

# 控制与决策

Control and Decision

基于T-S模糊模型的多时滞非线性网络切换控制系统非脆弱 $H_\infty$ 控制

刘毅, 梅玉鹏, 李国燕, 潘玉恒, 梅树立

引用本文:

刘毅, 梅玉鹏, 李国燕, 等. 基于T-S模糊模型的多时滞非线性网络切换控制系统非脆弱 $H_\infty$ 控制[J]. 控制与决策, 2021, 36(5): 1087–1094.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1098>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

具有不确定丢包率和时变采样周期的Delta算子系统故障检测

Fault detection for delta operator systems with uncertain packet dropout rate and time-varying sampling periods  
控制与决策. 2021, 36(5): 1101–1109 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1154>

基于模型依赖驻留时间的异步切换控制

Asynchronous switching control based on mode-dependent average dwell time  
控制与决策. 2021, 36(3): 609–618 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0645>

直线同步电动机磁悬浮系统的自适应模糊滑模控制

Adaptive fuzzy sliding mode control for magnetic suspension system of linear synchronous motor  
控制与决策. 2021, 36(3): 693–698 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0774>

基于反演算法的严格反馈非线性系统固定时间跟踪控制

Fixed-time tracking control for strict-feedback nonlinear systems based on backstepping algorithm  
控制与决策. 2021, 36(1): 173–179 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0658>

事件触发机制下分布时滞网络化控制系统 $H_\infty$ 故障检测

Event-triggered  $H_\infty$  fault detection for networked control systems with distributed delays  
控制与决策. 2020, 35(12): 3059–3065 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0456>

# 基于 T-S 模糊模型的多时滞非线性网络切换控制系统 非脆弱 $H_\infty$ 控制

刘毅<sup>1†</sup>, 梅玉鹏<sup>1</sup>, 李国燕<sup>1</sup>, 潘玉恒<sup>1</sup>, 梅树立<sup>2</sup>

(1. 天津城建大学 计算机与信息工程学院, 天津 300384; 2. 中国农业大学 信息与电气工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 针对一类控制器增益存在摄动的不确定非线性网络切换系统, 在系统同时存在随机时变时滞和数据包丢失的情况下, 研究系统的非脆弱  $H_\infty$  控制问题. 首先, 利用 T-S 模型, 将非线性网络切换系统建模为网络切换模糊系统; 其次, 将数据包丢失作为时滞处理, 并采用 Bernoulli 分布的随机序列描述该时滞; 再次, 采用平均驻留时间的方法 (ADT) 设计系统的切换律及非脆弱状态反馈控制器, 并给出网络切换模糊时滞系统指数稳定的平均驻留时间条件; 最后, 结合李雅普诺夫 (LKF) 方法给出系统均方指数稳定且满足  $H_\infty$  性能指标的充分条件. 仿真结果验证了所提出设计方法的有效性.

**关键词:** 网络控制系统; 切换模糊系统; 时滞相关; 非脆弱  $H_\infty$  控制; 平均驻留时间

中图分类号: TP273 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.1098

**引用格式:** 刘毅, 梅玉鹏, 李国燕, 潘玉恒. 基于 T-S 模糊模型的多时滞非线性网络切换控制系统非脆弱  $H_\infty$  控制 [J]. 控制与决策, 2021, 36(5): 1087-1094.

## Non-fragile $H_\infty$ control for multi-delay nonlinear network switching control system based on T-S model

LIU Yi<sup>1†</sup>, MEI Yu-peng<sup>1</sup>, LI Guo-yan<sup>1</sup>, PAN Yu-heng<sup>1</sup>, MEI Shu-li<sup>2</sup>

(1. School of Computer and Information Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The non-fragile  $H_\infty$  control problem is studied for the uncertain nonlinear network switching system with random time-varying delay and data packet dropout, in which the controller gain exists perturbation. Firstly, based on the T-S model, the nonlinear network switching system is modeled as a network switch fuzzy system. Then, the packet loss is treated as a time delay, and the time delay is described by the random sequence of Bernoulli distributed. By using the average dwell time (ADT) method, the system switching law and the non-fragile state feedback controller are designed, and the ADT condition of the exponential stability for the network switched fuzzy system is presented. Finally, by combining with Lyapunov (LKF) method, a sufficient condition for the mean square exponential of system stable and satisfying the performance criterion of  $H_\infty$  is presented. A Matlab numerical simulation verifies the effectiveness of the designed method.

**Keywords:** networked control systems; switching fuzzy system; delay dependent; non-fragile  $H_\infty$  control; average dwell time

## 0 引言

切换系统作为混杂动态系统的一种重要类型, 是由一系列连续或离散时间子系统和一个决定某个子系统何时激活的切换规则组成. 在工程实际中应用广泛, 目前已有大量的关于切换控制系统方面的研究

成果<sup>[1-3]</sup>. 文献[4]研究了切换系统的同时故障估计与容错控制问题; 文献[5]针对一类线性切换系统, 运用平均驻留时间法设计出系统的观测器; 文献[6]基于平均驻留时间法, 研究了不确定切换系统的  $H_\infty$  控制问题. 以上文献均未考虑系统的非线性和时变时滞

收稿日期: 2019-07-29; 修回日期: 2019-12-28.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61871380); 天津市自然科学基金项目 (17JCQNJC00500); 天津市科技特派员项目 (17JCTPJC50600, 18JCTPJC6180); 天津市教委科研计划项目 (2018KJ174).

责任编辑: 吴立刚.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: lgliuyi@163.com.

特性. 随着现代工业过程的日趋复杂, 在实际的切换系统中, 不可避免地存在着时滞和控制器参数摄动, 并且系统中普遍存在严重的非线性. 根据非线性系统不同区域的动态, 利用模糊 T-S 模型建立局部线性模型, 然后将各个局部线性模型用模糊隶属度函数连接起来, 可以得到整个系统的模糊模型. 文献[7]基于 T-S 模糊模型的离散时间系统, 研究了在减少系统计算负担的同时, 降低保守性的问题; 文献[8]研究了一类切换模糊系统的稳定控制问题. 在已有的文献中, 采用 T-S 模型建模, 结合平均驻留时间方法分析非线性切换时滞系统非脆弱控制问题的研究成果还很少见.

另一方面, 网络控制系统 (NCSs) 是由网络形成的闭环反馈控制系统. 该类系统中, 传感器、控制器与执行器的数据传输都是通过网络实现的<sup>[9-10]</sup>. NCSs 不仅节省了系统设计成本, 还使得远程信息资源共享成为可能, 使系统的可维护性和灵活性变强, 在工业控制网络、无人机等领域应用广泛, 具有重要的研究价值<sup>[11]</sup>. 然而, 由于网络的介入, 信息在传递过程中不可避免地存在丢包现象. 针对丢包问题, 文献[12]在基于网络的离散切换系统中, 研究了测量数据丢失情况下系统的故障检测和控制器协同设计问题; 文献[13]在数据包丢失的情况下, 研究了带宽限制网络化系统的稳定性问题; 文献[14]研究了存在网络时延和丢包现象的网络控制系统  $H_\infty$  控制问题; 文献[15]研究了网络控制系统在丢包情况下的保成本控制问题. 现有文献大多在网络控制系统中研究丢包问题, 而在网络切换模糊时滞系统中研究丢包问题的相关成果还鲜有报道.

