

DOI: 10.3969/j.issn.2096-8248.2025.04.010

引用格式: 杨慧, 李新蕊, 谭玉顺. 异步 WTOD 协议下奇异摄动系统的非脆弱安全控制 [J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2025, 34(4): 89-99.

异步 WTOD 协议下奇异摄动系统的非脆弱安全控制

杨 慧, 李新蕊, 谭玉顺

(南京财经大学 应用数学学院, 江苏 南京 210023)

摘 要: 研究通信协议和网络遭受欺骗攻击下基于观测器的 IT-2 (interval type-2) 模糊奇异摄动系统的非脆弱安全控制问题。为了优化网络通信资源和降低网络传输负担, 设计了一种异步 WTOD (weighted try once-discard) 传输协议, 分别对快变和慢变子系统的传输数据进行调度。针对网络遭受攻击的威胁, 构建异步 WTOD 协议和欺骗攻击下网络化奇异摄动控制系统的综合框架。首先根据系统的测量输出设计状态观测器, 并根据其估计状态设计具有鲁棒性的非脆弱安全控制策略。所提出的控制方法同时考虑到快变、慢变子系统的时间尺度和网络攻击的影响, 在参数不确定情况下实现目标控制。然后结合李雅普诺夫稳定性理论和线性矩阵不等式技术, 推导控制系统稳定的充分性条件, 并获得控制器和观测器参数的算法。最后的数值仿真实验表明, 控制输入偏差被有效抑制, 从而验证了该设计算法的有效性。

关键词: 奇异摄动系统; WTOD 协议; 欺骗攻击; 非脆弱安全控制

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 2096-8248 (2025) 04-0089-11

Non-fragile security control for singularly perturbed system under asynchronous WTOD protocol

YANG Hui, LI Xinrui, TAN Yushun

(School of Applied Mathematics, Nanjing University of Finance, Nanjing 210023, China)

Abstract: This paper investigates the observer-based non-fragile security control problem for interval type-2 fuzzy singularly perturbed system under deception attacks and communication protocols. In order to optimize network communication resources and reduce network transmission burden, an asynchronous weighted try once-discard (WTOD) transmission protocol was designed to schedule data for both fast and slow subsystems separately. Firstly, a state observer was designed based on the measurement output of the system, and a robust non-fragile security control strategy was designed based on the estimated state. The proposed control method taking into account the time scale of both fast and slow subsystems and the impact of network attacks, achieved control objectives in the presence of parameter uncertainty. Then, combining Lyapunov stability theory and linear matrix inequality techniques, sufficient conditions for the stability of the control system were derived, and algorithms for controller and observer parameters were obtained. Finally, a numerical simulation example showed that the control input deviation was effectively suppressed, and verified the effectiveness of the designed algorithm.

收稿日期: 2025-10-08; 修订日期: 2025-11-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (62441310)

作者简介: 杨慧, 硕士研究生, 研究方向为网络控制, (E-mail) 1431696473@qq.com。

通信作者: 谭玉顺, 教授, 博士, 研究方向为网络控制, (E-mail) tyshun994@163.com。

Key words: singularly perturbed system; WTOD protocols; deception attacks; non-fragile security control

0 引言

许多实际电力系统通常在动力学中表现出不同的响应速度和不同的时间尺度。如果在系统建模时忽略了微小寄生参数,且控制器的设计采用了相同的时间尺度,那么快变与慢变之间的相互作用通常会导致系统分析和设计中的高维性和病态数值问题。为了避免这些问题,在系统建模时考虑寄生参数,提出具有双时间尺度特性的奇异摄动系统,其动态行为可以分为快变动力学和慢变动力学^[1],在系统模型中包含一个正奇异摄动参数 ε ,以描述快变和慢变子系统之间的差异。另外,由于 T-S (Tagaki-Sugeno) 模糊和区间二型 (interval type-2, IT-2) T-S 模糊模型可以实现非线性系统的精确逼近,因而 T-S 模糊方法成为非线性系统建模的一个重要工具,其中模糊奇异摄动系统因其能够有效处理系统中的非线性、参数不确定性和多时间尺度特性,受到了广泛关注^[2-6]。

随着网络控制技术的发展,大多数工业系统的信息传输都是通过网络进行的,因此,对于网络化控制系统的采样数据设计问题变得尤为重要。不同于传统采样机制以时间驱动,事件触发的采样机制被提出,该机制的核心在于打破传统时间触发机制的固定周期模式,转而基于系统状态变化来决定何时执行数据传输和更新操作。无线通信网络的发展促进了独立系统组件之间的信息交换,而高频数据传输需要更多的通信和计算资源。为了节省有限的网络带宽,近年来对事件触发方案和数据调度协议的研究引起了广泛关注^[7-11]。例如,文献[10]针对具有时滞的离散时间系统设计了两种与状态相关的事件触发非周期间歇控制方案,借助阈值及检测周期指标推导出指数稳定性判据。文献[11]为基于观测器的多智能体系统提供了一种鲁棒的采样数据 H_∞ 一致性控制策略,通过控制作用实现多智能体系统在无噪声时闭环稳定,存在噪声干扰时控制输出的一致性误差不超过预期的范围。但在实际工程环境中,传感器和控制器之间的数据传输往往受到通信带宽和网络攻击的影响。数据发生冲突或者被破坏是常见的问题,这可能导致系统性能下降甚至不稳定。为了解决这一问题,研究者们近年来

提出了多种通信调度协议,如 WTOD 协议^[12]、轮询协议^[13-14]以及 DE-WTOD 协议(dynamic event driven-based WTOD)等。文献[15]针对递归滤波问题,在多传感器网络中利用 WTOD 协议节约网络资源。这些协议通过合理调度传感器和控制器之间的数据通信,有效减少了通信资源的浪费,同时提高了系统的鲁棒性。以上方法尽管在优化网络通信资源方面起到了积极的作用,但是对于具有多时间尺度特性的奇异摄动系统在统一协调调度方面仍存在一定的局限性。因此,本文引入一种异步 WTOD 协议以对奇异摄动系统中快变和慢变动力学不同尺度造成的资源浪费问题进行统一优化调度。

除通信受限外,由于通信网络的开放性,网络化系统容易遭受外部攻击的威胁,信息的完整性、保密性和可用性都受到了不同程度的威胁,导致事故频发。在实际的工业网络化系统中,通过替换实际信号或注入错误信息来恶意干扰系统稳定性的欺骗(或虚假数据注入)攻击和阻断信息传输的拒绝服务攻击都是典型且极其危险的网络安全攻击,近年来引起了广泛关注^[16-18]。若忽略网络安全攻击对控制系统中网络的影响,控制信号可能发生偏离,进而使系统变得不再稳定。在现有研究中一般假设攻击行为的特征符合 Bernoulli 分布的随机变量^[19-20]。在此基础上,考虑欺骗攻击和异步 WTOD 协议的模糊奇异摄动系统的控制算法和性能分析还有待更进一步的研究。

此外,非脆弱控制是近年来控制理论中的一个重要研究方向^[21]。现有的相关结果大多数都是基于理想情况,然而,受到不可避免的不确定干扰影响的观测器性能可能降低^[22]。确切地说,在大多数实际场景中,探索有效的非脆弱控制策略具有突出意义。对于模糊奇异摄动系统,非脆弱安全控制不仅需要考虑到系统的非线性和多时间尺度特性,还需要应对通信约束带来的挑战。通过设计非脆弱安全控制算法,可以在有限通信资源下实现系统的高效控制,同时提高系统的抗干扰能力和鲁棒性。近年来,尽管在模糊奇异摄动系统的控制设计方面已经取得了一些成果,但其在通信约束与网络攻击耦合作用下的安全控制仍面临诸多挑战。如何在通信约束下实现系统的安全高效控制是一个亟待解决的问题。此外,如何设计非脆弱安全控制器以应对系统中的

各种不确定性,也是当前研究的重点。

本文针对具有外部干扰的 IT-2 模糊奇异摄动系统的网络化系统的安全控制问题,构建异步 WTOD 协议和欺骗攻击的综合分析模型并设计相应的安全控制策略,主要贡献如下。

(1) 针对 IT-2 模糊奇异摄动系统中快变、慢变动力学子系统对网络资源需求的差异化,提出面向多时间尺度特性的异步 WTOD 调度协议。该协议实现网络资源的差异化分配,有效解决了传统调度协议难以兼顾快慢子系统、造成资源浪费或传输滞后的问题,明显降低了多时间尺度网络化系统的传输负担。

(2) 区别于现有仅单一考虑攻击或控制器不确定性的研究,创新性地非脆弱控制思想与观测器设计相结合,构建基于观测器的非脆弱安全控制模型。该模型一方面通过观测器实时感知系统状态,抑制欺骗攻击注入的虚假数据对控制决策的干扰;另一方面引入非脆弱控制策略以应对控制器不可避免的不确定干扰,提升控制算法在不确定性影响下的鲁棒性。

(3) 采用 IT-2 模糊奇异摄动系统能有效地处理系统中的非线性、参数不确定性和多时间尺度特性,实现线性系统的精确逼近。考虑到通讯受限和欺骗攻击的影响,构建异步 WTOD 协议和欺骗攻击的综合分析模型并设计相应的安全控制策略,研究具有外部干扰的 IT-2 模糊奇异摄动系统的网络化系统的安全控制问题。

