：

$$\begin{aligned} E\dot{x}(t)&=\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}h_i\left(\xi(t)\right)h_j\left(\xi(t)\right)\left[\left(A_i+\Delta A_i\right)+\left(B_i+\Delta B_i\right)K_j\right]x(t) \\ &=\sum_{i=1}^{r}h_i^{\mathrm{T}}\left(\xi(t)\right)\left[\left(A_i+\Delta A_i\right)+\left(B_i+\Delta B_i\right)K_i\right]x(t)+\sum_{i<j\leq r}h_i\left(\xi(t)\right)h_j\left(\xi(t)\right) \\ &\quad\left[\left(A_i+\Delta A_i\right)+\left(B_i+\Delta B_i\right)K_j+\left(A_j+\Delta A_j\right)+\left(B_j+\Delta B_j\right)K_i\right]x(t) \end{aligned} \tag{8}$$

定理 1 系统是渐近稳定的，如果存在共同的非奇异矩阵 P，使得

$$E^{\mathrm{T}}P=P^{\mathrm{T}}E\geq 0 \tag{9a}$$

$$\left[\left(\tilde{A}_i+\Delta\tilde{A}_i\right)+\left(\tilde{B}_{1i}+\Delta\tilde{B}_{1i}\right)\tilde{K}_j\right]^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}\left[\left(\tilde{A}_i+\Delta\tilde{A}_i\right)+\left(\tilde{B}_{1i}+\Delta\tilde{B}_{1i}\right)\tilde{K}_j\right]<0 \tag{9b}$$

证明：

$$\begin{aligned} &\left[\left(\tilde{A}_i+\Delta\tilde{A}_i\right)+\left(\tilde{B}_{1i}+\Delta\tilde{B}_{1i}\right)\tilde{K}_j\right]^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}\left[\left(\tilde{A}_i+\Delta\tilde{A}_i\right)+\left(\tilde{B}_{1i}+\Delta\tilde{B}_{1i}\right)\tilde{K}_j\right] \\ &=\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}h_i\left(\xi(t)\right)h_j\left(\xi(t)\right)\left[A_i^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}A_i+K_j^{\mathrm{T}}B_{1i}^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}B_{1i}K_j\right. \\ &\quad\left.+\left(H_iF_iE_{ai}\right)^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}H_iF_iE_{ai}+K_j^{\mathrm{T}}\left(H_iF_iE_{ai}\right)^{\mathrm{T}}P+PH_iF_iE_{ai}K_j\right] \\ &=\sum_{i=1}^{r}h_i^{\mathrm{T}}\left(\xi(t)\right)G_{ii}+\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}h_i\left(\xi(t)\right)h_j\left(\xi(t)\right)\left(G_{ij}+G_{ji}\right)<0 \end{aligned}$$

因此，定理 1 可以转化为：

$$\begin{aligned} &E^{\mathrm{T}}P=P^{\mathrm{T}}E\geq 0 \\ &G_{ii}<0 \\ &G_{ij}+G_{ji}<0 \end{aligned} \tag{10}$$

$G_{ii}<0$ 成立，当且仅当存在 $\varepsilon_i>0$，使得

$$A_i^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}A_i+K_i^{\mathrm{T}}B_{1i}^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}B_{1i}K_i+\varepsilon_i P^{\mathrm{T}}H_iH_i^{\mathrm{T}}P+\varepsilon_i^{-1}\left(E_{ai}+E_{1i}K_i\right)^{\mathrm{T}}\left(E_{ai}+E_{1i}K_i\right)<0$$

根据 Schur 补引理，等价于

$$\begin{bmatrix} A_i^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}A_i+K_i^{\mathrm{T}}B_{1i}^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}B_{1i}K_i+\varepsilon_i P^{\mathrm{T}}H_iH_i^{\mathrm{T}}P & E_{ai}^{\mathrm{T}}+K_i^{\mathrm{T}}E_{1i}^{\mathrm{T}} \\ E_{ai}+E_{1i}K_i & -\varepsilon_i I \end{bmatrix}<0$$

$$\begin{aligned} G_{ij}+G_{ji} &= A_i^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}A_i+K_j^{\mathrm{T}}B_{1i}^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}B_{1i}K_j+A_j^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}A_j+K_i^{\mathrm{T}}B_{1j}^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}B_{1j}K_i \\ &\quad+\begin{bmatrix} P^{\mathrm{T}}H_i & P^{\mathrm{T}}H_j \end{bmatrix}\begin{bmatrix} F_i & 0 \\ 0 & F_j \end{bmatrix}\begin{bmatrix} E_{ai}+E_{1i}K_j \\ E_{aj}+E_{1j}K_j \end{bmatrix} \\ &\quad+\begin{bmatrix} E_{ai}^{\mathrm{T}}+K_j^{\mathrm{T}}E_{1i}^{T} & E_{aj}^{\mathrm{T}}+K_i^{\mathrm{T}}E_{1j}^{\mathrm{T}} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} F_i^{\mathrm{T}} & 0 \\ 0 & F_j^{\mathrm{T}} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} H_i^{\mathrm{T}}P \\ H_j^{\mathrm{T}}P \end{bmatrix} \\ &<0 \end{aligned}$$

