

本文引用格式: 翁一航,林若波,廖兴展,等.基于指数衰减事件触发的有向线性多智能体系统鲁棒 H_∞ 一致性控制[J].自动化与信息工程,2026,47(2):26-33.

WENG Yihang, LIN Ruobo, LIAO Xingzhan, et al. Robust H_∞ consensus control for directed linear multi-agent systems based on exponential decay event-triggering[J]. Automation & Information Engineering, 2026,47(2):26-33.

基于指数衰减事件触发的有向线性多智能体系统 鲁棒 H_∞ 一致性控制*

翁一航 林若波 廖兴展 杨小佳

(揭阳职业技术学院, 广东 揭阳 522000)

摘要: 针对有向图导致的通信拓扑矩阵不对称问题, 提出一种指数衰减事件触发控制算法, 确保在有向图且存在外部干扰与建模不精确的情况下, 线性多智能体系统仍能达成鲁棒 H_∞ 一致性控制。通过引入有向图的控制输出和代数连通度等概念, 将线性多智能体系统一致性控制问题转化为线性闭环系统的稳定性问题进行分析; 通过引入指数衰减变量以及事件间隔中邻居智能体的相对状态, 设计一种指数衰减事件触发控制算法; 推导出的线性矩阵不等式充分条件, 严格确立了鲁棒 H_∞ 一致性控制达成; 对线性矩阵不等式解耦, 排除通信拓扑的影响, 降低计算复杂度; 通过求解解耦后的线性矩阵不等式, 得到指数衰减事件触发控制算法参数。仿真算例验证了该算法的有效性。

关键词: 指数衰减事件触发; 有向线性多智能体系统; 鲁棒 H_∞ 一致性; 线性矩阵不等式

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1674-2605(2026)02-0004-08

DOI: 10.12475/aie.20260204

开放获取

Robust H_∞ Consensus Control for Directed Linear Multi-agent Systems Based on Exponential Decay Event-triggering

WENG Yihang LIN Ruobo LIAO Xingzhan YANG Xiaojia

(Jieyang Polytechnic, Jieyang 522000, China)

Abstract: To address the issue of asymmetric communication topology matrices caused by directed graphs, an exponential decay event-triggered control algorithm is proposed. This algorithm ensures that linear multi-agent systems can achieve robust H_∞ consensus control in the presence of external disturbances and modeling inaccuracies under directed graphs. By introducing concepts such as control output and algebraic connectivity of directed graphs, the consensus control problem of linear multi-agent systems is transformed into a stability analysis problem of a linear closed-loop system. An exponential decay event-triggered control algorithm is designed by incorporating an exponential decay variable and the relative states of neighboring agents during event intervals. Sufficient conditions derived in terms of linear matrix inequalities (LMIs) rigorously establish the achievement of robust H_∞ consensus control. The LMIs are decoupled to eliminate the influence of communication topology and reduce computational complexity. By solving the decoupled LMIs, the parameters of the exponential decay event-triggered control algorithm are obtained. Simulation examples verify the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: exponential decay event-triggering; directed linear multi-agent systems; robust H_∞ consensus; linear matrix inequality

0 引言

多智能体系统是指由多个自治或半自治的智能

体, 通过交互与合作共同完成复杂任务的分布式计算系统。该系统通常运行在复杂环境中, 外部干扰对其

动态行为影响较大,且物理测量精度不足、传感器误差也会引入模型不确定性。多智能体系统一致性控制在仅依赖邻居智能体交互的分布式架构下,通过协同动力学可使多个智能体自主呈现全局一致的集体行为。因此,鲁棒性能约束下的多智能体系统一致性控制受到学术界广泛关注^[1]。文献[2]采用解耦方法分析外部干扰下动态耦合系统的鲁棒控制问题,通过将大规模系统分解为低维子系统,为分布式解耦控制提供有效思路,但该方法未讨论通信拓扑为有向图的情形。文献[3]针对连续和离散的时间场景,研究参数不确定模型异构多智能体系统的二次稳定性,通过分布式状态反馈控制算法,确保系统在参数摄动下的稳定性,但该方法未引入量化外部干扰抑制效果的鲁棒性能指标。文献[4]基于事件触发采样方法,研究外部干扰下模型不确定线性多智能体系统的鲁棒一致性控制,降低了通信负担,但其通信拓扑仅限于无向图,且鲁棒性能分析依赖拉普拉斯矩阵的对称特性。文献[5]为每个智能体设计观测器,在事件触发时刻利用局部观测的相对状态,实现基于输出反馈的一致性控制,在保证鲁棒性能的同时避免了芝诺行为(在一定时间内发生无限次事件)。文献[6]在有限网络带宽下,研究非线性多智能体系统的自适应鲁棒跟踪控制,解决了建模不精确与外部干扰复合作用下的不确定性问题。文献[7]研究外部干扰下有向多航天器系统的同步难题,通过性能可调的事件触发机制实现姿态同步,但未对线性多智能体系统的 H_∞ 一致性控制进行理论泛化与推广。文献[8]在模糊容错分布式协同控制策略中引入性能控制函数,实现非线性多智能体系统在限定时间内的鲁棒一致性跟踪。文献[9]针对模型不确定多智能体系统提出鲁棒一致性控制方法,增强了系统对参数摄动的适应性。文献[10]研究不确定分数阶非线性多智能体系统的鲁棒一致性控制问题,拓展了分数阶理论在分布式控制中的应用。文献[11]基于神经网络设计了非线性多智能体系统的自适应脉冲控制策略,提高了系统应对非线性扰动的能力。文献[12]探索基于大型语言模型的异构多智能体系统,为智能体间的语义交互与协同提供新思路。虽然上述研究推动

了鲁棒一致性控制理论的发展,但大多假设每个智能体都可以连续接收邻居智能体的状态信息。然而,在实际应用中,受限于车载系统的能源与多智能体系统的通信带宽,连续通信难以实现。

为减少通信开销,文献[13]提出基于事件触发的通信机制,可有效降低能耗。该机制引入多智能体系统的控制,触发条件通常设置为:当测量误差超过预设阈值时,邻居智能体进行通信并更新控制算法,从而使系统在保持一致性的同时,减少智能体间的通信频率,延长系统运行寿命。然而,事件触发控制会出现芝诺行为。为此,文献[14]引入衰减阈值机制,确保事件间存在最小时间间隔,以排除芝诺行为。文献[15]提出动态事件触发概念。文献[16]将动态事件触发机制应用于有向线性多智能体系统一致性控制,通过引入内部动态变量,避免对系统状态的连续监测,从而降低通信频率。文献[17-19]对基于观测器的预测控制、非线性系统的自适应控制以及动态事件触发机制进行深入研究,进一步推动了事件触发控制的发展。然而,上述研究多侧重于理想条件下的系统稳态性能,对外部干扰和模型不确定性下的多智能体系统鲁棒 H_∞ 性能约束考虑不足;且通信拓扑常限于无向图,其稳定性分析依赖于拉普拉斯矩阵的对称性或零特征值,难以推广至有向图场景。