综上,本文针对具有外部干扰的 IT-2 模糊奇异摄动系统的网络化系统的安全控制问题,首先,通过构建异步 WTOD 协议优化网络资源分配,降低网络传输负担。其次,针对网络化系统可能遭受的欺骗攻击,构建具有欺骗数据注入攻击下的基于观测器的非脆弱安全控制模型,确保系统在攻击下仍能保持渐近稳定。再次,利用 Lyapunov 稳定性理论和线性矩阵不等式方法,推导出系统稳定并满足预设性能指标的充分条件,并给出控制器和观测器的设计方法,总体流程如图 1 所示。最后,进行仿真实例。



图 1 总体流程图

Fig. 1 General flow diagram

1 奇异摄动系统分析与模型建立

1.1 问题描述

考虑如下一类受到外部干扰的 IT-2 模糊奇异摄动系统。

系统规则 i : 如果 $\sigma_1(x(l))$ 是 F_{i1} , $\sigma_2(x(l))$ 是 F_{i2} , \dots , $\sigma_p(x(l))$ 是 F_{ir} , 那么

$$\begin{cases} x(l+1) = A_i E_c x(l) + B_i u(l) + D_i \omega(l), \\ z(l) = M_i x(l), \quad i=1, 2, \dots, r. \end{cases} \quad (1)$$

其中, $x(l) = [x_s^T(l) \quad x_f^T(l)]^T$, $x_s(l) \in \mathcal{R}^{n_s}$ 和 $x_f(l) \in \mathcal{R}^{n_f}$ ($n_s + n_f = n_x$) 分别表示快变子系统和慢变子系统的状态。 $u(l) \in \mathcal{R}^{n_u}$, $\omega(l) \in \mathcal{R}^{n_\omega}$ 和 $z(l) \in \mathcal{R}^{n_z}$ 分别表示控制输入、外部扰动输入和控制输出向量,且外部扰动满足: $\omega(l) \in L_2[0, \infty)$ 。 $E_c = \text{diag}\{I_{n_s}, \varepsilon I_{n_f}\}$ 代表奇异摄动参数, $0 < \varepsilon \ll 1$, 其中 ε 的上界为 $\bar{\varepsilon}_0$ 。 $\sigma_j(x(l))$ ($j=1, 2, \dots, p$) 是前件变量, F_{ij} ($i=1, 2, \dots, r$) 代表模糊集, p 和 r 是前件变量和奇异摄动系统规则的数量。 A_i , B_i , D_i 和 M_i 是具有合适维数的矩阵并表示为

$$A_i = \begin{bmatrix} A_{i11} & A_{i12} \\ A_{i21} & A_{i22} \end{bmatrix}, \quad B_i = \begin{bmatrix} B_{i1} \\ B_{i2} \end{bmatrix}, \\ D_i = \begin{bmatrix} D_{i1} \\ D_{i2} \end{bmatrix}, \quad M_i = [M_i^1 \quad M_i^2].$$

第 i 条系统状态的触发强度表示为

$$S_i = [\underline{\phi}_i(x(l)), \overline{\phi}_i(x(l))], \quad (2)$$

其中,

$$\begin{aligned} \underline{\phi}_i(x(l)) &= \prod_{j=1}^p \beta_{F_{ij}}(\sigma_j(x(l))) > 0, \\ \overline{\phi}_i(x(l)) &= \prod_{j=1}^p \bar{\beta}_{F_{ij}}(\sigma_j(x(l))) > 0, \\ 0 &\leq \underline{\phi}_i(x(l)) \leq \overline{\phi}_i(x(l)) \leq 1. \end{aligned}$$

全局 IT-2 模糊奇异摄动系统模型可以表示为

$$\begin{cases} x(l+1) = \sum_{i=1}^r \phi_i(x(l)) [A_i E_c x(l) + B_i u(l) + D_i \omega(l)], \\ z(l) = \sum_{i=1}^r \phi_i(x(l)) M_i x(l), \quad i=1, 2, \dots, r. \end{cases} \quad (3)$$

其中,

$$\begin{aligned} \phi_i(x(l)) &= \frac{\hat{\phi}_i(x(l))}{\sum_{i=1}^r \hat{\phi}_i(x(l))}, \\ \hat{\phi}_i(x(l)) &= \underline{\phi}_i(x(l)) \underline{v}_i(x(l)) + \overline{\phi}_i(x(l)) \overline{v}_i(x(l)), \end{aligned}$$

$$\sum_{i=1}^r \phi_i(x(l))=1, \quad \underline{v}_i(x(l)) + \overline{v}_i(x(l))=1.$$

这里 $\underline{v}_i(x(l)) \in [0, 1]$ 和 $\overline{v}_i(x(l)) \in [0, 1]$ 表示模糊奇异摄动系统模型中的非线性加权系数, 用来表示参数的不确定性。

为了便于后续推导和证明, 给出以下假设、定义和引理。

假设 1^[23] 系统(1)矩阵 B_i 是列满秩矩阵, $B_i^{-1} = (B_i^T B_i)^{-1} B_i^T$ 为矩阵 B_i 的左逆。

引理 1^[24] 对给定的对称矩阵 $S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}$, 其中, S_{11} 是 $r \times r$ 维的。以下 3 个条件是等价的:

- (1) $S < 0$;
- (2) $S_{11} < 0, S_{22} - S_{12}^T S_{11}^{-1} S_{12} < 0$;
- (3) $S_{22} < 0, S_{11} - S_{12}^T S_{22}^{-1} S_{12} < 0$ 。

引理 2^[25] 给定具有相容维数的对称矩阵 H_1, H_2 和正标量 $\bar{\varepsilon}$ 。如果 $H_1 < 0$ 且 $H_1 + \bar{\varepsilon} H_2 < 0$, 那么有以下不等式成立:

$$H_1 + \varepsilon H_2 < 0, \quad \forall \varepsilon \in (0, \bar{\varepsilon}]。$$

引理 3^[26] 设 $E = E^T$, E_1 和 E_2 是给定的适当维数的矩阵, 对于满足 $H^T H \leq I$ 的所有 H , 存在以下不等式:

$$E + E_1 H E_2 + (E_1 H E_2)^T < 0。$$

当且仅当存在一个标量 $\kappa > 0$, 使得下列不等式成立:

$$E + \kappa E_1 E_1^T + \kappa^{-1} E_2^T E_2 < 0。$$

定义 1^[4] 如果增广闭环模糊奇异摄动系统是渐近稳定的, 则该系统被称为具有 H_∞ 衰减水平 γ 的渐近稳定, 在初始条件 $\xi(0) = 0$ 下, 如果以下不等式成立:

$$\sum_{l=0}^{\infty} \|z(l)\|^2 \leq \gamma^2 \sum_{l=0}^{\infty} \|\omega(l)\|^2。$$

1.2 异步 WTOD 协议设计与欺骗攻击

模糊奇异摄动系统通过共享网络将传感器的慢变和快变动力学信息发送到控制器。本节通过设计一种异步 WTOD 协议来缓解数据冲突, 通过该协议, 慢变和快变传感器信号被分别调度并传输到慢变和快变的控制器。

接下来, 给出异步 WTOD 协议的具体设计过程如下。假设慢变和快变传感器分别被分成 n_s 和 n_f 个节点。令 $T_1 = \{1, 2, \dots, n_s\}$ 和 $T_2 = \{1, 2, \dots, n_f\}$ 分别表示在时刻 l 通过异步 WTOD 协议获得对共享网络访问的所选慢变和快变传感器节点。然后, $\varphi_s(l)$ 和

$\varphi_f(l)$ 可以根据以下选择原则来确定:

$$\varphi_s(l) = \arg \max_{1 < i < n_s} (x_{si}(l) - \bar{x}_{si}(l-1))^T A_{1i} (x_{si}(l) - \bar{x}_{si}(l-1)), \quad (4)$$

$$\varphi_f(l) = \arg \max_{1 < j < n_f} (x_{fj}(l) - \bar{x}_{fj}(l-1))^T A_{2j} (x_{fj}(l) - \bar{x}_{fj}(l-1)). \quad (5)$$

其中, x_{si} ($i \in T_1$) 代表第 i 个慢变传感器节点的传输信号; x_{fj} ($j \in T_2$) 代表第 j 个快变传感器节点的传输信号。 \bar{x}_{si} 和 \bar{x}_{fj} 分别表示通过遭受欺骗攻击的网络后获得的实际数据。 A_{1i} 和 A_{2j} 是对应的加权矩阵。此外, 如果慢变或快变传感器中两个或多个节点之间的最大差异相同, 则随机选择一个。为了方便展示和推导, 下文分别记 $t = \varphi_s(l)$ 和 $n = \varphi_f(l)$ 表示通过异步 WTOD 协议选择的节点。

在传感器节点通过通信网络与控制器连接进行信号传输的过程中, 这些信号可能因通信网络的开放性受到攻击者随机发起的蓄意破坏。假定该共享网络遭受网络攻击。攻击者企图在数据传输过程中, 通过伪造或篡改数据破坏系统的正常运行。该欺骗攻击行为描述如下:

$$\bar{x}_{st}(l) = \begin{cases} x_{st}(l) + \alpha(l) q_s(l), & \text{if } t = \varphi_s(l), \\ 0, & \text{otherwise;} \end{cases} \quad (6)$$

$$\bar{x}_{fn}(l) = \begin{cases} x_{fn}(l) + \alpha(l) q_f(l), & \text{if } n = \varphi_f(l), \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (7)$$

