

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

面向航天器操控的物理人机交互方法

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：

物理人机交互为人类向机器人系统赋能提供了有效手段。项目组历经 6 年多时间，研究面向航天器操控的物理人机交互系统的控制与优化问题，突破时延影响下系统闭环稳定分析方法依赖控制器参数的思路，发现阶次-时延联合表征的大时延响应规律，提出融合结构特征的 ML 稳定性分析方法，提出了数据-模型双驱动状态预报方法，建立了面向航天器操控的物理人机交互快速迭代模型，提出了数据-模型双驱动的在线人机混合决策机制，提出动态约束安全人机交互控制方法，以及欠传感器条件下协作行为联合约束机制系列科学发现，在 IEEE 汇刊上发表了多篇学术论文。该成果在理论和技术层面解决了面向航天器操控的物理人机交互系统的控制保守和传感冗余等典型难题，得到了国内外专家的广泛关注，得到国内外著名专家学者的积极评价。成果在推动面向航天器操控的物理人机交互系统的理论与设计方面有贡献显著。严格对照陕西省自然科学奖授奖条件，该成果符合陕西省自然科学奖二等奖的成果要求。

提名该项目为陕西省自然科学奖二等奖。

三、项目简介

人在地面操控在轨服务航天器作业面临非平稳星地时延条件下回路状态失稳、非可靠数据通信下地面预报过程失真、以及非合作突发任务中行为失准的全面挑战。掌握面向航天器作业的物理人机交互方法，是实现航天器操控回路“稳”、预报“真”和执行“准”的基础。在不改变固有系统结构、通讯链路和星上载荷前提下，如何提高物理人机交互的时延耐受、预报仿真以及风险作业能力，胜任航天器作业任务，是我国航天器操控领域痛点问题。

该项目自 2015 年起在国家自然科学基金项目和军委科技委国防科技创新特区项目资助下，围绕航天器操控的物理人机交互系统“失稳、失真和失准”问题，率先开展了闭环控制系统阶次优化、人机混合策略优化、以及动态运动边界优化方法研究，主要发现点如下：

- 1、针对回路时延耐受机理不清问题，构建了时延显性表征的严格 Mittag-Leffler (ML) 有界分析框架，构建了变阶次流形的时频-马尔科夫决策过程 (Markov Decision Process, MDP) 联合响应模型，提出了近似动态规划的阶次优化控制方法，解决了在星地回路大时延条件下以物理人机交互方式操控机械臂的可行性难题，为时延条件下物理人机交互系统稳定性优化设计提供了理论依据。

2、针对面向航天器操控的物理人机交互中状态预测机制缺失问题，构建了离散事件触发的高精度人机交互模型，提出了数据-模型双驱动的人机混合决策方法，实现了大采样间隔非均匀输出条件下物理人机交互过程的运动状态预测，精准预报物理人机交互响应结果，奠定了非连续时间人机交互状态预测理论基础。

3、针对高风险任务中协作响应安全准则欠缺问题，提出物理人机交互过程的物理解析与统计学习混合表征方法，构建面向运动整形的动力学低维描述模型，提出少量传感器的鲁棒精确状态实时解算方法，建立运动交互信息到高维交互状态的反演机制，设计了协作响应受限下安全状态边界表征方法，提出欠传感器条件下人机交互行为约束机制，揭示物理几何约束和感知测量有效融合传感器最少使用机理。