受文献[14,16]启发,本文针对有向线性多智能体系统,提出一种指数衰减事件触发控制算法,即在事件触发机制中引入一个指数衰减变量以排除芝诺行为,从而实现鲁棒 H_∞ 一致性控制。该算法利用邻居智能体在指数衰减事件触发时的相对状态,避免智能体间的持续通信;通过引入强连通图的代数连通度,解决有向线性多智能体系统因拉普拉斯矩阵不对称导致的通信受阻问题;通过一致性误差函数,将多智能体系统一致性控制问题转化为拓扑解耦的子系统稳定性分析问题;通过理论推导得到实现鲁棒 H_∞ 一致性控制的充分条件(以线性矩阵不等式形式表示);通过解耦处理降低计算复杂度,求解解耦后的线性矩阵不等式,得到指数衰减事件触发控制算法参数,从而实现有向线性多智能体系统的鲁棒 H_∞ 一致性控制。

1 相关内容

1.1 预备知识

本文利用有向图 $G = (\mathbf{V}, \mathbf{E}, \mathbf{A})$ 描述多智能体系统的通信网络。其中， $\mathbf{V} = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 为节点集， $\mathbf{E} \subseteq \mathbf{V} \times \mathbf{V}$ 为边集， $\mathbf{A} = \{a_{ij}\}_{n \times n}$ 为邻居矩阵。从智能体 j 到智能体 i 的有向边表示为 $(i, j) \in \mathbf{E}$ 。若智能体 j 到智能体 i 存在有向边，则智能体 j 被称为智能体 i 的内邻智能体， $a_{ij} = 1$ ；否则，智能体 j 被称为智能体 i 的外邻智能体， $a_{ij} = 0$ 。智能体 i 的所有内邻智能体集合记为 $\mathbf{I}_i = \{j \in \mathbf{V} \mid (i, j) \in \mathbf{E}\}$ ，智能体 i 的所有外邻智能体集合记为 $\mathbf{O}_i = \{j \in \mathbf{V} \mid (j, i) \in \mathbf{E}\}$ 。定义度矩阵为 $\mathbf{D} = \text{diag}[d_1, d_2, \dots, d_n]$ ，其中 $d_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}$ ，那么有向图的拉普拉斯矩阵为 $\mathbf{L} = \mathbf{D} - \mathbf{A}$ 。若有向图中任意两个智能体之间均存在双向通信路径，则称该有向图为强连通图。

1.2 系统建模

由 n 个智能体组成的线性多智能体系统描述为^[1]

$$\dot{\mathbf{v}}_i(t) = \mathbf{F}\mathbf{v}_i(t) + \mathbf{G}\mathbf{u}_i(t) + \mathbf{H}\boldsymbol{\omega}_i(t) \quad (1)$$

式中： $\mathbf{v}_i(t) \in \mathbb{R}^N$ 、 $\mathbf{u}_i(t) \in \mathbb{R}^{N_u}$ 、 $\boldsymbol{\omega}_i(t) \in \mathbb{R}^{N_w}$ 分别为智能体 i 的状态、控制器、外部干扰，且 $\boldsymbol{\omega}_i(t) \in L_2[0, \infty)$ 是范数有界的， N 为状态 $\mathbf{v}_i(t)$ 的维数； $\mathbf{F}$ 、 $\mathbf{G}$ 、 $\mathbf{H}$ 为常数矩阵。

假设 1 ($\mathbf{F}$, $\mathbf{G}$) 是可镇定的。

假设 2 本文用于描述多智能体系统的有向图是强连通图。

引理 1 根据假设 2，存在一个向量 $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i, \dots, \theta_n]^T$ ，使 $\boldsymbol{\theta}^T \mathbf{L} = 0$ ，其中 $0 < \theta_i \in \mathbb{R}$ 且满足 $\sum_{i=1}^n \theta_i = 1$ 。

此外，定义 $\mathbf{T} = \mathbf{I}_n - \mathbf{1}_n \boldsymbol{\theta}^T$ 、 $\boldsymbol{\Theta} = \text{diag}[\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i, \dots, \theta_n]$ ，那么有 $\mathbf{L}\mathbf{T} = \mathbf{T}\mathbf{L} = \mathbf{L}$ 、 $\mathbf{T}^T \boldsymbol{\theta} = 0$ ，且存在一个对称矩阵 $\bar{\mathbf{L}} = (\boldsymbol{\Theta} \mathbf{L} + \mathbf{L}^T \boldsymbol{\Theta}) / 2$ ，满足 $\sum_{j=1}^n \bar{L}_{ij} = \sum_{i=1}^n \bar{L}_{ij} = 0$ 。

2 结论推导

2.1 指数衰减事件触发控制算法设计

受文献[3]启发，构造受控输出函数（同时作为一致性误差函数）为

$$\mathbf{z}_i(t) = \mathbf{v}_i(t) - \sum_{j=1}^n \theta_j \mathbf{v}_j(t), i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

则线性多智能体系统（公式(1)）被重构为

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{v}}(t) &= (\mathbf{I}_n \otimes \mathbf{F})\mathbf{v}(t) + (\mathbf{I}_n \otimes \mathbf{G})\mathbf{u}(t) + (\mathbf{I}_n \otimes \mathbf{H})\boldsymbol{\omega}(t) \\ \mathbf{z}(t) &= (\mathbf{T} \otimes \mathbf{I}_N)\mathbf{v}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

式中： $\mathbf{v}(t) = [\mathbf{v}_1(t), \dots, \mathbf{v}_n(t)]_{\text{stack}}$ 与 $\mathbf{u}(t)$ 、 $\boldsymbol{\omega}(t)$ 、 $\mathbf{z}(t)$ 具有相似定义。

如果智能体 i 和其余所有智能体的状态误差均为 0（见公式(4)），则称线性多智能体系统实现了一致性控制^[1]。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{v}_i(t) - \mathbf{v}_j(t)\| = 0, \forall i \neq j \quad (4)$$

结合公式(2)的定义，公式(5)可保证公式(4)成立。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{z}_i(t)\| = 0, i = 1, \dots, n \quad (5)$$