其中, $q_s(l) = x_{st}(l) + \mu_s(l)$, $q_f(l) = x_{fn}(l) + \mu_f(l)$, $\mu_s(l)$ 和 $\mu_f(l)$ 是攻击者注入的虚假数据。 $\alpha(\cdot) \in \{0, 1\}$ 表示是否发生了欺骗攻击的随机变量, 且符合 Bernoulli 分布。假设对攻击能量采用以下的限制条件^[19]:

$$\mu^T(l) \mu(l) \leq x^T(l) V^T V x(l), \quad (8)$$

其中, $\mu(l) = [\mu_s^T \quad \mu_f^T]^T$, V 是适当维度的已知正定矩阵。

注 1: 本文考虑的欺骗攻击发生概率是一个统计值, 可以通过长期监测和评估来确定。攻击行为的特征是符合 Bernoulli 分布的随机变量, 在现有研究中均采用了相同的假设^[19-20]。在此基础上, 本文将分析欺骗攻击对异步 WTOD 协议及模糊奇异摄动系统性能的影响。

引入 Kronecker 符号函数 $\delta(\cdot)$, 结合公式(6)~(8)和网络攻击特征, 可以得到实际的慢变信号和快变信号的紧凑形式为

$$\bar{x}_s(l) = (1-\alpha(l)) \Phi_s x_s(l) + \alpha(l) \Phi_s E_x \mu_s(l), \quad (9)$$

$$\bar{x}_f(l) = (1-\alpha(l)) \Phi_n x_f(l) + \alpha(l) \Phi_n E_x \mu_f(l). \quad (10)$$

其中,

$$\Phi_f = \text{diag} \{ \delta(1-t), \delta(2-t), \dots, \delta(n_x-t) \},$$

$$\Phi_n = \text{diag} \{ \delta(1-n), \delta(2-n), \dots, \delta(n_f-n) \}.$$

定义 $\bar{x}(l) = [\bar{x}_s^T(l) \ \bar{x}_f^T(l)]^T$ 能够得到

$$\bar{x}(l) = (1-\alpha(l)) \bar{\Phi}_{tn} x(l) + \alpha(l) \bar{\Phi}_{tn} \bar{E}_x \mu(l). \quad (11)$$

其中,

$$\bar{\Phi}_{tn} = \text{diag} \{ \Phi_f, \Phi_n \}, \quad \bar{E}_x = \text{diag} \{ E_x, E_x \}.$$

注 2: 应该指出的是轮询协议可以以周期性的方式调度节点, 从而强调传输的公平性^[14]。随机通信协议作为一种随机选择调度节点的协议, 由随机概率控制, 可以根据不同任务的重要性合理地预定义^[5]。但 WTOD 协议的调度标准符合按需传输, 即根据给定的权重矩阵和当前时刻与前一个传输时刻之间的差来选择最需要传输的节点。特别是 WTOD 协议中通信节点的网络访问权限分配是通过“竞争”原则实现的, 这反映了“按需分配”的思想。

1.3 观测器和非脆弱控制器模型

基于上述异步 WTOD 协议, 可以设计具有 r 个模糊规则的观测器并根据实际信号给出非脆弱观测器的结构。

观测器规则 j : 如果 $\sigma_1(\hat{x}(l))$ 是 F_{i1} , $\sigma_2(\hat{x}(l))$ 是 F_{i2} , \dots , $\sigma_p(\hat{x}(l))$ 是 F_{ip} , 那么

$$\hat{x}(l+1) = A_j E_c \hat{x}(l) + B_j u(l) + L_{jtn} (\bar{x}(l) - \hat{x}(l)). \quad (12)$$

其中, $j=1, 2, \dots, r$, $\hat{x}(l) = [\hat{x}_s^T(l) \ \hat{x}_f^T(l)]^T$ 代表被估计的系统状态, L_{jtn} 为待确定的观测器增益。

于是, 模糊观测器的全局动态向量则可以推导如下:

$$\hat{x}(l+1) = \sum_{i=1}^r \Phi_i(\hat{x}(l)) \cdot$$

$$[A_j E_c \hat{x}(l) + B_j u(l) + L_{jtn} (\bar{x}(l) - \hat{x}(l))]. \quad (13)$$

利用观测状态, 受文献[21]的启发, 设计如下结构的非脆弱控制器。

控制器规则 h : 如果 $g_1(\hat{x}(l))$ 是 G_{h1} , $g^2(\hat{x}(l))$ 是 G_{h2} , \dots , $g_p(\hat{x}(l))$ 是 G_{hr} , 那么

$$u(l) = (K_{htn} + \Delta K_h) \hat{x}(l). \quad (14)$$

其中, $K_{htn} = [K_{ht}^T \ K_{hn}^T]^T$ 是待设计的增益矩阵, $\Delta K_h = F_h H(l) N$ 是控制器中发生的扰动, 满足条件 $H^T(l) H(l) \leq I$ 。于是, 模糊非脆弱控制器能够被表示为

$$u(l) = \sum_{h=1}^r \mathcal{G}_h(\hat{x}(l)) [(K_{htn} + \Delta K_h) \hat{x}(l)]. \quad (15)$$

定义观测器误差为 $e(l) = x(l) - \hat{x}(l)$, 从而计算可以得到:

$$x(l+1) = \sum_{i=1}^r \sum_{h=1}^r \phi_i(x(l)) \mathcal{G}_h(\hat{x}(l)) [A_j E_c e(l) + D_i \omega(l) + (A_i E_c + B_i (K_{htn} + \Delta K_h)) \hat{x}(l)], \quad (16)$$

$$\hat{x}(l+1) =$$

$$\sum_{l=1}^r \sum_{h=1}^r \phi_j(\hat{x}(l)) \mathcal{G}_h(\hat{x}(l)) [(1-\alpha(l)) L_{jtn} \bar{\Phi}_{tn} e(l) + (A_j E_c - L_{jtn} + B_i (K_{htn} + \Delta K_h) + (1-\alpha(l)) L_{jtn} \bar{\Phi}_{tn}) \hat{x}(l) + \alpha(l) L_{jtn} \bar{\Phi}_{tn} \bar{E}_x \mu(l)], \quad (17)$$

$$e(l+1) =$$

$$\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{h=1}^r \phi_i(x(l)) \phi_j(\hat{x}(l)) \mathcal{G}_h(\hat{x}(l)) [D_i \omega(l) + (A_i E_c - (1-\alpha(l)) L_{jtn} \bar{\Phi}_{tn}) e(l) + (A_i E_c - A_j E_c) + (B_i - B_j) (K_{htn} + \Delta K_h) + L_{jtn} - (1-\alpha(l)) L_{jtn} \bar{\Phi}_{tn}) \hat{x}(l) - \alpha(l) L_{jtn} \bar{\Phi}_{tn} \bar{E}_x \mu(l)], \quad (18)$$

$$z(l) = \sum_{i=1}^r \phi_i(x(l)) [M_i e(l) + M_i \hat{x}(l)]. \quad (19)$$

令 $\xi(l) = [\hat{x}^T(l) \ e^T(l)]^T$, 则联立式(16)~(19), 可得如下闭环系统的紧凑形式:

$$\xi(l+1) =$$

$$\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{h=1}^r \phi_i(x(l)) \phi_j(\hat{x}(l)) \mathcal{G}_h(\hat{x}(l)) [(A_{ijhtnc}^1 + A_{jtn}^2) \xi(l) + \bar{D}_i \omega(l) + (E_{jtn}^1 + E_{jtn}^2) \mu(l)]. \quad (20)$$

其中,

$$A_{ijhtnc}^1 = \begin{bmatrix} \Gamma_{1jhtnc} & (1-\bar{\alpha}) L_{jtn} \bar{\Phi}_{tn} \\ \Gamma_{2jhtnc} & A_i E_c - (1-\bar{\alpha}) L_{jtn} \bar{\Phi}_{tn} \end{bmatrix},$$

$$\bar{D}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ D_i \end{bmatrix}, \quad E_{jtn}^1 = \begin{bmatrix} \bar{\alpha} L_{jtn} \bar{\Phi}_{tn} \bar{E}_x \\ -\bar{\alpha} L_{jtn} \bar{\Phi}_{tn} \bar{E}_x \end{bmatrix},$$

$$A_{jtn}^2 = \begin{bmatrix} -(\alpha(l) - \bar{\alpha}) L_{jtn} \bar{\Phi}_{tn} & -(\alpha(l) - \bar{\alpha}) L_{jtn} \bar{\Phi}_{tn} \\ (\alpha(l) - \bar{\alpha}) L_{jtn} \bar{\Phi}_{tn} & (\alpha(l) - \bar{\alpha}) L_{jtn} \bar{\Phi}_{tn} \end{bmatrix},$$

$$E_{jtn}^2 = \begin{bmatrix} (\alpha(l) - \bar{\alpha}) L_{jtn} \bar{\Phi}_{tn} \bar{E}_x \\ -(\alpha(l) - \bar{\alpha}) L_{jtn} \bar{\Phi}_{tn} \bar{E}_x \end{bmatrix},$$

$$\Gamma_{1jhtnc} = A_j E_c + B_j (K_{htn} + \Delta K_h) - L_{jtn} + (1-\bar{\alpha}) L_{jtn} \bar{\Phi}_{tn},$$

$$\Gamma_{2jhtnc} = (A_i - A_j) E_c + (B_i - B_j) (K_{htn} + \Delta K_h) +$$

$$L_{jtn} - (1-\alpha(l)) L_{jtn} \bar{\Phi}_{tn}.$$

注3: 本文设计的观测器(13)和控制器(15)通过为不同通信节点分配不同的增益,使其能够根据实时通信调度动态调整控制策略。在异步WTOD协议下,不同传感器节点被选中的概率不同,通过调度节点序列区分对应的增益矩阵,可以针对高优先级节点的数据传输优化控制响应,从而提升系统性能。异步WTOD协议中快变传感器与慢变传感器节点分别调度,通过下标分别设计对应的增益,实现资源分配与动态特性的解耦,避免因统一增益导致的性能折衷。具体来说,当异步WTOD选取的节点为*i*和*j*时,启用对应的增益 L_{jij} 和 K_{hij} ,相比文献[5-6]中采用的单一控制增益或同步WTOD协议更具优势。

