

# 复杂环境下多智能体系统一致性控制研究综述

邵俊倩 李舒恺 杜禹莹 袁巧佳 刘千德  
绥化学院信息工程学院 黑龙江绥化 152061

**摘要:** 多智能体系统一致性控制在无人机编队、智慧物流与交通、新型电力系统等众多工程场景中具有广泛应用前景。由于实际通信环境中普遍存在的通信时延、数据丢包、网络攻击等复杂因素,严重影响多智能体系统的协同控制性能,成为制约其工程化应用的关键瓶颈。本文系统梳理了复杂环境下多智能体系统一致性研究的最新成果,重点从通信时延、数据丢包、网络攻击三个维度阐述现有研究进展,分析当前研究存在的不足,展望未来研究方向,为后续相关研究提供参考。

**关键词:** 多智能体系统; 通信时延; 数据丢包; 网络攻击; 事件触发控制

## 引言

多智能体系统通过多个具有自主决策与通信能力的智能体之间的协同合作,能够完成单个智能体难以实现的复杂任务,其一致性控制旨在使系统中所有智能体的状态趋于相同,是实现协同目标的核心前提。在实际工程应用中,多智能体系统的通信过程不可避免地受到多种复杂因素的干扰:网络拥塞与带宽限制导致通信时延,网络流量拥堵、噪声干扰等引发数据丢包,网络规模扩大与复杂性增加使网络攻击风险显著上升。这些因素不仅会降低系统协同控制精度,甚至可能破坏系统稳定性,导致一致性无法实现。因此,系统梳理复杂环境下多智能体系统一致性研究成果,对于推动多智能体系统的工程化落地具有重要意义。

## 一、复杂环境下多智能体系统一致性研究

### (一) 通信时延下多智能体系统一致性

通信时延是多智能体系统协同控制中普遍存在的问题,主要由网络拥塞、带宽限制、信号传输距离等因素

导致,其存在会破坏智能体间信息交互的实时性,进而影响系统的协同控制性能,甚至导致系统不稳定。为解决通信时延带来的负面影响,研究者们从确定性时延与随机时延两个角度开展了大量研究。在确定性时延研究方面,一些学者探讨了一阶无领导者多智能体系统的随机时延影响,为低阶系统随机时延问题的分析提供了基础;2021年,Sun等<sup>[1]</sup>进一步将研究扩展到二阶多无人机系统,深入分析了随机时延对系统一致性的影响机制,提出了相应的控制策略,为高阶多智能体系统在随机时延环境下的应用提供了理论参考。

除了针对时延特性设计控制策略外,学者们从节约通信资源的角度出发,提出了基于事件驱动的控制方法。刘<sup>[2]</sup>专注于利用事件触发机制解决低阶多智能体系统的编队控制问题,安等<sup>[3]</sup>研究在噪声环境下的无领导者多无人机编队控制问题,考虑到通信噪声和随机时延的影响,采用Bernoulli随机分布描述时延发生的随机性,给出了多无人机系统的稳定性条件,通过理论分析和仿真实验验证了所提算法的有效性和正确性。

### (二) 数据丢包下多智能体系统一致性

在数字通信网络中,数据丢包现象在所难免。现有研究主要围绕随机丢包、采样系统丢包等场景展开,提出了多种一致性分析方法与控制策略。在随机丢包研究方面,Shi等<sup>[4]</sup>重点研究了离散时间二阶多智能体系统在随机丢包情况下的尺度跟踪一致性问题,为离散时间系统的丢包补偿提供了新的思路。Zhao等<sup>[5]</sup>探讨了连续时间多智能体系统在存在领导者且发生数据丢包情况下的协同控制问题,通过引入误差变量,将系统一致性问题

**基金项目:** 黑龙江省省属本科高校基本科研业务费项目《基于Leader-follower理论的多智能体系统一致性跟踪控制研究》(编号:YWF10236230211);黑龙江省大学生创新训练计划项目(编号:S202510236012;202310236030)研究成果。