受以上研究成果启发, 本文研究一类多时滞网络切换模糊系统的非脆弱  $H_\infty$  控制问题, 将网络传输过程中丢包现象作为时滞处理, 并采用 Bernoulli 分布的随机序列描述该时滞, 结合平均驻留时间法和李雅普诺夫 (LKF) 方法给出系统均方指数稳定且满足  $H_\infty$  性能的充分条件, 从而得到系统的切换律和控制器的设计方法. 仿真结果验证了该设计方法的有效性.

## 1 问题描述

考虑子系统为非线性网络时滞系统的切换系统

$$\begin{cases} x(k+1) = f_1(x(k)) + f_2(x(k-\tau(k))) + \\ \quad g(x(k))u(k) + l(x(k))w(k), \\ z(k) = h(x(k)), \quad x(k) = \Psi(k), \quad k \in [-\tau, 0]. \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $x(k) \in R^n$  为状态变量;  $u(k) \in R^m$  为控制输入变量;  $w(k) \in R^m$  为外部干扰输入且  $w(k) \in L_2[0,$

$\infty)$ ;  $z(k) \in R^q$  为调节输出;  $f_1(x(k))$ 、 $f_2(x(k-\tau(k)))$ 、 $g(x(k))$ 、 $l(x(k))$  均为非线性函数;  $\tau(k)$  为离散时间的时滞, 其取值范围为  $\tau_m \leq \tau(k) \leq \tau_M$ ;  $\Psi(k)$  为状态变量的初始函数.

采用 T-S 模型建模<sup>[16]</sup>, 对式(1)进行局部线性化, 线性化后的模型由模糊 if-then 规则来描述. 第  $i$  条模糊规则  $R_\sigma^i$  表明  $\zeta_1(k)$  是  $M_{\sigma_1}^i$ , 以此类推,  $\zeta_p(k)$  是  $M_{\sigma_p}^i$ , 即  $R_\sigma^i$  if  $\zeta_1(k)$  is  $M_{\sigma_1}^i$  and ... and  $\zeta_p(k)$  is  $M_{\sigma_p}^i$ , then

$$\begin{cases} x(k+1) = \tilde{A}_{\sigma i}x(k) + \tilde{A}_{d\sigma i}x(k-\tau(k)) + \\ \quad \tilde{B}_{\sigma i}u_\sigma(k) + B_{w\sigma i}w(k), \\ z(k) = C_{\sigma i}x(k), \\ x(k) = \Psi(k), \quad k \in [-\tau, 0], \quad i = 1, 2, \dots, N_\sigma. \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $R_\sigma^i$  为第  $i$  条模糊规则;  $M_{\sigma_j}^i$  为模糊集合;  $\zeta(k) \in R^p$  表示模糊前件变量;  $\sigma \in M = \{1, 2, \dots, l\}$  是切换信号;  $\tilde{A}_{\sigma i} = A_{\sigma i} + \Delta A_{\sigma i}$ ,  $\tilde{A}_{d\sigma i} = A_{d\sigma i} + \Delta A_{d\sigma i}$ ,  $\tilde{B}_{\sigma i} = B_{\sigma i} + \Delta B_{\sigma i}$ ,  $A_{\sigma i}$ 、 $A_{d\sigma i}$ 、 $B_{\sigma i}$ 、 $B_{w\sigma i}$ 、 $C_{\sigma i}$  为适维常数矩阵, 用来描述系统特征;  $\Delta A_{\sigma i}$ 、 $\Delta A_{d\sigma i}$ 、 $\Delta B_{\sigma i}$  为适维时变矩阵, 表示系统中的不确定干扰项.

**假设 1**<sup>[16]</sup> 不确定矩阵是模有界的, 即

$$\begin{bmatrix} \Delta A_{\sigma i} & \Delta A_{d\sigma i} & \Delta B_{\sigma i} \end{bmatrix} = D_{\sigma i} F_{\sigma i}(k) [E_{1\sigma i} \quad E_{2\sigma i} \quad E_{3\sigma i}].$$

其中:  $D_{\sigma i}$ 、 $E_{1\sigma i}$ 、 $E_{2\sigma i}$ 、 $E_{3\sigma i}$  为具有适当维数的已知常数矩阵,  $F_{\sigma i}^T(k) F_{\sigma i}(k) \leq I$ ,  $i = 1, 2, \dots, N_\sigma$ .

结合并行分布补偿 (PDC) 算法, 由单点模糊化、乘积推理和平均加权反模糊化, 系统(2)可表示为

$$\begin{aligned} x(k+1) = & \sum_{\sigma=1}^l \sum_{i=1}^{N_\sigma} \nu_\sigma(x(k)) \mu_{\sigma i}(\zeta(k)) [\tilde{A}_{\sigma i}x(k) + \\ & \tilde{A}_{d\sigma i}x(k-\tau(k)) \tilde{B}_{\sigma i}u_\sigma(k) + B_{w\sigma i}w(k)]. \end{aligned} \quad (3)$$

其中: 切换信号  $\sigma$  由函数  $\mu_\sigma(x(k))$  刻画, 当切换信号传递到子系统时,  $\nu_\sigma(x(k)) = 1$ ; 反之,  $\nu_\sigma(x(k)) = 0$ .

$$\mu_{\sigma i}(\zeta(k)) = \frac{\prod_{j=1}^p M_{\sigma_j}^i(\zeta_j(k))}{\sum_{i=1}^{N_\sigma} \prod_{j=1}^p M_{\sigma_j}^i(\zeta_j(k))},$$

$$0 \leq \mu_{\sigma i}(\zeta(k)) \leq 1, \quad \sum_{i=1}^{N_\sigma} \mu_{\sigma i}(\zeta(k)) = 1,$$

$M_{\sigma_j}^i(\zeta_j(k))$  为  $\zeta_j(k)$  属于模糊集  $M_{\sigma_j}^i$  的隶属度.

假设控制器和执行器均为事件驱动, 传感器为时间驱动. 在实际网络控制系统中, 系统往往会出现丢包的情况, 本文将数据包丢失作为时滞处理, 并考

考虑控制信号在传输过程中存在延时, 控制器在 $k$ 时刻接收到的系统状态为 $\hat{x}(k) = x(k - d(k))$ , 在常用的CSMA/CD网络协议中,  $d(k)$ 为随机短时延. 设计模糊状态反馈控制器如下:

$$u_\sigma(k) = - \sum_{j=1}^{N_\sigma} \mu_{\sigma j}(z(k)) \tilde{K}_{\sigma j} x(k - d(k)). \quad (4)$$

其中:  $d(k)$ 表示 $k$ 时刻的网络时延, 其取值范围是 $0 \leq d(k) \leq d_2$ ;  $\tilde{K}_{\sigma j} = K_{\sigma j} + \Delta K_{\sigma j}$ ,  $K_{\sigma j}$ 表示控制增益矩阵,  $\Delta K_{\sigma j}$ 表示控制增益摄动矩阵.

