

执行器攻击下开放式异构多智能体系统的 自适应输出一致性

李晓东¹, 温广辉^{2*}

(1. 东南大学数学学院, 江苏南京 211189; 2. 东南大学自动化学院, 江苏南京 210096)

摘要: 本文研究了受到执行器攻击的开放式异构多智能体系统的自适应输出一致性问题。在复杂的工业互联网与现代集群系统应用场景中, 多智能体系统常因任务编组调整、通信链路波动、节点故障与动态接入等因素而呈现出显著的开放式特性, 具体表现为系统节点集合与整体维数随时间演化, 通信拓扑呈现时变、间歇性连通与重构切换等复杂特性, 从而使群体动力学结构与可获得信息结构具有更强的时变性与不确定性。与此同时, 分布式控制信号通常需要经由网络化通道传输并在执行器端接收并执行, 一旦攻击者在执行器侧进行恶意数据注入, 控制输入将被叠加未知干扰甚至被篡改为具有误导性的指令, 从而导致智能体实际执行行为偏离预期并破坏协同一致性, 显著增加分布式控制设计与一致性分析的难度。针对上述挑战, 本文首先利用智能体的输出信息构造了一种具有攻击免疫能力的降阶观测器, 在不对执行器攻击进行显式估计的前提下获取控制所需的局部状态信息, 降低了估计成本。在此基础上, 本文进一步设计了一种完全分布式的自适应弹性控制协议, 该协议仅利用相邻智能体之间的交互信息及本地观测量即可在线调节耦合增益与攻击补偿参数, 实现对攻击影响的抑制以及对拓扑不确定性的自适应处理。该方法不需要任何全局拓扑信息与攻击上界信息, 因此能够适应开放式网络环境下的节点数量动态变化以及拓扑切换等情形, 具有良好的可扩展性与工程可实现性。为刻画开放式异构多智能体系统的结构特性与误差演化机理, 本文建立了一种用于描述系统跟踪误差演化的统一分析框架, 并在该框架下推导了执行器攻击存在时实现输出一致性的平均驻留时间条件, 从而给出拓扑切换频率与系统收敛性能之间的关系。最后, 通过数值仿真对所提出方法进行验证, 并与现有算法进行对比。结果表明在相同攻击条件与网络环境下, 本文方法能够有效抑制攻击对群体行为的影响并提升收敛速度, 从而验证了所提出降阶观测器与完全分布式自适应弹性控制策略的有效性与优势。

关键词: 开放式多智能体系统; 弹性一致性; 分布式跟踪; 自适应控制; 执行器攻击

基金项目: 国家自然科学基金(No.62325304)

中图分类号: TP273; TP13

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2026)02-0698-12

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20251224

Adaptive Output Consensus of Heterogeneous Open Multi-Agent Systems under Actuator Attacks

LI Xiaodong¹, WEN Guanghui^{2*}

(1. School of Mathematics, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China;

2. School of Automation, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: This paper investigates the adaptive output consensus problem of heterogeneous open multi-agent systems under actuator attacks. In complex application scenarios such as the industrial internet and modern cluster systems, multi-agent systems often exhibit open characteristics due to task reconfiguration, fluctuations in communication links, node faults, and dynamic joining/leaving. Specifically, the node set and the overall system dimension may evolve over time, and the communication topology may exhibit time-varying behavior, intermittent connectivity, and reconstruction-induced switching. These characteristics make both the collective dynamics and the available information structure strongly time-varying and uncertain. Meanwhile, distributed control signals typically need to be transmitted through networked channels and received and executed at the actuator. Once an attacker injects malicious data into the actuators, the control inputs can be superimposed with unknown disturbances or even tampered into misleading commands, causing the agents' actual behaviors to deviate from their intended actions and thereby destroying cooperative consensus. These issues significantly increase the difficulty of distributed controller design and consensus analysis. To address these challenges, an attack-free reduced-order observer is designed based solely on output information. Without explicitly estimating actuator attacks, the proposed ob-

server provides the local state information required for control design, thereby reducing the estimation cost. Building upon this, a fully distributed adaptive resilient control protocol is developed. The protocol relies solely on local observations and interaction information exchanged among neighboring agents to adjust the coupling gains and attack-compensation parameters online, achieving both suppression of attack effects and adaptive handling of topology uncertainties. Notably, the proposed method requires neither any global topology information nor prior knowledge of attack bounds. Thus, it is well suited to open network environments with dynamically changing numbers of nodes and topology switching, offering excellent scalability and practical implementability. To characterize the structural properties and error propagation mechanism of heterogeneous open multi-agent systems, a unified analytical framework is established to describe the evolution of the tracking error. Based on this framework, an average dwell-time condition is derived to guarantee output consensus of the system under actuator attacks, thereby revealing the relationship between the topology switching rate and the system's convergence performance. A numerical simulation is provided to demonstrate the effectiveness of the proposed approach and to compare it with existing algorithms. The results show that, under the same attack conditions and network settings, the proposed method effectively mitigates the impact of attacks on collective behaviors and improves the convergence speed, thereby demonstrating the effectiveness and advantages of the proposed reduced-order observer and fully distributed adaptive resilient control strategy.

Keywords: open multi-agent system; resilient consensus; distributed tracking; adaptive control; actuator attack

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.62325304)

0 引言

多智能体系统由多个具备自主决策能力的智能体通过通信网络相互协作构成,能够在无集中控制或仅依赖局部信息的条件下完成复杂任务。由于其具有良好的可扩展性、鲁棒性以及分布式实现优势,多智能体系统在无人艇编队^[1]、智能交通系统^[2]、智能电网^[3]、群体机器人系统^[4]以及无人机跟踪^[5]等领域展现出广泛的应用前景。协同控制作为多智能体系统研究的重要分支,旨在通过局部信息交互实现系统整体的协调与有序行为,其中一致性问题已成为控制领域的核心研究方向之一。近年来,围绕多智能体系统一致性问题的理论分析与控制设计方法已取得了大量研究成果^[6-9]。

已有的关于多智能体系统一致性的研究主要集中于同构系统情形,即假设所有智能体具有相同或相似的动力学结构。然而,在实际工程应用中,受硬件条件差异、控制目标多样性以及任务分工等因素的影响,系统中各个智能体的动力学模型往往存在显著差异,从而形成异构多智能体系统^[10-12]。相比同构系统,异构多智能体系统在系统建模、稳定性分析以及控制器设计等方面面临更大的挑战,尤其是在仅利用局部信息的条件下实现输出一致性时,其复杂性更为突出。为此,研究者逐渐将关注重点从状态一致性拓展至输出一致性问题。针对异构多智能体系统的输出一致性控制问题,已有文献提出了多种方法。例如,基于内模原理,文献[13]设计了一类控制协议,用于解决异构多智能体系统的输出一致性问题。文献[14]针对具有未知控制增益的异构非线性多智能体系统,设计了一类自适应跟踪控制协议以实现输出

一致性。

多智能体系统的分布式协同控制通常依赖通信链路完成信息交互与控制信号的传输,而当通信链路处于不可信的网络环境中时,系统可能受到恶意攻击者的信号注入、篡改或阻断等网络攻击的影响。网络攻击可作用于感知、通信与执行等不同环节,其中直接作用于控制输入通道的攻击通常称为执行器攻击^[15-16]。近年来,已有研究开始关注执行器攻击影响下异构多智能体系统的输出一致性问题。其中,弹性控制作为保障系统在恶意攻击或不确定扰动环境中稳定运行的重要策略,逐渐成为该领域的研究热点,该类方法旨在提升系统对攻击的鲁棒性和容错能力,即便在攻击模型未知或攻击持续存在的情况下,依然能够维持期望的协同行为。文献[17]采用基于参考模型的自适应弹性控制方法,解决了同时受到执行器攻击与传感器攻击的异构多智能体系统的输出一致性问题。文献[18]提出了一种基于自适应事件触发机制的完全分布式弹性控制协议,解决了受到链路攻击与执行器攻击的异构多智能体系统的输出一致性问题。

现实应用中,由于通信链路易受遮挡与干扰、网络带宽/能量约束以及任务重构等因素影响,智能体之间的交互关系往往随时间发生变化,从而使通信拓扑呈现切换特性。文献[19]基于 Lyapunov 不等式理论,开发了一种多 Lyapunov 函数方法解决了具有有向切换拓扑的多智能体系统的一致性跟踪问题。需要指出的是,现有针对切换拓扑的研究主要刻画通信拓扑的时变性,通常假设系统成员集合保持不变。而在许多实际场景中,智能体的动态加入或退出是一种常

态现象,例如无人机集群中的临时编队调整或分布式能源系统中的设备接入与断开,这类存在智能体动态加入与退出的系统通常被称为开放式多智能体系统。与封闭系统相比,开放式多智能体系统在系统维数、通信拓扑以及信息结构等方面均呈现动态变化特性,这给一致性分析和控制器设计带来了新的挑战。近年来,已有文献开始关注开放式多智能体系统的一致性问题,并在成员变化条件下给出了一定的理论分析结果^[20-24]。然而,现有研究大多未考虑系统在运行过程中可能遭受的执行器攻击因素。当系统同时具有异构特性、开放式结构以及执行器攻击时,其自适应一致性控制问题将变得更加复杂,目前尚缺乏统一的分析框架和系统性的研究成果。

基于上述分析,本文研究了受到执行器攻击的开放式异构多智能体系统的自适应输出一致性问题。针对系统状态信息受限、攻击信号未知以及网络结构开放等特点,本文构建了一种统一的开放式多智能体系统建模与分析框架,并在此基础上设计了一种分布式自适应输出反馈控制方法,从而实现了系统在执行器攻击下的输出一致性。本文的主要贡献概括如下:

(1) 针对开放式多智能体系统中难以获取领导者全局信息的问题,本文设计了一类完全分布式的动态补偿器,用于在线估计领导者状态信息。与文献[24]中依赖所有可能通信拓扑的拉普拉斯矩阵特征值的补偿方法相比,本文设计的补偿器仅依赖相邻智能体之间的局部交互信息,不需要任何全局拓扑参数或集中式信息,因而能够适应智能体数量变化的开放式环境。

(2) 基于攻击免疫降阶观测器估计的系统状态信息以及动态补偿器获得的领导者估计信息,进一步设计了一种弹性分布式控制协议,实现了开放式异构多智能体系统的输出一致性。同时,在控制器中引入了一种无需攻击先验信息的自适应攻击补偿机制,与文献[16]中需依赖攻击上界信息的方法相比,本文所提方法具有更强的自适应性与实用性,能够在未知执行器攻击条件下有效抑制攻击带来的不利影响,从而提高系统在对抗环境下的鲁棒性。

(3) 针对开放式多智能体系统中通信拓扑和成员集合动态变化所带来的分析困难,本文构造了一种统一的分析框架以刻画系统跟踪误差的演化特性。与文献[22]中基于依赖切换前误差范数的乘性因子方法相比,本文引入的加性误差项仅依赖于新增跟随者的误差变量,更便于预先调节。在该分析框架下,本文给出了保证系统实现输出一致性的平均驻留时间条件,为研究开放式多智能体系统的一致性问题提供了一种有效的分析工具。仿真算例也验证了上述算