**作者简介:** 邵俊倩(1980.04—)女,汉族,黑龙江绥化人,硕士研究生,副教授,主要从事多智能体系统协调控制方面的研究。

转化为误差系统的稳定性分析问题，简化了分析过程。

然而，上述研究大多仅处理了带有丢包的数据采样一致性问题，未引入事件触发机制。此外，丢包会进一步降低系统性能，甚至破坏系统向一致性收敛。因此，如何设计合理的采样周期和事件触发条件，使采样周期不仅能够补偿丢包带来的负面影响，还能在控制性能和资源利用率之间实现平衡，成为当前研究的重点问题之一。

### （三）网络攻击下多智能体系统安全一致性

常见的网络攻击主要分为拒绝服务攻击和欺骗攻击，拒绝服务攻击通过中断控制或测量通道上的通信，破坏系统的可用性；欺骗攻击则通过操纵通信网络传输的数据，破坏数据的完整性与可信度，进而影响系统的控制性能。在抵御拒绝服务攻击方面，学者们探讨了集中式系统中抵御拒绝服务攻击的安全一致性控制问题，进一步将研究扩展到分布式架构，深入探讨了分布式环境下应对拒绝服务攻击的安全协同控制问题，提出了相应的分布式控制策略，提高了系统的分布式容错能力。在欺骗攻击防御研究方面，Ma等<sup>[6]</sup>通过脉冲控制方法，提出了欺骗攻击下多智能体系统的安全一致性控制策略，利用脉冲信号的特性，有效抑制了欺骗攻击对系统状态的干扰，保证了系统的一致性。

考虑到周期性采样可能造成大量资源浪费，学者们开始探索将事件触发机制应用于网络攻击下的多智能体系统安全一致性控制。赵等<sup>[7]</sup>开发了一种基于事件的采样方案，有效克服了现有资源、计算和通信限制，提高了资源利用效率；鉴于DoS攻击的特性，研究者对DoS攻击的攻击频率及其持续时间实施了相应约束，并给出了均匀触发策略，保证了系统的稳定性。尽管现有研究已在网络攻击下多智能体系统安全一致性控制方面取得了一定成果，但网络攻击的多样性、动态性和复杂性仍给系统安全带来了巨大挑战。

## 二、当前研究存在的不足

### （一）复杂因素耦合影响研究不足

现有研究大多仅针对单一复杂因素开展一致性控制研究，但在实际工程环境中，通信时延、数据丢包、网络攻击等复杂因素往往是相互耦合、共同存在的。例如，网络拥塞不仅会导致通信时延，还可能引发数据丢包；网络攻击可能同时造成时延增加和丢包率上升。然而，目前关于多种复杂因素耦合情况下的多智能体系统一致性研究相对较少，现有控制策略难以有效应对多因素耦

合带来的叠加影响，系统的鲁棒性和适应性有待进一步提升。

### （二）高阶非线性系统研究有待加强

现有研究较多集中于一阶、二阶等低阶多智能体系统，对于高阶非线性多智能体系统的一致性控制研究相对不足。随着工程应用的不断发展，多智能体系统的动力学特性日益复杂，高阶非线性系统的应用越来越广泛。这类系统的一致性分析与控制设计更为复杂，现有低阶系统的控制策略难以直接推广应用。此外，对于高阶非线性多智能体系统在复杂环境下的一致性控制，相关研究更是匮乏，需要进一步探索适合其特性的控制策略与分析方法。

### （三）事件触发与复杂环境的融合研究不够深入

尽管事件触发控制策略在节约资源方面具有显著优势，但现有研究在事件触发与复杂环境的融合方面仍存在不足。一方面，在通信时延、数据丢包、网络攻击等复杂环境下，事件触发机制的设计缺乏针对性，难以有效应对复杂环境带来的挑战；另一方面，对于事件触发与复杂因素耦合场景下的系统稳定性分析、Zeno行为避免等关键问题，研究不够深入，缺乏完善的理论体系。此外，如何在复杂环境下设计合理的事件触发条件，实现控制性能与资源利用率的最优平衡，仍是当前研究的难点问题。

### （四）工程化应用验证不足

现有研究大多停留在理论分析和数值仿真阶段，缺乏充分的工程化应用验证。多智能体系统的实际工程应用场景复杂多变，存在诸多不确定因素，理论研究中所做的假设（如理想网络拓扑、特定时延模型、简单攻击模式等）与实际情况存在较大差距。因此，现有控制策略在实际工程应用中的有效性和可靠性有待进一步验证。此外，针对具体工程场景的定制化控制策略研究不足，难以满足实际应用需求。

