

2026 年度拟提名陕西省科学技术进步奖项目公示内容

一、项目名称

空间柔性操控的感知-规划-控制一体化关键技术及应用

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省知识产权局

提名意见：

该项目针对空间非合作目标抓捕、在轨设施检测、狭窄空间在轨操作等航天领域技术瓶颈，系统开展空间柔性操控的感知-规划-控制一体化关键技术研究，理论创新与工程价值突出。项目突破柔性结构-传感一体化设计、智能协同感知、超冗余柔性臂包络规划、欠驱动组合体姿轨一体化稳定控制四大核心技术，创新提出仿生共形结构设计及低功耗柔性感知方法，实现柔性臂高精度定位与姿态稳定，有效解决传统刚性机构作业受限难题。研发多源信息融合智能重建与状态估计技术，大幅提升非合作目标感知效率与精度；建立柔性臂包络式操控规划与有限时间稳定控制方法，攻克非规则目标可靠抓捕与组合体稳定控制难点。项目技术体系完整、创新性强，关键指标达到国内先进水平，应用前景广阔。累计授权发明专利 18 项、软著 3 项，发表高水平论文 27 篇，出版专著 1 部，获多项国家级、省级权威竞赛顶级奖项。整体成果技术成熟度高，可有效支撑我国在轨柔性服务工程应用。

提名该项目为陕西省科学技术进步奖二等奖。

三、项目简介

空间柔性操控技术可为解决空间非合作目标抓捕、空间重要资产设施在轨检测以及狭窄空间在轨操作技术瓶颈提供全新方法。针对空间柔性操控应用过程中面临的建模驱控、状态监测和多模变构等技术难题，系统性开展了空间操控驱感控关键技术及应用研究。针对复杂约束条件下的空间非合作目标柔性抓捕操控问题，提出了面向空间柔性操控的柔性结构-传感一体化设计与制备方法。受章鱼触手连续体结构与分布式传感机理启发，融合折纸原理提出了一种空间柔性臂体共形结构设计方法，发明了与柔性机械臂共形贴合的柔性传感器设计制造方法，以及柔性多功能结构状态感知与监测方法，实现了柔性臂体结构与共形传感器件在几何形态、力学特性与功能层面的一体化集成，感知器件具备小型化、柔性化和低功耗。为空间柔性操控臂在操控奠定了器件基础。有效保障了柔性功能结构几何拓扑构型的合理性及展开过程的稳定性；

针对复杂环境下柔性操控的目标感知问题，提出了面向空间非合作目标的自适应感知与状态估计方法。发明了多航天器协同观测与 MVSNet 驱动的快速智能重建方法，构建不依赖合作标识的帧间姿态变量观测模型，设计内外层优

化轨道实现异轨道序列化协同观测；提出了多源信息融合的环境感知与目标状态联合估计方法，融合可见光、红外与激光雷达数据构建可行域模型，基于EKF/CKF实现无目标绝对姿态先验的相对位姿确定，仅需3个标志点实现全状态同步收敛。该方法突破了非合作目标“看不全、建得慢、看不清、辨不明”的感知瓶颈，为柔性操作决策提供了目标几何、环境特征与运动状态的全链路信息基础。针对空间复杂环境下空间柔性结构的大量程、高动态精确感知难题，

针对空间多柔性机械臂协同抓捕规划问题，提出了面向非结构化环境的柔性操作规划方法。提出了超冗余机械臂整臂包络式构型搜索方法，无需预设抓持点与逆运动学求解即可实现大尺度目标可靠包络；提出了“主一从”式多指包络追踪与优化方法，建立统一包络准则，提出包络安全裕度量化安全性，结合模型预测控制与单向距离匹配实现动态翻滚目标实时追踪与最优包络。该方法以“包络”替代“抓取”、“贴合”替代“对准”、“顺应”替代“锁紧”，实现了对无抓持点非规则目标的安全可靠操作，为空间非结构化环境下的柔性操作提供了全链路决策能力。。

针对空间柔性操控的组合物体稳定控制问题，提出了面向空间柔性操控的欠驱动组合物体有限时间稳定与姿轨一体化控制方法。针对柔性机械臂捕获目标后组合物体执行机构欠驱动、动力学强耦合且姿轨协同困难的问题，设计了奇异规避与角速度自适应跟踪相结合的有限时间全状态稳定控制律，并构建了基于对偶代数的姿轨耦合误差方程与全推力器一体化控制架构，实现了组合物体三轴姿态与角速度全局稳定、欠驱动轴角速度有限时间收敛及椭圆轨道姿轨协同控制，为空间柔性操控组合物体在轨稳定捕获与协同机动奠定了控制方法基础。为提升空间复杂柔性操控平台稳定性、复杂多载荷切换过程可靠性等能力提供了创新技术支撑。

