

2026 年度拟提名陕西省自然科学奖项目公示内容

一、项目名称

自主无人系统预测控制理论及应用

二、提名者及提名意见

提名者：中共陕西省委军民融合发展委员会办公室

提名意见：自主无人系统是国际科技竞争的战略制高点，其预测控制面临控制结构复杂、多体协同复杂度高、优化调度非周期三重瓶颈，经典预测控制理论难以应对上述挑战。

该项目围绕自主无人系统预测控制关键科学问题开展系统研究，从单体层面、多体层面、系统层级三个方面取得了一系列原创性科学发现：（1）揭示了单体欠驱动系统预测控制可行域萎缩的根源，建立了非线性网络化自主无人系统预测控制的鲁棒镇定理论，突破了控制结构复杂导致预测控制器难以设计的技术瓶颈；

（2）建立了多体系统分布式预测控制与集中式预测控制的最优性等价条件，突破了“最优性缺失”的长期瓶颈，建立了大规模无中心集群的优化协同控制理论；

（3）揭示了系统层事件触发优化调度机制与闭环稳定性的耦合规律，发现了非周期调度的天然防御属性，建立了资源受限与攻击威胁下的安全弹性预测控制理论。研究成果发表于 IEEE Trans. Automatic Control、Automatica 等控制领域顶级期刊，被国内外众多院士和著名控制专家广泛引用和正面评价，应用于自主无人系统重点装备，取得重要的经济和社会效益。该项目成果起点高，创新性强，为自主无人系统预测控制提供了全新理论和重要的设计方法。

成果材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省自然科学奖提名条件。特提名为陕西省自然科学一等奖。

三、项目简介

以无人艇、无人车、无人机为代表的海陆空自主无人系统，正深刻重塑国防安全与国计民生格局。先进控制对保障自主无人系统高性能作业起着决定性作用。预测控制作为国际自动控制联合会评选的“最具影响力的高级控制方法”，凭借滚动性能优化与多约束驾驭能力，是实现自主无人系统在复杂工况下高性能控制不可替代的引擎。欧盟实施了大规模自主无人系统的预测控制研究计划，波士顿动力公司研发预测控制技术用以大幅提升动态机器人的运动能力，特别是2024年3月《Nature》封面报道了预测控制在高速竞速中击败人类顶级飞手。自主无人系统预测控制是国际学术前沿和大国间科技博弈的战略制高点。

自主无人系统预测控制面临三大挑战。**第一，单体控制结构非常规。**为满足复杂作业需求，水下航行器、固定翼无人机等多采用欠驱动非线性构型，可控性分析与控制器设计面临本质困难；同时，遥操作机器人、网联车等通过无线网络连接控制器与执行机构，形成复杂的网络化控制结构。**第二，多体协同复杂度高。**自主无人系统正从单体向大规模集群迅猛发展，规模增大引发系统行为涌现与协同调控难度急剧攀升，优化控制复杂度呈指数增长。**第三，系统优化调度非周期。**在系统层级，自主无人系统为实现持续节能航行、抵御恶意攻击等功能，需要按需非周期实施控制优化和资源调度，导致控制系统异常复杂。

经典预测控制理论的有效性高度依赖**标准控制结构、集中控制架构及周期性滚动优化调度**三项隐含前提，导致自主无人系统闭环稳定性难以保证、控制精度显著退化等深层理论瓶颈，长期制约着该理论向工程实际的纵深拓展。为突破上述假设的桎梏，该项目从单体控制、多体优化协同与系统层级调度优化等维度凝练出三个关键科学问题：在单体非常规控制结构下如何建立保障闭环稳定性的预测控制理论？在系统规模增长时如何设计兼具可扩展性与全局最优性的分布式协同框架？在系统层级如何构建资源适配的弹性调度策略以实现效能与安全的动态平衡？攻克上述难题，有望为自主无人系统预测控制奠定新的理论基础。