$G_{ij}+G_{ji}<0$ 当且仅当存在 $\varepsilon_{ij}>0$，使得

$$\begin{aligned} &A_i^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}A_i+K_j^{\mathrm{T}}B_{1i}^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}B_{1i}K_j+A_j^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}A_j+K_i^{\mathrm{T}}B_{1j}^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}B_{1j}K_i \\ &+\varepsilon_{ij}\begin{bmatrix} P^{\mathrm{T}}H_i & P^{\mathrm{T}}H_j \end{bmatrix}\begin{bmatrix} H_i^{\mathrm{T}}P \\ H_j^{\mathrm{T}}P \end{bmatrix}+\varepsilon_{ij}^{-1}\begin{bmatrix} E_{ai}^{\mathrm{T}}+K_j^{\mathrm{T}}E_{1i}^{\mathrm{T}} & E_{aj}^{\mathrm{T}}+K_i^{\mathrm{T}}E_{1j}^{\mathrm{T}} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} E_{ai}+E_{1i}K_j \\ E_{aj}+E_{1j}K_i \end{bmatrix}<0 \end{aligned}$$

根据 Schur 补引理，等价于

$$\begin{bmatrix} \Upsilon & P^{\mathrm{T}}H_i & E_{aj}^{\mathrm{T}}+K_i^{\mathrm{T}}E_{1j}^{\mathrm{T}} \\ E_{ai}+E_{1i}K_j & -\varepsilon_{ij}I & 0 \\ E_{aj}+E_{1j}K_i & 0 & -\varepsilon_{ij}I \end{bmatrix}<0$$

其中

$$\Upsilon=A_i^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}A_i+K_j^{\mathrm{T}}B_{1i}^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}B_{1i}K_j+A_j^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}A_j+K_i^{\mathrm{T}}B_{1j}^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}B_{1j}K_i+\varepsilon_{ij}P^{\mathrm{T}}H_iH_i^{\mathrm{T}}P+\varepsilon_{ij}P^{\mathrm{T}}H_jH_j^{\mathrm{T}}P$$

综上，令 $X=P^{-1},N_i=K_iP^{-1}$，定理可改写为：

$$\begin{aligned} &XE^{\mathrm{T}}=EX^{\mathrm{T}}\geq 0 \\ &\begin{bmatrix} XA_i^{\mathrm{T}}+A_iX^{\mathrm{T}}+N_i^{\mathrm{T}}B_{1j}^{\mathrm{T}}+B_{1j}N_i+\varepsilon_iH_iH_i^{\mathrm{T}} & XE_{ai}^{\mathrm{T}}+N_i^{\mathrm{T}}E_{1i}^{\mathrm{T}} \\ E_{ai}X^{\mathrm{T}}+E_{1i}N_i & -\varepsilon_iI \end{bmatrix}<0 \\ &\begin{bmatrix} \Pi & XE_{ai}^{\mathrm{T}}+N_j^{\mathrm{T}}E_{1i}^{\mathrm{T}} & XE_{aj}^{\mathrm{T}}+N_i^{\mathrm{T}}E_{1j}^{\mathrm{T}} \\ E_{ai}X^{\mathrm{T}}+E_{1i}N_j & -\varepsilon_{ij}I & 0 \\ E_{aj}X^{\mathrm{T}}+E_{1j}N_i & 0 & -\varepsilon_{ij}I \end{bmatrix}<0 \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} \Pi=&XA_i^{\mathrm{T}}+A_iX^{\mathrm{T}}+N_j^{\mathrm{T}}B_{1i}^{\mathrm{T}}+B_{1i}N_j+XA_j^{\mathrm{T}}+A_jX^{\mathrm{T}}+N_i^{\mathrm{T}}B_{1j}^{\mathrm{T}}+B_{1j}N_i \\ &+\varepsilon_{ij}H_iH_i^{\mathrm{T}}+\varepsilon_{ij}H_jH_j^{\mathrm{T}} \end{aligned}$$