2 主要结果

本节将针对模糊奇异摄动系统的稳定性与性能展开理论分析。考虑到网络攻击与通信协议的双重影响,结合Lyapunov稳定性理论、随机过程分析及线性矩阵不等式技术,推导闭环系统(20)在攻击环境下渐近稳定并满足预设性能的充分条件,并给出观测器与控制器增益。

2.1 稳定性分析

定理1 考虑模糊闭环系统(20),对于 $\varepsilon>0$,标量 $\bar{\alpha}\in[0,1]$ 和 $\gamma>0$,给定矩阵 K_{htn} 和 L_{jtn} ,如果存在适当维度的矩阵 $P_\varepsilon>0$,使得下列不等式成立:

$$\Omega_{ijhtn\varepsilon} = \begin{bmatrix} \Psi_{1ijhtn\varepsilon} & (A_{ijhtn\varepsilon}^1)^T P_\varepsilon \bar{D}_i & \Psi_{3ijhtn\varepsilon} \\ (*) & -\gamma^2 I_\omega + \bar{D}_i^T P_\varepsilon \bar{D}_i & \bar{D}_i^T P_\varepsilon E_{jtn}^1 \\ (*) & (*) & \Psi_{6jtn\varepsilon} \end{bmatrix} < 0, \quad (21)$$

则具有异步WTOD协议的模糊系统能够实现渐近稳定并达到 H_∞ 性能指标,其中,

$$\Phi_{1ijhtn\varepsilon} = -P_\varepsilon + \bar{M}_i^T \bar{M}_i + V^T V + (A_{ijhtn\varepsilon}^1)^T P_\varepsilon A_{ijhtn\varepsilon}^1 + \bar{\alpha} (\bar{A}_{jtn}^2)^T P_\varepsilon \bar{A}_{jtn}^2,$$

$$\Psi_{3ijhtn\varepsilon} = (A_{ijhtn\varepsilon}^1)^T P_\varepsilon E_{jtn}^1 + \bar{\alpha} (\bar{A}_{jtn}^2)^T P_\varepsilon \bar{E}_{jtn}^2,$$

$$\Phi_{6jtn\varepsilon} = -I_\mu + (E_{jtn}^1)^T P_\varepsilon E_{jtn}^1 + \bar{\alpha} (\bar{E}_{jtn}^2)^T P_\varepsilon \bar{E}_{jtn}^2,$$

$$\bar{\alpha} = \bar{\alpha} - \bar{\alpha}^2, \quad \bar{M}_i = \text{diag}\{M_i, M_i\},$$

$$\bar{A}_{jtn}^2 = \begin{bmatrix} -L_{jtn} \bar{\Phi}_{tn} & -L_{jtn} \bar{\Phi}_{tn} \\ L_{jtn} \bar{\Phi}_{tn} & L_{jtn} \bar{\Phi}_{tn} \end{bmatrix}, \quad \bar{E}_{jtn}^2 = \begin{bmatrix} L_{jtn} \bar{\Phi}_{tn} \\ -L_{jtn} \bar{\Phi}_{tn} \end{bmatrix}.$$

证明 通过条件 $\mu_s^T(l) \mu_s(l) \leq x_s^T(l) V^T V x_s(l)$ 和 $\mu_f^T(l) \mu_f(l) \leq x_f^T(l) V^T V x_f(l)$,能够得到

$$\mu^T(l) \mu(l) \leq x^T(l) \bar{V}^T \bar{V} x(l). \quad (22)$$

构建如下的Lyapunov函数:

$$V(l) = \xi^T(l) P_\varepsilon \xi(l). \quad (23)$$

定义 $\eta(l) = [\xi^T(l) \quad \omega^T(l) \quad \mu^T(l)]^T$,对式(23)求差分 and 期望可以推导出

$$\begin{aligned} E\{\Delta V(l)\} &= E\{\xi^T(l+1) P_\varepsilon \xi(l+1) - \xi^T(l) P_\varepsilon \xi(l)\} \leq \\ E\{ &\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{h=1}^r \phi_i(x(l)) \phi_j(\hat{x}(l)) \mathcal{G}_h(\hat{x}(l)) \cdot \\ &[(A_{ijhtn\varepsilon}^1 + A_{jtn}^2) \xi(l) + \bar{D}_i \omega(l) + \\ &(E_{jtn}^1 + E_{jtn}^2) \mu(l)]^T P_\varepsilon [(A_{ijhtn\varepsilon}^1 + A_{jtn}^2) \xi(l) + \\ &\bar{D}_i \omega(l) + (E_{jtn}^1 + E_{jtn}^2) \mu(l)] - \xi^T(l) P_\varepsilon \xi(l)\} \leq \\ &\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{h=1}^r \phi_i(x(l)) \phi_j(\hat{x}(l)) \mathcal{G}_h(\hat{x}(l)) \{ (A_{ijhtn\varepsilon}^1 \xi(l) + \\ &\bar{D}_i \omega(l) + E_{jtn}^1 \mu(l))^T P_\varepsilon (A_{ijhtn\varepsilon}^1 \xi(l) + \bar{D}_i \omega(l) + \\ &E_{jtn}^1 \mu(l)) - \xi^T(l) P_\varepsilon \xi(l) + E[(A_{jtn}^2 \xi(l) + \\ &E_{jtn}^2 \mu(l))^T P_\varepsilon (A_{jtn}^2 \xi(l) + E_{jtn}^2 \mu(l))] \} \leq \\ &\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{h=1}^r \phi_i(x(l)) \phi_j(\hat{x}(l)) \mathcal{G}_h(\hat{x}(l)) \eta^T(l) \Omega_{ijhtn\varepsilon} \eta(l). \end{aligned} \quad (24)$$

其中,

$$\bar{\Omega}_{ijhtn\varepsilon} = \begin{bmatrix} \Psi_{1ijhtn\varepsilon} & (A_{ijhtn\varepsilon}^1)^T P_\varepsilon \bar{D}_i & \Psi_{3ijhtn\varepsilon} \\ (*) & \bar{D}_i^T P_\varepsilon \bar{D}_i & \bar{D}_i^T P_\varepsilon E_{jtn}^1 \\ (*) & (*) & \bar{\Psi}_{6jtn\varepsilon} \end{bmatrix},$$

$$\bar{\Psi}_{1ijhtn\varepsilon} = (A_{ijhtn\varepsilon}^1)^T P_\varepsilon A_{ijhtn\varepsilon}^1 + \bar{\alpha} (\bar{A}_{jtn}^2)^T P_\varepsilon \bar{A}_{jtn}^2 - P_\varepsilon,$$

$$\bar{\Psi}_{6jtn\varepsilon} = (E_{jtn}^1)^T P_\varepsilon E_{jtn}^1 + \bar{\alpha} (\bar{E}_{jtn}^2)^T P_\varepsilon \bar{E}_{jtn}^2.$$

接着,结合式(22),添加零项 $(z^T(l) z(l) - \gamma^2 \omega^T(l) \omega(l)) - (z^T(l) z(l) - \gamma^2 \omega^T(l) \omega(l))$ 到式(24),得

$$\begin{aligned} E\{\Delta V(l)\} &\leq \\ E\{ &\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{h=1}^r \phi_i(x(l)) \phi_j(\hat{x}(l)) \mathcal{G}_h(\hat{x}(l)) \{ \eta^T(l) \Omega_{ijhtn\varepsilon} \eta(l) + \\ &(x^T(l) \bar{V}^T \bar{V} x(l) - \mu^T(l) \mu(l)) + (z^T(l) z(l) - \\ &\gamma^2 \omega^T(l) \omega(l)) - (z^T(l) z(l) - \gamma^2 \omega^T(l) \omega(l)) \} \} \leq \\ &\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{h=1}^r \phi_i(x(l)) \phi_j(\hat{x}(l)) \mathcal{G}_h(\hat{x}(l)) \{ \eta^T(l) \Omega_{ijhtn\varepsilon} \eta(l) - \\ &(z^T(l) z(l) - \gamma^2 \omega^T(l) \omega(l)) \} \}. \end{aligned} \quad (25)$$

