



具有无限马尔可夫二维 Roesser系统的模糊 H_∞ 状态反馈控制

叶志勇, 严 芳, 罗小玉

引用本文:

叶志勇, 严 芳, 罗小玉. 具有无限马尔可夫二维 Roesser系统的模糊 H_∞ 状态反馈控制[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(8): 297–306.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

无人车典型场景构建及车速预测

重庆理工大学学报(自然科学). 2022, 36(6): 33–40 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2022.06.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2022.06.004)

漂浮基空间机器人关节轨迹跟踪的时延估计控制

重庆理工大学学报(自然科学). 2022, 36(4): 299–305 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2022.04.036](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2022.04.036)

具有不确定参数的耦合神经网络固定与预设时间二分同步

重庆理工大学学报(自然科学). 2022, 36(5): 178–186 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2022.05.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2022.05.022)

两种马尔可夫链状态转移概率矩阵的估计与比较

Estimation and Comparison of Two Markov Chain State Transition Probability Matrices

重庆理工大学学报(自然科学). 2021, 35(8): 217–223 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2021.08.028](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2021.08.028)

3GPP LTE授权辅助接入性能分析

Performance Analysis of LTE Licensed Assisted Access Unlicensed Spectrum

重庆理工大学学报(自然科学). 2021, 35(2): 159–168 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2021.02.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2021.02.021)



具有无限马尔可夫二维 Roesser 系统的模糊 H_∞ 状态反馈控制

叶志勇¹, 严芳¹, 罗小玉², 何鑫¹, 赵红霞¹

(1. 重庆理工大学 理学院, 重庆 400054;
2. 重庆人文科技学院 机电与信息工程学院, 重庆 401524)

摘 要: 主要研究了带有无限状态空间马尔可夫链的二维 Roesser Takagi-Sugeno (T-S) 模糊模型系统的渐近均方稳定和 H_∞ 控制问题。首先, 利用范数有界参数不确定性和转移概率矩阵, 建立了离散时间无限马尔可夫链 T-S 模糊的 Roesser 模型系统; 其次, 通过构造一个李雅普诺夫函数, 利用现代概率论和线性矩阵不等式等方法证明了闭环系统的渐近均方稳定性和 H_∞ 控制。最后, 利用 Matlab 仿真模拟验证了其有效性和实用性。

关键词: T-S 模糊模型; 李雅普诺夫函数; 无限状态空间马尔可夫链

中图分类号: O231.2

文献标识码: A

文章编号: 1674-8425(2022)08-0297-10

0 引言

在过去几十年里, 带马尔可夫链的二维系统得到了广泛的关注, 主要应用于图像数据与处理、机器人操作^[1]、火电工程和热过程等领域, 并且取得了丰富的成果。文献[2]研究了 Roesser 模型中二维系统的耗散滤波与控制问题。文献[3]考虑了混合连续-离散时间二维系统, 得到了非保守的线性矩阵不等式, 从而保证了系统的鲁棒稳定性。在文献[4]中, PID 控制器和分数阶线性系统在静态输出反馈结构中受到输入饱和的影响。

众所周知, 马尔可夫跳跃系统在模拟突变结构和参数变化方面具有一定的研究意义。值得注意的是, 现有的大多成果都是在有限状态空间马尔可夫链条件下进行的。近年来, 具有无限状态空间马尔可夫跳系统引起了学者们的密切关注^[5], 人们已经认识到, 有限马尔可夫跳系统和无限马尔可夫跳系统的性能存在本质的区别。文献[6]讨论了对于平稳的有限马尔可夫跳系统, 随机稳定性等价于渐近均方稳

收稿日期: 2021-09-28

基金项目: 重庆市自然科学基金项目(2019cc27)

作者简介: 叶志勇, 男, 博士, 教授, 主要从事随机多智能体、随机复杂网络、传染病模型、动力系统与控制研究, E-mail: yezy@cqu.edu.cn; 通讯作者 严芳, 女, 硕士研究生, 主要从事动力学与控制研究, E-mail: 1257484684@qq.com。

本文引用格式: 叶志勇, 严芳, 罗小玉, 等. 具有无限马尔可夫二维 Roesser 系统的模糊 H_∞ 状态反馈控制[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(8): 297-306.

Citation format: YE Zhiyong, YAN Fang, LUO Xiaoyu, et al. The fuzzy state feedback H_∞ control of two-dimensional Roesser system with infinite Markov jumps[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2022, 36(8): 297-306.

定性,但在无限状态空间马尔可夫链情况下则并非如此。文献[7]研究了带无限状态马尔可夫链的离散时间不确定时滞系统的稳定性,讨论了系统渐近均方稳定性、随机稳定性、均方指数稳定性等之间的关系。

一般来说,T-S 模糊模型的优点是通过对局部线性系统模型的“混合”,来逼近任意光滑非线性函数,从而使线性控制系统理论有助于解决非线性问题。文献[8]研究了基于 Fornasini-Marchesini (FM)局部状态空间模型建立二维离散模糊系统模型的稳定性分析问题。文献[9]研究了离散时间非线性二维 Roesser 模型系统的镇定问题。文献[10]考虑了第二 FM 模型下基于观测器的二维 T-S 模糊系统的 H_∞ 控制器设计。文献[11-12]解决了 Roesser 模型的控制问题。文献[13]研究了用 Roesser 模型描述的 T-S 模糊系统的耗散性分析和控制器设计问题。文献[14]针对二维离散切换系统的 H_∞ 鲁棒控制器设计问题,采用具有多面体不确定性的 Roesser 模型来描述。文献[15]利用 T-S 模糊模型方法解决了一类受规定干扰衰减水平影响的非线性网络控制系统的事件触发滤波问题。

目前,带有无限状态空间马尔可夫链的二维 Roesser T-S 模糊模型系统的渐近均方稳定的 H_∞ 控制问题仍然是一个非常有趣且具有一定挑战性的问题。也很少有工作去处理这个问题,这主要是因为二维 Roesser 系统、无限状态空间马尔可夫链和 T-S 模糊模型的性质所引起的数学复杂性。因此,带有无限状态空间马尔可夫链的二维 Roesser T-S 模糊模型系统的渐近均方稳定的 H_∞ 控制问题的成果并不多,这推动了笔者的研究。

