

自然科学奖公示

一、项目名称

无人蜂群系统博弈学习与协同控制方法研究

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

提名意见：本项目以复杂环境下由自主单体系统构成的无人蜂群系统为研究对象，从系统的结构属性分析、博弈协同群控与拓扑优化、复杂环境下协同控制算法设计等视角展开研究，提出了全演化周期响应空间的可学习性、动态特性的自学习性等新概念，建立了全演化周期响应空间完全可学习性与系统动态特性之间的定性关系；构建了具有混杂特征的无人蜂群系统博弈对抗模型，设计了两类典型场景下协同控制策略，建立了博弈协同控制问题可解的判据准则及网络拓扑的优化机制；设计了非完全信息交互模式下显式/隐式协同控制协议和时变拓扑下协同控制协议，给出了复杂环境下无人蜂群系统协同群控问题可解的判别条件。

项目 5 篇代表性论文 Google 学术引用 494 次，其中 ESI 高被引论文 3 篇，获陕西高等学校科学技术研究优秀成果一等奖 2 项、二等奖 1 项，全军优秀博士学位论文奖 1 项、陕西省优秀博士学位论文奖 1 项。项目第一完成人和第二完成人均是陕西省杰出青年基金获得者。

拟提名该项目为陕西省自然科学奖二等奖。

三、项目简介

人工智能是引领未来的战略性技术，也是国际竞争的新焦点。《新一代人工智能发展规划》(国发[2017]3 号)明确指出自主智能系统是人工智能的发展重点，要重点突破面向自主无人系统的自主协同控制等基础理论及关键技术，牢牢把握人工智能发展新阶段国际竞争的战略主动。本项目以复杂环境下由自主单体系统构成的无人蜂群系统为研究对象，从系统的结构属性分析、博弈协同群控与拓扑

优化、复杂环境下协同控制算法设计等视角展开研究，取得一系列原创性成果，为无人蜂群系统的协同控制与决策提供了强有力的理论支撑。项目主要创新点如下：

（1）系统的结构属性分析：提出了全演化周期响应空间的可学习性、动态特性的自学习性等新概念，针对一类自主单体系统，建立了全演化周期响应空间完全可学习性与系统动态特性之间的定性关系；构建了系统动态的自学习机制，建立了系统具有自学习特性的表征因素，揭示了自学习性与状态能控性之间的等价关系。

（2）无人蜂群系统的博弈控制与拓扑优化：构建了具有混杂特征的无人蜂群系统博弈对抗模型，设计了两类典型场景下协同控制策略，严格数学理论建立了博弈协同控制问题可解的判据准则及网络拓扑的优化机制，揭示了协同控制策略、网络拓扑和协同性能之间的内在作用机理，提升了无人蜂群系统的协同能力。

（3）复杂环境下无人蜂群系统的协同控制：针对一类典型的具有对抗特征的无人蜂群系统，分别设计了非完全信息交互模式下显式/隐式协同控制协议，给出了协同群控问题可解的判别条件；进一步设计了时变拓扑下协同控制协议，给出了有限资源模型约束下无人蜂群系统协同群控问题可解的判别条件，解决了资源约束、间歇通信、拓扑切换下无人蜂群系统协同群控难的问题。

项目在国家自然科学基金、国防基础科研支持计划、陕西省杰出青年基金等资助下，共发表论文 53 篇，其中 SCI 检索论文 46 篇，包括 IEEE Trans.、Automatica 等顶级期刊论文。5 篇代表性论文 Google 学术引用 494 次，其中 ESI 高被引论文 3 篇。部分成果获陕西高等学校科学技术研究优秀成果一等奖 2 项、二等奖 1 项，全军优秀博士学位论文奖 1 项、陕西省优秀博士学位论文奖 1 项。

成果成功应用于北京航天自控所、中国电科 27 所、中国电子 6 所、西安爱生无人机技术有限公司和北京领创拓展科技发展有限公司等多家武器设计研制部门和高科技企业的无人机蜂群演示验证课题中，提升了协同控制性能，降低了冗余信息交互水平和通信代价。设计的无人蜂群系统协同控制协议鲁棒性强、可

