

# 2025 年度山东省自动化学会科学技术奖

## 推荐项目公示

### 一、项目名称

分层决策系统的最优控制与博弈理论研究

### 二、推荐者及推荐意见

**推荐者：**魏新江，泰山学院二级教授，2023 年山东省科学技术奖自然科学二等奖首位，获奖项目名称：多源异质干扰系统的精细抗干扰控制。所属学科专业：控制理论与控制工程。

**推荐意见：**本人经认真审阅该项目的研究内容与相关成果，认为该成果选题前沿明确、理论体系完整，具有较高的学术价值和创新性。

该项目围绕分层决策系统中的混合  $H_2/H_\infty$  控制与博弈问题，系统揭示了分层决策、鲁棒控制与博弈论之间的内在联系，在理论建模、可解性分析与方法拓展等方面取得了一系列原创性成果。项目突破了传统混合  $H_2/H_\infty$  控制对正定加权矩阵的限制，提出了基于正则 Riccati 方程的标准解理论，完善了相关控制理论体系；同时，将分层博弈思想系统引入鲁棒控制问题，构建了在  $H_\infty$  约束下的分层反馈控制框架，给出了明确的可解条件和解析表达，具有较强的理论深度。

此外，项目进一步考虑了不完全信息与非对称观测条件，拓展了分层决策系统的控制与估计理论，并将在线强化学习方法引入分层博弈控制问题，为未知或不确定环境下的鲁棒智能决策提供了新的理论路径。相关成果在国际主流期刊和会议上发表，学术影响力较好，体现了持续、系统的研究积累。

总体来看，该项目研究目标明确、创新点突出、理论贡献清晰，达到了自然科学奖一等奖的评价标准。本人同意并郑重推荐该成果申报山东省自动化学会科学技术奖（自然科学奖）。

推荐专家：魏新江

### 三、推荐等级

山东省自动化学会科学技术奖自然科学奖一等奖（2025 年）

## 四、项目简介

复杂工程系统普遍存在多决策主体、信息不完全及外部不确定扰动等特征，其决策过程往往呈现明显的层级结构。如何在分层决策框架下实现性能优化与鲁棒性保障，是现代控制理论与智能决策领域的核心科学问题之一。围绕分层决策系统中的鲁棒控制与智能学习问题，本成果系统研究了混合  $H_2/H_\infty$  控制、博弈论方法与强化学习理论的统一建模与分析，形成了具有内在一致性的理论框架。

在理论建模方面，成果从分层决策视角出发，将控制输入与外部扰动、多个决策主体之间的交互统一刻画为具有层级关系的 Nash 博弈与 Stackelberg 博弈模型，揭示了混合  $H_2/H_\infty$  控制问题在博弈论意义下的本质结构。针对传统混合  $H_2/H_\infty$  控制中解的非标准性与可解性受限问题，成果突破了控制加权矩阵正定性假设，提出了基于正则 Riccati 方程的标准解理论，给出了控制策略与扰动对策的显式解析表达，完善了混合  $H_2/H_\infty$  控制的理论体系。

在分层博弈控制理论方面，成果系统研究了多层级决策系统中的 Stackelberg 博弈问题，构建了在  $H_\infty$  约束下的分层反馈控制框架。针对多层级、多决策者耦合导致的复杂性，提出了基于 Pontryagin 极大值原理与前后向差分（或微分）方程的分析方法，推导了分层博弈系统的必要与充分可解条件，并建立了层级决策下控制与估计的分离原理，解决了长期以来分层博弈系统中反馈增益难以显式刻画的问题。

在信息结构与不确定性处理方面，成果进一步考虑了不完全观测与非对称信息条件下的分层决策系统，针对传统分离原理失效的情形，构建了适用于多信息结构的最优估计与控制方法，揭示了信息不对称对博弈均衡结构和系统鲁棒性的内在影响，拓展了分层决策控制理论在复杂信息环境下的适用范围。

在方法拓展方面，成果将在线强化学习思想引入分层博弈与混合  $H_2/H_\infty$  控制问题，提出无需精确系统模型的在线学习算法，实现了耦合 Hamilton - Jacobi 方程与 Riccati 方程的在线近似求解，证明了所提学习算法在闭环系统中的稳定性，为分层决策系统在未知或不确定环境下的自适应控制提供了理论支撑。

综上，本成果在分层决策系统的混合  $H_2/H_\infty$  博弈控制理论、标准解方法、信息结构分析及学习型控制等方面取得了系统性原创成果，深化了鲁棒控制与博弈论、强化学习之间的内在联系，为复杂自动化系统的安全、可靠与智能决策提供