**假设2**<sup>[17]</sup> 控制器增益摄动满足

$$\Delta K_{\sigma j} = H_{\sigma j} R_{\sigma j}(k) G_{\sigma j}.$$

其中:  $H_{\sigma j}$ 和 $G_{\sigma j}$ 为适当维数的已知常数矩阵;  $R_{\sigma j}(k)$ 为未知的时变矩阵, 且满足 $R_{\sigma j}^T(k) R_{\sigma j}(k) \leq I$ ,  $\sigma \in M, j = 1, 2, \dots, N_\sigma$ .

将式(4)代入(3), 可得

$$\begin{aligned} x(k+1) = & \sum_{\sigma=1}^l \sum_{i=1}^{N_\sigma} \sum_{j=1}^{N_\sigma} v_\sigma(x(k)) \mu_{\sigma i}(z(k)) \mu_{\sigma j}(z(k)) \times \\ & [\tilde{A}_{\sigma i} x(k) + \tilde{A}_{d\sigma i} x(k - \tau(k)) + \\ & \tilde{B}_{\sigma i} \tilde{K}_{\sigma j} x(k - d(k)) + B_{w\sigma i} w(k)]. \end{aligned} \quad (5)$$

采用伯努利分布的随机变量描述式(4)中的时滞, 即

$$\begin{cases} P\{\theta(k) = 1\} = P\{0 \leq d_1(k) \leq d_1\} = 1 - \theta_0, \\ P\{\theta(k) = 0\} = P\{d_1 \leq d_2(k) \leq d_2\} = \theta_0. \end{cases}$$

其中:  $d_1(k)$ 表示数据包没丢失时的网络时延,  $d_2(k)$ 表示数据包丢失时的网络时延,  $\theta_0$ 表示数据包丢失的概率,  $\theta(k) = 0$ 表示数据包丢失,  $\theta(k) = 1$ 表示数据包没丢失. 于是系统(5)可表示为

$$\begin{aligned} x(k+1) = & \sum_{\sigma=1}^l \sum_{i=1}^{N_\sigma} \sum_{j=1}^{N_\sigma} v_\sigma(x(k)) \mu_{\sigma i}(z(k)) \mu_{\sigma j}(z(k)) \times \\ & [\tilde{A}_{\sigma i} x(k) + \tilde{A}_{d\sigma i} x(k - \tau(k)) + \\ & (1 - \theta_0) \tilde{B}_{\sigma i} \tilde{K}_{\sigma j} x(k - d_1(k)) + \\ & \theta_0 \tilde{B}_{\sigma i} \tilde{K}_{\sigma j} x(k - d_2(k)) + B_{w\sigma i} w(k)]. \end{aligned} \quad (6)$$

**定义1**<sup>[18]</sup> 若存在标量 $\delta > 0$ 以及 $0 < \varpi < 1$ , 使得 $\|x(k)\| \leq \delta \varpi^{(k-k_0)} \|x(0)\|, k \geq k_0 \geq 0$ , 则网络切换模糊时滞系统(6)在切换信号 $\sigma$ 的作用下是指数稳定的,  $\varpi$ 表示衰减率.

**定义2**<sup>[18]</sup> 对于标量 $\gamma > 0$ , 在零初始条件下, 对于每一个非零的 $w(k) \in L_2(0, \infty)$ , 若系统(6)是指数均方稳定的且满足

$$\sum_{k=0}^{\infty} z^T(k) z(k) \leq \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^2 w^T(k) w(k),$$

则系统(6)具有 $H_\infty$ 抗干扰衰减水平.

**定义3**<sup>[19]</sup> 对于任意时刻 $t_2 > t_1 > 0$ , 用 $N_\sigma(t_1, t_2)$ 表示时间段 $[t_1, t_2]$ 上的切换次数. 若存在 $T_\alpha > 0, N_0 \geq 0$ , 使得不等式 $N_\sigma(t_1, t_2) \leq N_0 + (t_1, t_2)/T_\alpha$ 成立, 则常数 $T_\alpha$ 为平均驻留时间,  $N_0$ 为抖振界, 这里取 $N_0 = 0$ .

**引理1**<sup>[20]</sup> 给定适维矩阵 $\Xi_1, \Xi_2, F_{\sigma i}(k)$ 及对称矩阵 $\Lambda$ , 对于所有满足 $F_{\sigma i}^T(k) F_{\sigma i}(k) \leq I$ 的矩阵, 当 $\Lambda + \Xi_1 F_{\sigma i}(k) \Xi_2 + \Xi_2^T F_{\sigma i}^T(k) \Xi_1^T \leq 0$ 成立时, 存在常数 $\varepsilon \geq 0$ , 满足 $\Lambda + \varepsilon^2 \Xi_1 \Xi_1^T + \varepsilon^{-2} \Xi_2^T \Xi_2 \leq 0$ .

## 2 主要结果

### 2.1 系统指数稳定及 $H_\infty$ 性能分析

**定理1** 给定常数 $0 < \lambda < 1, \mu \geq 1, \varepsilon > 0, \gamma > 0$ , 若存在正定对称矩阵 $P_r, Q_r, R_r, S_r (r = 1, 2, \dots, l)$ , 对于任意的 $r, v \in M$ , 使得 $P_r \leq \mu P_v, Q_r \leq \mu Q_v, R_r \leq \mu R_v, S_r \leq \mu S_v$ 以及下面矩阵不等式成立:

$$\Pi = \begin{bmatrix} \Psi_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & C^T & \tilde{A}_{ri}^T \\ * & \Psi_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & \tilde{A}_{dri}^T \\ * & * & \Psi_{33} & 0 & 0 & 0 & \Psi_{37} \\ * & * & * & \Psi_{44} & 0 & 0 & \Psi_{47} \\ * & * & * & * & -\gamma^2 I & 0 & B_{wri}^T \\ * & * & * & * & * & -I & 0 \\ * & * & * & * & * & * & -P^{-1} \end{bmatrix} < 0,$$

并且切换信号满足平均驻留时间

$$T_\alpha \geq T_\alpha^* = -\frac{\ln \mu}{\ln(1 - \lambda)}, \quad (7)$$

则系统(6)是指数稳定的且具有 $H_\infty$ 性能指标 $\gamma$ . 进一步, 可得到系统的状态估计为

$$\begin{aligned} \|x(k)\| & \leq \sqrt{\frac{\xi_2}{\xi_1}} \varpi^{(k-k_0)} \|x(0)\|, \\ \varpi & = \sqrt{(1 - \lambda) \mu^{1/T_\alpha}}. \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} \forall \sigma(k) = r \in M, \forall \sigma(k-1) = v \in M, \\ \Psi_{11} = -P_r + \lambda P_r + (1 + \tau_M - \tau_m) Q_r + \\ (1 + d_1) R_r + (1 + d_2 - d_1) S_r, \\ \Psi_{22} = -(1 - \lambda)^{\tau_M} Q_r, \\ \Psi_{33} = -(1 - \lambda)^{d_1} R_r, \\ \Psi_{44} = -(1 - \lambda)^{d_2} S_r, \\ \Psi_{37} = (1 - \theta_0) (\tilde{B}_{ri} \tilde{K}_{rj})^T, \\ \Psi_{47} = \theta_0 (\tilde{B}_{ri} \tilde{K}_{rj})^T, \end{aligned}$$

\*是对称位置矩阵的转置.

