

控制与决策

Control and Decision

具有扰动的非线性多智能体系统在非周期间歇通信下的一致性问题的

任微, 禹梅

引用本文:

任微, 禹梅. 具有扰动的非线性多智能体系统在非周期间歇通信下的一致性问题的[J]. 控制与决策, 2025, 40(12): 3743-3751.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2025.0211>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于移动传感器/执行器网络的时滞分布参数系统镇定控制](#)

Stabilization control for a class of distributed parameter systems with time-delay based on mobile sensor and actuator networks
控制与决策. 2021, 36(8): 1955-1962 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1309>

[基于神经网络的电力系统暂态稳定分布式自适应控制](#)

Neural network-based distributed adaptive control for power system transient stability
控制与决策. 2021, 36(6): 1407-1414 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1168>

[多航天器系统分布式固定时间输出反馈姿态协同跟踪控制](#)

Distributed fixed-time output feedback attitude coordination tracking control for multiple rigid spacecraft
控制与决策. 2021, 36(5): 1049-1058 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0968>

[带输入饱和的不确定非线性系统自适应模糊触发式补偿控制](#)

Adaptive fuzzy trigger compensation control for uncertain nonlinear system with input saturation
控制与决策. 2021, 36(12): 3007-3014 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0907>

[基于神经动态优化的非线性系统近似最优跟踪控制](#)

Approximate optimal tracking control for nonlinear systems based on neurodynamic optimization
控制与决策. 2021, 36(1): 97-104 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0056>

具有扰动的非线性多智能体系统在非周期 间歇通信下的一致性问题的

任微, 禹梅[†]

(华北电力大学 控制与计算机工程学院, 北京 102206)

摘要: 研究具有未知外部扰动的非线性多智能体系统在非周期性间歇通信条件下的分布式领导-跟随一致性控制问题. 针对存在有界扰动并且满足 Lipschitz 条件的非线性多智能体系统, 设计分布式扩张状态观测器, 该观测器能够对系统状态和总扰动进行实时估计与动态补偿. 结合非周期性间歇通信的特性, 提出一种具有扰动补偿能力的分布式一致性控制协议, 该协议仅在通信阶段更新控制信号, 在非通信阶段则保持零输入, 从而在保证系统性能的同时, 有效降低系统的通信负担和能量消耗. 利用 Lyapunov 理论以及矩阵不等式相关知识证明了所提出的控制协议能够确保系统在非周期性间歇通信和未知外部扰动的复杂条件下实现领导跟随有界一致性. 数值仿真实验验证了所提出控制协议的有效性.

关键词: 一致性; 多智能体系统; 扩张状态观测器; 非周期间歇通信; 非线性; 扰动

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2025.0211

引用格式: 任微, 禹梅. 具有扰动的非线性多智能体系统在非周期间歇通信下的一致性问题的[J]. 控制与决策, 2025, 40(12): 3743-3751.

Consensus of nonlinear multi-agent systems with disturbances under aperiodic intermittent communications

REN Wei, YU Mei[†]

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: This paper investigates the distributed leader-following consensus control problem for nonlinear multi-agent systems with external disturbances under aperiodic intermittent communication. For the considered nonlinear multi-agent systems (MASs) with bounded disturbances satisfying Lipschitz continuity conditions, a distributed extended state observer (ESO) is designed to estimate and compensate the system states and aggregated disturbances in real time. Based on the characteristics of aperiodic intermittent communication, a distributed consensus control protocol with disturbance compensation capability is proposed. The protocol updates control signals only during communication phases while maintaining zero input otherwise, thus effectively reducing the communication burden and energy consumption of the system while ensuring system performance. By leveraging the Lyapunov theory and matrix inequality-related knowledge, it is proven that the proposed control protocol ensures the system can achieve leader-follower bounded consensus under complex conditions of aperiodic intermittent communication and unknown external disturbances. Numerical simulations verify the effectiveness of the presented control protocol.

Keywords: consensus; multi-agent systems; extended state observer; aperiodically intermittent communications; nonlinear; disturbance

0 引言

近年来, 多智能体系统一致性控制研究取得了显著进展^[1]. 为降低传感器更新频次对系统资源的消耗, 间歇通信条件下的协同控制问题受到了广泛关

注^[2]. 然而, 实际运行中的 MASs 常面临复杂的外部扰动, 这对系统的一致性性能产生了显著影响. 因此, 在控制器设计中引入扰动估计机制, 对于保障系统实现一致性收敛至关重要^[3]. 在此背景下, 探索适用

收稿日期: 2025-03-01; 录用日期: 2025-06-27.

基金项目: 吉林省电力有限公司科技基金项目 (2024JBGS-08); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2025JC009).

责任编辑: 王龙.

[†]通信作者. E-mail: meiyu@ncepu.edu.cn.

于间歇通信场景的分布式抗扰动控制策略具有重要理论价值与工程意义^[4].

自韩京清先生于1998年正式提出自抗扰控制(ADRC)^[5]这一思想以来,该方法凭借其对于未建模动态和外部扰动的强鲁棒性,逐渐成为解决MASs一致性问题有效范式. ADRC的核心优势在于无需依赖对象的精确模型,能够以统一的方式处理系统内部和外部的扰动. 这一特性使得自抗扰控制在面对复杂多变的多智能体系统时,展现出显著的适应性和优越性,为多智能体系统的一致性问题提供了全新的解决方案,有效提升了系统的稳定性和可靠性. 作为ADRC的关键组成部分,扩张状态观测器发挥着极为重要的作用^[6-9]. ESO通过独特的设计思路,将系统的不确定项以及外部扰动作为扩张状态,具体而言,它利用系统的输入输出信息,构建包含扰动状态的观测方程. 通过对这些状态变量的实时估计,ESO能够将复杂的非线性系统动态转化为可处理的线性形式,从而实现动态反馈线性化与控制解耦. 这种特性使得控制器的设计能够摆脱对系统精确数学模型的依赖,极大地提升了控制系统在复杂环境下的适应性. 文献[10]针对含未知负载信息的二质量伺服系统,提出了一种基于有限时间扩张状态观测器的非奇异快速终端滑模控制方法. 文献[11]提出了一种分布式扩张状态观测器,利用邻居智能体之间的相对输出信息同时估计出每个智能体的局部状态和扰动,以解决具有未知外部扰动的一般线性多智能体系统的领导者-跟随者一致性跟踪问题. 文献[12]基于预测型ESO,解决了输入输出时滞扰动下的线性MASs一致性控制问题. 该预测型ESO通过对未来状态的预估,提前补偿时滞带来的影响,并且进一步将ESO推广至非线性MASs,通过设计扰动估计与反馈线性化,实现了领导者-跟随者一致性跟踪. 文献[13]针对具有有界时变输入/输出延迟和不匹配扰动的多智能体系统,提出一种无需积分项的预测扩张状态观测器,通过线性化高维非线性矩阵不等式来计算ESO参数,从而构建控制输入. 这种创新设计简化了控制输入的构造过程,同时在处理复杂扰动时展现出独特的优势.

