

混合网络攻击下基于记忆型动态事件触发机制 多智能体包含控制

郭建锋^{1,2}, 钱伟^{1,2†}

(1. 河南理工大学 电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000;
2. 河南省煤矿装备智能检测与控制重点实验室, 河南 焦作 454000)

摘要: 针对通信网络中存在混合网络攻击问题, 通过设计一种记忆型自适应动态事件触发机制, 研究线性多智能体系统包含控制问题. 首先, 根据网络攻击特点, 构建拒绝服务攻击 (Denial of Service, DoS) 和欺骗攻击的数学模型; 针对跟随智能体状态不可测问题, 设计状态观测器. 其次, 基于当前时刻和历史时刻的观测状态及自适应更新规则, 设计一种包含欺骗攻击状态的记忆型自适应动态事件触发机制, 该机制主动引入欺骗攻击信号以感知恶意数据篡改对系统的影响, 并能在 DoS 攻击终止时立即恢复数据传输, 从而降低网络攻击对系统性能的不利影响. 然后, 基于观测状态和事件触发机制, 设计切换型包含控制协议, 并通过模型变换构造切换误差系统, 将多智能体包含控制问题转化为切换系统的均方稳定性问题; 再通过构造分段 Lyapunov-Krasovskii (L-K) 泛函, 进行稳定性分析, 得到切换系统均方指数稳定的充分条件, 通过求解线性矩阵不等式 (Linear Matrix Inequalities, LMIs), 得到观测器及控制器增益. 最后, 通过仿真验证了所提出方法的有效性.

关键词: 多智能体系统; 包含控制; DoS 攻击; 欺骗攻击; 记忆型动态事件触发机制; Lyapunov-Krasovskii 泛函
中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2025.1007

引用格式: 郭建锋, 钱伟. 混合网络攻击下基于记忆型动态事件触发机制多智能体包含控制 [J]. 控制与决策.

Memory-based dynamic event-triggered containment control of multi-agent systems under hybrid cyber attacks

GUO Jian-feng^{1,2}, QIAN Wei^{1,2†}

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;
2. Henan Key Laboratory of Intelligent Detection and Control of Coal Mine Equipment, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: This paper addresses the containment control problem for linear multi-agent systems (MASs) under hybrid cyberattacks by designing a memory-based adaptive dynamic event-triggered mechanism. First, to accurately characterize cyberattacks, mathematical models are developed for both denial-of-service (DoS) attacks and deception attacks; concurrently, a state observer is constructed to estimate the unmeasurable states of the follower agents. Second, a memory-based adaptive dynamic event-triggered mechanism is proposed by incorporating historical observed states and adaptive updating rules, while considering the impact of cyberattacks. This mechanism proactively integrates the deception attack signal, enabling it to perceive and quantify the impact of malicious data tampering on the system. It also ensures immediate data transmission recovery upon the termination of DoS attacks, thereby substantially mitigating the adverse effects of cyber attacks on system performance. Furthermore, a switched containment control protocol is designed based on cyber defense strategies, utilizing the observed states and the event-triggered mechanism. Through model transformation, a switched error system is constructed, transforming the containment control problem into a mean-square stability problem for switched systems. Then, by constructing a piecewise Lyapunov-Krasovskii functional, stability analysis is conducted to derive sufficient conditions for mean-square exponential stability of the switched system. The observer and controller gains are obtained by solving linear matrix inequalities (LMIs). Finally, simulations are provided to verify the effectiveness of the proposed method.

Keywords: multi-agent systems; containment control; DoS attacks; deception attack; memory-based dynamic event-triggered mechanism; Lyapunov-Krasovskii functional

收稿日期: 2025-09-23; 录用日期: 2026-04-17.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62373137); 河南省高等学校重点科研项目 (24B120003).

责任编辑: 李忠奎.

†通信作者. E-mail: qwei@hpu.edu.cn.

0 引言

近年来,随着无线通信和网络化技术的迅速发展,多智能体系统越来越广泛地应用于智慧交通、智能电网、智能制造、无人机控制等众多领域.对多智能体系统协同控制的研究,已成为控制领域的研究热点问题之一^[1-4].包含控制作为协同控制的重要组成部分,因其在无人机协同避障、智慧交通中车队引导、灾害救援中安全区域控制等实际工程应用中发挥着重要作用,而受到广大学者的密切关注和深入研究^[5-6].所谓包含控制,是指针对由多个领导者和多个跟随者构成的多智能体系统,设计合适的控制协议使其能够进入由领导者构成的凸包内^[7].

关于包含控制的研究最早可追溯到2006年, Ferrari-Trecate 等学者率先提出的一种停-走控制策略,能够控制跟随者逐渐进入领导者张成的凸包内^[8].随后,包含控制问题迅速受到学者们广泛关注,目前已有大量研究成果^[9-11].文献[12]考虑系统存在扰动情况,采用状态观测器来估计状态和扰动,并基于邻接智能体的相对输出信息设计控制协议,研究了受扰多智能体系统的包含控制问题.考虑系统受固定时滞和外部干扰影响,文献[13]提出一种基于观测器的分布式包含控制方案,研究了具有切换拓扑结构的线性多智能体系统 H_∞ 包含控制.文献[14]针对领导者输入未知情况,设计分布式自适应观测器,估计领导者的全局状态,在此基础上,设计了一种包含领导者期望凸组合的预定义分布式包含控制协议,研究了有向拓扑结构下非线性多智能体系统的预定有限时间输出包含控制.

多智能体系统的分布式协同控制高度依赖于网络通信,其协同控制性能在很大程度上受通信的可靠性与安全性制约^[15-16].然而,由于系统通常采用开放式网络架构,并具有节点分布广泛、动态交互频繁等特性,使得通信链路易受到多种网络攻击的威胁.因此,研究网络攻击下的多智能体系统安全控制机制,对保障系统稳定运行具有重要的理论价值和工程意义.近年来,针对网络攻击情况下多智能体包含控制问题的研究已取得一些有价值的成果^[17-18].针对跟随者状态信息未知且遭受 DoS 攻击的多智能体系统,文献[19]基于观测信息设计了混合型事件触发机制,研究其包含控制问题,并通过改进的矩阵分离方法设计了观测器和控制器,消除了输入矩阵需列满秩的约束条件,降低了结论的保守性.文献[20]针对遭受 DoS 攻击的线性多智能体系统,提出一种带攻击补偿机制的切换型完全分布式控制策略,基于

Lyapunov 稳定性理论研究其包含控制问题.文献[21]通过设置自适应耦合权重及引入辅助指数项等方法,设计了自适应动态事件触发机制和完全分布式包含控制协议,研究了 DoS 攻击下一般线性多智能体系统基于事件触发机制的包含控制.文献[22]针对遭受 DoS 攻击的非线性多智能体系统,提出了一种抵御 DoS 攻击的模糊观测器设计方法,基于观测状态,设计了一种新型弹性包含控制协议,通过秩分解技术与 DoS 攻击效应分析相结合的方法,将非凸设计条件转化为凸优化问题,研究了非线性多智能体系统包含控制.文献[23]基于事件触发控制策略,研究了 DoS 攻击下多智能体系统二分包含控制.文献[24]提出了一种具有抵御 DoS 攻击能力弹性控制策略,研究了异构多智能体系统输出编队-包含控制.文献[25]针对存在不确定性的非线性多智能体系统,研究了其在 DoS 攻击与执行器故障共同作用下的容错包含控制问题.通过建立区间型 Takagi-Sugeno 模糊模型,该文提出一种新型模糊动态包含控制协议,保证了即使在 DoS 攻击影响下,所有跟随者仍能收敛至由领导者状态所张成的凸包内部.文献[26]针对网络化集群系统面临未知无界欺骗攻击(虚假数据注入)的情况,设计了一种完全分布式弹性控制方法,以保证系统最终实现包含控制.

由上述文献分析可见,现有针对网络攻击下多智能体系统包含控制的研究大多集中于应对单一类型的网络攻击,如文献[19-25]仅研究 DoS 攻击,文献[26]则主要研究欺骗攻击.在实际复杂网络环境中,DoS 攻击和欺骗攻击可能会同时发生,形成混合攻击模式.具体而言,攻击者可以利用 DoS 攻击来消耗通信带宽或干扰信道连接,导致关键控制信息丢失或传输中断;也可采用欺骗攻击手段注入虚假数据,破坏状态信息的真实性与完整性.在这种混合攻击模式下,前者削弱系统通信能力,后者则趁机植入错误信息,二者叠加不仅会破坏网络拓扑的连通性,还可能致使协同控制算法失效,甚至引发系统崩溃.在混合网络攻击下,现有控制协议和事件触发机制往往缺乏足够的鲁棒性和适应性,导致多智能体系统包含控制性能下降.因此,面对混合网络攻击开展多智能体系统包含控制研究具有显著的现实意义.然而,目前针对该问题的研究仍相对有限,亟待进一步深入探索.

鉴于此,本文拟针对遭受混合攻击的多智能体系统,通过设计新的事件触发机制和包含控制协议,进一步深入研究其包含控制问题.首先,引入切换函数描述 DoS 攻击;引入与状态相关的非线性函数描

述欺骗攻击, 并采用 Bernoulli 分布来表征欺骗攻击的随机特性; 针对跟随智能体状态不可测问题, 设计状态观测器. 其次, 基于当前及历史触发时刻的观测状态和自适应更新规则, 并考虑网络攻击影响, 提出一种记忆型自适应动态事件触发机制; 基于观测状态和事件触发机制, 设计切换型包含控制协议. 然后, 通过模型变换构造切换误差系统, 将遭受混合网络攻击的多智能体包含控制问题转化为一个切换系统的均方稳定性问题; 利用 Lyapunov 稳定性理论进行分析, 得到混合网络攻击下多智能体系统包含控制条件, 并给出控制器增益和观测器增益协同设计方法. 最后, 通过仿真验证所提控制策略的有效性.

文中符号说明: $\mathbb{R}^{m \times n}$ 与 \mathbb{R}^n 分别表示实数域的 $m \times n$ 阶矩阵空间与 n 维向量空间; A^T 表示矩阵 A 的转置; $P > 0 (< 0)$ 表示 P 为正 (负) 定矩阵; $*$ 表示对称矩阵中的对称项; $I_{n \times n}, 0_{n \times n}$ 为 $n \times n$ 单位矩阵和 $n \times n$ 零矩阵; $\text{diag}\{\dots\}$ 表示对角矩阵; $E\{\cdot\}$ 表示数学期望; $otimes$ 表示克罗内克积.

1 预备知识和问题描述

1.1 图论基础

本文研究的智能体之间的连接关系用拓扑图 $\mathcal{G}(\mathcal{V}, \mathcal{E}, \mathcal{A})$ 表示, 图中的每个节点代表一个智能体, 其中 $\mathcal{V} = \{1, 2, \dots, N\}$ 为图的节点集, $\mathcal{E} \subseteq \mathcal{V} \times \mathcal{V}$ 表示边的集合, 如果节点 j 可以收到节点 i 传输的信息, 那么边 $(i, j) \in \mathcal{E}$, 且节点 i 是节点 j 的邻居. $\mathcal{A} = [a_{ij}] \in \mathbb{R}^{N \times N}$ 表示图 \mathcal{G} 的邻接矩阵. a_{ij} 表示边 (j, i) 的权值, 若 $(i, j) \in \mathcal{E}$, 则 $a_{ij} > 0$, 否则 $a_{ij} = 0$. 若 $(i, j) \in \mathcal{E} \Leftrightarrow (j, i) \in \mathcal{E}, \forall i, j \in \mathcal{V}$, 称图 \mathcal{G} 为无向图, 反之, 称为有向图. 对于无向图 $a_{ij} = a_{ji}$ 即 $\mathcal{A} = \mathcal{A}^T$. 定义节点 i 的邻居集合为 $\mathcal{N}_i = \{j | (j, i) \in \mathcal{E}\}$, 节点 i 的度为其邻居节点的个数, 定义度矩阵 $\mathcal{D} = \text{diag}\{d_1, d_2, \dots, d_N\}$, 其中 $d_i = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij}$, 图 \mathcal{G} 的 Laplacian 矩阵 $L = \mathcal{D} - \mathcal{A}$.