那么线性多智能体系统一致性控制问题便转为证明公式(5)成立。

定义 t_{ζ}^i ($\zeta = 1, 2, \dots$) 为智能体 i 的事件触发时刻，此时智能体 i 的最新状态会传播到外邻智能体。若没有事件触发，则智能体 i 继续沿用上一个事件触发时刻的状态。智能体 i 的测量误差为其在事件触发时刻的状态与当前状态的差值：

$$\mathbf{e}_i(t) = \mathbf{v}_i(t_{\zeta}^i) - \mathbf{v}_i(t), t \in [t_{\zeta}^i, t_{\zeta+1}^i) \quad (6)$$

控制器构造为

$$\mathbf{u}_i(t) = -\mathbf{J}\mathbf{K} \sum_{j=1}^n a_{ij} (\mathbf{v}_i(t_{\zeta}^i) - \mathbf{v}_j(t_{\zeta'}^j)), t \in [t_{\zeta}^i, t_{\zeta+1}^i) \quad (7)$$

式中： $0 < J \in \mathbb{R}$ 为耦合强度，增益矩阵 $\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{N_u \times N}$ 将在后续计算中给出。

定义 $\zeta'(t) = \arg \min_{i \in \mathbb{N}: t \geq t_{\zeta}^i} \{t - t_{\zeta}^i\}$ ，其中 $t_{\zeta'}^j$ 为智能体 j 在时间区间 $t \in [t_{\zeta'}^j, t_{\zeta'+1}^j)$ 的最新事件触发时刻，且满足 $\mathbf{e}_j(t) = \mathbf{v}_j(t_{\zeta'}^j) - \mathbf{v}_j(t)$ 。因此，有 $\mathbf{u}(t) = -(\mathbf{J}\mathbf{L} \otimes \mathbf{K})$

$(\mathbf{v}(t) + \mathbf{e}(t))$ ，其中 $\mathbf{e}(t) = [e_1(t), \dots, e_n(t)]_{\text{stack}}$ 。因此，控制器（公式(7)）取值于智能体 i 及其外邻智能体最新事件触发时刻的状态。

指数衰减事件触发控制算法根据邻居智能体的相对状态和自身测量误差来决定控制器是否更新。控制器更新触发条件为

$$\phi \|\mathbf{w}_i(t)\|^2 + \zeta_i e^{-\xi_i t} \leq \|\mathbf{e}_i(t)\|^2, t \in [t_{\zeta_i}^i, t_{\zeta_i+1}^i) \quad (8)$$

式中： $0 < \phi_i, \zeta_i, \xi_i \in \mathbb{R}$ 为需要确定的参数； $\zeta_i e^{-\xi_i t}$ 为指数衰减变量，用于确保公式(8)的左边始终大于 0，从而排除芝诺行为；在每个事件被触发后， $\mathbf{e}_i(t)$ 复位为 0。

为避免智能体间连续通信， $\mathbf{w}_i(t)$ 被构造为

$$\mathbf{w}_i(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij} (\mathbf{v}_i(t_{\zeta_i}^i) - \mathbf{v}_j(t_{\zeta_j}^j)) \quad (9)$$

$\mathbf{w}(t) = (\mathbf{L} \otimes \mathbf{I}_N)(\mathbf{v}(t) + \mathbf{e}(t))$ ，其中 $\mathbf{w}(t) = [\mathbf{w}_1(t), \dots, \mathbf{w}_n(t)]_{\text{stack}}$ 。

综上所述，指数衰减事件触发控制算法描述为：当测量误差满足公式(8)的触发条件时，智能体 i 将其最新状态传播给外邻智能体，并更新控制器，从而及时干预智能体状态；当指数衰减事件没有触发时，智能体 i 继续沿用上一个事件触发时刻的状态。

2.2 问题重构

将公式(7)代入公式(3)，得到线性闭环系统为

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{v}}(t) &= (\mathbf{I}_n \otimes \mathbf{F} - \mathbf{JL} \otimes \mathbf{GK})\mathbf{v}(t) - (\mathbf{JL} \otimes \mathbf{GK})\mathbf{e}(t) + \\ &\quad (\mathbf{I}_n \otimes \mathbf{H})\boldsymbol{\omega}(t) \\ \mathbf{z}(t) &= (\mathbf{T} \otimes \mathbf{I}_N)\mathbf{v}(t) \end{aligned} \quad (10)$$

根据公式(10)，并结合引理 1，可推出一致性误差函数闭环系统为

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{z}}(t) &= (\mathbf{I}_n \otimes \mathbf{F} - \mathbf{JL} \otimes \mathbf{GK})\mathbf{z}(t) - (\mathbf{JL} \otimes \mathbf{GK})\mathbf{e}(t) + \\ &\quad (\mathbf{T} \otimes \mathbf{H})\boldsymbol{\omega}(t) \\ &\triangleq \tilde{\mathbf{F}}\mathbf{z}(t) + \tilde{\mathbf{G}}\mathbf{e}(t) + \tilde{\mathbf{H}}\boldsymbol{\omega}(t) \end{aligned} \quad (11)$$

式中： $\tilde{\mathbf{F}} = \mathbf{I}_n \otimes \mathbf{F} - \mathbf{JL} \otimes \mathbf{GK}$ 、 $\tilde{\mathbf{G}} = -\mathbf{JL} \otimes \mathbf{GK}$ 、 $\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{T} \otimes \mathbf{H}$ 。

随着 $t \rightarrow \infty$ ，如果 $\mathbf{z}(t)$ 收敛到 0，则公式(5)成立，表明线性多智能体系统实现一致性控制，即线性多智能体系统一致性控制问题转为一致性误差函数闭环

系统的稳定性分析。

引理 2 根据公式(8)，建立以下不等式

$$\|\mathbf{e}(t)\|^2 \leq \frac{2\phi_M}{\varpi} \mathbf{z}^T(t) \tilde{\mathbf{L}}\mathbf{z}(t) + \frac{n\zeta_M}{\varpi} e^{-\xi_M t} \quad (12)$$

式中： $\tilde{\mathbf{L}} = \mathbf{L}^T \mathbf{L} \otimes \mathbf{I}_N$ ， $\varpi = 1 - 2\phi_M \lambda_M(\mathbf{L}^T \mathbf{L}) > 0$ ， $\phi_M = \max_i \phi_i$ ， $\zeta_M = \max_i \zeta_i$ 。