主要研究了对带有无限状态空间马尔可夫链的二维 Roesser T-S 模糊模型系统的渐近均方稳定的 H_∞ 控制问题。首先介绍了 Roesser 模糊模型系统的预备知识,通过构造 Lyapunov 函数以及线性矩阵不等式方法证明了带无限状态空间马尔可夫链的二维 Roesser T-S 模糊模型系统的渐近均方稳定性和 H_∞ 控制问题,并用一个特例验证其有效性和实用性。

1 基础知识和模型建立

1.1 符号说明

\mathbf{R}^n 表示 n 维欧式空间; \mathbf{A}^T 表示矩阵 \mathbf{A} 的转置; $E\{\cdot\}$ 表示数学期望; $\|\cdot\|$ 表示欧式范数; $L_2^\infty[0, \infty]$ 表示在 $[0, \infty]$ 上平方可积的函数; $\mathbf{P} > \mathbf{0}$ 表示 \mathbf{P} 是正定矩阵; \mathbf{I}_n 表示 n 维的单位矩阵; $*$ 表示该对称矩阵的对称项。

1.2 模型描述

在 (M, F, P) 空间上考虑一个二维离散时间 T-S 模糊 Roesser 模型系统如下:

规则 k If $\theta_1(i, j)$ is $M_{k,1}$, and $\theta_2(i, j)$ is $M_{k,2}, \dots, \theta_g(i, j)$ is $M_{k,g}$, then

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \mathbf{x}^h(i+1, j) \\ \mathbf{x}^v(i, j+1) \end{bmatrix} = \mathbf{A}_k(\gamma_{i,j}) \begin{bmatrix} \mathbf{x}^h(i, j) \\ \mathbf{x}^v(i, j) \end{bmatrix} + \mathbf{B}_k(\gamma_{i,j}) \mathbf{u}(i, j) + \mathbf{E}_k(\gamma_{i,j}) \boldsymbol{\omega}(i, j), \\ \mathbf{y}(i, j) = \mathbf{C}_k(\gamma_{i,j}) \begin{bmatrix} \mathbf{x}^h(i, j) \\ \mathbf{x}^v(i, j) \end{bmatrix} + \mathbf{D}_k(\gamma_{i,j}) \mathbf{u}(i, j) + \mathbf{F}_k(\gamma_{i,j}) \boldsymbol{\omega}(i, j), \end{cases} \quad k = 1, \dots, r \quad (1)$$

这里 $\boldsymbol{\theta}(i, j) = [\theta_1(i, j), \theta_2(i, j), \dots, \theta_g(i, j)]$ 是前提变量; $M_{k,l}$ 对 $l = 1, \dots, g$ 是模糊集, $\mathbf{x}^h(i, j) \in \mathbf{R}^{n_h}$ 是水平方向状态, $\mathbf{x}^v(i, j) \in \mathbf{R}^{n_v}$ 是垂直方向状态, $\mathbf{u}(i, j) \in \mathbf{R}^{n_u}$ 是控制输入, $\boldsymbol{\omega}(i, j) \in \mathbf{R}^{n_\omega}$ 是外部干扰, $\mathbf{y}(i, j) \in \mathbf{R}^{n_y}$ 是可测输出, r 是模糊规则数。其中

$$\mathbf{A}_k(\gamma_{i,j}) = \begin{bmatrix} A_k^{11}(\gamma_{i,j}) & A_k^{12}(\gamma_{i,j}) \\ A_k^{21}(\gamma_{i,j}) & A_k^{22}(\gamma_{i,j}) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_k(\gamma_{i,j}) = \begin{bmatrix} B_k^1(\gamma_{i,j}) \\ B_k^2(\gamma_{i,j}) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_k(\gamma_{i,j}) = \begin{bmatrix} C_k^{11}(\gamma_{i,j}) & C_k^{12}(\gamma_{i,j}) \\ C_k^{21}(\gamma_{i,j}) & C_k^{22}(\gamma_{i,j}) \end{bmatrix},$$

$$E_k(\gamma_{i,j}) = \begin{bmatrix} E_k^1(\gamma_{i,j}) \\ E_k^2(\gamma_{i,j}) \end{bmatrix}, D_k(\gamma_{i,j}) = \begin{bmatrix} D_k^1(\gamma_{i,j}) \\ D_k^2(\gamma_{i,j}) \end{bmatrix}, F_k(\gamma_{i,j}) = \begin{bmatrix} F_k^1(\gamma_{i,j}) \\ F_k^2(\gamma_{i,j}) \end{bmatrix}$$

是已知相应维数的实值矩阵,并且他们都是马尔可夫链 $\gamma_{i,j}$ 的函数。

$\gamma_{i,j}$ 在无限可数集 $K_1 = \{1, 2, \dots\}$ 中取值,转移概率矩阵 $\Theta_1 = (\Lambda_{pq})$, Λ_{pq} 形式如下:

$$Pr\{\gamma_{i+1,j} = q | \gamma_{i,j} = p\} = Pr\{\gamma_{i,j+1} = q | \gamma_{i,j} = p\} = \Lambda_{pq} \quad (2)$$

根据概率论, Λ_{pq} 满足如下条件:

$$\begin{cases} \Lambda_{pq} \geq 0 \\ \sum_{q \in K_1} \Lambda_{pq} = 1 \end{cases} \quad (3)$$

对 $\forall p, q \in K_1$ 。系统(1)的边界条件 (X_0, Γ_0) 定义如下:

$$\begin{cases} X_0 = \{\mathbf{x}^h(0, j), \mathbf{x}^v(i, 0) | i, j = 0, 1, 2, \dots\} \\ \Gamma_0 = \{\gamma_{0,j}, \gamma_{i,0} | i, j = 0, 1, 2, \dots\} \end{cases} \quad (4)$$