**证明** 首先证明系统(6)在所设计的切换律下是指数稳定的. 当 $w(k) = 0$ 时, 对于第 $r$ 个子系统, 选取如下形式的时滞依赖的Lyapunov-Krasovskii泛函:

$$\left\{ \begin{aligned} V_r(k) &= \sum_{\partial=1}^7 V_{\partial r}(k), \\ V_{1r}(k) &= x^T(k)P_r x(k), \\ V_{2r}(k) &= \sum_{s=k-\tau(k)}^{k-1} (1-\lambda)^{k-s-1} x^T(s)Q_r x(s), \\ V_{3r}(k) &= \sum_{s=k-d_1(k)}^{k-1} (1-\lambda)^{k-s-1} x^T(s)R_r x(s), \\ V_{4r}(k) &= \sum_{s=k-d_2(k)}^{k-1} (1-\lambda)^{k-s-1} x^T(s)S_r x(s), \\ V_{5r}(k) &= \sum_{n=1-\tau_M}^{-\tau_m} \sum_{s=k+n}^{k-1} (1-\lambda)^{k-s-1} x^T(s)Q_r x(s), \\ V_{6r}(k) &= \sum_{n=1-d_1}^0 \sum_{s=k+n}^{k-1} (1-\lambda)^{k-s-1} x^T(s)R_r x(s), \\ V_{7r}(k) &= \sum_{n=1-d_2}^{-d_1} \sum_{s=k+n}^{k-1} (1-\lambda)^{k-s-1} x^T(s)S_r x(s). \end{aligned} \right. \quad (8)$$

对于给定 Lyapunov 函数, 存在 2 个正数  $\xi_1, \xi_2$ , 使得

$$\xi_1 x^2 \leq V_r(k) \leq \xi_2 x^2. \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} \xi_1 &= \min_{\forall r \in M} \lambda_{\min}(P_r), \\ \xi_2 &= \max_{\forall r \in M} \lambda_{\max}(P_r) + (1 + \tau_M - \tau_m) \times \\ &\quad \max_{\forall r \in M} \lambda_{\max}(Q_r) + (1 + d_1) \max_{\forall r \in M} \lambda_{\max}(R_r) + \\ &\quad (1 + d_2 - d_1) \max_{\forall r \in M} \lambda_{\max}(S_r). \end{aligned}$$

沿着系统(6)的状态对  $V_r(k)$  求差分, 可得

$$\begin{aligned} \Delta V_{1r}(k) + \lambda V_{1r}(k) &= \\ x^T(k+1)P_r x(k+1) - (1-\lambda)x^T(k)P_r x(k), \\ \Delta V_{2r}(k) + \lambda V_{2r}(k) &\leq \\ \sum_{s=k+1-\tau_M}^{k-\tau_m} (1-\lambda)^{k-s} x^T(s)Q_r x(s) + x^T(k)Q_r x(k) - \\ (1-\lambda)^{\tau_M} x^T(k-\tau(k))Q_r x(k-\tau(k)), \\ \Delta V_{3r}(k) + \lambda V_{3r}(k) &\leq \\ \sum_{s=k+1-d_1}^k (1-\lambda)^{k-s} x^T(s)R_r x(s) + x^T(k)R_r x(k) - \\ (1-\lambda)^{d_1} x^T(k-d_1(k))R_r x(k-d_1(k)), \\ \Delta V_{4r}(k) + \lambda V_{4r}(k) &\leq \\ \sum_{s=k+1-d_2}^{k-d_1} (1-\lambda)^{k-s} x^T(s)S_r x(s) + x^T(k)S_r x(k) - \\ (1-\lambda)^{d_2} x^T(k-d_2(k))S_r x(k-d_2(k)), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta V_{5r}(k) + \lambda V_{5r}(k) &= \\ (\tau_M - \tau_m)x^T(k)Q_r x(k) - \\ \sum_{s=k+1-\tau_M}^{k-\tau_m} (1-\lambda)^{k-s} x^T(s)Q_r x(s), \\ \Delta V_{6r}(k) + \lambda V_{6r}(k) &= \\ d_1 x^T(k)R_r x(k) - \sum_{s=k+1-d_1}^k (1-\lambda)^{k-s} x^T(s)R_r x(s), \\ \Delta V_{7r}(k) + \lambda V_{7r}(k) &= \\ (d_2 - d_1)x^T(k)S_r x(k) - \\ \sum_{s=k+1-d_2}^{k-d_1} (1-\lambda)^{k-s} x^T(s)S_r x(s). \end{aligned}$$

结合以上式子, 并运用 Schur 分解方法, 可得

$$\Delta V_r(k) \leq \sum_{r=1}^l \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_r} v_r(x(k)) \mu_{ri}(z(k)) \mu_{rj}(z(k)) \beta^T \bar{\Pi} \beta. \quad (10)$$

其中

$$\begin{aligned} \beta &= [x^T(k) \quad x^T(k-\tau(k)) \quad \eta]^T, \\ \eta &= [x^T(k-d_1(k)) \quad x^T(k-d_2(k))], \end{aligned}$$

$$\bar{\Pi} = \begin{bmatrix} \Psi_{11} & 0 & 0 & 0 & \tilde{A}_{ri}^T \\ * & \Psi_{22} & 0 & 0 & \tilde{A}_{dri}^T \\ * & * & \Psi_{33} & 0 & \Psi_{37} \\ * & * & * & \Psi_{44} & \Psi_{47} \\ * & * & * & * & -P^{-1} \end{bmatrix}.$$

由  $\bar{\Pi} < 0$  可知, 在不考虑输出项和扰动项的情况下,  $\bar{\Pi} < 0$ , 由此可知, 在满足定理 1 的条件下, 下面不等式成立:

$$V_r(k+1) - V_r(k) + \lambda V_r(k) \leq 0.$$

因此, 可以得到

$$V_r(k+1) \leq (1-\lambda)V_r(k). \quad (11)$$

结合定理 1 及式(11), 可得

$$\begin{aligned} V_\sigma(k) &\leq (1-\lambda)^{(k-k_0)} \mu^{(k-k_0)/T_\alpha} V_\sigma(0) \leq \\ ((1-\lambda)\mu^{1/T_\alpha})^{(k-k_0)} V_\sigma(0). \end{aligned} \quad (12)$$

由式(9)和(12)可得

$$\begin{aligned} \xi_1 \|x(k)\|^2 &\leq V_\sigma(k) \leq ((1-\lambda)\mu^{1/T_\alpha})^{(k-k_0)} V_\sigma(0), \\ V_\sigma(0) &\leq \xi_2 \|x(0)\|^2. \end{aligned}$$

指数稳定的状态估计为

$$\begin{aligned} \|x(k)\| &\leq \sqrt{\frac{\xi_2}{\xi_1}} \varpi^{(k-k_0)} \|x(0)\|, \\ \varpi &= \sqrt{(1-\lambda)\mu^{1/T_\alpha}}. \end{aligned}$$

因此,结合式(7)可以得到 $\varpi < 1$ ,由定义1可知,系统(6)在所设计的切换律下是指数稳定的.

