

控制与决策

Control and Decision

基于T-S模糊模型的信息物理系统中分布式FDI攻击检测

程伶俐, 石榆, 詹习生

引用本文:

程伶俐, 石榆, 詹习生. 基于T-S模糊模型的信息物理系统中分布式FDI攻击检测[J]. *控制与决策*, 2025, 40(8): 2429–2438.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2025.0057>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于聚类簇结构特性的自适应综合采样法在入侵检测中的应用

[Toward intrusion detection via cluster structure-based adaptive synthetic sampling approach](#)

控制与决策. 2021, 36(8): 1920–1928 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1672>

分布式最小二乘估计中隐匿FDI攻击策略的设计

Hidden FDI attack strategy for distributed least square estimation

控制与决策. 2021, 36(8): 1963–1969 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1688>

工业信息物理系统安全风险动态表现分析量化评估模型

Quantitative evaluation model for dynamic performance analysis of security risk in industrial cyber physics systems

控制与决策. 2021, 36(8): 1939–1946 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1479>

基于动态观测器零极点优化的网络控制系统故障检测

Pole-zero optimization design of dynamic observer for fault detection of networked control systems

控制与决策. 2021, 36(6): 1351–1360 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1107>

基于KRLS的非均匀采样非线性系统辨识

Identification of non-uniformly sampled nonlinear systems based on KRLS

控制与决策. 2021, 36(12): 3049–3055 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0962>

基于 T-S 模糊模型的信息物理系统中 分布式 FDI 攻击检测

程伶俐[†], 石榆, 詹习生

(湖北师范大学 电气工程与自动化学院, 湖北 黄石 435002)

摘要: 研究虚假数据注入攻击下, 非线性信息物理系统中攻击检测的报警响应问题. 首先, 建立一种模糊模型, 用于处理信息物理系统的非线性特性, 首次在模糊模型中引入分布式融合策略来检测虚假数据注入攻击, 能够应对更复杂的现实场景, 并提高检测准确性和可靠性, 从而提升报警响应速度; 然后, 为实现实时在线异常检测, 部署的传感器通过通信网络将数据传输至监控中心, 考虑到带宽限制, 采用多个有限级对数量化方法减少数据包大小, 从而提高传输效率; 接着, 通过凸优化方法设计最优的分布式融合方案, 以提高在量化误差存在时的检测精度; 最后, 以质量-弹簧-阻尼系统为例, 验证了所提出方法相比于单传感器系统能够更快速地响应攻击, 展现出显著的优势.

关键词: 信息物理系统; 模糊模型; 攻击检测; 报警响应; 凸优化

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2025.0057

引用格式: 程伶俐, 石榆, 詹习生. 基于 T-S 模糊模型的信息物理系统中分布式 FDI 攻击检测 [J]. 控制与决策, 2025, 40(8): 2429-2438.

Distributed FDI attack detection based on T-S fuzzy model in cyber-physical systems

CHENG Ling-li[†], SHI Yu, ZHAN Xi-sheng

(College of Electrical Engineering and Automation, Hubei Normal University, Huangshi 435002, China)

Abstract: This paper investigates the alarm response issue for attack detection in nonlinear cyber-physical systems under false data injection attacks. A fuzzy model is developed to address the nonlinear characteristics of cyber-physical systems. For the first time, a distributed fusion strategy is introduced in the fuzzy model to detect false data injection attacks, enabling it to handle more complex real-world scenarios and improve detection accuracy and reliability, thereby enhancing alarm response speed. Next, to achieve real-time online anomaly detection, deployed sensors transmit data to a monitoring center through a communication network. Considering bandwidth limitations, multiple finite-level uniform quantizers are employed to reduce data packet size, thereby improving transmission efficiency. Then, an optimal distributed fusion scheme is designed using convex optimization to enhance detection accuracy in the presence of quantization errors. Finally, using a mass-spring-damping system as an example, it is demonstrated that the proposed method responds to attacks more rapidly compared to a single-sensor system, showing significant advantages.

Keywords: cyber-physical systems; fuzzy model; attack detection; alarm response; convex optimization

0 引言

信息物理系统 (cyber-physical systems, CPSs) 具有诸多优势, 如较高的可靠性、优异的数据处理能力、实时性强的信息收集以及较高的安全性^[1-3]. 因

此, CPSs 在核工业、能源生产、交通系统、智能制造以及电力等多个领域得到了广泛应用^[4-7]. 尽管 CPSs 在提升信息处理效率方面表现突出, 但是, 在实际应用中, 仍然面临许多亟需解决的挑战. 因此,

收稿日期: 2025-01-13; 录用日期: 2025-04-04.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (62303169); 湖北省自然科学基金创新群体项目 (2025AFA040); 湖北省自然科学基金联合基金项目 (2024AFD008); 湖北省教育厅科学研究计划青年人才项目 (Q20232513, Q20232505).

责任编委: 牛玉刚.

[†]通信作者. E-mail: lcheng@hbnu.edu.cn.

学者们针对不同的问题进行了一系列的研究. 文献 [8] 在存在混合攻击的情况下, 推导了离散 CPSs 的均方稳定性; 文献 [9] 提出了一种优化的编码方案, 用于提高电力系统状态估计中的虚假数据注入 (false data injection, FDI) 攻击检测; 文献 [10] 提出了预测控制算法. 本文研究非线性 CPSs 的攻击检测的报警响应问题.

非线性 CPSs 在实际应用中更为普遍, 这使得相关研究变得更加复杂. 随着技术的不断进步, 出现了多种应对非线性问题的方案, 其中 T-S 模糊模型凭借独特的优势, 被许多研究者广泛采用^[11-13]. 模糊控制通过集成知识库、模糊推理、输入变量的模糊化过程以及输出变量的精确控制, 形成了一个完整的控制框架. T-S 模糊模型则通过组合多个局部线性子模型, 能够在任意精度下逼近任何平滑的非线性函数. 文献 [14] 研究了非线性系统的故障检测, 文献 [15] 研究了欺骗攻击下 T-S 模糊的预测控制, 文献 [16] 讨论了一种基于事件触发的新颖滤波器设计. 考虑到本文中 CPSs 的非线性, 应用模糊模型来解决 FDI 攻击检测问题.

由于 CPSs 依赖于复杂的网络结构进行信息交换和控制, 系统面临显著的网络安全隐患. 其多层次、分布式的架构增加了维护和管理的难度, 并提高了隐私泄露和数据失真的风险. 因此, 尽管 CPSs 提高了系统的智能性, 但是, 不可避免地带来了严重的网络安全挑战. 在 CPSs 网络安全问题的研究方面, 已有大量成果^[17-19]. 文献 [20] 考虑到恶意欺骗攻击会修改 CPSs 的数据, 提出了一种具有可调阈值的随机方案; 文献 [21] 讨论了拒绝服务攻击的影响, 并提出了滤波器设计; 文献 [22] 介绍了一种基于隐层的分布式事件触发弹性控制方法, 解决了孤岛微电网在 FDI 攻击下的频率恢复问题. 在众多攻击类型中, FDI 攻击通过篡改或误导系统传感器或控制器的数据, 干扰系统的正常运行, 这使得传统安全防护措施难以识别这些攻击. 因此, 设计高效的 FDI 攻击检测方法成为一个重要的研究课题. 特别是提升 FDI 攻击的检测速度和准确性对于保障 CPSs 的安全至关重要. 快速而准确地检测不仅能够有效遏制攻击带来的损害, 还能为后续防御措施争取宝贵的时间.

近年来, CPSs 复杂的结构和功能使得网络攻击的检测和防御面临更大的挑战, 网络攻击检测已受到广泛关注, 并取得了一些进展^[23-25]. 文献 [25] 提出了一种基于集合成员估计和切换多模态高阶自由权矩阵方法的攻击检测策略, 以降低状态估计的保守性并提高了 T-S 模糊系统在未知但是有界噪声和恶

意攻击下的检测精度; 文献 [26] 提出了一种基于残差信号扩展和加密传输的模糊系统网络攻击检测方案, 以提高网络物理系统对欺骗攻击的检测能力和信息安全性; 文献 [27] 提出了一种基于残差的检测方法, 用于识别远程状态估计中的 FDI 攻击, 其中远程估计器通过智能传感器接收数据. 值得注意的是, 从上述分析可见, 大多数攻击检测方法的基本思路是通过比较观测器或滤波器产生的残差信号与设定的阈值来判断系统是否受到网络攻击. 尽管这些方法各具优势, 但是, 通常依赖单一传感器信息进行攻击检测, 因此, 存在预警响应较慢和检测精度不足等问题.