同时,将零边界条件定义为:

$$\mathbf{x}^h(0, j) = \mathbf{0}, \mathbf{x}^v(i, 0) = \mathbf{0}, i, j = 0, 1, 2, \dots$$

进一步在 X_0 上作出如下假设。

假设 1 假设 X_0 满足下列条件:

$$\lim_{L \rightarrow \infty} E\left\{ \sum_{l=0}^L (|\mathbf{x}^h(0, l)|^2 + |\mathbf{x}^v(0, l)|^2) \right\} < \infty \quad (5)$$

这里 $E\{\cdot\}$ 表示数学期望, $|\cdot|$ 表示欧式范数。

模糊集函数定义如下:

$$h_k(\theta(i, j)) = \frac{\prod_{l=1}^g \mu_{k,l}(\theta_l(i, j))}{\sum_{k=1}^r \prod_{l=1}^g \mu_{k,l}(\theta_l(i, j))} \quad (6)$$

这里 $\mu_{k,l}(\theta_l(i, j))$ 是在模糊规则数 k 上 $\theta(i, j)$ 的隶属度。通过定义有:

$$\begin{cases} h_k(\theta(i, j)) \geq 0 \\ \sum_{k=1}^r h_k(\theta(i, j)) = 1 \end{cases}$$

基于模糊规则, T-S 模糊 Roesser 模型可以推断如下:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \mathbf{x}^h(i+1, j) \\ \mathbf{x}^v(i, j+1) \end{bmatrix} = \mathbf{A}(\gamma_{i,j}) \begin{bmatrix} \mathbf{x}^h(i, j) \\ \mathbf{x}^v(i, j) \end{bmatrix} + \mathbf{B}(\gamma_{i,j}) \mathbf{u}(i, j) + \mathbf{E}(\gamma_{i,j}) \boldsymbol{\omega}(i, j) \\ \mathbf{y}(i, j) = \mathbf{C}(\gamma_{i,j}) \begin{bmatrix} \mathbf{x}^h(i, j) \\ \mathbf{x}^v(i, j) \end{bmatrix} + \mathbf{D}(\gamma_{i,j}) \mathbf{u}(i, j) + \mathbf{F}(\gamma_{i,j}) \boldsymbol{\omega}(i, j) \end{cases} \quad (7)$$

其中:

$$\mathbf{A}(\gamma_{i,j}) = \begin{bmatrix} A^{11}(\gamma_{i,j}) & A^{12}(\gamma_{i,j}) \\ A^{21}(\gamma_{i,j}) & A^{22}(\gamma_{i,j}) \end{bmatrix}, \mathbf{C}(\gamma_{i,j}) = \begin{bmatrix} C^{11}(\gamma_{i,j}) & C^{12}(\gamma_{i,j}) \\ C^{21}(\gamma_{i,j}) & C^{22}(\gamma_{i,j}) \end{bmatrix}, \mathbf{B}(\gamma_{i,j}) = \begin{bmatrix} B^1(\gamma_{i,j}) \\ B^2(\gamma_{i,j}) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{E}(\gamma_{i,j}) = \begin{bmatrix} E^1(\gamma_{i,j}) \\ E^2(\gamma_{i,j}) \end{bmatrix}, \mathbf{D}(\gamma_{i,j}) = \begin{bmatrix} D^1(\gamma_{i,j}) \\ D^2(\gamma_{i,j}) \end{bmatrix}, \mathbf{F}(\gamma_{i,j}) = \begin{bmatrix} F^1(\gamma_{i,j}) \\ F^2(\gamma_{i,j}) \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \mathbf{A}(\gamma_{i,j}) = \sum_{k=1}^r h_k(i,j) \mathbf{A}_k \\ \mathbf{C}(\gamma_{i,j}) = \sum_{k=1}^r h_k(i,j) \mathbf{C}_k \\ \mathbf{E}(\gamma_{i,j}) = \sum_{k=1}^r h_k(i,j) \mathbf{E}_k \end{cases} \quad \begin{cases} \mathbf{B}(\gamma_{i,j}) = \sum_{k=1}^r h_k(i,j) \mathbf{B}_k \\ \mathbf{F}(\gamma_{i,j}) = \sum_{k=1}^r h_k(i,j) \mathbf{F}_k \\ \mathbf{D}(\gamma_{i,j}) = \sum_{k=1}^r h_k(i,j) \mathbf{D}_k \end{cases}$$

本节采用了状态反馈控制中常用的假设,假设 $\gamma_{i,j}$ 的精确值难以获得,设计状态反馈控制器如下:

$$\mathbf{u}(i,j) = \mathbf{K}(\eta_{i,j}) \begin{bmatrix} \mathbf{x}^h(i,j) \\ \mathbf{x}^v(i,j) \end{bmatrix} \quad (8)$$

这里 $\mathbf{K}(\eta_{i,j})$ 表示控制增益,它依赖于参数 $\eta_{i,j} \in K_2 (K_2 = \{1, 2, \dots\})$, $\eta_{i,j}$ 是变量控制的模式,同时它的条件概率 Λ_{ps} 可以由 $\gamma_{i,j}$ 得到,即:

$$\Pr\{\eta_{i,j} = s \mid \gamma_{i,j} = p\} = \Lambda_{ps} \quad (9)$$

$\Theta_2 = (\Lambda_{ps})$ 为条件概率矩阵,同样满足:

$$\begin{cases} \Lambda_{ps} \in [0, 1], \\ \sum_{s \in K_2} \Lambda_{ps} = 1, \end{cases} \quad \forall p \in K_1, s \in K_2$$

将 $\gamma_{i,j}, \gamma_{i+1,j}, \gamma_{i,j+1}, \eta_{i,j}$ 简记为 p, q, s , 如 $\mathbf{A}(\eta_{i,j})$ 简记为 \mathbf{A}_q 。

把式(8)代入式(7)得到闭环动态系统如下:

$$\begin{cases} \mathbf{x}^1(i,j) = \mathbf{G}_{ps} \mathbf{x}(i,j) + \mathbf{E}_p \boldsymbol{\omega}(i,j) \\ \mathbf{y}(i,j) = \mathbf{H}_{ps} \mathbf{x}(i,j) + \mathbf{F}_p \boldsymbol{\omega}(i,j) \end{cases} \quad (10)$$