下面分析当 $w(k) \neq 0$ 时,网络切换模糊时滞系统满足零初始条件下 $H_\infty$ 性能指标.考虑如下函数:

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} (\Delta V_r(k) + \lambda V_r(k) + \Gamma(k)), \quad (13)$$

其中 $\Gamma(k) = z^T(k)z(k) - \gamma^2 w^T(k)w(k)$ .结合Schur分解方法,进一步推导可得

$$\Gamma(k) + \Delta V_r(k) + \lambda V_r(k) \leq \vartheta^T \Pi \vartheta, \quad (14)$$

其中 $\vartheta = [\beta^T \quad w^T(k)]^T$ .

由定理1可知 $\Pi < 0$ ,结合式(14)可知

$$\Gamma(k) + \Delta V_r(k) + \lambda V_r(k) < 0,$$

在零初始条件下,有

$$z^T(k)z(k) - \gamma^2 w^T(k)w(k) < 0.$$

进一步推导可得

$$\sum_{k=0}^{\infty} z^T(k)z(k) \leq \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^2 w^T(k)w(k).$$

因此,当系统的切换律满足平均驻留时间条件(7)时,对于任意非零 $w(k) \in L_2[0, \infty)$ ,系统(6)是均方指数稳定的且具有 $H_\infty$ 性能指标 $\gamma$ .  $\square$

### 2.2 范数有界不确定性问题

**定理2** 给定常数 $0 < \lambda < 1, \mu \geq 1, \varepsilon > 0, \gamma > 0$ ,若存在正定对称矩阵 $P_r, Q_r, R_r, S_r (r = 1, 2, \dots, l)$ ,对于任意的 $r, v \in M$ ,使得 $P_r \leq \mu P_v, Q_r \leq \mu Q_v, R_r \leq \mu R_v, S_r \leq \mu S_v$ 及如下矩阵不等式成立:

$$\ddot{\Pi} = \begin{bmatrix} \ddot{\Pi}_1 & \ddot{\Psi}_{17} \\ * & \ddot{\Psi}_{77} \end{bmatrix} < 0,$$

并且切换信号满足式(7),则系统(6)是指数稳定的且具有 $H_\infty$ 性能指标 $\gamma$ .

其中

$$\ddot{\Pi}_1 = \begin{bmatrix} \ddot{\Psi}_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & C^T \\ * & \ddot{\Psi}_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & \ddot{\Psi}_{33} & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & \ddot{\Psi}_{44} & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -\gamma^2 I & 0 \\ * & * & * & * & * & -I \end{bmatrix},$$

$$\ddot{\Psi}_{11} = \Psi_{11} + \varepsilon_{1rij}^{-2} E_{1ri}^T E_{1ri},$$

$$\ddot{\Psi}_{22} = \Psi_{22} + \varepsilon_{2rij}^{-2} E_{2ri}^T E_{2ri},$$

$$\ddot{\Psi}_{33} = \begin{bmatrix} \Psi_{33} & \ddot{\Psi}_{331}^T \\ * & \varepsilon_{3rij}^2 I \end{bmatrix}, \quad \ddot{\Psi}_{44} = \begin{bmatrix} \Psi_{44} & \ddot{\Psi}_{441}^T \\ * & \varepsilon_{4rij}^2 I \end{bmatrix},$$

$$\ddot{\Psi}_{331} = (1 - \theta_0)(E_{3ri} \tilde{K}_{rj}), \quad \ddot{\Psi}_{411} = \theta_0(E_{3ri} \tilde{K}_{rj}),$$

$$\ddot{\Psi}_{17} = [A_{ri} \quad A_{dri} \quad \ddot{\Psi}_{171} \quad 0 \quad \ddot{\Psi}_{172} \quad 0 \quad B_{wri} \quad 0]^T,$$

$$\ddot{\Psi}_{171} = (1 - \theta_0)(B_{ri} \tilde{K}_{rj}), \quad \ddot{\Psi}_{172} = \theta_0(B_{ri} \tilde{K}_{rj}),$$

$$\ddot{\Psi}_{77} = -P_r^{-1} + (\varepsilon_{1rij}^2 + \varepsilon_{2rij}^2 + \varepsilon_{3rij}^2 + \varepsilon_{4rij}^2) D_{ri} D_{ri}^T.$$

**证明** 将 $\tilde{A}_{ri} = A_{ri} + \Delta A_{ri}, \tilde{A}_{dri} = A_{dri} + \Delta A_{dri}, \tilde{B}_{ri} = B_{ri} + \Delta B_{ri}$ 代入定理1中,并运用Schur补分解定理,可得

$$\Pi = \begin{bmatrix} \Pi_1 & \Pi_2 \\ * & -P_r^{-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \Delta \Pi_2 \\ * & 0 \end{bmatrix} = \ddot{\Pi}.$$

其中

$$\Pi_1 = \begin{bmatrix} \Psi_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & C^T \\ * & \Psi_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & \Psi_{33} & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & \Psi_{44} & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -\gamma^2 I & 0 \\ * & * & * & * & * & -I \end{bmatrix},$$

$$\Pi_2 = [A_{ri} \quad A_{dri} \quad \ddot{\Psi}_{331} \quad \ddot{\Psi}_{441} \quad B_{wri} \quad 0]^T,$$

$$\Delta \Pi_2 = [\Delta A_{ri} \quad \Delta A_{dri} \quad \Delta \ddot{\Psi}_{331} \quad \Delta \ddot{\Psi}_{441} \quad B_{wri} \quad 0]^T,$$

$$\Delta \ddot{\Psi}_{331} = (1 - \theta_0)(\Delta B_{ri} \tilde{K}_{rj}),$$

$$\Delta \ddot{\Psi}_{441} = \theta_0(\Delta B_{ri} \tilde{K}_{rj}). \quad \square$$

### 2.3 非脆弱控制器的设计

**定理3** 给定常数 $0 < \lambda < 1, \mu \geq 1, \varepsilon > 0, \gamma > 0$ ,若存在正定对称矩阵 $P_r, Q_r, R_r, S_r (r = 1, 2, \dots, l)$ ,对于任意的 $r, v \in M$ ,使得 $P_r \leq \mu P_v, Q_r \leq \mu Q_v, R_r \leq \mu R_v, S_r \leq \mu S_v$ 及如下矩阵不等式成立:

$$\hat{\Pi} = \begin{bmatrix} \hat{\Pi}_1 & \hat{\Psi}_{17} \\ * & \hat{\Psi}_{77} \end{bmatrix} < 0,$$

并且切换信号满足式(7),则系统(6)是指数稳定的且具有 $H_\infty$ 性能指标 $\gamma$ .