从上述讨论来看, 提升 FDI 攻击下非线性 CPSs 的攻击检测报警响应速度是一个具有挑战性的问题. 如何解决 FDI 攻击下离散非线性 CPSs 的攻击检测问题以及提升报警响应速度是两个最大的难点. 因此, 本文将基于多传感器融合策略解决 FDI 攻击检测的报警响应问题.

本文的主要内容如下: 1) 在模糊模型中首次引入多传感器分布式融合策略, 以提高虚假数据注入攻击的检测准确性和可靠性, 能够显著提升报警响应速度, 尤其适用于更复杂的现实应用场景; 2) 考虑到带宽限制, 使用多个有限级对数量化器对传感器数据进行量化, 从而有效减少数据包大小, 提高传输效率; 3) 局部检测器和最优融合准则的设计被转化为凸优化问题, 可通过标准软件包轻松求解.

1 问题描述与预备知识

本文采用 T-S 模糊系统来处理非线性 CPSs, 定义如下所示:

$$\begin{aligned} \text{Rule } i: & \text{ if } \theta_1(k) \in \Theta_{1i}, \theta_2(k) \in \Theta_{2i}, \\ & \text{ and } \theta_s(k) \in \Theta_{si}, \text{ then} \\ x(k+1) &= A_i x(k) + B_i u(k) + E_i \omega(k), \\ & i = 1, 2, \dots, r. \end{aligned} \quad (1)$$

其中: A_i 、 B_i 、 E_i 为适当的矩阵; $x(k) \in R^n$ 为系统的状态向量; $u(k) \in R^m$ 为系统的控制输入向量; $\omega_k \in R^p$ 属于 $\mathcal{L}_2[0, \infty)$, 为系统的扰动输入向量; Θ_{vi} ($i = 1, 2, \dots, r, v = 1, 2, \dots, s$) 为模糊集; $\theta_k = [\theta_1(k), \theta_2(k), \dots, \theta_s(k)]^T$ 为前提变量.

定义 $f_i(\theta_k) = \prod_{v=1}^s \Theta_{vi}(\theta_v(k))$, $i \in \{1, 2, \dots, r\}$, 其中 $\Theta_{vi}(\theta_v(k))$ 为 $\theta_v(k)$ 在模糊集 Θ_{vi} 中的隶属度. 进一步定义 $\eta_i(\theta(k)) = f_i(\theta_k) / \sum_{i=1}^r f_i(\theta_k)$ 作为隶属函数. 假设 $f_i(\theta_k) > 0$, $\sum_{i=1}^r f_i(\theta_k) > 0$, 显然有

$$\eta_i(\theta(k)) = \frac{f_i(\theta_k)}{\sum_{i=1}^r f_i(\theta_k)} \geq 0,$$

$$\sum_{i=1}^r \eta_i(\theta(k)) = 1.$$

系统 (1) 的模糊系统推理为

$$x(k+1) = \sum_{i=1}^r \eta_i(\theta(k)) [A_i x(k) + B_i u(k) + E_i \omega(k)]. \quad (2)$$

假设模糊系统中每个子系统 (A_i, B_i) 是可控的, 且已为每个子系统设计了一个反馈增益矩阵 $K_i \in \mathbb{R}^{m \times n}$, 使得所有模糊子系统的组合反馈矩阵 $\Phi_i = \sum_{i=1}^r \eta_i(\theta(k))(A_i + B_i K_i)$ 是 Hurwitz 稳定的. 在 CPSs 中, 当控制信号通过通信网络发送到执行器时, 可能会遇到恶意攻击者的 FDI 攻击, 即执行器接收到的控制信号为

$$\tilde{u}(k) = u(k) + a(k), \quad (3)$$

其中 $a(k) \in \mathbb{R}^m$ 为未知的攻击信号. 若 $a(k) \equiv 0$, 则 $\tilde{u}(k) = u(k)$ 表示控制信号不受影响; 反之, 则表示控制信号被恶意攻击信号 $a(k)$ 破坏.

注 1 在实际系统中, 攻击者通常会保持一定的隐蔽性, 以避免被检测机制识别, 因此, 攻击信号 $a(k)$ 受到一定的上界限制. 在这一上界约束下, 攻击信号可以是任意的虚假数据, 其具体形式取决于攻击者的策略以及系统的特性. 本文研究的是攻击者通过注入任意虚假信息来访问并篡改物理系统控制信号的情形.

由式 (2) 和 (3), 在 FDI 攻击下, 闭环系统在模糊系统框架下可重构为

$$x(k+1) = \sum_{i=1}^r \eta_i(\theta(k)) [\Phi_i x(k) + B_i a(k) + E_i \omega(k)]. \quad (4)$$

为及时准确地检测式 (3) 中的攻击信号, 建议在不同位置部署 N 个传感器, 在模糊系统框架下, 每个传感器的测量值可建模为

$$\begin{aligned} \text{Rule } i : & \text{ if } \theta_1(k) \in \Theta_{1i}, \theta_2(k) \in \Theta_{2i}, \\ & \text{ and } \theta_s(k) \in \Theta_{si}, \text{ then} \\ y_\lambda(k) &= C_{i\lambda} x(k) + D_{i\lambda} \omega(k), \quad \lambda = 1, 2, \dots, N, \\ & i = 1, 2, \dots, r. \end{aligned} \quad (5)$$

带有隶属函数的分布式传感器 (5) 可表示为

$$y_\lambda(k) = \sum_{i=1}^r \eta_i(\theta(k)) [C_{i\lambda} x(k) + D_{i\lambda} \omega(k)]. \quad (6)$$

2 攻击检测估计器设计

针对式 (2) 和 (5), 设计如下模糊 FDI 攻击检测估计器:

$$\begin{cases} \hat{x}_\lambda(k+1) = \sum_{i=1}^r \eta_i(\theta(k)) [G_{i\lambda} \hat{x}_\lambda(k) + M_{i\lambda} y_\lambda(k)], \\ z_\lambda(k) = \sum_{i=1}^r \eta_i(\theta(k)) [L_{i\lambda} \hat{x}_\lambda(k)]. \end{cases} \quad (7)$$

其中: $\hat{x}_\lambda(k) \in \mathbb{R}^n$ 为局部估计状态; $G_{i\lambda} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $M_{i\lambda} \in \mathbb{R}^{n \times q}$, $L_{i\lambda} \in \mathbb{R}^{q \times n}$ 为估计器增益; $z_\lambda(k) \in \mathbb{R}^q$ 为残差信号, 用于逼近攻击信号 $a(k)$. 定义 $e_\lambda(k) = z_\lambda(k) - a(k)$, $\hat{\eta}_\lambda(k) = \text{col}\{x(k), \hat{x}_\lambda(k)\}$, $v(k) = \text{col}\{\omega(k), a(k)\}$, 可得到增广估计误差为

$$\begin{aligned} \hat{\eta}_\lambda(k+1) &= \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \eta_i(\theta(k)) \eta_j(\theta(k)) \times \\ & \quad [\bar{A}_{ij\lambda} \hat{\eta}_\lambda(k) + \bar{B}_{ij\lambda} v(k)], \\ e_\lambda(k) &= \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \eta_i(\theta(k)) \eta_j(\theta(k)) \times \\ & \quad [\bar{C}_{ij\lambda} \hat{\eta}_\lambda(k) + \bar{D}_{ij\lambda} v(k)]. \end{aligned} \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{A}_{ij\lambda} &= \begin{bmatrix} \Phi_i & 0 \\ M_{i\lambda} C_{j\lambda} & G_{i\lambda} \end{bmatrix}, \quad \bar{B}_{ij\lambda} = \begin{bmatrix} E_i & B_i \\ M_{i\lambda} D_{j\lambda} & 0 \end{bmatrix}, \\ \bar{C}_{ij\lambda} &= [0 \quad L_{i\lambda}], \quad \bar{D}_{ij\lambda} = [0 \quad -I]. \end{aligned}$$

对于局部状态估计器 $\hat{x}_\lambda(k)$, 关键在于设计估计器增益矩阵 $G_{i\lambda}$ 、 $M_{i\lambda}$ 、 $L_{i\lambda}$, 以确保增广估计误差系统 (8) 能够满足 H_∞ 干扰抑制水平界限.