由上可得，当条件满足时，不确定广义 T-S 模糊系统在控制器下是稳定的，其中反馈增益矩阵为 $K_i=N_iP$。

3.2. 控制器设计

考虑以下闭环系统：

$$\begin{aligned} &E\dot{x}(t)=\sum_{i=1}^{r}h_i\left(\xi(t)\right)\left[\left(A_i+\Delta A_i\right)x(t)+\left(B_{1i}+\Delta B_{1i}\right)u(t)+B_{2i}\omega(t)\right] \\ &z(t)=\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}h_i\left(\xi(t)\right)h_j\left(\xi(t)\right)\left[C_ix(t)+D_iu(t)K_j\right] \end{aligned} \tag{11}$$

寻找广义状态反馈控制器 K_i，使系统(11)满足：

$\omega(t)=0$ 时，系统正则、脉冲、渐近稳定，则系统鲁棒稳定。

存在 $\gamma>0$，在零初始条件下，满足 $\|z(t)\|_2<\gamma\|\omega(t)\|_2$，即系统具有 H_∞ 范数上界 γ。

将闭环系统(11)简记为：

$$\begin{aligned}&E\dot{x}(t)=\left[\left(\tilde{A}_i+\Delta\tilde{A}_i\right)x(t)+\left(\tilde{B}_{1i}+\Delta\tilde{B}_{1i}\right)u(t)+\tilde{B}_{2i}\omega(t)\right]\\&z(t)=\left(\tilde{C}_i x(t)+\tilde{D}_i\tilde{K}_j\right)x(t)\end{aligned}\tag{12}$$

定理 2 正则、无脉冲的广义 T-S 模糊系统是鲁棒稳定的，如果存在共同的非奇异矩阵 P，满足

$$E^{\mathrm{T}}P=P^{\mathrm{T}}E\geq 0\tag{13a}$$

$$\begin{bmatrix}\left[\left(\tilde{A}_i+\Delta\tilde{A}_i\right)+\left(\tilde{B}_{1i}+\Delta\tilde{B}_{1i}\right)\tilde{K}_j\right]^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}\left[\left(\tilde{A}_i+\Delta\tilde{A}_i\right)+\left(\tilde{B}_{1i}+\Delta\tilde{B}_{1i}\right)\tilde{K}_j\right]+\tilde{C}_i^T\tilde{C}_i+\tilde{K}_j^{\mathrm{T}}\tilde{K}_j & P^{\mathrm{T}}\tilde{B}_{2i}\\ \tilde{B}_{2i}^{\mathrm{T}}P & -\gamma^2 I\end{bmatrix}<0\tag{13b}$$

证明 可知 $\left[\left(\tilde{A}_i+\Delta\tilde{A}_i\right)+\left(\tilde{B}_{1i}+\Delta\tilde{B}_{1i}\right)\tilde{K}_j\right]^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}\left[\left(\tilde{A}_i+\Delta\tilde{A}_i\right)+\left(\tilde{B}_{1i}+\Delta\tilde{B}_{1i}\right)\tilde{K}_j\right]<0$

考虑 Lyapunov 函数，$V(x(t))=x^{\mathrm{T}}(t)E^{\mathrm{T}}Px(t)$，由定理 1 可知，当 $\omega(t)=0$ 时，系统鲁棒稳定。

当 $\omega(t)\neq 0$ 时，

$$V(x(t))=x^{\mathrm{T}}(t)\left(\Theta^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}\Theta\right)x(t)+x^{\mathrm{T}}(t)P^{\mathrm{T}}\tilde{B}_{2i}\omega(t)+\omega^{\mathrm{T}}(t)\tilde{B}_{2i}^{\mathrm{T}}Px(t)$$

其中

$$\Theta=\left(\tilde{A}_i+\Delta\tilde{A}_i\right)+\left(\tilde{B}_{1i}+\Delta\tilde{B}_{1i}\right)\tilde{K}_j$$

总存在一个充分小的 $0<\delta<1$，使得

$$\begin{bmatrix}\left\{\Theta^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}\Theta+\tilde{C}_i^{\mathrm{T}}\tilde{C}_i+\tilde{K}_j^{\mathrm{T}}\tilde{K}_j\right\} & P^{\mathrm{T}}\tilde{B}_{2i}\\ \tilde{B}_{2i}^{\mathrm{T}}P & -\gamma^2(1-\delta)I\end{bmatrix}<0$$

$$\Theta=\left(\tilde{A}_i+\Delta\tilde{A}_i\right)+\left(\tilde{B}_{1i}+\Delta\tilde{B}_{1i}\right)\tilde{K}_j$$

