

申报 2025 年度山东省自动化学会自然科学奖一等奖 情况

一、项目名称

面向多重非线性动态系统的性能优化与安全控制方法

二、推荐者及推荐意见

推荐者：赵延龙 (中国科学院数学与系统科学研究院 研究员 所属学科：控制科学与工程)

推荐意见：

我认真审阅了该项目的推荐书及附件材料，确认全部材料真实有效，相关栏目符合山东省自动化学会的填写要求。

该项目围绕“面向多重非线性动态系统的性能优化与安全控制”这一重要科学问题，展开深入研究并取得了一系列高水平成果：1. 复杂切换动态系统的改进自适应控制策略。突破了传统方法对精确模型的依赖，构建了在模型估计误差存在条件下切换非线性系统基于平均驻留时间的稳定性理论框架；进而给出了以非严格反馈形式实现的智能跟踪控制器与切换信号一体化设计方案，克服了切换动态与非线性耦合带来的稳定性分析难题，实现了在未知动态与切换扰动下系统的渐近稳定跟踪。2. 复杂非线性多智能体系统的高性能控制策略。突破了传统李雅普诺夫函数仅能处理误差约束的限制，提出了一种新颖的非线性变换函数，可直接对系统状态施加非对称时变约束，从而使状态在预设安全范围；设计了多种Lyapunov-Krasovskii泛函及补偿策略，分别抑制状态时延与输入时延的影响，显著提升了非线性多智能体系统在时滞条件下的收敛速度与一致性精度。3. 复杂非线性动态系统的多层次安全控制策略。构建了“人工智能+机理模型+智能控制”多层次故障监控-安全防御理论体系，建立了误差系统与闭环系统的稳定性判据，实现了对缓变、斜坡与快速时变故障的精准重构；提出了非平衡通信拓扑下基于最短路径的分层架构，设计了资源节约的拒绝服务攻击下自适应二部一致控制机制，为复杂系统在开放网络环境中的韧性调控提供了理论支撑。

本项目在国内外权威期刊IEEE Trans.汇刊等共发表SCI学术论文40余篇。所列5篇代表性论文被SCI严格他引总计260次，单篇SCI他引最高162次，1篇代表性论文入选ESI前1%高被引论文。研究成果得到20余名国内外院士、IEEE Fellow、长江学者特聘教授和国家杰青等国内外知名学者的正面评价。

推荐该项目为2025年度山东省自动化学会自然科学奖 一 等奖。

三、推荐等级

推荐该项目为山东省自动化学会自然科学奖：一等奖。

四、项目简介

多重非线性动态系统广泛存在于航空航天、智能制造、无人集群、能源电网等国家战略与民生关键领域，是复杂工程系统的核心抽象与效能基石。这类系统的“多重非线性”深刻体现为系统状态随时间增长呈非线性复杂演化、子系统间存在强非线性耦合以及物理上的分布式部署特性，从而构成了极具挑战性的分析与控制对象。在此背景下，深入研究其性能优化与安全控制方法，对于提升复杂工程系统的整体效能、运行可靠性及对恶劣环境的适应性具有至关重要的作用。然而，系统状态演化的高度非线性、子系统间耦合关系的复杂建模、以及网络攻击和系统故障带来的控制难题，共同构成了该领域研究中亟待突破的核心挑战，也是实现系统智能化、自主化升级所必须攻克理论与技术瓶颈。

为应对上述挑战，本项目深入研究复杂切换动态系统的改进自适应控制策略，进一步拓展应用于复杂非线性多智能体系统。该策略能够在系统存在模型不确定性的条件下，有效规避时延与约束带来的不利影响，显著提升系统的跟踪精度、响应速度与协同一致性等控制性能。更进一步地，项目从系统安全的全局视角出发，构建多层次的安全控制策略，旨在强化系统在面临内部传感器故障和执行器故障与外部恶意网络攻击等复杂威胁时的弹性恢复与稳定运行能力，为系统在非理想环境下的生存性与任务完成度提供坚实保障。

本项目的核心创新点主要体现在以下三个方面：

1. 复杂切换动态系统的改进自适应控制策略。突破了传统方法对精确模型的依赖，构建了在模型估计误差存在条件下切换非线性系统基于平均驻留时间的稳定性理论框架；进而给出了以非严格反馈形式实现的智能跟踪控制器与切换信号一体化设计方案，克服了切换动态与非线性耦合带来的稳定性分析难题，实现了在未知动态与切换扰动下系统的渐近稳定跟踪。

2. 复杂非线性多智能体系统的高性能控制策略。突破了传统李雅普诺夫函数仅能处理误差约束的限制，提出一种非线性变换函数，可直接对系统状态施加非对称时变约束，从而使状态在预设安全范围。针对时延问题，设计了多种李雅普诺夫-克拉索夫斯基泛函(Lyapunov-Krasovskii functionals)及补偿策略，分别抑制状态时延与输入时延的影响，显著提升了非线性多智能体系统在时滞条件下的收敛速度与一致性精度。

3. 复杂非线性动态系统的多层次安全控制策略。构建了“人工智能+机理模型+智能控制”多层次故障监控-安全防御理论体系，在模糊李雅普诺夫函数框

架下建立了误差系统与闭环系统的稳定性判据，实现了对缓变、斜坡与快速时变故障的精准重构；提出了非平衡通信拓扑下基于最短路径的分层架构，设计了资源节约的拒绝服务攻击下自适应二部一致控制机制，为复杂系统在开放网络环境中的韧性调控提供了理论支撑。