尽管上述研究在提升MASs抗扰能力方面成果斐然,但这些研究大多基于连续通信的假设. 在实际应用场景中,如无线传感网络、无人机集群等,通信资源往往受到诸多限制,使得连续通信难以满足实际需求. 此外,实际系统运行过程中,通信链路受能量约束等因素影响,呈现出非周期中断的特性. 因此,如何在通信效率与控制性能之间实现权衡优化,已

成为保障系统在复杂通信环境下高效稳定运行的关键问题.

当前,已有不少针对间歇通信的控制方法,其中多数基于周期性协议^[14-16]. 这些周期性协议通过预先设定固定的时间窗口,实现通信与非通信周期的切换. 从理论分析的角度来看,这种方式在一定程度上简化了分析过程. 然而,从实际控制效果来看,由于其无法依据系统状态的动态变化实时调整通信策略,导致通信资源的利用率难以达到最优. 尽管文献[17]结合扰动观测器,利用估计扰动和局部相关信息,设计了分布式间歇控制器,成功实现了线性MASs在外部扰动下的状态/输出反馈一致性;文献[18]引入ESO框架,构建了自抗扰间歇协议,求解了未建模扰动下MASs的一致性问题. 但这些研究均局限于周期通信模型下的线性MASs范畴,未能充分考虑复杂通信环境下的多样性需求.

在非周期性协议驱动的多智能体系统研究领域,虽然已取得一定的阶段性成果,但仍面临诸多亟待解决的关键问题. 文献[19]研究了一般线性多智能体系统的半全局超前-跟随协调问题. 该研究采用非周期间歇饱和执行器来操控智能体的控制输入,结合基于代数Riccati方程的低增益反馈技术和多重Lyapunov稳定性理论,给出了不同情况下系统跟踪的充分条件,推动了相关领域的研究. 然而,在实际工程应用中,多智能体系统通常受到外部扰动的影响,并且表现出显著的非线性特性,而文献[19]并未充分考虑这些因素. 外部扰动会直接影响系统的稳定性和动态行为,而非线性特性则会显著增加控制设计的复杂性. 这些因素的存在限制了该研究成果在应对复杂实际场景时的适用性.

本文针对无向图拓扑下含未知外部扰动的非线性多智能体系统,深入研究非周期间歇通信条件下的领导-跟随一致性控制问题. 在文献[19]的基础上,将改进的扩张状态观测器引入非周期间歇通信条件下的多智能体系统,构建具有扰动动态解耦能力的协同控制策略,用于解决含外部扰动的一致性问题. 相较于文献[18]的线性多智能体模型,本文建立了满足Lipschitz条件的连续非线性的多智能体动力学模型,该模型在实际工程中普遍存在^[12]. 此外,文献[18]要求通信序列严格满足周期性约束,而本文聚焦于非周期间歇通信场景,仅需通信间隔满足弱约束条件,显著放宽了通信限制.

下面对符号进行说明:上标“T”表示矩阵的转置; R^n , $R^{n \times n}$ 表示 n 维实向量和 $n \times n$ 维实矩阵; I_m 代表 m 维单位矩阵; L_2 表示平方可积函数空间;

⊗表示矩阵的克罗内克积.

1 问题描述

对于一个由单个领导者和 $N(N > 0)$ 个跟随者组成的多智能体系统, 假设不区分信息流动的方向, 可以用无向图表示其跟随者的拓扑结构. 该无向图用 $G = (V, \Xi, A)$ 表示, 其中 $V = (v_1, v_2, \dots, v_N)$ 和 $\Xi \subseteq V \times V$ 分别定义节点集合和边集合. 邻接矩阵定义为 $A = [a_{ij}]_{N \times N} \in \mathbb{R}^{N \times N}$, 若 $(v_i, v_j) \in \Xi$, 则 $a_{ij} = 1$; 否则 $a_{ij} = 0$. 节点 i 的邻接节点集合表示为 $N_i = \{j \in V : (i, j) \in \Xi\}$. 定义拉普拉斯矩阵为 $L = [l_{ij}]_{N \times N} \in \mathbb{R}^{N \times N}$, 当 $i = j$ 时, $l_{ii} = \sum_{j=1}^N a_{ij}$; 当 $i \neq j$ 时, $l_{ij} = -a_{ij}$. 在本文中, 假设领导者节点不接收来自跟随者节点的任何反馈信号. 在此假设下, 定义邻接权重 h_i 如下: 若领导者节点与智能体 i 之间存在直接通信, 则 $h_i > 0$; 否则 $h_i = 0$. 进一步构造对角矩阵 $H = \text{diag}\{h_1, h_2, \dots, h_N\}$, 并定义增广拉普拉斯矩阵 $\hat{L} = L + H$, 其中 L 为跟随者间的拉普拉斯矩阵.

领导者的动态模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_0(t) = Ax_0(t) + f(x_0(t)), \\ y_0(t) = Cx_0(t). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x_0 \in \mathbb{R}^n$ 为领导者的状态向量, $y_0 \in \mathbb{R}^p$ 为领导者的输出向量. 系统矩阵 $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 和 $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$ 为常数矩阵. 具有Lipschitz常数 ρ 的非线性函数 $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ 满足全局Lipschitz条件

$$\|f(x) - f(y)\| \leq \rho \|x - y\|, \quad \forall x, y \in \mathbb{R}^n.$$

相应地, 跟随者 $i(i = 1, 2, \dots, N)$ 的动态模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = Ax_i + B(u_i(t) + d_i(t)) + f(x_i(t)), \\ y_i(t) = Cx_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, N. \end{cases} \quad (2)$$

其中: $x_i \in \mathbb{R}^n$ 为跟随者的状态向量, $u_i \in \mathbb{R}^m$ 为跟随者的控制输入向量, $d_i(t) \in \mathbb{R}^m$ 为跟随者的外部扰动, $y_i \in \mathbb{R}^p$ 为跟随者的输出向量.

定义 1 对于任意初始状态 $x_i(0)$, 若存在一个有界正常数 ℓ , 使多智能体系统中每个智能体 i 满足

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i - x_0\| \leq \ell, \quad \forall i = 1, 2, \dots, N, \quad (3)$$

则称该多智能体系统达到了有界一致性.

假设 1 多智能体系统中的矩阵对 (A, B) 可控, (A, C) 可观测, 且矩阵 (A, B, C) 满足 $\text{rank} \begin{bmatrix} C & 0 \\ A & B \end{bmatrix} = n + m$.

假设 2 多智能体系统的通信拓扑结构由无向图 G 描述, 该图保证领导者与 N 个跟随者之间至少存在一条路径.