$$\begin{aligned}&\int_0^T\left[\|z(t)\|^2\mathrm{d}t-\gamma^2(1-\delta)\|\omega(t)\|^2\right]\mathrm{d}t\\&=\int_0^T\left[z(t)^{\mathrm{T}}z(t)-\gamma^2(1-\delta)\omega(t)^{\mathrm{T}}\omega(t)+\dot{V}(x(t))\right]\mathrm{d}t-V(x(T))\\&=\int_0^T\left\{\left[\left(\tilde{C}_i+\Delta\tilde{D}_i\tilde{K}_j\right)x(t)\right]^{\mathrm{T}}\left(\tilde{C}_i+\Delta\tilde{D}_i\tilde{K}_j\right)x(t)-\gamma^2(1-\delta)\omega^{\mathrm{T}}(t)\omega(t)\right.\\&\quad+x(t)^{\mathrm{T}}\left\{\left[\left(\tilde{A}_i+\Delta\tilde{A}_i\right)+\left(\tilde{B}_{1i}+\Delta\tilde{B}_{1i}\right)\tilde{K}_j\right]^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}\left[\left(\tilde{A}_i+\Delta\tilde{A}_i\right)+\left(\tilde{B}_{1i}+\Delta\tilde{B}_{1i}\right)\tilde{K}_j\right]\right\}x(t)\\&\left.x(t)^{\mathrm{T}}P^{\mathrm{T}}\tilde{B}_{2i}\omega(t)+\omega^{\mathrm{T}}(t)\tilde{B}_{2i}^{\mathrm{T}}Px(t)\right\}\mathrm{d}t-V(x(t))\\&=\int_0^T\begin{bmatrix}x(t)\\ \omega(t)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\left(\Theta^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}\Theta+\tilde{C}_i^{\mathrm{T}}\tilde{C}_i+\tilde{K}_j^{\mathrm{T}}\tilde{K}_j\right) & P^{\mathrm{T}}\tilde{B}_{2i}\\ \tilde{B}_{2i}^{\mathrm{T}}P & -\gamma^2(1-\delta)I\end{bmatrix}\mathrm{d}t<0\end{aligned}$$

其中

$$\Theta=\left(\tilde{A}_i+\Delta\tilde{A}_i\right)+\left(\tilde{B}_{1i}+\Delta\tilde{B}_{1i}\right)\tilde{K}_j$$

可得

$$V\left(x(T)\right)+\int_0^T\left[z^{\mathrm{T}}(t)z(t)\right]\mathrm{d}t<\int_0^T\gamma^2(1-\delta)\omega^{\mathrm{T}}(t)\omega(t)\mathrm{d}t$$

因此$\left\|z(t)\right\|_2^2\le\gamma^2(1-\delta)\left\|\omega(t)\right\|_2^2<\gamma^2\left\|\omega(t)\right\|_2^2$

所以系统渐近稳定，并且状态反馈控制器为鲁棒H_∞控制器。

条件(13b)等价于

$$\begin{bmatrix}\Theta^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}\Theta & P^{\mathrm{T}}\tilde{B}_{2i} & \tilde{C}_i^{\mathrm{T}} & \tilde{K}_j^{\mathrm{T}}\\ \tilde{B}_{2i}^{\mathrm{T}}P & -\gamma^2I & 0 & 0\\ \tilde{C}_i & 0 & -I & 0\\ \tilde{K}_j & 0 & 0 & -I\end{bmatrix}<0$$

$$\sum_{i=1}^{r}h_i\left(\xi(t)\right)G_{ii}+\sum_{i<j\le r}^{r}h_i\left(\xi(t)\right)h_j\left(\xi(t)\right)\left(G_{ij}+G_{ji}\right)<0$$

其中

$$\Theta=\left(\tilde{A}_i+\Delta\tilde{A}_i\right)+\left(\tilde{B}_{1i}+\Delta\tilde{B}_{1i}\right)\tilde{K}_j$$

$$G_{ij}=\begin{bmatrix}Z & P^{\mathrm{T}}B_{2i} & C_i^{\mathrm{T}} & K_j^{\mathrm{T}}\\ B_{2i}^{\mathrm{T}}P & -\gamma^2I & 0 & 0\\ C_i & 0 & -I & 0\\ K_j & 0 & 0 & -I\end{bmatrix}$$

其中

$$Z=A_i^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}A_i+K_j^{\mathrm{T}}B_{1i}^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}B_{1i}K_j+\left(H_iF_iE_{ai}\right)^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}H_iF_iE_{ai}+K_j^{\mathrm{T}}\left(H_jF_iE_{1i}\right)^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}H_jF_iE_{1i}K_j$$

因此定理 2 成立，只要

$$\begin{aligned}&E^{\mathrm{T}}P=P^{\mathrm{T}}E\ge0\\&G_{ii}<0\\&G_{ij}+G_{ji}<0\end{aligned}\tag{14}$$

$$G_{ii}=\begin{bmatrix}Z & P^{\mathrm{T}}B_{2i} & C_i^{\mathrm{T}} & K_i^{\mathrm{T}}\\ B_{2i}^{\mathrm{T}}P & -\gamma^2I & 0 & 0\\ C_i & 0 & -I & 0\\ K_i & 0 & 0 & -I\end{bmatrix}$$

