

区间2型T-S模糊系统的事件触发预测控制

周靖峰, 胡满峰[†]

(江南大学 理学院, 江苏 无锡 214000)

摘要: 本文研究了前提不匹配的区间2型(IT2)模糊系统的事件触发预测控制问题. 首先, 提出了一个IT2模糊系统模型, 包括动态事件触发机制(ETM)和预测控制器, ETM可以通过减少传输的数据包数量来节省有限的网络资源, 预测控制器可以预测两个成功传输时刻之间的系统状态来处理不可靠的通信网络. 其次, 根据李雅普诺夫稳定性理论和前提不匹配方法, 得到了系统稳定的充分条件. 然后, 根据线性矩阵不等式(LMI)得到控制器增益. 最后通过数值模拟验证了方法的有效性.

关键词: 模糊系统; 预测控制; 事件触发机制; 李雅普诺夫稳定性理论; 线性矩阵不等式

引用格式: 周靖峰, 胡满峰. 区间2型T-S模糊系统的事件触发预测控制. 控制理论与应用, 2022, 39(8): 1471 – 1478
DOI: 10.7641/CTA.2021.10549

Event-triggered predictive control for interval type-2 T-S fuzzy systems

ZHOU Jing-feng, HU Man-feng[†]

(School of Science, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214000, China)

Abstract: This paper investigates the dynamic event-triggered predictive control problem of interval type-2 (IT2) fuzzy systems with imperfect premise matching. First of all, an IT2 fuzzy system is proposed, including a dynamic event-triggered mechanism (ETM) that can save limited network resources by reducing the number of data packets transmitted and a predictive controller that can predict the state of the system between the two successful transmitted instants to deal with unreliable communication networks. Next, according to the Lyapunov stability theory and imperfect premise matching method, the sufficient conditions for system stabilization are obtained. Then, the gain of the controller are obtained by using linear matrix inequality (LMI). Finally, the validity of the design method is demonstrated by the numerical simulation.

Key words: fuzzy systems; predictive control; event-triggered mechanism; Lyapunov stability theory; linear matrix inequality

Citation: ZHOU Jingfeng, HU Manfeng. Event-triggered predictive control for interval type-2 T-S fuzzy systems. *Control Theory & Applications*, 2022, 39(8): 1471 – 1478

1 引言

网络控制系统(networked control systems, NCSs)是通过带宽有限的通信网络连接各种物理设备的控制系统. 近年来, NCSs已广泛应用于各个领域, 并引起了极大的关注^[1-6].

为了节省通信资源并保持一定的系统性能, 动态事件触发机制(event-triggered mechanism, ETM)被用来控制通信网络中信号的传输. 在文献[7-9]中, 使用了固定阈值的静态ETM, 但是这并不能真正反映系统动态, 从而导致一定的保守性. 因此, 期望能动态变化自适应调整阈值的触发法则来进一步降低信号传输的频率. 遵循这个想法, 通过引入内部动态变量, 在文

献[10-13]中设计了动态或自适应ETM. 然而, 一些动态ETM可能存在奇异问题并会退化为传统的时间触发机制, 这可能会限制其在实际应用中的使用. 最近, 在文献[14-15]中, 设计了有乘法和加法内部动态变量的ETM来避免奇异现象. 在文献[16-17]中, 提出了静态事件触发预测控制方法, 其控制器通过引入预测器来获取系统的估计状态, 这不仅节省了通信资源, 而且有助于获得良好的系统控制性能. 受上述工作的启发, 设计一种动态事件触发的预测控制方案是有意义的.

T-S模糊模型可以用若干IF-Then规则下的局部线性子系统来表示具有非线性动力学的系统. 考虑到采

收稿日期: 2021-06-26; 录用日期: 2021-11-17.

[†]通信作者. E-mail: humanfeng@jiangnan.edu.cn.

本文责任编辑: 龙离军.

国家自然科学基金项目(61973137), 江苏省自然科学基金项目(BK20181342)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61973137) and the National Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20181342).

样的非均匀性, Wang等人^[18]提出了一种T-S模糊马尔可夫跳变系统的模糊事件触发异步耗散控制方法. Ma等人^[19]研究了一类具有全状态约束和执行器失效的随机非线性系统的自适应模糊输出反馈控制问题. 但由于传感器和控制器通过通信网络传输信号, 因此假设模糊系统和模糊控制器具有相同的前提变量是不实际的. 因此, Asalm等人^[20]提出了一类具有时滞和前提变量不匹配的非线性系统在ETM下的模糊控制器设计方法. 但传统的T-S模糊系统在实际应用中存在着隶属度函数难以精确获得的问题. 为了解决这一问题, 通过对隶属函数进行有界化处理, 文献[21]建立了IT2模糊模型. 然而, 在上述工作中, 通信网络中的网络丢包问题一直没有得到很好的解决, 这对本文的工作有很大的启发.

本文的目的是针对IT2模糊系统设计一种动态事件触发预测控制器, 该控制器具有不同于模糊系统的前提变量并且能够补偿网络丢包带来的负面影响. 首先, 提出了一种新的IT2模糊系统模型, 该模型包括能减轻通信网络负担的动态ETM和能解决网络丢包问题的预测控制器. 然后, 利用Lyapunov稳定性理论和前提不匹配方法得到了系统稳定的充分条件, 并根据给定的充分条件得到了控制器增益和事件触发参数. 本文主要贡献如下:

1) 提出了一种新的IT2模糊模型, 该模型将动态ETM和预测控制方法相结合, 以补偿网络丢包带来的负面影响. 与传统的T-S模糊模型^[22]不同, 它不需要获得精确的隶属函数.

2) 针对网络化IT2 T-S模糊系统, 提出了一种动态事件触发预测控制器的设计方法. 与网络化并行分布式补偿方法^[23]不同, 不完全前提匹配方法可以不要求控制器具有与所研究的T-S模糊系统相同的前提变量.

本文的结构如下. 第2部分是系统描述, 其包括IT2 T-S模糊模型和动态ETM. 第3部分分析了系统的稳定性, 得到了系统稳定的充分条件. 最后, 通过数值仿真说明了设计方法的有效性.

注1 在本文中, 矩阵中的星号*用来表示对称项. $X > 0$ ($X \geq 0$)意思是 X 是对称的和正定的(半正定的). I 和 0 分别表示单位矩阵和零矩阵.

2 系统描述

本文考虑的模糊事件触发预测控制结构图如图1. 模糊事件触发预测控制方法包括传输采样数据的ETM1, 基于ETM2的模糊事件触发预测控制器和存储预测数据包的网络数据丢失补偿器(networked data-dropout compensator, NDC). 传感器与控制器通过通信网络连接, 控制器与执行器直接点对点连接.