2 基于扩张状态观测器的非线性多智能体系统的一致性

2.1 多智能体系统的扩张状态观测器设计

多智能体系统的一致性误差定义为 $\tilde{x}_i(t) = x_i(t) - x_0(t)$, 则有

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_i(t) = A\tilde{x}_i(t) + B(u_i(t) + d_i(t)) + \tilde{f}_i(x_i, x_0), \\ \tilde{y}_i(t) = C\tilde{x}_i(t). \end{cases} \quad (4)$$

其中: $\tilde{f}_i(x_i, x_0) = f(x_i(t)) - f(x_0(t))$, $\tilde{y}(t)Z = y_i(t) - y_0(t)$.

定义 $z_i = [x_i^T(t), d_i^T(t)]^T$, 多智能体系统(2)通过扩张状态变量 $\sigma_i(t) = \dot{d}_i(t)$, 可以转化为如下形式的增广系统:

$$\begin{cases} \dot{z}_i(t) = A_z z_i(t) + B_z u_i(t) + E \sigma_i(t) + \mathcal{F}_i(t), \\ \tilde{y}_i(t) = C_z z_i(t). \end{cases} \quad (5)$$

其中: $A_z = \begin{bmatrix} A & B \\ 0_{m \times n} & 0_m \end{bmatrix}$, $B_z = \begin{bmatrix} B \\ 0_m \end{bmatrix}$, $E = \begin{bmatrix} 0_{n \times m} \\ I_m \end{bmatrix}$, $\mathcal{F}_i(t) = \begin{bmatrix} f_i(x_i(t)) \\ 0_m \end{bmatrix}$, $C_z = [C \quad 0_{p \times n}]$.

假设 3^[20] 每个智能体的外部扰动满足以下条件: 1) $d_i(t)$ 和 $\sigma_i(t)$ 是有界的; 2) $\sigma_i(t) \in L_2$.

注 1 假设 3 中所涉及的扰动表示集总扰动, 这些扰动是未知的但有界, 且趋向某个稳定值. 并令 $\sigma(t) = [\sigma_1^T(t), \sigma_2^T(t), \dots, \sigma_N^T(t)]^T$, 分段连续函数 $\sigma(t)$ 的2-范数 $\|\sigma(t)\|_{L_2} = \left(\int_0^\infty \|\sigma(t)\|^2 dt \right)^{1/2} \leq \mu < \infty$.

定义 $\hat{z}_i(t) = [\hat{x}_i^T(t), \hat{d}_i^T(t)]^T$, 其中 $\hat{x}_i(t)$ 和 $\hat{d}_i(t)$ 分别为第 i 个智能体的状态估计值和扰动估计值. 当系统满足假设 1 ~ 假设 3, 构建如下扩张状态观测器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}_i(t) = A_z \hat{z}_i(t) + B_z u_i(t) + \hat{\mathcal{F}}_i(t) + \\ F(\tilde{y}_i(t) - C_z \hat{z}_i(t)), \end{cases} \quad (6)$$

其中 $\hat{\mathcal{F}}_i(t)$ 作为 t 时状态 $\mathcal{F}_i(t)$ 的估计值.

定义 $e_{x_i}^T(t) = \hat{x}_i(t) - x_i(t)$, $e_{d_i}^T(t) = \hat{d}_i(t) - d_i(t)$, 则估计误差 $e_i(t) = [e_{x_i}^T(t), e_{d_i}^T(t)]^T = \hat{z}_i(t) - z_i(t)$. 故误差动态系统可以描述为

$$\dot{e}(t) = [(I_N \otimes (A_z - FC_z))]e(t) + \tilde{\mathcal{F}}(t) - (I_N \otimes E)\sigma(t), \quad (7)$$

其中 $\tilde{\mathcal{F}}(t) = \hat{\mathcal{F}}(t) - \mathcal{F}(t)$.

注 2 由于智能体 0 是领导者, 其自身状态可直接获取而无需估计, 因此 $\hat{x}_0(t) = x_0(t)$.

2.2 多智能体系统的控制律设计

本文采用如图 1 所示的非周期性间歇通信策略, 在此通信条件下, 设计一种分布式抗扰动协议. 当多智能体系统中的智能体能够相互通信时, 第 i 个智能

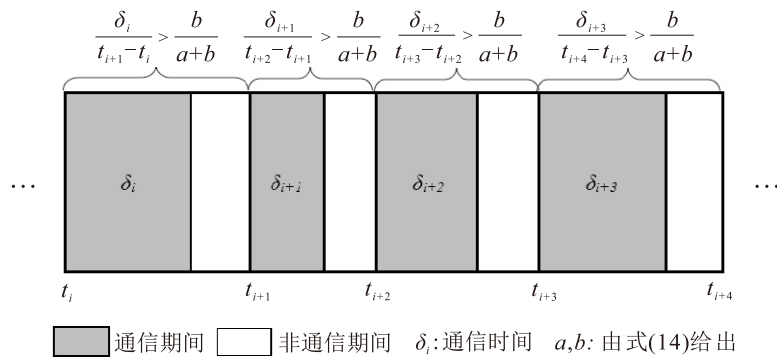


图1 非周期间歇通信

体与其他智能体之间进行状态信息交互, 协议为 $\sum_{j=1}^N a_{ij}(\hat{x}_i - \hat{x}_j) + h_i(\hat{x}_i - \hat{x}_0) - \hat{d}_i(t)$, 其中 a_{ij} 是邻接矩阵 A 的元素, h_i 是定义的邻接权重; 当通信不可用时, 协议仅保留对扰动 $d(t)$ 的估计值部分 $\hat{d}_i(t)$. 设计的一致性协议如下所示:

$$u_i(t) = \begin{cases} K \left(\sum_{j=1}^N a_{ij}(\hat{x}_i(t) - \hat{x}_j(t)) + h_i(\hat{x}_i - x_0) \right) - \hat{d}_i(t), & t \in [t_k, t_k + \delta_k); \\ -\hat{d}_i(t), & t \in [t_k + \delta_k, t_{k+1}). \end{cases} \quad (8)$$

其中控制增益矩阵 $K \in \mathbb{R}^{m \times n}$. 将式 (8) 代入 (2) 和 (4), 则有

$$\dot{x}_i(t) = \begin{cases} Ax_i(t) + BK \left(\sum_{j=1}^N a_{ij}(\hat{x}_i(t) - \hat{x}_j(t)) + h_i(\hat{x}_i(t) - \hat{x}_0(t)) \right) + f(x_i(t)) + B(d_i(t) - \hat{d}_i(t)), & t \in [t_k, t_k + \delta_k); \\ x_i(t) + f(x_i(t)) + B(d_i(t) - \hat{d}_i(t)), & t \in [t_k + \delta_k, t_{k+1}). \end{cases} \quad (9)$$

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \begin{cases} (I_N \otimes A + \hat{L} \otimes BK)\tilde{x}(t) + \tilde{f}(x_i(t), x_0(t)) + Me(t), & t \in [t_k, t_k + \delta_k); \\ (I_N \otimes A)\tilde{x}(t) + \tilde{f}(x_i(t), x_0(t)) + De(t), & t \in [t_k + \delta_k, t_{k+1}). \end{cases} \quad (10)$$

其中

$$\begin{aligned} M &= [\hat{L} \otimes BK \quad -I_N \otimes B], \\ D &= [0_{Nn \times Nn} \quad -I_N \otimes B]. \end{aligned}$$

本文的主要工作是设计合适的控制策略 (8) 和观测器 (6), 其目的是使多智能体系统中的每个跟随者智能体的状态 (2) 能够有效跟踪领导者智能体的状态 (1), 最终实现领导跟随有界一致性 (3).