其中

$$Z=A_i^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}A_i+K_i^{\mathrm{T}}B_{1i}^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}B_{1i}K_i+\left(H_iF_iE_{ai}\right)^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}H_iF_iE_{ai}+K_i^{\mathrm{T}}\left(H_iF_iE_{1i}\right)^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}H_iF_iE_{1i}K_i$$

$G_{ii}<0$等价于

$$\begin{aligned}&A_i^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}A_i+K_i^{\mathrm{T}}B_{1i}^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}B_{1i}K_i+\left(H_iF_iE_{ai}\right)^{\mathrm{T}}P\\&+P^{\mathrm{T}}H_iF_iE_{ai}+K_i\left(H_iF_iE_{1i}\right)^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}H_iF_iE_{1i}K_i\\&-\begin{bmatrix}P^{\mathrm{T}}B_{2i} & C_i^{\mathrm{T}} & K_i\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-\gamma^2I & 0 & 0\\ 0 & -I & 0\\ 0 & 0 & -I\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}B_{2i}^{\mathrm{T}}P\\ C_i\\ K_i^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}<0\end{aligned}$$

由引理 1 可得，当且仅当存在 $\varepsilon_i > 0$，使得

$$A_i^{\mathrm{T}} P + P^{\mathrm{T}} A_i + K_i^{\mathrm{T}} B_{1i}^{\mathrm{T}} P + P^{\mathrm{T}} B_{1i} K_i + \varepsilon_i P^{\mathrm{T}} H_i H_i^{\mathrm{T}} P + \varepsilon_i^{-1} \left(E_{ai} + E_{1i} K_i\right)^{\mathrm{T}} \left(E_{ai} + E_{1i} K_i\right)$$
$$-\begin{bmatrix} P^{\mathrm{T}} B_{2i} & C_i^{\mathrm{T}} & K_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\gamma^2 I & 0 & 0 \\ 0 & -I & 0 \\ 0 & 0 & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{2i}^{\mathrm{T}} P \\ C_i \\ K_i^{\mathrm{T}} \end{bmatrix} < 0$$

根据 Schur 补引理，等价于

$$\begin{bmatrix} \mathrm{X} & E_{ai}^{\mathrm{T}} + K_i^{\mathrm{T}} E_{1i}^{\mathrm{T}} & P^{\mathrm{T}} B_{2i} & C_i^{\mathrm{T}} & K_i^{\mathrm{T}} \\ E_{ai} + E_{1i} K_i & -\varepsilon_i I & 0 & 0 & 0 \\ B_{2i}^{\mathrm{T}} P & 0 & -\gamma^2 I & 0 & 0 \\ C_i & 0 & 0 & -I & 0 \\ K_i & 0 & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0$$

其中

$$\mathrm{X} = A_i^{\mathrm{T}} P + P^{\mathrm{T}} A_i + K_i^{\mathrm{T}} B_{1i}^{\mathrm{T}} P + P^{\mathrm{T}} B_{1i} K_i + \varepsilon_i P^{\mathrm{T}} H_i H_i^{\mathrm{T}} P$$

$$G_{ij} + G_{ji} = \begin{bmatrix} \Phi_{ij} + \Phi_{ji} & P^{\mathrm{T}} B_{2i} + P^{\mathrm{T}} B_{2j} & C_i^{\mathrm{T}} + C_j^{\mathrm{T}} & K_i^{\mathrm{T}} + K_j^{\mathrm{T}} \\ B_{2i}^{\mathrm{T}} P + B_{2j}^{\mathrm{T}} P & -2\gamma^2 I & 0 & 0 \\ C_i + C_j & 0 & -2I & 0 \\ K_i + K_j & 0 & 0 & -2I \end{bmatrix} < 0$$

其中

$$\Phi_{ij} = A_i^{\mathrm{T}} P + P^{\mathrm{T}} A_i + K_j^{\mathrm{T}} B_{1i}^{\mathrm{T}} P + P^{\mathrm{T}} B_{1i} K_j + \left(H_i F_i E_{ai}\right)^{\mathrm{T}} P + P^{\mathrm{T}} H_i F_i E_{ai} + K_j^{\mathrm{T}} \left(H_j F_i E_{1i}\right)^{\mathrm{T}} P + P^{\mathrm{T}} H_j F_i E_{1i} K_j$$