该项目在领域顶级期刊发表 SCI 论文 44 篇，其中 ESI 高被引论文 2 篇，相关成果获得了 2012 年机电领域著名国际会议 IEEE/ASME AIM 最优学生论文，以及 2014 年 ASME 美国动力学与控制分会最佳年度学生机电论文奖；5 篇代表作发表在中科院 TOP 期刊 IEEE Transactions on Industrial Electronics、IEEE/ASME Transactions on Mechatronics、和 IEEE Transactions on Cybernetics，2 篇入选 ESI 高被引论文。相关工作受到了国内外学者积极引用和高度评价，SCIE 他引 143 次。IEEE Fellow，得克萨斯农工大学 Tingwen Huang 教授在论文（引文序号 1）中评价该科学发现是集成传感器、通信及控制技术的物理信息系统代表性研究（CYBER-PHYSICAL systems have been extensively studied from both academia and industry with the integration of sensor, communication, and control technique）。IEEE Fellow，意大利罗马大学 Vannozzi 教授在其综述文章中（引文序号 3）评价该科学发现中考虑人机交互约束特征的姿态估计方法为先锋应用（A pioneering application about body orientation using IMUs was given in the definition of human whole body pose during bicycle riding by considering the constraints characterising human - bicycle interaction [331]）。中国自动化学会会士，同济大学特聘陈虹教授在论文（引文序号 6）中评价该科学发现能够通过训练基于 AI 的逻辑评判来辅助甚至取代人类提供的交互反馈（Related research explores accelerating policy updates through efficient feedback processing or training AI-based logical judges to assist or even replace humans in providing feedback [88]）。IEEE Fellow，北京理工大学夏元清教授在论文（引文序号 7）评价科学发现为有力的获取期望性能的控制器的（For the disturbances that are not treated effectively, instead of a PD controller, a more powerful controller should be introduced, if one wants to obtain more desired closed-loop performance. For example, an adaptive neural-network control [22] is designed to overcome the uncertainties）。

该项目成果成功应用于我国高轨道航天器的地面系统转阶段测试和高轨道飞行验证，支持我国首个数据驱动型集群飞行任务的地面集成联试，完成了该飞行系统的人机交互变阶次优化控制半物理仿真试验验证，为集群飞行系统转阶段起到了关键作用，并为后续工作提供了重要的技术支撑；应用于高沉浸度式自行

车运动、滑雪运动模拟器研制，高维人机物理交互状态感知方法保障了运动模拟器对各类人机协同运动过程的信息高效融合与快速分析；应用于六维触觉力反馈装置的欠传感器力感知、控制与交互，交互装置具有运动空间大、响应速度快、触控融合以及交互灵敏特征，填补了我国桌面式六自由度触觉-力觉融合物理人机交互装置的空白。

该项目的第一、第二完成人均依靠该项目成果获批国家自然科学基金优秀青年科学基金；该项目培养了西北工业大学翱翔青年学者 2 人次，翱翔新星 3 人次。

四、客观评价

该项目成果由完成人团队独立发现，并创建了面向航天器操控的物理人机交互体系，开拓了物理人机交互的发展新方向，对物理人机交互的方法优化、装置研制和场景应用具有革命性引领和推动作用，国内外学者受牵引开展了深入研究，产生了巨大的学术影响，并获得了大量的积极学术评价。该项目成果的引用者来自全球 20 余个国家和地区，引用期刊包括 IEEE 汇刊及感知、控制、交互等相关领域的旗舰级刊物。

重要科学发现 1：大时延变阶次稳定性理论的成果形成 1 篇中科院 TOP 期刊 IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 论文（代表性论文 1）。IEEE Fellow，得克萨斯农工大学 Tingwen Huang 教授在论文（引文序号 1）中评价该科学发现是集成传感器、通信及控制技术的物理信息系统代表性研究（CYBER-PHYSICAL systems have been extensively studied from both academia and industry with the integration of sensor, communication, and control technique [1]，参考文献[1]即为代表性论文 1）。IEEE Fellow，哈尔滨工业大学 Guo-Ping Liu 教授在论文（引文需要 2）中评价该科学发现能够克服遥操作信息物理系统的不确定性和外部扰动影响（Reference [3] proposed a fractional-order sliding mode control to overcome the model uncertainties and external disturbances of tele-operated CPSs，参考文献[3]即为代表性论文 1）。