其中:

$$\mathbf{x}^1(i,j) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}^h(i+1,j) \\ \mathbf{x}^v(i,j+1) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x}(i,j) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}^h(i,j) \\ \mathbf{x}^v(i,j) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G}_{ps} = \mathbf{A}_p + \mathbf{B}_p \mathbf{K}_s, \quad \mathbf{H}_{ps} = \mathbf{C}_p + \mathbf{D}_p \mathbf{K}_s$$

注:本节得到的闭环系统形式上与文献[12]的闭环系统相似,是在此基础上向 T-S 模糊模型、无限状态空间的马尔可夫链进行的推广。

为了进一步研究对带有无限状态空间马尔可夫链的二维 Roesser T-S 模糊模型系统的渐近均方稳定的 H_∞ 控制问题,给出如下定义。

定义1 当闭环二维系统(10)中外部扰动输入 $\boldsymbol{\omega}(i,j) = \mathbf{0}$ 时,如果对任何边界条件 (X_0, Γ_0) 满足如下条件:

$$\lim_{i+j \rightarrow \infty} E\{|\mathbf{x}(i,j)|^2\} = 0 \quad (11)$$

则闭环系统(10)被称为渐近均方稳定。

定义2 假设闭环二维系统(10)满足条件(11),对 $\mu > 0$,如果基于 $\boldsymbol{\omega}(i,j) \in L_2^\infty\{[0, \infty), [0, \infty)\}$ 和零边界条件,满足如下不等式:

$$\sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} E\{|\mathbf{y}(i,j)|^2\} < \mu^2 \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} |\boldsymbol{\omega}(i,j)|^2 \quad (12)$$

则闭环系统(10)有 H_∞ 性能指标 μ 。

2 主要结论

定理1 考虑闭环系统(10),基于假设1的条件下,对给定的 $\mu > 0$,如果存在一个对称矩阵 $\mathbf{R}_p = \text{diag}$

$\{\mathbf{R}_p^h, \mathbf{R}_p^v\} > \mathbf{0}$ 和 $\mathbf{Q}_{ps} > \mathbf{0}$, 对 $\forall p \in K_1, s \in K_2$ 使得如下条件满足:

$$\sum_{s \in K_2} \Lambda_{ps} \mathbf{Q}_{ps} < \mathbf{R}_p \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} -\bar{\mathbf{R}}_p^{-1} & \mathbf{0} & \mathbf{G}_{ps} & \mathbf{E}_p \\ * & -\mathbf{I} & \mathbf{H}_{ps} & \mathbf{F}_p \\ * & * & -\mathbf{Q}_{ps} & \mathbf{0} \\ * & * & * & -\mu^2 \mathbf{I} \end{bmatrix} < \mathbf{0} \quad (14)$$

这里 $\bar{\mathbf{R}}_p = \sum_{q \in K_1} \Lambda_{pq} \mathbf{R}_q$, 则系统(10)是渐近均方稳定带有 H_∞ 性能指标。

证明 构造李亚普诺夫函数如下:

$$V(i, j) = \mathbf{x}^T(i, j) \mathbf{R}_p \mathbf{x}(i, j)$$

定义:

$$\Delta V(i, j) = \mathbf{x}^{1T}(i, j) \mathbf{R}_q \mathbf{x}^1(i, j) - \mathbf{x}^T(i, j) \mathbf{R}_p \mathbf{x}(i, j) \quad (15)$$

根据状态方程(10), 当 $\boldsymbol{\omega}(i, j) \equiv \mathbf{0}$ 时, 很容易得到:

$$\Delta V(i, j) = (\mathbf{G}_{ps} \mathbf{x}(i, j))^T \mathbf{R}_q (\mathbf{G}_{ps} \mathbf{x}(i, j)) - \mathbf{x}(i, j)^T \mathbf{R}_p \mathbf{x}(i, j) = \mathbf{x}^T(i, j) (\mathbf{G}_{ps}^T \mathbf{R}_q \mathbf{G}_{ps} - \mathbf{R}_p) \mathbf{x}(i, j) \quad (16)$$

由 $\sum_{q \in K_1} \Lambda_{pq} = 1, \sum_{s \in K_2} \Lambda_{ps} = 1$, 且对 $\Delta V(i, j)$ 求期望, 得到:

$$\begin{aligned} E\{\Delta V(i, j)\} &= E\{\mathbf{x}^T(i, j) (\sum_{s \in K_2} \Lambda_{ps} \mathbf{G}_{ps}^T \sum_{q \in K_1} \Lambda_{pq} \mathbf{R}_q \mathbf{G}_{ps} - \mathbf{R}_p) \mathbf{x}(i, j)\} = \\ &E\{\mathbf{x}^T(i, j) (\sum_{s \in K_2} \Lambda_{ps} \mathbf{G}_{ps}^T \bar{\mathbf{R}}_p \mathbf{G}_{ps} - \mathbf{R}_p) \mathbf{x}(i, j)\} \end{aligned} \quad (17)$$

通过舒尔补引理, 从式(14)得到:

$$\mathbf{G}_{ps}^T \bar{\mathbf{R}}_p \mathbf{G}_{ps} < \mathbf{Q}_{ps} \quad (18)$$

结合式(17)和式(18), 可得:

$$E\{\Delta V(i, j)\} < E\{\mathbf{x}^T(i, j) (\sum_{s \in K_2} \Lambda_{ps} \mathbf{Q}_{ps} - \mathbf{R}_p) \mathbf{x}(i, j)\} \leq -\varepsilon E\{|\mathbf{x}(i, j)|^2\} \quad (19)$$

这里 $\varepsilon = \lambda_{\min}(\mathbf{R}_p - \sum_{s \in K_2} \Lambda_{ps} \mathbf{Q}_{ps})$ 是最小的特征值, 只要式(13)满足, $\varepsilon > 0$ 。对式(19)的两边求和, 得到:

$$E\left\{\sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} |\mathbf{x}(i, j)|^2\right\} \leq -\frac{1}{\varepsilon} E\left\{\sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \Delta V(i, j)\right\} \quad (20)$$