项目取得了一系列原创性成果，授权国家发明专利18项、软件著作权3项，发表高水平学术论文27篇，出版专著1部。项目团队获2024年中国机器人大赛暨RoBoCup机器人世界杯中国赛一等奖（冠军）、第九届中国国际“互联网+”大学生创新创业大赛陕西赛区省级复赛金奖、第四届全国高等学校航空航天类专业本科毕业设计成果交流会特等奖、第十一届中国研究生能源装备创新设计大赛二等奖。

项目研究成果已应用于柔性传感的卫星关键折展部件状态监测系统，并于2025年9月搭载谷神星一号顺利入轨，完成了国内首次将柔性电子传感技术应用于航天器关键部件的在轨验证。2025年12月，集成传感监测与柔性机械臂操控的敏捷遥感机械臂监测系统随中哈敏捷遥感卫星顺利入轨，充分验证了整套系统在空间环境下工作的可靠性与稳定性。中国驻阿拉木图代总领事吕毅在当地主流媒体刊发署名文章，明确提及阿里法拉比哈萨克国立大学与西北工业大学联合研制的中哈敏捷遥感关键载荷成功发射，并将本项目列为高质量共建“一带一路”标志性合作成果。

在项目支持下，人才培养显著，项目第一完成人孙冲获评陕西省科技新星

(第 2023SR5144 号), 主要完成人张力军、付康佳分别入选特殊科技领域中国科协青年人才托举工程(项目编号 2020-JCJQ-QT-023、2021-JCJQ-QT-039)。

四、客观评价

1. 查新结论佐证技术唯一性

2026 年 8 月 17 日, 项目组委托教育部科技查新工作站(L29)对“柔性结构-传感一体化设计与制备技术”、“非合作目标协同感知与状态估计技术”、“非结构化环境柔性操作规划技术”、“主动-被动一体化捕获控制与冲击振动抑制技术”等 4 个创新点开展科技查新。查新结论摘要如下: 经检索并对相关文献分析对比结果表明, 上述国内外的相关文献报道分别涉及到该查新项目的部分研究内容, 但除委托项目组发表的文献[1-4, 15-18]外, 国内外均未见与该查新项目查新点相同的文献报道。

2. 核心指标与先进性

(1) 基于柔性传感的卫星关键折展部件状态监测系统, 搭载谷神星一号遥十五火箭完成在轨验证。指标性能先进性: ①传统裂纹型传感器(Nano-Micro Lett., 2021; Chin. J. Polym. Sci., 2021)灵敏度可达 2000, 但拉伸比仅 100%, 本系统以 >10 的灵敏度实现 $>200\%$ 拉伸比, 综合力学适应性更优, 且在 $-60^{\circ}\sim+80^{\circ}\text{C}$ 热真空环境下保持稳定, 上述文献均未涉及空间服役环境验证。②基于 FBG 阵列的形貌重构方法(Micromachines, 2022; SDHM, 2022)精度可达亚毫米级($<0.032\text{ mm}$), 但系统复杂且延迟取决于后续算法处理。③压电阵列方案(Sensors, 2022; Struct. Health Monit., 2024)功能单一, 仅实现冲击定位; 本系统集成碰撞感知、破损评估与实时损伤监测于一体, 是唯一经在轨验证的空间柔性结构共形感知与状态监测一体化系统。

(2) 敏捷遥感机械臂状态监测系统, 搭载“中哈敏捷遥感卫星载荷”完成在轨验证。指标性能先进性: ①面向机械臂的应变片力感知方案(Appl. Sci., 2023)采用神经网络间接估计力/力矩, 未给出直接测量精度; 本系统力学响应误差 $<2\%$, 实现直接高精度测量。②连续体机械臂形状感知方法(IEEE SENSORS, 2023; Soft Robot., 2024)端点位置误差约 1.61%, 本系统位姿识别误差 $<2\text{ cm}$, 精度相当, 但延迟 $<1\text{ ms}$, 远优于上述文献依赖的后处理算法。③电子皮肤多模态设计(Nano Energy, 2024; J. Intell. Manuf., 2025)仅实现接触压力感知或抓取预警, 未涉及空间环境验证; 本系统耐受 $-60^{\circ}\sim+80^{\circ}\text{C}$ 热真空环境, 是目前唯一实现敏捷遥感机械臂在轨状态监测的系统, 在环境适应性、实时性与功能集成度方面具有显著优势。

3. 国内外同行高度认可

本成果先后获 2024 年中国机器人大赛暨 RoboCup 机器人世界杯中国赛冠军(一等奖), 第九届中国国际“互联网+”大学生创新创业大赛陕西赛区金奖, 全国航空宇航本科毕业设计大赛特等奖, 第十一届中国研究生能源装备创新设计大赛二等奖。