2.1 IT2 T-S模糊模型

考虑如下的网络化IT2 T-S模糊模型:

Rule ϵ : IF $f_1(x(k))$ is M_1^ϵ and \dots and $f_p(x(k))$ is M_p^ϵ , THEN

$$x(k+1) = A_\epsilon x(k) + B_\epsilon u(k), \quad (1)$$

$f_\nu(x(k))$ 和 M_ν^ϵ ($\nu = 1, 2, \dots, p; \epsilon = 1, 2, \dots, r$)代表前提变量和模糊集, $x(k) \in \mathbb{R}^n$ 和 $u(k) \in \mathbb{R}^m$ 是系统状态和控制输入. A_ϵ 和 B_ϵ 是适当维度的系统常数矩阵. 规则 ϵ 的激活强度为

$$W_\epsilon(x(k)) = [\underline{h}_\epsilon(x(k)) \quad \bar{h}_\epsilon(x(k))],$$

其中:

$$\underline{h}_\epsilon(x(k)) = \prod_{\nu=1}^p \underline{\mu}_{M_\nu^\epsilon}(f_\nu(x(k))),$$

$$\bar{h}_\epsilon(x(k)) = \prod_{\nu=1}^p \bar{\mu}_{M_\nu^\epsilon}(f_\nu(x(k)))$$

表示隶属函数的下界和上界. 且 $\underline{\mu}_{M_\nu^\epsilon}(f_\nu(x(k))) \in [0, 1]$, $\bar{\mu}_{M_\nu^\epsilon}(f_\nu(x(k))) \in [0, 1]$.

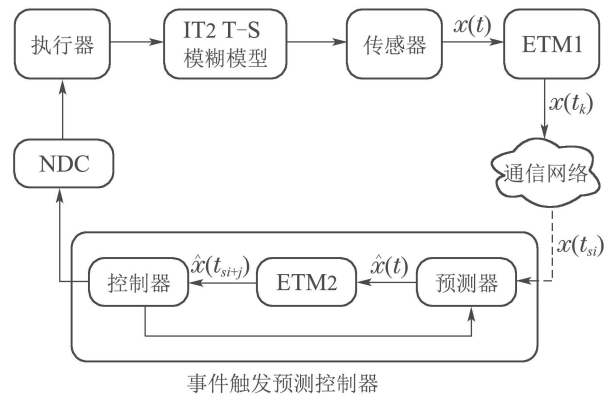


图1 IT2 T-S模糊系统框架

Fig. 1 The framework of IT2 T-S fuzzy system

此时, 系统(1)可以表示为

$$x(k+1) = \sum_{\epsilon=1}^r h_\epsilon(x(k)) [A_\epsilon x(k) + B_\epsilon u(k)], \quad (2)$$

其中: $h_\epsilon(x(k)) = \underline{\kappa}_\epsilon \underline{h}_\epsilon(x(k)) + \bar{\kappa}_\epsilon \bar{h}_\epsilon(x(k))$ 满足 $0 \leq h_\epsilon(x(k)) \leq 1$ 和 $\sum_{\epsilon=1}^r h_\epsilon(x(k)) = 1$. $\underline{\kappa}_\epsilon \in [0, 1]$ 和 $\bar{\kappa}_\epsilon \in [0, 1]$ 满足 $\underline{\kappa}_\epsilon + \bar{\kappa}_\epsilon = 1$.

注2 不同于传统的T-S模糊模型(例如文献[16]), IT2模糊模型的隶属函数在一个区间范围内, 这意味着实际应用中不再要求获取精确的隶属函数. IT2模糊模型不仅扩展了传统的T-S模糊模型, 而且有处理不确定性的特点.

2.2 动态ETM

为了节省有限的通信资源, 设计了动态ETM1(见图1)来释放采样信号. 假设 $e(k) = x(k) - x(k_n)$ 是当前状态 $x(k)$ 和最新触发状态 $x(k_n)$ 之间的误差. 然后, 下一个事件触发时刻由如下ETM1确定:

$$k_{n+1} = k_n + \min\{T, T_k\},$$

$$T_k = \min\{k | k > k_n, \frac{1}{\rho} \phi(k) + \delta x^T(k)x(k) -$$

$$e^T(k)e(k) \leq 0\}, n = 0, 1, 2, \dots, \quad (3)$$

其中: $0 < \delta < 1$ 和 $\rho > 0$ 是常数, T 是正的常数, 它表示事件触发间隔的上界.

内部动态变量 $\phi(k)$ 被设计为

$$\phi(k+1) = \tau\phi(k) + \delta x^T(k)x(k) - e^T(k)e(k), \quad (4)$$

其中 $\tau \in (0, 1)$ 是一个常数且 $\phi(0) = \phi_0 > 0$, 参数 τ 和 ρ 满足 $\tau\rho > 1$. 在区间 $[k_n, k_{n+1})$ 中, 通过式(3)可以得到 $\frac{1}{\rho}\phi(k) + \delta x^T(k)x(k) - e^T(k)e(k) > 0$, 将其同式(4), $\tau\rho > 1$ 和 $\phi_0 > 0$ 结合可以得到不等式 $\phi(k) > 0$.

注 3 动态ETM1包含一个内部动态变量 $\phi(k)$, 它可以根据系统状态动态的调整ETM1的强度. 当 $\phi(k) \rightarrow 0$ 时, ETM1将变成静态ETM. 在文献[14]中, ETM的内部动态变量是乘性的, 而式(3)中的内部动态变量是加性的. 一旦乘性动态变量退化到0, 相应的动态ETM就退化为时间触发机制. 当加性动态变量退化到0时, 相应的动态ETM退化为静态ETM^[16].

2.3 模糊事件触发控制器

由于网络资源的有限性和通信网络的不可靠性, 一些采样数据不会传输到控制器, 因此在控制器中设置了预测器. 考虑到控制器模型不能与系统模型共享前提变量, 因此模糊预测控制器模型描述为

Rule w : IF $g_1(\hat{x}(k))$ is N_1^w and \dots and $g_q(\hat{x}(k))$ is N_q^w , THEN

$$\hat{x}(k+1) = \hat{A}_w\hat{x}(k) + \hat{B}_wu(k), \quad (5)$$

Rule l : IF $g_1(\hat{x}(k))$ is N_1^l and \dots and $g_q(\hat{x}(k))$ is N_q^l , THEN

$$\hat{u}(k) = K_l\hat{x}(k), \quad (6)$$

其中: $g_\gamma(\hat{x}(k))$ 和 $N_\gamma^{w,l}$ ($w, l = 1, 2, \dots, o; \gamma = 1, 2, \dots, q$)表示前提变量和模糊集, $\hat{x}(k)$ 是系统的预测状态, \hat{A}_w 和 \hat{B}_w 是适当维度的矩阵.