这里 m_1, m_2 是正整数。

通过 $\mathbf{x}^1(i, j) = [\mathbf{x}^{hT}(i+1, j), \mathbf{x}^{vT}(i, j+1)]^T$ 和 $\mathbf{R}_p = \text{diag}\{\mathbf{R}_p^h, \mathbf{R}_p^v\}$ 代入 $\Delta V(i, j)$, 可得:

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \Delta V(i, j) &= \sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \left[(\mathbf{x}^{hT}(i+1, j), \mathbf{x}^{vT}(i, j+1)) \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{r_{i+1}, j}^h & \\ & \mathbf{R}_{r_{i, j+1}}^v \end{bmatrix} (\mathbf{x}^{hT}(i+1, j), \mathbf{x}^{vT}(i, j+1))^T \right. \\ &\quad \left. - (\mathbf{x}^{hT}(i, j), \mathbf{x}^{vT}(i, j)) \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{r_{i, j}}^h & \\ & \mathbf{R}_{r_{i, j}}^v \end{bmatrix} (\mathbf{x}^{hT}(i, j), \mathbf{x}^{vT}(i, j))^T \right] \\ &= \sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \left[\mathbf{x}^{hT}(i+1, j) \mathbf{R}_{r_{i+1}, j}^h \mathbf{x}^h(i+1, j) - \mathbf{x}^{hT}(i, j) \mathbf{R}_{r_{i, j}}^h \mathbf{x}^h(i, j) \right. \\ &\quad \left. + \mathbf{x}^{vT}(i, j+1) \mathbf{R}_{r_{i, j+1}}^v \mathbf{x}^v(i, j+1) - \mathbf{x}^{vT}(i, j) \mathbf{R}_{r_{i, j}}^v \mathbf{x}^v(i, j) \right] \end{aligned}$$

$$\sum_{i=0}^{m_1} \begin{bmatrix} \mathbf{x}^{vT}(i, m_2 + 1) \mathbf{R}_{\gamma_i, m_2+1}^v \mathbf{x}^v(i, m_2 + 1) \\ -\mathbf{x}^{vT}(i, 0) \mathbf{R}_{\gamma_i, 0}^v \mathbf{x}^v(i, 0) \end{bmatrix} \quad (21)$$

通过式(20)和式(21)可以推得:

$$E \left\{ \sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} |\mathbf{x}(i, j)|^2 \right\} \leq \frac{1}{\varepsilon} E \left\{ \sum_{j=0}^{m_2} \mathbf{x}^{hT}(0, j) \mathbf{R}_{\gamma_0, j}^h \mathbf{x}^h(0, j) + \sum_{i=0}^{m_1} \mathbf{x}^{vT}(i, 0) \mathbf{R}_{\gamma_i, 0}^v \mathbf{x}^v(i, 0) \right\} \quad (22)$$

令 $\xi = \lambda_{\max}(\mathbf{R}_{\gamma_0, j}^h, \mathbf{R}_{\gamma_i, 0}^v)$ 是最大特征值, $i, j = 0, 1, 2, \dots$, 且式(22)中 $m_1, m_2 \rightarrow \infty$, 则如下不等式成立:

$$E \left\{ \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} |\mathbf{x}(i, j)|^2 \right\} \leq \frac{\xi}{\varepsilon} E \left\{ \sum_{i=0}^{\infty} |\mathbf{x}^h(0, i)|^2 + |\mathbf{x}^v(i, 0)|^2 \right\} \quad (23)$$

由假设 1 中的式(5), 有

$$E \left\{ \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} |\mathbf{x}(i, j)|^2 \right\} < \infty \quad (24)$$

则式(11)满足, 故闭环系统(10)渐近均方稳定。得证。

进一步地, 讨论基于零边界条件下的 H_{∞} 性能指标。

记

$$\xi(i, j) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(i, j) \\ \boldsymbol{\omega}(i, j) \end{bmatrix}, \mathbf{Y}_1 = [\mathbf{G}_{ps} \quad \mathbf{E}_p], \mathbf{Y}_2 = [\mathbf{H}_{ps} \quad \mathbf{F}_p], \bar{\mathbf{I}} = \text{diag}\{\mathbf{0}, \mu^2 \mathbf{I}\}, \bar{\mathbf{Q}}_{ps} = \text{diag}\{\mathbf{Q}_{ps}, \mathbf{0}\}$$

则式(14)等价于如下矩阵:

$$\begin{bmatrix} -\bar{\mathbf{R}}_p & \mathbf{0} & \mathbf{Y}_1 \\ * & \mathbf{I} & \mathbf{Y}_2 \\ * & * & -\bar{\mathbf{I}} - \bar{\mathbf{Q}}_{ps} \end{bmatrix} < \mathbf{0} \quad (25)$$

通过舒尔补定理, 等价矩阵(25)可以等价于如下不等式:

$$\mathbf{Y}_1^T \bar{\mathbf{R}}_p \mathbf{Y}_1 + \mathbf{Y}_2^T \mathbf{Y}_2 - \bar{\mathbf{I}} < \bar{\mathbf{Q}}_{ps} \quad (26)$$

通过闭环系统(10), 得到:

$$\Delta V(i, j) = \xi^T(i, j) \mathbf{Y}_1^T \mathbf{R}_p \mathbf{Y}_1 \xi(i, j) - \mathbf{x}^T(i, j) \mathbf{R}_p \mathbf{x}(i, j) \quad (27)$$

$$\mathbf{y}^T(i, j) \mathbf{y}(i, j) - \mu^2 \boldsymbol{\omega}^T(i, j) \boldsymbol{\omega}(i, j) = \xi^T(i, j) (\mathbf{Y}_2^T \mathbf{Y}_2 - \bar{\mathbf{I}}) \xi(i, j) \quad (28)$$