证明：根据公式(8)，可推出 $\sum_{i=1}^n \|\mathbf{e}_i(t)\|^2 \leq \sum_{i=1}^n \phi_i \|\mathbf{w}_i(t)\|^2 + \sum_{i=1}^n \zeta_i e^{-\xi_i t}$ ，且有 $\|\mathbf{e}(t)\|^2 \leq \phi_M \|\mathbf{w}(t)\|^2 + n\zeta_M e^{-\xi_M t} \leq 2\phi_M \mathbf{z}^T(t) \tilde{\mathbf{L}}\mathbf{z}(t) + 2\phi_M \lambda_M(\mathbf{L}^T \mathbf{GK}) \|\mathbf{e}(t)\|^2 + n\zeta_M e^{-\xi_M t}$ ，其中， $\tilde{\mathbf{L}} = \mathbf{L}^T \mathbf{L} \otimes \mathbf{I}_N$ 。当 $1 - 2\phi_M \lambda_M(\mathbf{L}^T \mathbf{L}) > 0$ ，即 $\phi_M < 1/(2\lambda_M(\mathbf{L}^T \mathbf{L}))$ ，合并同类项后，可推导出不等式(12)。

引理 3^[16] 根据假设 2，存在

$$\lambda_s = \min_{\mathbf{v}^T \boldsymbol{\theta} = 0, \mathbf{v} \neq 0} \frac{\mathbf{v}^T \bar{\mathbf{L}} \mathbf{v}}{\mathbf{v}^T \boldsymbol{\Theta} \mathbf{v}} > 0 \quad (13)$$

在强连通图中， λ_s 表示代数连通度。对于无向图， λ_s 相当于其拉普拉斯矩阵的最小非零特征值。

引理 4 设 $\hat{\mathbf{W}} = \boldsymbol{\Theta} \otimes \mathbf{W}$ ， $\mathbf{K} = \mathbf{G}^T \mathbf{W}$ ，且 $\mathbf{W} \in \mathbb{R}^{N \times N}$ 是一个正定矩阵。根据公式(11)，可建立不等式

$$\mathbf{z}^T(t)(\hat{\mathbf{W}} + \tilde{\mathbf{F}}^T \hat{\mathbf{W}})\mathbf{z}(t) \leq \mathbf{z}^T(t) \boldsymbol{\Psi} \mathbf{z}(t) \quad (14)$$

式中： $\boldsymbol{\Psi} = \boldsymbol{\Theta} \otimes (\mathbf{W}\mathbf{F} + \mathbf{F}^T \mathbf{W}) - 2J\lambda_s \boldsymbol{\Theta} \otimes \mathbf{W}\mathbf{G}\mathbf{G}^T \mathbf{W}$ ， $\tilde{\mathbf{F}} = \mathbf{I}_n \otimes \mathbf{F} - \mathbf{JL} \otimes \mathbf{G}\mathbf{G}^T \mathbf{W}$ 。

证明：因为 $\mathbf{z}^T(t)(\boldsymbol{\theta} \otimes \mathbf{I}_N) = \mathbf{v}^T(t)(\mathbf{T}^T \boldsymbol{\theta} \otimes \mathbf{I}_N) = 0$ ，根据引理 3 可推导出公式(14)，具体步骤如下：

$$\begin{aligned} &\mathbf{z}^T(t)(\hat{\mathbf{W}}\tilde{\mathbf{F}} + \tilde{\mathbf{F}}^T \hat{\mathbf{W}})\mathbf{z}(t) \\ &= \mathbf{z}^T(t) \left[\boldsymbol{\Theta} \otimes (\mathbf{W}\mathbf{F} + \mathbf{F}^T \mathbf{W}) - 2J\bar{\mathbf{L}} \otimes \mathbf{W}\mathbf{G}\mathbf{G}^T \mathbf{W} \right] \mathbf{z}(t) \\ &\leq \mathbf{z}^T(t) \left[\boldsymbol{\Theta} \otimes (\mathbf{W}\mathbf{F} + \mathbf{F}^T \mathbf{W}) - 2J\lambda_s \boldsymbol{\Theta} \otimes \mathbf{W}\mathbf{G}\mathbf{G}^T \mathbf{W} \right] \mathbf{z}(t) \\ &\triangleq \mathbf{z}^T(t) \boldsymbol{\Psi} \mathbf{z}(t) \end{aligned} \quad (15)$$

2.3 一致性分析

2.3.1 一致性控制

引理 5 根据假设 1、假设 2，设 $\mu > 0$ 为鲁棒性能指标， $0 < \xi_m \leq \frac{n\zeta_M}{\chi \varepsilon \varpi}$ 为参数。如果存在 $\hat{\mathbf{W}} = \boldsymbol{\Theta} \otimes \mathbf{W}$ 且

$\hat{\mathbf{W}}$ 和 $\mathbf{W} \in \mathbb{R}^{N \times N}$ 均为正定矩阵，参数 $\varepsilon > 0$ ， $0 < \phi_M < 1/(2\lambda_M(\mathbf{L}^T \mathbf{L}))$ ，满足线性矩阵不等式（公式

(16)), 那么线性多智能体系统在指数衰减事件触发控制算法(公式(7)、(8))的调节下实现鲁棒 H_∞ 一致性控制。

$$\begin{bmatrix} \hat{\Omega} & \hat{W}\tilde{G} & \hat{W}\tilde{H} \\ \tilde{G}^T\hat{W} & -\varepsilon^{-1}I_{nN} & 0 \\ \tilde{H}^T\hat{W} & 0 & -I_{nN} \end{bmatrix} < 0, \quad (16)$$

式中: $\hat{\Omega} = \Psi + \frac{2\phi_M}{\varepsilon\varpi}\tilde{L} + \frac{1}{\mu^2}I_{nN}$ 。

证明: 在没有外部干扰下 ($\omega(t)=0$), 分析一致性误差函数闭环系统的稳定性。构造李雅普诺夫函数 $V(t) = z^T(t)\hat{W}z(t) + \chi e^{-\xi_m t}$, ($\hat{W} = \Theta \otimes W$, $0 < \chi \in \mathbb{R}$), 显然 $V(t) > 0$ 。借助公式(14)以及参数 $0 < \varepsilon \in \mathbb{R}$, 对 $V(t)$ 求导, 有

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= z^T(t)(\hat{W}\tilde{F} + \tilde{F}^T\hat{W})z(t) + 2z^T(t)\hat{W}\tilde{G}e(t) - \chi\xi_m e^{-\xi_m t} \\ &\leq z^T(t)(\Psi + \varepsilon\hat{W}\tilde{G}\tilde{G}^T\hat{W})z(t) + \frac{1}{\varepsilon}\|e(t)\|^2 - \chi\xi_m e^{-\xi_m t} \\ &\leq z^T(t)(\Psi + \varepsilon\hat{W}\tilde{G}\tilde{G}^T\hat{W} + \frac{2\phi_M}{\varepsilon\varpi}\tilde{L})z(t) + \delta e^{-\xi_m t} \\ &\triangleq z^T(t)\Omega z(t) + \delta e^{-\xi_m t} \end{aligned} \quad (17)$$