1.2 问题描述

1.2.1 多智能体系统模型

给定一个由 N 个智能体构成的线性多智能体系统, 该系统包含 M 个跟随者和 $N - M$ 个领导者. M 个跟随者构成的集合定义为 \mathcal{F} , 即 $\mathcal{F} \triangleq \{1, 2, \dots, M\}$; $N - M$ 个领导者构成的集合定义为 $\check{\mathcal{O}}$, 即 $\check{\mathcal{O}} \triangleq \{M + 1, M + 2, \dots, N\}$. 该系统 Laplacian 矩阵为:

$$L = \begin{bmatrix} L_1 & L_2 \\ 0_{(N-M) \times M} & 0_{(N-M) \times (N-M)} \end{bmatrix}.$$

其中, $L_1 \in \mathbb{R}^{M \times M}$ 代表跟随智能体之间的信息交互关系, $L_2 \in \mathbb{R}^{M \times (N-M)}$ 代表跟随智能体与领导智能体连接关系.

第 $i (i = 1, 2, \dots, M)$ 个跟随智能体动态如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = Ax_i(t) + Bu_i(t) \\ \dot{y}_i(t) = Cx_i(t) \end{cases}, i \in \mathcal{F} \quad (1)$$

$x_i(t) \in \mathbb{R}^n$ 、 $u_i(t) \in \mathbb{R}^m$ 和 $y_i(t) \in \mathbb{R}^q$ 分别表示智能体 i 的状态向量, 控制输入和测量输出向量; $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 、 $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 、 $C \in \mathbb{R}^{q \times n}$ 分别为系统的常量矩阵, 且 C 矩阵为行满秩矩阵. 同时, 假设 (A, B) 能控, (A, C) 能观.

第 $j (j = M + 1, M + 2, \dots, N)$ 个领导智能体动态如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_j(t) = Ax_j(t) \\ \dot{y}_j(t) = Cx_j(t) \end{cases}, j \in \check{\mathcal{O}}. \quad (2)$$

其中 $x_j(t) \in \mathbb{R}^n$ 为领导智能体 j 的状态向量.

1.2.2 DoS 攻击模型

假设系统存在周期性 DoS 攻击, 由于攻击者的能量有限, 需要一段休眠期来为下一次攻击积攒能量. 因此, 整个 DoS 攻击序列包含两个部分, 即攻击的活动期和休眠期. 该攻击行为可用 $\Gamma_{DoS}(t)$ 来描述, 其中, 当 $\Gamma_{DoS}(t) = 0$ 表示 DoS 攻击处于休眠期, 此时通信信道处于安全状态, 信号可正常传输; 当 $\Gamma_{DoS}(t) = 1$, 表示 DoS 攻击处于活动期, 此时通信信道遭受 DoS 攻击, 信号传输被阻断. DoS 攻击数学模型可表示为:

$$\Gamma_{DoS}(t) = \begin{cases} 0, & t \in S_n \\ 1, & t \in A_n \end{cases} \quad (3)$$

其中, $S_n = [s_n, s_n + a_n)$ 表示第 n 次 DoS 攻击的休眠时间区间; $A_n = [s_n + a_n, s_{n+1})$ 表示第 n 次 DoS 攻击的活动时间区间. s_n 和 a_n 分别表示第 n 次休眠期的起始时刻和持续时间. 此外, 为了保证存在一定的休眠期, s_n 和 a_n 需满足 $s_n < s_n + a_n$.

假设 1 在 DoS 攻击的活动期内, 所有通信均完全中断.

假设 2 假设系统通信可通过内部修复重新恢复至初始拓扑结构.

假设 3 对于式 (3) 中 DoS 攻击的休眠时间间隔 S_n , 存在一个正标量 s_{min} 使得 $s_{min} \leq \inf\{a_n\}$; 同样, 对于 DoS 攻击的活动时间间隔 A_n , 也存在一个标量 a_{max} 使得 $a_{max} \geq \sup\{s_n - s_{n-1} - a_{n-1}\}$.

假设 4 将 $n_a(t_0, t)$ 定义为时间间隔 $[0, t]$ 内 DoS 攻击发生的次数. 对于给定的正标量 $l'_1 \in \mathbb{R}$ 和 $l'_2 \in \mathbb{R}$, DoS 攻击发生的次数满足 $n_a(t_0, t) \leq l'_1 + t/l'_2$.

注1 在系统发生 DoS 攻击时, 攻击者攻击强度和通信信道结构等因素会导致通信受阻程度不同, 可能会出现通信完全中断, 也可能出现部分通信残留情况, 假设 1 考虑极端情况, 即在 DoS 攻击活动期内, 系统中所有通信完全中断, 这种情况在实际系统中是存在的, 且通过该假设简化了攻击模型的描述, 使后续分析能够聚焦于攻击的周期性特征及其对控制协议的影响, 而无需考虑部分通信残留的复杂情况. 假设 2 描述了本文考虑的多智能系统拓扑结构的可恢复性, 多智能体系统在攻击间歇期通过内部能力恢复初始拓扑, 避免因攻击导致的永久性拓扑破坏. 这一假设保证了系统的韧性, 为系统保持稳定奠定了基础.

注2 在实际场景中, 网络攻击能量通常是有界的, 能量约束是保证系统不失控的前提. 假设 3 和假设 4 正是对攻击能量进行约束. 本文建立了一种周期性 DoS 攻击模型, 其特点是休眠时间与活动时间交替出现. 从实际应用的角度来看, 攻击持续时间 $s_{n+1} - s_n - a_n$ 不宜过长, 否则系统在通信完全中断情况下, 很难保持稳定, 一定的休眠时长 a_n 以保证系统获得足够的修复时间, 以确保系统稳定. 因此, 假设 3 和假设 4 具有合理性和必要性.

1.2.3 欺骗攻击模型

欺骗攻击是通信网络中一种常见的攻击形式, 其本质在于攻击者通过伪造或篡改通信数据, 诱导系统偏离控制目标, 从而破坏系统性能. 这类攻击通过假冒控制信号、篡改通信数据或利用协议漏洞等方式, 破坏系统安全可靠运行. 相较于直接阻断通信的 DoS 攻击, 欺骗攻击更具隐蔽性, 能够在不触发常规异常告警的情况下, 逐步瓦解系统的可信基础, 最终导致控制失效或状态误判等严重后果.

考虑欺骗攻击具有偶发性特点, 本文引入 Bernoulli 随机变量 $\rho(t) \in \{0, 1\}$ 描述欺骗攻击的发生, 其满足如下条件:

- (i) $\text{Prob}\{\rho(t) = 1\} = \rho$,
- (ii) $\text{Prob}\{\rho(t) = 0\} = 1 - \rho$,
- (iii) $E\{(\rho(t) - \rho)^2\} = \rho(1 - \rho)$,
- (iv) $E\{1 - \rho(t)\} = (1 - \rho)$.

采用与智能体状态相关的非线性函数 $f(x_i(t))$ 来描述欺骗攻击信号, $f(x_i(t))$ 表示欺骗攻击向系统注入的虚假数据.

假设 5^[27] 给定非负常数 $l''_1, l''_2, \dots, l''_{N-M}$ 满足 $\sum_{i=1}^{N-M} l''_i = 1$, 对于任意非线性函数 $f(v_i(t), t)$ 和 $f(\bar{v}(t), t)$, 存在常数 $\lambda \geq 0$, 使得:

$$\|f(\bar{v}(t), t) - \sum_{i=1}^{N-M} l''_i f(v_i(t), t)\|_2 \leq \lambda \|\bar{v}(t) - \sum_{i=1}^{N-M} l''_i v_i(t)\|_2. \quad (4)$$

注3 本文考虑系统同时遭受 DoS 攻击和欺骗攻击, 当 DoS 攻击处于活动期内, 通信将被阻断, 此时欺骗攻击信息将无法注入系统; 当 DoS 攻击处于休眠期内, 系统将允许信号传输, 此时若发生欺骗攻击, 虚假信息将被注入系统, 对系统将产生影响.

2 网络攻击下事件触发包含控制

本节目标是针对遭受混合网络攻击 (DoS 攻击和欺骗攻击) 的多智能体系统, 设计合适的事件触发机制和控制协议, 使多智能体系统实现包含控制.

2.1 观测器设计

在实际应用场景中, 可能存在智能体某些状态不可测的情况, 为解决此问题, 通常需要设计观测器观测系统不可测状态. 本文假设系统中跟随智能体状态不可测, 将跟随智能体 $i (i \in \mathcal{F})$ 的观测器设计为:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_i(t) = A\hat{x}_i(t) + Bu_i(t) + G(y_i(t) - \hat{y}_i(t)) \\ \hat{y}_i(t) = C\hat{x}_i \end{cases} \quad (5)$$

其中 $\hat{x}_i(t)$ 、 $\hat{y}_i(t)$ 分别表示智能体 i 对应的观测器在 t 时刻的状态和输出, $G \in \mathbb{R}^{n \times q}$ 表示待定的观测器增益矩阵.

2.2 网络攻击下记忆型自适应动态事件触发机制

传统的事件触发机制通常仅依赖当前采样数据 $x_i(t)$ (或 $x_i(t_k^i h + lh)$) 和最近一次触发信号 $x_i(t_k^i)$ (或 $x_i(t_k^i h)$). 在实际应用中发现, 当系统状态处于波峰或波谷时, 这种触发策略可能因相邻采样误差过小, 不满足数据释放条件而遗漏关键数据, 但事实上这些时刻的信号幅值往往最大, 需增强控制. 特别是当系统遭受网络攻击时, 更需要增加在状态快速变化这些时刻的控制干预. 鉴于此, 本文通过在事件触发函数中引入若干历史触发时刻数据, 同时, 考虑网络攻击影响, 设计一种新的网络攻击下记忆型自适应动态事件触发机制.

对于所有 $i \in \mathcal{F}$, 事件触发机制设计如下:

$$t_{k+1}^i h = t_k^i h + \min_l \{lh \mid \|\sum_{r=1}^m \bar{\mu}_r \varepsilon_{i, (t_k - r + 1)}(t)\| > \varsigma(t) \|\tilde{y}_i(t_k^i h + lh)\|\}. \quad (6)$$

上式中

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{i,(t_{k-r+1})}(t) &= \zeta_i(t_k^i h + lh) - \zeta_i(t_{k-r+1}^i h), \\
\tilde{y}_i(t_k^i h + lh) &= y_i(t_k^i h + lh) - \hat{y}_i(t_k^i h + lh) = \\
&C(x(t_k^i h + lh) - \hat{x}(t_k^i h + lh)), \\
\zeta_i(t_k^i h + lh) &= (1 - \rho(t)) \times \\
&\left(\sum_{j=1}^M a_{ij} (\hat{x}_i(t_k^i h + lh) - \hat{x}_j(t_k^i h + lh)) + \right. \\
&\quad \left. \sum_{j=M+1}^N a_{ij} (\hat{x}_i(t_k^i h + lh) - x_j(t_k^i h + lh)) \right) + \\
\rho(t) &\left(\sum_{j=1}^M a_{ij} (f(\hat{x}_i(t_k^i h + lh)) - f(\hat{x}_j(t_k^i h + lh))) + \right. \\
&\quad \left. \sum_{j=M+1}^N a_{ij} (f(\hat{x}_i(t_k^i h + lh)) - f(x_j(t_k^i h + lh))) \right), \\
\zeta_i(t_{k-r+1}^i h) &= (1 - \rho(t)) \times \\
&\left(\sum_{j=1}^M a_{ij} (\hat{x}_i(t_{k-r+1}^i h) - \hat{x}_j(t_{k-r+1}^i h)) + \right. \\
&\quad \left. \sum_{j=M+1}^N a_{ij} (\hat{x}_i(t_{k-r+1}^i h) - x_j(t_{k-r+1}^i h)) \right) + \\
\rho(t) &\left(\sum_{j=1}^M a_{ij} (f(\hat{x}_i(t_{k-r+1}^i h)) - f(\hat{x}_j(t_{k-r+1}^i h))) + \right. \\
&\quad \left. \sum_{j=M+1}^N a_{ij} (f(\hat{x}_i(t_{k-r+1}^i h)) - f(x_j(t_{k-r+1}^i h))) \right).
\end{aligned}$$

其中 m 表示该机制所采用的触发数据包数量; h 表示传感器采样周期; $t_k^i h$ 表示最近一次触发时刻, $t_{k+1}^i h$ 表示下一个触发时刻.如果式(6)满足,当前 $t_k^i h + lh$ 时刻的采样数据将被发送,此时 $t_{k+1}^i h = t_k^i h + lh$. $\bar{\mu}_r \in [0, 1]$ 是给定的权重参数,且满足 $\sum_{r=1}^m \bar{\mu}_r = 1$. $\varsigma(t)$ 为动态自适应参数,满足如下等式:

$$\varsigma(t) = \varsigma_0 + (\varsigma_1 - \varsigma_0) e^{-\bar{\lambda} \|\bar{\Psi}(t_k^i h)\|_2}, \varsigma(t) \in [\varsigma_0, \varsigma_1] \quad (7)$$

其中 $0 < \varsigma_0 < \varsigma_1 < 1$, $\bar{\lambda} \geq 0$, $\bar{\Psi}(t_k^i h) = \|\hat{x}_i(t_k^i h + lh) - \hat{x}_i(t_k^i h)\| + \|\hat{y}_i(t_k^i h) - y_i(t_k^i h)\|$.