重要科学发现 2：数据-模型双驱动状态预报的人交互行为测量与感知成果形成了 1 篇中科院 TOP 期刊 IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 论文（代表性论文 2）。IEEE Fellow，意大利罗马大学 Vannozzi 教授在其综述文章中（引文序号 3）评价该科学发现中考虑人机交互约束特征的姿态估计方法为先锋应用（A pioneering application about body orientation using IMUs was given in the definition of human whole body pose during bicycle riding by considering the constraints characterising human - bicycle interaction [331]，参考文献[331]即为代表性论文 2）。IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems 前主编，英国曼彻斯特大学 Cangelosi 教授在论文（引文序号 4）中用 7 行篇幅系统性介绍科学发现的物理几何约束的少量传感器设计（Zhang et al. [23] presented a computational scheme to estimate the human whole-body pose with application to bicycle riding using a small set of wearable sensors. Their estimation scheme is built

on the fusion of gyroscopes, accelerometers, force sensors, and physical rider-bicycle interaction constraints through an extended Kalman filter (EKF) design, 参考文献[23]即为代表性论文 2)。

数据-模型双驱动状态预报的离散事件驱动人机交互控制方法成果形成了 1 篇中科院 TOP 期刊 IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs 论文 (代表性论文 3)。IEEE Transactions on Industrial Electronics 期刊 AE, 兰州大学金龙教授在论文 (引文序号 5) 评价该科学发现的采样足够小条件下, 离散形式能够高精度地近似连续动力学模型 (Furthermore, the discretized form of the consensus system (8) through the Euler forward difference formula is designed as [36], ... As the sampling interval is small enough, this discretized formula is able to accurately approximate the continuous dynamics model, 参考文献[16]即为代表性论文 3)。

数据-模型双驱动状态预报的人机混合决策成果形成了 1 篇中科院 TOP 期刊 IEEE Transactions on Industrial Electronics 论文 (代表性论文 4)。中国自动化学会会士, 同济大学特聘陈虹教授在论文 (引文序号 6) 中评价该科学发现能够通过训练基于 AI 的逻辑评判来辅助甚至取代人类提供的交互反馈 (Related research explores accelerating policy updates through efficient feedback processing or training AI-based logical judges to assist or even replace humans in providing feedback [88], 参考文献[88]即为代表论文 4)。

重要科学发现 3: 动态约束安全人机交互控制方法的部分成果发表在 IEEE Transactions on Cybernetics (代表性论文 5)。IEEE Fellow, 北京理工大学夏元清教授在论文 (引文序号 7) 评价科学发现为有力的获取期望性能的控制 (For the disturbances that are not treated effectively, instead of a PD controller, a more powerful controller should be introduced, if one wants to obtain more desired closed-loop performance. For example, an adaptive neural-network control [22] is designed to overcome the uncertainties, 参考文献[22]即为代表性论文 5)。

国家高层次人才计划入选者, 西北工业大学岳晓奎教授的论文 (引文序号 8) 评价该科学发现能降低力矩限制, 并可以有效估计期望力矩与限制值之间的比例 (An adaptive control law was designed for reducing the impacts of torque limitation, and the adaptive law was used to estimate the ration of the desired torque to the limited value [13], 参考文献[13]即为代表性论文 5)。

少量传感器的物理人机交互系统技术设计相关成果获评 2012 年机电领域著名国际会议 IEEE/ASME AIM 最优学生论文; 物理解析与统计学习混合模型相关成果获评 2014 年 ASME 美国动力学与控制分会最佳年度学生机电论文奖。

(二) 该项目成果应用场景丰富, 受到用户单位的好评, 应用价值很高

该重要科学发现成功应用于高沉浸式自行车运动、滑雪运动模拟器研制, 用户单位评价: 通过该方法, 各类人机协同运动模拟器可以敏捷地感受高维人机运动, 反馈给主控单元, 是支撑系列模拟器成功的关键技术 (应用证明 1)。