了坚实的理论基础，具有重要的学术价值和推广意义。

## 五、代表性论文专著目录

- [1] Jing, Z., **Li, X.\***, Ju, P., & Zhang, H. (2024) .Optimal control and filtering for hierarchical decision problems with  $H_\infty$  constraint based on Stackelberg strategy. IEEE Transactions on Automatic Control, 69(9), 6238-6245.
- [2] **Li, X.**, Xu, J., Wang, W.\*, & Zhang, H. (2018). Mixed  $H_2/H_\infty$  control for discrete-time systems with input delay. IET Control Theory and Applications, 12(16), 2221-2231.
- [3] **Li, X.**, Wang, W.\*, Xu, J., & Zhang, H. (2019). Stackelberg game approach to mixed  $H_2/H_\infty$  problem for continuous-time system. Journal of Systems Science and Complexity, 32(5): 1324-1339.
- [4] **Li, X.\***, Bai, M., Zhang, H., Jing, Z., Ju, P., & Guo, Z. (2022). Incentive Stackelberg game for  $H_\infty$ -constrained multi-hierarchy systems under observation information. IET Control Theory and Applications, 16(18): 1821-1833.
- [5] **Li, X.**, Xu, J., & Zhang, H.\* (2021). Standard solution to mixed  $H_2/H_\infty$  control with regular Riccati equation. IET Control Theory and Applications, 14(20): 3643-3651.

## 六、主要完成人（“主要完成人情况”摘自“主要完成人情况表”中的部分内容，公示姓名、排名、行政职务、技术职称、工作单位、完成单位、对本项目贡献）

1. **李小倩**：排名 1 ；副教授；工作单位：泰山学院；完成单位：泰山学院。

项目负责人，负责整个项目的设计和规划、研究方向与研究内容的确定、指导与实施，组建研究队伍、培养人才。对具有输入时滞的随机系统 Stackelberg 博弈控制问题展开深入研究，提出了该问题的完整解决方案；完成了极大值原理的建立、时滞引起的非因果性的处理、随机正倒向方程的求解等；提出了具有输入时滞的随机系统 Stackelberg 博弈控制应用到混合  $H_2/H_\infty$  最优控制问题以及强化学习领域的解决方案。对本项目的重要科学发现做出了创造性贡献，是所有代表性论文的通讯作者或者第一作者。

2. **鞠培军**：排名 2；教授；工作单位：泰山学院；完成单位：泰山学院。

项目主要参与人，研究了具有输入时滞的连续时间系统的最优控制问题，给出控制器结构并同时得到控制器结构的策略。主要学术贡献为：对本项目的第一、

二、四项科学发现做出了重要贡献。是代表性论文 1、4 的合作者。佐证材料为代表性论文 1、4。

3. **国忠金**；排名：3；教授；工作单位：泰山学院；完成单位：泰山学院。

项目主要参与人，给出激励型 Stackelberg 策略在多智能体系统中的模型，对多个控制器的结构以及存在条件进行了论证。主要学术贡献为：是主要科学发现一、二的主要贡献者。是代表性论文专著 4 的合作者。佐证材料为代表性论文 4。

## 七、主要完成单位（“主要完成人单位”摘自“主要完成单位情况表”中的部分内容，公示单位名称、排名、对本项目主要学术贡献）

该项目泰山学院为主要完成单位。泰山学院对本项目的所有科学问题做出了贡献，在项目的整体学术布局、基础理论研究组织与持续创新能力建设中发挥了核心支撑作用。学校高度重视智能控制与人工智能相关方向的学科发展，将其作为新工科建设的重要组成部分，持续推动控制科学、信息工程与系统科学等学科的交叉融合，为本项目所涉及的分层决策系统、随机博弈控制与鲁棒优化等基础性科学问题的系统研究提供了稳定而持续的学术环境与制度保障。在研究实施过程中，学校依托完善的科研平台条件与计算分析环境，有效支撑了项目在理论建模、数学分析、方法推导与数值验证等关键学术环节的深入开展，促进了相关控制理论与博弈方法的系统化发展。同时，学校通过科研创新团队建设与学术梯队培育机制，在研究方向凝练、青年学者培养及学术合作组织等方面形成了良性支撑体系，保障了项目研究的连续性与原创性。上述举措不仅推动了本项目在随机分层博弈控制理论与方法方面取得系统性学术成果，也为相关领域的后续研究与人才培养奠定了坚实基础，体现了完成单位在基础研究组织与学术创新体系建设中的重要学术贡献。