注4 与文献[28]不同,事件触发机制(6)中不仅包含当前状态信息和最近一次触发时刻状态信息,还包含 $m-1$ 个历史触发时刻的状态信息,从而使其因包含具有时间累积效应的触发误差项而具备历史信息记忆能力,能够更全面、更准确地捕捉系统状态的动态演变趋势.这一设计有效解决了传统瞬时触发机制可能因相邻采样误差过小,不满足数据释放条件而遗漏某些幅值很大需要增强控制的关键数据的问题.当 $m=1$ 时,本文设计的记忆型事件触发机制将退化为传统的无记忆事件触发机制.参数 $\bar{\mu}_r$ 用于表征各触发数据包在事件触发条件中的权

重.根据控制系统的实际需求,新触发的数据包通常比历史数据包更重要,因此将 $\bar{\mu}_r$ 设置为远大于其他权重系数(即 $\bar{\mu}_r \geq \bar{\mu}_{r+1}$,其中 $r=1, 2, \dots, m-1$),以此体现时序数据包的差异性权重分配.

注5 与现有研究基于事件触发机制包含控制的文献[29-31]不同,本文设计的事件触发机制考虑了混合网络攻击影响,在触发函数中引入欺骗攻击特征信号.为了描述具有高隐蔽性的攻击行为,该信号用与系统状态相关的非线性函数 $f(x_i(t))$ 表示,其中 $f(x_i(t_k^i h + lh))$ 和 $f(x_i(t_{k-r+1}^i h))$ 分别表示当前采样时刻和历史触发时刻的欺骗攻击信号,且该欺骗攻击的发生符合Bernoulli分布.这种将网络攻击引入事件触发函数中的做法,不仅更符合网络攻击发生的实际情况,而且通过前摄性地刻画攻击行为,使触发机制能够感知恶意数据篡改对系统的影响,提升了系统在遭受攻击时的识别与预处理能力.相较于传统被动式防御策略,该方法增强了事件触发机制的适应性与鲁棒性,具有更强的工程实用价值.

注6 本文在触发函数中引入动态自适应参数 $\varsigma(t)$,如式(7)所示,该机制的触发阈值可以根据相邻观测状态 $\hat{x}_i(t_k^i h + lh)$ 和 $\hat{x}_i(t_k^i h)$ 之间的误差,以及观测器输出 $\hat{y}(t_k^i h)$ 和测量输出 $y(t_k^i h)$ 之间的误差进行动态调节.相较于现有基于观测器的静态事件触发机制,所提出的动态自适应触发机制能够根据系统状态和输出的变化,实时动态调整触发阈值,增强了触发条件的灵活性;同时,显著提升了触发机制对复杂网络攻击环境下的适应能力.DoS攻击活动期,由于观测器性能下降,会导致观测状态的变化量 $\|\hat{x}_i(t_k^i h + lh) - \hat{x}_i(t_k^i h)\|$ 增大,从而使 $\|\bar{\Psi}(t_k^i h)\|$ 变大,进而引起动态阈值参数 $\varsigma(t)$ 单调下降,趋近于下界 ς_0 .一旦DoS攻击停止,信道恢复可用,在攻击中止后的第一个采样周期,由于此时动态阈值参数 $\varsigma(t)$ 因长期累积误差而处于极低水平,而智能体本地计算的触发误差项 $\|\hat{x}_i(t_k^i h + lh) - \hat{x}_i(t_k^i h)\|$ 仍保持较大值.因此,此时触发条件极易成立,数据立刻开始发送,控制输入更新.此外,当 $\varsigma_0 = \varsigma_1$ 时,所设计的动态事件触发机制可简化为具有固定阈值的静态事件触发机制.

另外,在多智能体利用网络交互信息时,网络诱导时滞难以避免^[32-36].定义系统中时滞为 τ_{t_k} ,满足 $\tau_1 \leq \tau_{t_k} \leq \tau_2$.将相邻两次触发时刻的时间间隔 \mathfrak{N}_k 划分为 ω_k 个子区间,即 $\mathfrak{N}_k^i = [t_k^i h + \tau_{t_k}, t_{k+1}^i h + \tau_{t_{k+1}}) = \cup_{l=1}^{\omega_k} \psi_l$, $l=0, 1, \dots, \omega_k$, $\omega_k = t_{k+1} - t_k - 1$.定义时滞 $d(t)$ 为:

$$d(t) = \begin{cases} t - t_k h, t \in \psi_1 \\ t - t_k h - h, t \in \psi_2 \\ \vdots \\ t - t_k h - (\varpi_k - 1)h, t \in \psi_{\varpi_k} \end{cases} \quad (8)$$

时滞 $d(t)$ 满足 $0 \leq d(t) \leq h$. 由式(8)可知, $t_k h + lh = t - d(t)$.

定义如下状态向量:

$$\begin{aligned} \zeta(t) &= [\zeta_1^T(t), \zeta_2^T(t), \dots, \zeta_M^T(t)]^T, \\ x_f(t) &= [x_1^T(t), x_2^T(t), \dots, x_M^T(t)]^T, \\ \hat{x}_f(t) &= [\hat{x}_1^T(t), \hat{x}_2^T(t), \dots, \hat{x}_M^T(t)]^T, \\ x_i(t) &= [x_{M+1}^T(t), x_{M+2}^T(t), \dots, x_N^T(t)]^T. \end{aligned}$$

将 $\zeta_i(t_k h + lh)$ 写成向量形式, 可得:

$$\begin{aligned} \zeta(t_k h + lh) &= (1 - \rho(t))(L_1 \hat{x}_f(t - d(t)) + \\ &L_2 x_i(t - d(t))) + \rho(t)(L_1 f(\hat{x}_f(t - d(t))) + \\ &L_2 f(x_i(t - d(t)))). \end{aligned} \quad (9)$$

将 $\zeta_i(t_{k-r+1} h + lh)$ 写成向量形式, 可得:

$$\begin{aligned} \zeta(t_{k-r+1} h) &= (1 - \rho(t))(L_1 \hat{x}_f(t_{k-r+1} h) + \\ &L_2 x_i(t - d(t))) + \rho(t)(L_1 f(\hat{x}_f(t_{k-r+1} h)) + \\ &L_2 f(x_i(t - d(t)))). \end{aligned} \quad (10)$$

定义 $\hat{x}_i(t_{k-r+1} h) = \tilde{x}_{i,k-r+1}(t)$, $f(\hat{x}_i(t_{k-r+1} h)) = f(\tilde{x}_{i,k-r+1}(t))$, 将事件触发函数写成向量形式:

$$\begin{aligned} \sum_{r=1}^m \bar{\mu}_r \zeta(t_{k-r+1} h) &= (1 - \rho(t)) \times \\ &(L_1 \sum_{r=1}^m \bar{\mu}_r \tilde{x}_{f,k-r+1}(t) + L_2 x_i(t - d(t))) + \\ &\rho(t)(L_1 \sum_{r=1}^m \bar{\mu}_r f(\tilde{x}_{f,k-r+1}(t)) + L_2 f(x_i(t - d(t)))). \end{aligned} \quad (11)$$

由此可将式(6)中 $\sum_{r=1}^m \bar{\mu}_r \varepsilon_{t_{k-r+1}}(t)$ 整理如下:

$$\begin{aligned} \sum_{r=1}^m \bar{\mu}_r \varepsilon_{t_{k-r+1}}(t) &= \zeta(t_k h + lh) - \\ &\sum_{r=1}^m \bar{\mu}_r \zeta(t_{k-r+1} h) = \\ &(1 - \rho(t))L_1(\hat{x}_f(t - d(t)) - \sum_{r=1}^m \bar{\mu}_r \tilde{x}_{f,k-r+1}(t)) + \\ &\rho(t)L_1(f(\hat{x}_f(t - d(t))) - \sum_{r=1}^m \bar{\mu}_r f(\tilde{x}_{f,k-r+1}(t))). \end{aligned} \quad (12)$$

进一步整理, 事件触发机制式(6)可写成如下形式:

$$\begin{aligned} &(\sum_{r=1}^m \bar{\mu}_r \varepsilon_{t_{k-r+1}}(t))^T (\sum_{r=1}^m \bar{\mu}_r \varepsilon_{t_{k-r+1}}(t)) - \\ &\bar{e}^T(t - d(t))(I_M \otimes C)^T \zeta^T(t) \zeta(t) \times \end{aligned}$$

$$(I_M \otimes C)\bar{e}(t - d(t)) > 0. \quad (13)$$

2.3 包含控制协议设计

针对混合网络攻击, 设计如下包含控制协议:

$$\begin{cases} u_i(t) = K \sum_{r=1}^m \bar{\mu}_r \zeta_i(t_{k-r+1} h), t \in S_n = [s_n, s_n + a_n) \\ u_i(t) = 0, t \in A_n = [s_n + a_n, s_{n+1}) \end{cases} \quad (14)$$

其中, $K \in \mathbb{R}^{m \times n}$ 表示控制协议增益. 定义 $u(t) = [u_1^T(t), \dots, u_m^T(t)]^T$, 将式(14)写成向量形式:

$$\begin{cases} u(t) = (1 - \rho(t))((L_1 \otimes K) \sum_{r=1}^m \bar{\mu}_r \tilde{x}_{f,k-r+1}(t) + \\ (L_2 \otimes K)x_i(t - d(t))) + \rho(t)((L_1 \otimes K) \times \\ \sum_{r=1}^m \bar{\mu}_r f(\tilde{x}_{f,k-r+1}(t)) + (L_2 \otimes K)f(x_i(t - d(t))))), \\ t \in S_n = [s_n, s_n + a_n) \\ u(t) = 0, t \in A_n = [s_n + a_n, s_{n+1}) \end{cases} \quad (15)$$

注7 本文提出的控制协议旨在解决 DoS 攻击和欺骗攻击并存时多智能体系统包含控制问题. 该协议根据 DoS 攻击的激活状态进行分段设计: 在攻击休眠期, 控制信号正常传输, 设计记忆型反馈控制策略; 在攻击活动期, 假设所有通信链路均被阻断, 系统不产生控制指令, 表现为 $u_i(t) = 0$, 这一假设符合高强度 DoS 攻击导致通信瘫痪的实际特征. 特别地, 协议中引入了由智能体状态相关的非线性函数描述的欺骗攻击特征项, 并用 Bernoulli 分布来表征欺骗攻击序列. 由于实际系统常面临多种网络攻击并发的复杂场景, 本协议具有更显著的工程实用性和普适性.

2.4 误差系统构造

当系统处于 DoS 攻击休眠期时, 控制信号能正常传输. 将跟随智能体动态方程写成向量形式:

$$\begin{aligned} \dot{x}_f(t) &= (I_M \otimes A)x_f(t) + (I_M \otimes B)u(t) = \\ &(I_M \otimes A)x_f(t) + (1 - \rho(t))((L_1 \otimes BK) \times \\ &\sum_{r=1}^m \bar{\mu}_r \tilde{x}_{f,k-r+1}(t) + (L_2 \otimes BK)x_i(t - d(t))) + \\ &\rho(t)((L_1 \otimes BK) \sum_{r=1}^m \bar{\mu}_r f(\tilde{x}_{f,k-r+1}(t)) + \\ &(L_2 \otimes BK)f(x_i(t - d(t)))). \end{aligned} \quad (16)$$

将领导智能体动态方程写成向量形式:

$$\dot{x}_l(t) = (I_{N-M} \otimes A)x_l(t). \quad (17)$$

将观测器动态方程写成向量形式:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_f(t) &= (I_M \otimes A)\hat{x}_f(t) + (I_M \otimes B)u(t) + \\ &(I_M \otimes GC)(x_f(t) - \hat{x}_f(t)). \end{aligned} \quad (18)$$