该重要科学发现应用于六维触觉力反馈装置研制，用户单位评价为：提出的方法能够实现欠传感器力感知、力控制和力交互，保障了装置的运动空间大、响应速度快、触控融合以及交互灵敏的感知和控制性能，适用于虚拟混合场景互动，市场前景广阔，经济效益可观。

该重要科学发现成功应用于我国首个数据驱动的集群飞行任务地面集成联试，用户单位评价该工作：完成了集群飞行任务地面验证阶段人机交互感知预测视景呈现、人机交互变阶次优化控制半物理试验验证，为集群飞行系统转阶段起到了关键作用，并为后续工作提供了重要的技术支撑。

五、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	Fractional-order control for uncertain teleoperated cyber-physical system with actuator fault	IEEE/ASME Transactions on Mechatronics	Zhiqiang Ma, Zhengxiong Liu, Panfeng Huang	2021 年 26 (5) 卷 2472-2482 页	2020. 11.24	Zhengxiong Liu	Zhiqiang Ma	马志强, 刘正雄, 黄攀峰	33	SCIE	是/否
2	Whole-Body Pose Estimation in Human Bicycle Riding Using a Small Set of Wearable Sensors	IEEE/ASME Transactions on Mechatronics	Yizhai Zhang, Kuo Chen, Jingang Yi, Tao Liu, Quan Pan	2016 年 21 (1) 卷 163-174 页	2015. 10.12	Jingang Yi	Yizhai Zhang	张夷斋, 刘韬, 潘泉	29	SCIE	是
3	Event-triggered logarithmic sliding mode control for discrete-time Lagrangian haptic manipulator	IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs	Dailiang Shi, Bo Zhang, Hanlin Dong, Zhengxiong Liu, Panfeng Huang	2024 年 71 (6) 卷 3076-3080 页	2024. 1.16	Zhiqiang Ma, Hanlin Dong	Dailiang Shi	石岱梁, 张博, 董瀚林, 马志强, 刘正雄, 黄攀峰	6	SCIE	是

4	Episode-Fuzzy-COACH Method for Fast Robot Skill Learning	IEEE Transactions on Industrial Electronics	Bingqian Li, Xing Liu, Zhengxiong Liu, Panfeng Huang	2024 年 71 (6) 卷 5931-5940 页	2023. 7.21	Panfeng Huang	Bingqian Li, Xing Liu	李冰倩, 刘星, 刘正雄, 黄攀峰	3	SCIE	是
5	Adaptive neural network controller for an uncertain rigid manipulator with input saturation and full-order state constraint	IEEE Transactions on Cybernetics	Zhiqiang Ma, Panfeng Huang	2022 年 52 (5) 卷 2909-2925 页	2020. 10.7	Panfeng Huang	Zhiqiang Ma	马志强, 黄攀峰	72	SCIE	是
6											
7											
8											
合 计									143	SCIE	是

六、主要完成人情况（不超过 6 人）

（所列完成人应为在陕个人，或与在陕个人合作的我国其他地域的个人（**第一完成人必须为全职在陕的个人**），且是“代表性论文专著”主要学术思想的提出者，并在“代表性论文专著”中有署名。应按表格要求逐项填写。附件所列验收、鉴定的专家组成员不能作为完成人。同一人同一年度只能作为一个提名项目的完成人参加陕西省科技奖的评审。附件所列验收、鉴定的专家组成员不能作为完成人。

工作单位：根据人事关系填写完成人现工作的单位，已退休的填写退休前的工作单位。

完成单位：填写完成人参与本项目主要研究工作时所在单位，应为国内法人单位。如涉及多个单位，应根据贡献大小填写一个单位。完成单位与奖励证书关联，请根据实际情况审慎填写。