法的有效性。

符号说明: $\mathbb{R}^{p \times q}$ 表示 $p \times q$ 维实矩阵集合;“\”表示集合的差集,例如 $A \setminus B$ 表示集合 A 中去除 B 的元素; $D^+V(t)$ 表示函数 $V(t)$ 沿系统轨迹的右上 Dini 导数,定义为 $D^+V(t) = \limsup_{h \rightarrow 0^+} \frac{V(t+h) - V(t)}{h}$; $\|\cdot\|$ 表示向量或矩阵的 2-范数; \otimes 表示矩阵的 Kronecker 积; I_n 表示 n 阶单位矩阵; $\text{col}\{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n\}$ 表示将向量 $\mathbf{x}_i, i = 1, 2, \dots, n$ 按列方式堆叠组成的向量,即 $[\mathbf{x}_1^T, \mathbf{x}_2^T, \dots, \mathbf{x}_n^T]^T$ 。

1 模型与问题描述

考虑由一个领导者和若干跟随者构成的开放式异构多智能体系统,在实际工程系统中,不同智能体往往由不同硬件平台或执行机构构成,其动力学结构和参数存在差异,因此系统整体呈现出异构特性。此外,与传统多智能体系统中跟随者数量固定的情形不同,在开放式系统中,由于任务需求变化、系统扩展或节点故障等因素,参与协同控制的跟随者数量可能随时间发生变化,即部分智能体可能在运行过程中加入系统或从系统中退出。首先,引入一组严格递增的切换时间序列 $0 = t_0 < t_1 < t_2 < \dots$,其中相邻时刻用于刻画系统结构可能发生变化的切换瞬间。在任意时间区间 $[t_\theta, t_{\theta+1})$ 内,系统中参与协同控制的跟随者集合保持不变,而在切换时刻 t_θ ,可能出现新的跟随者加入系统,或者已有跟随者退出系统,或者两种情况同时发生。

为了描述这一动态过程,定义分段右连续的常值切换信号 $\rho(t): \mathbb{R}_{\geq 0} \rightarrow \mathcal{S}$, \mathcal{S} 表示系统运行过程中所有可能出现的模式集合。当 $t \in [t_\theta, t_{\theta+1})$ 时, $\rho(t) = \sigma_\theta, \sigma_\theta \in \mathcal{S}$ 表示系统在区间 $[t_\theta, t_{\theta+1})$ 内所处的模式编号,在该时间区间内使用时变的无向图 $G_{\rho(t)} = \{\mathcal{V}_{\rho(t)}, E_{\rho(t)}, \mathcal{A}_{\rho(t)}\}$ 表示激活跟随者之间的通信关系, $\mathcal{V}_{\rho(t)} \subseteq \mathcal{V}$ 表示在该时间区间内处于激活状态的跟随者集合,其基数记为 η_θ ,其中, $\mathcal{V} = \{v_1, v_2, \dots, v_{N_{\max}}\}$ 为系统中所有潜在跟随者集合, N_{\max} 表示系统运行过程中可能出现的最大跟随者数量。 $E_{\rho(t)} \subset \mathcal{V}_{\rho(t)} \times \mathcal{V}_{\rho(t)}$ 表示边集合, $\mathcal{A}_{\rho(t)} = [a_{ij}(\rho(t))]_{\eta_\theta \times \eta_\theta}$ 为对应的邻接矩阵。若在区间 $[t_\theta, t_{\theta+1})$ 内跟随者 v_{θ_j} 能够向跟随者 v_{θ_i} 发送信息,则有 $a_{ij}(\rho(t)) = 1$,否则 $a_{ij}(\rho(t)) = 0$ 。进一步定义度矩阵 $\mathbf{D}_{\rho(t)} = \text{diag}[d_1(\rho(t)), d_2(\rho(t)), \dots, d_{\eta_\theta}(\rho(t))]$,其中, $d_i(\rho(t)) = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij}(\rho(t))$, \mathcal{N}_i 表示节点在拓扑下的邻居集合。由此可得对应的拉普拉斯矩阵 $\mathbf{L}_{\rho(t)} = \mathbf{D}_{\rho(t)} - \mathcal{A}_{\rho(t)}$ 。

在上述开放式通信拓扑定义的基础上,进一步对

系统中领导者及激活跟随者的动力学行为进行建模。对于任一处于激活状态的跟随者 $v_{\theta_i} \in \mathcal{V}_{\rho(t)}$, 其动力学模型在区间 $[t_{\theta}, t_{\theta+1})$ 内描述为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_{\theta_i} = \mathbf{A}_{\theta_i} \mathbf{x}_{\theta_i} + \mathbf{B}_{\theta_i} \mathbf{u}_{\theta_i} \\ \mathbf{y}_{\theta_i} = \mathbf{C}_{\theta_i} \mathbf{x}_{\theta_i} \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\mathbf{x}_{\theta_i} \in \mathbb{R}^{n_{\theta_i}}$ 、 $\mathbf{u}_{\theta_i} \in \mathbb{R}^{m_{\theta_i}}$ 和 $\mathbf{y}_{\theta_i} \in \mathbb{R}^p$ 分别表示跟随者 v_{θ_i} 的状态, 实际控制输入和输出, 矩阵 $\mathbf{A}_{\theta_i} \in \mathbb{R}^{n_{\theta_i} \times n_{\theta_i}}$ 、 $\mathbf{B}_{\theta_i} \in \mathbb{R}^{n_{\theta_i} \times m_{\theta_i}}$ 和 $\mathbf{C}_{\theta_i} \in \mathbb{R}^{p \times n_{\theta_i}}$ 的维数及参数随智能体编号变化。领导者的动力学模型描述为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_0 = \mathbf{A}_0 \mathbf{x}_0 \\ \mathbf{y}_0 = \mathbf{C}_0 \mathbf{x}_0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{x}_0 \in \mathbb{R}^r$ 和 $\mathbf{y}_0 \in \mathbb{R}^p$ 分别表示领导者的状态和输出, 矩阵 $\mathbf{A}_0 \in \mathbb{R}^{r \times r}$ 和 $\mathbf{C}_0 \in \mathbb{R}^{p \times r}$ 为已知常数矩阵, 领导者的状态通常无法被所有跟随者直接获取。当系统结构在切换时刻 t_{θ} 发生变化时, 新加入的跟随者从其加入时刻起开始按照式(1)参与系统演化, 而退出的跟随者则不再参与后续与其余跟随者的信息交互。为了便于分析, 在任意给定的时间区间 $[t_{\theta}, t_{\theta+1})$ 内, 系统可视为由领导者与 η_{θ} 个跟随者构成的固定维数多智能体系统, 其动力学模型在该区间内保持不变。

在网络化控制系统中, 控制信号通常需要通过通信网络和执行器模块才能作用于被控对象。在此过程中, 执行器端可能成为恶意攻击者的直接目标, 例如攻击者通过入侵执行器控制模块、篡改控制指令或注入伪造信号, 从而破坏控制输入的正常执行。这类攻击通常被统称为执行器攻击, 其本质特征是在不改变控制器结构的情况下, 直接干扰系统实际接收到的控制输入。为刻画上述执行器攻击对系统的影响, 假设跟随者 v_{θ_i} 施加于系统的实际控制输入由正常控制信号与攻击信号叠加而成, 即

$$\mathbf{u}_{\theta_i}^c = \mathbf{u}_{\theta_i} + \mathbf{u}_{\theta_i}^a \quad (3)$$

其中, $\mathbf{u}_{\theta_i} \in \mathbb{R}^{m_{\theta_i}}$ 表示由控制器计算得到的期望控制输入, $\mathbf{u}_{\theta_i}^a \in \mathbb{R}^{m_{\theta_i}}$ 表示注入到执行器通道中的攻击信号。该攻击信号的产生机制和具体形式未知, 可能为常值偏置、时变信号或具有一定频谱特性的复杂信号, 但在物理约束和攻击资源受限的条件下, 其幅值通常是有界的, 即存在一个正常数 $\gamma > 0$ 使得 $\dot{\mathbf{u}}_{\theta_i}^a \leq \gamma$ 。需要指出的是, 执行器攻击通过直接作用于控制输入通道, 对系统的动态行为产生持续影响, 其危害性不同于瞬时扰动或测量噪声。即使控制器本身设计正确, 执行器攻击的存在仍可能导致系统性能恶化甚至破坏一致性目标, 因此在控制策略设计与稳定性分析中必须显式加以考虑。

为保证后续分析与控制器设计的可行性, 下面对所研究的系统做出若干合理假设。

假设 1 领导者系统矩阵 \mathbf{A}_0 的所有特征值均位于复平面的闭右半平面, 即 $\text{Re}\{\lambda_{\min}(\mathbf{A}_0)\} \geq 0$ 。

假设 2 领导者系统矩阵对 $(\mathbf{A}_0, \mathbf{C}_0)$ 是能观的。

假设 3 对于任一跟随者 v_{θ_i} , 其系统矩阵对 $(\mathbf{A}_{\theta_i}, \mathbf{B}_{\theta_i})$ 是能控的。

假设 4 对于任一跟随者 v_{θ_i} , 对于 $\forall \varepsilon \in \mathbb{C}^+$ 有

$$\text{rank} \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{\theta_i} - \varepsilon \mathbf{I}_{n_{\theta_i}} & \mathbf{B}_{\theta_i} \\ \mathbf{C}_{\theta_i} & \mathbf{0} \end{bmatrix} = n_{\theta_i} + m_{\theta_i}。$$

假设 5 对于任一跟随者 v_{θ_i} , 有 $\text{rank}(\mathbf{B}_{\theta_i}) = \text{rank}(\mathbf{C}_{\theta_i} \mathbf{B}_{\theta_i}) = m_{\theta_i}$ 。

假设 6 对于任一跟随者 v_{θ_i} , 输出矩阵满足 $\text{rank}(\mathbf{C}_{\theta_i}) = p$ 。

注 1 以上假设为本文提出的控制策略设计的关键前提。具体而言, 假设 1、3 和 4 是求解输出调节问题所需的基本条件^[13]; 假设 2 为动态补偿器的构造提供结构支撑; 假设 5 和 6 则保障了降阶观测器的构造与误差分析的有效性。

考虑领导者与跟随者之间的信息交互关系, 引入领导者邻接矩阵 $\mathbf{B}_{\rho(t)} = \text{diag}[b_1(\rho(t)), b_2(\rho(t)), \dots, b_{\eta_{\theta}}(\rho(t))] \in \mathbb{R}^{\eta_{\theta} \times \eta_{\theta}}$, 其中, $b_i(\rho(t)) = 1$ 表示在时间区间 $[t_{\theta}, t_{\theta+1})$ 内跟随者 v_{θ_i} 能够直接接收到来自领导者的信息, 否则 $b_i(\rho(t)) = 0$ 。在此基础上, 定义扩展结构矩阵为 $\mathbf{H}_{\rho(t)} = \mathbf{L}_{\rho(t)} + \mathbf{B}_{\rho(t)}$ 。在上述通信拓扑建模的基础上, 对系统的信息交互结构作如下假设。