定义观测器的观测误差: $\bar{e}_i(t) = x_i(t) - \hat{x}_i(t)$, $\bar{e}(t) = [\bar{e}_1^T(t), \bar{e}_2^T(t), \dots, \bar{e}_M^T(t)]^T$ 并求导可得:

$$\dot{\bar{e}}_f(t) = (I_M \otimes (A - GC))\bar{e}_f(t). \quad (19)$$

定义多智能体系统由真实状态构成的包含误差为 $\bar{x}_f(t) = x_f(t) + (L_1^{-1}L_2 \otimes I_n)x_i(t)$, 多智能体系统由欺骗状态信息构成的包含误差为 $\bar{F}(\bar{x}_f(t)) = F(\hat{x}_f(t)) + (L_1^{-1}L_2 \otimes I_n)F(x_i(t))$. 由假设 5 可知:

$$\|\bar{F}(\bar{x}_f(t))\|_2 \leq \lambda \|\bar{x}_f(t)\|_2 \quad (20)$$

根据式 (12) 可得:

$$\begin{aligned} & (1 - \rho(t))(L_1 \otimes BK) \sum_{r=1}^m \bar{\mu}_r \tilde{x}_{f,k-r+1}(t) + \\ & \rho(t)(L_1 \otimes BK) \sum_{r=1}^m \bar{\mu}_r f(\tilde{x}_{f,k-r+1}(t)) = \\ & (1 - \rho(t))(L_1 \otimes BK)\hat{x}_f(t - d(t)) + \\ & \rho(t)(L_1 \otimes BK)f(\hat{x}_f(t - d(t))) - \\ & (I_M \otimes BK) \sum_{r=1}^m \bar{\mu}_r \varepsilon_{t_{k-r+1}}(t). \end{aligned} \quad (21)$$

对包含误差求导, 并综合式 (16)-(17), (21) 可得:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}_f(t) &= \dot{x}_f(t) + (L_1^{-1}L_2 \otimes I_n)\dot{x}_i(t) = \\ & (I_M \otimes A)\bar{x}_f(t) + (1 - \rho(t))(L_1 \otimes BK) \times \\ & \bar{x}_f(t - d(t)) + \rho(t)(L_1 \otimes BK)\bar{F}(t - d(t)) - \\ & (1 - \rho(t))(L_1 \otimes BK)\bar{e}_f(t - d(t)) - \\ & (I_M \otimes BK) \sum_{r=1}^m \bar{\mu}_r \varepsilon_{t_{k-r+1}}(t). \end{aligned} \quad (22)$$

令 $\bar{\delta}(t) = [\bar{x}_f^T(t), \bar{e}_f^T(t)]^T$, 由式 (19) 和式 (22) 得:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{\delta}}(t) &= \bar{A}\bar{\delta}(t) + (1 - \rho(t))\bar{B}\bar{\delta}(t - d(t)) + \\ & \rho(t)\bar{H}\bar{F}(t - d(t)) - \bar{E} \sum_{r=1}^m \bar{\mu}_r \varepsilon_{t_{k-r+1}}(t). \end{aligned} \quad (23)$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{A} &= \begin{bmatrix} I_M \otimes A & 0 \\ 0 & I_M \otimes (A - GC) \end{bmatrix}, \\ \bar{B} &= \begin{bmatrix} L_1 \otimes BK & L_1 \otimes BK \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ \bar{H} &= \begin{bmatrix} L_1 \otimes BK \\ 0 \end{bmatrix}, \bar{E} = \begin{bmatrix} I_M \otimes BK \\ 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

综合可得:

$$\begin{cases} \dot{\bar{\delta}}(t) = \bar{A}\bar{\delta}(t) + (1 - \rho(t))\bar{B}\bar{\delta}(t - d(t)) + \\ \rho(t)\bar{H}\bar{F}(t - d(t)) - \bar{E} \sum_{r=1}^m \bar{\mu}_r \varepsilon_{t_{k-r+1}}(t), t \in S_n \\ \dot{\bar{\delta}}(t) = \tilde{A}\bar{\delta}(t), t \in A_n \end{cases} \quad (24)$$

$$\text{其中 } \tilde{A} = \begin{bmatrix} I_M \otimes A & 0 \\ 0 & I_M \otimes A \end{bmatrix}.$$

通过上述误差系统构造过程可知, 多智能体系

统要实现包含控制目标, 当且仅当其误差系统 (24) 达到稳定, 即将多智能体系统包含控制问题转化为对应闭环误差系统的稳定性问题.

2.5 包含控制分析

本节主要通过 L-K 泛函方法研究混合网络攻击下切换误差系统 (24) 的稳定性分析与控制问题. 分析和推导过程需用到如下引理.

引理 1^[37] 对于给定的正标量 $\bar{\tau}$, 任意实对称矩阵 $S_1 = S_1^T > 0$ 以及任意矩阵 Y_1 , 对所有可微函数 $x : [0, \bar{\tau}] \rightarrow \mathbb{R}^n$, 下列不等式成立:

$$\begin{aligned} & -\bar{\tau} \int_{t-\bar{\tau}}^t \dot{x}^T(s)S_1\dot{x}(s)ds \leq \\ & - \begin{bmatrix} \bar{w}_1 \\ \bar{w}_2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} S_1 & Y_1^T \\ Y_1 & S_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{w}_1 \\ \bar{w}_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (25)$$

其中 $\bar{w}_1 = x(t) - x(t - \tau(t))$, $\bar{w}_2 = x(t - \tau(t)) - x(t - \bar{\tau})$, $0 \leq \tau(t) \leq \bar{\tau}$.

引理 2^[38] 对于矩阵 $C \in \mathbb{R}^{m \times n}$, 其奇异值分解表示为 $C = E \begin{bmatrix} N & 0 \end{bmatrix} \check{E}$, 其中 E 和 \check{E} 分别为正交矩阵, 满足 $EE^T = I$, $\check{E}\check{E}^T = I$, 且矩阵 C 的秩 $\text{rank}(C) = q$. 设定矩阵 $\hat{J}_1 > 0$, $\aleph_{11} \in \mathbb{R}^{m \times m}$, $\aleph_{12} \in \mathbb{R}^{(n-m) \times (n-m)}$, 若条件 $\hat{J}_1 = \check{E} \begin{bmatrix} \aleph_{11} & 0 \\ * & \aleph_{12} \end{bmatrix} \check{E}^T$ 成立, 则存在矩阵 \hat{J}_1 , 使得 $C\hat{J}_1 = \hat{J}_1C$.

引理 3^[39] 给定正定矩阵 P , S 和标量 $\hat{\delta} > 0$, 下列不等式成立:

$$-PS^{-1}P \leq -2\hat{\delta}P + \hat{\delta}^2S. \quad (26)$$

定理 1 对于遭受具有参数 $l'_1, l'_2, a_{\max}, s_{\min}$ 的有限能量 DoS 攻击和具有参数 λ 的欺骗攻击的多智能体系统, 在给定正标量 $h, \hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, \tilde{\mu}_1, \tilde{\mu}_2, 0 < \rho < 1, 0 < \hat{\delta} < 1, 0 < s_1 < 1$ 以及控制协议增益矩阵 K 和观测器增益矩阵 G 情况下, 如存在适维正定对称矩阵 $\bar{P}_i, \bar{P}_i, \bar{Q}_i, \bar{Q}_i, \bar{W}_i, \bar{W}_i$ ($i = 1, 2$) 以及对称矩阵 J_1 和任意矩阵 X_i, \tilde{X}_i ($i = 1, 2$), 使得如下不等式成立, 则误差系统 (24) 均方指数稳定, 且具有衰减率 $\tilde{\Delta} = (2\hat{\alpha}_1s_{\min} - 2\hat{\alpha}_2a_{\max} - \ln(\tilde{\mu}_1\tilde{\mu}_2))/l'_2$, 即表明该系统在触发机制 (6) 和控制协议 (14) 共同作用下实现包含控制.

$$\bar{\Sigma} = [\bar{\Sigma}_{ij}]_{1 \leq i, j \leq 10} < 0, \quad (27)$$

$$\tilde{\Sigma} = [\tilde{\Sigma}_{ij}]_{1 \leq i, j \leq 8} < 0, \quad (28)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{W} & X^T \\ X & \bar{W} \end{bmatrix} > 0, \begin{bmatrix} \tilde{W} & \tilde{X}^T \\ \tilde{X} & \tilde{W} \end{bmatrix} > 0, \quad (29)$$

$$\begin{cases} \bar{P} \leq \tilde{\mu}_2 \tilde{P} \\ \bar{Q} \leq \tilde{\mu}_2 \tilde{Q} \\ \bar{W} \leq \tilde{\mu}_2 \tilde{W} \end{cases}, \begin{cases} \tilde{P} \leq \tilde{\mu}_1 \bar{P} \\ \tilde{Q} \leq \tilde{\mu}_1 \bar{Q} \\ \tilde{W} \leq \tilde{\mu}_1 \bar{W} \end{cases}, \quad (30)$$

$$\ln(\tilde{\mu}_1 \tilde{\mu}_2) + 2\hat{\alpha}_2 a_{\max} - 2\hat{\alpha}_1 s_{\min} < 0. \quad (31)$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{\Sigma}_{11} &= I_M \otimes (2\hat{\alpha}_1 \bar{P}_1 + \bar{Q}_1 - \hat{a}_1 \bar{W}_1 + J_1^T A + A^T J_1), \\ \bar{\Sigma}_{13} &= (1 - \rho) L_1 \otimes J_1^T B K + \\ & I_M \otimes (A^T J_1 + \hat{a}_1 \bar{W}_1 - \hat{a}_1 X_1^T), \\ \bar{\Sigma}_{14} &= -(1 - \rho) L_1 \otimes J_1^T B K, \quad \bar{\Sigma}_{15} = I_M \otimes \hat{a}_1 X_1^T, \\ \bar{\Sigma}_{17} &= I_M \otimes (\bar{P}_1 + A^T J_1 - J_1^T), \\ \bar{\Sigma}_{19} &= \rho L_1 \otimes J_1^T B K, \quad \bar{\Sigma}_{1,10} = -I_M \otimes J_1^T B K, \\ \bar{\Sigma}_{22} &= I_M \otimes (2\hat{\alpha}_1 \bar{P}_2 + \bar{Q}_2 - \hat{a}_1 \bar{W}_2 + J_1^T (A - GC)) + \\ & I_M \otimes ((A - GC)^T J_1), \\ \bar{\Sigma}_{24} &= I_M \otimes ((A - GC)^T J_1 + \hat{a}_1 \bar{W}_2 - \hat{a}_1 X_2^T), \\ \bar{\Sigma}_{26} &= I_M \otimes \hat{a}_1 X_2^T, \\ \bar{\Sigma}_{28} &= I_M \otimes (\bar{P}_2 + (A - GC)^T J_1 - J_1^T), \\ \bar{\Sigma}_{33} &= (1 - \rho) L_1 \otimes J_1^T B K + (1 - \rho) L_1^T \otimes K^T B^T J_1 + \\ & I_M \otimes (-2\hat{a}_1 \bar{W}_1 + \hat{a}_1 X_1 + \hat{a}_1 X_1^T + \lambda^2 I_n), \\ \bar{\Sigma}_{34} &= -(1 - \rho) L_1 \otimes J_1^T B K, \\ \bar{\Sigma}_{35} &= I_M \otimes (-\hat{a}_1 X_1^T + \hat{a}_1 \bar{W}_1), \\ \bar{\Sigma}_{37} &= (1 - \rho) L_1^T \otimes K^T B^T J_1 - I_M \otimes J_1^T, \\ \bar{\Sigma}_{39} &= \rho L_1 \otimes J_1^T B K, \quad \bar{\Sigma}_{3,10} = -I_M \otimes J_1^T B K, \\ \bar{\Sigma}_{44} &= I_M \otimes (-2\hat{a}_1 \bar{W}_2 + \hat{a}_1 X_2 + \hat{a}_1 X_2^T) + \\ & (I_M \otimes C)^T \tilde{Y}^T \tilde{Y} (I_M \otimes C), \\ \bar{\Sigma}_{46} &= I_M \otimes (-\hat{a}_1 X_2^T + \hat{a}_1 \bar{W}_2), \\ \bar{\Sigma}_{47} &= -(1 - \rho) L_1^T \otimes K^T B^T J_1, \quad \bar{\Sigma}_{48} = -I_M \otimes J_1^T, \\ \bar{\Sigma}_{55} &= I_M \otimes (-\hat{a}_1 \bar{Q}_1 - \hat{a}_1 \bar{W}_1), \\ \bar{\Sigma}_{66} &= I_M \otimes (-\hat{a}_1 \bar{Q}_2 - \hat{a}_1 \bar{W}_2), \\ \bar{\Sigma}_{77} &= I_M \otimes (h^2 \bar{W}_1 - J_1 - J_1^T), \\ \bar{\Sigma}_{79} &= \rho L_1 \otimes J_1^T B K, \quad \bar{\Sigma}_{7,10} = -I_M \otimes J_1^T B K, \\ \bar{\Sigma}_{88} &= I_M \otimes (h^2 \bar{W}_2 - J_1 - J_1^T), \quad \bar{\Sigma}_{99} = -I_M \otimes I_n, \\ \bar{\Sigma}_{10,10} &= -I_M \otimes I_n, \\ \tilde{\Sigma}_{11} &= I_M \otimes (-2\hat{\alpha}_2 \tilde{P}_1 + \tilde{P}_1 A + A^T \tilde{P}_1 + \tilde{Q}_1 - \hat{a}_2 \tilde{W}_1), \\ \tilde{\Sigma}_{13} &= I_M \otimes (\hat{a}_2 \tilde{W}_1 - \hat{a}_2 \tilde{X}_1^T), \\ \tilde{\Sigma}_{15} &= I_M \otimes \hat{a}_2 \tilde{X}_1^T, \quad \tilde{\Sigma}_{17} = I_M \otimes h A^T \tilde{P}_1, \\ \tilde{\Sigma}_{22} &= I_M \otimes (-2\hat{\alpha}_2 \tilde{P}_2 + \tilde{P}_2 A + A^T \tilde{P}_2 + \\ & \tilde{Q}_2 - \hat{a}_2 \tilde{W}_2), \\ \tilde{\Sigma}_{24} &= I_M \otimes (\hat{a}_2 \tilde{W}_2 - \hat{a}_2 \tilde{X}_2^T), \\ \tilde{\Sigma}_{26} &= I_M \otimes \hat{a}_2 \tilde{X}_2^T, \quad \tilde{\Sigma}_{28} = I_M \otimes h A^T \tilde{P}_2, \\ \tilde{\Sigma}_{33} &= I_M \otimes (-\hat{a}_2 \tilde{W}_1 + \hat{a}_2 \tilde{X}_1 + \hat{a}_2 \tilde{X}_1^T - \hat{a}_2 \tilde{W}_1), \\ \tilde{\Sigma}_{35} &= I_M \otimes (-\hat{a}_2 \tilde{X}_1^T + \hat{a}_2 \tilde{W}_1), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{\Sigma}_{44} &= I_M \otimes (-\hat{a}_2 \tilde{W}_2 + \hat{a}_2 \tilde{X}_2 + \hat{a}_2 \tilde{X}_2^T - \hat{a}_2 \tilde{W}_2), \\ \tilde{\Sigma}_{46} &= I_M \otimes (-\hat{a}_2 \tilde{X}_2^T + \hat{a}_2 \tilde{W}_2), \\ \tilde{\Sigma}_{55} &= I_M \otimes (-\hat{a}_2 \tilde{Q}_1 - \hat{a}_2 \tilde{W}_1), \\ \tilde{\Sigma}_{66} &= I_M \otimes (-\hat{a}_2 \tilde{Q}_2 - \hat{a}_2 \tilde{W}_2), \\ \tilde{\Sigma}_{77} &= I_M \otimes (-2\hat{\delta} \tilde{P}_1 + \hat{\delta}^2 \tilde{W}_1), \\ \tilde{\Sigma}_{88} &= I_M \otimes (-2\hat{\delta} \tilde{P}_2 + \hat{\delta}^2 \tilde{W}_2), \end{aligned}$$