自2013年起，该项目在国家优青、陕西省杰青等项目支持下，围绕自主无人系统预测控制的关键科学问题，发现了适应自主无人系统控制结构的预测控制新范式，厘清了自主无人集群分布式预测控制的设计机理，揭示了事件触发滚动优化调度机制对闭环控制性能的影响规律，推动了自主无人系统预测控制理论的发展与应用。重要科学发现如下：

发现点一（单体层面）：发现了适应欠驱动和网络化控制结构的预测控制新范式，创立了非线性网络化自主无人系统预测控制理论。发现了自主无人系统的欠驱动控制结构和外部约束对预测控制器设计的影响机理，提出了基于同胚变换

的保结构映射方法,将欠驱动无人系统的可行域扩张问题转化为虚拟空间中的标准约束预测控制问题,建立了欠驱动系统稳定预测控制新方法,破解了非完整约束导致经典预测控制理论失效的难题;提出了利用预测控制信息补偿通信约束的新机制,揭示了通信时延/丢包与控制品质退化的耦合规律,给出了保障非线性网络化系统预测控制稳定的最大允许丢包率与时延上界,建立了网络通信畸变下的鲁棒镇定理论,实现了从被动适应通信畸变到主动预测补偿的范式转变。

发现点二(多体层面):厘清了大规模自主无人集群分布式预测控制实现全局优化一致性的设计机理,建立了复杂环境下性能增强的分布式协同控制方法。提出了基于分布式预测控制实现大规模集群系统优化一致性和协同控制的设计框架,建立了分布式预测控制与集中式预测控制在最优性上的数学等价条件,保障了自主无人集群系统全局控制约束的有效满足,突破了分布式预测控制难以达到全局最优目标的技术瓶颈;提出了适应外部扰动和通信约束的分布式滚动时域协同控制方法,建立了保障无人集群编队增益稳定性的设计准则,显著减少大规模无人集群优化协同控制的计算复杂度,增强了集群系统分布式协同控制的品质与环境适应性。

发现点三(系统层级):揭示了事件触发滚动优化调度机制影响闭环系统控制性能与抗攻击能力的内在规律,建立了自主无人系统事件触发预测控制新方法。阐明了非周期滚动优化对闭环系统控制性能的影响机理,创建了基于事件触发优化调度机制的预测控制理论,建立了事件触发条件与闭环稳定性的内在关系,给出了保证渐进稳定的触发间隔判据,突破了自主无人系统在计算资源受限时难以保障控制性能的技术瓶颈;发现了非周期通信使网络攻击成功率显著下降的天然防御属性,提出了自触发输入重构的抗攻击调度框架,建立了事件触发弹性预测控制方法,在显著减少计算与通信资源消耗的同时,增强了自主无人系统在对抗环境下的生存能力,将事件触发从“节能工具”升级为无人系统的“安全机制”。

5篇代表性论文均发表于控制领域TOP期刊IEEE Trans. Automatic Control和Automatica,出版学术专著3部。5篇代表论文WOS被引1059次,SCI他引769次,单篇最高SCI他引326次,ESI高被引论文3篇,ESI热点论文1篇,被Proceedings of the IEEE等多篇权威期刊综述收录为重要研究进展,受到了国内外众多院士和IEEE/IFAC Fellow的正面引用和高度评价,被评价为“新颖的模型预测控制方法”、“计算资源高效优化的控制方法”、“分布式模型预测控制的典型方法”。提出的预测控制理论及方法应用于头部研究所和重点企业的多型重点自主无人系统产品,产生了重要的经济和社会效益。

二、客观评价

(1) **IEEE Fellow、澳大利亚昆士兰科技大学教授 Daniel E. Quevedo** 在著名期刊IET Control Theory & Applications (2017) 论文中评价【代表性论文1】:“提出一种基于资源高效优化的控制方法”。

原文: “Resource efficient optimisation based control strategies are developed ... in

[10] for systems with bounded disturbances.”