基于式(21)和零边界条件, $\sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \Delta V(i, j) \geq 0$, 进一步引入如下性能指标:

$$J = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} E \{ \mathbf{y}^T(i, j) \mathbf{y}(i, j) - \mu^2 \boldsymbol{\omega}^T(i, j) \boldsymbol{\omega}(i, j) \} \leq \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} E \{ \mathbf{y}^T(i, j) \mathbf{y}(i, j) - \mu^2 \boldsymbol{\omega}^T(i, j) \boldsymbol{\omega}(i, j) + \Delta V(i, j) \} \quad (29)$$

结合式(27)和式(28), 可得:

$$\begin{aligned} E \{ \mathbf{y}^T(i, j) \mathbf{y}(i, j) - \mu^2 \boldsymbol{\omega}^T(i, j) \boldsymbol{\omega}(i, j) + \Delta V(i, j) \} &= \\ E \{ \xi^T(i, j) \sum_{s \in K_2} \Lambda_{ps} [\mathbf{Y}_1^T \bar{\mathbf{R}}_p \mathbf{Y}_1 + \mathbf{Y}_2^T \mathbf{Y}_2 - \mathbf{I}] \xi(i, j) - \mathbf{x}^T(i, j) \mathbf{R}_p \mathbf{x}(i, j) \} &< \\ E \{ \xi^T(i, j) \sum_{s \in K_2} \Lambda_{ps} \bar{\mathbf{Q}}_{ps} \xi(i, j) - \mathbf{x}^T(i, j) \mathbf{R}_p \mathbf{x}(i, j) \} &= \\ E \{ \mathbf{x}^T(i, j) [\sum_{s \in K_2} \Lambda_{ps} \mathbf{Q}_{ps} - \mathbf{R}_p] \mathbf{x}(i, j) \} & \end{aligned} \quad (30)$$

只要条件(13)(26)成立, 即得到 $J < 0$, 可以推得:

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} E \{ \mathbf{y}^T(i, j) \mathbf{y}(i, j) - \mu^2 \boldsymbol{\omega}^T(i, j) \boldsymbol{\omega}(i, j) + \Delta V(i, j) \} = \\
& E \sum_{j=0}^{\infty} [\mathbf{x}^{hT}(\infty, j) \mathbf{R}_{\gamma_{\infty, j}}^h \mathbf{x}^h(\infty, j) - \mathbf{x}^{hT}(0, j) \mathbf{R}_{\gamma_{0, j}}^h \mathbf{x}^h(0, j)] + \\
& E \sum_{i=0}^{\infty} [\mathbf{x}^{vT}(i, \infty) \mathbf{R}_{\gamma_{i, \infty}}^v \mathbf{x}^v(i, \infty) - \mathbf{x}^{vT}(i, 0) \mathbf{R}_{\gamma_{i, 0}}^v \mathbf{x}^v(i, 0)] + \\
& \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} E \{ \mathbf{y}^T(i, j) \mathbf{y}(i, j) - \mu^2 \boldsymbol{\omega}^T(i, j) \boldsymbol{\omega}(i, j) \} \geq \\
& \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} E \{ \mathbf{y}^T(i, j) \mathbf{y}(i, j) - \mu^2 \boldsymbol{\omega}^T(i, j) \boldsymbol{\omega}(i, j) \} \quad (31)
\end{aligned}$$

在零边界条件下,又由式(21)(29)(30),得到:

$$\sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} E \{ \mu^2 \boldsymbol{\omega}^T(i, j) \boldsymbol{\omega}(i, j) - \mathbf{y}^T(i, j) \mathbf{y}(i, j) \} > 0 \quad (32)$$

综上所述,对无限状态空间马尔可夫链的模糊 Roesser 模型,根据定义 2,则式(12)满足,故定理 1 得证。即最终得到了关于无限状态空间马尔可夫跳的模糊 Roesser 模型系统在假设 1 条件下的渐近均方稳定和 H_∞ 控制的充分条件。

接下来,给出一个实例的仿真模拟来验证其定理的有效性以及实用性。

3 仿真模拟

在本节中,基于文献[16-17]将提供一个实例来说明所提出方法的有效性。在现实世界中,有些气体吸收、水流加热的动力学过程和空气干燥可以如下公式表示:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 f(x, t)}{\partial x \partial t} = & a_1(\gamma_{i, j}) \frac{\partial f(x, t)}{\partial t} + a_2(\gamma_{i, j}) \frac{\partial f(x, t)}{\partial t} + a_0(\gamma_{i, j}) \sin^2(f(x, t)) f(x, t) + \\
& b(\gamma_{i, j}) u(x, t) + e(\gamma_{i, j}) \boldsymbol{\omega}(x, t) \quad (33)
\end{aligned}$$

其中: $f(x, t)$ 是关于空间 $x \in [0, x_f]$ 和时间 $t \in [0, \infty]$ 的未知函数; $a_0(\gamma_{i, j}), a_1(\gamma_{i, j}), a_2(\gamma_{i, j}), a_3(\gamma_{i, j}), b(\gamma_{i, j}), e(\gamma_{i, j})$ 是关于 $\gamma_{i, j}$ 的函数; $\boldsymbol{\omega}(x, t)$ 是输入扰动, $u(x, t)$ 是控制输入。定义:

$$x^h(x, t) = \frac{\partial f(x, t)}{\partial t} - a_2(\gamma_{i, j}) f(x, t), x^v(x, t) = f(x, t) \quad (34)$$

则微分方程(33)可转化为以下二维状态空间模型:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \frac{\partial x^h(x, t)}{\partial x} \\ \frac{\partial x^v(x, t)}{\partial t} \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} a_1(\gamma_{i, j}) & a_1(\gamma_{i, j}) a_2(\gamma_{i, j}) + a_0(\gamma_{i, j}) \sin^2(f(x, t)) \\ 1 & a_2(\gamma_{i, j}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^h(x, t) \\ x^v(x, t) \end{bmatrix} + \\
& \begin{bmatrix} b(\gamma_{i, j}) \\ 0 \end{bmatrix} u(x, t) + \begin{bmatrix} e(\gamma_{i, j}) \\ 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{\omega}(x, t) \quad (35)
\end{aligned}$$