3 一致性分析

定理 1 非线性多智能体系统 (1) 和 (2) 在非周

期间歇通信条件下可实现有界一致性, 如果存在通信时间 $\delta_k > 0$, 正定矩阵 $P_1 > 0, P_2 > 0$ 及标量 $k_1 > 0, k_2 > 0, \varpi > 0$, 满足下列条件:

$$P_1 A + A^T P_1 - 2P_1 B B^T P_1 + k_1 P_1 P_1 + k_1^{-1} \rho_1^2 I_{n \times n} < 0, \quad (11)$$

$$P_2 A_z + A_z^T P_2 - 2C_z^T C_z + k_2 P_2 P_2 + (k_2^{-1} \rho_2^2 + \varpi) I_{(n+m) \times (n+m)} < 0, \quad (12)$$

$$\delta_k > \frac{b}{a+b} (t_{k+1} - t_k), \quad (13)$$

$$a = -\frac{\lambda_{\max}(Q_1)}{\lambda_{\max}(P_2)\gamma}, \quad b = \frac{\lambda_{\max}(Q_2)}{\lambda_{\min}(P_1)}. \quad (14)$$

其中

$$Q_1 = \begin{bmatrix} \Phi & (I_N \otimes P_1)M \\ M^T(I_N \otimes P_1)^T & \gamma \Pi \end{bmatrix},$$

$$Q_2 = \begin{bmatrix} \Psi & (I_N \otimes P_1)D \\ D^T(I_N \otimes P_1)^T & \gamma \Pi \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned} \Phi &= I_N \otimes (P_1 A + A^T P_1 + k_1 P_1 P_1 + k_1^{-1} \rho_1^2 I) + 2\hat{L} \otimes P_1 B K, \\ \Psi &= I_N \otimes (P_2 A_z + A_z^T P_2 + k_2 P_2 P_2 + k_2^{-1} \rho_2^2 I), \\ \Pi &= I_N \otimes (P_2 A_z + A_z^T P_2 - C_z^T F^T P_2 - P_2 F C_z + k_2 P_2 P_2 + k_2^{-1} \rho_2^2 I + \varpi I), \\ K &= -\frac{1}{\lambda_1(\hat{L})} B^T P_1, \quad F = P_2^{-1} C_z^T. \end{aligned}$$

证明 设 Lyapunov 函数为

$$V(t) = \tilde{x}^T(t)(I \otimes P_1)\tilde{x}(t) + \gamma e^T(t)(I \otimes P_2)e(t),$$

其中 $\gamma > 0$ 为调节参数.

step 1: 当 $t \in [t_k, t_k + \delta_k)$ 时, 系统处于通信阶段, $V(t)$ 沿着系统轨迹求导, 即

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \tilde{x}^T(t)(I_N \otimes (P_1 A + A^T P_1) + 2\hat{L} \otimes P_1 B K)\tilde{x}(t) + 2\tilde{x}^T(t)(I_N \otimes P_1)\tilde{f}(x_i, x_0) + 2\tilde{x}^T(t)(I_N \otimes P_1)Me(t) + \gamma e^T(t)(I_N \otimes (P_2 A_z + A_z^T P_2 - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & C_z^T F^T P_2 - P_2 F C_z))e(t) - \\ & 2\gamma e^T(t)(I_N \otimes P_2 E)\sigma(t) + \\ & 2\gamma e^T(t)(I_N \otimes P_2)\tilde{\mathcal{F}}(x). \end{aligned} \quad (15)$$

根据文献 [21] 中柯西不等式, 可得

$$\begin{aligned} & -2e^T(t)(I_N \otimes P_2 E)\sigma(t) \leq \\ & \varpi e^T(t)e(t) + \frac{1}{\varpi}\sigma^T(t)(I_N \otimes E^T P_2^T P_2 E)\sigma(t). \end{aligned} \quad (16)$$

同时, 基于系统的非线性特性, 有

$$\begin{aligned} & 2\tilde{x}^T(t)(I_N \otimes P_1)\tilde{f}(x_i, x_0) \leq \\ & \tilde{x}^T(t)(I_N \otimes (k_1 P_1 P_1 + k_1^{-1} \rho_1^2 I))\tilde{x}. \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} & 2\gamma e^T(t)(I_N \otimes P_2)\tilde{\mathcal{F}}(x) \leq \\ & \gamma e^T(t)(I_N \otimes (k_2 P_2 P_2 + k_2^{-1} \rho_2^2 I))e. \end{aligned} \quad (18)$$

将式 (16) ~ (18) 代入 (15) 中, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) \leq & \tilde{x}^T(t)(I_N \otimes (P_1 A + A^T P_1 + k_1 P_1 P_1 + k_1^{-1} \rho_1^2 I) + \\ & 2\hat{L} \otimes P_1 B K)\tilde{x}(t) + 2\tilde{x}^T(t)(I_N \otimes P_1)\mathcal{M}e(t) + \\ & \gamma e^T(t)(I_N \otimes (P_2 A_z + A_z^T P_2 - C_z^T F^T P_2 - \\ & P_2 F C_z + k_2 P_2 P_2 + k_2^{-1} \rho_2^2 I + \varpi I))e(t) + \\ & \frac{\gamma}{\varpi}\sigma^T(t)(I_N \otimes E^T P_2^T P_2 E)\sigma(t) \triangleq \\ & \eta^T(t)Q_1\eta(t) + \varphi\sigma^T(t)\sigma(t). \end{aligned} \quad (19)$$

其中

$$\eta(t) = [\tilde{x}^T(t) \quad e^T(t)]^T,$$

$$\varphi = \frac{\gamma}{\varpi}\lambda_{\max}((P_2 E)^T P_2 E),$$

$$Q_1 = \begin{bmatrix} \Phi & (I_N \otimes P_1)M \\ M^T(I_N \otimes P_1)^T & \gamma\Pi \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned} \Phi = & I_N \otimes (P_1 A + A^T P_1 + k_1 P_1 P_1 + \\ & k_1^{-1} \rho_1^2 I) + 2\hat{L} \otimes P_1 B K, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi = & I_N \otimes (P_2 A_z + A_z^T P_2 - C_z^T F^T P_2 - P_2 F C_z + \\ & k_2 P_2 P_2 + k_2^{-1} \rho_2^2 I + \varpi I). \end{aligned}$$