(2) **IEEE Fellow、IFAC Fellow、新加坡工程院院士、南洋理工大学教授 Lihua Xie** 在国际控制领域顶级期刊 *IEEE Transaction on Automatic Control* (2018) 论文中评价【代表性论文 2】：“是一种共享邻域信息的分布式模型预测控制的**典型方法**”。

原文：“**A typical solution** is DMPC with assumed neighboring information.”

(3) 美国工程院院士，加州大学伯克利分校 **J. Karl Hedrick** 教授在著名期刊 *IEEE Transactions on Control Systems Technology* (2019) 论文中指出【代表性论文 2】：“提出的鲁棒约束是解决他们控制方法鲁棒性问题的**潜在方法**”。

原文：“We notice that **a robust constraint proposed in [39] might be integrated into problem Fi to address the robustness issue.**”

(4) **IFAC Fellow，IFAC 前主席，世界著名预测控制专家，德国斯图加特大学 Frank Allgöwer** 教授将【代表性论文 3】作为模型预测编队控制领域的代表性文献进行综述，指出其“提出了一种**新的增益稳定性概念**，拓展了传统队列的串稳定性定义”。

原文：“In [158], an MPC algorithm for a vehicle platoon is designed which can ensure the named gain stability (**a new concept proposed in [158], which is an extension of platoon string stability**) .”

(5) 中国科学院院士段广仁教授评价【代表性论文 4】：“设计了一种**新颖的模型预测控制方法**对两受限输入欠驱动空间飞行器实现了**渐进点稳定控制**”。

原文：“In the recent work, the model predictive stabilization problem of a class of under-actuated rigid spacecraft with two bounded control torques is considered, and **a novel model predictive control algorithm** is designed to **asymptotically stabilize the system.**”

(6) **IEEE Fellow、瑞典皇家工程科学院院士 Karl H. Johansson** 教授在著名期刊 *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* (2021) 论文中，将【代表性论文 5】作为平衡计算效率与控制性能的事件触发模型预测控制的示例性方法，并指出“该工作通过事件触发能**大量减少计算量**”。

原文：“To improve computational efficiency without sacrificing control performance, event-triggered MPC methods as **an extension of the MPC** have been developed. While maintaining the originality of MPC, it can **significantly reduce computational cost** by allowing control updates only when the events are triggered.”

(7) 欧洲科学院院士、国际信息处理联合会会士、苏黎世联邦理工学院副校长

Lothar Thiele 教授在著名期刊 IEEE Control Systems Letters (2021) 论文中评价【代表性论文 5】：“利用 Min - Max 优化实现了对最坏情形控制性能的优化，并且能够处理非线性系统中的一般不确定性。”

原文：“Reference [11] used a min-max optimization to optimize the worst-case performance. it is capable of **handling general uncertainties in nonlinear systems,.....**”

(8) 中国工程院外籍院士、加拿大皇家科学院院士、加拿大工程院院士、IEEE Fellow、加拿大滑铁卢大学 **Xuemin Shen** 教授在著名期刊 IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (2022) 论文中评价【代表性论文 5】：“将极小极大模型预测控制与时间离散的自触发机制相结合，以利于其在低计算负担和低通信负担下的实现。”

原文：“Moreover, min-max MPC has also been combined with time-discrete self-triggered mechanisms to **facilitate their implementation with low-computation and low-communication burden.**”

三、代表性论文专著目录（不超过 8 条，其中代表性论文不超过 5 篇，代表性专著不超过 3 部）

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	通讯 作者	第一 作者	国内作 者	他引 总次 数	检索 数据 库	知识产 权是否 归国内 所有
1	Event-triggered robust model predictive control of continuous-time nonlinear systems	Automatica	Huiping Li, Yang Shi	2014 年 50 卷 1507-1513 页	2014 年 5 月	Huiping Li	Huiping Li	李慧平	326	SCI	是
2	Robust distributed model predictive control of constrained continuous-time nonlinear systems: A robustness constraint approach	IEEE Transactions on Automatic Control	Huiping Li, Yang Shi	2014 年 59 卷 1673-1678 页	2014 年 6 月	Huiping Li	Huiping Li	李慧平	143	SCI	是