类似的, 模糊预测控制器模型可以表示为

$$\hat{x}(k+1) = \sum_{w=1}^o \eta_w(g(\hat{x}(k))) [\hat{A}_w\hat{x}(k) + \hat{B}_wu(k)], \quad (7)$$

$$\hat{u}(k) = \sum_{l=1}^o \eta_l(g(\hat{x}(k))) K_l\hat{x}(k), \quad (8)$$

其中:

$$\begin{aligned} \eta_w &= \underline{\kappa}_w \underline{W}_w(\hat{x}(k)) + \bar{\kappa}_w \bar{W}_w(\hat{x}(k)), \\ 0 &\leq \eta_w(\hat{x}(k)) \leq 1, \sum_{w=1}^o \eta_w(\hat{x}(k)) = 1, \\ \underline{\kappa}_w &\in [0, 1], \bar{\kappa}_w \in [0, 1], \underline{\kappa}_w + \bar{\kappa}_w = 1, \\ \eta_l &= \underline{\kappa}_l \underline{W}_l(\hat{x}(k)) + \bar{\kappa}_l \bar{W}_l(\hat{x}(k)), \\ 0 &\leq \eta_l(\hat{x}(k)) \leq 1, \sum_{w=1}^o \eta_l(\hat{x}(k)) = 1, \end{aligned}$$

$$\underline{\kappa}_l \in [0, 1], \bar{\kappa}_l \in [0, 1], \underline{\kappa}_l + \bar{\kappa}_l = 1.$$

注意到预测器和控制器的前提变量是相同的, 但他们的前提变量和系统模型的前提变量是不同的.

2.4 T-S模糊模型

这一节, 将仔细分析数据在网络中的传输过程并设计事件触发预测器.

假设 t_{s_i} ($i = 1, 2, \dots$)是ETM (3)成功触发的时间序列, 那么闭环系统(1)可以被预测为

$$\begin{aligned} \hat{x}(\hat{t}_{s_i+j} + k + 1 | t_{s_i}) &= \sum_{w=1}^o \eta_w g(\hat{x}) [\hat{A}_w \hat{x}(\hat{t}_{s_i+j} + k | t_{s_i}) + \hat{B}_w \sum_{l=1}^o \eta_l g(\hat{x}) K_l \hat{x}(\hat{t}_{s_i} + j | t_{s_i})], \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $k \in \{0, 1, 2, \dots, \hat{t}_{s_i+j+1} - \hat{t}_{s_i+j} - 1\}$ 和 $j \in \{0, 1, 2, \dots, \theta_i\}$. 在区间 $[t_{s_i}, t_{s_{i+1}})$ 中, 系统(9)的状态是

$$\begin{aligned} x(t_{s_i}), \hat{x}(t_{s_i} + 1), \hat{x}(t_{s_i} + 2), \dots, \hat{x}(\hat{t}_{s_i+1}), \\ \hat{x}(\hat{t}_{s_i+1} + 1), \hat{x}(\hat{t}_{s_i+1} + 2), \dots, \hat{x}(\hat{t}_{s_i+\theta_i-1}), \\ \hat{x}(\hat{t}_{s_i+\theta_i-1} + 1), \hat{x}(\hat{t}_{s_i+\theta_i-1} + 2), \dots, \hat{x}(\hat{t}_{s_i+\theta_i}). \end{aligned}$$

当 $j=0$ 时, 得到 $\hat{t}_{s_i+j} = t_{s_i}$ 和 $\hat{x}(\hat{t}_{s_i} | t_{s_i}) = x(t_{s_i})$.

假设 1 在通信网络中, 存在着网络丢包现象, 且连续发生丢包现象的最大次数为 σ . 当网络丢包发生时, 触发数据将不会被成功发送到控制器中, 控制器将继续使用预测状态.

在式(9)中, 预测触发时刻 \hat{t}_{s_i+j+1} 由ETM2所决定

$$\begin{aligned} \hat{t}_{s_i+j+1} &= \hat{t}_{s_i+j} + \min\{T, T_{s_i+j}\}, \\ T_{s_i+j} &= \min\{k | k > \hat{t}_{s_i+j}, \frac{1}{\rho} \hat{\phi} + \delta \hat{x}^T(t | t_{s_i}) x(t | t_{s_i}) - \hat{e}^T(t) \hat{e}(t) \leq 0\}, \\ j &= 0, 1, 2, \dots, \theta_i. \end{aligned} \quad (10)$$

内部动态变量 $\hat{\phi}(k)$ 被设计为

$$\hat{\phi}(k+1) = \tau \hat{\phi}(k) + \delta \hat{x}^T(k) \hat{x}(k) - \hat{e}^T(k) \hat{e}(k), \quad (11)$$

其中参数 ρ, δ 和 τ 与式(3)-(4)中的参数相同. 同样的, 当 $\hat{\phi}(0) = \hat{\phi}_0 > 0$, 可以得到 $\hat{\phi}(k) > 0$. 定义等式 $\hat{e}(t) = \hat{x}(t | t_{s_i}) - \hat{x}(\hat{t}_{s_i+j} | t_{s_i})$, 预测事件触发时刻为 $\{\hat{t}_{s_i+j}\}_{j=1}^{\theta_i}$ 且满足 $\hat{t}_{s_i+\theta_i} \leq t_{s_i} + T * \sigma < \hat{t}_{s_i+\theta_i+1}$.

预测控制信号可以表示为

$$\begin{aligned} \hat{u}(\hat{t}_{s_i+j} | t_{s_i}) &= \sum_{l=1}^o \eta_l(g(\hat{x})) K_l \hat{x}(\hat{t}_{s_i+j} | t_{s_i}), \\ j &\in \{0, 1, \dots, \theta_i\}, \end{aligned} \quad (12)$$

在式(12)中的控制序列可以表示为

$$U_{t_{s_i}} = [u(t_{s_i}) \hat{u}(\hat{t}_{s_i+1} | t_{s_i}) \dots \hat{u}(\hat{t}_{s_i+\theta_i} | t_{s_i})]. \quad (13)$$

注 4 如果没有ETM (10), 那么控制信号序列将表示

为

$$\begin{aligned} \tilde{U}_{t_{s_i}} &= [u(t_{s_i}) \ u(t_{s_i} + 1) \ \cdots \\ &\quad \hat{u}(\hat{t}_{s_i+1}|t_{s_i}) \ \hat{u}(\hat{t}_{s_i+1} + 1|t_{s_i}) \ \cdots \\ &\quad \hat{u}(\hat{t}_{s_i+2}|t_{s_i}) \ \hat{u}(\hat{t}_{s_i+2} + 1|t_{s_i}) \ \cdots \\ &\quad \hat{u}(\hat{t}_{s_i+\theta_i}|t_{s_i})]. \end{aligned}$$

与 $U_{t_{s_i}}$ 相比, $\tilde{U}_{t_{s_i}}$ 的复杂度和大小都更大. 因此, ETM (10)能节约计算能力和存储空间.

基于以上分析, 式(2)和式(7)可以分别表示为闭环系统

$$x(t + 1) = \sum_{\epsilon=1}^r h_{\epsilon}(x)[A_{\epsilon}x(t) + B_{\epsilon}\hat{u}(\hat{k}_{s_i+j}|t_{s_i})], \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \hat{x}(t + 1) &= \sum_{w=1}^o \eta_w(\hat{x})[\hat{A}_w\hat{x}(t) + \\ &\quad \hat{B}_w\hat{u}(\hat{t}_{s_i+j}|t_{s_i})], \quad (15) \end{aligned}$$

其中 $t \in \Phi_{m_j}^i, \Phi_{m_j}^i \triangleq [t_{s_i}, t_{s_i+1}) \cap [t_{s_i+m}, t_{s_i+m+1}) \cap [\hat{t}_{s_i+j}, \hat{t}_{s_i+j+1})$ 和 $[t_{s_i}, t_{s_i+1}) = \bigcup_{m=0}^{s_{i+1}-s_i-1} \bigcup_{j=0}^{\theta_i} \Phi_{m_j}^i$.