由 Schur 补引理，等价于

$$A_i^{\mathrm{T}} P + P^{\mathrm{T}} A_i + K_j^{\mathrm{T}} B_{1i}^{\mathrm{T}} P + P^{\mathrm{T}} B_{1i} K_j + A_j^{\mathrm{T}} P + P^{\mathrm{T}} A_j + K_i^{\mathrm{T}} B_{1j}^{\mathrm{T}} P + P^{\mathrm{T}} B_{1j} K_i$$
$$+\begin{bmatrix} P^{\mathrm{T}} H_i & P^{\mathrm{T}} H_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_i & \\ & F_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{ai} + E_{1i} K_j \\ E_{aj} + E_{1j} K_i \end{bmatrix}$$
$$+\begin{bmatrix} E_{ai}^{\mathrm{T}} + K_j^{\mathrm{T}} E_{1i}^{\mathrm{T}} & E_{aj}^{\mathrm{T}} + K_i^{\mathrm{T}} E_{1j}^{\mathrm{T}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_i^{\mathrm{T}} & 0 \\ 0 & F_j^{\mathrm{T}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_i^{\mathrm{T}} P \\ H_j^{\mathrm{T}} P \end{bmatrix}$$
$$-\begin{bmatrix} P^{\mathrm{T}} B_{2i} + P^{\mathrm{T}} B_{2j} & C_i^{\mathrm{T}} + C_j^{\mathrm{T}} & K_i^{\mathrm{T}} + K_j^{\mathrm{T}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2\gamma^2 I & 0 & 0 \\ 0 & -2I & 0 \\ 0 & 0 & -2I \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} B_{2i}^{\mathrm{T}} P + B_{2j}^{\mathrm{T}} P \\ C_i + C_j \\ K_i + K_j \end{bmatrix} < 0$$

由引理 1 及 Schur 补引理，当且仅当存在 $\varepsilon_{ij} > 0$，使得

$$\begin{bmatrix} \left(\Gamma_{ij} + \Gamma_{ji} + \Xi_i + \Xi_j\right) & \left(E_{ai}^{\mathrm{T}} + K_j^{\mathrm{T}} E_{1i}^{\mathrm{T}}\right) & \left(E_{aj}^{\mathrm{T}} + K_i^{\mathrm{T}} E_{1j}^{\mathrm{T}}\right) & \left(P^{\mathrm{T}} B_{2i} + P^{\mathrm{T}} B_{2j}\right) & C_i^{\mathrm{T}} + C_j^{\mathrm{T}} & K_i^{\mathrm{T}} + K_j^{\mathrm{T}} \\ * & -\varepsilon_{ij} I & * & * & * & * \\ * & * & -\varepsilon_{ij} I & * & * & * \\ * & * & * & -2\gamma^2 I & * & * \\ * & * & * & * & -2I & * \\ * & * & * & * & * & -2I \end{bmatrix} < 0$$

其中

$$\Gamma_{ij}=A_i^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}A_i+K_j^{\mathrm{T}}B_{1i}^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}B_{1i}K_j,\ \Xi_i=\varepsilon_{ij}P^{\mathrm{T}}H_iH_i^{\mathrm{T}}P$$

令 $X=P^{-1},K_i=N_iP^{-1}$，得到

$$\begin{bmatrix}\Psi & XE_{ai}^{\mathrm{T}}+N_j^{\mathrm{T}}E_{1i}^{\mathrm{T}} & XE_{aj}^{\mathrm{T}}+N_i^{\mathrm{T}}E_{1j}^{\mathrm{T}} & B_{2i}+B_{2j} & XC_i^{\mathrm{T}}+XC_j^{\mathrm{T}} & N_i^{\mathrm{T}}+N_j^{\mathrm{T}}\\ * & -\varepsilon_{ij}I & * & * & * & *\\ * & * & -\varepsilon_{ij}I & * & * & *\\ * & * & * & -2\gamma^2I & * & *\\ * & * & * & * & -I & *\\ * & * & * & * & * & -I\end{bmatrix}<0$$

其中

$$\Psi=XA_i^{\mathrm{T}}+A_iX^{\mathrm{T}}+N_j^{\mathrm{T}}B_{1i}^{\mathrm{T}}+B_{1i}N_j$$

至此，定理得到证明。

4. 数值算例

考虑参数不确定的广义 T-S 模糊系统：

$$\begin{aligned}&R^i:\text{if } x_1(t) \text{ is } M_i,\text{then}\\&E\dot{x}(t)=(A_i+\Delta A_i)x(t)+(B_{1i}+\Delta B_{1i})u(t)+B_{2i}\omega(t)\\&z(t)=C_ix(t)+D_iu(t)\end{aligned}$$