由于通信带宽有限, 引入对数量化器 $\chi_\lambda \triangleq q_\lambda(\cdot)$ 对残差信号 $z_\lambda(k)$ 进行量化, 量化器 χ_λ 的量化水平集合表示为 $U_\lambda = \{\pm u_h^{(\lambda)} : u_h^{(\lambda)} = \rho_\lambda^h u_0^{(\lambda)}, h = 0, \pm 1, \pm 2, \dots\} \cup \{0\}$ ($0 < \rho_\lambda < 1, u_0^{(\lambda)} > 0$), 其中 ρ_λ 为量化密度. 对数量化器 $q(\cdot)$ 定义为

$$q_\lambda(v) = \begin{cases} u_h^{(\lambda)}, & \frac{1}{1 + \delta_\lambda} u_h^{(\lambda)} < v < \frac{1}{1 - \delta_\lambda} u_h^{(\lambda)}; \\ 0, & v = 0; \\ -q_\lambda(-v), & v < 0. \end{cases} \quad (9)$$

这里: $\delta_\lambda = \frac{1 - \rho_\lambda}{1 + \rho_\lambda}$ ($0 < \delta_\lambda < 1$). 由文献 [28] 可知, $q_\lambda(v)$ 可表示为 $q_\lambda(v) = (1 + \tilde{\Delta}_\lambda)v$, 其中 $\tilde{\Delta}_\lambda$ 满足 $|\tilde{\Delta}_\lambda| \leq \delta_\lambda$. 设 $z_{r_\lambda}(k)$ 表示局部量化估计, 则由式 (9), 可得到

$$z_{r_\lambda}(k) = q_\lambda(z_\lambda(k)) = (1 + \tilde{\Delta}_\lambda)z_\lambda(k). \quad (10)$$

为使得局部量化估计 $z_{r_\lambda}(k)$ 与 FDI 攻击信号 $a(k)$ 间的误差尽可能地缩小, 局部量化估计的分布式 H_∞ 融

合计算如下所示:

$$z_{r_0}(k) = \sum_{\lambda=1}^N W_{\lambda} z_{r_{\lambda}}(k). \quad (11)$$

这里: 加权矩阵 W_1, W_2, \dots, W_N 满足 $\sum_{\lambda=1}^N W_{\lambda} = I$, 将在后文第3节中进行设计. 由式(11), 可得到融合误差 $e(k) = z_{r_0}(k) - a(k)$, 可表示为

$$e(k) = \sum_{\lambda=1}^M W_{\lambda} (1 + \tilde{\Delta}_{\lambda}) z_{\lambda}(k) - a(k).$$

定义

$$\Upsilon(k) = \text{col}\{\hat{x}_1(k), \hat{x}_2(k), \dots, \hat{x}_N(k), x(k)\},$$

可得到融合增广误差系统为

$$\begin{aligned} \Upsilon(k+1) &= \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \eta_i(\theta(k)) \eta_j(\theta(k)) \times \\ &\quad [\tilde{A}_{ij} \Upsilon(k) + \tilde{B}_{ij} v(k)], \\ e(k) &= \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \eta_i(\theta(k)) \eta_j(\theta(k)) \times \\ &\quad [\tilde{C}_{ij} \Upsilon(k) + \tilde{D}_{ij} v(k)]. \end{aligned} \quad (12)$$

其中

$$\begin{aligned} \tilde{A}_{ij} &= \begin{bmatrix} G_{i1} & 0 & \dots & 0 & M_{i1} C_{j1} \\ 0 & G_{i2} & \dots & 0 & M_{i2} C_{j2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & G_{iN} & M_{iN} C_{jN} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \Phi_i \end{bmatrix}, \\ \tilde{B}_{ij} &= \begin{bmatrix} M_{i1} D_{j1} & 0 \\ M_{i2} D_{j2} & 0 \\ \vdots & \vdots \\ M_{iN} D_{jN} & 0 \\ E_i & B_i \end{bmatrix}, \quad \tilde{C}_{ij} = \bar{C}_{ij} + \sum_{\lambda=1}^N \tilde{C}_{\tilde{\Delta}_{ij\lambda}}, \\ \tilde{C}_{\tilde{\Delta}_{ij\lambda}} &= [\underbrace{0 \dots 0}_{\lambda-1} \quad W_{\lambda} \tilde{\Delta}_{\lambda} L_{i\lambda} \quad \underbrace{0 \dots 0}_{N+1-\lambda}], \\ \tilde{D}_{ij} &= [0 \quad -I]. \end{aligned}$$

为了检测 FDI 攻击的发生, 为融合检测器和每个局部检测器构造如下残差评估函数:

$$\Theta_{\lambda}(k) = \frac{1}{k} \left\{ \sum_{t=0}^k z_{r_{\lambda}}^T(t) z_{r_{\lambda}}(t) \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad \lambda = 0, 1, \dots, N. \quad (13)$$

选择残差阈值 $\Theta_{\text{th}\lambda}$ 为

$$\Theta_{\text{th}\lambda} = \sup_{v(k) \in l_2, a(k)=0} \Theta_{\lambda}(k), \quad \lambda = 0, 1, \dots, N. \quad (14)$$

由式(13)和(14), 当残差评估函数 $\Theta_{\lambda}(k)$ 的值大于给定阈值 $\Theta_{\text{th}\lambda}$ 时, 将触发攻击警报, 即

$$\begin{aligned} \Theta_{\lambda}(k) > \Theta_{\text{th}\lambda} &\Rightarrow \text{有FDI攻击} \Rightarrow \text{警报}, \\ \Theta_{\lambda}(k) \leq \Theta_{\text{th}\lambda} &\Rightarrow \text{无FDI攻击}. \end{aligned} \quad (15)$$

注2 式(13)中的 $\Theta_0(k)$ 和(14)中的 $\Theta_{\text{th}0}$ 分别为融合检测器的残差评估函数及其评估阈值. 此外, 融合检测器和每个局部检测器通过分别计算式(13)和(14), 然后判断条件(15)来实现.

本文的首要目标是设计式(7)中的局部量化估计增益 $G_{i\lambda}, M_{i\lambda}, L_{i\lambda}$, 使得在以下约束条件下, H_{∞} 干扰抑制水平界限 γ_{λ}^2 最小化:

$$\sup_{v(k) \neq 0} \frac{\|e_{\lambda}(k)\|_2}{\|v(k)\|_2} < \gamma_{\lambda}^2,$$

其中在零初始条件下, $\gamma_{\lambda}^2 > 0$. 由量化策略(9)和期望的融合估计算法(11), 本文的第2个目标是找到一组最优的加权矩阵 W_1, W_2, \dots, W_N , 使得系统(12)的 H_{∞} 干扰抑制水平界限 γ_{λ}^2 最小化, 即

$$\begin{aligned} \{W_1, \dots, W_N\} &= \arg \min \gamma; \\ \text{s.t. } \|\tilde{C}_{ij}(sI - \tilde{A}_{ij})^{-1} \tilde{B}_{ij} + \tilde{D}_{ij}\|_{\infty} &< \gamma_{\lambda}^2. \end{aligned}$$

注3 尽管每个局部量化估计(10)可用于设计局部检测器, 以识别 FDI 攻击, 但是阈值的设定对于检测精度至关重要. 因此, 本文引入了分布式传感器融合, 通过融合检测器提升了对攻击的响应能力, 相较于单一局部检测器, 表现更加敏感.

3 主要结果

本节对增广估计误差系统(8)推导出局部 H_{∞} 攻击检测估计器随机稳定的充分条件, 以及对应检测器的增益矩阵. 根据所提出 H_{∞} 滤波理论, 推导出在通信约束下的融合检测性能的最优条件, 实现了 T-S 模糊系统的融合检测器的最终设计. 在给出结果前, 先给出相关定义和引理.