假设 7 在任意时间区间 $[t_{\theta}, t_{\theta+1})$ 内, 至少存在一条从领导者节点到所有激活跟随者的有向路径。

在开放式网络环境下, 除通信拓扑切换外, 系统结构还会因跟随者节点的加入与退出而发生变化。具体而言, 在切换时刻 t_{θ} 处, 系统中激活跟随者集合 \mathcal{V}_{θ} 的演化通常可归结为以下三种典型情形。

(1) 仅有退出情形。由于通信链路失效、节点故障、能量耗尽或阶段性任务完成等原因, 部分原有跟随者在切换时刻退出系统, 而无新的跟随者加入, 此时激活跟随者数量减少, 即 $\eta_{\theta} < \eta_{\theta-1}$ 。

(2) 仅有加入情形。由于任务规模变化、系统功能增强或新的智能体完成初始化并具备协同控制能力, 部分新的跟随者加入系统, 而原有跟随者保持不变, 此时激活跟随者数量增加, 即 $\eta_{\theta} > \eta_{\theta-1}$ 。

(3) 混合情形。部分原有跟随者因运行约束或通信原因退出系统的同时, 新的跟随者加入系统, 该情形在动态任务环境或大规模网络中较为常见。与前两种单一变化情形不同, 混合演化过程中新增与退出

智能体的数量可存在不对等情况,具体变化由任务复杂度、系统负载等因素共同决定。

在任意时间区间 $[t_\theta, t_{\theta+1})$ 内,激活跟随者的数量保持不变,而仅在切换时刻发生变化。为定量刻画由上述节点变化与拓扑调整所引起的切换频率,引入平均驻留时间的概念。具体而言,对于切换信号 $\rho(t)$,若存在常数 $N_0 > 0$,使得对任意 $t > t_0$ 均有 $N_\rho(t, t_0) \leq N_0 + \frac{t-t_0}{\zeta}$,则称正常数 ζ 为该切换信号的平均驻留时间,其中, $N_\rho(t, t_0)$ 表示该切换信号在区间 $[t_0, t)$ 内的切换次数, N_0 为该切换信号的抖振上界。

在上述建模与假设条件下,为刻画跟随者对领导者的跟踪性能,引入输出跟踪误差的定义。对任一处于激活状态的跟随者 $v_{\theta_i} \in \mathcal{V}_{\rho(t)}$,定义其输出跟踪误差为 $\mathbf{e}_{\theta_i} = \mathbf{y}_{\theta_i} - \mathbf{y}_0, i = 1, 2, \dots, \eta_\theta$ 。

考虑到开放式网络环境下系统结构的动态变化,跟随者集合 \mathcal{V}_θ 随时间发生切换,上述误差定义仅对当前激活的跟随者成立。对于新加入系统的跟随者,其跟踪误差自加入时刻起被定义,并参与后续的演化过程;而对于已退出系统的跟随者,其对应误差不再纳入分析范围。因此,本文关注如下问题:在满足前述系统假设、通信拓扑连通性条件及平均驻留时间约束的前提下,为受到执行器攻击的开放式异构多智能体系统设计分布式弹性控制策略,使得对任意初始条件以及任意允许的节点加入与退出过程,所有处于激活状态的跟随者能够实现输出一致性,即输出跟踪误差 \mathbf{e}_{θ_i} 保持一致最终有界。由于系统拓扑结构和智能体集合随时间动态变化,导致误差信号 $\mathbf{E}_{\eta_\theta}(t) = \text{col}\{\mathbf{e}_{\theta_1}, \mathbf{e}_{\theta_2}, \dots, \mathbf{e}_{\theta_{\eta_\theta}}\}$ 的维数不断变化,传统渐近一致性的定义和分析方法难以直接适用,因而采用输出跟踪误差一致最终有界作为性能指标不仅具有可实现性,也更契合开放式多智能体系统的结构特征与运行实际。一致最终有界的概念定义如下。

定义 1^[25] 对于任意误差信号 $\delta(t) \in \mathbb{R}^N$,如果存在与初始时刻 t_0 无关的常数 a 和时间节点 $T_f(a, \delta(t_0))$,对于 $\forall t \geq t_0 + T_f$ 都有 $\|\delta(t)\| \leq a$ 成立,那么该误差向量 $\delta(t)$ 就是一致最终有界的,其中, $\delta(t_0) \in \mathcal{Z}, \mathcal{Z} \subset \mathbb{R}^N$ 是一个紧集。

2 分布式弹性自适应控制器设计

本节针对受到执行器攻击的开放式异构多智能体系统,研究其自适应输出一致性问题。在考虑执行器攻击未知以及智能体数量动态变化的情况下,构建了一套分层的控制与估计框架。首先,针对每个跟随者仅部分状态可测且受执行器攻击影响的问题,设计

了一种具有攻击免疫能力的降阶观测器,实现对系统不可测状态的有效估计;其次,基于分布式信息交互,设计了一种自适应动态补偿器以实现领导者状态的在线估计,从而避免对领导者全状态信息和全局拓扑信息的直接依赖;最后,利用上述状态与领导者估计结果构造一种弹性自适应控制器,能够在执行器攻击和系统开放性的双重不利条件下,保证开放式异构多智能体系统实现输出一致性。

2.1 降阶观测器设计

对于每个跟随者而言,在执行任务过程中通常仅能够直接获取其输出信息,而控制器的设计和实现则依赖于系统状态的反馈,因此需要引入状态估计机制以弥补测量信息的不足。一种直接的思路是为每个跟随者设计全阶状态观测器,利用可测输出对系统全部状态进行在线估计。然而,在输出本身已直接可测的情况下,全阶观测器仍然对全部状态进行重构,这将导致对可测状态分量的冗余估计,从而显著增加观测器的计算复杂度和实现负担。尤其在开放式环境中,这种冗余动态会进一步放大系统分析与实现的难度。

基于上述考虑,本文设计了一种降阶观测器,直接利用每个跟随者可获得的输出信息,仅对系统中无法直接由输出获得的状态分量进行估计。该方法在避免冗余估计的同时,有效降低了观测器的计算复杂度,为后续自适应控制律的构造提供了可直接使用的状态估计信号。为便于降阶观测器的构造,首先对系统状态进行适当的坐标变换,以显式分离系统中可直接测量与不可测的状态分量。构造如下可逆变换矩阵 $\mathbf{T}_{\theta_i} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{\theta_i}^\perp & \mathbf{C}_{\theta_i}^\top \end{bmatrix}^\top \in \mathbb{R}^{n_{\theta_i} \times n_{\theta_i}}$,其中, $\mathbf{C}_{\theta_i}^\perp \in \mathbb{R}^{n_{\theta_i} \times (n_{\theta_i} - p)}$ 的列向量由矩阵 \mathbf{C}_{θ_i} 的零空间正交基构成。记 $\mathbf{S}_{\theta_i} \triangleq \mathbf{T}_{\theta_i}^{-1}$,并按列分块为 $\mathbf{S}_{\theta_i} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\theta_{i1}} & \mathbf{S}_{\theta_{i2}} \end{bmatrix}$,其中, $\mathbf{S}_{\theta_{i1}} = \mathbf{C}_{\theta_i}^\perp \left[(\mathbf{C}_{\theta_i}^\perp)^\top \mathbf{C}_{\theta_i}^\perp \right]^{-1} \in \mathbb{R}^{n_{\theta_i} \times (n_{\theta_i} - p)}$, $\mathbf{S}_{\theta_{i2}} = \mathbf{C}_{\theta_i}^\top (\mathbf{C}_{\theta_i} \mathbf{C}_{\theta_i}^\top)^{-1} \in \mathbb{R}^{n_{\theta_i} \times p}$ 。使用坐标变换 $\bar{\mathbf{x}}_{\theta_i} \triangleq \mathbf{T}_{\theta_i} \mathbf{x}_{\theta_i}$ 原系统等价表示为

$$\begin{cases} \dot{\bar{\mathbf{x}}}_{\theta_i} = \bar{\mathbf{A}}_{\theta_i} \bar{\mathbf{x}}_{\theta_i} + \bar{\mathbf{B}}_{\theta_i} (\mathbf{u}_{\theta_i} + \mathbf{u}_{\theta_i}^a) \\ \mathbf{y}_{\theta_i} = \bar{\mathbf{C}}_{\theta_i} \bar{\mathbf{x}}_{\theta_i} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $\bar{\mathbf{A}}_{\theta_i} = \mathbf{T}_{\theta_i} \mathbf{A}_{\theta_i} \mathbf{S}_{\theta_i}$, $\bar{\mathbf{B}}_{\theta_i} = \mathbf{T}_{\theta_i} \mathbf{B}_{\theta_i}$, $\bar{\mathbf{C}}_{\theta_i} = \mathbf{C}_{\theta_i} \mathbf{S}_{\theta_i}$ 。进一步将变换后的状态向量分解为 $\bar{\mathbf{x}}_{\theta_i} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{x}}_{\theta_{i1}}^\top & \bar{\mathbf{x}}_{\theta_{i2}}^\top \end{bmatrix}^\top$,其中, $\bar{\mathbf{x}}_{\theta_{i1}} \in \mathbb{R}^{n_{\theta_i} - p}$ 和 $\bar{\mathbf{x}}_{\theta_{i2}} \in \mathbb{R}^p$,并对系统矩阵按如下方式进行

$$\text{分块: } \bar{\mathbf{A}}_{\theta_i} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{A}}_{\theta_{i11}} & \bar{\mathbf{A}}_{\theta_{i12}} \\ \bar{\mathbf{A}}_{\theta_{i21}} & \bar{\mathbf{A}}_{\theta_{i22}} \end{bmatrix}, \bar{\mathbf{B}}_{\theta_i} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{B}}_{\theta_{i1}} \\ \bar{\mathbf{B}}_{\theta_{i2}} \end{bmatrix}。$$

由 $\bar{\mathbf{C}}_{\theta_i}$ 的结构可知, $\bar{\mathbf{x}}_{\theta_{i2}} = \mathbf{y}_{\theta_i}$ 为可直接测量的状态分量,因此下面只需利用测量到的 $\bar{\mathbf{x}}_{\theta_{i2}}$ 设计观测器来

估计不可测状态分量 \bar{x}_{θ_i} 。由于执行器攻击直接影响控制信号, 需要对系统 (4) 进行额外的转换, 从而消除执行器攻击对观测器的影响。

引理 1 在假设 6 成立的前提下, 若存在正定矩阵 $\Gamma_{\theta_i} \in \mathbb{R}^{n_{\theta_i} \times n_{\theta_i}}$ 和矩阵 $H_{\theta_i} \in \mathbb{R}^{n_{\theta_i} \times p}$, 使得下面的等式成立:

$$\bar{B}_{\theta_i}^T \Gamma_{\theta_i} = H_{\theta_i} \bar{C}_{\theta_i} \quad (5)$$