靠性高、实用性好，开发的半实物半仿真平台提升了研制效率、降低了外场试验费用。

项目第一完成人是陕西省杰出青年基金获得者，入选陕西省高校青年杰出人才支持计划，连续 3 年入选全球前 2% 顶尖科学家榜单；项目第二完成人是陕西省杰出青年基金获得者，某重大工程副总师，某重大项目专家组成员，教育部重点实验室副主任；项目第五完成人入选中国科协青年人才托举工程。

四、客观评价

项目共发表 46 篇 SCI 检索论文，包括 IEEE Trans.、Automatica 等控制领域权威期刊论文，5 篇代表性论文 Google 学术引用 494 次，ESI 高被引论文 3 篇。成果获陕西高等学校科学技术研究优秀成果一等奖 2 项、二等奖 1 项，全军优秀博士学位论文奖 1 项、陕西省优秀博士学位论文奖 1 项。

- 中国工程院院士王耀南教授及其合作者在 Adaptive neural design of consensus controllers for nonlinear multiagent systems under switching topologies 中将项目研究成果作为无人蜂群系统的重要工作(“In this area, considerable works are reported in the recent decade In [7] and [8], the consensus problem of hybrid MASs is considered.”，摘自 IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 53(1): 309-320, 2023，其中[7]为本项目的代表性论文 1)。
- IEEE Fellow、波德奖获得者、美国加州大学 Miroslav Krstić 教授及其合作者在 Multi-agent deployment in 3-D via reaction–diffusion system with radially-varying reaction 中将项目研究成果作为协同群控有影响力的工作(“... research on multi-agent systems (MASs) has drawn significant attention from control scientists ... Graph theory (Zheng et al., 2019) ... have been widely applied, ..., and have already produced an impressive array of results.”，摘自 Automatica, 161: 111491, 2024，其中 Zheng et al., 2019 为本项目代表性工作 1)。
- 欧洲科学院院士、英国爱丁堡皇家学会会士 Jürgen Kurths 教授在多篇论文中对项目研究成果予以正面引用。在 Group consensus of heterogeneous multi-

agent systems with packet loss and unknown speed of second-order agents in cooperative-competitive networks 中明确指出项目组深入研究了无人蜂群系统的协同控制问题(“Among them, the consensus control of MASs is an extremely important issue, and has been deeply studied in various aspects [9-20].”, 摘自 Nonlinear Dynamics, 110: 3447-3461, 2022, 其中[13]为本项目代表性工作 1)。

- IEEE Fellow、欧洲科学院院士 Guo-Ping Liu 教授及其合作者在 Coordinated control of quasilinear multiagent systems via output feedback predictive control 中将项目研究成果作为无人蜂群系统的重要成果(“Multiagent systems (MASs) have obtained a string of significant achievements in various fields with the development and progress of Internet of Things,..., Zheng et al. [22], Shen et al. [23] and other relative achievements also contribute to the development of this research field.”, 摘自 ISA transactions, 2022, 128: 58-70, 其中[22]为本项目的代表性论文 1)。
- IEEE Fellow、国际系统与控制科学院院士、《控制与决策》主编 Guanghong Yang 教授在多篇论文中对项目研究成果予以正面评价。在 Estimator-based event-triggered output synchronization for heterogeneous multi-agent systems under denial-of-service attacks and actuator faults 中将项目研究成果作为无人蜂群系统的经典结果(“... the multi-agent systems (MASs) have captivated a great deal of notice for its practical applications in unmanned aerial vehicle (UAV) formation control, distributed power generation, urban transportation scheduling and so forth ... Typical results on this aspect can be found in [3-8], which are for homogeneous multiagent systems.”, 摘自 Information Sciences, 652: 119670, 2024, 其中[8]为本项目代表性工作 2)。
- 中国工程院院士桂卫华教授及其合作者在 Admissible consensus for homogenous descriptor multiagent systems 中将项目研究成果作为协同群控的显著性结果(“Recently, several remarkable results have been achieved based on the

distributed consensus control, for instance, first/second-order continuous multiagent systems [1]-[4], ...”, 摘自 IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 51(2): 965-974, 2021, 其中[4]为本项目的代表性论文 3)。