为了得到非线性系统的二维 T-S 模糊模型,考虑以下 2 个规则:

规则 1 If $\sin^2(x^v(x, t))$ is about 0, then

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial x^h(x, t)}{\partial x} \\ \frac{\partial x^v(x, t)}{\partial t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1(\gamma_{i, j}) & a_1(\gamma_{i, j}) a_2(\gamma_{i, j}) \\ 1 & a_2(\gamma_{i, j}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^h(x, t) \\ x^v(x, t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b(\gamma_{i, j}) \\ 0 \end{bmatrix} u(x, t) + \begin{bmatrix} e(\gamma_{i, j}) \\ 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{\omega}(x, t) \quad (36)$$

规则 2 If $\sin^2(x^v(x, t))$ is about 1, then

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \frac{\partial x^h(x, t)}{\partial x} \\ \frac{\partial x^v(x, t)}{\partial t} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_1(\gamma_{i,j}) & a_1(\gamma_{i,j})a_2(\gamma_{i,j}) + a_0(\gamma_{i,j}) \\ 1 & a_2(\gamma_{i,j}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^h(x, t) \\ x^v(x, t) \end{bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} b(\gamma_{i,j}) \\ 0 \end{bmatrix} u(x, t) + \begin{bmatrix} e(\gamma_{i,j}) \\ 0 \end{bmatrix} \omega(x, t) \end{aligned} \quad (37)$$

二维 T-S 模糊系统的隶属函数是:

$$h_1 = \cos^2(x^v(x, t)), h_2 = \sin^2(x^v(x, t))$$

接下来,将上述 T-S 模糊系统离散化为采样时间 T_1 和 T_2 , 对应于变量 x 和 t 。因此,带无限马可夫离散二维模糊系统由下式给出:

规则 1 If $\sin^2(x^v(x, t))$ is about 0, then

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x^h(i+1, j) \\ x^v(i, j+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 + a_1(\gamma_{i,j})T_1 & a_1(\gamma_{i,j})a_2(\gamma_{i,j})T_1 \\ T_2 & 1 + a_2(\gamma_{i,j})T_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^h(i, j) \\ x^v(i, j) \end{bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} b(\gamma_{i,j})T_1 \\ 0 \end{bmatrix} u(i, j) + \begin{bmatrix} e(\gamma_{i,j})T_1 \\ 0 \end{bmatrix} \omega(i, j) \end{aligned} \quad (38)$$

规则 2 If $\sin^2(x^v(x, t))$ is about 1, then

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x^h(i+1, j) \\ x^v(i, j+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 + a_1(\gamma_{i,j})T_1 & (a_1(\gamma_{i,j})a_2(\gamma_{i,j}) + a_0(\gamma_{i,j}))T_1 \\ T_2 & 1 + a_2(\gamma_{i,j})T_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^h(i, j) \\ x^v(i, j) \end{bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} b(\gamma_{i,j})T_1 \\ 0 \end{bmatrix} u(i, j) + \begin{bmatrix} e(\gamma_{i,j})T_1 \\ 0 \end{bmatrix} \omega(i, j) \end{aligned} \quad (39)$$

取 $T_1 = T_2 = 0.1$, $a_0(\gamma_{i,j}) = 4$, $a_1(\gamma_{i,j}) = -8$, $a_2(\gamma_{i,j}) = -8$ 以及 $b(\gamma_{i,j}) = -4$, $e(\gamma_{i,j}) = -4$, 得到系统相对应的参数矩阵如下:

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 0.2 & 6.4 \\ 0.1 & 0.2 \end{bmatrix}, \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.6 \\ 0.1 & 0.4 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_1 = \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} -0.4 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{E}_1 = \mathbf{E}_2 = \begin{bmatrix} -0.4 \\ 0 \end{bmatrix}$$

为了研究系统(1)的 H_∞ 控制问题,令式(1)中相应的参数矩阵为:

$$\mathbf{C}_1 = \mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} 0.5 & 1 \\ 0.4 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0.2 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

其中转移概率矩阵 $\Theta_1 = (\Lambda_{pq})$, $\Theta_2 = (\Lambda_{ps})$ 为:

$$\begin{cases} \Lambda_{pq} = 1, & q = p \\ \Lambda_{pq} = 0, & q \neq p \end{cases} \quad \begin{cases} \Lambda_{ps} = 1, & s = p \\ \Lambda_{ps} = 0, & s \neq p \end{cases}$$

得到式(8)中反馈控制的反馈增益矩阵为:

$$\mathbf{K}_1 = [-0.153 \ 6 \ 1.228 \ 6], \mathbf{K}_2 = [0.562 \ 7 \ 3.902 \ 3]$$