隶属度函数：

$$h_1(\xi_1(t))=1-\frac{1}{1+\mathrm{e}^{-2x_1}},\ h_2(\xi_1(t))=\frac{1}{1+\mathrm{e}^{-2x_1}}$$

$$E=\begin{bmatrix}1&0\\0&0\end{bmatrix};A_1=\begin{bmatrix}0.1&0.2\\0.2&0.7\end{bmatrix};A_2=\begin{bmatrix}0.1&0.1\\0&0.9\end{bmatrix};$$

$$B_{11}=\begin{bmatrix}15\\16\end{bmatrix};B_{12}=\begin{bmatrix}16\\12\end{bmatrix};B_{21}=\begin{bmatrix}0.125\\0\end{bmatrix};B_{22}=\begin{bmatrix}0.1227\\0\end{bmatrix};$$

$$C_1=C_2=\begin{bmatrix}0&1\end{bmatrix};$$

$$E_{11}=\begin{bmatrix}0\\0.12\end{bmatrix};E_{12}=\begin{bmatrix}0\\0.11\end{bmatrix};E_{a1}=\begin{bmatrix}0&0\\0&0.27\end{bmatrix};E_{a2}=\begin{bmatrix}0&0\\0&0.9\end{bmatrix};$$

$$H_1=\begin{bmatrix}0&0\\0&0.119\end{bmatrix};H_2=\begin{bmatrix}0&0\\0&0.27\end{bmatrix}$$

取 $\gamma=0.1$，应用 MATLAB 中的 LMI 工具箱可得：

$$X=\begin{bmatrix}230.2734&212.1117\\0&4.3549\end{bmatrix}$$

$$N_1=\begin{bmatrix}-11.8783&-8.5217\end{bmatrix};\ N_1=\begin{bmatrix}-10.7686&-10.3875\end{bmatrix}$$

$$\varepsilon_1=520.5714,\ \varepsilon_2=463.1203,\ \varepsilon_{12}=519.6739$$

从而得到

$$P=\begin{bmatrix}0.0043 & 0\\ -0.2115 & 0.2296\end{bmatrix}$$

$$K_1=\begin{bmatrix}1.7509 & -1.9568\end{bmatrix};\ K_2=\begin{bmatrix}2.1503 & -2.3852\end{bmatrix}$$

因此状态反馈控制器为：

$$u(t)=\left\{\left(1-\frac{1}{1+\mathrm{e}^{-2x_1}}\right)\begin{bmatrix}1.7509 & -1.9568\end{bmatrix}+\frac{1}{1+\mathrm{e}^{-2x_1}}\begin{bmatrix}2.1503 & -2.3852\end{bmatrix}\right\}x(t)$$

5. 结论

在存在外界扰动的情况下，利用 Lyapunov 函数方法、矩阵缩放理论以及线性矩阵不等式(LMI)技术研究了具有不确定参数的广义 T-S 模糊系统的稳定性问题。首先给出了控制器存在的充分条件，保证闭环系统稳定且具有 H_∞ 性能。然后用 MATLAB 进行仿真算例验证所得结果的有效性，从而达到系统的可行性。

参考文献

[1] Takagi, T. and Sugeno, M. (1985) Fuzzy Identification of Systems and Its Application to Modeling and Control. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, **15**, 116-132. https://doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313399

[2] Wang, H.O., Tanaka, K. and Griffin, M. (1995) Parallel Distributed Compensation of Nonlinear Systems by Takagi and Sugeno's Fuzzy Model. *Proceedings of 4th IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Vol. 2, 531-538.

[3] Taniguchi, T., Tanaka, K. and Yamafuji, K. (1999) Fuzzy Descriptor Systems: Stability Analysis and Design via LMIs. *IEEE American Control Conference*, San Diego, 2-4 June 1999.

[4] 施佳. 离散 T-S 模糊广义系统的稳定性分析与控制[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.

[5] Kim-Doang, N. (2020) An Adaptive Controller for Uncertain Nonlinear Systems with Multiple Time Delays. *Automatica*, **117**, Article ID: 108976. https://doi.org/10.1016/j.automatica.2020.108976

[6] Cao, Y.Y. and Frank, P.M. (2000) Analysis and Synthesis of Nonlinear Time-Delay Systems via Fuzzy Control Approach. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, **8**, 200-211. https://doi.org/10.1109/91.842153

[7] Xu, Y., Yang, C.W. and Zhou, S.S. (2000) Robust H_∞ Control for Uncertain Discrete-Time Systems with Circular Pole Constraints. *Systems & Control Letters*, **39**, 13-18. https://doi.org/10.1016/S0167-6911(99)00066-3

[8] Hu, G. and Xu, J.M. (2002) Robust Control for Uncertain Singular Systems with Disk Pole Constraints. *Proceedings of the 42nd IEEE Conference*, **11**, 288-293.

[9] Wang, Y., Sun, Z.Q. and Sun, F.C. (2004) Robust Fuzzy Control of a Class of Nonlinear Descriptor Systems with Time-Varying Delay. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, **2**, 76-82.