定义1 若存在一个与初始条件 $\hat{\eta}_{\lambda}(0)$ 无关的有限值 $V > 0$, 使得对于任意初始条件 $\hat{\eta}_{\lambda}(0)$, 满足

$$\hat{\eta}_{\lambda}(0) E \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \hat{\eta}_{\lambda}(k)^T \hat{\eta}_{\lambda}(k) \mid \hat{\eta}_{\lambda}(0) \right\} < \hat{\eta}_{\lambda}(0)^T V \hat{\eta}_{\lambda}(0),$$

则称式(8)中的残差系统在均方意义下是随机稳定的 ($v_k \equiv 0$).

引理1 (Schur 补) 记 $\Omega = \begin{bmatrix} \mathcal{R}_{11} & \mathcal{R}_{12} \\ \mathcal{R}_{21} & \mathcal{R}_{22} \end{bmatrix}$, 其中 $\mathcal{R}_{ii} (i = 1, 2)$ 满足以下不等式:

$$\begin{cases} \mathcal{R} < 0; \\ \mathcal{R}_{11} < 0, \mathcal{R}_{22} - \mathcal{R}_{12} \mathcal{R}_{11}^{-1} \mathcal{R}_{12}^T < 0; \\ \mathcal{R}_{22} < 0, \mathcal{R}_{11} - \mathcal{R}_{12} \mathcal{R}_{22}^{-1} \mathcal{R}_{12}^T < 0. \end{cases}$$

引理2 给定适当维数的矩阵 G_1, G_2, G_3 , 可得到

$$G_1 + G_2 F G_3 + G_3^T F^T G_2^T < 0,$$

其中 G_1 是对称的.

对于所有满足 $F^T F < I$ 的矩阵 F 成立, 当且仅当存在一个标量 $\varepsilon > 0$, 使得

$$G_1 + \varepsilon G_2 G_2^T + \varepsilon^{-1} G_3^T G_3 < 0.$$

定理 1 考虑式 (4) 和 (6) 中的模糊系统, 假设式 (7) 中的 FDI 攻击检测估计器矩阵 $G_{i\lambda}$ 、 $M_{i\lambda}$ 和 $L_{i\lambda}$ 已知. 若式 (8) 中的残差系统在具有保证性能 γ 的情况下是随机稳定的, 则存在 $P_l > 0$ 满足以下不等式:

$$\begin{bmatrix} -I & 0 & \bar{C}_{ij\lambda} & \bar{D}_{ij\lambda} \\ * & \Pi_l & \Pi^T \bar{A}_{ij\lambda} & \Pi^T \bar{B}_{ij\lambda} \\ * & * & -\bar{P}_i & 0 \\ * & * & * & -\gamma_\lambda I \end{bmatrix} < 0. \quad (16)$$

其中: $\Pi_l = P_l - \Pi^T - \Pi$, $\gamma_\lambda = \gamma_\lambda^2$, $i, j, l = 1, 2, \dots, r$.

证明 假设存在实对称正定矩阵 $P_l (l = 1, 2, \dots, r)$ 和一个非奇异矩阵 Π , 满足不等式 (16). 根据文献 [29] 的引理 2 和式 (16), 下列不等式成立:

$$\begin{bmatrix} -I & 0 & \bar{C}_{ij\lambda} & \bar{D}_{ij\lambda} \\ * & -P_l & P_l \bar{A}_{ij\lambda} & P_l \bar{B}_{ij\lambda} \\ * & * & -P_i & 0 \\ * & * & * & -\gamma_\lambda I \end{bmatrix} < 0. \quad (17)$$

首先, 证明式 (8) 中增广误差系统的随机稳定性. 定义性能指标为

$$J = \hat{\eta}_\lambda(k+1)^T \sum_{l=1}^r \eta_l(\theta(k+1)) P_l \hat{\eta}_\lambda(k+1) - \hat{\eta}_\lambda(k)^T \sum_{i=1}^r \eta_i(\theta(k)) P_i \hat{\eta}_\lambda(k). \quad (18)$$

当 $v(k) = 0$ 时, 可得到

$$\begin{aligned} J &= \sum_{l=1}^r \eta_l(\theta(k+1)) \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{s=1}^r \sum_{t=1}^r \eta_i(\theta(k)) \times \\ &\quad \eta_j(\theta(k)) \eta_s(\theta(k)) \eta_t(\theta(k)) \bar{A}_{ij\lambda} \hat{\eta}_\lambda(k)^T P_l \bar{A}_{st\lambda} \times \\ &\quad \hat{\eta}_\lambda(k) - \hat{\eta}_\lambda(k)^T \sum_{i=1}^r \eta_i(\theta(k)) P_i \hat{\eta}_\lambda(k) \leq \\ &\quad \hat{\eta}_\lambda(k)^T \sum_{l=1}^r \eta_l(\theta(k+1)) \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \eta_i(\theta(k)) \times \\ &\quad \eta_j(\theta(k)) \{ \bar{A}_{ij\lambda}^T P_l \bar{A}_{ij\lambda} - P_i \} \hat{\eta}_\lambda(k). \end{aligned} \quad (19)$$

定义

$$\begin{aligned} \bar{\Psi}_{ijl} &= \bar{A}_{ij\lambda}^T P_l \bar{A}_{ij\lambda} - P_i, \\ \bar{\Psi}(k) &= \sum_{l=1}^r \eta_l(\theta(k+1)) \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \eta_i(\theta(k)) \eta_j(\theta(k)). \end{aligned} \quad (20)$$

考虑式 (20), 可得到 $J \leq \hat{\eta}_\lambda(k)^T \bar{\Psi}(k) \bar{\Psi}_{ijl} \hat{\eta}_\lambda(k)$, 即

$$\begin{aligned} J &= \hat{\eta}_\lambda(k+1)^T \sum_{l=1}^r \eta_l(\theta(k+1)) P_l \hat{\eta}_\lambda(k+1) - \\ &\quad \hat{\eta}_\lambda(k)^T \sum_{i=1}^r \eta_i(\theta(k)) P_i \hat{\eta}_\lambda(k) \leq \\ &\quad \hat{\eta}_\lambda(k)^T \bar{\Psi}(k) \bar{\Psi}_{ijl} \hat{\eta}_\lambda(k). \end{aligned} \quad (21)$$

当 $k = 0, 1, \dots, \beta$ 时, 对式 (21) 不等号两边分别求和, 对于任意 $\beta > 0$, 可得到

$$\begin{aligned} &\hat{\eta}_\lambda(\beta+1)^T \sum_{l=1}^r \eta_l(\theta(\beta+1)) P_l \hat{\eta}_\lambda(\beta+1) - \\ &\hat{\eta}_\lambda(0)^T \sum_{i=1}^r \eta_i(\theta(0)) P_i \hat{\eta}_\lambda(0) \leq \\ &\sum_{k=0}^{\beta} \sum_{l=1}^r \eta_l(\theta(\beta+1)) \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \eta_i(\theta(k)) \eta_j(\theta(k)) \times \\ &\hat{\eta}_\lambda(k)^T \bar{\Psi}_{ijl} \hat{\eta}_\lambda(k) \leq \\ &\sum_{k=0}^{\beta} \sum_{l=1}^r \eta_l(\theta(\beta+1)) \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \eta_i(\theta(k)) \eta_j(\theta(k)) \times \\ &(\lambda_{\max}(\bar{\Psi}_{ijl}) \hat{\eta}_\lambda(k)^T \hat{\eta}_\lambda(k)) = \\ &\sum_{k=0}^{\beta} \max_{i,j,l=1,2,\dots,r} (\lambda_{\max}(\bar{\Psi}_{ijl})) \hat{\eta}_\lambda(k)^T \hat{\eta}_\lambda(k). \end{aligned}$$

由上述不等式, 不难得出, 对于 $i, j, l = 1, 2, \dots, r$ 和 β , 以下不等式成立:

$$\begin{aligned} &\hat{\eta}_\lambda(\beta+1)^T P_l \hat{\eta}_\lambda(\beta+1) - \hat{\eta}_\lambda(0)^T P_i \hat{\eta}_\lambda(0) \leq \\ &\max_{i,j,l=1,2,\dots,r} (\lambda_{\max}(\bar{\Psi}_{ijl})) \sum_{k=0}^{\beta} \hat{\eta}_\lambda(k)^T \hat{\eta}_\lambda(k). \end{aligned}$$