其中: $\Gamma_{\theta_i} = \begin{bmatrix} \Gamma_{\theta_{i1}} & \Gamma_{\theta_{i2}} \\ \Gamma_{\theta_{i2}}^T & \Gamma_{\theta_{i3}} \end{bmatrix}$, $\Gamma_{\theta_{i1}} \in \mathbb{R}^{(n_{\theta_i}-p) \times (n_{\theta_i}-p)}$, $\Gamma_{\theta_{i2}} \in \mathbb{R}^{(n_{\theta_i}-p) \times p}$, $\Gamma_{\theta_{i3}} \in \mathbb{R}^{p \times p}$, 那么可以将执行器攻击从 \bar{x}_{θ_i} 的动态中完全消除。

证明 构造如下可逆矩阵 $R_{\theta_i} = \begin{bmatrix} I_{n_{\theta_i}-p} & \Gamma_{\theta_{i1}}^{-1} \Gamma_{\theta_{i2}} \\ \mathbf{0}_{p \times (n_{\theta_i}-p)} & I_p \end{bmatrix}$,

在变换后的状态向量动力学方程左右同时乘该矩阵可得:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}_{\theta_i} = & (\bar{A}_{\theta_{i11}} + \Gamma_{\theta_{i1}}^{-1} \Gamma_{\theta_{i2}} \bar{A}_{\theta_{i21}}) \bar{x}_{\theta_i} - \Gamma_{\theta_{i1}}^{-1} \Gamma_{\theta_{i2}} \dot{\bar{x}}_{\theta_{i2}} \\ & + (\bar{A}_{\theta_{i21}} + \Gamma_{\theta_{i1}}^{-1} \Gamma_{\theta_{i2}} \bar{A}_{\theta_{i22}}) \bar{x}_{\theta_{i2}} \end{aligned} \quad (6)$$

由此可看出执行器攻击不会影响 \bar{x}_{θ_i} 的动态。

证毕

基于解耦子系统 (6), 在时间区间 $[t_{\theta}, t_{\theta+1})$ 内设计攻击免疫降阶观测器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_{\theta_i} = z_{\theta_i} - \Gamma_{\theta_{i1}}^{-1} \Gamma_{\theta_{i2}} y_{\theta_i} \\ \dot{z}_{\theta_i} = (\bar{A}_{\theta_{i11}} + \Gamma_{\theta_{i1}}^{-1} \Gamma_{\theta_{i2}} \bar{A}_{\theta_{i21}}) z_{\theta_i} + (\bar{A}_{\theta_{i21}} + \Gamma_{\theta_{i1}}^{-1} \Gamma_{\theta_{i2}} \bar{A}_{\theta_{i22}}) y_{\theta_i} \\ \quad - (\bar{A}_{\theta_{i11}} + \Gamma_{\theta_{i1}}^{-1} \Gamma_{\theta_{i2}} \bar{A}_{\theta_{i21}}) \Gamma_{\theta_{i1}}^{-1} \Gamma_{\theta_{i2}} y_{\theta_i} \end{cases} \quad (7)$$

其中, z_{θ_i} 为观测器内部状态, \hat{x}_{θ_i} 表示对不可测状态 \bar{x}_{θ_i} 的估计。令 $\tilde{e}_{\theta_i} = \hat{x}_{\theta_i} - \bar{x}_{\theta_i}$, 可以得到 \tilde{e}_{θ_i} 的动力学方程为

$$\dot{\tilde{e}}_{\theta_i} = (\bar{A}_{\theta_{i11}} + \Gamma_{\theta_{i1}}^{-1} \Gamma_{\theta_{i2}} \bar{A}_{\theta_{i21}}) \tilde{e}_{\theta_i} \quad (8)$$

由该误差方程可知, 降阶观测器的估计误差动力学仅由系统矩阵决定, 而与实际执行器输入无关, 并且该误差系统不会受到邻居的影响, 因此其演化过程不受开放式环境的影响。基于此, 下面给出观测误差有界性的充分条件, 以证明所设计降阶观测器的有效性。

引理 2 在假设 4 和 5 成立的前提下, 如果存在矩阵 $F_{\theta_i} \in \mathbb{R}^{n_{\theta_i} \times p}$ 、正定矩阵 $\Gamma_{\theta_i} \in \mathbb{R}^{n_{\theta_i} \times n_{\theta_i}}$ 和 $Q_{\theta_i} \in \mathbb{R}^{n_{\theta_i} \times n_{\theta_i}}$ 使得式 (5) 和下面的等式成立:

$$(\bar{A}_{\theta_i} - F_{\theta_i} \bar{C}_{\theta_i})^T \Gamma_{\theta_i} + \Gamma_{\theta_i} (\bar{A}_{\theta_i} - F_{\theta_i} \bar{C}_{\theta_i}) = -Q_{\theta_i} \quad (9)$$

那么使用降阶观测器 (7) 可以估计不可测状态分量 \bar{x}_{θ_i} 。

证明 将矩阵 F_{θ_i} 按前文同样的维数分块记为 $F_{\theta_i} = [F_{\theta_{i1}}^T \quad F_{\theta_{i2}}^T]^T$, 代入式 (9) 中可得 $(\bar{A}_{\theta_{i11}} +$

$\Gamma_{\theta_{i1}}^{-1} \Gamma_{\theta_{i2}} \bar{A}_{\theta_{i21}})^T \Gamma_{\theta_{i1}} + \Gamma_{\theta_{i1}} (\bar{A}_{\theta_{i11}} + \Gamma_{\theta_{i1}}^{-1} \Gamma_{\theta_{i2}} \bar{A}_{\theta_{i21}}) = -Q_{\theta_{i1}}$ 成立, 其中, $Q_{\theta_{i1}}$ 表示由 Q_{θ_i} 的相应主块引出的矩阵。由于 $Q_{\theta_i} > 0$, 可知该主块满足 $Q_{\theta_{i1}} > 0$ 。

构造 Lyapunov 函数 $V_{\theta_i}(t) = \tilde{e}_{\theta_i}^T \Gamma_{\theta_{i1}} \tilde{e}_{\theta_i}$, 沿式 (8) 对该函数求导可得 $\dot{V}_{\theta_i}(t) \leq -\chi_1 V_{\theta_i}(t)$, 其中, $\chi_1 = \frac{\min_{\theta_i} \{\lambda_{\min}(Q_{\theta_{i1}})\}}{\lambda_1}$, $\lambda_2 = \min_{\theta_i} \{\lambda_{\min}(\Gamma_{\theta_{i1}})\}$, $\lambda_1 = \max_{\theta_i} \{\lambda_{\max}(\Gamma_{\theta_{i1}})\}$ 。对该不等式求积分并进行适当变换可得 $\|\tilde{e}_{\theta_i}\|^2 \leq e^{-\chi_1 t} V_{\theta_i}(0)$, 可得 \tilde{e}_{θ_i} 对所有 $t \geq 0$ 一致有界, 且指数收敛至 0。证毕

令 $\tilde{E}_{\eta_{\theta}}(t) = \text{col}\{\tilde{e}_{\theta_1}, \tilde{e}_{\theta_2}, \dots, \tilde{e}_{\theta_{\eta_{\theta}}}\}$, 可以得到 $\tilde{E}_{\eta_{\theta}}(t)$ 的动力学方程为

$$\dot{\tilde{E}}_{\eta_{\theta}}(t) = (\bar{A}_{\eta_{\theta 1}} + \Gamma_{\eta_{\theta 1}}^{-1} \Gamma_{\eta_{\theta 2}} \bar{A}_{\eta_{\theta 21}}) \tilde{E}_{\eta_{\theta}}(t) \quad (10)$$

为方便上述符号定义, 令 $\tilde{\Theta}_{\eta_{\theta}} = \text{diag}[\tilde{\Theta}_{\theta_1}, \tilde{\Theta}_{\theta_2}, \dots, \tilde{\Theta}_{\theta_{\eta_{\theta}}}]$,

其中, $\tilde{\Theta}_{\eta_{\theta}}$ 和 $\tilde{\Theta}_{\theta_i}$ 分别从集合 $\{\bar{A}_{\eta_{\theta 1}}, \Gamma_{\eta_{\theta 1}}^{-1}, \Gamma_{\eta_{\theta 2}}, \bar{A}_{\eta_{\theta 21}}\}$ 和 $\{\bar{A}_{\theta_{i1}}, \Gamma_{\theta_{i1}}^{-1}, \Gamma_{\theta_{i2}}, \bar{A}_{\theta_{i21}}\}$ 中选取, $i = 1, 2, \dots, \eta_{\theta}$ 。在引理 2 中已经证明, 每一个跟随者对应的估计误差 \tilde{e}_{θ_i} 保持一致有界, 然而, 在开放式系统中, 智能体数量的变化会导致整体误差向量 $\tilde{E}_{\eta_{\theta}}(t)$ 的维数和结构发生突变, 因此, 仅有局部误差的有界性尚不足以直接推出整体估计误差在开放系统背景下的收敛特性, 有必要对切换瞬间该向量的演化特性进行刻画, 进而分析其收敛特性。令 $\mathcal{V}_{\theta-1} = \{\theta_1^-, \theta_2^-, \dots, \theta_{\eta_{\theta-1}}^-\}$ 和 $\mathcal{V}_{\theta} = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{\eta_{\theta}}\}$ 分别表示在切换时刻 t_{θ} 前后跟随者的索引集合, 接下来对开放环境中三种典型情形进行逐一分析。

对于第一种情形, 有 $\mathcal{V}_{\theta} \subset \mathcal{V}_{\theta-1}$, 切换后的误差向量 $\tilde{E}_{\eta_{\theta}}(t_{\theta}^+)$ 由原误差向量 $\tilde{E}_{\eta_{\theta-1}}(t_{\theta}^-)$ 中删除对应已退出跟随者的估计误差分量得到, 因此, 其欧氏范数满足 $\|\tilde{E}_{\eta_{\theta}}(t_{\theta}^+)\|^2 \leq \|\tilde{E}_{\eta_{\theta-1}}(t_{\theta}^-)\|^2$, 其中, t_{θ}^- 和 t_{θ}^+ 分别表示切换时刻 t_{θ} 的前后瞬间。

对于第二种情形, 有 $\mathcal{V}_{\theta-1} \subset \mathcal{V}_{\theta}$, 切换后的误差向量 $\tilde{E}_{\eta_{\theta}}(t_{\theta}^+)$ 由 $\tilde{E}_{\eta_{\theta-1}}(t_{\theta}^-)$ 叠加大量新加入跟随者的估计误差分量得到, 即 $\|\tilde{E}_{\eta_{\theta}}(t_{\theta}^+)\|^2 = \|\tilde{E}_{\eta_{\theta-1}}(t_{\theta}^-)\|^2 + \sum_{\theta_j} \|\tilde{e}_{\theta_j}(t_{\theta}^+)\|^2$, 其中, $\theta_j \in \mathcal{V}_{\theta} \setminus \mathcal{V}_{\theta-1}$ 。