对本项目贡献：不超过 300 字。应具体写明完成人对本项目做出的实质性贡献，并注明代表性论文专著编号。
填报时括号部分内容删除。）

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
马志强	1	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	对重要科学发现 1 和 3 有贡献，揭示了不确定性系统的阶次-时延-行为-误差的耦合机理，提出了近似动态规划的阶次优化控制方法，扩大了阶次选取范围，提升了控制系统的稳态精度，解决“控制保守”问题。提出了基于神经学习的欠传感器行为无源重建方法，奠定了解决“行为不敏”问题的基础。
张夷斋	2	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	对重要科学发现 3 有贡献，提出少量传感器的鲁棒精确状态实时解算方法，建立运动交互信息到高维交互状态的反演机制，设计了协作响应受限下安全状态边界表征方法，提出欠传感器条件下人机交互行为约束机制，揭示物理几何约束和感知测量有效融合的传感器最少使用量机理。

刘星	3	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	对重要科学发现 2 有贡献，提出了数据-模型双驱动的人机混合决策方法，精准预报物理人机交互响应结果。
董瀚林	4	无	副教授	西北工业大学	西北工业大学	对重要科学发现 2 有贡献，提出了离散事件触发的物理人机交互模型高精度构建方法，通过离散时间模型快速迭代，为地面操作人员提供虚拟协作依据；提出离散事件触发的控制输入管理机制，实现低频次、高效率的星地数据交换。

七、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	对重要科学发现 1、2 和 3 有贡献，揭示了不确定性系统的阶次-时延-行为-误差的耦合机理，提出了近似动态规划的阶次优化控制方法，扩大了阶次选取范围，提升了控制系统的稳态精度；提出了数据-模型双驱动的人机混合决策方法，精准预报物理人机交互响应结果；针对物理人机交互中高维不确定运动过程的传感冗余问题，发现了降低传感维度的物理几何约束和感知测量有效融合机理，提出了高保真传感数据优化状态估计方法；提出了基于神经学习的欠传感器行为无源重建方法。提出的主要学术思想具体见代表作论文 1、2、3、4 和 5。

八、完成人合作关系说明

完成人之间长期保持良好的合作，第一完成人（后称本人）与第二完成人（张夷斋）、第三完成人（刘星）和第四完成人（董瀚林）同属西北工业大学航天学院智能机器人研究中心（主任：黄攀峰教授/院长），本人与第二完成人合作发表 SCI 论文：Zhiqiang Ma, Xiaolong Duan, Xiyao Liu, Yizhai Zhang, and Panfeng Huang*, "Human-assisted regulation of deployment of tethered space robot via feasibility condition optimization and fast logarithmic sliding mode", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2024, 60(2): 2001-2015. 本人与第三完成人合作授权发明专利：马志强, 石岱梁, 黄攀峰, 刘正雄, 刘星, 常海涛. 一种阶次优化的远程操控行为轮廓规划方法. ZL202210198829.1. 本人与第四完成人合作发表 SCI 论文：Dailiang Shi, Bo Zhang, Hanlin Dong*, Zhiqiang Ma*, Zhengxiong Liu, and Panfeng Huang, "Event-triggered logarithmic sliding mode control for discrete-time Lagrangian haptic manipulator", *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2024, 71(6): 3076-3080. （代表性论著 3）完成人合作关系情况见下表。

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者/项目排名	合作时间	合作成果	证明材料
1	论文	马志强（1）、张夷斋（2）	2024 年 4 月	Human-assisted regulation of deployment of tethered space robot via feasibility condition	未列入附件

				optimization and fast logarithmic sliding mode	
2	专利	马志强（1）、刘星（3）	2023 年 9 月 8 日	一种阶次优化的远程操控行为轮廓规划方法	未列入附件
3	论文	马志强（1）、董瀚林（4）	2024 年 6 月	Event-triggered logarithmic sliding mode control for discrete-time Lagrangian haptic manipulator	代表性论著 3