式中: $\Omega = \Psi + \varepsilon\hat{W}\tilde{G}\tilde{G}^T\hat{W} + \frac{2\phi_M}{\varepsilon\varpi}\tilde{L}$, $0 < \xi_m \leq \frac{n\zeta_M}{\chi\varepsilon\varpi}$,

$$\delta = \frac{n\zeta_M}{\varepsilon\varpi} - \chi\xi_m \leq 0。$$

公式(17)最后的不等号处引用了公式(12)。借助舒尔补引理, 线性矩阵不等式可改写为 $\hat{\Omega} + \varepsilon\hat{W}\tilde{G}\tilde{G}^T\hat{W} + \hat{W}\tilde{H}\tilde{H}^T\hat{W} < 0$, 等价于 $\Omega + \hat{W}\tilde{H}\tilde{H}^T\hat{W} + \mu^{-2}I_{nN} < 0$ 。由于 $\hat{W}\tilde{H}\tilde{H}^T\hat{W} \geq 0$ 、 $\mu^{-2}I_{nN} > 0$, 可验证 $\Omega < 0$ 。因此, 引理 5 可同时保证 $\Omega < 0$ 、 $\delta \leq 0$ 、 $0 < \phi_M < 1/(2\lambda_M(L^T L))$, 可得 $\dot{V}(t) < 0$, 表明一致性误差函数闭环系统渐近稳定, 即线性多智能体系统实现了一致性控制。

2.3.2 鲁棒性能

在非零初始条件下, 若公式(18)成立

$$\|T_{z\omega}(s)\|_\infty = \sup_{v \in \mathbb{R}} \bar{\sigma}(T_{z\omega}(jv)) = \sup_{0 \neq \omega(t) \in L_2[0, \infty)} \frac{\|z(t)\|_2}{\|\omega(t)\|_2} < \mu \quad (18)$$

或者其对应的线性闭环系统满足公式(19), 则称线性多智能体系统满足期望的鲁棒 H_∞ 性能^[4]。

$$\mu^{-2} \int_0^\infty \|z(t)\|^2 dt < \int_0^\infty \|\omega(t)\|^2 dt, \forall \omega \in L_2[0, \infty) \quad (19)$$

在零初始条件下, 线性闭环系统定义为

$$J_\tau = \mu^{-2} \int_0^\tau \|z(t)\|^2 dt - \int_0^\tau \|\omega(t)\|^2 dt \quad (\tau > 0), \text{ 则有}$$

$$\begin{aligned} J_\tau &= \int_0^\tau \left[\mu^{-2} \|z(t)\|^2 - \|\omega(t)\|^2 + \dot{V}(t) \right] dt - V(\tau) \leq \\ &\int_0^\tau \left[z^T(t)(\Psi + \mu^{-2}I_{nN})z(t) + 2z^T(t)\hat{W}(\tilde{G}e(t) + \tilde{H}\omega(t)) + \varepsilon^{-1}\|e(t)\|^2 - \varepsilon^{-1}\|\omega(t)\|^2 - \chi\xi_m e^{-\xi_m t} \right] dt - V(\tau) = \\ &\int_0^\tau \begin{bmatrix} z(t) \\ e(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \hat{\Omega} & \hat{W}\tilde{G} & \hat{W}\tilde{H} \\ \tilde{G}^T\hat{W} & -\varepsilon^{-1}I_{nN} & 0 \\ \tilde{H}^T\hat{W} & 0 & I_{nN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z(t) \\ e(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} dt + \int_0^\tau (\delta e^{-\xi_m t}) dt - V(\tau) \end{aligned} \quad (20)$$

由于引理 5 同时保证了线性矩阵不等式成立与 $\delta \leq 0$, 结合公式(20), 可得 $J_\tau + V(\tau) < 0$, 根据 $J_\tau = \mu^{-2} \int_0^\tau \|z(t)\|^2 dt - \int_0^\tau \|\omega(t)\|^2 dt$, 则有 $\mu^{-2} \int_0^\tau \|z(t)\|^2 dt - \int_0^\tau \|\omega(t)\|^2 dt + V(\tau) < 0$ 。引理 5 保证了 $\dot{V}(t) < 0$, 可得 $\lim_{\tau \rightarrow \infty} V(\tau) = 0$ 。随着 $\tau \rightarrow \infty$, $\int_0^\infty \|z(t)\|^2 dt < \mu^2 \int_0^\infty \|\omega(t)\|^2 dt$ 成立, 满足公式(19), 表明线性多智能体系统满足期望的鲁棒性能。

2.3.3 鲁棒 H_∞ 一致性控制

对线性矩阵不等式进行解耦, 可得到实现线性多智能体系统鲁棒 H_∞ 一致性控制的充分条件, 并给出增益矩阵 K 的求解方法。

定理 1 根据假设 1、假设 2, 设鲁棒性能指标 $\mu > 0$ 、 $0 < \xi_m \leq \frac{n\zeta_M}{\chi\varepsilon\varpi}$ 为参数。如果存在正定矩阵 $V \in \mathbb{R}^{N \times N}$ 以及参数 $J > 0$ 、 $\varepsilon > 0$ 、 $\varpi > 0$ 、 $0 < \phi_M < 1/(2\lambda_M(L^T L))$, 且满足线性矩阵不等式(公式(21)), 对于 $\theta_i = \theta_M$ 、 $\theta_i = \theta_m$, 线性多智能体系统在指数衰减事件触发控制算法的调节下实现了鲁棒 H_∞ 一致性控制。

$$\Pi_i = \begin{bmatrix} \Gamma_{i11} & GG^T & H & V \\ * & \kappa^{-1}(I_N - 2V) & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma^{-1}I_N & 0 \\ * & * & * & -\varphi^{-1}I_N \end{bmatrix} < 0 \quad (21)$$

式中： $\tilde{\Gamma}_{i11} = \theta_i(\mathbf{F}\mathbf{V} + \mathbf{V}\mathbf{F}^T) - 2J\lambda_s\theta_m\mathbf{G}\mathbf{G}^T$, $\kappa = J^2$.

$\theta_m^2\varepsilon\lambda_m(\mathbf{L}\mathbf{L}^T)$, $\gamma = \theta_m^2\lambda_m(\mathbf{T}\mathbf{T}^T)$, $\varphi = 2\phi_m/\varepsilon\varpi \cdot \lambda_m(\mathbf{L}^T\mathbf{L}) + 1/\mu^2$.

由 $\mathbf{K} = \mathbf{G}^T\mathbf{V}^{-1}$ 可求解增益矩阵 $\mathbf{K}$.