本项目在国内外权威期刊如 IEEE Trans. 汇刊等共发表 SCI 论文 40 余篇。所列 5 篇代表性论文被 SCI 严格他引总计 260 次，单篇 SCI 他引最高 162 次，1 篇代表性论文入选 ESI 前 1% 高被引论文。研究成果得到 20 余名国内外院士、IEEE Fellow、长江学者特聘教授和国家杰青等国内外知名学者的正面评价。以本项目研究成果为基础，第一完成人获批多项国家自然科学基金及省部级基金，第二完成人入选国家博士后创新人才支持计划，第三完成人入选国家资助博士后研究人员计划，第四完成人获评国家级青年人才、山东省泰山学者、入选科睿唯安全球高被引学者。

五、代表性论文专著目录

- [1] **Niu Ben**, Wang Ding, Alotaibi, Naif D., Alsaadi, Fuad E.. Adaptive Neural State-Feedback Tracking Control of Stochastic Nonlinear Switched Systems: An Average Dwell-Time Method, IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 30(4): 1076-1087.
- [2] **Niu Yi**, Yang Yulong, **Niu Ben**, Zhao Xudong, Zhai Lun, Zhang Boyi. Robust consensus tracking strategy of heterogeneous nonlinear multi-agent systems with time-varying input delays. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2023, DOI:10.1109/TASE.2023.3324389.
- [3] **Niu Yi**, Yang Yulong, Wang Huanqing, **Niu Ben**, Shang Zihao. Adaptive tracking control of high-order nonlinear systems with time-varying delays under asymmetric output constraints. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2024, DOI: 10.1109/TASE.2024.3374242.
- [4] **Mu Yunfei**, Zhang Huaguang, Gao Zhiyun, Zhang Juan. A Fuzzy Lyapunov Function Approach for Fault Estimation of T - S Fuzzy Fractional-Order Systems Based on Unknown Input Observer. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 53 (2): 1246-1255, 2023.
- [5] **Wang Xiaomei**, Na Jing, **Niu Ben**, Zhao Xudong, Cheng Tingting, Zhou Wenqi. Event-triggered adaptive bipartite secure consensus asymptotic tracking control for nonlinear MASs subject to DoS attacks, IEEE Transactions on Automation Science and Engineering 21 (3), 3816-3825.

六、主要完成人、主要完成单位情况

(1) **牛屹**，排名 **1**，行政职务：无，技术职称：副教授，工作单位：山东师范大学，完成单位：山东师范大学。

对本项目贡献：对本项目主要学术贡献：第一完成人牛屹为山东师范大学副教授、硕士生导师。在非线性和动力系统方向发表论文 30 余篇。对本项目主要学术贡献：(1)对本项目科学发现二有重要贡献，是代表性论文 2, 3 的第一作者。

(2)提出了一种分别针对状态时延和输入时延设计了一系列L-K泛函和补偿机制,缓解了非线性系统因时延带来的性能下降。

(2) **穆云飞**, 排名 **2**, 行政职务: 无, 技术职称: 特聘研究员, 工作单位: 东北大学, 完成单位: 东北大学。

对本项目贡献: 第二完成人穆云飞为东北大学特聘研究员、博士生导师, 入选全国博士后创新人才支持计划, 校卓越青年人才聚集计划。在故障诊断与容错控制等方向发表论文 40 余篇。对本项目主要学术贡献: (1) 对本项目科学发现三有重要贡献, 是代表性论文 4 的第一作者。(2) 提出了面向复杂非线性系统的全流程高精度智能故障诊断与容错控制方法, 在模糊李雅普诺夫函数框架下给出了保守性更低的误差系统和闭环系统稳定性条件, 实现了复杂非线性系统即使在受到多种故障和外部扰动影响时仍能维持安全稳定运行的控制机制。

(3) **王晓梅**, 排名 **3**, 行政职务: 无, 技术职称: 助理研究员, 工作单位: 重庆大学, 完成单位: 山东师范大学。

对本项目贡献: 第三完成人王晓梅为重庆大学博士后。在网络化非线性多智能体系统的稳定性分析与控制设计等方向发表论文 20 余篇。对本项目主要学术贡献: (1)对本项目科学发现三有重要贡献, 是代表性论文 5 的第一作者。(2)提出了非平衡通信拓扑下基于最短路径的分层架构, 设计了资源节约的拒绝服务攻击下自适应二部一致控制机制, 为复杂系统在开放网络环境中的韧性调控提供了理论支撑。

(4) **牛奔**, 排名 **4**, 行政职务: 无, 技术职称: 助理研究员, 工作单位: 大连理工大学, 完成单位: 山东师范大学。

对本项目贡献: 第四完成人牛奔为大连理工大学教授、国家高层次青年人才、山东省泰山学者、科睿唯安全球高被引学者。在切换系统等方向发表论文 100 余篇。对本项目主要学术贡献: (1)对本项目科学发现一、三有重要贡献, 是代表性论文 1, 5 的通信作者。(2) 通过构建在模型估计误差存在条件下切换非线性时滞系统基于平均驻留时间的稳定性理论框架; 进而给出了以输出反馈形式实现的智能跟踪控制器与切换信号一体化设计方案。该创新有效克服了切换动态与非线性交织带来的稳定性分析难题, 实现了在未知动态与切换扰动下系统的渐近稳定跟踪。