- IEEE Fellow 张化光教授及其合作者在 Adaptive bipartite event-triggered output consensus of heterogeneous linear multiagent systems under fixed and switching topologies 中明确指出项目首次研究了无人蜂群系统的对抗协同控制 (“It is generally known that both the cooperative and antagonistic interactions may exist simultaneously in the communication between multiple agents. ...It was first investigated for MASs with integrator dynamics [25], [26].”, 摘自 IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2020, 31(11): 4816-4830, 其中[26]为本项目的代表性论文 3)。
- IEEE Fellow、欧洲科学院院士、TII 主编 Qing-Long Han 教授及其合作者在 Order-Preserved preset-time cooperative control: a monotone system-based approach 中指出项目研究成果解决了无人蜂群系统协同控制领域的关键问题 (“consensus is a key and fundamental one, which aims to achieve state agreement by using only local information [6]–[10]...Convergence rate is a key index to evaluate the designed controllers [6]–[15].”, 摘自 IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2022, 9(9): 1603-1611, 其中[8]为本项目研究成果 5)。

五、代表性论文专著目录

| 序号 | 论文专著名称 | 刊名 | 作者 | 年卷页码 (xx年xx卷xx页) | 发表时间 (年月日) | 通讯作者 (含共同) | 第一作者 (含共同) | 国内作者 | 知识产权是否归国内所有 |
|----|---|--|---|---------------------|---------------|-------------------------|---------------|-----------------------|-------------|
| 1 | Second-order consensus of hybrid multi-agent systems | Systems & Control Letters | Yuanshi Zheng, Qi Zhao, Jingying Ma, Long Wang | 2019年125卷51-58页 | 2019年02月22日 | Yuanshi Zheng | Yuanshi Zheng | 郑元世, 赵琦, 马婧瑛, 王龙 | 是 |
| 2 | Game-based consensus of hybrid multiagent systems | IEEE Transactions on Cybernetics | Liqi Zhou, Jian Liu, Yuanshi Zheng, Feng Xiao, Jianxiang Xi | 2023年53卷5346-5357页 | 2022年11月04日 | Jian Liu, Yuanshi Zheng | Liqi Zhou | 周丽琪, 刘健, 郑元世, 肖峰, 席建祥 | 是 |
| 3 | Bipartite consensus in networks of agents with antagonistic interactions and quantization | IEEE Transactions on Circuits and Systems-II: Express Briefs | Yunru Zhu, Sulan Li, Jingying Ma, Yuanshi Zheng | 2018年65卷2012-2016页 | 2018年03月05日 | Yuanshi Zheng | Yunru Zhu | 朱韵茹, 李素兰, 马婧瑛, 郑元世 | 是 |
| 4 | Iterative learning control for discrete-time systems with full learnability | IEEE Transactions on Neural Networks And Learning Systems | Jian Liu, Xiaoe Ruan, Yuanshi Zheng | 2022年33卷629-643页 | 2020年10月21日 | Yuanshi Zheng | Jian Liu | 刘健, 阮小娥, 郑元世 | 是 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|--|--|-------------------|----------|---------|--------------|------------------------|---|
| 5 | Limited-budget consensus design and analysis for multiagent systems with switching topologies and intermittent communications | IEEE/CA A Journal of Automatica Sinica | Le Wang, Jianxiang Xi, Bo Hou, Guangbin Liu | 2021年8卷1724-1736页 | 2021年08月 | Le Wang | Le Wang | 王乐, 席建祥, 侯博, 刘光斌 | 是 |
| 6 | Admissible consensus and consensualization for singular multi-agent systems | Springer | Jianxiang Xi, Le Wang, Xiaogang Yang, Jiuan Gao, Ruitao Lu | 2023年11卷 | 2023年 | / | Jianxiang Xi | 席建祥, 王乐, 杨小冈, 高久安, 卢瑞涛 | 是 |