通信拓扑是一个无向连通图, 并且其增广拉普拉斯矩阵 \hat{L} 是正定矩阵 [22], 因此有 $0 < \lambda_1(\hat{L}) \leq \lambda_2(\hat{L}) \leq \dots \leq \lambda_N(\hat{L})$. 由不等式 (11), 可知

$$\begin{aligned} & P_1 A + A^T P_1 - 2\frac{\lambda_i(\hat{L})}{\lambda_1(\hat{L})}P_1 B B^T P_1 + \\ & k_1 P_1 P_1 + k_1^{-1} \rho_1^2 I_{n \times n} < 0. \end{aligned} \quad (20)$$

将控制器增益矩阵 $K = -B^T P_1 / (\lambda_1(\hat{L}))$ 代入 Φ , 由不等式 (20) 可知 $\Phi < 0$. 同样地, 将观测器增益矩阵 $F = P_2^{-1} C_z^T$ 代入 Π , 由不等式 (12) 可知 $\Pi < 0$. 考虑矩阵 $(I_N \otimes P_1)M$ 是常数矩阵, 在此基础上, 通过合理选取参数 γ , 并运用舒尔补, 可以得出矩阵 Q_1

< 0 . 于是有

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) \leq & \eta^T(t)Q_1\eta(t) + \varphi\|\sigma(t)\|^2 \leq \\ & \lambda_{\max}(Q_1)\eta^T(t)\eta(t) + \varphi\|\sigma(t)\|^2 \leq \\ & \lambda_{\max}(Q_1)(\tilde{x}^T(t)\tilde{x}(t) + e^T(t)e(t)) + \varphi\|\sigma(t)\|^2 \leq \\ & \frac{\lambda_{\max}(Q_1)}{\lambda_{\max}(P_2)\gamma} \left[\frac{\lambda_{\max}(P_2)\gamma}{\lambda_{\max}(P_1)}\tilde{x}^T(t)(I_N \otimes P_1)\tilde{x}(t) + \right. \\ & \left. \gamma e^T(t)(I_N \otimes P_2)e(t) \right] + \varphi\|\sigma(t)\|^2. \end{aligned} \quad (21)$$

假设 $\gamma > \max\left\{\frac{\lambda_{\max}(P_1)}{\lambda_{\max}(P_2)}, \frac{\lambda_{\min}(P_1)}{\lambda_{\min}(P_2)}\right\}$, 有

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) \leq & \frac{\lambda_{\max}(Q_1)}{\lambda_{\max}(P_2)\gamma} [\tilde{x}^T(t)(I_N \otimes P_1)\tilde{x}(t) + \\ & \gamma e^T(t)(I_N \otimes P_2)e(t)] + \varphi\|\sigma(t)\|^2 = \\ & -aV(t) + \varphi\|\sigma(t)\|^2, \end{aligned}$$

其中 $a = -\frac{\lambda_{\max}(Q_1)}{\lambda_{\max}(P_2)\gamma}$. 对其在区间 $[t_k, t_k + \delta_k)$ 积分可得

$$V(t) \leq e^{-a(t-t_k)}V(t_k) + \int_{t_k}^t \varphi\|\sigma(s)\|^2 ds. \quad (22)$$

特别地, 当 $t = t_k + \delta_k$ 时, 有

$$\begin{aligned} V(t_k + \delta_k) \leq & \lim_{t \rightarrow (t_k + \delta_k)^-} e^{-a(t-t_k)}V(t_k) + \int_{t_k}^t \varphi\|\sigma(s)\|^2 ds \leq \\ & e^{-a\delta_k}V(t_k) + \int_{t_k}^{t_k + \delta_k} \varphi\|\sigma(s)\|^2 ds. \end{aligned} \quad (23)$$

step 2: 当 $t \in [t_k + \delta_k, t_{k+1})$ 时, 系统处于非通信阶段, $V(t)$ 沿着系统轨迹求导, 即

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \tilde{x}^T(t)(I_N \otimes (P_1 A + A^T P_1))\tilde{x}(t) + \\ & 2\tilde{x}^T(t)(I_N \otimes P_1)D e(t) + \\ & 2\tilde{x}^T(t)(I_N \otimes P_1)\tilde{f}(x_i, x_0) + \\ & \gamma e^T(t)(I_N \otimes (P_2 A_z + A_z^T P_2 - C_z^T F^T P_2 - \\ & P_2 F C_z))e(t) - 2\gamma e^T(t)(I_N \otimes P_2 E)\sigma(t) + \\ & 2\gamma e^T(t)(I_N \otimes P_2)\tilde{\mathcal{F}}(x) \leq \\ & \tilde{x}^T(t)(I_N \otimes (P_1 A + A^T P_1 + k_1 P_1 P_1 + \\ & k_1^{-1} \rho_1^2 I))\tilde{x}(t) + 2\tilde{x}^T(t)(I_N \otimes P_1)D e(t) + \\ & \gamma e^T(t)(I_N \otimes (P_2 A_z + A_z^T P_2 - C_z^T F^T P_2 - \\ & P_2 F C_z + k_2 P_2 P_2 + k_2^{-1} \rho_2^2 I + \varpi I))e(t) + \\ & \frac{\gamma}{\varpi}\sigma^T(t)(I_N \otimes E^T P_2^T P_2 E)\sigma(t) \leq \\ & \eta^T(t)Q_2\eta(t) + \varphi\sigma^T(t)\sigma(t). \end{aligned}$$

其中

$$Q_2 = \begin{bmatrix} \Psi & (I_N \otimes P_1)D \\ D^T(I_N \otimes P_1)^T & \gamma\Pi \end{bmatrix},$$

$$\Psi = I_N \otimes (P_1A + A^T P_1 + k_1 P_1 P_1 + k_1^{-1} \rho_1^2 I),$$

$$\Pi = I_N \otimes (P_2 A_z + A_z^T P_2 - C_z^T F^T P_2 - P_2 F C_z + k_2 P_2 P_2 + k_2^{-1} \rho_2^2 I + \varpi I).$$

Q_2 结构与 Q_1 类似,运用舒尔补,可以得出矩阵 $Q_2 < 0$. 于是有

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq \lambda_{\max}(Q_2)\eta^T(t)\eta(t) + \varphi\|\sigma(t)\|^2 = \\ &\lambda_{\max}(Q_2)(\tilde{x}^T(t)\tilde{x}(t) + e^T(t)e(t)) + \varphi\|\sigma(t)\|^2 \leq \\ &\frac{\lambda_{\max}(Q_2)}{\lambda_{\min}(P_1)}\tilde{x}^T(t)(I_N \otimes P_1)\tilde{x}(t) + \\ &\frac{\lambda_{\max}(Q_2)}{\lambda_{\min}(P_2)}e^T(t)(I_N \otimes P_2)e(t) + \varphi\|\sigma(t)\|^2 \leq \\ &\frac{\lambda_{\max}(Q_2)}{\lambda_{\min}(P_1)}(\tilde{x}^T(t)(I_N \otimes P_1)\tilde{x}(t) + \\ &\frac{\lambda_{\min}(P_1)}{\gamma\lambda_{\min}(P_2)}\gamma e^T(t)(I_N \otimes P_2)e(t)) + \varphi\|\sigma(t)\|^2 \leq \\ &\frac{\lambda_{\max}(Q_2)}{\lambda_{\min}(P_1)}[\tilde{x}^T(t)(I_N \otimes P_1)\tilde{x}(t) + \\ &\gamma e^T(t)(I_N \otimes P_2)e(t)] + \varphi\|\sigma(t)\|^2 \leq \\ &bV(t) + \varphi\|\sigma(t)\|^2. \end{aligned}$$