[10] Tanaka, K. and Wang, H.O. (2001) Fuzzy Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach. John Wiley & Sons, Inc., New York. https://doi.org/10.1002/0471224596

[11] Taniguchi, T., Tanaka, K. and Wang, H.O. (2000) Fuzzy Descriptor Systems and Nonlinear Model Following Control. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, **8**, 442-452. https://doi.org/10.1109/91.868950

[12] Han, C., Zhang, G., Wu, L. and Zeng, Q. (2012) Sliding Mode Control of T-S Fuzzy Descriptor Systems with Time-Delay. *Journal of the Franklin Institute*, **349**, 1430-1444. https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2011.07.001

[13] Yuan, Y., Zhang, Q., Zhang, D. and Chen, B. (2008) Admissible Conditions of Fuzzy Descriptor Systems Based on Fuzzy Lyapunov Function Approach. *International Journal of Information and Systems Sciences*, **4**, 219-232.

[14] Han, J. and Zhang, H.G. (2016) Robust Fault Estimation and Accommodation for a Class of T-S Fuzzy Systems with Local Nonlinear Models. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, **35**, 3506-3530. https://doi.org/10.1007/s00034-015-0219-x

[15] 张嗣瀛(译). 对于控制的挑战——集体的观点[J]. 控制与决策, 1987(4): 52-64.

[16] Niederlinski, A. (1971) A Heuristic Approach to the Design of Linear Multivariable Interacting Control Systems. *Automatica*, **7**, 691-701. https://doi.org/10.1016/0005-1098(71)90007-0

[17] Siljak, D.D. (1980) Reliable Control Using Multiple Control Systems. *International Journal of Control*, **31**, 303-329. https://doi.org/10.1080/00207178008961043

[18] Su, X.M., Wang, J.Y. and Shi, H.Y. (2018) Optimal Fault-Tolerant Control against Descriptor Time-Varying Systems with Nonlinear Input. *Mathematical Problems in Engineering*, **2018**, Article ID: 4631371. https://doi.org/10.1155/2018/4631371

[19] Patton, R.J. (2014) Fault-Tolerant Control. Springer, London.

[20] 孙金生, 李军, 冯缵刚, 等. 鲁棒容错控制系统设计[J]. 控制理论与应用, 1994, 11(3): 376-380.

[21] 杨虹, 孙金生, 王执铨, 等. 时滞不确定系统的鲁棒容错控制[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2005, 29(2): 132-135.

[22] 韩清龙, 俞金寿. 不确定连续系统具有完整性的反馈设计新方法[J]. 自动化学报, 1998, 24(5): 768-775.

[23] Wang, Z., Tang, G. and Chen, X. (1996) Robust Controller Design for Uncertain Linear Systems with Circular Pole Constraints. *International Journal of Control*, **65**, 1045-1054.

[24] Meng, L.Q. (2014) Robust H_∞ Control for Uncertain Continuous-Time Singular Systems with Circular Pole Constraints. 2014 26*th Chinese Control and Decision Conference*, Changsha, 31 May-2 June 2014, 444-447. https://doi.org/10.1109/CCDC.2014.6852189

[25] Chaabane, M., Bachelier, O., Souissi, M. and Mehdi, D. (2007) Stability and Stabilization of Continuous Descriptor Systems: An LMI Approach. *Mathematical Problems in Engineering*, **2006**, Article ID: 039367. https://doi.org/10.1155/MPE/2006/39367

[26] Gassara, H., Kchaou, M. and Chaabane, M. (2014) Control of Time Delay Fuzzy Descriptor Systems with Actuator Saturation. *Circuits*, *Systems*, *and Signal Processing*, **33**, 3739-3756. https://doi.org/10.1007/s00034-014-9836-z

[27] Tadmor (1990) Worst-Case Design in the Time Domain: The Maximum Principle and Standard H_∞ Problem. *Mathematics of Control Signals & Systems*, **3**, 301-324. https://doi.org/10.1007/BF02551373

[28] 贺爱玲, 陈卫田, 初学导, 等. 广义不确定系统的模糊滑模控制[J]. 控制理论与应用, 1999, 16(5): 677-681.

[29] 朱宝彦, 张庆灵. 时滞 T-S 模糊广义系统鲁棒 H_∞ 控制[J]. 电机与控制学报, 2005, 9(4): 352-336.

[30] 袁宇浩, 张广明. T-S 模糊广义系统研究综述[J]. 自动化学报, 2010, 36(7): 901-911.

[31] 王世新. 带有部分不可测前件变量的 T-S 模糊系统的 H_∞ 跟踪控制方法研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2017.

[32] 佟绍成, 王涛, 等. 模糊控制系统的设计及稳定性分析[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

[33] 冯琦. 多时滞广义系统的鲁棒 H_∞ 控制[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2013.

[34] 陈芳芳. 模糊广义系统鲁棒控制策略研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2008.