六、主要完成人情况

| 姓名 | 排名 | 行政职务 | 技术职称 | 工作单位 | 完成单位 | 对本项目贡献 |
|-----|----|-------|------|----------------|----------------|--|
| 郑元世 | 1 | 无 | 教授 | 西安电子科技大学 | 西安电子科技大学 | 项目主要负责人,是代表性论文1的第一作者,代表性论文1-4的通讯作者,对三项主要科学发现均有贡献 |
| 席建祥 | 2 | 教研室主任 | 教授 | 中国人民解放军火箭军工程大学 | 中国人民解放军火箭军工程大学 | 项目主要合作者,是代表性专著6的第一作者,代表性论文2和5的作者,对主要科学发现2和3有贡献 |
| 刘健 | 3 | 无 | 副教授 | 西安电子科技大学 | 西安电子科技大学 | 项目主要合作者,是代表性论文4的第一作者,代表性论文2的通讯作者,对主要科学发现1和2有贡献 |
| 周丽琪 | 4 | 无 | 讲师 | 西安工业大学 | 西安电子科技大学 | 项目主要合作者,是代表性论文2的第一作者,对主要科学发现2有贡献 |

| | | | | | | |
|-----|---|---|-----|----------------|----------------|---|
| 王乐 | 5 | 无 | 副教授 | 中国人民解放军火箭军工程大学 | 中国人民解放军火箭军工程大学 | 项目主要合作者,是代表性论文 5 的第一作者和通讯作者,代表性专著 6 的作者,对主要科学发现 3 有贡献 |
| 朱韵茹 | 6 | 无 | 副教授 | 西安电子科技大学 | 西安电子科技大学 | 项目主要合作者,是代表性论文 3 的第一作者,对主要科学发现 3 有贡献 |

七、主要完成单位情况

| 排名 | 完成单位 | 对本项目的贡献 |
|----|----------------|---|
| 1 | 西安电子科技大学 | 项目的第一完成单位,负责项目的总体设计和组织实施,确保项目组策划和实施的顺利完成,具体贡献如下:1)提出了系统全演化周期响应空间的可学习性、动态特性的自学习性等新概念,建立了全演化周期响应空间完全可学习性与系统动态特性之间的定性关系,构建了系统动态的自学习机制,建立了系统具有自学习特性的表征因素;2)构建了具有混杂特征的无人蜂群系统及博弈对抗模型,设计了两类典型场景下协同控制策略,建立了博弈协同控制问题可解的判据准则及网络拓扑的优化机制;3)设计了非完全信息交互模式下显式/隐式协同控制协议,给出了协同群控问题可解的判别条件。 |
| 2 | 中国人民解放军火箭军工程大学 | 项目的主要合作完成单位,负责项目的部分算法设计和理论论证,确保项目顺利完成,具体贡献如下:1)验证了项目设计的无人蜂群系统博弈对抗模型,提升了无人蜂群系统的协同能力;2)设计了时变拓扑下协同控制协议,给出了有限资源模型约束下无人蜂群系统协同群控问题可解的判别条件。 |

八、完成人合作关系说明

(1) 合作基础

2017.07-今,刘健加入郑元世课题组,开展无人蜂群方向研究;

2018.09-2023.12,周丽琪在郑元世的主要指导及刘健的协助指导下攻读博士学位;

2009.08-今,朱韵茹在郑元世的协助指导下攻读博士学位,毕业后加入郑元世课题组,进一步开展合作研究;

2017.03-今,王乐在席建祥的协助指导下攻读博士学位,毕业后加入席建祥课题组,进一步开展合作研究。

(2) 合作方式

2016年7月,郑元世与席建祥通过中国控制会议相识,就无人蜂群系统的协同控制问题展开深度交流,随后一直合作开展协同群控方面的研究工作,如共

同承担国防基础科研计划、共同发表高质量学术论文等多种方式开展实质性的合作，取得了丰硕的研究成果。具体而言，郑元世与周丽琪、刘健、席建祥合作完成代表性论文 2；郑元世与朱韵茹合作完成代表性论文 3；郑元世与刘健合作完成代表性论文 4；席建祥与王乐合作完成代表性论文 5 和代表性专著 6；郑元世与刘健、周丽琪、朱韵茹共同获得 2024 年度陕西高等学校科学技术研究优秀成果一等奖；席建祥与王乐共同获得 2023 年度陕西高等学校科学技术研究优秀成果一等奖和 2021 年度陕西高等学校科学技术研究优秀成果二等奖；郑元世与席建祥、王乐、刘健共同申报的国防基础科研计划获得立项。