其中: $b = \lambda_{\max}(Q_2)/\lambda_{\min}(P_1)$, 对其在区间 $[t_k + \delta_k, t_{k+1})$ 积分可得

$$\begin{aligned} V(t) &\leq e^{b(t-t_k-\delta_k)}V(t_k + \delta_k) + \int_{t_k+\delta_k}^t \varphi\|\sigma(t)\|^2 ds \leq \\ &e^{b(t-t_k-\delta_k)}\left(V(t_k + \delta_k) + \int_{t_k+\delta_k}^t \varphi\|\sigma(t)\|^2 ds\right). \end{aligned} \tag{24}$$

令 $\max_{k \in \mathbb{N}}(t_{k+1} - t_k) = \tau_1$, 当 $t = t_{k+1}$ 时, 将式(23)代入(24), 得

$$\begin{aligned} V(t_{k+1}) &\leq \lim_{t \rightarrow t_{k+1}^-} e^{b(t-(t_k+\delta_k))}\left(V(t_k + \delta_k) + \int_{t_k+\delta_k}^{t_{k+1}} \varphi\|\sigma(t)\|^2 ds\right) \leq \\ &e^{b(t_{k+1}-t_k-\delta_k)}\left(e^{-a\delta_k}V(t_k) + \int_{t_k}^{t_{k+1}} \varphi\|\sigma(t)\|^2 ds\right) \leq \\ &e^{-[(a+b)\delta_k - b(t_{k+1}-t_k)]}V(t_k) + e^{b(t_{k+1}-t_k-\delta_k)} \int_{t_k}^{t_{k+1}} \varphi\|\sigma(t)\|^2 ds \leq \\ &e^{-m_k}V(t_k) + e^{b\tau_1} \int_{t_k}^{t_{k+1}} \varphi\|\sigma(t)\|^2 ds. \end{aligned} \tag{25}$$

其中: $m_k = [(a+b)\delta_k - b(t_{k+1} - t_k)] > 0$, 由此可

得 $\delta_k > b(t_{k+1} - t_k)/(a+b)$, 则 $t_{k+1} - t_k - \delta_k < a(t_{k+1} - t_k)/(a+b) < \tau_1$.

step 3: 当 $t \in [t_k, \infty)$ 时, 由式(23)和(25)运算可得

$$\begin{aligned} V(t_2) &\leq e^{-m_1}V(t_1) + e^{b\tau_1} \int_{t_1}^{t_2} \varphi\|\sigma(t)\|^2 ds, \\ V(t_3) &\leq e^{-m_2}V(t_2) + e^{b\tau_1} \int_{t_2}^{t_3} \varphi\|\sigma(t)\|^2 ds \leq \\ &e^{-m_2}\left(e^{-m_1}V(t_1) + e^{b\tau_1} \int_{t_1}^{t_2} \varphi\|\sigma(t)\|^2 ds\right) + \\ &e^{b\tau_1} \int_{t_2}^{t_3} \varphi\|\sigma(t)\|^2 ds \leq \\ &e^{-(m_1+m_2)}V(t_1) + e^{-m_2}e^{b\tau_1} \int_{t_1}^{t_2} \varphi\|\sigma(t)\|^2 ds + \\ &e^{b\tau_1} \int_{t_2}^{t_3} \varphi\|\sigma(t)\|^2 ds \leq \\ &e^{-(m_1+m_2)}V(t_1) + e^{b\tau_1} \int_{t_1}^{t_4} \varphi\|\sigma(t)\|^2 ds. \end{aligned}$$

通过迭代, 对于任何正整数 k , 以下不等式成立:

$$\begin{aligned} V(t_{k+1}) &\leq e^{-m_k}V(t_k) + e^{b\tau_1} \int_{t_k}^{t_{k+1}} \varphi\|\sigma(t)\|^2 ds \leq \\ &e^{-\sum_{j=1}^k m_j}V(t_1) + e^{b\tau_1} \int_{t_1}^{t_{k+1}} \varphi\|\sigma(t)\|^2 ds. \end{aligned} \tag{26}$$

对于任意 $t > 0$, 存在正整数 s 使得 $t_{s+1} < t < t_{s+2}$. 并令 $m = \min\{m_k\} > 0$, $t_1 = 0$, 可以获得

$$\begin{aligned} V(t) &\leq e^{b(t-t_{s+1})}V(t_{s+1}) + \int_{t_{s+1}}^t \varphi\|\sigma(t)\|^2 ds \leq \\ &e^{b\tau_1}V(t_{s+1}) + \int_{t_{s+1}}^t \varphi\|\sigma(t)\|^2 ds \leq \\ &e^{b\tau_1}\left(e^{-\sum_{j=1}^s m_j}V(t_1) + e^{b\tau_1} \int_{t_1}^{t_{s+1}} \varphi\|\sigma(t)\|^2 ds\right) + \int_{t_{s+1}}^t \varphi\|\sigma(t)\|^2 ds \leq \\ &e^{b\tau_1}e^{-\sum_{j=1}^s m_j}V(t_1) + e^{b\tau_1} \int_{t_1}^t \varphi\|\sigma(t)\|^2 ds \leq \\ &e^{b\tau_1}e^{-\sum_{j=1}^s m_j}V(0) + e^{b\tau_1} \int_{t_1}^t \varphi\|\sigma(t)\|^2 ds. \end{aligned} \tag{27}$$

则有

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} V(t) &\leq e^{b\tau_1}e^{-\sum_{j=1}^s m_j}V(0) + e^{\tau_1} \int_{t_1}^{\infty} \varphi\|\sigma(t)\|^2 ds \leq \\ &\varphi e^{\tau_1} \mu^2. \end{aligned}$$

因 $\lambda_{\min}(P)\|\eta(t_k)\|^2 \leq V(t_k)$, $P = I_N \otimes \text{diag}\{P_1, \gamma P_2\}$, 有

$$\lim_{l \rightarrow \infty} \|\eta(t_k)\|^2 \leq \frac{\varphi e^{b\tau_1} \mu^2}{\lambda_{\min}(P)}. \tag{28}$$

最终得到

$$S = \left\{ \eta(t) \mid \|\eta(t)\| \leq \sqrt{\frac{\varphi e^{b\tau_1} \mu^2}{\lambda_{\min}(P)}} \right\}. \quad (29)$$

基于上述分析, 在所设计的控制策略和观测器下, 多智能体系统的每个跟随者状态能够跟踪到领导者状态, 系统可实现有界一致性. □

注 3 相较于文献 [19] 提出的基于代数 Riccati 方程的非周期间歇控制方法 (该方法未考虑外部扰动因素), 以及文献 [18] 针对周期间歇通信条件下线性系统的研究成果, 本文通过设计分布式观测器与抗扰控制器, 成功实现了非线性多智能体系统在非周期间歇通信和外部扰动条件下的有界一致性控制. 此外, 本文所提出的条件不依赖严格的周期性约束, 通信间隔仅需满足式 (13) 所示的弱条件, 其显著增强了算法的适用性.