当 $\beta \rightarrow \infty$ 时, 可得到

$$\begin{aligned} &\hat{\eta}_\lambda(\infty)^T P_l \hat{\eta}_\lambda(\infty) - \hat{\eta}_\lambda(0)^T P_i \hat{\eta}_\lambda(0) \leq \\ &\max_{i,j,l=1,2,\dots,r} (\lambda_{\max}(\bar{\Psi}_{ijl})) \sum_{k=0}^{\infty} \hat{\eta}_\lambda(k)^T \hat{\eta}_\lambda(k). \end{aligned}$$

考虑非零初始条件, 且有 $\hat{\eta}_\lambda(\infty)^T P_l \hat{\eta}_\lambda(\infty) \geq 0$, 可得到

$$\begin{aligned} &\sum_{k=0}^{\infty} \hat{\eta}_\lambda(k)^T \hat{\eta}_\lambda(k) \leq \\ &(-\max_{i,j,l=1,2,\dots,r} (\lambda_{\max}(\bar{\Psi}_{ijl})))^{-1} \times \hat{\eta}_\lambda(0)^T P_i \hat{\eta}_\lambda(0) \leq \\ &\hat{\eta}_\lambda(0)^T (-\max_{i,j,l=1,2,\dots,r} (\lambda_{\max}(\bar{\Psi}_{ijl})))^{-1} \times \\ &\max_{\lambda=1,2,\dots,r} (\lambda_{\max}(P_i)) \hat{\eta}_\lambda(0) = \\ &\sigma \hat{\eta}_\lambda(0)^T \hat{\eta}_\lambda(0). \end{aligned}$$

其中

$$\sigma \triangleq -\left(\max_{i,j,l=1,2,\dots,r} (\lambda_{\max}(\bar{\Psi}_{ijl}))\right)^{-1} \times \max_{\lambda=1,2,\dots,r} (\lambda_{\max}(P_i)),$$

且 $\hat{\eta}_\lambda(0)$ 为初始条件. 由引理 1 和式 (17), 可得到 $\bar{\Psi}_{ijl} < 0$, 因此, $\sigma > 0$. 根据定义 1, 增广误差系统在均方

意义下是随机稳定的.

接下来证明增广误差系统 (8) 满足 H_∞ 性能, 假设初始条件为零, 且 $v(k) \neq 0$, 定义

$$\begin{aligned} \bar{J} = & \hat{\eta}_\lambda(k+1)^T \sum_{l=1}^r \eta_l(\theta(k+1)) P_l \hat{\eta}_\lambda(k+1) - \\ & \hat{\eta}_\lambda(k)^T \sum_{i=1}^r \eta_i(\theta(k)) P_i \hat{\eta}_\lambda(k) + e_\lambda(k)^T e_\lambda(k) - \\ & \gamma_\lambda^2 v(k)^T v(k). \end{aligned} \quad (22)$$

由式 (8), 可得到

$$\begin{aligned} \hat{\eta}_\lambda(k+1)^T \sum_{l=1}^r \eta_l(\theta(k+1)) P_l \hat{\eta}_\lambda(k+1) \leq & \\ \sum_{l=1}^r \eta_l(\theta(k+1)) \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \eta_i(\theta(k)) \eta_j(\theta(k)) \xi(k)^T \times & \\ \begin{bmatrix} \bar{A}_{ij\lambda}^T \\ \bar{B}_{ij\lambda}^T \end{bmatrix} P_l [\bar{A}_{ij\lambda} \quad \bar{B}_{ij\lambda}] \xi(k), & \\ e(k)_\lambda^T e(k)_\lambda = & \\ \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{s=1}^r \sum_{t=1}^r \eta_i(\theta(k)) \eta_j(\theta(k)) \eta_s(\theta(k)) \eta_t(\theta(k)) \times & \\ \xi(k)^T \begin{bmatrix} \bar{C}_{ij\lambda}^T \\ \bar{D}_{ij\lambda}^T \end{bmatrix} \times [\bar{C}_{st\lambda} \quad \bar{D}_{st\lambda}] \xi(k) \leq & \\ \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \eta_i(\theta(k)) \eta_j(\theta(k)) \xi(k)^T \times & \\ \begin{bmatrix} \bar{C}_{ij\lambda}^T \\ \bar{D}_{ij\lambda}^T \end{bmatrix} [\bar{C}_{ij\lambda} \quad \bar{D}_{ij\lambda}] \xi(k), & \end{aligned}$$

其中 $\xi(k) = [\hat{\eta}_\lambda(k)^T \quad v(k)^T]^T$. 将上式代入式 (22), 有

$$\begin{aligned} \bar{J} \leq & \sum_{l=1}^r \eta_l(\theta(k+1)) \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \eta_i(\theta(k)) \eta_j(\theta(k)) \times \\ & \xi(k)^T \left\{ \begin{bmatrix} \bar{A}_{ij\lambda}^T \\ \bar{B}_{ij\lambda}^T \end{bmatrix} P_l [\bar{A}_{ij\lambda} \quad \bar{B}_{ij\lambda}] + \right. \\ & \left. \begin{bmatrix} \bar{C}_{ij\lambda}^T \\ \bar{D}_{ij\lambda}^T \end{bmatrix} [\bar{C}_{ij\lambda} \quad \bar{D}_{ij\lambda}] \right\} \xi(k) - \\ & \xi(k)^T \begin{bmatrix} P_i & 0 \\ 0 & \gamma_\lambda^2 I \end{bmatrix} \xi(k). \end{aligned} \quad (23)$$

根据引理 1, 式 (17) 和 (23), 可得到 $\bar{J} \leq 0$, 即

$$\begin{aligned} \hat{\eta}_\lambda(k+1)^T \sum_{l=1}^r \eta_l(\theta(k+1)) P_l \hat{\eta}_\lambda(k+1) - \\ \hat{\eta}_\lambda(k)^T \sum_{i=1}^r \eta_i(\theta(k)) P_i \hat{\eta}_\lambda(k) + e_\lambda(k)^T e_\lambda(k) - \\ \gamma_\lambda^2 v(k)^T v(k) \leq 0. \end{aligned}$$

对于 $k = 0, 1, \dots$, 对上述不等式的等号两边求和,

考虑零初始条件以及 $\hat{\eta}_\lambda(\infty)^T \sum_{i=1}^r \eta_i(\theta(\infty)) P_i \hat{\eta}_\lambda(\infty) > 0$, 可得到

$$\sum_{k=0}^{\infty} e_\lambda(k)^T e_\lambda(k) - \gamma_\lambda^2 \sum_{k=0}^{\infty} v(k)^T v(k) \leq 0. \quad \square$$

在得到定理 2 前, 首先定义变量

$$\begin{aligned} \Phi_{1ij} &= [0 \quad Y_{i\lambda}], \quad \Phi_{2ij} = [0 \quad -I], \\ \Phi_{3ij} &= \begin{bmatrix} P_{1l} - R - R^T & P_{2l} - S - T \\ * & P_{3l} - T - T^T \end{bmatrix}, \\ \Phi_{4ij} &= \begin{bmatrix} R^T \Phi_i + X_{i\lambda} C_j & Z_{i\lambda} \\ S^T \Phi_i + X_{i\lambda} C_j & Z_{i\lambda} \end{bmatrix}, \\ \Phi_{5ij} &= \begin{bmatrix} R^T E_i + X_{i\lambda} D_j & R^T B_i \\ S^T E_i + X_{i\lambda} D_j & S^T B_i \end{bmatrix}, \\ \Phi_{6ij} &= - \begin{bmatrix} P_{1i} & P_{2i} \\ * & P_{3i} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

定理 2 对于给定参数 $\delta_i > 0$, 式 (7) 中的模糊最优估计器增益 $G_{i\lambda}$, $M_{i\lambda}$ 和 $L_{i\lambda}$ 由以下公式计算:

$$\begin{bmatrix} G_{i\lambda} & M_{i\lambda} \\ L_{i\lambda} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T^{-1} & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{i\lambda} & X_{i\lambda} \\ Y_{i\lambda} & 0 \end{bmatrix}. \quad (24)$$