根据 $\bar{\Omega}_{ijhtn\varepsilon} < 0$,可知

$$E\{\Delta V(l) + z^T(l) z(l) - \gamma^2 \omega^T(l) \omega(l)\} < 0. \quad (26)$$

因此,当外部扰动 $\omega(l) = 0$ 时,能够得到 $E\{\Delta V(l)\} < 0$.这证明了闭环模糊奇异摄动系统(20)的渐近稳定性。通过对时刻*l*从0到 ∞ 在公式(26)的两边求和,可以得到

$$E\left\{ \sum_{l=1}^{\infty} \|z(l)\|^2 \right\} \leq \gamma^2 \sum_{l=1}^{\infty} \|\omega(l)\|^2.$$

由此满足 H_∞ 性能指标,并完成了定理1的证明。

2.2 观测器和控制器设计

定理1在给定观测器和控制器增益矩阵的情况

下, 推导出了模糊系统在所设性能水平下实现渐近稳定性的充分条件。接下来, 定理 2 将给出基于观测器的控制器的设计方法。

定理 2 对于给定的标量 $\bar{\alpha} \in [0, 1]$ 和 $\gamma > 0$, 对所有 $\varepsilon \in (0, \bar{\varepsilon}]$ 和预先设定的上界 $\bar{\varepsilon}$, 当且仅当存在正标量 κ , 适当维度的矩阵 \bar{K}_{htn} , \bar{L}_{jtn} , Y 以及具有 $\bar{P} = \text{diag} \{ \bar{P}_1, \bar{P}_2 \}$ 和 $\tilde{P} = \text{diag} \{ \tilde{P}_1, \tilde{P}_2 \}$ 形式的矩阵 \bar{P} 和 \tilde{P} , 使得:

$$\bar{P} > 0, \bar{P} + \varepsilon \tilde{P} > 0, \quad (27)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{\Pi}_{ijltn} & [\kappa Z \quad W^T] \\ (*) & -\kappa I \end{bmatrix} < 0, \quad (28)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{\Pi}_{ijltn} & [\kappa Z \quad W^T] \\ (*) & -\kappa I \end{bmatrix} < 0. \quad (29)$$

则在异步 WTOD 协议下的闭环系统具有渐近稳定性并满足 H_∞ 性能指标, 其中,

$$\bar{\Pi}_{ijltn} = \begin{bmatrix} \bar{\Pi}_i^{11} & \bar{\Pi}_{ijltn}^{12} & \bar{\Pi}_{jtn}^{13} \\ (*) & \bar{P} & \mathbf{0} \\ (*) & (*) & \bar{P} \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\Pi}_{ijltn} = \begin{bmatrix} \tilde{\Pi}_i^{11} & \tilde{\Pi}_{ijltn}^{12} & \tilde{\Pi}_{jtn}^{13} \\ (*) & \tilde{P} & \mathbf{0} \\ (*) & (*) & \tilde{P} \end{bmatrix},$$

$$Z = \mathbf{0} \begin{bmatrix} B_j F_l \\ (B_i - B_j) F_l \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}^T,$$

$$W = [[N \ N \ 0 \ 0] \ 0 \ 0],$$

$$\bar{\Pi}_i^{11} = \text{diag} \{ -\bar{P} + \bar{M}_i^T \bar{M}_i + V^T V, -\gamma^2 I_\omega, -I_\mu \},$$

$$\bar{\Pi}_{ijltn}^{12} = [\bar{\Pi}_{ijltn}^{12} + \bar{\Gamma}_{ijltn} \quad \bar{D}_i^T \bar{Y}^T \quad (E_{jtn}^1)^T],$$

$$\tilde{\Pi}_i^{11} = \text{diag} \{ -(\bar{P} + \varepsilon \tilde{P}) + \bar{M}_i^T \bar{M}_i + V^T V, -\gamma^2 I_\omega, -I_\mu \},$$

$$\tilde{\Pi}_{ijltn}^{12} = [\tilde{\Pi}_{ijltn}^{12} + \bar{\Gamma}_{ijltn} \quad \bar{D}_i^T \bar{Y}^T \quad (E_{jtn}^1)^T],$$

$$\bar{\Gamma}_{ijltn} = B_j \bar{K}_{htn} - \bar{L}_{jtn} + (1 - \bar{\alpha}) \bar{L}_{jtn} \bar{\Phi}_{tn},$$

$$\bar{\Pi}_{ijltn}^{12} = \begin{bmatrix} Y A_j E_{1\varepsilon} & \mathbf{0} \\ Y (A_i - A_j) E_{1\varepsilon} & Y A_i E_{1\varepsilon} \end{bmatrix}^T,$$

$$\tilde{\Pi}_{ijltn}^{12} = \begin{bmatrix} Y A_i E_{2\varepsilon} & \mathbf{0} \\ Y (A_i - A_j) E_{2\varepsilon} & Y A_i E_{2\varepsilon} \end{bmatrix}^T,$$

$$\bar{\Gamma}_{ijltn} = \begin{bmatrix} \bar{\Gamma}_{1ijltn} & (1 - \bar{\alpha}) \bar{L}_{jtn} \bar{\Phi}_{tn} \\ \bar{\Gamma}_{3ijltn} & -(1 - \bar{\alpha}) \bar{L}_{jtn} \bar{\Phi}_{tn} \end{bmatrix}^T,$$

$$\bar{\Gamma}_{3ijltn} = B_i \bar{K}_{htn} - B_j \bar{K}_{htn} + \bar{L}_{jtn} - (1 - \bar{\alpha}) \bar{L}_{jtn} \bar{\Phi}_{tn},$$

$$\bar{\Pi}_{jtn}^{13} = [\sqrt{\bar{\alpha}} \bar{A}_{jtn}^2 \quad \mathbf{0} \quad \sqrt{\bar{\alpha}} \bar{E}_{jtn}^2],$$

$$\bar{A}_{jtn}^2 = \begin{bmatrix} -\bar{L}_{jtn} \bar{\Phi}_{tn} & -\bar{L}_{jtn} \bar{\Phi}_{tn} \\ \bar{L}_{jtn} \bar{\Phi}_{tn} & \bar{L}_{jtn} \bar{\Phi}_{tn} \end{bmatrix}, \quad \tilde{\varepsilon}_{jtn}^2 = \begin{bmatrix} \bar{L}_{jtn} \bar{\Phi}_{tn} \\ -\bar{L}_{jtn} \bar{\Phi}_{tn} \end{bmatrix},$$

$$\bar{P} = \bar{P} - \bar{Y} - \bar{Y}^T, \quad \tilde{P} = \bar{P} + \varepsilon \tilde{P} - \bar{Y} - \bar{Y}^T,$$

$$E_{1\varepsilon} = \text{diag} \{ I_{n_x}, \mathbf{0} \}, \quad E_{2\varepsilon} = \text{diag} \{ I_{n_x}, \bar{\varepsilon} I_{n_y} \}.$$

所求的观测器和控制器增益矩阵分别为 $L_{jtn} = Y^{-1} \bar{L}_{jtn}$ 和 $K_{htn} = (B_j^{-1} Y^{-1} (B_j^-)^T) K_{htn}$ 。

证明 通过引理 2 和式 (27) ~ (29), 可得不等式

$$P_\varepsilon = \bar{P} + \varepsilon \tilde{P} > 0, \quad (30)$$

再利用引理 1, 可得

$$\Pi_{ijltn\varepsilon} = \begin{bmatrix} \Pi_{i\varepsilon}^1 & \Pi_{ijltn\varepsilon}^{12} & \Pi_{jtn\varepsilon}^{13} \\ (*) & -P_\varepsilon^{-1} & \mathbf{0} \\ (*) & (*) & -P_\varepsilon^{-1} \end{bmatrix} < 0. \quad (31)$$

其中,

$$\Pi_{i\varepsilon}^1 = \text{diag} \{ -P_\varepsilon + \bar{M}_i^T \bar{M}_i + V^T V, -\gamma^2 I, -I_\mu \},$$

$$\Pi_{ijltn\varepsilon}^{12} = [A_{ijhtn\varepsilon}^1 \quad \bar{D}_i \quad E_{jtn}^1]^T,$$

$$\Pi_{jtn\varepsilon}^{13} = [\sqrt{\bar{\alpha}} \bar{A}_{jtn\varepsilon}^2 \quad \mathbf{0} \quad \sqrt{\bar{\alpha}} \bar{E}_{jtn}^2]^T.$$

为了处理控制器中的不确定项, 类似于文献 [21], 可得到

$$A_{ijhtn\varepsilon}^1 = \bar{A}_{ijltn}^1 + \begin{bmatrix} B_j \Delta K_h \\ (B_i - B_j) \Delta K_h \end{bmatrix}, \quad (32)$$