其中

$$\hat{\Pi}_1 = \begin{bmatrix} \ddot{\Psi}_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & C^T \\ * & \ddot{\Psi}_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & \hat{\Psi}_{33} & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & \hat{\Psi}_{44} & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -\gamma^2 I & 0 \\ * & * & * & * & * & -I \end{bmatrix},$$

$$\hat{\Psi}_{33} = \begin{bmatrix} \hat{\Psi}_{331} & \hat{\Psi}_{332}^T \\ * & \hat{\Psi}_{333} \end{bmatrix}, \quad \hat{\Psi}_{44} = \begin{bmatrix} \hat{\Psi}_{441} & \hat{\Psi}_{442}^T \\ * & \hat{\Psi}_{443} \end{bmatrix},$$

$$\hat{\Psi}_{331} = \Psi_{33} + \varepsilon_{5rij}^{-2} G_{rj}^T G_{rj} + \varepsilon_{7rij}^{-2} G_{rj}^T G_{rj},$$

$$\hat{\Psi}_{441} = \Psi_{44} + \varepsilon_{6rij}^{-2} G_{rj}^T G_{rj} + \varepsilon_{8rij}^{-2} G_{rj}^T G_{rj},$$

$$\hat{\Psi}_{332} = (1 - \theta_0)(E_{3ri} K_{rj}), \quad \hat{\Psi}_{442} = \theta_0(E_{3ri} K_{rj}),$$

$$\hat{\Psi}_{333} = \varepsilon_{3rij}^2 I + \varepsilon_{5rij}^2 (1 - \theta_0)^2 (E_{3ri} H_{rj})(E_{ri} H_{rj})^T,$$

$$\begin{aligned} \hat{\Psi}_{443} &= \varepsilon_{4rij}^2 I + \varepsilon_{6rij}^2 \theta_0^2 (E_{3ri} H_{rj})(E_{3ri} H_{rj})^T, \\ \hat{\Psi}_{17} &= [A_{ri} \quad A_{dri} \quad \hat{\Psi}_{171} \quad 0 \quad \hat{\Psi}_{172} \quad 0 \quad B_{wri} \quad 0]^T, \\ \hat{\Psi}_{171} &= (1 - \theta_0)(B_{ri} K_{rj}), \quad \hat{\Psi}_{172} = \theta_0(B_{ri} K_{rj}), \\ \hat{\Psi}_{77} &= \ddot{\Psi}_{77} + \varepsilon_{7rij}^2 (1 - \theta_0)^2 (B_{ri} H_{rj})(B_{ri} H_{rj})^T + \\ &\quad \varepsilon_{8rij}^2 \theta_0^2 (B_{ri} H_{rj})(B_{ri} H_{rj})^T. \end{aligned}$$

证明 将  $\tilde{K}_{rj} = K_{rj} + \Delta K_{rj}$  代入  $\ddot{II}$  中, 从而分离出  $\Delta K_{rj}$ , 可得  $\hat{II}$ , 于是定理得证.  $\square$

### 3 仿真例子

例1 考虑不确定网络切换模糊时滞系统(6), 系统参数矩阵如下:

$$\begin{aligned} A_{11} &= \begin{bmatrix} 0.6 & 0.1 \\ 0.2 & 0.3 \end{bmatrix}, \quad A_{12} = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.1 \\ 0.5 & 0.2 \end{bmatrix}, \\ A_{21} &= \begin{bmatrix} 0.7 & 0.5 \\ 0.3 & 0.1 \end{bmatrix}, \quad A_{22} = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.3 \\ -0.5 & 0.1 \end{bmatrix}, \\ B_{11} &= \begin{bmatrix} 0.1 & 0.9 \\ 0.5 & 0.2 \end{bmatrix}, \quad B_{12} = \begin{bmatrix} 0.4 & -0.2 \\ 0.2 & 0 \end{bmatrix}, \\ B_{21} &= \begin{bmatrix} 0.2 & 0.3 \\ 0.3 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 \\ -0.2 & 0 \end{bmatrix}, \\ A_{d11} &= \begin{bmatrix} 0.1 & 0.2 \\ 0.5 & 0.3 \end{bmatrix}, \quad A_{d12} = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.5 \\ 0.8 & 0.2 \end{bmatrix}, \\ A_{d21} &= \begin{bmatrix} 0.2 & 0.9 \\ 0.1 & 0.4 \end{bmatrix}, \quad A_{d22} = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.9 \\ 0.6 & 0.5 \end{bmatrix}, \\ B_{w11} &= \begin{bmatrix} 2.1 & -1.6 \\ 0.3 & -3.6 \end{bmatrix}, \quad B_{w12} = \begin{bmatrix} 2.1 & 0.7 \\ 1.5 & 4.3 \end{bmatrix}, \\ B_{w21} &= \begin{bmatrix} 8.7 & 1.6 \\ 1.2 & 3.2 \end{bmatrix}, \quad B_{w22} = \begin{bmatrix} 7.4 & 5.3 \\ 1.2 & 6.1 \end{bmatrix}, \\ D_{11} &= \begin{bmatrix} 0 & 0.2 \\ 0.1 & 0 \end{bmatrix}, \quad D_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0.1 \\ 0.2 & 0 \end{bmatrix}, \\ D_{21} &= \begin{bmatrix} 0 & 0.1 \\ 0.1 & 0 \end{bmatrix}, \quad D_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 0.3 \\ 0.1 & 0 \end{bmatrix}, \\ E_{11i} &= \begin{bmatrix} 0 & 0.1 \\ 0.2 & 0 \end{bmatrix}, \quad E_{12i} = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 \\ 0.1 & 0 \end{bmatrix}, \\ E_{21i} &= \begin{bmatrix} 0 & 0.1 \\ 0.3 & 0 \end{bmatrix}, \quad E_{22i} = \begin{bmatrix} 0 & 0.3 \\ 0.1 & 0 \end{bmatrix}, \\ E_{31i} &= \begin{bmatrix} 0 & 0.2 \\ 0.3 & 0 \end{bmatrix}, \quad E_{32i} = \begin{bmatrix} 0 & 0.3 \\ 0.2 & 0 \end{bmatrix}, \\ G_{1j} &= \begin{bmatrix} 0 & 0.2 \\ 0.1 & 0 \end{bmatrix}, \quad G_{2j} = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 \\ 0.2 & 0 \end{bmatrix}, \\ F_{rj}(k) &= R_{rj}(k) = \begin{bmatrix} \sin k & 0 \\ 0 & \cos k \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$H_{rj} = \begin{bmatrix} 0 & 0.4 \\ 0.4 & 0 \end{bmatrix}, \quad r, i, j = 1, 2.$$

取隶属度函数为

$$\begin{aligned} \mu_{11}(x_1(k)) &= \mu_{12}(x_1(k)) = 1 - \frac{1}{(1 + e^{-4x_1(k)})}, \\ \mu_{21}(x_1(k)) &= \mu_{22}(x_1(k)) = \frac{1}{(1 + e^{-4x_1(k)})}. \end{aligned}$$