其中: T , $X_{i\lambda}$, $Y_{i\lambda}$, $Z_{i\lambda}$ 通过求解以下凸优化问题得到:

$$\begin{aligned} \min_V \hat{\gamma}_\lambda; \\ \text{s.t.} \quad \begin{bmatrix} -I & 0 & \Phi_{1ij} & \Phi_{2ij} \\ * & \Phi_{3ij} & \Phi_{4ij} & \Phi_{5ij} \\ * & * & \Phi_{6ij} & 0 \\ * & * & * & -\hat{\gamma}_\lambda I \end{bmatrix} < 0. \end{aligned} \quad (25)$$

这里: V 表示 LMI 的决策变量 P_{1l} , P_{2l} , P_{3l} , P_{1i} , P_{2i} , P_{3i} , R , S , T , $X_{i\lambda}$, $Y_{i\lambda}$, $Z_{i\lambda}$. 接着, 通过求解以下凸优化问题, 可获得一组最优的加权矩阵 $W_\lambda (\lambda = 1, 2, \dots, N)$:

$$\begin{aligned} \min_{\tilde{P}_i > 0} \hat{\gamma}_\lambda; \\ \text{s.t.} \quad \begin{bmatrix} \Psi_{1ij\lambda} & \Psi_{2ij\lambda} & 0 \\ * & \Psi_{3ij\lambda} & \Psi_{4ij\lambda} \\ * & * & \Psi_{5ij\lambda} \end{bmatrix} < 0. \end{aligned} \quad (26)$$

其中

$$H_\lambda \triangleq \text{diag} \left[\underbrace{0 \quad \dots \quad 0}_{\lambda-1} \quad L_{i\lambda}^T \delta_\lambda \quad \underbrace{0 \quad \dots \quad 0}_{N+1-\lambda} \right],$$

$$Q_\lambda \triangleq \left[\underbrace{0 \quad \dots \quad 0}_{\lambda-1} \quad W_\lambda \quad \underbrace{0 \quad \dots \quad 0}_{N+1-\lambda} \right],$$

$$\Psi_{1ij\lambda} = \text{diag} \{ -\varepsilon_N I, \dots, -\varepsilon_1 I \},$$

$$\Psi_{2ij\lambda} = [0 \quad \Psi_{6ij\lambda} \quad 0 \quad 0],$$

$$\Psi_{3ij\lambda} = \begin{bmatrix} -\tilde{P}_i & \tilde{P}_i \tilde{A}_{ij} & \tilde{P}_i \tilde{B}_{ij} & 0 \\ * & -\tilde{P}_i & 0 & \tilde{C}_{ij}^T \\ * & * & -\hat{\gamma}_\lambda I & \tilde{D}_{ij}^T \\ * & * & * & -I \end{bmatrix},$$

$$\Psi_{4_{ij\lambda}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \Psi_{7_{ij\lambda}} \end{bmatrix}, \Psi_{5_{ij\lambda}} = \text{diag}\{\varepsilon_1 I, \varepsilon_2 I, \dots, \varepsilon_N I\},$$

$$\Psi_{6_{ij\lambda}} = \text{col}\{\varepsilon_N H_N^T, \dots, \varepsilon_1 H_1^T\},$$

$$\Psi_{7_{ij\lambda}} = [Q_1, Q_2, \dots, Q_N].$$

证明 将 P_λ, P_i, Π 划分如下:

$$P_l = \begin{bmatrix} P_{1l} & P_{2l} \\ * & P_{3l} \end{bmatrix}, P_i = \begin{bmatrix} P_{1i} & P_{2i} \\ * & P_{3i} \end{bmatrix},$$

$$\Pi = \begin{bmatrix} \Pi_1 & \Pi_2 \\ \Pi_3 & \Pi_4 \end{bmatrix}.$$

引入如下矩阵:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & \Pi_4^{-1} \Pi_3 \end{bmatrix},$$

$$\bar{P}_l = \begin{bmatrix} \bar{P}_{1l} & \bar{P}_{2l} \\ * & \bar{P}_{3l} \end{bmatrix} = \Gamma^T P_l \Gamma,$$

$$\bar{P}_i = \begin{bmatrix} \bar{P}_{1i} & \bar{P}_{2i} \\ * & \bar{P}_{3i} \end{bmatrix} = \Gamma^T P_i \Gamma. \quad (27)$$

通过对式 (16) 进行对角线变换 $\text{diag}\{I, \Gamma, \Gamma, I\}$, 可得到

$$\begin{bmatrix} -I & 0 & \bar{\Phi}_{1ij} & \bar{D}_{ij\lambda} \\ * & \bar{\Phi}_{2ij} & \bar{\Phi}_{3ij} & \bar{\Phi}_{4ij} \\ * & * & -\bar{P}_i & 0 \\ * & * & * & -\gamma_\lambda^2 I \end{bmatrix} < 0. \quad (28)$$

其中

$$\bar{\Phi}_{1ij} = [0 \quad L_{i\lambda} \Pi_4^{-1} \Pi_3], \bar{\Phi}_{2ij} = \begin{bmatrix} \bar{\Phi}_{5ij} & \bar{\Phi}_{6ij} \\ * & \bar{\Phi}_{7ij} \end{bmatrix},$$

$$\bar{\Phi}_{3ij} = \begin{bmatrix} \Pi_1^T \Phi_i + \Pi_3^T M_{i\lambda} C_{j\lambda} & \bar{\Phi}_{8ij} \\ \Pi_3^T \Pi_4^{-T} \Pi_2^T \Phi_i + \Pi_3^T M_{i\lambda} C_{j\lambda} & \bar{\Phi}_{9ij} \end{bmatrix},$$

$$\bar{\Phi}_{4ij} = \begin{bmatrix} \Pi_1^T E_i + \Pi_3^T M_{i\lambda} D_{j\lambda} & \Pi_1^T B_i \\ \Pi_3^T \Pi_4^{-T} \Pi_2^T + \Pi_3^T M_{i\lambda} D_{j\lambda} & \Pi_3^T \Pi_4^{-T} \Pi_2^T B_i \end{bmatrix},$$

$$\bar{\Phi}_{5ij} = \bar{P}_{1l} - \Pi_1 - \Pi_1^T,$$

$$\bar{\Phi}_{6ij} = \bar{P}_{2l} - \Pi_2 \Pi_4^{-1} \Pi_3 - \Pi_3^T \Pi_4^{-1} \Pi_3,$$

$$\bar{\Phi}_{7ij} = \bar{P}_{3l} - \Pi_3^T \Pi_4^{-1} \Pi_3 - \Pi_3^T \Pi_4^{-T} \Pi_3,$$

$$\bar{\Phi}_{8ij} = \Pi_3^T G_{i\lambda} \Pi_4^{-1} \Pi_3,$$

$$\bar{\Phi}_{9ij} = \Pi_3^T G_{i\lambda} \Pi_4^{-1} \Pi_3.$$

定义

$$R = \Pi_1, S = \Pi_2 \Pi_4^{-1} \Pi_3, T = \Pi_3^T \Pi_4^{-1} \Pi_3,$$

$$X_{i\lambda} = \Pi_3^T M_{i\lambda}, Y_{i\lambda} = L_{i\lambda} \Pi_4^{-1} \Pi_3,$$

$$Z_{i\lambda} = \Pi_3^T G_{i\lambda} \Pi_4^{-1} \Pi_3. \quad (29)$$

将式 (29) 代入 (28), 可得到 (25). 由式 (27) 和 (29), 可推导出

$$\Pi = \begin{bmatrix} R & S \Pi_3^{-1} \Pi_4 \\ \Pi_3 & \Pi_4 \end{bmatrix}, G_{i\lambda} = \Pi_3^{-T} Z_{i\lambda} \Pi_3^{-1} \Pi_4,$$

$$P_i = \Gamma^{-T} \bar{P}_i \Gamma^{-1}, M_{i\lambda} = \Pi_3^{-T} X_{i\lambda},$$