4 仿真实例

在本节中, 给出了一个仿真实例来验证本文的结果. 考虑一个由单个领导者和 4 个跟随者组成的多智能体系统, 其通信拓扑图如图 2 所示, 其中索引为 0 的智能体是领导者智能体, 索引为 1 到 4 的均是跟随者智能体.

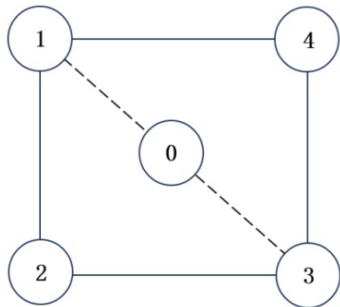


图2 多智能体系统的通信拓扑图

图 2 所示的通信拓扑图表明, 智能体 1 和智能体 3 能够与领导者建立连接, 并且整个拓扑结构包含生成树. 第 i 个智能体的动态特性由方程 (2) 所描述, 参数设置如下:

$$x_i = \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$C = [1 \quad 0], \quad f(x_i) = \begin{bmatrix} 0.1 \sin x_1 \\ 0.1 \sin x_2 \end{bmatrix}.$$

其中: Lipschitz 常数 $\rho_1 = \rho_2 = 0.04$, $\gamma = 20$. 可以验证假设 1 和假设 2 均成立.

增广拉普拉斯矩阵 \hat{L} 为

$$\hat{L} = \begin{bmatrix} 3 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 3 & -1 \\ -1 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix},$$

其中最小特征值 $\lambda_1(\hat{L}) = 0.4384$. 通过求解矩阵不等式 (11) 和 (12), 可以得到

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0.4790 & 0.4119 \\ 0.4119 & 1.3809 \end{bmatrix},$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} 0.9802 & -0.5910 & -0.5285 \\ -0.5910 & 1.1907 & -0.6710 \\ -0.5285 & -0.6710 & 3.2617 \end{bmatrix}.$$

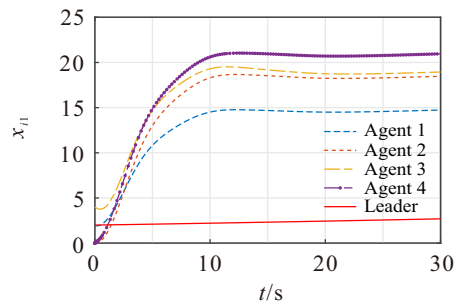
根据定理 1 可以计算出控制器增益矩阵 $K = [-0.9724, -3.2442]$, 观测器增益矩阵 $F = [2.2235, 1.4569, 0.6650]^T$. 求解矩阵特征值, 可得 $\lambda_{\max}(Q_1) = -0.1493$, $\lambda_{\max}(Q_2) = 1.2761$, 从而计算出参数 $a = -\frac{\lambda_{\max}(Q_1)}{\lambda_{\max}(P_2)\gamma} = 0.0021$, $b = \frac{\lambda_{\max}(Q_2)}{\lambda_{\min}(P_1)} = 3.9979$. 设置外部扰动为

$$d_i = \varepsilon_i t + \nu_i e^{x_{it}} \sin t + \nu_i, \quad i = 1, 2, 3, 4.$$

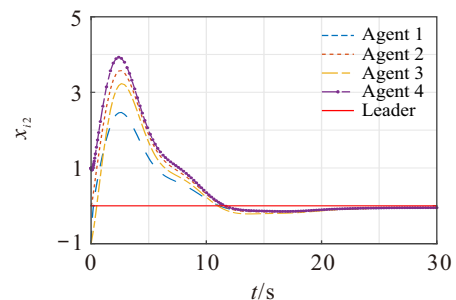
扰动参数 $\varepsilon = [0.001, -0.001, 0.002, 0.001]^T$, $\nu = [1, 1.5, 2, 2.5]^T$, $\chi = [-0.3, -0.3, -0.5, -0.3]^T$, $\nu = [1, 2, -1, 5]^T$, 参数 $\varpi = 0.05$, $k_1 = 0.04$ 和 $k_2 = 0.01$, 并且设每个智能体的初始信息为

$$x_0(0) = [2, 0]^T, \quad x_1(0) = [2, -1]^T, \quad x_2(0) = [0, 0]^T, \quad x_3(0) = [4, -1]^T, \quad x_4(0) = [0, 1]^T.$$

图 3 展示了在文献 [19] 研究基础上, 未采用扩张状态观测器且存在外部扰动时, 非线性多智能体系统在非周期间歇通信条件下的状态跟随情况. 由于系统自身的非线性特性与外部扰动的耦合作用, 使系统呈现出复杂的非线性动态行为, 传统基于线性化假设的控制方法难以有效抑制扰动并补偿非线性特性带来的影响. 在此工况下, 跟随者智能体无法实时跟踪领导者智能体的状态轨迹, 导致多智能体系统的协同控制目标难以实现.



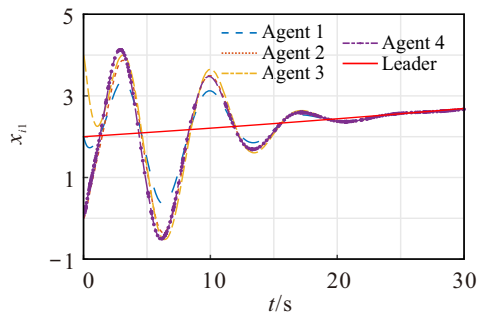
(a) 位置跟随情况



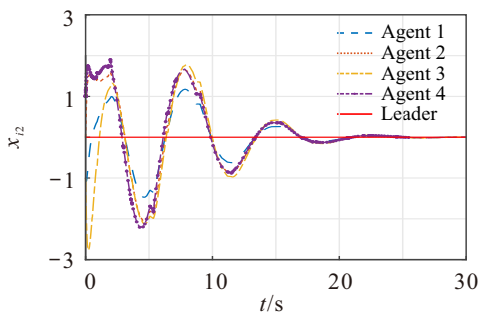
(b) 速度跟随情况

图3 无 ESO 的系统状态跟随情况

图4展示了采用改进扩张状态观测器后,多智能体系统的状态跟随情况. 仿真结果表明,该方法能够有效抑制外部扰动,并克服系统非线性特性的影响,显著提升了跟随者对领导者状态的跟踪精度. 图5呈现了智能体1~智能体4的扰动实际值与扰动估计值之间的误差情况. 在采用扩张状态观测器及相应控制策略后,系统能在较短时间内使扰动误差收敛至有界区域. 这种快速收敛特性表明,所设计的方法具备良好的抗扰动能力和快速响应性能,适用于复杂环境下多智能体的一致性跟踪任务.