证明：对线性矩阵不等式（公式(16)）应用舒尔补引理，得到 $\hat{\boldsymbol{\Omega}} + \varepsilon\hat{\mathbf{W}}\tilde{\mathbf{G}}\tilde{\mathbf{G}}^T\hat{\mathbf{W}} + \hat{\mathbf{W}}\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}^T\hat{\mathbf{W}} < 0$ ，且有

$$\hat{\boldsymbol{\Omega}} = \Psi + \frac{2\phi_m}{\varepsilon\varpi}\tilde{\mathbf{L}} + \frac{1}{\mu^2}\mathbf{I}_{nN} \leq \boldsymbol{\Theta} \otimes (\mathbf{W}\mathbf{F} + \mathbf{F}^T\mathbf{W}) -$$

$$2J\lambda_s\theta_m\mathbf{I}_n \otimes \mathbf{W}\mathbf{G}\mathbf{G}^T\mathbf{W} + \varphi\mathbf{I}_{nN} \triangleq \hat{\boldsymbol{\Xi}}$$

$$\varepsilon\hat{\mathbf{W}}\tilde{\mathbf{G}}\tilde{\mathbf{G}}^T\hat{\mathbf{W}} = J^2\varepsilon\boldsymbol{\Theta}\mathbf{L}\mathbf{L}^T\boldsymbol{\Theta} \otimes \mathbf{W}\mathbf{G}\mathbf{G}^T\mathbf{W}\mathbf{W}\mathbf{G}\mathbf{G}^T\mathbf{W} \leq \kappa\mathbf{I}_n \otimes \mathbf{W}\mathbf{G}\mathbf{G}^T\mathbf{W}\mathbf{W}\mathbf{G}\mathbf{G}^T\mathbf{W} \triangleq \bar{\boldsymbol{\Xi}}$$

$$\hat{\mathbf{W}}\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}^T\hat{\mathbf{W}} = \boldsymbol{\Theta}\mathbf{T}\mathbf{T}^T\boldsymbol{\Theta} \otimes \mathbf{W}\mathbf{H}\mathbf{H}^T\mathbf{W} \leq \gamma\mathbf{I}_n \otimes \mathbf{W}\mathbf{H}\mathbf{H}^T\mathbf{W} \triangleq \tilde{\boldsymbol{\Xi}}$$

$\hat{\boldsymbol{\Xi}} + \bar{\boldsymbol{\Xi}} + \tilde{\boldsymbol{\Xi}} < 0$ 保证 $\hat{\boldsymbol{\Omega}} + \varepsilon\hat{\mathbf{W}}\tilde{\mathbf{G}}\tilde{\mathbf{G}}^T\hat{\mathbf{W}} + \hat{\mathbf{W}}\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}^T\hat{\mathbf{W}} < 0$.

根据舒尔补引理， $\hat{\boldsymbol{\Xi}} + \bar{\boldsymbol{\Xi}} + \tilde{\boldsymbol{\Xi}} < 0$ 可重述为

$$\begin{bmatrix} \hat{\Gamma}_{11} & \hat{\Gamma}_{12} & \hat{\Gamma}_{13} & \mathbf{I}_{nN} \\ * & -\kappa^{-1}\mathbf{I}_{nN} & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma^{-1}\mathbf{I}_{nN} & 0 \\ * & * & * & -\varphi^{-1}\mathbf{I}_{nN} \end{bmatrix} < 0 \quad (22)$$

式中： $\hat{\Gamma}_{11} = \boldsymbol{\Theta} \otimes (\mathbf{W}\mathbf{F} + \mathbf{F}^T\mathbf{W}) - 2J\lambda_s\theta_m\mathbf{I}_n \otimes \mathbf{W}\mathbf{G}\mathbf{G}^T\mathbf{W}$, $\hat{\Gamma}_{12} = \mathbf{I}_n \otimes \mathbf{W}\mathbf{G}\mathbf{G}^T\mathbf{W}$, $\hat{\Gamma}_{13} = \mathbf{I}_n \otimes \mathbf{W}\mathbf{H}$.

根据块对角矩阵的特性，公式(22)可由公式(23)保证

$$\begin{bmatrix} \bar{\Gamma}_{i11} & \mathbf{W}\mathbf{G}\mathbf{G}^T\mathbf{W} & \mathbf{W}\mathbf{H} & \mathbf{I}_N \\ * & -\kappa^{-1}\mathbf{I}_N & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma^{-1}\mathbf{I}_N & 0 \\ * & * & * & -\varphi^{-1}\mathbf{I}_N \end{bmatrix} < 0 \quad (23)$$

式中： $\bar{\Gamma}_{i11} = \theta_i(\mathbf{W}\mathbf{F} + \mathbf{F}^T\mathbf{W}) - 2J\lambda_s\theta_m\mathbf{W}\mathbf{G}\mathbf{G}^T\mathbf{W}$, $i = 1, \dots, n$.

用 $\tilde{\mathbf{W}} = \text{diag}[\mathbf{W}^{-1}, \mathbf{W}^{-1}, \mathbf{I}_N, \mathbf{I}_N]$ 分别左乘、右乘公式(23)，有

$$\hat{\Pi}_i = \begin{bmatrix} \tilde{\Gamma}_{i11} & \mathbf{G}\mathbf{G}^T & \mathbf{H} & \mathbf{W}^{-1} \\ * & -\kappa^{-1}\mathbf{W}^{-1}\mathbf{W}^{-1} & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma^{-1}\mathbf{I}_N & 0 \\ * & * & * & -\varphi^{-1}\mathbf{I}_N \end{bmatrix} < 0 \quad (24)$$

式中： $\tilde{\Gamma}_{i11} = \theta_i(\mathbf{F}\mathbf{W}^{-1} + \mathbf{W}^{-1}\mathbf{F}^T) - 2J\lambda_s\theta_m\mathbf{G}\mathbf{G}^T$.

由 $(\mathbf{I}_N - \mathbf{W}^{-1})^T(\mathbf{I}_N - \mathbf{W}^{-1}) \geq 0$ 可以推出 $-\mathbf{W}^{-1}\mathbf{W}^{-1} \leq \mathbf{I}_N - 2\mathbf{W}^{-1}$ ，代入到公式(24)，有

$$\hat{\Pi}_i \leq \bar{\Pi}_i = \begin{bmatrix} \tilde{\Gamma}_{i11} & \mathbf{G}\mathbf{G}^T & \mathbf{H} & \mathbf{W}^{-1} \\ * & \kappa^{-1}(\mathbf{I}_N - 2\mathbf{W}^{-1}) & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma^{-1}\mathbf{I}_N & 0 \\ * & * & * & -\varphi^{-1}\mathbf{I}_N \end{bmatrix} \quad (25)$$