$$L_{i\lambda} = Y_{i\lambda} \Pi_3^{-1} \Pi_4. \quad (30)$$

通过将式 (30) 中的参数代入增广误差系统 (8) 的传递函数, 并考虑关系 $T = \Pi_3^T \Pi_4^{-1} \Pi_3$, 可得到

$$T_{yri}(s) = L_{i\lambda}(sI - G_{i\lambda})^{-1} M_{i\lambda} =$$

$$Y_{i\lambda}(sI - T^{-1} Z_{i\lambda})^{-1} T^{-1} X_{i\lambda}.$$

这意味着 LSE 参数可通过式 (24) 计算. 接下来证明凸优化问题 (26), 根据增广融合误差系统 (12) 定义指标

$$\hat{J} = \bar{\eta}_\lambda(k+1)^T \sum_{l=1}^r \eta_l(\theta(k+1)) \tilde{P}_i \bar{\eta}_\lambda(k+1) -$$

$$\bar{\eta}_\lambda(k)^T \sum_{i=1}^r \eta_i(\theta(k)) \tilde{P}_i \bar{\eta}_\lambda(k) + e(k)^T e(k) -$$

$$\gamma^2 v(k)^T v(k).$$

与定理 1 的证明类似, 可得到融合增广误差系统满足式 (8) H_∞ 性能, 且以下不等式成立:

$$\begin{cases} \tilde{A}_{ij}^T \tilde{P}_i \tilde{A}_{ij} - \tilde{P}_i + \tilde{C}_{ij}^T \tilde{C}_{ij} - \gamma^{-2} \Lambda_1 \Lambda_2^{-1} \Lambda_1^T < 0, \\ \Lambda_2 < 0. \end{cases} \quad (31)$$

其中

$$\Lambda_1 = \tilde{A}_{ij}^T \tilde{P}_i \tilde{B}_{ij} + \tilde{C}_{ij}^T \tilde{D}_{ij},$$

$$\Lambda_2 = \gamma^{-2} (\tilde{D}_{ij}^T \tilde{D}_{ij} + \tilde{B}_{ij}^T \tilde{P}_i \tilde{B}_{ij}) - I.$$

由引理 1, 式 (31) 等价于

$$\begin{bmatrix} -\tilde{P}_i & \tilde{P}_i \tilde{A}_{ij} & \tilde{P}_i \tilde{B}_{ij} & 0 \\ * & -\tilde{P}_i & 0 & \tilde{C}_{ij}^T \\ * & * & -\gamma^2 I & \tilde{D}_{ij}^T \\ * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0, \quad (32)$$

设 $F_{\Delta} \Delta_\lambda = \frac{\tilde{\Delta}_\lambda}{\delta_\lambda}$, 满足 $F_{\Delta} \tilde{\Delta}_\lambda F_{\Delta}^T \leq I$, 则有

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \tilde{C}_{\Delta_\lambda}^T \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ H_\lambda \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} F_{\Delta} [0 \quad 0 \quad 0 \quad Q_\lambda^T],$$

这里 $F_{\Delta} \triangleq \text{diag}\{F_{\Delta_1}, F_{\Delta_2}, \dots, F_{\Delta_N}, I\}$. 由引理 2, 不等式 (32) 成立, 当且仅当存在一个标量 $\varepsilon_\lambda > 0$, 使得以下不等式成立:

$$\begin{bmatrix} -\tilde{P}_i & \tilde{P}_i \tilde{A}_{ij} & \tilde{P}_i \tilde{B}_{ij} & 0 \\ * & -\tilde{P}_i & 0 & \tilde{C}_{ij}^T \\ * & * & -\hat{\gamma} I & \tilde{D}_{ij}^T \\ * & * & * & -I \end{bmatrix} + \sum_{\lambda=1}^N \Xi_\lambda < 0. \quad (33)$$

其中: $\Xi_\lambda = \varepsilon_\lambda \mathcal{H}_\lambda \mathcal{H}_\lambda^T + \varepsilon_\lambda^{-1} Q_\lambda Q_\lambda^T$, $\mathcal{H}_\lambda = \text{col}\{0, H_\lambda, 0, 0\}$, $Q_\lambda = \text{col}\{0, 0, 0, Q_i\}$. 通过引理 1, 然后分别左乘和右乘 $\text{diag}\{\varepsilon_N I, \dots, \varepsilon_1 I, I\}$ 及其转置, 可以发现, 不等式 (33) 等价于 (26). \square

4 仿真分析

本节采用一个例子来验证所提出策略的有效性, 考虑到非线性质量-弹簧-阻尼系统^[30], 令采样周期 $T = 0.2\text{ s}$, 则可得到 T-S 模糊模型的系统参数为

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \begin{bmatrix} 0.7986 & -0.2078 \\ 0.1799 & 0.9784 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0.3119 \\ 0.0023 \end{bmatrix}, \\ \Phi_2 &= \begin{bmatrix} 0.7986 & -0.2078 \\ 0.1799 & 0.9784 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0.1217 \\ 0.0023 \end{bmatrix}, \\ E_1 &= E_2 = \begin{bmatrix} 0.164 \\ 0.084 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

传感器的测量矩阵取

$$\begin{aligned} C_{11} &= C_{21} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, D_{12} = D_{22} = \begin{bmatrix} 0.2 \\ 0.1 \end{bmatrix}, \\ D_{11} &= D_{21} = D_{13} = D_{23} = \begin{bmatrix} 0.4 \\ 0.2 \end{bmatrix}, \\ C_{12} &= C_{22} = C_{13} = C_{23} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

然后, 可通过使用 Matlab 中的 LMI 工具箱来求解优化问题 (25), 从而得到式 (7) 中对应的局部最优估计器增益. 接下来, 带宽约束的参数设定为 $\delta_1 = 0.8, \delta_2 = 0.5, \delta_3 = 0.6$. 通过求解凸优化问题 (26), 得到最优加权矩阵分别为 $W_1 = 0.7641, W_2 = 1.103, W_3 = 0.1256$. 在没有 FDI 攻击的情况下, 通过蒙特卡洛实验, 得到了局部和融合检测器的阈值, 如表 1 所示. 结果表明, 融合检测器的阈值低于局部检测器的阈值.

表1 T-S 模糊的 FDI 攻击检测

	阈值	检测时间/s
局部检测器1	9.985×10^{-6}	2
局部检测器2	1.817×10^{-5}	5.6
局部检测器3	1.312×10^{-5}	2.2
分布式融合检测器3	3.220×10^{-6}	0.5

通过实时 FDI 攻击检测仿真, 验证了所提出基于 T-S 模糊模型的分布式 FDI 攻击检测方法的有效性. 系统噪声 $\omega(k)$ 设定为 $\omega(k) = 0.01v(k)$, 其中 $v(k)$ 在 $[-1, 1]$ 区间内均匀分布. FDI 攻击信号 $a(k)$ 设定为

$$a(k) = \begin{cases} 3 \times \cos(1.5k), & k \geq 15; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

如图 1 ~ 图 4 所示: 虚线表示检测阈值, 实线表示残差评估函数. 攻击信号在 15 s 时引入, 此后残差评估函数开始增加. 与检测阈值的交点表示攻击被检测到的时刻. 图 1 ~ 图 3 为局部检测器检测性能. 由图 1 ~ 图 3 可见, 检测时间分别为 2 s, 5.6 s, 2.2 s. 图 4 为融合检测器检测性能, 检测时间为 0.5 s. 由此

可得, 融合检测器的响应速度快于每个局部检测器, 这与算法的预期一致. 此外, 在实际应用中, 当攻击被检测到时, 系统应触发警报, 以便操作人员或设计者能够及时采取相应的防范措施.