(a) 位置跟随情况



(b) 速度跟随情况

图4 有 ESO 的系统状态跟随情况

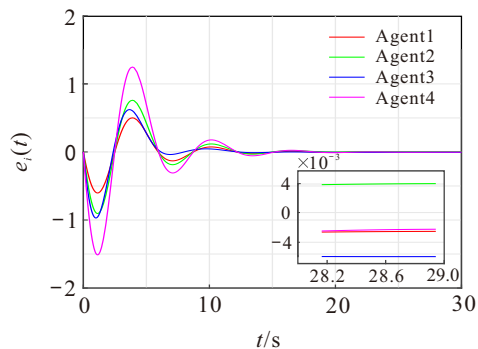


图5 扰动观测误差

5 结论

本文通过引入改进的扩展状态观测器,有效补偿了系统中的未知外部扰动. 进一步地,通过提出一种非周期性间歇通信协议,实现了非线性多智能体系统中领导者与跟随者之间的一致性控制. 理论分析表明,在无需精确扰动模型的情况下,系统误差能够收敛到一个有界区域. 数值仿真验证了所提出方

法的有效性. 所提出的方法可以推广到有向图和多个领导者情形.

参考文献 (References)

- [1] Wang J N, Zhou Z Y, Wang C Y, et al. Cascade structure predictive observer design for consensus control with applications to UAVs formation flying[J]. *Automatica*, 2020, 121: 109200.
- [2] Zou W C, Shi P, Xiang Z R, et al. Consensus tracking control of switched stochastic nonlinear multiagent systems via event-triggered strategy[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2020, 31(3): 1036-1045.
- [3] Guo B Z, Wu Z H, Zhou H C. Active disturbance rejection control approach to output-feedback stabilization of a class of uncertain nonlinear systems subject to stochastic disturbance[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2016, 61(6): 1613-1618.
- [4] Chen T T, Wang F Y, Xia C Y, et al. Leader-following consensus of second-order multi-agent systems with intermittent communication via persistent-hold control[J]. *Neurocomputing*, 2022, 471: 183-193.
- [5] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. *控制与决策*, 1998, 13(1): 19-23.
(Han J Q. Auto disturbance rejection controller and its applications[J]. *Control and Decision*, 1998, 13(1): 19-23.)
- [6] 杨明, 董晨, 王松艳, 等. 基于有限时间输出反馈的线性扩张状态观测器[J]. *自动化学报*, 2015, 41(1): 59-66.
(Yang M, Dong C, Wang S Y, et al. Linear extended state observer based on finite-time output feedback[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(1): 59-66.)
- [7] 刘晨, 董朝阳, 王青, 等. 基于扩张状态观测器的动态抗饱和补偿器设计方法[J]. *控制与决策*, 2018, 33(11): 2087-2093.
(Liu C, Dong C Y, Wang Q, et al. Dynamic anti-windup compensator design based on ESOs[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(11): 2087-2093.)
- [8] Wu X, Liu K X, Bai Y Q, et al. Towards event-triggered extended state observer for multi-agent systems[J]. *Neurocomputing*, 2020, 386: 191-197.
- [9] 刘俊, 谭锦浩, 蒲明, 等. 一种新型三阶固定时间收敛滑模非线性扩张状态观测器[J]. *控制与决策*, 2024, 39(12): 3910-3918.
(Liu J, Tan J H, Pu M, et al. Novel third-order fixed-time convergent nonlinear extended state observer based on sliding mode control method[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(12): 3910-3918.)
- [10] 沙磊, 王树波, 刘逸坚. 基于扩张状态观测器的二质量系统非奇异快速终端滑模控制[J]. *控制与决策*, 2023, 38(3): 850-856.
(Sha L, Wang S B, Liu Y J. Nonsingular fast terminal sliding mode control based on extended state observer for two mass systems[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(3): 850-856.)

- [11] Cao W J, Zhang J H, Ren W. Leader–follower consensus of linear multi-agent systems with unknown external disturbances[J]. *Systems & Control Letters*, 2015, 82: 64-70.
- [12] Wang C, Zuo Z, Qi Z, et al. Predictor-based extended-state-observer design for consensus of MASs with delays and disturbances[J]. *IEEE Trans Cybern*, 2019, 49(4): 1259-1269.
- [13] Jiang W, Charalambous T. Distributed consensus tracking of multi-agent systems with time-varying input/output delays and mismatched disturbances[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2021, 54(9): 787-794.
- [14] Huang N, Duan Z S, Zhao Y. Leader-following consensus of second-order non-linear multi-agent systems with directed intermittent communication[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2014, 8(10): 782-795.
- [15] Su H S, Jia G, Chen M Z Q. Semi-global containment control of multi-agent systems with intermittent input saturation[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2015, 352(9): 3504-3525.
- [16] Li H J. Leader-following consensus of nonlinear multi-agent systems with mixed delays and uncertain parameters via adaptive pinning intermittent control[J]. *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, 2016, 22: 202-214.
- [17] Xu C J, Xu H C, Su H S, et al. Disturbance-observer based consensus of linear multi-agent systems with exogenous disturbance under intermittent communication[J]. *Neurocomputing*, 2020, 404: 26-33.
- [18] Yu R L, He P, Li H, et al. Consensus of multiagent systems with intermittent communication *via* extended state observer[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2023, 70(1): 231-235.
- [19] Fan Z P, Su H S, Chen S M, et al. Semi-global leader-following coordination of multi-agent systems with input saturation and aperiodic intermittent communications[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2019, 356(2): 1051-1066.
- [20] Huo Y W, Lv Y Z, Wu X, et al. Fully distributed consensus for general linear multi-agent systems with unknown external disturbances[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2019, 13(16): 2595-2609.
- [21] Yu J L, Dong X W, Li Q D, et al. Practical time-varying formation tracking for high-order nonlinear multi-agent systems based on the distributed extended state observer[J]. *International Journal of Control*, 2019, 92(10): 2451-2462.
- [22] Ni W, Cheng D Z. Leader-following consensus of multi-agent systems under fixed and switching topologies[J]. *Systems & Control Letters*, 2010, 59(3/4): 209-217.

作者简介

任微 (2001–), 女, 硕士生, 主要研究方向为多智能体系统, E-mail: renwei66624@163.com;

禹梅 (1975–), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为多智能体系统、网络控制系统, E-mail: meiyu@ncepu.edu.cn.