取  $\varepsilon_{nrj} = 1 (n \in N^* \text{ 且 } n \in [1, 8]), \tau_m = 1, \tau_M = 5, d_1 = 3, d_2 = 8, \theta_0 = 0.1, \lambda = 0.2, \mu = 2.5$ . 由式(7)可得  $T_\alpha^* = 4.106$ , 选取驻留时间  $T_\alpha = 5$ . 因此, 切换律设计为

$$\sigma = \begin{cases} 1, & [k/5] = 0, 2, 4, \dots; \\ 2, & [k/5] = 1, 3, 5, \dots \end{cases}$$

当  $w(k) = 0$  时, 解矩阵不等式  $\hat{II} < 0$ , 得

$$\begin{aligned} K_{11} &= \begin{bmatrix} 0.6156 & -0.3215 \\ 0.4237 & -0.6246 \end{bmatrix}, \\ K_{12} &= \begin{bmatrix} 0.5962 & -0.3104 \\ 0.4851 & -0.2648 \end{bmatrix}, \\ K_{21} &= \begin{bmatrix} 0.1362 & -0.2013 \\ -0.4016 & -0.5243 \end{bmatrix}, \\ K_{22} &= \begin{bmatrix} 0.2139 & -0.3583 \\ -0.4985 & -0.4257 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

选取初始点  $[0.3, -0.1]^T$ , 利用 Matlab 进行仿真, 系统状态曲线如图1所示.

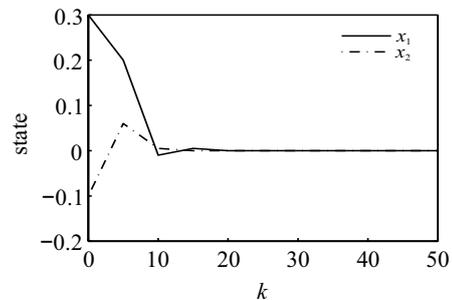


图1  $w(k) = 0$  时的系统状态曲线

当  $w(k) \neq 0$  时, 取  $w(k) = [\sin k \quad \cos k]^T, \gamma = 1/\sqrt{2}$ , 可以解得

$$\begin{aligned} K_{11} &= \begin{bmatrix} 0.3546 & -0.5246 \\ 0.2667 & -0.9563 \end{bmatrix}, \\ K_{12} &= \begin{bmatrix} 0.4863 & -0.4156 \\ 0.2742 & -0.6141 \end{bmatrix}, \\ K_{21} &= \begin{bmatrix} 0.0981 & -0.1452 \\ -0.8143 & -0.5973 \end{bmatrix}, \\ K_{22} &= \begin{bmatrix} 0.1764 & -0.3172 \\ -0.7628 & -0.5126 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

选取初始点  $[0.3, -0.1]^T$ , 利用 Matlab 仿真, 干扰状态下系统状态曲线如图2所示, 系统的切换信号如图3所示.

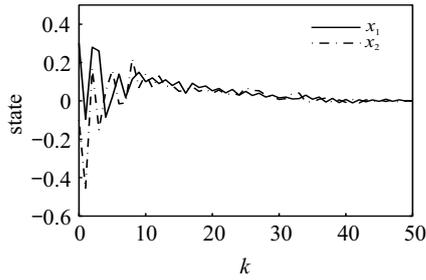


图2  $w(k) \neq 0$ 时的系统状态曲线

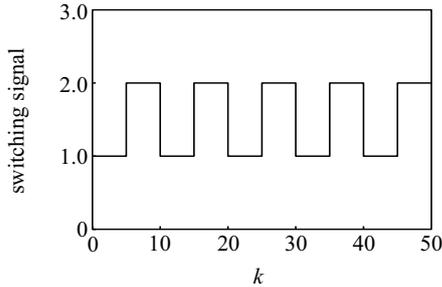


图3 切换信号

由仿真结果可知, 系统在所设计的切换律和非脆弱状态控制器下是指数稳定的. 通过图1与图2对比可知, 当存在外部干扰时, 系统的收敛速度较慢且有一定的波动, 但系统仍是稳定的且具有  $H_\infty$  性能指标  $\gamma$ .

**例2** 考虑如下离散切换模糊系统<sup>[8]</sup>:

$$x(k+1) = \sum_{\sigma=1}^3 \sum_{i=1}^2 v_{\sigma}(x(k)) \mu_{\sigma i}(z(k)) [\tilde{A}_{\sigma i} x(k) + \tilde{A}_{d\sigma i} x(k-\tau(k)) + \tilde{B}_{\sigma i} u_{\sigma}(k)];$$

$$\tilde{A}_{11} = \begin{bmatrix} 1 & 0.1 \\ -0.49 & 0.8 \end{bmatrix}, \tilde{A}_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 0.1 \\ 0.42 & 0.8 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{A}_{21} = \begin{bmatrix} 1 & 0.1 \\ -0.43 & 0.96 \end{bmatrix}, \tilde{A}_{22} = \begin{bmatrix} 1 & 0.1 \\ -0.25 & 0.96 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{A}_{31} = \begin{bmatrix} 1 & 0.1 \\ -0.25 & 0.96 \end{bmatrix}, \tilde{A}_{32} = \begin{bmatrix} 1 & 0.1 \\ 0.01 & 0.96 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{B}_{11} = \tilde{B}_{12} = 0.1I, \tilde{B}_{21} = \tilde{B}_{22} = 0.02I,$$

$$\tilde{B}_{31} = \tilde{B}_{32} = 0.01I, \tilde{A}_{d\sigma i} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & -0.2 \end{bmatrix}.$$

解矩阵不等式  $\bar{\Pi} < 0$ , 可得

$$\tilde{K}_{11} = \begin{bmatrix} -8.6481 & -2.8546 \\ 6.2365 & -9.3584 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{K}_{12} = \begin{bmatrix} 3.2514 & 1.6522 \\ -3.4953 & 0.6658 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{K}_{21} = \begin{bmatrix} 0.4853 & -0.8847 \\ 3.2145 & 6.2154 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{K}_{22} = \begin{bmatrix} 0.2249 & -0.2415 \\ -0.6214 & -0.2158 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{K}_{31} = \begin{bmatrix} 0.5217 & -2.2153 \\ 0.8549 & -1.2143 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{K}_{32} = \begin{bmatrix} 0.3952 & -0.0841 \\ -0.3514 & 0.6216 \end{bmatrix}.$$

选取初始点  $[0.3, 0.1]^T$ , 利用 Matlab 进行仿真, 图4为本文方法的系统状态曲线, 图5是文献[8]中方法所得到的系统状态曲线.