由 $\bar{\Pi}_i \leq 0$ ，可保证 $\hat{\Pi}_i \leq 0$ 。

通过以上推导可知，公式(16)可由公式(25)推导得到，表明定理 1 可确保线性多智能体系统达成鲁棒 H_∞ 一致性控制。为简化符号，引入 $\mathbf{V} = \mathbf{W}^{-1}$ ，并将线性矩阵不等式（公式(25)）化简为公式(21)。

值得注意的是， θ_m 、 θ_m 的凸线性组合能够表示任何 θ_i ，可将线性矩阵不等式（公式(21)）中的 Π_i 重写为仿射函数 $\Pi_i = \mathbf{V} + \theta_i\mathbf{W}$ （ $\mathbf{V}$ 和 $\mathbf{W}$ 为常数矩阵）。因此，可以用 Π_m 和 Π_m 的凸线性组合来表示 Π_i 。那么，如果 $\Pi_m < 0$ 和 $\Pi_m < 0$ 同时成立，则可以保证对于 $i = 1, \dots, n$ ， $\Pi_i < 0$ 成立。

2.4 芝诺行为排除

由于 $\|\mathbf{e}_i(t)\|$ 在区间 $t \in [t_\zeta^i, t_{\zeta+1}^i)$ 是连续可微分的，可推导出其右导数 $d^+\|\mathbf{e}_i(t)\|$ 为

$$\begin{aligned} d^+\|\mathbf{e}_i(t)\| &\leq \frac{\|\dot{\mathbf{e}}_i(t)\|}{\|\mathbf{e}_i(t)\|} \|\mathbf{e}_i(t)\| = \|\dot{\mathbf{v}}_i(t_\zeta^i) - \dot{\mathbf{v}}_i(t)\| = \|\dot{\mathbf{v}}_i(t)\| \leq \\ &\|\mathbf{F}\|\|\mathbf{e}_i(t)\| + \|\mathbf{F}\|\|\mathbf{v}_i(t_\zeta^i)\| + \|\mathbf{H}\|\|\boldsymbol{\omega}_i(t)\| + \\ &J\|\mathbf{G}\mathbf{G}^T\mathbf{W}\| \left\| \sum_{j=1}^N a_{ij}(\mathbf{v}_i(t_\zeta^i) - \mathbf{v}_j(t_{\zeta(t)}^j)) \right\| \leq \\ &\|\mathbf{F}\|\|\mathbf{e}_i(t)\| + \rho_\zeta^i \end{aligned} \quad (26)$$

式中： ρ_ζ^i 为 $\|\mathbf{F}\|\|\mathbf{v}_i(t_\zeta^i)\| + \|\mathbf{H}\|\|\boldsymbol{\omega}_i(t)\| + J\|\mathbf{G}\mathbf{G}^T\mathbf{W}\| \left\| \sum_{j=1}^N a_{ij}(\mathbf{v}_i(t_\zeta^i) - \mathbf{v}_j(t_{\zeta(t)}^j)) \right\|$ 的上确界。

考虑区间 $t \in [t_\zeta^i, t_{\zeta+1}^i)$ 有初始值 $\|\mathbf{e}_i(t_\zeta^i)\| = 0$ ，根据比较定理，由公式(26)可推导出 $\|\mathbf{e}_i(t)\| \leq \frac{\rho_\zeta^i}{\|\mathbf{F}\|} (e^{\|\mathbf{F}\|(t-t_\zeta^i)} - 1)$ 。

在 $t_{\varsigma+1}^i$ 时刻, 结合公式(8)有 $\sqrt{\phi \|\mathbf{w}_i(t_{\varsigma+1}^i)\|^2 + \zeta_i e^{-\zeta_i t_{\varsigma+1}^i}} \leq \frac{\rho_{\varsigma}^i}{\|\mathbf{F}\|} (e^{\|\mathbf{F}\|(t_{\varsigma+1}^i - t_{\varsigma}^i)} - 1)$ 。根据已知条件 $\mathbf{w}_i(t_{\varsigma+1}^i) \geq 0$ 、 $\phi > 0$, 可得 $\sqrt{\zeta_i e^{-\zeta_i t_{\varsigma+1}^i}} \leq \frac{\rho_{\varsigma}^i}{\|\mathbf{F}\|} (e^{\|\mathbf{F}\|(t_{\varsigma+1}^i - t_{\varsigma}^i)} - 1)$ 。假设 $\lim_{\varsigma \rightarrow \infty} t_{\varsigma}^i = T_{\varsigma} < \infty$ 表明智能体 i 在 T_{ς} 时刻陷入芝诺行为。当 $\varsigma \rightarrow \infty$ 时, 有 $t_{\varsigma+1}^i - t_{\varsigma}^i = 0$, 代入 $\sqrt{\zeta_i e^{-\zeta_i t_{\varsigma+1}^i}} \leq \frac{\rho_{\varsigma}^i}{\|\mathbf{F}\|} (e^{\|\mathbf{F}\|(t_{\varsigma+1}^i - t_{\varsigma}^i)} - 1)$ 可得 $0 < \sqrt{\zeta_i e^{-\zeta_i t_{\varsigma+1}^i}} \leq 0$, 这显然是矛盾的, 因此假设不成立, 即对所有智能体排除了芝诺行为。

3 仿真算例

本文将包含6个智能体的线性多智能体系统矩阵定义为

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2.8 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.4 \end{bmatrix}, \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.4 \end{bmatrix}$$

该线性多智能体系统的有向图如图1所示。

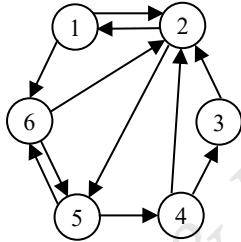


图1 线性多智能体系统有向图

假设外部干扰为正弦信号 $\omega_i(t) = \sin(0.5t)$ 。根据引理1, 可计算出 $\lambda_s = 0.7939$ 、 $p = [0.2500, 0.1071, 0.1071, 0.2143, 0.1786, 0.1429]^T$ 。选取参数为: $J = 66$ 、 $\varepsilon = 0.0017$ 、 $\phi_M = 2.2793 \times 10^{-6}$ 、 $\varpi = 0.9999$ 、 $\mu = 2.0655$, 求解线性矩阵不等式(公式(21)), 可得到一个可行解 $\mathbf{V} = \begin{bmatrix} 0.5364 & -0.1911 \\ -0.1911 & 2.0892 \end{bmatrix}$, $\mathbf{K} = \mathbf{G}^T \mathbf{V}^{-1} = [0.0705 \quad 0.1979]$ 。