对于第三种情形, 切换后的误差向量 $\tilde{E}_{\eta_{\theta}}(t_{\theta}^+)$ 由两部分操作得到: 一方面删除由 $\mathcal{V}_{\theta} \setminus \mathcal{V}_{\theta-1}$ 索引的误差分量, 另一方面插入由 $\mathcal{V}_{\theta-1} \setminus \mathcal{V}_{\theta}$ 索引的新误差分量, 由此可得 $\|\tilde{E}_{\eta_{\theta}}(t_{\theta}^+)\|^2 \leq \|\tilde{E}_{\eta_{\theta-1}}(t_{\theta}^-)\|^2 + \sum_{\theta_j} \|\tilde{e}_{\theta_j}(t_{\theta}^+)\|^2$ 。进一步地, 根据引理 2 中关于观测误差 \tilde{e}_{θ_i} 有界性的结论, 并结合开放

式系统中单次切换时刻新加入跟随者数量有限的事实,可知存在常数 $\gamma_1 > 0$, 使得 $\sum_{\theta} \|\tilde{e}_{\theta}(t_{\theta}^+)\|^2 \leq \gamma_1$ 成立。

因此,在任意切换时刻 t_{θ} , 误差向量 $\tilde{E}_{\eta_{\theta}}(t)$ 的瞬时增量均受到统一上界的约束,即下式恒成立:

$$\|\tilde{E}_{\eta_{\theta}}(t_{\theta}^+)\|^2 \leq \|\tilde{E}_{\eta_{\theta-1}}(t_{\theta}^-)\|^2 + \gamma_1.$$

注 2 由引理 2 可知,在任意连续时间区间 $[t_{\theta}, t_{\theta+1})$ 内,每一个局部观测误差 \tilde{e}_{θ_i} 均保持一致有界,从而整合误差向量 $\tilde{E}_{\eta_{\theta}}(t)$ 在区间内部不会发生发散。而针对误差向量在切换时刻的变化过程的分析进一步表明,在切换时刻 t_{θ} 处,尽管开放事件会导致整合误差向量的维数和结构发生变化,其范数的瞬时增量始终受到一个与切换次数无关的常数上界约束。因此,本节所设计的攻击免疫降阶观测器在开放式系统框架下仍能够保证整合观测误差向量 $\tilde{E}_{\eta_{\theta}}(t)$ 一致最终有界。由此,降阶观测器在执行器攻击存在的条件下对系统状态的估计是有效的,为后续领导者状态估计与控制器设计提供了可靠的状态信息基础。需要指出的是,“攻击免疫”是指观测器的结构设计使得攻击信号与控制输入在观测误差动态中被完全抵消,因而观测误差的动态演化不受这两项的影响。该性质体现为观测器对攻击项的结构隔离作用,并不意味着攻击对控制器性能不再产生影响。

注 3 由文献[24]可知,当假设 4~6 成立时,式(5)与式(9)有解,因此该观测器设计是合理的。相较于文献[22]中设计的全阶状态观测器,其状态维数为 n_{θ_i} , 本文提出的攻击免疫降阶观测器仅估计不可测状态分量,状态维数为 $n_{\theta} - p$, 在保持估计性能的同时有效减小了计算开销与实现负担。此外,结合式(7)与 $\bar{x}_{\theta_2} = y_{\theta}$, 可以设计如下形式的观测器来估计原系统状态 x_{θ_0} 。

$$\hat{x}_{\theta_0} = S_{\theta_1}(z_{\theta_0} - \Gamma_{\theta_1}^{-1} \Gamma_{\theta_2} y_{\theta_0}) + S_{\theta_2} y_{\theta_0} \quad (11)$$

2.2 自适应动态补偿器设计

为了进一步实现输出一致性,还需要获取领导者系统的状态信息。然而,在分布式框架下,领导者状态无法被所有跟随者直接测量,因此有必要为每个跟随者设计一种自适应动态补偿机制,以实现领导者状态的分布式估计。为此,在时间区间 $[t_{\theta}, t_{\theta+1})$ 内设计如下形式的自适应动态补偿器。

$$\begin{cases} \dot{\xi}_{\theta_0} = A_0 \xi_{\theta_0} + \alpha_{\theta_0} K C_0 \bar{\xi}_{\theta_0} \\ \dot{\alpha}_{\theta_0} = -\alpha_{\theta_0} + \bar{\xi}_{\theta_0}^T C_0^T C_0 \bar{\xi}_{\theta_0} \end{cases} \quad (12)$$

其中: ξ_{θ_0} 表示对领导者状态 x_0 的估计; $\bar{\xi}_{\theta_0} = b_i(\rho(t))(\xi_{\theta_0} - x_0) + \sum_{j=1}^{\eta_{\theta}} a_{ij}(\rho(t))(\xi_{\theta_0} - \xi_{\theta_j})$; α_{θ_0} 为自适应调

节参数,根据估计误差信号在线调节,从而增强系统在开放式环境下的鲁棒性。由假设 2 可知矩阵不等式 $A_0^T P_2 + P_2 A_0 - 2C_0^T C_0 < -P_2$ 有正定矩阵解 $P_2 > 0$ 。据此,选取补偿器增益为 $K = -P_2^{-1} C_0^T$ 。

为分析补偿器的估计性能,定义补偿误差 $\bar{e}_{\theta_i} = \xi_{\theta_0} - x_0$ 和整合误差向量 $\bar{E}_{\eta_{\theta}}(t) = \text{col}\{\bar{e}_{\theta_1}, \bar{e}_{\theta_2}, \dots, \bar{e}_{\theta_{\eta_{\theta}}}\}$ 。根据式(2)和式(12),可以得到 $\bar{E}_{\eta_{\theta}}(t)$ 的动力学方程为

$$\dot{\bar{E}}_{\eta_{\theta}}(t) = (I_{\eta_{\theta}} \otimes A_0 + A_{\eta_{\theta}} H_{\rho(t)} \otimes K C_0) \bar{E}_{\eta_{\theta}}(t) \quad (13)$$

其中, $A_{\eta_{\theta}} = \text{diag}[\alpha_{\theta_1}, \alpha_{\theta_2}, \dots, \alpha_{\theta_{\eta_{\theta}}}]$ 。本文假设新加入的跟随者位于现有网络的局部邻域内,从而能够与网络中其他智能体保持有效通信。这一假设在工程实践中是合理的,可避免由于节点突变引起的通信失效或收敛性能显著恶化。在该条件下,新加入跟随者的补偿误差在切换瞬间保持有界。为了公式展示清晰,提前定义符号: $\lambda_1^* = \max_{\rho(t)} \{\lambda_{\max}(H_{\rho(t)} \otimes P_2)\}$, $\lambda_2^* = \min_{\rho(t)} \{\lambda_{\min}(H_{\rho(t)} \otimes P_2)\}$ 和 $\chi_3 = \frac{\lambda_1^*}{\lambda_2^*}$ 。基于上述分析,给出如下结论来刻画所设计自适应动态补偿器的有效性。

引理 3 在假设 2 和 7 成立的前提下,若平均驻留时间满足 $\zeta > \ln \chi_3$, 使用动态补偿器(12)可以有效估计领导者状态。

证明 在时间间隔内 $[t_{\theta}, t_{\theta+1})$ 构造 Lyapunov 函数 $V_2(t) = \bar{E}_{\eta_{\theta}}^T(t) (H_{\rho(t)} \otimes P_2) \bar{E}_{\eta_{\theta}}(t) + \sum_{i=1}^{\eta_{\theta}} (\alpha_{\theta_i} - r)^2$, 其中, $r > \frac{1}{\lambda_{\min}(H_{\rho(t)})}$, 式(13)对该函数求右上 Dini 导数可得:

$$\begin{aligned} D^+ V_2(t) = & \bar{E}_{\eta_{\theta}}^T(t) [H_{\rho(t)} \otimes (P_2 A_0 + A_0^T P_2) \\ & - 2H_{\rho(t)} A_{\eta_{\theta}} H_{\rho(t)} \otimes C_0^T C_0] \bar{E}_{\eta_{\theta}}(t) \\ & + 2 \sum_{i=1}^{\eta_{\theta}} (\alpha_{\theta_i} - r) \dot{\alpha}_{\theta_i} \end{aligned} \quad (14)$$

由式(12)可知:

$$\begin{aligned} & 2 \sum_{i=1}^{\eta_{\theta}} (\alpha_{\theta_i} - r) (-\alpha_{\theta_i} + \bar{\xi}_{\theta_0}^T C_0^T C_0 \bar{\xi}_{\theta_0}) \\ & \leq - \sum_{i=1}^{\eta_{\theta}} (\alpha_{\theta_i} - r)^2 + \eta_{\theta} r^2 - 2r \bar{E}_{\eta_{\theta}}^T(t) (H_{\rho(t)}^2 \otimes C_0^T C_0) \bar{E}_{\eta_{\theta}}(t) \\ & \quad + 2 \bar{E}_{\eta_{\theta}}^T(t) (H_{\rho(t)} A_{\eta_{\theta}} H_{\rho(t)} \otimes C_0^T C_0) \bar{E}_{\eta_{\theta}}(t) \end{aligned} \quad (15)$$

由此可得 $D^+ V_2(t) \leq -V_2(t) + \chi_2$, 其中, $\chi_2 = \eta_{\theta} r^2$ 。由于 α_{θ_i} 始终有界,并且会随着误差的收敛而趋于衰减,因此存在常数 $\gamma_2 > 0$ 和 $\gamma_3 > 0$, 使得 $\|\bar{E}_{\eta_{\theta}}(t_{\theta}^+)\|^2 \leq \|\bar{E}_{\eta_{\theta-1}}(t_{\theta}^-)\|^2 + \gamma_2$ 和 $\sum_{i=1}^{\eta_{\theta}} (\alpha_{\theta_i} - r)^2 \leq \sum_{i=1}^{\eta_{\theta-1}} (\alpha_{\theta_i} - r)^2 + \gamma_3$ 成立。

由于在区间 $[t_\theta, t_{\theta+1})$ 内无跳变, 对于任意 $t \in [t_\theta, t_{\theta+1})$ 和切换时刻前后有 $V_2(t) \leq e^{t_\theta - t} V_2(t_\theta^+) + \chi_2(1 - e^{t_\theta - t})$ 和 $V_2(t^-) \leq e^{t_\theta - 1 - t_\theta} V_2(t_\theta^+) + \chi_2(1 - e^{t_\theta - 1 - t_\theta})$ 成立。又因为下式成立:

$$\lambda_2^* \|\bar{E}_{\eta_\theta}(t)\|^2 + \sum_{i=1}^{\eta_\theta} (\alpha_{\theta_i} - r)^2 \leq V_2(t) \leq \lambda_1^* \|\bar{E}_{\eta_\theta}(t)\|^2 + \sum_{i=1}^{\eta_\theta} (\alpha_{\theta_i} - r)^2 \quad (16)$$