定义等式 $\hat{e}_{ij}(t) = \hat{x}(t) - \hat{x}(\hat{t}_{s_i+j}|t_{s_i}), e_{im} = x(t) - x(t_{s_i+m}), \beta(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ 和 $\alpha = [x^T(t) \ \beta^T(t)]^T$, 系统(14)–(15)能联合表示为

$$\alpha(t + 1) = \sum_{\epsilon=1}^o \sum_{w=1}^o \sum_{l=1}^o h_{\epsilon}(x)\eta_w(\hat{x})\eta_l(\hat{x})[\chi_{\epsilon wl}], \quad (16)$$

其中:

$$\chi_{\epsilon wl} = \Pi_{\epsilon wl}\alpha(t) + \Xi_{\epsilon wl}\hat{e}_{ij}(t),$$

$$\Xi_{\epsilon wl} = \begin{bmatrix} -B_{\epsilon}K_l \\ -(B_{\epsilon} - \hat{B}_{\epsilon})K_l \end{bmatrix},$$

$$\chi_{\epsilon wl} = \begin{bmatrix} A_{\epsilon} + B_{\epsilon}K_l & -B_{\epsilon}K_l \\ A_{\epsilon} - \hat{A}_w + (B_{\epsilon} - \hat{B}_w)K_l & \hat{A}_w - (B_{\epsilon} - \hat{B}_w)K_l \end{bmatrix}.$$

注 5 本文中的系统(2)和预测控制器(8)的前提变量是不完全匹配的, 具体表示为 $h_{\epsilon} \neq \eta_l$. 完全匹配可以看作本文中的一种特殊情况, 这意味着本文中的设计方法更具一般性.

引理 1^[24] 给定矩阵 $Q_i (i = 1, \dots, s)$ 和半正定矩阵 P , 如果 $\sum_{i=1}^s v_i = 1$ 和 $0 \leq v_i \leq 1$ 存在, 那么如下不等式成立:

$$\left(\sum_{i=1}^s v_i Q_i\right)^T P \left(\sum_{i=1}^s v_i Q_i\right) \leq \sum_{i=1}^s v_i Q_i^T P Q_i.$$

3 主要结果

本节中, 将分析系统(16)在ETM (3)(10)下的稳定性准则.

定理 1 给定参数 $\rho > 0, \delta > 0, 0 < \tau < 1$, 矩阵 K_l 和满足 $\eta_l(\hat{x}) - \gamma_l h_l(x) \geq 0 (0 < \gamma_l < 1)$ 的隶属

函数, 如果存在矩阵 $P > 0$ 和适当维度的矩阵 $\Lambda_{\epsilon}, \Lambda_l (\epsilon, w, l = 1, 2, \dots, o)$ 满足

$$\Psi_{\epsilon wl} - \Lambda_l < 0, \quad (17)$$

$$\gamma_{\epsilon} \Psi_{\epsilon w \epsilon} - \gamma_{\epsilon} \Lambda_{\epsilon} + \Lambda_{\epsilon} < 0, \quad (18)$$

$$\gamma_l \Psi_{\epsilon wl} + \gamma_{\epsilon} \Psi_{l w \epsilon} - \gamma_l \Lambda_{\epsilon} - \gamma_{\epsilon} \Lambda_l + \Lambda_{\epsilon} + \Lambda_l < 0, \quad (19)$$

$$\Psi_{\epsilon wl} \triangleq \begin{bmatrix} -P + \Omega & * & * & * & * & * \\ 0 & -v_1 I & * & * & * & * \\ 0 & 0 & -v_1 I & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & v_2 I & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & v_2 I & * \\ P \Pi_{\epsilon wl} & P \Xi_{\epsilon wl} & 0 & 0 & 0 & -P \end{bmatrix}, \quad (20)$$

$$v_1 = \left(\frac{1}{\rho} + \delta\right), \quad v_2 = \frac{\tau - 1 + c}{\rho}, \quad (21)$$

$$v_3 = \frac{\delta}{\rho} + c\delta, \quad \Omega \triangleq \begin{bmatrix} 2v_3 I & -v_3 I \\ -v_3 I & v_3 I \end{bmatrix}. \quad (22)$$

那么闭环系统(16)在ETM (3)(10)下是渐近稳定的.

证 选择Lyapunov函数

$$V(\alpha(k), \phi(k)) = \alpha^T(k)P\alpha(k) + \frac{1}{\rho}\phi(k) + \frac{1}{\rho}\hat{\phi}(k), \quad (23)$$

计算其差分可得

$$\begin{aligned} \Delta V(\alpha(k), \phi(k)) &= \\ &= \alpha^T(k + 1)P\alpha(k + 1) - \alpha^T(k)P\alpha(k) + \\ &= \frac{1}{\rho}\phi(k + 1) - \frac{1}{\rho}\phi(k) + \frac{1}{\rho}\hat{\phi}(k + 1) - \frac{1}{\rho}\hat{\phi}(k). \quad (24) \end{aligned}$$

对于任何 $t \in (t_{s_i+m}, t_{s_i+m+1})$, 由动态ETM (3)可得到

$$\frac{1}{\rho}\phi(k) + \delta x^T(k)x(k) - e^T(k)e(k) \geq 0, \quad (25)$$

所以, 结合式(4), 对于任何 $c > 0$, 有

$$\begin{aligned} &\frac{1}{\rho}\phi(k + 1) - \frac{1}{\rho}\phi(k) \leq \\ &\frac{1}{\rho}\phi(k + 1) - \frac{1}{\rho}\phi(k) + \\ &c\left(\frac{1}{\rho}\phi(k) + \delta x^T(k)x(k) - e^T(k)e(k)\right) = \\ &\frac{\tau - 1 + c}{\rho}\phi(k) + \left(\frac{\delta}{\rho} + c\delta\right)x^T(k)x(k) - \\ &\left(\frac{1}{\rho} + \delta\right)e^T(k)e(k). \quad (26) \end{aligned}$$

类似地, 结合式(11), 对于任何 $t \in (\hat{t}_{s_i+j}, \hat{t}_{s_i+j+1})$

和 $c > 0$, 由ETM (10)得到

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\rho} \hat{\phi}(k+1) - \frac{1}{\rho} \hat{\phi}(k) \leq \\ & \frac{1}{\rho} \hat{\phi}(k+1) - \frac{1}{\rho} \hat{\phi}(k) + \\ & c \left(\frac{1}{\rho} \hat{\phi}(k) + \delta \hat{x}^T(k) \hat{x}(k) - \hat{e}_{ij}^T(t) \hat{e}_{ij}(k) \right) = \\ & \frac{\tau - 1 + c}{\rho} \hat{\phi}(k) + \left(\frac{\delta}{\rho} + c\delta \right) \hat{x}^T(k) \hat{x}(k) - \\ & \left(\frac{1}{\rho} + \delta \right) \hat{e}_{ij}^T(k) \hat{e}_{ij}(k). \end{aligned} \quad (27)$$