该线性多智能体系统一阶、二阶状态的渐近收敛曲线如图2所示, 外部干扰与控制输出之间的能量关系如图3所示。

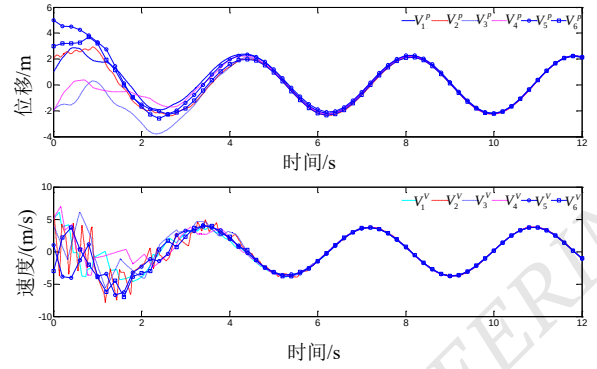


图2 线性多智能体系统一阶、二阶状态的渐近收敛曲线

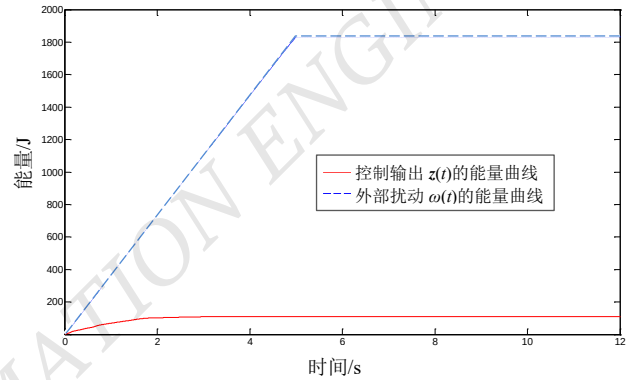


图3 外部干扰与控制输出之间的能量关系

由图2可知: 6个智能体的一阶、二阶状态渐近收敛曲线一致, 表明线性多智能体系统实现了一致性控制; 收敛曲线中未出现发散或持续波动, 表明指数衰减事件触发控制算法在降低通信频率的同时, 保证了系统稳定性。

由图3可知: 随着外部干扰能量累积, 控制输出能量始终低于干扰能量, 且两者的比值满足公式(19), 表明干扰得到抑制; 控制输出能量曲线的衰减趋势表明, 线性多智能体系统在扰动下能快速抑制误差并保持一致性, 验证了 H_{∞} 性能指标的有效性; 输出能量无爆发性增长, 排除了芝诺行为, 表明指数衰减事件触发控制算法有效平衡了通信效率与扰动抑制能力。

4 结论

本文提出一种指数衰减事件触发控制算法, 使有向线性多智能体系统在建模不精确和受干扰情况下仍能达成鲁棒 H_{∞} 一致性控制, 并排除芝诺行为。通过仿真算例, 验证了该算法的有效性。未来研究可进一

步拓展至非线性系统控制、复杂通信拓扑优化、实际工程应用验证以及智能算法融合等方向,以推动多智能体系统分布式协同控制理论的发展与创新。

©The author(s) 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

参考文献

- [1] 薛宏涛,叶媛媛,沈林成,等.多智能体系统体系结构及协调机制研究综述[J].机器人,2001,23(1):85-90.
- [2] MASSIONI P, VERHAEGEN M. Distributed control for identical dynamically coupled systems: A decomposition approach[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54(1):124-135.
- [3] LI Z, DUAN Z, XIE L, et al. Distributed robust control of linear multi-agent systems with parameter uncertainties[J]. International Journal of Control, 2012, 85(8): 1039-1050.
- [4] LIU Y, HOU X. Event-triggered consensus control of disturbed multi-agent systems using output feedback[J]. ISA Transactions, 2019,91:166-173.
- [5] HU W, WENG Y, LI H. Observer-based output feedback event-triggered robust consensus control of uncertain linear multi-agent systems with directed networks[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2022,32(9):5555-5573.
- [6] YAO D, LI H, SHI Y. Adaptive event-triggered sliding-mode control for consensus tracking of nonlinear multiagent systems with unknown perturbations[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2022,53(4):2672-2684.
- [7] HU W, LI Z, DAI M, HUANG T. Robust adaptive control for spacecraft attitude synchronization subject to external disturbances: A performance adjustable event-triggered mechanism[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2023,33(3):2392-2408.
- [8] LIANG H, CHEN L, PAN Y, LAM H K. Fuzzy-based robust precision consensus tracking for uncertain networked systems with cooperative-antagonistic interactions[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2022,31(4):1362-1376.
- [9] 黄小龙,陈阳舟,詹璟原.模型不确定多智能体系统的鲁棒一致性控制[J].华中科技大学学报(自然科学版),2020,48(9):19-24;75.
- [10] 李静,方正.不确定分数阶非线性多智能体系统的鲁棒一致性[J].四川大学学报(自然科学版),2016,53(1):54-60.
- [11] 罗振发.基于神经网络的非线性多智能体系统自适应脉冲控制[J].自动化与信息工程,2025,46(1):20-28;35.
- [12] 王航,黄小平,甘国操,等.基于大型语言模型的异构多智能体系统[J].自动化与信息工程,2025,46(4):22-27.
- [13] TABUADA P. Event-triggered real-time scheduling of stabilizing control tasks[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2007,52(9):1680-1685.
- [14] SEYBOTH G S, DIMAROGONAS D V, JOHANSSON K H. Event-based broadcasting for multi-agent average consensus [J]. Automatica, 2013,49(1):245-252.
- [15] GIRARD A. Dynamic triggering mechanisms for event-triggered control[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015,60(7):1992-1997.
- [16] HU W, YANG C, HUANG T, et al. A distributed dynamic event-triggered control approach to consensus of linear multiagent systems with directed networks[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019,50(2):869-874.
- [17] DENG C, WEN C, HUANG J, et al. Distributed observer-based cooperative control approach for uncertain nonlinear mass under event-triggered communication[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2022,67(5):2669-2676.
- [18] CAO L, PAN Y, LIANG H, et al. Observer-based dynamic event-triggered control for multiagent systems with time-varying delay[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2022,53(5):3376-3387.
- [19] JU Y, DING D, HE X, et al. Consensus control of multi-agent systems using fault-estimation-in-the-loop: Dynamic event-triggered case[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2021,9(8):1440-1451.

作者简介:

翁一航,男,1996年生,硕士研究生,助教,主要研究方向:多智能体系统事件触发鲁棒控制。E-mail: yihangweng@foxmail.com

林若波,男,1974年生,硕士研究生,教授,主要研究方向:机电一体化技术。E-mail: 875529062@qq.com

廖兴展,男,1980年生,硕士研究生,副教授,主要研究方向:PLC控制技术。E-mail: 574791762@qq.com

杨小佳,男,1992年生,硕士研究生,讲师/高级工程师,主要研究方向:工业过程控制。E-mail: 312209013@qq.com