其中,

$$\bar{A}_{ijhtn\varepsilon}^1 = \begin{bmatrix} \bar{\Gamma}_{1ijhtn\varepsilon} & (1 - \bar{\alpha}) L_{jtn} \bar{\Phi}_{tn} \\ \bar{\Gamma}_{2ijhtn\varepsilon} & A_i E_\varepsilon - (1 - \bar{\alpha}) L_{jtn} \bar{\Phi}_{tn} \end{bmatrix},$$

$$\bar{\Gamma}_{1ijhtn\varepsilon} = A_j E_\varepsilon + B_j K_{htn} - L_{jtn} + (1 - \bar{\alpha}) L_{jtn} \bar{\Phi}_{tn},$$

$$\bar{\Gamma}_{2ijhtn\varepsilon} = (A_i - A_j) E_\varepsilon + (B_i - B_j) K_{htn} + L_{jtn} - (1 - \alpha(l)) L_{jtn} \bar{\Phi}_{tn}.$$

经过变换能够得到

$$\tilde{\Pi}_{ijltn\varepsilon} + ZH(l)W + (ZH(l)W)^T < 0, \quad (33)$$

其中,

$$\tilde{\Pi}_{ijltn\varepsilon} = \begin{bmatrix} \Pi_{i\varepsilon}^1 & \tilde{\Pi}_{ijltn\varepsilon}^{12} & \Pi_{jtn\varepsilon}^{13} \\ (*) & -P_\varepsilon^{-1} & \mathbf{0} \\ (*) & (*) & -P_\varepsilon^{-1} \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\Pi}_{ijltn\varepsilon}^{12} = [\bar{A}_{ijhtn\varepsilon}^1 \quad \bar{D}_i \quad E_{jtn}^1]^T.$$

利用引理 3 和条件 $H^T(l)H(l) \leq I$ 可知, 如果存在标量 κ , 则不等式 (33) 成立, 从而下列不等式成立:

$$\tilde{\Pi}_{ijltn\varepsilon} + \kappa Z Z^T + \kappa^{-1} W^T W < 0. \quad (34)$$

利用引理 1 和引理 2 并结合式 (27) ~ (29), 可以得到

$$\begin{bmatrix} \tilde{\Pi}_{ijhtn\varepsilon} & [\kappa Z \quad W^T] \\ (*) & -\kappa I \end{bmatrix} < 0, \quad (35)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{\Pi}_{ijltn\varepsilon} & [\kappa Z \quad W^T] \\ (*) & -\kappa I \end{bmatrix} < 0. \quad (36)$$

其中,

$$\hat{\Pi}_{ijltn\varepsilon} = \begin{bmatrix} \Pi_{i\varepsilon}^1 & \hat{\Pi}_{ijltn\varepsilon}^{12} & \hat{\Pi}_{jtn\varepsilon}^{13} \\ (*) & -\bar{P} & \mathbf{0} \\ (*) & (*) & -\bar{P} \end{bmatrix},$$

$$\hat{\Pi}_{ijltn\varepsilon}^{12} = [\hat{\Pi}_{ijhtn\varepsilon}^1 + \bar{\Gamma}_{ijltn} \quad \bar{D}_i^T \bar{Y}^T \quad (E_{jtn}^1)^T],$$

$$\hat{\Pi}_{ijltn\epsilon}^2 = \begin{bmatrix} YA_j E_\epsilon & \mathbf{0} \\ Y(A_i - A_j) E_\epsilon & YA_i E_\epsilon \end{bmatrix}.$$

通过 $P_\epsilon > 0$, 可得

$$(P_\epsilon - \bar{Y}) P_\epsilon^{-1} (P_\epsilon - \bar{Y})^T \geq 0, \quad (37)$$

$$-\bar{Y} P_\epsilon^{-1} \bar{Y}^T \leq P_\epsilon - \bar{Y} - \bar{Y}^T. \quad (38)$$

因此

$$\begin{bmatrix} \hat{\Pi}_{ijltn\epsilon} & [\kappa Z \quad W^T] \\ (*) & -\kappa I \end{bmatrix} < 0. \quad (39)$$

其中,

$$\hat{\Pi}_{ijltn\epsilon} = \begin{bmatrix} \Pi_{ie}^1 & \hat{\Pi}_{ijltn\epsilon}^2 & \bar{\Pi}_{jtn\epsilon}^3 \\ (*) & -\bar{Y} P_\epsilon^{-1} \bar{Y}^T & \mathbf{0} \\ (*) & (*) & -\bar{Y} P_\epsilon^{-1} \bar{Y}^T \end{bmatrix}.$$

对式(39)两边分别左乘及右乘 $\{I, I, I, \bar{Y}^{-1}, I, I\}$ 及其的转置, 得

$$\begin{bmatrix} \mathcal{E}_{ijltn\epsilon} & [\kappa Z \quad W^T] \\ (*) & -\kappa I \end{bmatrix} < 0. \quad (40)$$

其中,

$$\mathcal{E}_{ijltn\epsilon} = \begin{bmatrix} \Pi_{ie}^1 & \hat{\Pi}_{ijltn\epsilon}^2 & \bar{\Pi}_{jtn\epsilon}^3 \\ (*) & -P_\epsilon^{-1} & \mathbf{0} \\ (*) & (*) & -P_\epsilon^{-1} \end{bmatrix}.$$

由于式(40)中的 $\mathcal{E}_{ijltn\epsilon}$ 和式(35)中的 $\bar{\Pi}_{ijltn\epsilon}$ 是等价的, 因此, 通过引理1可知, 式(40)成立是式(35)成立的充分条件, 进而保证式(21)成立。至此定理2证明结束。

3 实验仿真与分析

为了验证所提出的网络攻击和异步 WTOD 协议下模糊奇异摄动系统的非脆弱安全控制设计的有效性, 本节给出一个数值仿真例子进行验证。离散时间系统(1)的参数为

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1.08 & 0.8 & 0 & 0 \\ -0.16 & 0.36 & 0.32 & 0.32 \\ 0 & 0.32 & -0.32 & 0 \\ 0 & 0.32 & 0 & 0.68 \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0.92 & 0.8 & 0 & 0 \\ -0.16 & 0.36 & 0.32 & 0.32 \\ -0.16 & 0.32 & 0.68 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.68 \end{bmatrix},$$

$$B_1 = [0.008 \quad 0.16 \quad 0.24 \quad 0.16]^T,$$

$$B_2 = [0.016 \quad 0.16 \quad 0.168 \quad 0.16]^T,$$

$$D_1 = [0.11 \quad 0.32 \quad 0.20 \quad 0.08]^T,$$

$$D_2 = [0.11 \quad 0.32 \quad 0.20 \quad 0.08]^T,$$

$$M_1 = M_2 = 0.1 [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1].$$

攻击概率、奇异摄动参数上界和性能指标可以分别选择为: $\bar{\alpha} = 0.22$, $\bar{\epsilon} = 0.1$ 和 $\gamma = 30.8$ 。对于控制器(14)中的不确定项的相关参数, 给定 $H(l) = 0.5 \sin(0.5l)$, $N = 0.1 \times \text{diag}\{1, 1, 1, 1\}$, $F_1 = 0.1 \times [1 \quad 2 \quad 3 \quad 1]$, $F_2 = 0.1 \times [3 \quad 1 \quad 2 \quad 1]$ 。欺骗攻击的参数分别选择为 $\mu_s(l) = \mu_f(l) = 0.1 \sin(l)$ 和 $V = 0.1 \times \text{diag}\{1, 1, 1, 1\}$ 。对于采用的异步 WTOD 协议, 选择慢变和快变子系统各自的权重系数分别为 $A_1 = \{0.3, 0.4\}$ 和 $A_2 = \{0.4, 0.3\}$ 。

系统和观测器的非线性隶属度函数选择如下:

$$\bar{\phi}_1(x(l)) = \begin{cases} \frac{\sin(x_1(l)) - 0.2 \sin(l) x_1(l)}{x_1(l) (1 - 0.2 \sin(l))}, & x_1(l) \neq 0, \\ 1, & x_1(l) = 0; \end{cases}$$

$$\phi_1(x(l)) = \begin{cases} \frac{0.2 \sin(x_1(l)) - 0.2 \sin(l) x_1(l)}{x_1(l) (1 - 0.2 \sin(l))}, & x_1(l) \neq 0, \\ \frac{0.2 (1 - \sin(l))}{1 - 0.2 \sin(l)}, & x_1(l) = 0; \end{cases}$$

$$\bar{\phi}_2(x(l)) = \begin{cases} \frac{x_1(l) - 0.2 \sin(l) x_1(l)}{x_1(l) (1 - 0.2 \sin(l))}, & x_1(l) \neq 0, \\ \frac{0.8}{1 - 0.2 \sin(l)}, & x_1(l) = 0; \end{cases}$$

$$\phi_2(x(l)) = \begin{cases} \frac{x_1(l) - \sin(l) x_1(l)}{x_1(l) (1 - 0.6 \sin(l))}, & x_1(l) \neq 0, \\ 0, & x_1(l) = 0. \end{cases}$$