另一方面, 通过使用引理1, 可以得到

$$\begin{aligned} & \alpha^T(k+1) P \alpha(k+1) = \\ & \left\{ \sum_{\epsilon=1}^o \sum_{w=1}^o \sum_{l=1}^o h_{\epsilon}(x) \eta_w(\hat{x}) \eta_l(\hat{x}) [\Pi_{\epsilon w l} \alpha(k) + \Xi_{\epsilon w l} \hat{e}_{ij}(k)] \right\}^T P \cdot \\ & \left\{ \sum_{\epsilon=1}^o \sum_{w=1}^o \sum_{l=1}^o h_{\epsilon}(x) \eta_w(\hat{x}) \eta_l(\hat{x}) [\Pi_{\epsilon w l} \alpha(k) + \Xi_{\epsilon w l} \hat{e}_{ij}(k)] \right\} \leq \\ & \sum_{\epsilon=1}^o \sum_{w=1}^o \sum_{l=1}^o h_{\epsilon}(x) \eta_w(\hat{x}) \eta_l(\hat{x}) [\Pi_{\epsilon w l} \alpha(k) + \Xi_{\epsilon w l} \hat{e}_{ij}(k)]^T P [\Pi_{\epsilon w l} \alpha(k) + \Xi_{\epsilon w l} \hat{e}_{ij}(k)]. \end{aligned} \quad (28)$$

结合式(24)–(28)和Schur补理论, 可以得到

$$\begin{aligned} & \Delta V(\alpha(k), \phi(k)) \leq \\ & \sum_{\epsilon=1}^o \sum_{w=1}^o \sum_{l=1}^o h_{\epsilon}(x) \eta_w(\hat{x}) \eta_l(\hat{x}) \{ [\Pi_{\epsilon w l} \alpha(k) + \Xi_{\epsilon w l} \hat{e}_{ij}(k)]^T P [\Pi_{\epsilon w l} \alpha(k) + \Xi_{\epsilon w l} \hat{e}_{ij}(k)] + \\ & \frac{\tau - 1 + c}{\rho} \phi(k) - \left(\frac{1}{\rho} + \delta \right) e^T(k) e(k) + \\ & \frac{\tau - 1 + c}{\rho} \hat{\phi}(k) - \left(\frac{1}{\rho} + \delta \right) \hat{e}_{ij}^T(k) \hat{e}_{ij}(k) + \\ & \alpha^T(k) \Omega \alpha(k) - \alpha^T(k) P \alpha(k) \} \leq \\ & \sum_{\epsilon=1}^o \sum_{w=1}^o \sum_{l=1}^o h_{\epsilon}(x) \eta_w(\hat{x}) \eta_l(\hat{x}) \xi^T \Psi_{\epsilon w l} \xi, \end{aligned} \quad (29)$$

其中 $\xi^T \triangleq [\alpha^T(t) \ e \ \hat{e}_{ij}^T \ x(t) \ \sqrt{\hat{\phi}^T(t)} \ \sqrt{\phi^T(t)}]$, 同时可以得到

$$\begin{aligned} & \sum_{\epsilon=1}^o \sum_{w=1}^o \sum_{l=1}^o h_{\epsilon}(x) \eta_w(\hat{x}) [h_l(x) - \eta_l(\hat{x})] \Lambda_{\epsilon} = \\ & \sum_{\epsilon=1}^o \sum_{w=1}^o h_{\epsilon}(x) \eta_w(\hat{x}) \left[\sum_{l=1}^o h_l(x) - \sum_{l=1}^o \eta_l \right] \Lambda_{\epsilon} = \\ & \sum_{\epsilon=1}^o \sum_{w=1}^o h_{\epsilon}(x) \eta_w(\hat{x}) (1 - 1) \Lambda_{\epsilon} = 0, \end{aligned} \quad (30)$$

其中 $\Lambda_{\epsilon} = \Lambda_{\epsilon}^T$. 结合式(29)和式(30), 可以得到

$$\begin{aligned} & \sum_{\epsilon=1}^o \sum_{w=1}^o \sum_{l=1}^o h_{\epsilon}(x) \eta_w(\hat{x}) \eta_l(\hat{x}) \Psi_{\epsilon w l} \leq \\ & \sum_{\epsilon=1}^o \sum_{w=1}^o h_{\epsilon}^2(x) \eta_w(\hat{x}) (\gamma_{\epsilon} \Psi_{\epsilon w \epsilon} - \gamma_{\epsilon} \Lambda_{\epsilon} + \Lambda_{\epsilon}) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{\epsilon=1}^o \sum_{w=1}^o \sum_{l=1}^o h_{\epsilon}(x) \eta_w(\hat{x}) (\eta_l(\hat{x}) - \gamma_l h_l(x)) (\Psi_{\epsilon w l} - \Lambda_l) + \\ & \sum_{\epsilon=1}^o \sum_{w=1}^o \sum_{l < \epsilon} h_{\epsilon}(x) \eta_w(\hat{x}) h_l(x) (\gamma_l \Psi_{\epsilon w l} + \gamma_{\epsilon} \Psi_{l w \epsilon} - \gamma_l \Lambda_{\epsilon} - \gamma_{\epsilon} \Lambda_l + \Lambda_{\epsilon} + \Lambda_l), \end{aligned} \quad (31)$$

其中 $\eta_l(\hat{x}) - \gamma_l h_l(x) \geq 0$ 对任意 l 成立. 若式(17)–(19)对所有 $\epsilon, w, l = 1, 2, \dots, o$, 都成立, 那么可以得到

$$\Delta V(\alpha(t), \phi(t)) < 0. \quad (32)$$

显然, 存在一个标量 $\iota > 0$ 对所有 $\xi \neq 0$ 都满足 $\Delta V(\alpha(t), \phi(t)) \leq -\iota \|\xi^2\|$. 因此, 系统(16)是渐近稳定的. 证毕.

虽然定理1保证了闭环系统是渐近稳定的, 但是为了使用LMI寻求控制器增益和ETM的参数, 有如下定理2.

定理 2 给定参数 $\rho > 0, \delta > 0, 0 < \tau < 1$, 矩阵 K_l 和满足 $\eta_l(\hat{x}) - \gamma_l h_l(x) \geq 0 (0 < \gamma_l < 1)$ 的隶属函数, 如果存在矩阵 $\bar{\Upsilon} > 0$ 和适当维度的矩阵 $\bar{\Lambda}_{\epsilon}, \bar{\Lambda}_l (\epsilon, w, l = 1, 2, \dots, o)$ 满足

$$\bar{\Psi}_{\epsilon w l} - \bar{\Lambda}_l < 0, \quad (33)$$

$$\gamma_{\epsilon} \bar{\Psi}_{\epsilon w \epsilon} - \gamma_{\epsilon} \bar{\Lambda}_{\epsilon} + \bar{\Lambda}_{\epsilon} < 0, \quad (34)$$

$$\gamma_l \bar{\Psi}_{\epsilon w l} + \gamma_{\epsilon} \bar{\Psi}_{l w \epsilon} - \gamma_l \bar{\Lambda}_{\epsilon} - \gamma_{\epsilon} \bar{\Lambda}_l + \bar{\Lambda}_{\epsilon} + \bar{\Lambda}_l < 0, \quad (35)$$