## 三、未来研究方向

### （一）多复杂因素耦合下的一致性控制

加强通信时延、数据丢包、网络攻击等多种复杂因素耦合情况下的多智能体系统一致性研究。首先，需要建立更符合实际工程环境的多因素耦合模型，准确描述复杂因素之间的相互作用机制；其次，设计能够有效应对多因素耦合影响的鲁棒性控制策略，例如将自适应控制、滑模控制、预测控制等先进控制方法与一致性算法相结合，提高系统对复杂环境的适应能力；最后，通过

严格的理论分析和大量的数值仿真,验证所提模型和控制策略的有效性。

### (二) 高阶非线性多智能体系统一致性控制

深入开展高阶非线性多智能体系统在复杂环境下的一致性控制研究。针对高阶系统的特性,探索基于降阶、分解等方法的一致性分析与控制设计思路;对于非线性系统,研究非线性补偿、自适应控制等方法,将非线性系统转化为线性系统或近似线性系统进行处理,再结合现有的一致性控制理论进行设计。同时,将事件触发控制策略推广应用于高阶非线性多智能体系统,设计适合其特性的触发机制和控制协议,在保证系统一致性和稳定性的前提下,提高资源利用效率。

### (三) 事件触发与复杂环境的深度融合研究

加强事件触发控制与复杂环境的深度融合研究。一方面,针对通信时延、数据丢包、网络攻击等不同复杂环境,设计具有针对性的事件触发机制,例如在时延环境下,考虑时延补偿的事件触发条件设计;在丢包环境下,设计能够容忍丢包的事件触发机制;在网络攻击环境下,结合安全防御技术的事件触发控制策略。另一方面,深入研究事件触发与复杂因素耦合场景下的系统稳定性分析方法和Zeno行为避免策略,建立完善的理论体系。探索基于强化学习、深度学习等人工智能技术的事件触发机制设计方法,通过智能算法自主学习最优触发策略,实现控制性能与资源利用率的动态平衡。

### (四) 工程化应用与验证研究

加强多智能体系统一致性控制的工程化应用与验证研究。针对具体工程场景(如无人机编队、智能电网、机器人集群等),开展定制化控制策略设计,充分考虑实际应用中的约束条件(如通信带宽、计算资源、传感器精度等);搭建多智能体系统实验平台,进行大量的物理实验验证,检验控制策略在实际环境中的有效性和可靠性;加强产学研合作,推动研究成果的工程化转化,解决实际工程问题。

### 结语

本文系统综述了复杂环境下多智能体系统一致性研究成果,从通信时延、数据丢包、网络攻击三个维度阐述了现有研究进展;分析了当前研究存在的不足,展望了未来研究方向,未来,需要进一步加强理论创新与工程应用相结合,深入研究复杂环境下多智能体系统一致性事件触发控制的关键问题,提出更具鲁棒性、适应性和实用性的控制策略,推动多智能体系统在实际工程中的广泛应用。

### 参考文献

- [1]Sun F, Liao X, Kurths J. Mean-square consensus for heterogeneous multi-agent systems with probabilistic time delay[J]. Information Sciences, 2021, 543: 112-124.
- [2]刘静.事件触发机制下的无人机半全局编队跟踪控制[J].自动化应用, 2021, 61(5): 64-67.
- [3]安述祥, 宋公飞, 尹资荣, 等.基于事件触发机制的随机时延无人机编队控制[J].电光与控制, 2024, 31(12): 1-7.
- [4]Shi L, Zheng W, Shao J, et al. Scaled tracking consensus in discrete-time second-order multiagent systems with random packet dropouts[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2020, 51(12): 7745-7751.
- [5]Zhao H, Wang L, Zhou H, et al. Consensus for a class of sampled-data heterogeneous multi-agent systems[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2021, 19(5): 1751-1759.
- [6]Ma T, Zhang Z, Cui B. Impulsive consensus of nonlinear fuzzy multi-agent systems under DoS attack[J]. Nonlinear Analysis: Hybrid Systems, 2022, 44: 101155.
- [7]赵昌北, 纪文呈宇, 姜玉莲, 等.DoS攻击下多自主系统的事件触发安全控制[J].控制工程, 2022, 29(06): 964-970.