3	Distributed receding horizon control of constrained nonlinear vehicle formations with guaranteed gamma-gain stability	Automatica	Huiping Li, Yang Shi, Weisheng Yan	2016 年 68 卷 148-154 页	2016 年 6 月	Huiping Li, Weisheng Yan, Yang Shi	Huiping Li	李慧平, 严卫生	88	SCI	是
4	Continuous-time model predictive control of under-actuated spacecraft with bounded control torques	Automatica	Huiping Li, Weisheng Yan, Yang Shi	2016 年 75 卷 144-153 页	2017 年 1 月	Huiping Li	Huiping Li	李慧平, 严卫生	107	SCI	是
5	Robust self-triggered min-max model predictive control for discrete-time nonlinear systems	Automatica	Changxin Liu, Huiping Li, Jian Gao, Demin Xu	2017 年 89 卷 333-339 页	2018 年 3 月	Huiping Li	Changxin Liu	刘昌鑫, 李慧平, 高剑, 徐德民	105	SCI	是

6	事件触发弹性预测控制方法及应用	科学出版社	贺宁， 李慧平		20 24 年 6 月	贺宁	贺宁	贺宁， 李慧平			是
7	微小型无人水下航行器集群协同理论与应用	清华大学出版社	梁洪涛， 喻俊志， 李慧平		20 24 年 7 月	梁洪涛	梁洪涛	梁洪涛， 喻俊志， 李慧平			是
8	Robust receding horizon control for networked and distributed nonlinear systems	Springer	Huiping Li, Yang Shi		20 16 年 10 月	Huiping Li	Huiping Li	李慧平			是
合 计									769	SCI	是

四、主要完成人情况（不超过 6 人）

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
李慧平	1	无	正高	西北工业大学	西北工业大学	项目负责人，主持了该项目的研究工作，是代表性论著 1-4 和 8 的第一作者，代表性论著 5 的通信作者，代表性论著 6-7 的主要作者，对科学发现点 1-3 均做出重要贡献。①发现了适应欠驱动和网络化控制结构的预测控制新范式，创立了非线性网络化无人系统预测控制理论；②厘清了大规模无人集群分布式预测控制实现全局优化一致性的设计机理，提出了大规模集群系统优化一致性和协同控制的设计框架；③阐明了非周期滚动优化对闭环系统控制性能的影响机理，提出了基于事件触发优化调度机制的预测控制方法。
贺宁	2	院长助理	正高	西安建筑科技大学	西安建筑科技大学	项目主要完成人，对科学发现点 1、3 做出重要贡献，是代表性论著 6 的第一作者。①提出了利用预测控制信息补偿通信约束的新机制，建立了网络通信畸变下的鲁棒镇定理论；②发现了非周期通信使网络攻击成功率显著下降的天然防御属性，提出了自触发

						输入重构的抗攻击调度框架，建立了事件触发弹性预测控制方法。
刘昌鑫	3	无	正高	华东理工大学	西北工业大学	项目主要完成人，对科学发现点 2、3 做出重要贡献，是代表性论文 5 的第一作者。①建立了分布式预测控制与集中式预测控制在最优性上的数学等价条件；②建立了事件触发条件与闭环稳定性的内在关系，提出了无人系统事件触发预测控制新方法。
梁洪涛	4	无	副高	陕西师范大学	陕西师范大学	项目主要完成人，对科学发现点 2 做出重要贡献，是代表性论著 7 的第一作者。①提出了适应外部扰动的分布式滚动时域协同控制方法，显著减少了大规模无人集群优化协同控制的计算复杂度，建立了性能增强的集群系统分布式协同控制方法。
严卫生	5	无	正高	西北工业大学	西北工业大学	项目主要完成人，对科学发现点 1、2 做出重要贡献，是代表性论著 3-4 的作者。①提出了基于同胚变换的保结构映射方法；②设计了保障了无人集群系统全局控制约束满足和实现一致性的分布式预测控制方法。
高剑	6	无	正高	西北工业大学	西北工业大学	项目主要完成人，对科学发现点 3 做出重要贡献，是代表性论文 5 的作者。①建立了保证渐进稳定的触发