非线性加权系数为 $v_i(x(l)) = 0.4$ 和 $\bar{v}_i(x(l)) = 0.6$ 。此外, 令控制器的下、上隶属度函数分别为

$$\underline{\mathcal{G}}_1(\hat{x}(l)) = e^{-\frac{\hat{x}_1^2(l)}{0.5}},$$

$$\bar{\mathcal{G}}_1(\hat{x}(l)) = e^{-\hat{x}_1^2(l)},$$

$$\underline{\mathcal{G}}_2(\hat{x}(l)) = 1 - \bar{\mathcal{G}}_1(\hat{x}(l)),$$

$$\bar{\mathcal{G}}_2(\hat{x}(l)) = 1 - \underline{\mathcal{G}}_1(\hat{x}(l)).$$

控制器的非线性加权系数为

$$\underline{\chi}_h(\hat{x}(l)) = \cos^2(\hat{x}(l)),$$

$$\bar{\chi}_h(\hat{x}(l)) = 1 - \cos^2(\hat{x}(l)).$$

通过求解线性矩阵不等式(27)~(29), 可以获得以下观测器和控制器的增益矩阵:

$$K_{111} = [-0.179 \quad 9 \quad -2.307 \quad 2 \quad -0.085 \quad 6 \quad -0.093 \quad 9],$$

$$K_{121} = [-0.186 \quad 4 \quad -2.318 \quad 8 \quad -0.068 \quad 0 \quad -0.097 \quad 7],$$

$$K_{112} = [-0.179 \quad 7 \quad -2.306 \quad 4 \quad -0.054 \quad 2 \quad -0.109 \quad 8],$$

$$K_{122} = [-0.185 \quad 9 \quad -2.324 \quad 9 \quad -0.079 \quad 1 \quad -0.101 \quad 8],$$

$$K_{211} = [-0.180 \quad 0 \quad -2.307 \quad 2 \quad -0.085 \quad 6 \quad -0.093 \quad 9],$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{K}_{221} &= [-0.186\ 4 \quad -2.318\ 7 \quad -0.068\ 0 \quad -0.097\ 7], \\
 \mathbf{K}_{212} &= [-0.179\ 7 \quad -2.306\ 4 \quad -0.054\ 2 \quad -0.109\ 8], \\
 \mathbf{K}_{222} &= [-0.186\ 0 \quad -2.324\ 9 \quad -0.079\ 1 \quad -0.101\ 8], \\
 \mathbf{L}_{111} &= \begin{bmatrix} 0.121\ 6 & -0.364\ 8 & 0.017\ 3 & -0.003\ 8 \\ -0.029\ 7 & 0.307\ 3 & 0.066\ 6 & 0.007\ 0 \\ -0.016\ 8 & 0.148\ 5 & 0.046\ 1 & -0.004\ 0 \\ -0.002\ 2 & 0.323\ 2 & 0.020\ 2 & 0.051\ 7 \end{bmatrix}, \\
 \mathbf{L}_{112} &= \begin{bmatrix} 0.118\ 8 & -0.416\ 1 & 0.014\ 1 & -0.001\ 7 \\ -0.028\ 2 & 0.374\ 6 & 0.012\ 6 & 0.025\ 4 \\ -0.016\ 2 & 0.268\ 9 & -0.013\ 7 & 0.012\ 5 \\ -0.001\ 6 & 0.390\ 6 & 0.008\ 1 & 0.019\ 5 \end{bmatrix}, \\
 \mathbf{L}_{121} &= \begin{bmatrix} 0.070\ 5 & -0.098\ 7 & 0.099\ 3 & -0.017\ 1 \\ -0.003\ 6 & 0.194\ 7 & 0.002\ 5 & 0.024\ 3 \\ 0.071\ 5 & 0.123\ 1 & 0.014\ 7 & 0.018\ 9 \\ -0.006\ 0 & 0.053\ 9 & -0.002\ 3 & 0.033\ 9 \end{bmatrix}, \\
 \mathbf{L}_{122} &= \begin{bmatrix} 0.111\ 2 & -0.070\ 9 & -0.008\ 8 & 0.031\ 5 \\ -0.065\ 2 & 0.194\ 5 & 0.017\ 5 & 0.005\ 5 \\ -0.038\ 7 & 0.126\ 9 & -0.039\ 4 & 0.002\ 8 \\ -0.065\ 4 & 0.052\ 8 & 0.019\ 8 & 0.012\ 3 \end{bmatrix}, \\
 \mathbf{L}_{211} &= \begin{bmatrix} 0.146\ 7 & -0.083\ 4 & 0.031\ 8 & -0.007\ 7 \\ -0.010\ 6 & 0.318\ 4 & 0.082\ 2 & 0.008\ 0 \\ 0.049\ 2 & 0.509\ 4 & 0.110\ 5 & -0.000\ 8 \\ 0.007\ 3 & 0.013\ 0 & 0.027\ 3 & 0.015\ 4 \end{bmatrix}, \\
 \mathbf{L}_{212} &= \begin{bmatrix} 0.142\ 6 & -0.118\ 2 & -0.007\ 3 & 0.004\ 9 \\ -0.003\ 9 & 0.378\ 7 & 0.013\ 6 & 0.032\ 9 \\ 0.056\ 3 & 0.592\ 3 & 0.042\ 0 & 0.035\ 2 \\ 0.010\ 2 & 0.082\ 1 & 0.009\ 1 & 0.022\ 4 \end{bmatrix}, \\
 \mathbf{L}_{221} &= \begin{bmatrix} -0.084\ 1 & -0.102\ 5 & 0.102\ 0 & -0.017\ 5 \\ -0.006\ 9 & 0.196\ 9 & 0.001\ 3 & 0.024\ 5 \\ -0.107\ 9 & 0.131\ 2 & 0.014\ 4 & 0.021\ 1 \\ 0.040\ 5 & 0.034\ 1 & 0.013\ 1 & 0.024\ 7 \end{bmatrix}, \\
 \mathbf{L}_{222} &= \begin{bmatrix} -0.053\ 4 & -0.073\ 8 & -0.016\ 3 & 0.032\ 1 \\ -0.062\ 8 & 0.196\ 1 & 0.022\ 1 & 0.005\ 0 \\ -0.185\ 1 & 0.134\ 5 & 0.035\ 0 & 0.001\ 6 \\ -0.021\ 0 & 0.036\ 6 & -0.025\ 5 & 0.017\ 4 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

为了说明所设计的非脆弱 H_∞ 控制器的有效性, 将外部扰动设置为 $\omega(l) = -0.2e^{-0.35l}$, 初始状态向量设置为 $\mathbf{x}(0) = 0.1 \times [5 \ 12 \ 5 \ 5]^T$, 估计器的初始状态向量设置为 $\hat{\mathbf{x}}(l) = [0.3 \ 0.3 \ 0.3 \ -0.3]$ 。图 2~图 5 中给出仿真结果, 其中图 2 和图 3 显示了随机欺骗攻击下闭环系统的状态和相应估计的响应曲线, 图 4 给出了系统控制输入信号 $\mathbf{u}(l)$ 和观测误差 $\mathbf{e}(l)$ 的

动态响应, 图 5 表示了选定的带有异步 WTOD 协议的慢变和快变子系统传感器节点。从图 2 和图 3 中的轨迹曲线可以看出, 观测器能够有效跟踪系统状态, 模糊奇异摄动系统可以在时间 20 附近收敛。本文改进的异步 WTOD 协议, 设计具有调度节点编号的观测器增益来响应不同的调度节点, 所估计的状态值可以有效地跟踪系统状态, 这证明了所设计的模糊观测器的有效性。此外, 图 2~图 4 中用灰色线条描绘了随机欺骗攻击发生的时间。从以上仿真结果可以看出, 由于欺骗攻击的发生, 控制输入存在一定程度的偏差, 但这些不利影响很快就会被非脆弱控制策略抵消, 这表明异步 WTOD 协议下的模糊控制器对攻击具有较强的鲁棒性。

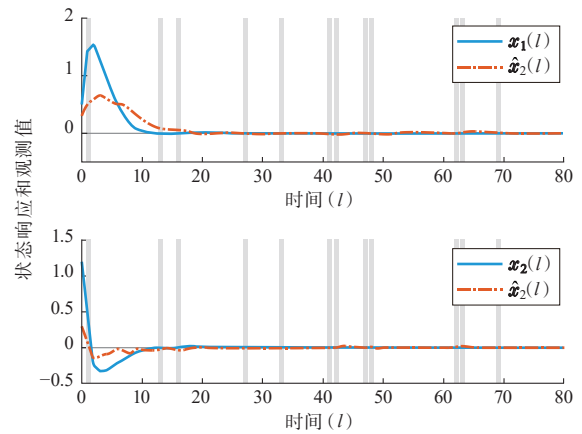


图 2 欺骗攻击下状态 x_1, x_2 和 \hat{x}_1, \hat{x}_2 估计的曲线
Fig. 2 Curves of state x_1, x_2 and estimate \hat{x}_1, \hat{x}_2 under stochastic deception attacks

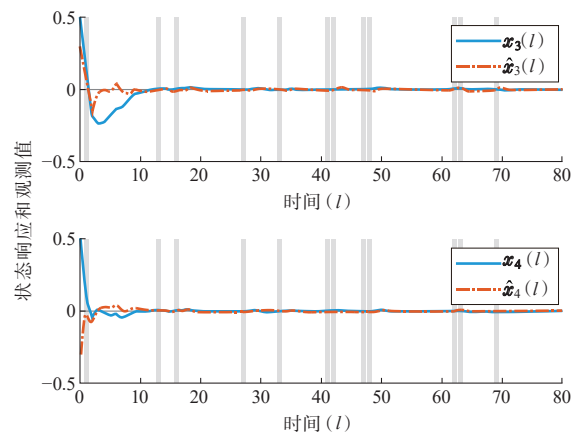


图 3 欺骗攻击下状态 x_3, x_4 和 \hat{x}_3, \hat{x}_4 估计的曲线
Fig. 3 Curves of state x_3, x_4 and estimated \hat{x}_3, \hat{x}_4 under stochastic deception attacks