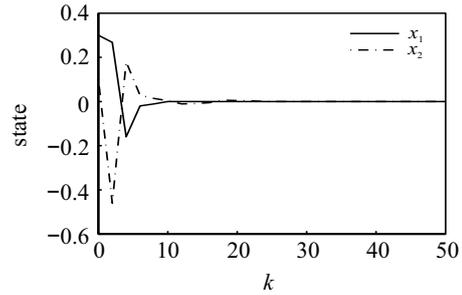


图4 本文方法下的系统状态曲线

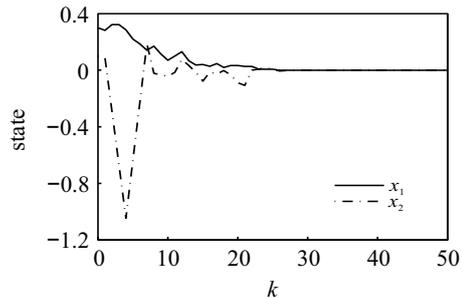


图5 文献[8]中系统的状态曲线

由图4和图5可知, 与文献[8]中的方法相比, 即使本文考虑了系统存在丢包的情况, 系统收敛速度依然比文献[8]中系统的收敛速度快, 系统性能指标更好.

### 4 结论

本文针对一类控制器增益存在摄动的不确定网络切换模糊系统, 当系统存在时变时滞和数据包丢失时, 将数据包丢失作为时滞处理, 并采用 Bernoulli 分布的随机序列描述该时滞, 从而形成多时滞的网络切换模糊控制系统; 然后, 采用平均驻留时间的方法设计系统切换律, 给出了时滞相关的网络切换模糊系统指数稳定的条件; 最后, 结合李雅普诺夫(LKF)方法给出了系统均方指数稳定且满足  $H_\infty$  性能的充分条件, 获得了非脆弱模糊控制器的设计方法. 现有文献大多在网络控制系统中研究丢包问题, 本文则在网络切换模糊时滞系统中对丢包问题进行了研究, 所得结论可以推广到多时滞系统故障检测问题的研究. 仿真结果表明, 本文的设计方法具有良好的性能指标.

## 参考文献(References)

- [1] Fu X Z, Zhu Q X. Stability of nonlinear impulsive stochastic systems with Markovian switching under generalized average dwell time condition[J]. Science China: Information Sciences, 2018, 61(11): 208-222.
- [2] 李艳辉, 柳桐. 具有分布时滞和随机测量数据丢失的离散切换系统  $H_\infty$  滤波[J]. 控制与决策, 2017, 32(8): 1486-1492.  
(Li Y H, Liu T.  $H_\infty$  filtering for discrete switched systems with distributed delays and random measurement data missing[J]. Control and Decision, 2017, 32(8): 1486-1492.)
- [3] Liu H, Zhao X D. Finite-time  $H_\infty$  control of switched systems with model-dependent average dwell time[J]. Journal of the Franklin Institute, 2014, 351(3): 1301-1315.
- [4] 王佳伟, 沈毅, 王振华. 切换系统的同时故障估计与容错控制[J]. 控制理论与应用, 2017, 34(1): 85-92.  
(Wang J W, Shen Y, Wang Z H. Simultaneous fault estimation and fault tolerance control for switching systems[J]. Control Theory & Applications, 2017, 34(1): 85-92.)
- [5] Zhao X D, Liu H, Zhang J F, et al. Multiple-mode observer design for a class of switched linear systems[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2015, 12(1): 272-280.
- [6] Zhang L X, El-kebir Boukas, Shi P, et al. A  $\mu$ -dependent approach to control of uncertain switched linear systems with average dwell time[J]. Optimal Control Applications and Methods, 2011, 32(1): 15-27.
- [7] Xie X, Yue D, Zhang H, et al. Control synthesis of discrete-time T-S fuzzy systems: Reducing the conservatism whilst alleviating the computational burden[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 47(9): 2480-2491.
- [8] Jarina B L, Balasubramaniam P. Robust stability and stabilization analysis for discrete-time randomly switched fuzzy systems with known sojourn probabilities[J]. Nonlinear Analysis: Hybrid Systems, 2015, 17: 128-143.
- [9] Hespanha J P, Naghshtabrizi P, Xu Y G. A survey of recent results in networked control systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1): 138-162.
- [10] 游科友, 谢立华. 网络控制系统的最新研究综述[J]. 自动化学报, 2013, 39(2): 101-118.  
(You K Y, Xie L H. Survey of recent progress in networked control systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(2): 101-118.)
- [11] Franzè G, Tedesco F, Famularo D. Model predictive control for constrained networked systems subject to data losses[J]. Automatica, 2015, 54(C): 272-278.
- [12] 王申全, 王越男, 庞基越, 等. 基于网络的离散切换时滞系统故障检测和控制器协同设计[J]. 控制与决策, 2017, 32(10): 1810-1816.  
(Wang S Q, Wang Y N, Pang J Y, et al. Fault detection and control co-design for networked-based discrete-time switched systems with time-varying delays[J]. Control and Decision, 2017, 32(10): 1810-1816.)
- [13] 詹习生, 吴杰, 关治洪, 等. 基于丢包和带宽限制网络化系统稳定性分析[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(8): 1111-1115.  
(Zhan X S, Wu J, Guan Z H, et al. Stability analysis of networked system based on packet dropouts and bandwidth constraints[J]. Control Theory & Applications, 2014, 31(8): 1111-1115.)
- [14] Li B, Wu J F, Huang L. Improved control for networked  $H_\infty$  control systems with network-induced delay and packet dropout[J]. Journal of Control South University, 2016, 23(5): 1215-1223.
- [15] 唐晓铭, 杨爽, 虞继敏, 等. 基于量化依赖Lyapunov函数的有界丢包网络控制系统的保成本控制[J]. 自动化学报, 2018, 44(8): 1381-1390.  
(Tang X M, Yang S, Yu J M, et al. Guaranteed cost control of networked control systems with bounded packet loss based on quantization dependent Lyapunov function[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(8): 1381-1390.)
- [16] 佟绍成, 王涛, 王艳平, 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: 123-138.  
(Tong S C, Wang T, Wang Y P, et al. Design and stability analysis of fuzzy control system[M]. Beijing: Science Press, 2004: 123-138.)
- [17] Park J H, Mathiyalagan K, Sakthivel R. Fault estimation for discrete-time switched nonlinear systems with discrete and distributed delays[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2016, 26(17): 3755-3771.
- [18] Wang D, Shi P, Wang W, et al. Non-fragile  $H_\infty$  control for switched stochastic delay systems with application to water quality process[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2014, 24(11): 1677-1693.
- [19] Zhang D, Li Y, Zhang W A. Delay-dependent fault detection for switched linear systems with time-varying delays the average dwell time approach[J]. Signal Processing, 2011, 91(4): 832-840.
- [20] Xie L H. Output feedback  $H_\infty$  control of systems with parameter uncertainty[J]. International Journal of Control, 1996, 63(4): 741-750.

## 作者简介

刘毅(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 从事切换模糊控制系统等研究, E-mail: lgliuyi@163.com;

梅玉鹏(1993—), 男, 硕士生, 从事网络控制、切换模糊控制系统的研究, E-mail: 824822128@qq.com;

李国燕(1984—), 女, 讲师, 博士, 从事智能信息处理的研究, E-mail: ligy@tcu.edu.cn;

潘玉恒(1978—), 女, 副教授, 博士, 从事智能信息处理的研究, E-mail: panyuheng@tju.edu.cn;

梅树立(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能信息处理等研究, E-mail: meishuli@163.com.