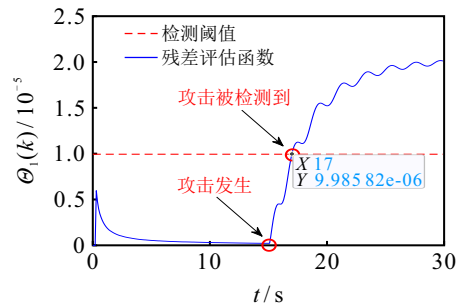


图1 局部检测器 1

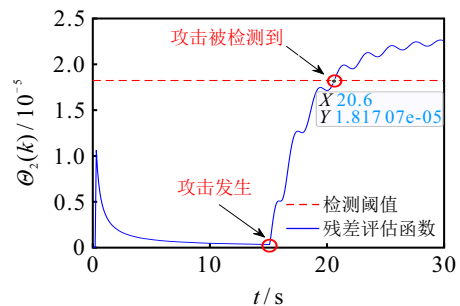


图2 局部检测器 2

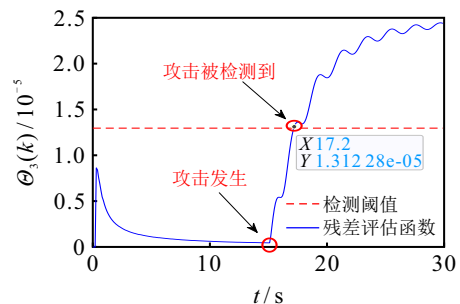


图3 局部检测器 3

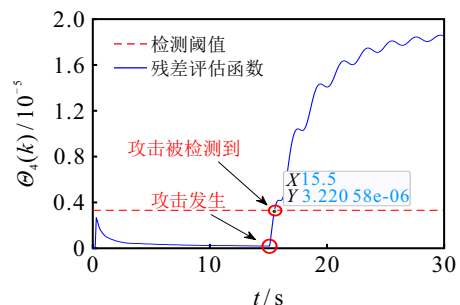


图4 融合检测器

5 结论

本文探讨了在非线性 CPSs 中, 控制输入遭遇 FDI 攻击时的报警响应问题, 并采用了多传感器融合方法. 首先, 针对 CPSs 中的非线性特征, 建立了基于 T-S 模糊模型的系统描述; 然后, 为实现实时的异常检测, 设计了一组分布于不同位置的传感器, 通过

通信网络将采集的数据传送至监控中心, 在通信带宽有限的情况下, 采用了多个有限级对数量化器来减小数据包的大小; 接着, 推导出了一种最优的融合准则, 以确保在量化误差存在时仍然能够提供更为精确的阈值; 最后, 通过对质量-弹簧-阻尼系统的仿真分析, 验证了所提出方法的有效性。

参考文献 (References)

- [1] 闫敬, 关新平, 刘妹琴. 水下/水面信息物理系统感知-通信-控制理论及其应用专刊序言[J]. 控制与决策, 2025, 40(1): 1-6.
(Yan J, Guan X P, Liu M Q. Guest editorial of special issue on sensing-communication-control theory and application for underwater/surface cyber-physical systems[J]. Control and Decision, 2025, 40(1): 1-6.)
- [2] 黄帅, 孙棣华, 赵敏. 多切入机制下基于信息物理系统的混合车群协同控制[J]. 控制与决策, 2024, 39(1): 17-25.
(Huang S, Sun D H, Zhao M. CPS-based mixed vehicle group cooperative control with multiple cut-in maneuvers[J]. Control and Decision, 2024, 39(1): 17-25.)
- [3] Derler P, Lee E A, Vincentelli A S. Modeling cyber-physical systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2012, 100(1): 13-28.
- [4] Yu W W, Wen G H, Yu X H, et al. Bridging the gap between complex networks and smart grids[J]. *Journal of Control and Decision*, 2014, 1(1): 102-114.
- [5] Lu A Y, Yang G H. False data injection attacks against state estimation in the presence of sensor failures[J]. *Information Sciences*, 2020, 508: 92-104.
- [6] Xu D Z, Zhang W M, Shi P, et al. Model-free cooperative adaptive sliding-mode-constrained-control for multiple linear induction traction systems[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2020, 50(9): 4076-4086.
- [7] Liu Y G, Xu B G, Ding Y H. Convergence analysis of cooperative braking control for interconnected vehicle systems[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 18(7): 1894-1906.
- [8] Hamdan M M, Mahmoud M S, Baroudi U A. Event-triggering control scheme for discrete time cyberphysical systems in the presence of simultaneous hybrid stochastic attacks[J]. *ISA Transactions*, 2022, 122: 1-12.
- [9] Liu C S, Deng R L, He W L, et al. Optimal coding schemes for detecting false data injection attacks in power system state estimation[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(1): 738-749.
- [10] Kuppusamy S, Joo Y H. Stabilization of interval type-2 fuzzy-based reliable sampled-data control systems[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, 52(2): 1312-1320.
- [11] Lian Z, He Y, Zhang C K, et al. Stability and stabilization of T-S fuzzy systems with time-varying delays via delay-product-type functional method[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2020, 50(6): 2580-2589.
- [12] Li H Q, Zhan X S, Yang Q S, et al. Quantized based dynamic-output-feedback guaranteed-cost control of interval-type-2 Takagi-Sugeno fuzzy systems under DoS attacks[J]. *Information Sciences*, 2024, 683: 121238.
- [13] Shi K B, Cai X, She K, et al. Stability analysis and security-based event-triggered mechanism design for T-S fuzzy NCS with traffic congestion via DoS attack and its application[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2023, 31(10): 3639-3651.
- [14] Ning Z K, Wang T, Zhang K. Dynamic event-triggered security control and fault detection for nonlinear systems with quantization and deception attack[J]. *Information Sciences*, 2022, 594: 43-59.
- [15] 马江涛, 宋燕. 带有欺骗攻击的区间二型 T-S 模糊系统的高效模型预测控制[J]. 控制与决策, 2024, 39(7): 2205-2214.
(Ma J T, Song Y. Efficient model predictive control for interval type-2 T-S fuzzy systems with deception attacks[J]. Control and Decision, 2024, 39(7): 2205-2214.)
- [16] Hu S L, Yue D, Chen X L, et al. Resilient H_∞ filtering for event-triggered networked systems under nonperiodic DoS jamming attacks[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(3): 1392-1403.
- [17] Li H Q, Yang Q S, Zhan X S, et al. Hybrid-triggered H_∞ control for networked control systems with deception attacks[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2023, 70(9): 3494-3498.
- [18] Peng C, Wu J C, Tian E G. Stochastic event-triggered H_∞ control for networked systems under denial of service attacks[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2022, 52(7): 4200-4210.
- [19] Ge H, Yue D, Xie X P, et al. A unified modeling of multi-sources cyber-attacks with uncertainties for CPS security control[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2021, 358(1): 89-113.
- [20] Li Y Z, Yang Y K, Chai T Y, et al. Stochastic detection against deception attacks in CPS: Performance evaluation and game-theoretic analysis[J]. *Automatica*, 2022, 144: 110461.
- [21] Zhan X S, Cheng L L, Wu J, et al. Optimal modified performance of MIMO networked control systems with multi-parameter constraints[J]. *ISA Transactions*, 2019, 84: 111-117.
- [22] Zhang C, Ye D, Wei M H, et al. Dynamic event-triggered resilient network-level control for microgrids subject to FDI attacks[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2024, 112(11): 9195-9207.
- [23] Lei W X, Pang Z B, Wen H, et al. FDI attack detection at the edge of smart grids based on classification of predicted residuals[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(12): 9302-9311.
- [24] He Y B, Mendis G J, Wei J. Real-time detection of false

- data injection attacks in smart grid: A deep learning-based intelligent mechanism[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(5): 2505-2516.
- [25] Du M N, Xie X P, Wang H, et al. Relaxed co-design of attack detection and set-membership estimation for T-S fuzzy systems subject to malicious attacks[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2024, 32(5): 2663-2676.
- [26] Zhang H L, Li L L, Qiao L. A control and attack detection scheme for fuzzy systems against cyber-attacks[C]. *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. Incheon, 2023: 1-6.
- [27] Guo Z Y, Shi D W, Johansson K H, et al. Optimal linear cyber-attack on remote state estimation[J]. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2017, 4(1): 4-13.
- [28] Sathishkumar M, Sakhivel R, Alzahrani F, et al. Mixed H_∞ and passivity-based resilient controller for nonhomogeneous Markov jump systems[J]. *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, 2019, 31: 86-99.
- [29] He X, Wang Z D, Ji Y D, et al. Robust fault detection for networked systems with distributed sensors[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(1): 166-177.
- [30] Li H Q, Zhan X S, Wu B, et al. Dynamic event-based output feedback tracking control of nonlinear CPSs with cyber attacks[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2024, 130: 107784.

作者简介

程伶俐 (1991-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为网络化控制系统、网络攻击, E-mail: lcheng@hbnu.edu.cn;

石榆 (2000-), 男, 硕士生, 主要研究方向为信息物理系统 FDI 攻击检测, E-mail: 18697360521@163.com;

詹习生 (1979-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为网络化控制系统、鲁棒控制、迭代学习控制, E-mail: xisheng519@126.com.