可知 $V_2(t_\theta^+) \leq \chi_3 V_2(t_\theta^-) + \chi_4$, 其中, $\chi_4 = \lambda_1^* \gamma_2 + \gamma_3$ 。结合上述不等式与平均驻留时间的定义可得:

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} \|\bar{E}_{\eta_\theta}(t)\|^2 \leq (\chi_3 \chi_2 + \chi_4) \frac{1 - \chi_3^\theta}{\lambda_1^* (1 - \chi_3)} + \frac{\chi_2}{\lambda_1^*} \quad (17)$$

因此, 当平均驻留时间满足 $\zeta > \ln \chi_3$ 时, $\bar{E}_{\eta_\theta}(t)$ 一致最终有界。证毕

注 4 本节所提出的动态补偿器通过引入自适应调节项 α_{θ_i} , 有效规避了在开放式多智能体系统中对全局网络信息的依赖。智能体的持续加入与退出会导致通信拓扑及其对应的拉普拉斯矩阵随时间演化, 且难以在设计阶段加以完整刻画, 基于固定或预设全局拓扑信息的补偿方法在此类环境下往往难以直接应用。例如, 文献[24]中所设计的补偿方案需依赖于所有可能通信拓扑对应的拉普拉斯矩阵特征值, 从而对系统整体结构信息具有较强依赖性。相比之下, 本文所提出的动态补偿器仅依赖于局部邻居交互信息对补偿增益进行在线自适应调节, 无需预先枚举或实时更新所有可能的全局网络参数, 从而更符合开放式系统的运行特性。该特性为在缺乏全局网络信息条件下开展开放式多智能体系统的一致性与协同控制研究提供了一种可行且具有推广意义的思路。

2.3 弹性控制器设计

在前两节中, 已分别为每个跟随者构造了降阶观测器和动态补偿器对自身状态与领导者状态进行估计。在此基础上, 本节进一步设计一种弹性控制器, 使开放式多智能体系统在受到执行器攻击影响下仍能够实现输出一致性。在设计分布式输出一致性控制器之前, 首先给出一个关于调节方程可解性的基本结论, 该结论为后续控制器结构的构造提供理论依据。

引理 4^[13] 在假设 1、3 和 4 成立的前提下, 调节方程:

$$\begin{cases} A_\theta X_{\theta_i} + B_\theta Y_{\theta_i} = X_{\theta_i} A_0 \\ C_\theta X_{\theta_i} = C_0, i = 1, 2, \dots, \eta_\theta \end{cases} \quad (18)$$

有矩阵解对 (X_θ, Y_θ) , 其中, $X_\theta \in \mathbb{R}^{\eta_\theta \times r}$, $Y_\theta \in \mathbb{R}^{m_\theta \times r}$ 。

在时间区间 $[t_\theta, t_{\theta+1})$ 内设计如下形式的弹性控制器:

$$u_{\theta_i} = c_{\theta_i} (K_{\theta_i}^I \hat{x}_{\theta_i} + K_{\theta_i}^{II} \bar{x}_{\theta_i}) + K_{\theta_i}^{III} \xi_{\theta_i} - \omega_{\theta_i} \quad (19)$$

其中, 矩阵 $K_{\theta_i}^I \in \mathbb{R}^{m_{\theta_i} \times (n_{\theta_i} - p)}$, $K_{\theta_i}^{II} \in \mathbb{R}^{m_{\theta_i} \times p}$ 以及 $K_{\theta_i}^{III} \in \mathbb{R}^{m_{\theta_i} \times r}$ 为待设计的控制增益矩阵。

根据假设 3, 对于 $\varphi_{1, \theta_i} > 0$ 和 $\varphi_{2, \theta_i} > 1$, 矩阵不等式 $A_{\theta_i} P_{\theta_i}^{-1} + P_{\theta_i}^{-1} A_{\theta_i}^T - \varphi_{1, \theta_i} B_{\theta_i} B_{\theta_i}^T + \varphi_{2, \theta_i} P_{\theta_i}^{-1} < 0$ 存在正定矩阵解 $P_{\theta_i} > 0$ 。据此, 选取控制增益 $c_{\theta_i} \geq \frac{\varphi_{1, \theta_i}}{2}$,

$\bar{K}_{\theta_i} \triangleq [K_{\theta_i}^I \quad K_{\theta_i}^{II}] = -B_{\theta_i}^T P_{\theta_i} T_{\theta_i}^{-1}$, $K_{\theta_i}^{III} = Y_{\theta_i} - c_{\theta_i} \bar{K}_{\theta_i} T_{\theta_i} X_{\theta_i}$ 。为分析闭环系统性能, 定义误差向量 $\hat{e}_{\theta_i} = \hat{x}_{\theta_i} - X_{\theta_i} \xi_{\theta_i}$, 并进一步定义整合误差向量 $\bar{E}_{\eta_\theta}(t) = \text{col}\{\hat{e}_{\theta_1}, \hat{e}_{\theta_2}, \dots, \hat{e}_{\theta_{\eta_\theta}}\}$ 。此外, 为了抵消执行器攻击的影响, 在控制器中引入如下攻击补偿项:

$$\begin{cases} \omega_{\theta_i} = \frac{\beta_{\theta_i} B_{\theta_i}^T P_{\theta_i} \hat{e}_{\theta_i}}{\|B_{\theta_i}^T P_{\theta_i} \hat{e}_{\theta_i}\| + \gamma_{\theta_i}} \\ \dot{\beta}_{\theta_i} = \|B_{\theta_i}^T P_{\theta_i} \hat{e}_{\theta_i}\| \end{cases} \quad (20)$$

其中, γ_{θ_i} 是正的指数衰减函数, β_{θ_i} 为自适应参数。根据式(11)、(12)和引理 4 中的第一个等式, 可以得到 $\bar{E}_{\eta_\theta}(t)$ 的动力学方程为

$$\begin{aligned} \dot{\bar{E}}_{\eta_\theta}(t) = & A_{\eta_\theta} \bar{E}_{\eta_\theta}(t) + B_{\eta_\theta} \bar{E}_{\eta_\theta}(t) + B_{\eta_\theta} [U_{\eta_\theta}^a(t) - \Omega_{\eta_\theta}(t)] \\ & - X_{\eta_\theta} (A_{\eta_\theta} H_{\rho(t)} \otimes KC_0) \bar{E}_{\eta_\theta}(t) \end{aligned} \quad (21)$$

其中, $\Omega_{\eta_\theta}(t) = \text{col}\{\omega_{\theta_1}, \omega_{\theta_2}, \dots, \omega_{\theta_{\eta_\theta}}\}$ 。为方便上述符号定义, 令 $\bar{\Theta}_{\eta_\theta} = \text{diag}\{\bar{\Theta}_{\theta_1}, \bar{\Theta}_{\theta_2}, \dots, \bar{\Theta}_{\theta_{\eta_\theta}}\}$, 其中, $\bar{\Theta}_{\theta_i}$ 和 $\bar{\Theta}_{\eta_\theta}$ 分别从集合 $\{A_{\theta_i} - c_{\theta_i} B_{\theta_i} B_{\theta_i}^T P_{\theta_i}, (S_{\theta_i} \Gamma_{\theta_i}^{-1} \Gamma_{\theta_i} - S_{\theta_i}) \bar{A}_{\theta_i}, X_{\theta_i}\}$ 和 $\{A_{\eta_\theta}, B_{\eta_\theta}, X_{\eta_\theta}\}$ 中选取, $i = 1, 2, \dots, \eta_\theta$ 。

根据前述分析, 误差跳变项主要取决于系统切换时新增智能体对应的误差项。由于新增智能体对应的观测器状态 \hat{x}_{θ_i} 与动态补偿器状态 ξ_{θ_i} 在切换时刻的初值可取任意有界值, 因此可设置新增误差项的初始值保持有界, 即存在常数 $\gamma_4 > 0$, 使得在任意切换时刻

$$t_\theta \text{ 有 } \|\bar{E}_{\eta_\theta}(t_\theta^+)\|^2 \leq \|\bar{E}_{\eta_{\theta-1}}(t_\theta^-)\|^2 + \gamma_4$$

为了公式展示清晰, 提前定义符号: $\bar{\lambda}_1 = \max_{\theta_i} \{\lambda_{\max}(P_{\theta_i})\}$,

$$\bar{\lambda}_2 = \min_{\theta_i} \{\lambda_{\min}(P_{\theta_i})\}, \bar{\lambda}_3 = \max_{\theta_i} \{\lambda_{\max}(B_{\theta_i}^T P_{\theta_i} B_{\theta_i})\}, \chi_5 = \frac{2\bar{\lambda}_3}{\lambda_1},$$

$$\chi_6 = \frac{2\bar{\lambda}_4}{\lambda_2^*}, \varpi_1 > \frac{\chi_5}{\chi_1}, \varpi_2 > \chi_6, \varpi_3 = \min\left\{\frac{\varpi_1 \chi_1 - \chi_5}{\varpi_1}, \frac{\varpi_2 - \chi_6}{\varpi_2}, \varphi_{2, \theta_i} - 1\right\},$$

$$\bar{\lambda}_4 = \lambda_{\max}\left\{(A_{\eta_\theta} H_{\rho(t)} \otimes KC_0)^T X_{\eta_\theta}^T P_{\eta_\theta} X_{\eta_\theta} (A_{\eta_\theta} H_{\rho(t)} \otimes KC_0)\right\},$$

$\varpi_5 = \max \left\{ \frac{\lambda_1}{\lambda_2}, \frac{\lambda_1^*}{\lambda_2^*}, \frac{\bar{\lambda}_1}{\bar{\lambda}_2} \right\}$ 。基于上述分析,给出如下结果以刻画所设计弹性控制器的有效性。

定理 1 在假设 1~7 成立的前提下,若平均驻留时间满足 $\zeta > \frac{\ln \varpi_5}{\varpi_3}$,则该开放式系统在弹性控制器(19)的作用下能够实现输出一致性,同时输出跟踪误差 $E_{\eta_0}(t)$ 一致最终有界。

证明 基于引理 4 中的第二个式子,对误差项 e_{θ_i} 进行分解可得:

$$\|e_{\theta_i}\|^2 \leq 2 \|C_{\theta_i}\|^2 \|\widehat{e}_{\theta_i}\|^2 + 2 \|C_0\|^2 \|\bar{e}_{\theta_i}\|^2 \quad (22)$$