那么闭环系统(16)在ETM (3)(10)下是渐近稳定的. 其中

$$\bar{\Psi}_{\epsilon w l} \triangleq \begin{bmatrix} \bar{\Psi}_{11} & \bar{\Psi}_{12} & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & \bar{\Psi}_{23} & * & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & \bar{\Psi}_{34} & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{\Psi}_{45} & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{\Psi}_{56} & * \\ \bar{\Psi}_{61} & \bar{\Psi}_{62} & \bar{\Psi}_{63} & 0 & 0 & 0 & -P \end{bmatrix},$$

$$\bar{\Psi}_{11} = \begin{bmatrix} 2\bar{v}_3 I - \bar{\Upsilon} \\ -\bar{v}_3 I \end{bmatrix}, \bar{\Psi}_{12} = \begin{bmatrix} * \\ 2\bar{v}_3 I - \bar{\Upsilon} \end{bmatrix},$$

$$\bar{\Psi}_{61} = \begin{bmatrix} A_{\epsilon} \bar{\Upsilon} + B_{\epsilon} Y_l \\ (A_{\epsilon} - \hat{A}_w) \bar{\Upsilon} + (B_{\epsilon} - \hat{B}_w) Y_l \end{bmatrix},$$

$$\bar{\Psi}_{62} = \begin{bmatrix} -B_{\epsilon} Y_l \\ \hat{A}_{\epsilon} \bar{\Upsilon} - (B_{\epsilon} - \hat{B}_w) Y_l \end{bmatrix},$$

$$\bar{\Psi}_{67} = \begin{bmatrix} -\bar{\Upsilon} & * \\ * & -\bar{\Upsilon} \end{bmatrix}, \bar{\Psi}_{63} = \begin{bmatrix} -B_{\epsilon} Y_l \\ -(B_{\epsilon} - \hat{B}_{\epsilon}) Y_l \end{bmatrix},$$

$$\bar{\Psi}_{23} = -v_1 \bar{\Upsilon}^{-1} I \bar{\Upsilon}^{-1}, \bar{\Psi}_{34} = -v_1 \bar{\Upsilon}^{-1} I \bar{\Upsilon}^{-1},$$

$$\bar{\Psi}_{45} = v_2 \bar{\Upsilon}^{-1} I \bar{\Upsilon}^{-1}, \bar{\Psi}_{56} = v_2 \bar{\Upsilon}^{-1} I \bar{\Upsilon}^{-1},$$

$$K_l = Y_l \bar{\Upsilon}^{-1}.$$

证 定义

$$P = \text{diag}\{\bar{P}, \bar{P}\}, \bar{\Upsilon} = \bar{P}^{-1}, \Upsilon = \text{diag}\{\bar{\Upsilon}, \bar{\Upsilon}\},$$

$$D = \text{diag}\{\Upsilon, \bar{\Upsilon}, \bar{\Upsilon}, \bar{\Upsilon}, \bar{\Upsilon}, \Upsilon\}.$$

将 D 左乘和右乘在式(17)–(19)上, 那么就能得到式(33)–(35). 证毕.

4 仿真实验

本部分通过数值模拟验证所设计的区间2型模糊系统的事件触发预测控制方案的有效性. 给出一个非线性质量弹簧系统^[16]

$$\begin{aligned} \dot{\varrho}_1 &= \varrho_2, \\ \varrho_2 &= -0.01\varrho_1 - 0.67\varrho_1^3 + u, \end{aligned}$$

其中有 $\varrho_1 \in [-1, 1]$. 如果非线性质量弹簧系统以采样周期 $h = 0.1$ s离散化, 则离散模糊系统为

$$x(t+1) = \sum_{\epsilon=1}^2 h_{\epsilon}(f(x)) [A_{\epsilon}x(t) + B_{\epsilon}x(t)], \quad (36)$$

其中:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.1000 \\ -0.0010 & 1.0000 \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0.0050 \\ 0.100 \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0.9966 & 0.0999 \\ -0.0679 & 0.9966 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0.0050 \\ 0.0999 \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned} h_{\epsilon}(x(k)) &= \underline{\kappa}_{\epsilon} \underline{h}_{\epsilon}(x(k)) + \bar{\kappa}_{\epsilon} \bar{h}_{\epsilon}(x(k)), \\ h_2 &= 1 - h_1, \quad \underline{h}_2(f(x)) = 1 - \bar{h}_1(f(x)), \\ \bar{h}_2(f(x)) &= 1 - \underline{h}_1(f(x)), \\ \bar{h}_1(f(x)) &= \frac{1}{1 + \exp(-\varphi_2 x_1(t))}, \\ \underline{h}_1(f(x)) &= \frac{1}{1 + \exp(-\varphi_1 x_1(t))}, \end{aligned}$$

而且隶属函数表示为

$$\begin{aligned} \eta_l(g(\hat{x})) &= \underline{\kappa}_l \underline{\eta}_l(x(k)) + \bar{\kappa}_l \bar{\eta}_l(x(k)), \\ \eta_2 &= 1 - \eta_1, \\ \underline{\eta}_2(g(\hat{x})) &= 1 - \bar{\eta}_1(g(\hat{x})), \\ \bar{\eta}_2(g(\hat{x})) &= 1 - \underline{\eta}_1(g(\hat{x})), \\ \bar{\eta}_1(g(\hat{x})) &= 0.98 \exp(-\varphi_1 x_1(t)), \\ \underline{\eta}_1(g(\hat{x})) &= 0.98 \exp(-\varphi_2 x_1(t)), \end{aligned}$$

其中有 $\varphi_1 = 1, \varphi_2 = 2$.

例1 假设预测器参数和模糊系统参数相同, 即 $\hat{A} = A, \hat{B} = B$. 给定参数 $\gamma_1 = 0.8$ 和 $\gamma_2 = 0.95$ 且保证 $\eta_l(\hat{x}) - \gamma_l h_l(x) \geq 0$ 成立. 事件触发参数设定为 $\rho = 4, \delta = 0.8, \tau = 0.3$. 通过使用LMI, 得到控制器增益

$$\begin{aligned} K_1 &= [-0.1581 \quad -0.0851], \\ K_2 &= [-0.1481 \quad -0.0441]. \end{aligned}$$

假设系统初始状态为 $x_0 = [0.5 \quad -0.5]^T$, 采样间隔为0.1 s, 模拟时长为20 s. 丢包在通信网络中随机发生且连续丢包的最大次数为 $\sigma = 10$. 图2展示了系统

状态的演化. 图3展示了事件触发的时刻和间隔. 图4动态变量 $\phi(k)$ 的演化. 图5展示了网络丢包的发生时刻和间隔.