$\bar{\Sigma}$ 和 $\tilde{\Sigma}$ 均为对称矩阵,其上三角部分中除上述元素外其余元素均为0,

$$\begin{aligned} \bar{P} &= \text{diag}\{I_M \otimes \bar{P}_1, I_M \otimes \bar{P}_2\}, \\ \tilde{P} &= \text{diag}\{I_M \otimes \tilde{P}_1, I_M \otimes \tilde{P}_2\}, \\ \bar{Q} &= \text{diag}\{I_M \otimes \bar{Q}_1, I_M \otimes \bar{Q}_2\}, \\ \tilde{Q} &= \text{diag}\{I_M \otimes \tilde{Q}_1, I_M \otimes \tilde{Q}_2\}, \\ \bar{W} &= \text{diag}\{I_M \otimes \bar{W}_1, I_M \otimes \bar{W}_2\}, \\ \tilde{W} &= \text{diag}\{I_M \otimes \tilde{W}_1, I_M \otimes \tilde{W}_2\}, \\ X &= \text{diag}\{I_M \otimes X_1, I_M \otimes X_2\}, \\ \tilde{X} &= \text{diag}\{I_M \otimes \tilde{X}_1, I_M \otimes \tilde{X}_2\}, \\ \tilde{Y} &= \text{diag}_M\{\varsigma_1, \varsigma_1, \dots, \varsigma_1\}, \\ \hat{a}_1 &= e^{-2\hat{\alpha}_1 h}, \quad \hat{a}_2 = e^{2\hat{\alpha}_2 h}. \end{aligned}$$

证明 针对 DoS 攻击休眠期与活动期分别讨论.

(1) 当系统处于 DoS 攻击休眠期,即 $t \in S_n = [s_n, s_n + a_n)$ 时,构造如下 L-K 泛函:

$$V_1(t) = \sum_{i=1}^3 V_{1i}(t). \quad (32)$$

其中

$$\begin{aligned} V_{11}(t) &= \bar{\delta}^T(t) \bar{P} \bar{\delta}(t), \\ V_{12}(t) &= \int_{t-h}^t e^{-2\hat{\alpha}_1(t-s)} \bar{\delta}^T(s) \bar{Q} \bar{\delta}(s) ds, \\ V_{13}(t) &= h \int_{-h}^0 \int_{t+\theta}^t e^{-2\hat{\alpha}_1(t-s)} \bar{\delta}^T(s) \bar{W} \dot{\bar{\delta}}(s) ds d\theta. \end{aligned}$$

沿着误差系统 (24) 解轨线计算 $V_1(t)$ 数学期望:

$$\begin{aligned} E\{\dot{V}_1(t)\} &= -2\hat{\alpha}_1 V_1(t) + 2\hat{\alpha}_1 \bar{\delta}^T(t) \bar{P} \bar{\delta}(t) + \\ & 2E\{\bar{\delta}^T(t) \bar{P} \dot{\bar{\delta}}(t)\} + \bar{\delta}^T(t) \bar{Q} \dot{\bar{\delta}}(t) - \\ & e^{-2\hat{\alpha}_1 h} \bar{\delta}^T(t-h) \bar{Q} \dot{\bar{\delta}}(t-h) + \\ & h^2 E\{\dot{\bar{\delta}}^T(t) \bar{W} \dot{\bar{\delta}}(t)\} - \\ & h \int_{t-h}^t e^{-2\hat{\alpha}_1(t-s)} \dot{\bar{\delta}}^T(s) \bar{W} \dot{\bar{\delta}}(s) ds. \quad (33) \end{aligned}$$

利用引理 1 对式 (33) 中单重积分项进行处理:

$$\begin{aligned} -h \int_{t-h}^t e^{-2\hat{\alpha}_1(t-s)} \dot{\bar{\delta}}^T(s) \bar{W} \dot{\bar{\delta}}(s) ds &\leq \\ -h \int_{t-h}^t e^{-2\hat{\alpha}_1 h \delta^T(s)} \bar{W} \dot{\bar{\delta}}(s) ds &\leq \end{aligned}$$

$$-e^{-2\widehat{\alpha}_1 h} \begin{bmatrix} \bar{\delta}(t) - \bar{\delta}(t-d(t)) \\ \bar{\delta}(t-d(t)) - \bar{\delta}(t-h) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \bar{W} & X^T \\ X & \bar{W} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{\delta}(t) - \bar{\delta}(t-d(t)) \\ \bar{\delta}(t-d(t)) - \bar{\delta}(t-h) \end{bmatrix} \quad (34)$$

此外,由误差系统(24)可得如下零等式:

$$0 = 2(\dot{\bar{\delta}}^T(t) + \bar{\delta}^T(t) + \bar{\delta}^T(t-d(t)))J^T(\bar{A}\bar{\delta}(t) + (1-\rho(t))\bar{B}\bar{\delta}(t-d(t)) + \rho(t)\bar{H}\bar{F}(t-d(t)) + \bar{E}\sum_{r=1}^m \bar{\mu}_r \varepsilon_{t_k-r+1}(t) - \dot{\bar{\delta}}(t)). \quad (35)$$

其中 $J = \text{diag}\{I_M \otimes J_1, I_M \otimes J_1\}$.

当采样数据不满足触发条件时,由式(13)可得:

$$\left(\sum_{r=1}^m \bar{\mu}_r \varepsilon_{t_k-r+1}(t)\right)^T \left(\sum_{r=1}^m \bar{\mu}_r \varepsilon_{t_k-r+1}(t)\right) - \bar{e}^T(t-d(t))(I_M \otimes C)^T \tilde{\Upsilon}^T \tilde{\Upsilon} (I_M \otimes C) \bar{e}(t-d(t)) < 0. \quad (36)$$

其中 $\tilde{\Upsilon} = \text{diag}\{\varsigma_1, \varsigma_1, \dots, \varsigma_1\}$.

由1.2.3节欺骗攻击模型可知,本文采用非线性函数 $f(x_i(t))$ 描述系统中遭受的欺骗攻击,由式(20)可得:

$$\lambda^2 \bar{x}_f^T(t-d(t)) \bar{x}_f(t-d(t)) - \bar{F}^T(t-d(t)) \bar{F}(t-d(t)) \geq 0. \quad (37)$$

定义如下决策变量:

$$\xi(t) = [\bar{x}_f^T(t), \bar{e}_f^T(t), \bar{x}_f^T(t-d(t)), \bar{e}_f^T(t-d(t)), \bar{x}_f^T(t-h), \bar{e}_f^T(t-h), \dot{\bar{x}}_f^T(t), \dot{\bar{e}}_f^T(t), \bar{F}^T(t-d(t)), \sum_{r=1}^m \bar{\mu}_r \varepsilon_{t_k-r+1}^T(t)]^T.$$

综合式(33)-(37)可得:

$$E\{\dot{V}_1(t)\} \leq -2\widehat{\alpha}_1 E\{V_1(t)\} + \xi^T(t) \bar{\Sigma} \xi(t). \quad (38)$$

当式(27)成立时,误差系统(24)指数稳定,即:

$$E\{\dot{V}_1(t)\} \leq -2\widehat{\alpha}_1 E\{V_1(t)\}. \quad (39)$$

(2) 当系统处于 DoS 攻击活跃期,即 $t \in A_n = [s_n + a_n, s_{n+1})$ 时,构造如下 L-K 泛函:

$$V_2(t) = \sum_{i=1}^3 V_{2i}(t). \quad (40)$$

其中

$$V_{21}(t) = \bar{\delta}^T(t) \tilde{P} \bar{\delta}(t),$$

$$V_{22}(t) = \int_{t-h}^t e^{2\widehat{\alpha}_2(t-s)} \bar{\delta}^T(s) \tilde{Q} \bar{\delta}(s) ds,$$

$$V_{23}(t) = h \int_{-h}^0 \int_{t+\theta}^t e^{2\widehat{\alpha}_2(t-s)} \dot{\bar{\delta}}^T(s) \tilde{W} \dot{\bar{\delta}}(s) ds d\theta.$$

定义如下决策变量:

$$\tilde{\xi}(t) = [\bar{x}_f^T(t), \bar{e}_f^T(t), \bar{x}_f^T(t-d(t)), \bar{e}_f^T(t-d(t)), \bar{x}_f^T(t-h), \bar{e}_f^T(t-h)]^T.$$

采用和情况(1)类似的处理方法,此外,利用引理3对其中的非线性项 $I_M \otimes \tilde{P}_1 \tilde{W}_1^{-1} \tilde{P}_1$, $I_M \otimes \tilde{P}_2 \tilde{W}_2^{-1} \tilde{P}_2$ 进行处理可得:

$$E\{\dot{V}_2(t)\} \leq 2\widehat{\alpha}_2 E\{V_2(t)\} + \tilde{\xi}^T(t) \tilde{\Sigma} \tilde{\xi}(t). \quad (41)$$

当式(28)成立时,误差系统(24)指数稳定,即:

$$E\{\dot{V}_2(t)\} \leq 2\widehat{\alpha}_2 E\{V_2(t)\}. \quad (42)$$

由上述证明过程可知:

$$\begin{cases} E\{\dot{V}_1(t)\} \leq -2\widehat{\alpha}_1 E\{V_1(t)\}, \\ t \in S_n = [s_n, s_n + a_n) \\ E\{\dot{V}_2(t)\} \leq 2\widehat{\alpha}_2 E\{V_2(t)\}, \\ t \in A_n = [s_n + a_n, s_{n+1}) \end{cases} \quad (43)$$

由式(43)可得:

$$\begin{cases} E\{V_1(t)\} \leq e^{-2\widehat{\alpha}_1(t-s_n)} E\{V_1(s_n)\}, \\ t \in S_n = [s_n, s_n + a_n) \\ E\{V_2(t)\} \leq e^{2\widehat{\alpha}_2(t-s_n-a_n)} E\{V_2(s_n + a_n)\}, \\ t \in A_n = [s_n + a_n, s_{n+1}) \end{cases} \quad (44)$$