引理 3 证明了 \bar{e}_{θ_i} 一致最终有界,接下来只需分析 \widehat{e}_{θ_i} 的收敛性质即可。

在时间间隔 $[t_{\theta}, t_{\theta+1})$ 内构造 Lyapunov 函数 $V_3(t) = \widehat{E}_{\eta_0}^T(t) P_{\eta_0} \widehat{E}_{\eta_0}(t)$, 其中, $P_{\eta_0} = \text{diag}[P_{\theta_1}, P_{\theta_2}, \dots, P_{\theta_{n_0}}]$, 对 $V_3(t)$ 求右上 Dini 导数可得:

$$\begin{aligned} D^+V_3(t) &= \widehat{E}_{\eta_0}^T(t) \left(P_{\eta_0} A_{\eta_0} + A_{\eta_0}^T P_{\eta_0} \right) \widehat{E}_{\eta_0}(t) \\ &\quad + 2 \widehat{E}_{\eta_0}^T(t) P_{\eta_0} B_{\eta_0} \tilde{E}_{\eta_0}(t) \\ &\quad + 2 \widehat{E}_{\eta_0}^T(t) P_{\eta_0} B_{\eta_0} \left[U_{\eta_0}^a(t) - \Omega_{\eta_0}(t) \right] \\ &\quad - 2 \widehat{E}_{\eta_0}^T(t) P_{\eta_0} X_{\eta_0} \left(A_{\eta_0} H_{\rho(t)} \otimes KC_0 \right) \bar{E}_{\eta_0}(t) \end{aligned} \quad (23)$$

由式(20)可知:

$$\begin{aligned} &2 \widehat{E}_{\eta_0}^T(t) P_{\eta_0} B_{\eta_0} \left[U_{\eta_0}^a(t) - \Omega_{\eta_0}(t) \right] \\ &= 2 \sum_{i=1}^{n_0} \frac{\left\| \widehat{e}_{\theta_i}^T P_{\theta_i} B_{\theta_i} \right\|^2 \left(\left\| u_{\theta_i}^a \right\| - \beta_{\theta_i} \right) + \left\| \widehat{e}_{\theta_i}^T P_{\theta_i} B_{\theta_i} \right\| \cdot \left\| u_{\theta_i}^a \right\| \cdot \gamma_{\theta_i}}{\left\| B_{\theta_i}^T P_{\theta_i} \widehat{e}_{\theta_i} \right\| + \gamma_{\theta_i}} \end{aligned} \quad (24)$$

由于执行器攻击的导数 $\dot{u}_{\theta_i}^a$ 有界,这意味着 $u_{\theta_i}^a$ 的增长速度会受到限制,因此 $\|u_{\theta_i}^a\|$ 的上界至多呈线性随时间变化。因此当 $t \rightarrow 0$ 时,有 $\|u_{\theta_i}^a\| \cdot \gamma_{\theta_i} \rightarrow 0$ 。为了便于后续分析,引入有界集合 $\Delta_1 = \left\{ \widehat{e}_{\theta_i} : \left\| \widehat{e}_{\theta_i} \right\| \leq \frac{\gamma}{\kappa} \right\}$, 其中, κ 取为矩阵 $B_{\theta_i}^T P_{\theta_i}$ 的最小奇异值。注意到当 \widehat{e}_{θ_i} 落在该集合之外时,有 $\frac{d}{dt} \|u_{\theta_i}^a\| - \dot{\beta}_{\theta_i} \leq 0$ 成立。

上述分析表明, Δ_1 是 \widehat{e}_{θ_i} 轨迹的一个吸引集。因此,存在某个有限时刻 T ,使得当 $t > T$ 时,下式恒成立:

$$2 \widehat{E}_{\eta_0}^T(t) P_{\eta_0} B_{\eta_0} \left[U_{\eta_0}^a(t) - \Omega_{\eta_0}(t) \right] < 0 \quad (25)$$

继而可以推出:

$$D^+V_3(t) \leq -(\varphi_{2,\theta_i} - 1)V_3(t) + \chi_5 V_1(t) + \chi_6 V_2(t) \quad (26)$$

在时间间隔内 $[t_{\theta}, t_{\theta+1})$ 构造 Lyapunov 函数 $V(t) = \varpi_1 V_1(t) + \varpi_2 V_2(t) + V_3(t)$, 其中, $V_1(t) = \tilde{E}_{\eta_0}^T(t) \Gamma_{\eta_0} \tilde{E}_{\eta_0}(t)$, $\Gamma_{\eta_0} = \text{diag}[\Gamma_{\theta_1}, \Gamma_{\theta_2}, \dots, \Gamma_{\theta_{n_0}}]$ 。结合上述分析,对 $V(t)$ 求右上 Dini 导数可得 $D^+V(t) \leq -\varpi_3 V(t) + \varpi_4$, 其中, $\varpi_4 = \varpi_2 \chi_2$ 。继而可得 $V(t_{\theta}^+) \leq \varpi_5 V(t_{\theta}^-) + \varpi_6$, 其中, $\varpi_6 = \varpi_1 \lambda_1 \gamma_1 + \varpi_2 \chi_4 + \bar{\lambda}_1 \gamma_4$ 。与引理 3 的证明类似,可以得到输出跟踪误差 $E_{\eta_0}(t)$ 一致最终有界。证毕

注 5 在所设计的控制器(19)中,引入的补偿项 ω_{θ_i} 用于应对系统中存在的未知攻击影响。该补偿项的构造仅依赖于局部误差信号,通过自适应调节其幅值,实现对攻击输入的在线补偿。与文献[22,24]中依赖攻击信息的控制方法不同,本文所采用的补偿机制不需要任何关于攻击信号的先验信息,也无需进行攻击检测或辨识。此外,控制器整体结构依赖于观测器(11)估计的系统状态与动态补偿器(12)提供的领导者信息,其中各子模块均可由每个智能体基于本地及邻居信息独立实现,进一步体现了本文方法在结构上的完全分布式特性。

3 仿真与结果分析

本节通过数值仿真对本文所提方法在开放式异构多智能体系统中的性能进行验证。考虑一个由一个领导者和若干跟随者组成的异构多智能体系统,跟随者和领导者的动力学分别如式(1)和式(2)所示,其中参数矩阵分别为 $A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$, $A_2 = A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -0.5 \end{bmatrix}$, $A_4 = A_5 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & -2 \end{bmatrix}$, $B_1 = B_2 = B_3 = [1 \ 1]^T$, $B_4 = B_5 = [1 \ 1 \ 1]^T$, $C_0 = [1 \ 1]$, $C_1 = C_2 = C_3 = [1 \ 0]$, $C_4 = C_5 = [1 \ 0 \ 0]$ 。

为构造降阶观测器,对每个跟随者选取相应的坐标变换矩阵 $T_1 = T_2 = T_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$, $T_4 = T_5 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ 。

考虑在跟踪过程中跟随者数量会随时间变化的情况,令切换信号为

$$\rho(t) = \begin{cases} 1, t \in [12k, 12k+4) \\ 2, t \in [12k+4, 12k+8) \\ 3, t \in [12k+8, 12k+12) \end{cases} \quad (27)$$

其中, $k \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$ 。在时间区间 $[0, 48)$ 内跟随者数量如图 1 所示,对应的三种通信拓扑如图 2 所示,每一种拓扑均满足领导者可达性假设。此外,每个跟随者均受到执行器攻击,其攻击信号统一设定为 $u_{\theta_i}^a = 0.2 \sin(0.5t)$ 。

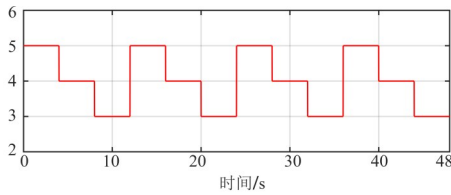


图1 跟随者数量的演化图

Figure 1 Evolution of the number of followers

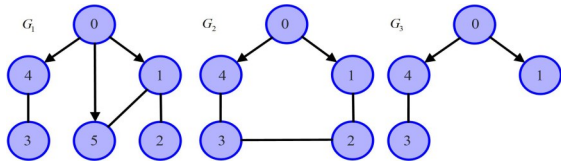


图2 跟踪过程中可能的拓扑情况

Figure 2 Possible communication topologies during tracking

首先验证所提出的降阶观测器对跟随者状态的估计性能。求解式(5)和(9)可得一组解 $\Gamma_1 = \begin{bmatrix} 1.715 0 & -1.715 0 \\ -1.715 0 & 4.485 3 \end{bmatrix}$, $\Gamma_2 = \Gamma_3 = \begin{bmatrix} 4.587 2 & -4.587 2 \\ -4.587 2 & 12.782 2 \end{bmatrix}$, $\Gamma_4 = \Gamma_5 = \begin{bmatrix} 4.731 9 & -0.130 4 & -4.601 5 \\ -0.130 4 & 1.177 7 & -1.047 3 \\ -4.601 5 & -1.047 3 & 8.632 8 \end{bmatrix}$ 。利用上述矩阵信息构造降阶观测器, 即对不可测状态分量进行估计。图3给出了不可测状态估计误差范数 $\tilde{E}_{\eta_o}(t)$ 的演化曲线, 图中以暗绿色虚竖线表示智能体退出的时刻, 以暗红色虚竖线表示智能体加入的时刻。可以观察到, 所设计的降阶观测器能实现对不可测状态实现快速且稳定的估计, 估计误差收敛并保持有界, 从而验证了引理2中关于观测器有效性的结论。同时, 为进一步验证所提观测器的性能优势, 图3同时给出了文献[22]中所提出观测器的估计误差演化结果作为对比。可以观察到, 本文所设计的降阶观测器在估计误差收敛速度方面明显优于文献[22]方法, 体现出更好的收敛性能和更低的计算复杂度。

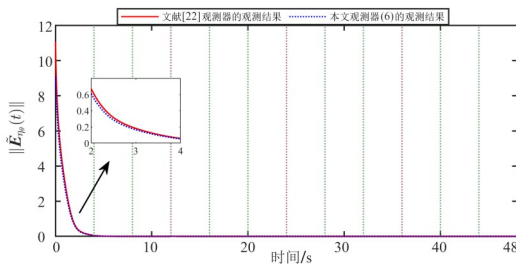


图3 状态估计误差范数的演化曲线

Figure 3 Evolution of the norm of state estimation error

随后验证动态补偿器对领导者状态的估计效果, 设计补偿器增益矩阵为 $\mathbf{K} = [-0.192 7 \quad -3.921 3]^T$, 图4

给出了补偿误差的演化曲线。可以看出所提出动态补偿器在无需全局拓扑信息条件下, 仍能够有效实现领导者状态估计, 并且在智能体数量发生变化后仍能收敛, 体现了其在开放式网络环境中的有效性, 从而验证了引理3中关于动态补偿器有效性的结论。

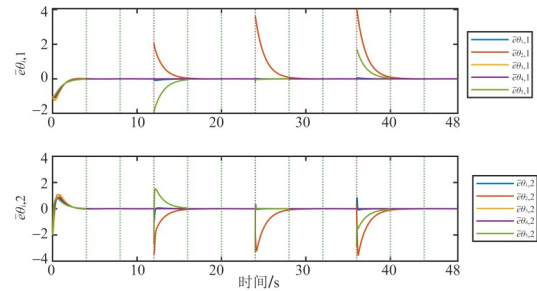


图4 补偿误差的演化曲线

Figure 4 Evolution of the compensation error

最后, 对所设计的弹性控制器进行验证, 该控制器综合利用降阶观测器提供的状态估计、动态补偿器给出的领导者状态估计, 并引入自适应攻击补偿项以抑制执行器攻击的影响。设计控制增益矩阵 $\mathbf{K}_1^I = 0.582 7$, $\mathbf{K}_2^I = \mathbf{K}_3^I = 0.042 5$, $\mathbf{K}_4^I = \mathbf{K}_5^I = [-1.257 6 \quad -0.041 1]$, $\mathbf{K}_1^{II} = -3.539 6$, $\mathbf{K}_2^{II} = \mathbf{K}_3^{II} = -4.086 5$, $\mathbf{K}_4^{II} = \mathbf{K}_5^{II} = -2.374 0$, $\mathbf{K}_1^{III} = [8.244 5 \quad 5.913 7]$, $\mathbf{K}_2^{III} = \mathbf{K}_3^{III} = [8.009 3 \quad 7.672 3]$, $\mathbf{K}_4^{III} = \mathbf{K}_5^{III} = [3.215 6 \quad 7.235 9]$ 。