基于不同的权重矩阵, 快变和慢变子系统的节点选择顺序如图 5 所示。来自不同节点的信息值会影

响其各自权重设置。一般权重较大的节点被选择的概率较高。根据仿真结果可以很好地发现,在慢变传感器节点中,选择第一个节点的效率为36.25%,而另一个节点的选择效率为63.75%。此外,21.25%和78.75%分别是快变子系统节点内第一个和第二个节点的选择比率,体现了异步WTOD协议按需分配资源的特性。进一步分析表明,异步WTOD协议通过差异化权重分配优化了网络资源利用率。

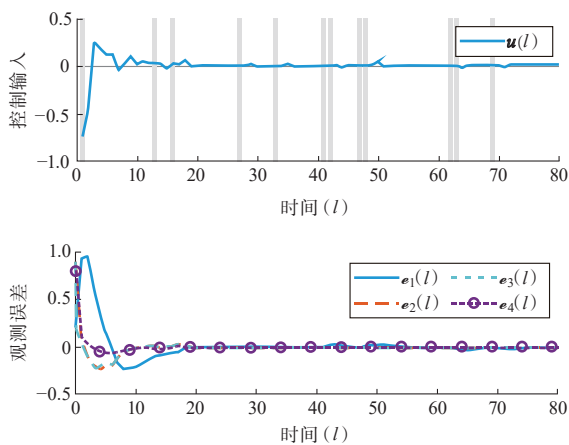


图4 控制输入信号 $u(t)$ 和观测器误差 $e(t)$

Fig. 4 Control input signal $u(t)$ and observer error $e(t)$

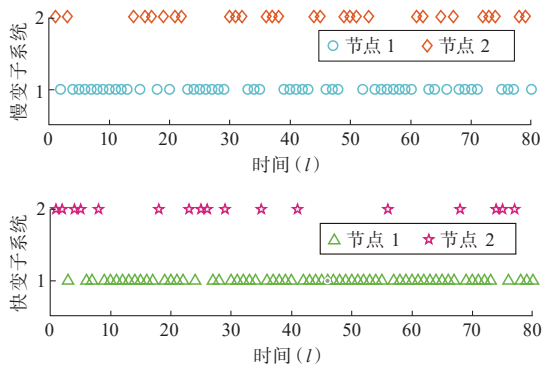


图5 选择具有异步WTOD协议的慢变和快变节点

Fig. 5 Selection of slow and fast nodes with asynchronous WTOD protocols

因此,实验结果表明,本文设计的非脆弱安全控制策略在通信资源受限与网络攻击并存环境下,能有效平衡系统性能与安全性,其有效性得到了证明。

4 结论

本文针对通信资源受限与网络攻击威胁并存的复杂场景,提出一种基于异步WTOD协议的模糊奇异摄动系统非脆弱安全控制策略。首先,针对传统同

步通信协议在快变和慢变子系统数据调度中的资源浪费问题,引入异步WTOD协议。该协议通过差异化权重分配,实现快变和慢变子系统数据的分通道异步调度,显著降低了网络拥塞风险,同时保障了数据传输的实时性与可靠性。其次,考虑欺骗攻击可能对系统数据进行篡改,构建了攻击模型与协议综合分析框架,提出一种基于观测器的非脆弱控制策略。通过Lyapunov稳定性理论与线性矩阵不等式技术,推导了系统在攻击环境下满足预设性能的充分条件并得到观测器与控制器的增益。最后,通过仿真验证了所提出控制策略的有效性。未来将进一步探索异构网络环境下混合协议普适性优化,并探索通信协议下数据驱动的攻击检测与容错控制方法。

参考文献:

- [1] 王燕舞,杨武. 混杂奇异摄动系统的研究综述[J]. 控制与决策, 2018, 33(5): 950-959.
- [2] SHEN Hao, LIU Yuan, WANG Jing, et al. Sliding-mode control for IT2 fuzzy nonlinear singularly perturbed systems and its application to electric circuits: a dynamic event-triggered mechanism[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2023, 53(7): 4077-4090.
- [3] ASEMANI M H, MAJD V J. A robust H_∞ non-PDC design scheme for singularly perturbed T-S fuzzy systems with immeasurable state variables[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2015, 23(3): 525-541.
- [4] HU Yue, CAI Chenxiao, LIN Hong, et al. Fuzzy-model-based H_∞ control for networked singularly perturbed systems: the asynchronous weighted try-once-discard protocol case[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2024, 32(5): 2713-2724.
- [5] CHENG Jun, YAN Huaicheng, PARK J H, et al. Output-feedback control for fuzzy singularly perturbed systems: a nonhomogeneous stochastic communication protocol approach[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2023, 53(1): 76-87.
- [6] HU Yue, CAI Chenxiao, LEE S H, et al. New results on H_∞ control for interval type-2 fuzzy singularly perturbed systems with fading channel: the WTOD protocol case[J]. Applied Mathematics and Computation, 2023, 448: 127939.
- [7] YUE Dong, TIAN Engang, HAN Qinglong. A delay

- system method for designing event-triggered controllers of networked control systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2013, 58 (2): 475-481.
- [8] PENG Chen, HAN Qinglong. A novel event-triggered transmission scheme and L2 control co-design for sampled-data control systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2013, 58 (10): 2620-2626.
- [9] WAKAIKI M. Self-triggered stabilization of discrete-time linear systems with quantized state measurements [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2023, 68 (3): 1776-1783.
- [10] 傅志忠, 刘斌, 杨兴旺, 等. 事件触发非周期间歇控制下离散时滞系统的指数稳定 [J]. 信息与控制, 2025, 54 (2): 1-23.
- [11] 宋金波, 董宏丽, 申雨轩, 等. Round-Robin 协议下基于观测器的多智能体系统 H_∞ 一致性控制 [J]. 信息与控制, 2022, 51 (6): 719-729.
- [12] YANG Hongchenyu, PENG Chen, CAO Zhiru. Attack-model-independent stabilization of networked control systems under a jump-like TOD scheduling protocol [J]. Automatica, 2023, 152: 110982.
- [13] GENG Hang, WANG Zidong, HU Jun, et al. Variance-constrained filter design with sensor resolution under round-robin communication protocol: an outlier-resistant mechanism [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2023, 53 (6): 3762-3773.
- [14] WANG Yezheng, WANG Zidong, ZOU Lei, et al. H_∞ PID control for discrete-time fuzzy systems with infinite-distributed delays under round-robin communication protocol [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2022, 30 (6): 1875-1888.
- [15] SHEN Yuxuan, WANG Zidong, SHEN Bo, et al. Outlier-resistant recursive filtering for multisensor multirate networked systems under weighted try-once-discard protocol [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2021, 51 (10): 4897-4908.
- [16] ZHANG Ning, QI Wenhai, PANG Guocheng, et al. Observer-based sliding mode control for fuzzy stochastic switching systems with deception attacks [J]. Applied Mathematics and Computation, 2022, 427: 127153.
- [17] ZHANG Yifang, WU Zhengguang, SHI Peng, et al. Quantization-based event-triggered consensus of multi-agent systems against aperiodic DoS attacks [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2023, 53 (6): 3774-3783.
- [18] 王昆玉, 韦琳楠, 田恩刚, 等. DoS 攻击下的网络控制系统的记忆型事件触发控制 [J]. 信息与控制, 2019, 48 (5): 528-535.
- [19] LI Li, YANG Huan, XIA Yuanqing, et al. Attack detection and distributed filtering for state-saturated systems under deception attack [J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2021, 8 (4): 1918-1929.
- [20] 丁瑞森, 杨飞生, 付远超, 等. 混合攻击下基于带宽感知型事件触发机制的负荷频率控制 [J]. 中国科学: 信息科学, 2024, 54 (12): 2828-2840.
- [21] JIANG Xianli, XIA Guihua, FENG Zhiguang, et al. Nonfragile formation seeking of unmanned surface vehicles: a sliding mode control approach [J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2022, 9 (2): 431-444.
- [22] ANAND S, DEV A, SARKAR M K, et al. Non-fragile approach for frequency regulation in power system with event-triggered control and communication delays [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57 (3): 2187-2201.
- [23] RETERSEN I R. A stabilization algorithm for a class of uncertain linear systems [J]. Systems & Control Letters, 1987, 8 (4): 351-357.
- [24] LIU Jinliang, WEI Lili, XIE Xiangpeng, et al. Quantized stabilization for T-S fuzzy systems with hybrid-triggered mechanism and stochastic cyber-attacks [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2018, 26 (6): 3820-3834.
- [25] WAN Xiongbo, WANG Zidong, WU Min, et al. H_∞ state estimation for discrete-time nonlinear singularly perturbed complex networks under the round-robin protocol [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2019, 30 (2): 415-426.
- [26] ZHENG Qunxian, XU Shengyuan, ZHANG Zhengqi-ang. Nonfragile H_∞ control for uncertain Takagi-Sugeno fuzzy systems under digital communication channels and its application [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2022, 52 (6): 3638-3647.