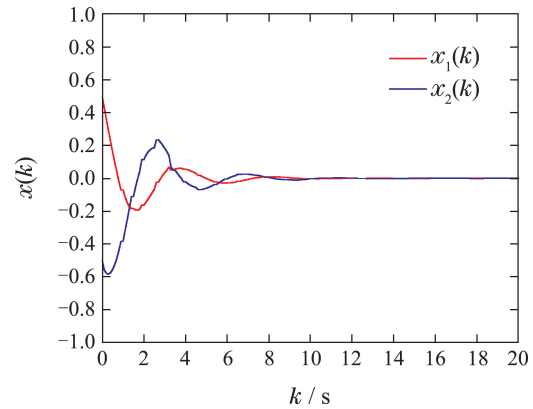


图2 例1中的系统状态

Fig. 2 The state of system in case 1

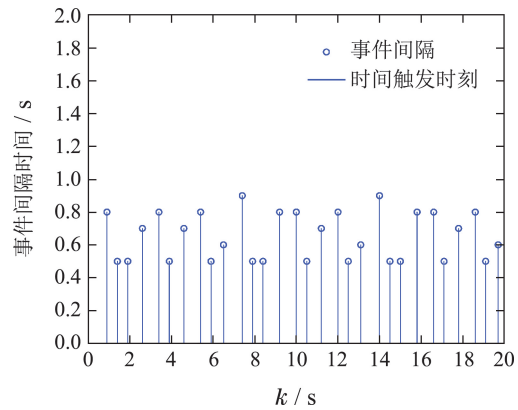


图3 例1中的事件触发时刻和间隔

Fig. 3 The instant and interval of even-triggered in case 1

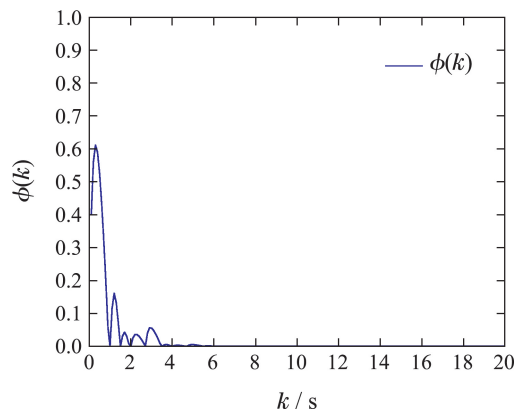


图4 例1中的 $\phi(k)$

Fig. 4 $\phi(k)$ in case 1

例2 假设预测器参数和模糊系统参数不同, 即 $\hat{A} = 1.02A, \hat{B} = 0.9B$. 给定参数 $\gamma_1 = 0.8$ 和 $\gamma_2 = 0.95$ 且满足 $\eta_l(\hat{x}) - \gamma_l h_l(x) \geq 0$. 事件触发参数设定为 $\rho = 4, \delta = 0.8, \tau = 0.3$. 通过使用LMI, 可以得到控制器增益

$$\begin{aligned} K_1 &= [-0.3145 \quad -0.8307], \\ K_2 &= [-0.0152 \quad -0.4473]. \end{aligned}$$

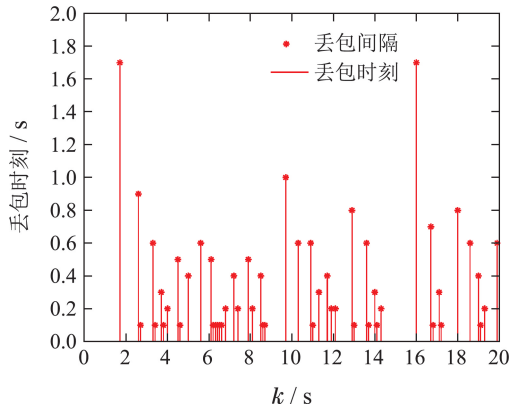


图 5 例1中的丢包时刻和间隔

Fig. 5 The instant and interval of packet loss in case 1

假设系统初始状态为 $x_0 = [0.5 \ -0.5]^T$, 采样间隔为 0.1 s , 模拟时长为 20 s . 丢包在通信网络中随机发生且连续丢包的最大次数为 $\sigma = 10$. 图6展示了系统状态的演化. 图7展示了事件触发的时刻和间隔. 图8动态变量 $\phi(k)$ 的演化. 图9展示了网络丢包的发生时刻和间隔.

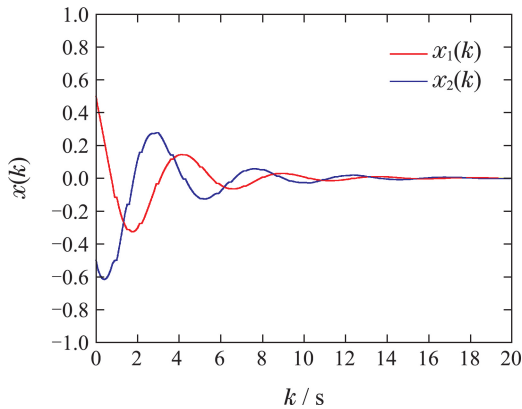


图 6 例2中的系统状态

Fig. 6 The state of system in case 2

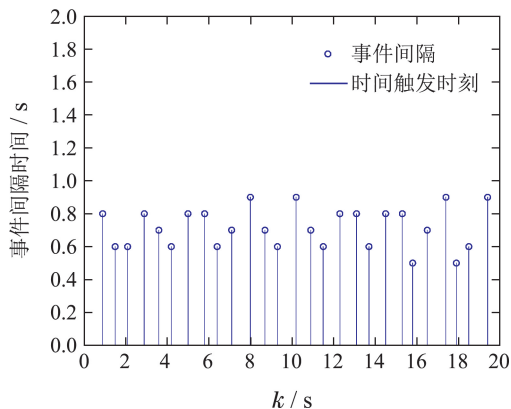


图 7 例2中的事件触发时刻和间隔

Fig. 7 The instant and interval of even-triggered in case 2

因为网络丢包是随机发生, 所以两种情况的ETM无法进行比较. 所以, 另外设定丢包状况相同的两个

例子来进行仿真, 并且跟静态ETM^[16]进行比较, 最终的结果在表1中展示. 可以看到, 动态ETM比静态ETM有更低的事件触发频率.

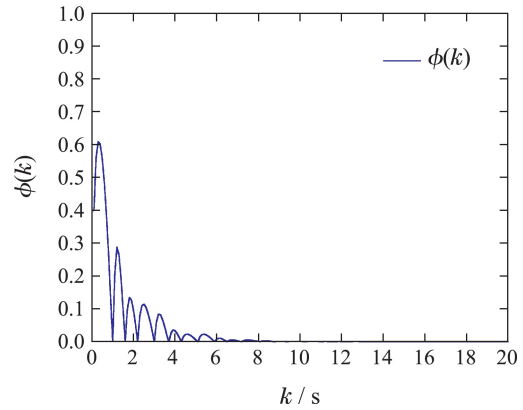


图 8 例2中的参数 $\phi(k)$

Fig. 8 $\phi(k)$ in case 2

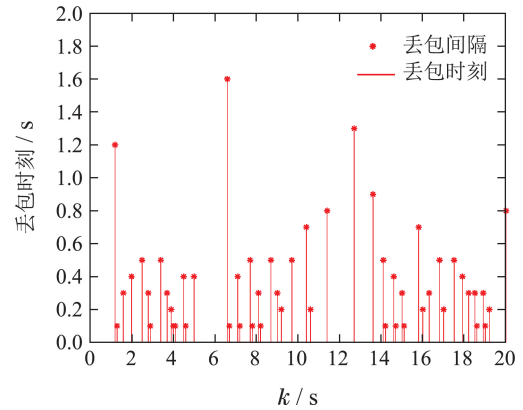


图 9 例2中的丢包时刻和间隔

Fig. 9 The instant and interval of packet loss in case 2

表 1 事件触发频率

Table 1 The frequency of event-triggered

ETM	触发频率	采样次数
例1动态ETM ($\phi(k) \neq 0$)	27	200
例1静态ETM ($\phi(k) = 0$)	52	200
例2动态ETM ($\phi(k) \neq 0$)	30	200
例2静态ETM ($\phi(k) = 0$)	56	200