因 L-K 泛函系数矩阵满足式(30),因此可得:

$$\begin{cases} E\{V_1(s_n)\} \leq \mu_2 E\{V_2(s_n^-)\} \\ E\{V_2(s_n + a_n)\} \leq \mu_1 E\{V_1((s_n + a_n)^-)\} \end{cases} \quad (45)$$

类似上述证明过程,也分两种情况讨论:

(3) 当 $t \in [s_n, s_n + a_n)$ 时,

$$E\{V_1(t)\} \leq e^{-2\widehat{\alpha}_1(t-s_n)} E\{V_1(s_n)\} \leq e^{-2\widehat{\alpha}_1(t-s_n)} \tilde{\mu}_2 E\{V_2(s_n^-)\} \leq \dots \leq e^{n_a(t_0,t)(\ln(\tilde{\mu}_1 \tilde{\mu}_2) + 2\widehat{\alpha}_2 a_{\max} - 2\widehat{\alpha}_1 s_{\min})} E\{V_1(t_0)\}. \quad (46)$$

(4) 当 $t \in [s_n + a_n, s_{n+1})$ 时,

$$E\{V_2(t)\} \leq e^{2\widehat{\alpha}_2(t-s_n-a_n)} E\{V_2(s_n + a_n)\} \leq e^{2\widehat{\alpha}_2(t-s_n-a_n)} \tilde{\mu}_1 E\{V_1((s_n + a_n)^-)\} \leq \dots \leq \frac{1}{\tilde{\mu}_2} e^{n_a(t_0,t)(\ln(\tilde{\mu}_1 \tilde{\mu}_2) + 2\widehat{\alpha}_2 a_{\max} - 2\widehat{\alpha}_1 s_{\min})} E\{V_1(t_0)\}. \quad (47)$$

定义 $\tilde{\omega} = \begin{cases} 1, & t \in [s_n, s_n + a_n) \\ \frac{1}{\tilde{\mu}_2}, & t \in [s_n + a_n, s_{n+1}) \end{cases}$, 综合式

(46) 和 (47) 可得:

$$\begin{aligned} E\{V(t)\} = & \\ & \tilde{\omega} e^{n_a(t_0, t)(\ln(\tilde{\mu}_1 \tilde{\mu}_2) + 2\tilde{\alpha}_2 a_{\max} - 2\tilde{\alpha}_1 s_{\min})} E\{V_1(t_0)\} \leq \\ & \tilde{\omega} e^{(l'_1 + \frac{t}{l'_2})(\ln(\tilde{\mu}_1 \tilde{\mu}_2) + 2\tilde{\alpha}_2 a_{\max} - 2\tilde{\alpha}_1 s_{\min})} E\{V_1(t_0)\} = \\ & \tilde{\omega} e^{l'_1(\ln(\tilde{\mu}_1 \tilde{\mu}_2) + 2\tilde{\alpha}_2 a_{\max} - 2\tilde{\alpha}_1 s_{\min})} e^{-\tilde{\Delta} t} E\{V_1(t_0)\}. \end{aligned} \quad (48)$$

$$\text{其中 } \tilde{\Delta} = \frac{2\tilde{\alpha}_1 s_{\min} - 2\tilde{\alpha}_2 a_{\max} - \ln(\tilde{\mu}_1 \tilde{\mu}_2)}{l'_2}.$$

当 $\tilde{\Delta} > 0$ 时, 即式 (31) 成立时, $\lim_{t \rightarrow \infty} E\{V(t)\} \rightarrow 0$, 表明闭环误差系统 (24) 均方指数稳定, 且衰减率为 $\tilde{\Delta}$. 综上定理 1 得证.

定理 2 对于遭受具有参数 l'_1 和 l'_2 的有限能量 DoS 攻击和具有参数 λ 的欺骗攻击的多智能体系统, 在给定正标量 $h, \tilde{\mu}_1, \tilde{\mu}_2, \hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, 0 < \rho < 1, 0 < \hat{\delta} < 1$ 和 $0 < \varsigma_1 < 1$, 如存在适维正定对称矩阵 $\hat{P}_i, \hat{\tilde{P}}_i, \hat{Q}_i, \hat{Q}_i, \hat{W}_i, \hat{W}_i (i = 1, 2)$ 以及对称矩阵 $\hat{J}_1, \bar{Y}, \hat{G}$ 和任意矩阵 $\hat{X}_i, \hat{X}_i (i = 1, 2)$, 使得如下不等式成立, 则误差系统 (24) 均方指数稳定, 即表明该系统实现包含控制. 此外, 控制器增益和观测器增益可通过 $K = \bar{Y} \hat{J}_1^{-1}, G = \hat{G} E N^{-1} \aleph_{11}^{-1} N E^T$ 得到.

$$\hat{\Sigma} = [\hat{\Sigma}_{ij}]_{1 \leq i, j \leq 12} < 0, \quad (49)$$

$$\hat{\Sigma} = [\hat{\Sigma}_{ij}]_{1 \leq i, j \leq 8} < 0, \quad (50)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{W} & \hat{X}^T \\ \hat{X} & \hat{W} \end{bmatrix} > 0, \quad \begin{bmatrix} \hat{W} & \hat{X}^T \\ \hat{X} & \hat{W} \end{bmatrix} > 0, \quad (51)$$

$$\begin{cases} \hat{P} \geq \tilde{\mu}_2^{-1} \hat{\tilde{P}} \\ \hat{Q} \geq \tilde{\mu}_2^{-1} \hat{\tilde{Q}} \\ \hat{W} \geq \tilde{\mu}_2^{-1} \hat{\tilde{W}} \end{cases}, \quad \begin{cases} \hat{P} \geq \tilde{\mu}_1^{-1} \hat{\tilde{P}} \\ \hat{Q} \geq \tilde{\mu}_1^{-1} \hat{\tilde{Q}} \\ \hat{W} \geq \tilde{\mu}_1^{-1} \hat{\tilde{W}} \end{cases}. \quad (52)$$

其中

$$\hat{\Sigma}_{11} = I_M \otimes (2\hat{\alpha}_1 \hat{P}_1 + \hat{Q}_1 - \hat{a}_1 \hat{W}_1 + A \hat{J}_1 + \hat{J}_1 A^T),$$

$$\hat{\Sigma}_{13} = (1 - \rho) L_1 \otimes B \bar{Y} +$$

$$I_M \otimes (\hat{J}_1 A^T + \hat{a}_1 \hat{W}_1 - \hat{a}_1 \hat{X}_1^T),$$

$$\hat{\Sigma}_{14} = -(1 - \rho) L_1 \otimes B \bar{Y}, \quad \hat{\Sigma}_{15} = I_M \otimes \hat{a}_1 \hat{X}_1^T,$$

$$\hat{\Sigma}_{17} = I_M \otimes (\hat{P}_1 + \hat{J}_1 A^T - \hat{J}_1), \quad \hat{\Sigma}_{19} = \rho L_1 \otimes B \bar{Y},$$

$$\hat{\Sigma}_{1,10} = -I_M \otimes B \bar{Y}, \quad \hat{\Sigma}_{26} = I_M \otimes \hat{a}_1 \hat{X}_1^T,$$

$$\hat{\Sigma}_{22} = I_M \otimes (2\hat{\alpha}_1 \hat{P}_2 + \hat{Q}_2 - \hat{a}_1 \hat{W}_2 + A \hat{J}_1 - \hat{G} C + \hat{J}_1 A^T + C^T \hat{G}^T),$$

$$\hat{\Sigma}_{24} = I_M \otimes (\hat{J}_1 A^T - C^T \hat{G}^T + \hat{a}_1 \hat{W}_2 - \hat{a}_1 \hat{X}_2^T),$$

$$\hat{\Sigma}_{28} = I_M \otimes (\hat{P}_2 + \hat{J}_1 A^T - C^T \hat{G}^T - \hat{J}_1),$$

$$\hat{\Sigma}_{33} = (1 - \rho) L_1 \otimes B \bar{Y} + (1 - \rho) L_1^T \otimes \bar{Y}^T B^T +$$

$$I_M \otimes (-2\hat{a}_1 \hat{W}_1 + \hat{a}_1 \hat{X}_1 + \hat{a}_1 \hat{X}_1^T),$$

$$\hat{\Sigma}_{34} = -(1 - \rho) L_1 \otimes B \bar{Y},$$

$$\hat{\Sigma}_{35} = I_M \otimes (-\hat{a}_1 \hat{X}_1^T + \hat{a}_1 \hat{W}_1),$$

$$\hat{\Sigma}_{37} = (1 - \rho) L_1^T \otimes \bar{Y}^T B^T - I_M \otimes \hat{J}_1,$$

$$\hat{\Sigma}_{39} = \rho L_1 \otimes B \bar{Y}, \quad \hat{\Sigma}_{3,10} = -I_M \otimes B \bar{Y},$$

$$\hat{\Sigma}_{3,11} = \lambda I_M \otimes \hat{J}_1^T,$$

$$\hat{\Sigma}_{44} = I_M \otimes (-2\hat{a}_1 \hat{W}_2 + \hat{a}_1 \hat{X}_2 + \hat{a}_1 \hat{X}_2^T),$$

$$\hat{\Sigma}_{46} = I_M \otimes (-\hat{a}_1 \hat{X}_2^T + \hat{a}_1 \hat{W}_2),$$

$$\hat{\Sigma}_{47} = -(1 - \rho) L_1^T \otimes \bar{Y}^T B^T, \quad \hat{\Sigma}_{48} = -I_M \otimes \hat{J}_1,$$

$$\hat{\Sigma}_{4,12} = (I_M \otimes \hat{J}_1)^T (I_M \otimes C)^T \bar{Y}^T,$$

$$\hat{\Sigma}_{55} = I_M \otimes (-\hat{a}_1 \hat{Q}_1 - \hat{a}_1 \hat{W}_1),$$

$$\hat{\Sigma}_{66} = I_M \otimes (-\hat{a}_1 \hat{Q}_2 - \hat{a}_1 \hat{W}_2),$$

$$\hat{\Sigma}_{77} = I_M \otimes (h^2 \hat{W}_1 - \hat{J}_1 - \hat{J}_1),$$

$$\hat{\Sigma}_{79} = \rho L_1 \otimes B \bar{Y}, \quad \hat{\Sigma}_{7,10} = -I_M \otimes B \bar{Y},$$

$$\hat{\Sigma}_{88} = I_M \otimes (h^2 \hat{W}_2 - \hat{J}_1 - \hat{J}_1),$$

$$\hat{\Sigma}_{99} = I_M \otimes (-2\hat{\delta} \hat{J}_1 + \hat{\delta}^2 I_n),$$

$$\hat{\Sigma}_{10,10} = I_M \otimes (-2\hat{\delta} \hat{J}_1 + \hat{\delta}^2 I_n),$$

$$\hat{\Sigma}_{11,11} = -I_M \otimes I_n, \quad \hat{\Sigma}_{12,12} = -I_M \otimes I_p,$$

$$\hat{\Sigma}_{11} = I_M \otimes (-2\hat{\alpha}_2 \hat{P}_1 + A \hat{P}_1 + \hat{P}_1 A^T + \hat{Q}_1 - \hat{a}_2 \hat{W}_1),$$

$$\hat{\Sigma}_{13} = I_M \otimes (\hat{a}_2 \hat{W}_1 - \hat{a}_2 \hat{X}_1^T),$$

$$\hat{\Sigma}_{15} = I_M \otimes (\hat{a}_2 \hat{X}_1^T), \quad \hat{\Sigma}_{17} = I_M \otimes (h \hat{P}_1 A^T),$$

$$\hat{\Sigma}_{22} = I_M \otimes (-2\hat{\alpha}_2 \hat{P}_2 + A \hat{P}_2 + \hat{P}_2 A^T + \hat{Q}_2 - \hat{a}_2 \hat{W}_2),$$

$$\hat{\Sigma}_{24} = I_M \otimes (\hat{a}_2 \hat{W}_2 - \hat{a}_2 \hat{X}_2^T),$$

$$\hat{\Sigma}_{26} = I_M \otimes (\hat{a}_2 \hat{X}_2^T), \quad \hat{\Sigma}_{28} = I_M \otimes (h \hat{P}_2 A^T),$$

$$\hat{\Sigma}_{33} = I_M \otimes (-\hat{a}_2 \hat{W}_1 + \hat{a}_2 \hat{X}_1 + \hat{a}_2 \hat{X}_1^T - \hat{a}_2 \hat{W}_1),$$

$$\hat{\Sigma}_{35} = I_M \otimes (-\hat{a}_2 \hat{X}_1^T + \hat{a}_2 \hat{W}_1),$$

$$\hat{\Sigma}_{44} = I_M \otimes (-\hat{a}_2 \hat{W}_2 + \hat{a}_2 \hat{X}_2 + \hat{a}_2 \hat{X}_2^T - \hat{a}_2 \hat{W}_2),$$

$$\hat{\Sigma}_{46} = I_M \otimes (-\hat{a}_2 \hat{X}_2^T + \hat{a}_2 \hat{W}_2),$$

$$\hat{\Sigma}_{55} = I_M \otimes (-\hat{a}_2 \hat{Q}_1 - \hat{a}_2 \hat{W}_1),$$

$$\hat{\Sigma}_{66} = I_M \otimes (-\hat{a}_2 \hat{Q}_2 - \hat{a}_2 \hat{W}_2),$$

$$\hat{\Sigma}_{77} = I_M \otimes (-2\hat{\delta} \hat{P}_1 + \hat{\delta}^2 \hat{W}_1),$$

$$\hat{\Sigma}_{88} = I_M \otimes (-2\hat{\delta} \hat{P}_2 + \hat{\delta}^2 \hat{W}_2),$$