图5给出了输出跟踪误差的演化曲线。可以看到, 在执行器攻击以及开放式网络等多重因素同时存在的情况下, 各跟随者能够实现输出一致性, 且跟踪误差保持一致最终有界。这说明所提出的弹性控制策略能够有效抵御执行器攻击, 并保证系统整体的协同性能, 从而验证了定理1中关于所提出的控制协议在执行器攻击下的有效性。为验证本文所提出弹性控制策略在攻击环境下的性能优势, 图5还对比了文献[24]中控制策略的跟踪误差变化情况。可以看到, 本文方法在执行器攻击和网络动态变化共同作用下依然能够实现更快的误差收敛, 从而体现出所提策略在攻击抑制与系统协同性能方面的改进效果。同时, 为进一步体现攻击补偿策略的重要性, 图5还展示了在无攻击补偿控制条件下的跟踪误差变化情况, 结果显示无攻击补偿时系统无法实现误差收敛, 进一步验证了本文所提控制协议在面对执行器攻击时的有效性与必要性。此外, 可以观察到在退出时刻系统误差曲线整体变化较小, 而在加入时刻由于新增智能体引入新的估计误差, 误差范数曲线往往会发生明显的突变, 随后仍会继续收敛, 这进一步验证了该控制策略在开放式环境下的适应能力。

为进一步分析控制器设计中控制增益 c_{θ} 对系统

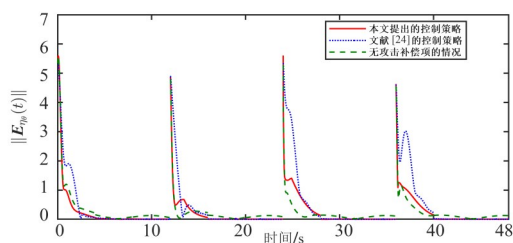
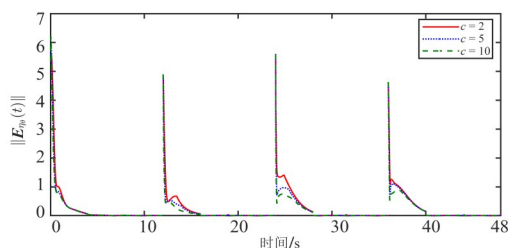


图5 输出跟踪误差范数的演化曲线

Figure 5 Evolution of the norm of output tracking error

性能的影响,图6展示了分别设置 $c_{\theta_1}=2$ 、 $c_{\theta_1}=5$ 、 $c_{\theta_1}=10$ 时系统输出误差范数的演化曲线。可以观察到,随着控制增益的增大,系统误差收敛速度明显提升,表明较大的控制增益有助于加快系统达到输出一致性的速度。

图6 设置三组不同的控制增益 c_{θ} 对应的输出跟踪误差范数的演化曲线Figure 6 Evolution of the norm of output tracking error corresponding to three different gains c_{θ}

4 结论

本文研究了受到执行器攻击的开放式异构多智能体系统的自适应输出一致性问题。首先,基于输出信息为每个跟随者构造了一种具有攻击免疫能力的降阶观测器,用以获取控制所需的局部状态信息。为了刻画网络的开放特性,建立了一种用于描述系统跟踪误差演化的统一分析框架。基于该框架,提出了一种完全分布式的自适应弹性控制协议,从而实现了开放式异构多智能体系统的输出一致性。未来的研究将在本文分析框架的基础上,进一步考虑更一般的攻击模型以及非线性系统情形下的开放式异构多智能体系统的一致性问题。

参考文献

[1] 温广辉, 余星火, 黄廷文, 等. 模型参数不确定下多无人艇系统固定时间二分编队跟踪控制[J]. 自动化学报, 2025, 51(3): 669-677.
Wen Guanghui, Yu Xinghuo, Huang Tingwen, et al. Fixed-time bipartite formation tracking control for multi-USV systems with uncertain model parameters[J]. Acta Automatica Sinica, 2025, 51(3): 669-677. (in Chinese)

[2] Dong Jiawei, Yassine A, Armitage A, et al. Multi-agent reinforcement learning for intelligent V2G integration in future transportation systems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(12): 15974-15983.
[3] Yu Tao, Wang Haizhu, Zhou Bin, et al. Multi-agent correlated equilibrium Q(λ) learning for coordinated smart generation control of interconnected power grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4): 1669-1679.
[4] 王健安, 闫慧娴, 赵志诚. 事件触发策略下多移动机器人抗干扰固定时间编队控制[J]. 电子学报, 2023, 51(5): 1256-1265.
Wang Jianan, Yan Huixian, Zhao Zhicheng. Anti-disturbance fixed-time formation control of multi-mobile robots via event-triggered mechanism[J]. Acta Electronica Sinica, 2023, 51(5): 1256-1265. (in Chinese)
[5] 伍瀚, 孙浩, 计科峰, 等. 时序信息引导跨视角特征融合的多无人机多目标跟踪方法[J]. 电子学报, 2025, 53(3): 728-743.
Wu Han, Sun Hao, Ji Kefeng, et al. Temporal-guided cross-view feature fusion network for multi-drone multi-object tracking[J]. Acta Electronica Sinica, 2025, 53(3): 728-743. (in Chinese)
[6] Wen Guanghui, Yu Wenwu, Yu Xinghuo, et al. Complex cyber-physical networks: From cybersecurity to security control[J]. Journal of Systems Science and Complexity, 2017, 30(1): 46-67.
[7] Li Zhongkui, Duan Zhisheng, Lewis F L. Distributed robust consensus control of multi-agent systems with heterogeneous matching uncertainties[J]. Automatica, 2014, 50(3): 883-889.
[8] Li Yifei, Wang Xin, Sun Jian, et al. Self-triggered consensus control of multiagent systems from data[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2024, 69(7): 4702-4709.
[9] 吴忠强, 程洪强. 网络攻击下考虑状态受限的微电网安全运行与控制[J]. 电子学报, 2024, 52(9): 3240-3250.
Wu Zhongqiang, Cheng Hongqiang. Safe operation and control of microgrid considering state constraints under network attacks[J]. Acta Electronica Sinica, 2024, 52(9): 3240-3250. (in Chinese)
[10] 江碧涛, 温广辉, 周佳玲, 等. 智能无人集群系统跨域协同技术研究现状与展望[J]. 中国工程科学, 2024, 26(1): 117-126.
Jiang Bitao, Wen Guanghui, Zhou Jialing, et al. Cross-domain cooperative technology of intelligent unmanned swarm systems: Current status and prospects[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(1): 117-126. (in Chinese)
[11] Adib Yaghmaie F, Lewis F L, Su Rong. Output regulation of linear heterogeneous multi-agent systems via output and state feedback[J]. Automatica, 2016, 67: 157-164.
[12] 贾泉, 席建祥, 刘光斌, 等. 基于脉冲控制的时延异构多

智能体编队控制[J]. 电子学报, 2018, 46(12): 2957-2963.

Jia Xiao, Xi Jianxiang, Liu Guangbin, et al. Formation control for heterogeneous multi-agent systems with communication delays based on impulsive control[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(12): 2957-2963. (in Chinese)

- [13] Huang Jie. Nonlinear output regulation[M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2004.
- [14] Luo Dahui, Wang Yujuan, Li Zeqiang, et al. Asymptotic leader-following consensus of heterogeneous multi-agent systems with unknown and time-varying control gains[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2025, 22: 2768-2779.
- [15] Zhou Jialing, Lv Yuezu, Wen Guanghui, et al. Resilient consensus of multiagent systems under malicious attacks: Appointed-time observer-based approach[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2022, 52(10): 10187-10199.
- [16] 张文雨, 徐勇, 孙健, 等. 网络攻击下多智能体系统攻击检测设计与分布式弹性控制[J]. 自动化学报, 2025, 51(10): 2347-2358.
Zhang Wenyu, Xu Yong, Sun Jian, et al. Attack detection design and distributed resilient control of multi-agent systems under cyber-attacks[J]. Acta Automatica Sinica, 2025, 51(10): 2347-2358. (in Chinese)
- [17] Huo Shicheng, Huang Dalin, Zhang Ya. Secure output synchronization of heterogeneous multi-agent systems against false data injection attacks[J]. Science China Information Sciences, 2022, 65(6): 162204.
- [18] Yang Yang, Qi Chang, Qian Yue, et al. Output synchronization of heterogeneous multiagent systems with resilience to link and actuator attacks: A fully distributed event-triggered mechanism[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2023, 10(4): 1695-1706.
- [19] Wen Guanghui, Zheng Weixing. On constructing multiple Lyapunov functions for tracking control of multiple agents with switching topologies[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2019, 64(9): 3796-3803.
- [20] Demazeau Y, Costa A C R. Populations and organizations in open multi-agent systems[C]//Proceedings of the 1st National Symposium on Parallel and Distributed AI, Hyderabad, 1996: 1-13.
- [21] Hayashi N. Distributed subgradient method in open multi-agent systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2023, 68(10): 6192-6199.
- [22] Li Xiaodong, Lv Yuezu, Wen Guanghui, et al. Tracking consensus of multi-agent systems with varying number of agents under actuator attacks[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2023, 70(12): 4514-4518.
- [23] Xue Mengqi, Tang Yang, Ren Wei, et al. Stability of multi-dimensional switched systems with an application to open multi-agent systems[J]. Automatica, 2022, 146: 110644.
- [24] Li Xiaodong, Wen Guanghui, Lv Yuezu, et al. Output consensus tracking of heterogeneous open multiagent systems under actuator attacks[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2026, 13(1): 423-435.
- [25] Das A, Lewis F L. Distributed adaptive control for synchronization of unknown nonlinear networked systems[J]. Automatica, 2010, 46(12): 2014-2021.

作者简介



李晓东 男, 1995年6月出生于山东省泰安市。现为东南大学数学学院数学专业博士研究生。主要研究方向为多智能体系统、攻击检测与分布式控制。

E-mail: 230208654@seu.edu.cn



温广辉 1983年10月出生于河南省平顶山市。现为东南大学自动化学院首席教授、博士生导师。主要研究方向为智能系统、复杂网络化系统、分布式控制与优化、弹性控制与强化学习。

E-mail: ghwen@seu.edu.cn