						间隔判据，突破了无人系统在计算资源受限时难以保障控制性能的技术瓶颈。
--	--	--	--	--	--	------------------------------------

五、主要完成单位情况（不超过 3 个）

完成单位	排名	对本项目主要贡献（限 600 字）
西北工业大学	1	1. 发现了适应欠驱动和网络化控制结构的预测控制新范式，创立了非线性网络化无人系统预测控制理论。 2. 建立了基于分布式预测控制实现大规模集群系统优化一致性和协同控制的设计框架，给出了分布式预测控制与集中式预测控制在最优性上的数学等价条件，提出了适应通信约束的分布式预测控制方法。 3. 阐明了非周期滚动优化对闭环系统控制性能的影响机理，创建了基于事件触发优化调度机制的预测控制理论，建立了事件触发条件与闭环稳定性的内在关系，给出了保证渐进稳定的触发间隔判据。 同时，本单位为项目提供了主要的科研经费、科研用房等支持；提供了主要的人力资源和优质的工作场所；为该项目提供了重要的计算平台和软硬件资源。
西安建筑科技大学	2	1. 提出了利用预测控制信息补偿通信约束的新机制，建立了网络通信畸变下的鲁棒镇定理论。 2. 发现了非周期通信使网络攻击成功率显著下降的天然防御属性，提出了自触发输入重构的抗攻击调度框架，建立了事件触发弹性预测控制方法。 该单位为项目提供了重要的科研经费、科研用房等支持，提供了重要的人力资源和优质的工作场所以及必要的计算平台和软硬件资源。
陕西师范大学	3	1. 提出适应外部扰动的分布式协同控制方法，显著减少了大规模无人集群优化协同控制的计算复杂度，建立了性能增强的集群系统分布式协同控制方法。 该单位为项目提供了重要的科研经费、科研用房等支持，提供了部分人力资源和优质的工作场所以及必要的计算平台和软硬件资源。

六、完成人合作关系说明

项目第一完成人李慧平与主要完成人刘昌鑫、严卫生、高剑曾隶属于西北工业大学水下信息处理与控制国家级重点实验室，徐德民院士曾任该实验室主任。项目完成人李慧平的硕士导师以及严卫生、高剑、刘昌鑫的博士导师均为徐德民

院士。项目第一完成人李慧平与第二完成人贺宁在加拿大攻读博士学位期间相识，均开展模型预测控制方向的研究，并与其回国任教后开展了深入系统的合作研究。项目第一完成人李慧平与主要完成人梁洪涛均毕业西北工业大学航海学院自动控制系，主要研究方向均包括水下航行器控制，项目第一完成人李慧平与其入职陕西师范大学后持续保持实质性合作。

2013 年 10 月，第一完成人李慧平加入西北工业大学，与主要完成人严卫生、高剑开展无人系统优化控制方面的研究工作，合作发表多篇预测控制方面的学术论文，其中，李慧平与严卫生合作发表代表性论著 3 和 4；李慧平与高剑合作发表代表性论著 5。

2016 年 5 月，第一完成人李慧平协助徐德民院士指导主要完成人刘昌鑫开展博士研究工作，合作发表多篇预测控制方面的学术论文，包括代表性论著 5。

2017 年 7 月，第二完成人贺宁入职西安建筑科技大学后，与第一完成人李慧平在预测控制方向开展深入和持续性的合作研究，合作发表多篇论著，包括代表性论著 6。

2018 年 5 月，第一完成人李慧平与主要完成人梁洪涛在水下航行器协同控制方面开展深入合作，此后合作发表多篇学术论著，包括代表性论著 7。