$\hat{\Sigma}$ 和 $\hat{\Sigma}$ 均为对称矩阵, 其上三角部分中除上述元素外其余元素均为 0, E, N, \aleph_{11} 的含义见引理 2,

$$\hat{P} = \text{diag}\{I_M \otimes \hat{P}_1, I_M \otimes \hat{P}_2\},$$

$$\hat{\tilde{P}} = \text{diag}\{I_M \otimes \hat{\tilde{P}}_1, I_M \otimes \hat{\tilde{P}}_2\},$$

$$\hat{Q} = \text{diag}\{I_M \otimes \hat{Q}_1, I_M \otimes \hat{Q}_2\},$$

$$\begin{aligned}\hat{Q} &= \text{diag}\{I_M \otimes \hat{Q}_1, I_M \otimes \hat{Q}_2\}, \\ \hat{W} &= \text{diag}\{I_M \otimes \hat{W}_1, I_M \otimes \hat{W}_2\}, \\ \tilde{W} &= \text{diag}\{I_M \otimes \tilde{W}_1, I_M \otimes \tilde{W}_2\}, \\ \tilde{\Upsilon} &= \text{diag}_M\{s_1, \dots, s_1\}, \hat{a}_1 = e^{-2\hat{\alpha}_1 h}, \hat{a}_2 = e^{2\hat{\alpha}_2 h}.\end{aligned}$$

证明 定义 $\hat{J}_1 = J_1^{-1}$, $U = \text{diag}_{10}\{I_M \otimes \hat{J}_1, \dots, I_M \otimes \hat{J}_1\}$, 将定理 1 中的式 (27) 左乘、右乘 U , 同时定义 $\hat{P}_1 = \hat{J}_1 \bar{P}_1 \hat{J}_1$, $\hat{P}_2 = \hat{J}_1 \bar{P}_2 \hat{J}_1$, $\hat{Q}_1 = \hat{J}_1 \bar{Q}_1 \hat{J}_1$, $\hat{Q}_2 = \hat{J}_1 \bar{Q}_2 \hat{J}_1$, $\hat{W}_1 = \hat{J}_1 \bar{W}_1 \hat{J}_1$, $\hat{W}_2 = \hat{J}_1 \bar{W}_2 \hat{J}_1$, $\hat{X}_1 = \hat{J}_1 \bar{X}_1 \hat{J}_1$, $\hat{X}_2 = \hat{J}_1 \bar{X}_2 \hat{J}_1$, $Y = K \hat{J}_1$; 根据引理 2 可知, 存在 $\tilde{J}_1 = EN^{-1}N_1NE^T$, 使得 $C\tilde{J}_1 = \tilde{J}_1 C$ 成立, 令 $G\tilde{J}_1 = \tilde{G}$; 然后, 对矩阵中 $\lambda^2 \tilde{J}_1 I_n \tilde{J}_1$ 和 $\tilde{J}_1 (I_M \otimes C)^T \tilde{\Upsilon}^T \tilde{\Upsilon} (I_M \otimes C) \tilde{J}_1$ 项, 采用 Schur 补引理进行处理. 通过上述变换, 最终可以得到定理 2 中的式 (49). 定义 $\hat{P}_1 = \tilde{P}_1^{-1}$, $\hat{P}_2 = \tilde{P}_2^{-1}$, $\tilde{U} = \text{diag}\{I_M \otimes \hat{P}_1, I_M \otimes \hat{P}_2, I_M \otimes \hat{P}_1, I_M \otimes \hat{P}_2, I_M \otimes \hat{P}_1, I_M \otimes \hat{P}_2, I_M \otimes \hat{P}_1, I_M \otimes \hat{P}_2\}$, 将定理 1 中的式 (28) 左乘、右乘 \tilde{U} , 同时定义 $\hat{Q}_1 = \hat{P}_1 \tilde{Q}_1 \hat{P}_1$, $\hat{Q}_2 = \hat{P}_2 \tilde{Q}_2 \hat{P}_2$, $\hat{W}_1 = \hat{P}_1 \tilde{W}_1 \hat{P}_1$, $\hat{W}_2 = \hat{P}_2 \tilde{W}_2 \hat{P}_2$, $\hat{X}_1 = \hat{P}_1 \tilde{X}_1 \hat{P}_1$, $\hat{X}_2 = \hat{P}_2 \tilde{X}_2 \hat{P}_2$, 即得式 (50). 至此, 定理 2 证明完毕.

3 仿真分析

本节将通过仿真分析, 验证在本文设计的事件触发机制及控制协议作用下, 遭受 DoS 攻击和欺骗攻击的多智能体系统能有效实现包含控制, 且能减少触发次数, 证明所提方法的有效性和优越性.

考虑一个由 3 个领导者和 3 个跟随者构成的多智能体系统, 其拓扑结构如图 1 所示.

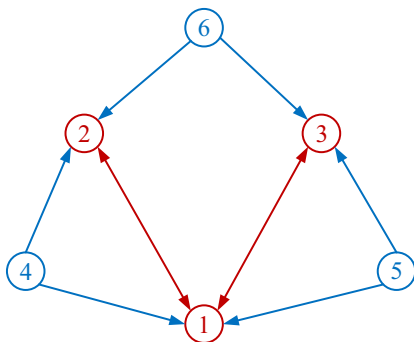


图1 系统拓扑结构图

系统中智能体动态方程如式 (1)-(2) 所示, 系统参数矩阵如下:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -1.5 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, C = [1 \ 0].$$

系统 Laplacian 矩阵如下:

$$L_1 = \begin{bmatrix} 4 & -1 & -1 \\ -1 & 3 & 0 \\ -1 & 0 & 3 \end{bmatrix}, L_2 = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix}.$$

系统其他参数取值: $\hat{\alpha}_1 = 0.5$, $\hat{\alpha}_2 = 0.3$, $s_0 = 0.05$, $s_1 = 0.5$, $\lambda = 0.7$, $\hat{o} = 0.05$.

通过求解定理 2 中的 LMIs, 可求得控制器增益、观测器增益一组可行解为:

$$K = [-0.0080 \quad -0.0119], G = \begin{bmatrix} 0.4646 \\ -0.0050 \end{bmatrix}.$$

设系统和观测器的初始状态如下:

$$\begin{aligned}x_1(t_0) &= \begin{bmatrix} -7 \\ 6 \end{bmatrix}, x_2(t_0) = \begin{bmatrix} 5 \\ 3 \end{bmatrix}, x_3(t_0) = \begin{bmatrix} 7 \\ -3 \end{bmatrix}, \\ x_4(t_0) &= \begin{bmatrix} -8 \\ 1 \end{bmatrix}, x_5(t_0) = \begin{bmatrix} 6 \\ 2 \end{bmatrix}, x_6(t_0) = \begin{bmatrix} 8 \\ 1 \end{bmatrix}, \\ \hat{x}_1(t_0) &= \begin{bmatrix} -2 \\ -1 \end{bmatrix}, \hat{x}_2(t_0) = \begin{bmatrix} 3 \\ 5 \end{bmatrix}, \hat{x}_3(t_0) = \begin{bmatrix} 2.5 \\ -4 \end{bmatrix}.\end{aligned}$$

取系统的采样周期 $h = 0.01s$, 采用非线性函数 $f(\hat{x}_i(t_k^i h)) = \tanh(\hat{x}_i(t_k^i h))$ 描述欺骗攻击信号, 且服从 Bernoulli 分布, 发生的概率为 $\rho = 0.7$, DoS 攻击周期性发生, 1s 攻击一次, 攻击持续时间为 0.2s; 利用上述参数对多智能体系统进行仿真. 在 DoS 和欺骗双重攻击下, 跟随智能体控制输入如图 2 所示. 可以看出, 当通信网络发生 DoS 攻击时, 由于通信中断, 控制输入为零; 在发生欺骗攻击时, 控制输入出现一定幅度的振荡, 这体现了 DoS 攻击对通信通道的阻断效应及欺骗攻击对控制信号稳定性的直接影响.

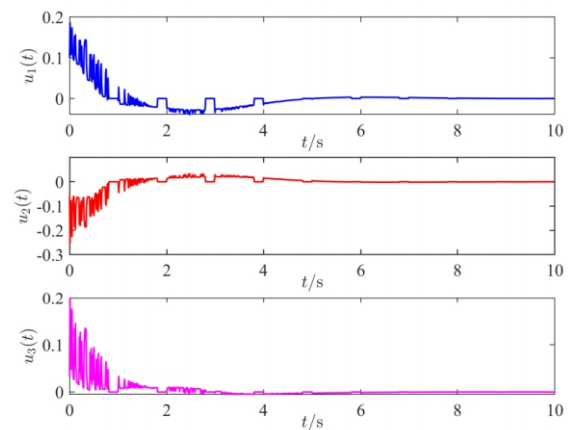


图2 跟随智能体控制输入

系统的状态轨迹及包含误差如图 3-图 4 所示. 可以看出, 在本文设计的事件触发机制 (6) 和控制协议 (14) 作用下, 跟随智能体 1-3 能移动到领导智能体 4-6 形成的凸包内, 包含误差收敛到零, 实现包含控制.

针对跟随者状态不可测问题, 本文设计了状态

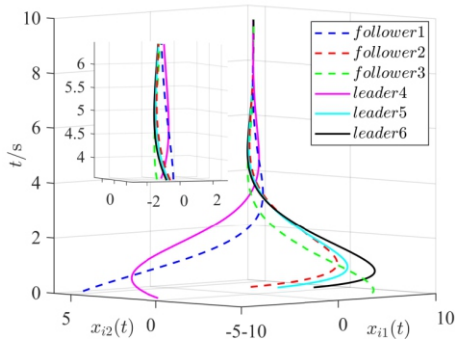


图3 智能体状态轨迹

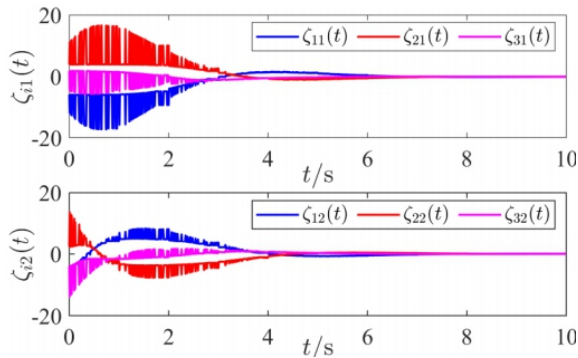


图4 系统包含误差

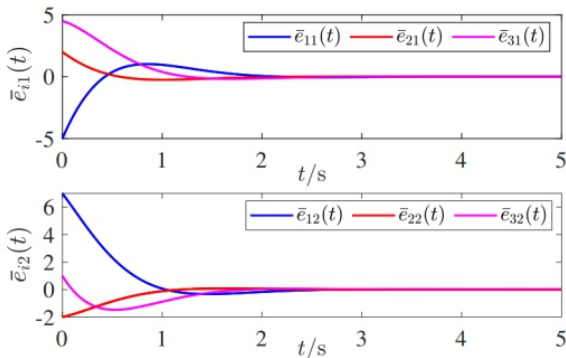


图5 跟随智能体状态观测误差

观测器, 跟随智能体 1-3 状态观测误差如图 5 所示. 可以看出, 状态观测误差能较快收敛到零, 说明设计的观测器能较准确观测跟随智能体状态.