5 总结

针对一类NCSs, 本文采用IT2模糊模型进行建模, 提出了一种前提不匹配的事件触发预测控制器的设计方法. 动态ETM可以有效节约有限的通信资源并保持一定的控制性能, 并且设计的事件触发预测控制器可以预测两次成功传输之间的系统状态. 通过选择Lyapunov函数和一些不等式, 可以得到一些充分条件来保证闭环系统是渐近稳定的, 而且可以获得控制器的清晰表达. 最后, 通过数值模拟来说明设计方法的有效性. 本文不考虑网络时延, 未来的工作将研究具

有网络诱导时延的NCSs的稳定性. 此外, 还有更多实际因素需要考虑, 例如物理设备的故障以及网络信号的量化等. 这些都是本文未来的研究方向.

参考文献:

- [1] ZHANG X M, HAN Q L. Networked control systems: a survey of trends and techniques. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2020, 7(1): 1 – 17.
- [2] ZHANG X M, HAN Q L. Survey on recent advances in networked control systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, 12(5): 1740 – 1752.
- [3] LAI Shaoyu, CHEN Bo, YU Li. Switching-Luenberger-observer-based redundant control under DoS attacks. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(4): 758 – 766.
(赖绍禹, 陈博, 俞立. DoS攻击下基于切换Luenberger观测器的冗余控制. 控制理论与应用, 2020, 37(4): 758 – 766.)
- [4] LI Chaochao, HAN Chunyan, HE Fang. Receding horizon estimation for networked control systems with random transmission delays. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(5): 1118 – 1126.
(李超超, 韩春艳, 何芳. 随机时滞网络控制系统的后退时域估计. 控制理论与应用, 2020, 37(5): 1118 – 1126.)
- [5] ZHAO Yunbo, YUAN Zheng, ZHU Chuang. Power-aware event triggering for wireless networked control systems and its closed-loop stability. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(4): 881 – 887.
(赵云波, 袁征, 朱创. 无线网络化控制系统的功率感知事件触发策略及其闭环稳定性. 控制理论与应用, 2020, 37(4): 881 – 887.)
- [6] TANG Xiaoming, DENG Li, YU Jimin, et al. Output feedback model predictive control for interval type-2 T-S fuzzy networked control systems. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(3): 604 – 616.
(唐晓铭, 邓梨, 虞继敏, 等. 基于区间二型T-S模糊模型的网络控制系统的输出反馈预测控制. 自动化学报, 2019, 45(3): 604 – 616.)
- [7] LIU D, YANG G J, ER M J. Event-triggered control for T-S fuzzy systems under asynchronous network communications. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2020, 28(2): 390 – 399.
- [8] LECHAPPE V, MOULAY E, PLESTAN F, et al. Discrete predictor-based event-triggered control of networked control systems. *Automatica*, 2019, 107: 281 – 288.
- [9] WU X H, MU X W. Event-triggered control for networked nonlinear semi-Markovian jump systems with randomly occurring uncertainties and transmission delay. *Information Sciences*, 2019, 487: 84 – 96.
- [10] NING Z K, YU J Y, PAN Y N, et al. Adaptive event-triggered fault detection for fuzzy stochastic systems with missing measurements. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2018, 26(6): 2201 – 2212.
- [11] ZHANG L C, LIANG H J, SUN Y H, et al. Adaptive event-triggered fault detection scheme for semi-Markovian jump systems with output quantization. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, DOI: 10.1109/TSMC.2019.2912846.
- [12] CHEN M, SUN J, KARIMI H R. Input-output finite-time generalized dissipative filter of discrete time-varying systems with quantization and adaptive event-triggered mechanism. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2020, 50(12): 5061 – 5073.
- [13] GE X H, HAN Q L, WANG Z D. A dynamic event-triggered transmission scheme for distributed set-membership estimation over wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2019, 49(1): 171 – 183.
- [14] GUO X G, FAN X, AHN C K. Adaptive event-triggered fault detection for interval type-2 T-S fuzzy systems with sensor saturation. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2020, DOI: 10.1109/TFUZZ.2020.2997515.
- [15] ZHANG Z N, SU S F, NIU Y G. Dynamic event-triggered control for interval type-2 fuzzy systems under fading channel. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2021, 110: 53 – 62.
- [16] PENG C, WU M, XIE X P, et al. Event-triggered predictive control for networked nonlinear systems with imperfect premise matching. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2018, 26(5): 2797 – 2806.
- [17] DENG Y R, YIN X X, HU S L. Event-triggered predictive control for networked control systems with DoS attacks. *Information Sciences*, 2021, 542: 71 – 91.
- [18] WANG X, PARK J H, YANG H L, et al. An improved fuzzy event-triggered asynchronous dissipative control to T-S FMJSs with non-periodic sampled data. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2020, DOI: 10.1109/TFUZZ.2020.3009735.
- [19] MA H, LI H Y, LIANG H J, et al. Adaptive fuzzy event-triggered control for stochastic nonlinear systems with full state constraints and actuator faults. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2019, 27(11): 1063 – 6706.
- [20] ASLAM M S, CHEN Z R. Observer-based dissipative output feedback control for network T-S fuzzy systems under time delays with mismatch premise. *Nonlinear Dynamics*, 2019, 95(4): 2923 – 2941.
- [21] ZHAO T, ZHANG K P, DIAN S Y. Security control of interval type-2 fuzzy system with two-terminal deception attacks under premise mismatch. *Nonlinear Dynamics*, 2020, 102(1): 431 – 453.
- [22] JIANG B P, KARIMI H R, KAO Y G, et al. Takagi-Sugeno model based event-triggered fuzzy sliding-mode control of networked control systems with semi-markovian switchings. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2020, 28(4): 673 – 683.
- [23] PENG C, YUE D, FEI M. Relaxed stability and stabilization conditions of networked fuzzy control systems subject to asynchronous grades of membership. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2014, 22(5): 1101 – 1112.
- [24] CAO Y Y, LIN Z L. Robust stability analysis and fuzzy-scheduling control for nonlinear systems subject to actuator saturation. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2003, 11(1): 57 – 67.

作者简介:

周靖峰 硕士研究生, 目前研究方向为事件触发控制, E-mail: zhoujingfengjn@163.com;

胡满峰 教授, 硕士生导师, 目前研究方向为神经网络动力学、复杂网络同步、多智能体一致性等, E-mail: humanfeng@jiangnan.edu.cn.