利用 Matlab 对系统进行模拟,模拟结果如图 1—3 所示。模拟结果表明 H_∞ 控制中参数的最小值为 $u^2 = 4$ 。

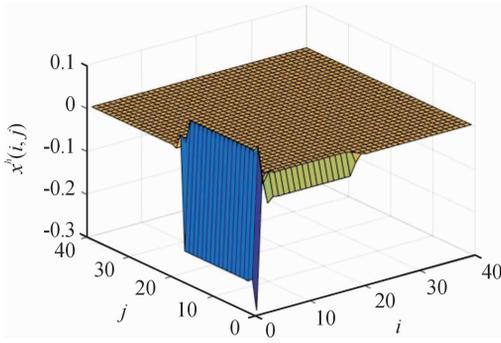


图1 有控制输入的水平状态

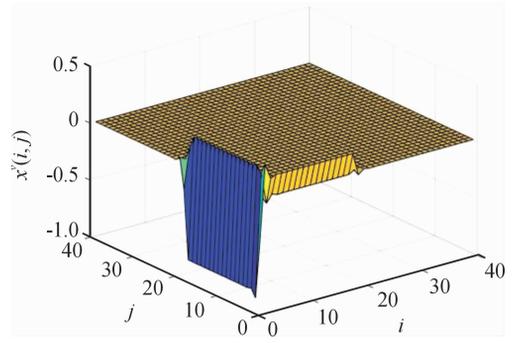


图2 有控制输入的垂直状态

由图1和图2可以看出,二维系统水平方向与垂直方向一开始波动比较大,但在一段时间后都渐近的逼近于零。因此证明了定理1。

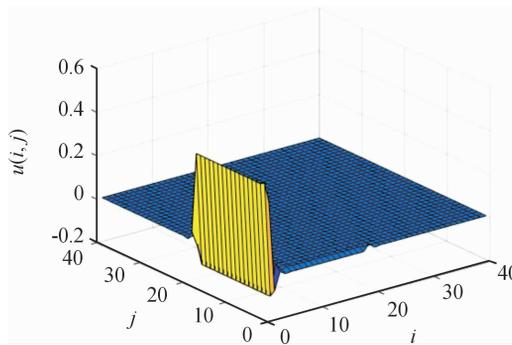


图3 控制输入图

4 结论

目前的研究中,通常都是对二维 Roesser 模型 H_∞ 控制的研究;但带有无限状态空间马尔可夫链的二维 Roesser T-S 模糊模型系统的渐近均方稳定的 H_∞ 控制问题仍然是一个非常有趣和具有挑战性的问题。基于 T-S 模糊模型,研究了一类离散时间无限状态空间马尔可夫跳二维 Roesser 模型系统的渐近均方稳定性与 H_∞ 控制,并且通过构建李雅普诺夫函数,利用线性矩阵不等式给出了证明。利用 Matlab 模拟出的结果表明 H_∞ 控制中参数的最小值为 $u^2 = 4$,验证了理论的有效性和实用性。

参考文献:

- [1] SIQUEIRA A A G, TERRA M H. A fault-tolerant manipulator robot based on H_2 , H_∞ , and mixed H_2/H_∞ Markovian controls [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2009, 14(2): 257 - 263.
- [2] AHN C K, SHI P, BASIN M V, et al. Two-dimensional dissipative control and filtering for Roesser model [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, 60(7): 1745 - 1759.
- [3] CHESI G, MIDDLETON R H. Robust stability and performance analysis of 2D mixed continuous-discrete-time systems with uncertainty [J]. Automatica, 2016, 67: 233 - 243.
- [4] FIUZY M, SHAMAGHDARI S. Stability analysis of fractional-order linear system with PID controller in the output feedback structure subject to input saturation [J]. International Journal of Dynamics and Control, 2022, 10: 511 - 524.
- [5] HOU T, MA H. Exponential stability for discrete-time infinite Markov jump systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Con-

trol,2016,61(12):4241–4246.

- [6] COSTA O L V, FRAGOSO M D. Discrete-time LQ-optimal control problems for infinite Markov jump parameter systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control,1995,40(12):2076–2088.
- [7] HOU T, LIU Y, DENG F, et al. Stability for discrete-time uncertain systems with infinite Markov jump and time-delay[J]. Science China; Information Sciences,2021,64(5):96–106.
- [8] CHEN X, GAO H. Stability analysis of 2-D fuzzy systems[C]//2009 7th Asian Control Conference. China;IEEE,2009.
- [9] HMAMED A, HAJJAJI A E, BENZAOUIA A, et al. Stabilization of discrete-time 2D T-S fuzzy systems by state feedback control [C]//2009 17th Mediterranean Conference on Control and Automation. Greece;IEEE,2009.
- [10] LI L. Observer-based H_∞ controller for 2-D T-S fuzzy model[J]. International Journal of Systems Science,2016,47(14):3455–3464.
- [11] BADIE K, ALFDI M, CHAIH Z. Fuzzy H_∞ filtering for nonlinear 2D systems in the Roesser model[J]. International Journal of Modelling Identification and Control,2019,33(2):169–178.
- [12] WU Z, SHEN Y, SHI P, et al. H_∞ control for 2D Markov jump systems in Roesser model[J]. IEEE Transactions on Automatic Control,2019,64(1):427–432.
- [13] WANG J, LIANG J, ZHANG C, et al. Dissipativity analysis and synthesis for positive Roesser systems under the switched mechanism and Takagi-Sugeno fuzzy rules[J]. Information Sciences,2021,546:234–252.
- [14] BADIE K, ALFIDI M, TADEO F, et al. Robust state feedback for uncertain 2-D discrete switched systems in the Roesser model [J]. Journal of Control and Decision,2021,8(3):331–342.
- [15] YI X, LI G, LIU Y, et al. Event-triggered H_∞ filtering for nonlinear networked control systems via T-S fuzzy model approach [J]. Neurocomputing,2021,448:344–352.
- [16] 曲国华,张汉鹏,刘增良,等. 基于环境信息和金融市场不对称博弈模型分析[J]. 中国管理科学,2015,23(12):53–62.
- [17] 曲国华,张汉鹏,刘增良,等. 基于直觉模糊 λ -Shapley Choquet 积分算子 TOPSIS 的多属性群决策方法[J]. 系统工程理论与实践,2016,36(3):726–742.

The fuzzy state feedback H_∞ control of two-dimensional Roesser system with infinite Markov jumps

YE Zhiyong¹, YAN Fang¹, LUO Xiaoyu², HE Xin¹, ZHAO Hongxia¹

(1. College of Science, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;
2. College of Mechatronics and Information Engineering,
Chongqing College of Humanities, Science and Technology, Chongqing 401524, China)

Abstract: This paper mainly studied the asymptotic mean square stable and the H_∞ control problem of a two-dimensional Roesser Takagi-Sugeno (T-S) fuzzy model system with an infinite Markov chain. First, this paper uses the bounded parameter uncertainty of the norm and the transition probability matrix to establish a discrete-time infinite Markov chain T-S fuzzy Roesser model system. Secondly, by constructing a Lyapunov function, modern probability theory and linear matrix inequality are used to prove the asymptotic mean square stability and H_∞ control of the closed-loop system. Finally, Matlab simulation is used to verify its effectiveness and practicability.

Key words: T-S module and model; Lyapunov function; infinite state space Markov chain