图 6 给出了在 DoS 攻击和欺骗攻击双重攻击下本文所设计的事件触发机制的释放间隔和释放瞬间. 可以看出, 所设计的触发机制可以在 DoS 攻击结束时立即触发, 从而降低对系统性能的影响. 经统计, 在 1000 次周期采样过程中, 跟随智能体 1、2、3 的控制输入更新次数分别为 286、188 和 253, 这意味着数据通信率分别降低了 71.4%、81.2% 和 74.7%, 充分说明了本文所设计的事件触发机制能有效降低多智能体系统包含控制的数据更新频率, 以达到节约通信资源的目的.

为探究不同频率的 DoS 攻击与不同强度的欺骗攻击对系统包含控制收敛性能的影响, 将 DoS 攻击

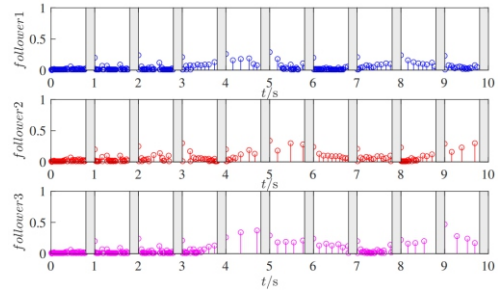


图6 事件触发机制下数据释放间隔和释放瞬间

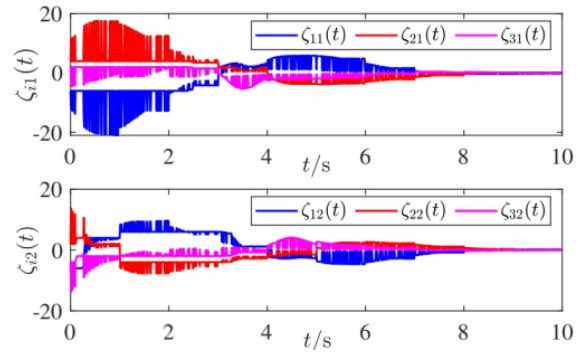


图7 攻击强度增大情况下系统包含误差

持续时间设置为 0.5s, 欺骗攻击信号取 $f(\hat{x}_i(t_k^{ih})) = \tanh(10\hat{x}_i(t_k^{ih}))$, 仿真结果如图 7 所示.

相较于图 4 可以明显看出, 当 DoS 攻击持续时间延长且欺骗攻击强度增大时, 系统的包含控制收敛速度延缓, 且收敛过程中的状态波动加剧. 此外, 事件触发机制的触发频率明显上升. 具体而言, 在 1000 个采样周期内, 跟随智能体 1、2、3 的控制输入更新次数分别为 343、285 和 318 次, 相较于上一组仿真参数, 其通信率分别增加了 16.6%、34.0% 和 20.4%. 这表明, 随着攻击持续时间与攻击强度的增加, 为保证系统稳定并实现包含控制目标, 触发机制提升了数据更新频率. 由此可见, 攻击的持续时间和强度对系统收敛性能具有直接且显著的影响.

4 结论

本文研究了混合网络攻击下的多智能体系统基于事件触发机制包含控制问题. 针对同时遭受 DoS 攻击和欺骗攻击的多智能体系统, 基于当前时刻和历史时刻的观测状态及自适应更新规则, 设计了一种记忆型自适应动态事件触发机制, 该机制充分考虑网络攻击影响, 主动将欺骗攻击信号模型引入到触发条件中, 使其能感知恶意数据篡改对系统的影响, 且能够在 DoS 攻击终止时立即恢复数据包传输, 有效缓解因通信中断导致系统性能下降的影响. 同时, 基于网络攻击防御策略, 基于观测状态和事件触发机制, 设计切换型包含控制协议, 采用 L-K 泛函方法展开研究, 得到混合网络攻击下多智能体系统包含

控制条件,并给出了控制器、观测器协同设计方法。最后,通过仿真验证了所提方法的有效性。

参考文献 (References)

- [1] 卢剑权,邢梦平,张晶.网络攻击下多智能体系统一致性安全与隐私保护研究综述[J].*控制与决策*,2025,40(11):3201-3219.
(Lu J Q, Xing M P, Zhang J. A survey on secure and privacy protection of multi-agent systems consensus under cyber attacks[J]. *Control and Decision*, 2025, 40(11): 3201-3219.)
- [2] 张金南,胡仲瑞,汪涵博,等.能量受限 DoS 攻击下多智能体系统二分一致性控制[J].*控制与决策*,2025,40(11):3340-3348.
(Zhang J N, Hu Z D, Wang H B, et al. Bipartite consensus control of multi-agent systems under energy-constrained DoS attacks[J]. *Control and Decision*, 2025, 40(11): 3340-3348.)
- [3] 马煜文,李贤伟,李少远.无控制器间通信的线性多智能体一致性的降阶协议[J].*自动化学报*,2023,49(9):1836-1844.
(Ma Y W, Li X W, Li S Y. A reduced-order protocol for linear multi-agent consensus without inter-controller communication[J]. *ACTA Automatica Sinica*, 2023, 49(9): 1836-1844.)
- [4] 范泉涌,张乃宗,唐勇,等.基于动态事件触发通信协议的多智能体系统自适应可靠控制[J].*自动化学报*,2024,50(5):924-936.
(Fan Q Y, Zhang N Z, Tang Y, et al. Adaptive reliable control of multi-agent systems based on dynamic event-triggered communication protocol[J]. *ACTA Automatica Sinica*, 2024, 50(5): 924-936.)
- [5] 李瑶珀,马丹.二阶多智能体系统包含控制的时滞范围优化[J].*控制与决策*,2023,38(5):1345-1351.
(Li Y P, Ma D. Delay range optimization for containment control of second-order multi-agent systems[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(5): 1345-1351.)
- [6] 邓甲,王付永,刘忠信,等.动态事件触发机制下二阶多智能体系统完全分布式控制[J].*控制理论与应用*,2024,41(1):11-20.
(Deng J, Wang F Y, Liu Z X, et al. Fully distributed control for second-order multi-agent systems based on dynamic event-triggered mechanism[J]. *Control Theory & Applications*, 2024, 41(1): 11-20.)
- [7] Ding Y, Ren W. Sampled-data containment control for double-integrator agents with dynamic leaders with nonzero inputs[J]. *Systems & Control Letters*, 2020, 139: 104673.
- [8] Ferrari-Trecate G, Egerstedt M, Buffa A, et al. Laplacian sheep: A hybrid, stop-go policy for leader-based containment control[C]. *Hybrid Systems: Computation and Control*. Heidelberg, 2006: 212-226.
- [9] Qin J H, Ma Q C, Yu X H, et al. Output containment control for heterogeneous linear multiagent systems with fixed and switching topologies[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2019, 49(12): 4117-4128.
- [10] Xiao S Y, Dong J X. Distributed fault-tolerant containment control for linear heterogeneous multiagent systems: A hierarchical design approach[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, 52(2): 971-981.
- [11] Liu Z H, Zhan X S, Han T, et al. Distributed adaptive finite-time bipartite containment control of linear multi-agent systems[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2022, 69(11): 4354-4358.
- [12] Luo H, Ye Q B, Chen W H, et al. Containment control problem of linear multi-agent systems with external disturbance[C]. *Proceedings of the 40th Chinese Control Conference*. Shanghai, 2021: 5240-5245.
- [13] Wang D, Huang Y, Guo S X, et al. Distributed H_∞ containment control of multiagent systems over switching topologies with communication time delay[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2020, 30(13): 5221-5232.
- [14] Wang Q, Dong X W, Yu J L, et al. Predefined finite-time output containment of nonlinear multi-agent systems with leaders of unknown inputs[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2021, 68(8): 3436-3448.
- [15] Lei Y, Wang Y W, Morarescu I C, et al. Event-triggered fixed-time stabilization of two time scales linear systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2023, 68(3): 1722-1729.
- [16] Lei Y, Wang Z, Wang X, et al. Hybrid formation control for heterogeneous uncertain linear two-time-scale systems[J]. *Automatica*, 2025, 176: 112267.
- [17] Mousavian M, Atrianfar H. Resilient event-triggered containment control of multiagent systems under asynchronous DoS attacks and disturbances[J]. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2025, 12(1): 85-95.
- [18] Guang W W, Lei Y, Wang X. Event-triggered optimal containment control for heterogeneous stochastic nonlinear multiagent systems under denial-of-service attacks[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2025, 55(10): 6505-6516.
- [19] Ma Y S, Che W W, Deng C, et al. Observer-based event-triggered containment control for MASs under DoS attacks[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, 52(12): 13156-13167.
- [20] Ma Y S, Che W W, Deng C, et al. Observer-based fully distributed containment control for MASs subject to DoS attacks[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2023, 53(2): 897-907.
- [21] Xia T H, Yan H C, Wang M, et al. Fully distributed containment control for multiagent systems under DoS attacks via adaptive event-triggered approach[J]. *Asian Journal of Control*, 2026, 28(2): 1026-1038.
- [22] Ma Y S, Che W W, Deng C. Observer-Based fuzzy containment control for nonlinear networked mass under dos attacks[J]. *Applied Mathematics and Computation*,

- 2022, 421: 126941.
- [23] Liu Z H, Zhang H, Wang Z P. Bipartite containment control of multi-agent systems under DoS attacks: An event-triggered scheme[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2025, 35(2): 479-495.
- [24] Zuo S, Yue D. Resilient output formation containment of heterogeneous multigroup systems against unbounded attacks[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, 52(3): 1902-1910.
- [25] Zhang Z X, Dong J X. Fault-tolerant containment control for IT2 fuzzy networked multiagent systems against denial-of-service attacks and actuator faults[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2022, 52(4): 2213-2224.
- [26] Zuo S, Yue D. Resilient containment of multigroup systems against unknown unbounded FDI attacks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(3): 2864-2873.
- [27] Cai Y L, Dai J, Zhang H G, et al. Fixed-time leader-following/containment consensus of nonlinear multi-agent systems based on event-triggered mechanism[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2021, 396: 125881.
- [28] Zhu H F, Liu J H, Zhang S, et al. Event-triggered containment control for multi-agent systems under hybrid cyber attacks[J]. *Asian Journal of Control*, 2024, 26(1): 114-125.
- [29] Wang D, Wang Z D, Wang Z H, et al. Design of hybrid event-triggered containment controllers for homogeneous and heterogeneous multiagent systems[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2021, 51(10): 4885-4896.
- [30] Liu W H, Yang C J, Sun Y X, et al. Observer-based event-triggered containment control of multi-agent systems with time delay[J]. *International Journal of Systems Science*, 2017, 48(6): 1217-1225.
- [31] Zhang J, Zhang H G, Cai Y L, et al. Containment control of general linear multi-agent systems by event-triggered control mechanisms[J]. *Neurocomputing*, 2021, 433: 263-274.
- [32] Qian W, Lu D, Guo S M, et al. Distributed state estimation for mixed delays system over sensor networks with multichannel random attacks and Markov switching topology[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2024, 35(6): 8623-8637.
- [33] Qian W, Xing W W, Fei S M. H_∞ state estimation for neural networks with general activation function and mixed time-varying delays[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2021, 32(9): 3909-3918.
- [34] Qian W, Li Y J, Chen Y G, et al. L_2 - L_∞ filtering for stochastic delayed systems with randomly occurring nonlinearities and sensor saturation[J]. *International Journal of Systems Science*, 2020, 51(13): 2360-2377.
- [35] Qian W, Li Y L, Zhao Y J, et al. New optimal method for L_2 - L_∞ state estimation of delayed neural networks[J]. *Neurocomputing*, 2020, 415: 258-265.
- [36] Qian W, Wu Y M, Wang Z D. New WOTD protocol-based fault detection filter design for interval type-2 fuzzy systems via an adaptive differential evolution algorithm[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2025, 36(10): 19119-19132.
- [37] Park P, Ko J W, Jeong C. Reciprocally convex approach to stability of systems with time-varying delays[J]. *Automatica*, 2011, 47(1): 235-238.
- [38] Han Q L, Liu Y R, Yang F W. Optimal communication network-based H_∞ quantized control with packet dropouts for a class of discrete-time neural networks with distributed time delay[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2016, 27(2): 426-434.
- [39] Liu J L, Gu Y Y, Xie X P, et al. Hybrid-driven-based H_∞ control for networked cascade control systems with actuator saturations and stochastic cyber attacks[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, 49(12): 2452-2463.

作者简介

郭建锋 (1980–), 男, 博士生, 主要研究方向为多智能体系统控制, E-mail: gjf@hpu.edu.cn;

钱伟 (1978–), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为网络化系统控制、时滞系统的稳定性分析与综合, E-mail: qwei@hpu.edu.cn.