在国内外引用评价方面：(1) 针对项目提出的柔性结构-传感一体化设计与制备方法，Nature Machine Intelligence 专题报道评价其“在结合实验科学以设计新器件方面迈出了一大步”；NASA Tech Briefs 专题报道指出该成果“在宽工作范围实现超灵敏传感器的定制化制造是一项技术突破”；英国皇家化学学会会士 Husam N. Alshareef 教授在 Matter 综述中强调，该传感器褶皱结构设计相较平面构型在灵敏度与结构稳定性方面均实现显著提升。(2) 针对项目提出的非合作翻滚目标多航天器协同姿态确定方法，IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems、IEEE Sensors Journal、Journal of the Franklin Institute 及《宇航学报》等航天与传感领域权威期刊予以引用，肯定其在目标状态信息获取与在轨服务前序任务中的关键作用，指出该方法通过多源传感器融合有效应对非合作目标行为不可预测、输入与动力学未知等挑战，且无需先验信息即可实现翻滚目标姿态估计。

五、应用情况和效益

1. 应用情况

主要应用单位情况表

序号	单位名称	应用的技术	应用对象及效果	应用起止时间	单位联系人/电话
1	西安紫微宇通科技有限公司	基于分布式柔性传感器阵列的柔性功能结构状态监测方法	该监测方法基于与柔性结构共形的柔性传感阵列感知状态，相较传统传感器轻量化优势突出，解决柔性结构形变实时监测难题。	2023.5~2025.12	王 崇 辉 /18672370029
2	星众空间（嘉兴）科技股份有限公司	内嵌柔性传感器的大变形结构运动状态监测方法	分布式共性贴合传感器将本体的机械变形转化为可被柔性电子皮肤感知捕获的电信号，从而实现了对柔性机械臂形变状态的监测和位姿精准确定。	2023.06~2025.12	赵 丹 /18729253078
3	国家无线电监测中心乌鲁木齐监测站	面向空间非合作目标的多源协同感知与状态估计方法	实现了面向空间非合作柔性操控的目标位姿感知和高精度轨道预报。	2023.05~2025.12	张 明 /13209910322

应用情况（限 2 页）

本项目相关成果授权国家发明专利 18 项、软著 3 项，发表高水平论文 27 篇，出版专著 1 部；获 2024 年中国机器人大赛暨 RoboCup 机器人世界杯中国赛冠军、

第九届中国国际“互联网+”大学生创新创业大赛陕西赛区金奖、全国航空宇航本科毕业设计大赛特等奖等。

本项目围绕空间柔性传感监测、航天器折展结构状态感知、在轨柔性机械臂智能操控等关键技术开发系统性攻关，突破了传统航天结构监测设备重量大、适配性差、智能化程度低、在轨可靠性不足等技术瓶颈，形成了自主可控、可工程化、可批量推广的成套技术体系。成果经多次在轨飞行验证，技术成熟度高、通用性强，产业化应用价值突出，经济效益显著。

项目创新采用轻量化柔性电子监测方案，替代传统刚性监测结构，在保证高精度监测性能的基础上，有效降低卫星载荷重量、结构复杂度与整星研制成本，大幅缩短微纳卫星新型结构、新型载荷的研发迭代周期，显著降低航天型号研制与空间试验试错成本，为商业航天低成本、快速化、批量化研制提供了全新高效的技术路径。成果先后搭载谷神星一号、中哈敏捷遥感卫星完成在轨成功验证，技术稳定性、空间环境适应性得到真实轨道考核，可广泛适配对地观测、空间探测、在轨维护、新技术在轨试验等多类微纳卫星任务场景，能够持续赋能商业航天产业降本增效，产业化推广空间广阔，长期经济效益突出。

(2) 社会效益

本项目紧扣我国航天器智能感知、在轨安全监测、空间柔性作业装备发展需求，攻克多项空间柔性传感与智能操控关键技术，实现多项国内首次工程化应用，在技术创新、行业引领、国际合作、人才培养、产业带动等方面社会效益显著。

六、主要知识产权证明目录（限 10 条）

序号	知识产权类别	知识产权具体名称	国家（地区）	授权号	授权日期	证书编号	权利人	发明人
1	发明专利	一种基于多指机构的三维空间翻滚目标包络抓捕方法	中国	CN111360828B	2021 年 12 月 03 日	证书号第 4828528 号	西北工业大学	孙冲， 万文姬，袁源
2	发明专利	一种线驱动柔性高冗余度机械臂	中国	CN222831817U	2025 年 05 月 06 日	证书号第 22814247 号	西北工业大学	孙冲， 绕以恒，王乾，乔子珩

3	论文	Computational design of ultra-robust strain sensors for soft robot perception and autonomy	中国	SCI 检索: 00118037 1400008	2024 年 2 月 22 日	Nature Commu nications , 2024, 15(1), 1636.	西北工 业大学	杨海 涛, 丁 硕, 王 佳豪
4	发明专利	一种多航天器协同识别目标姿态参数的方法	中国	CN111377 065B	2021 年 11 月 16 日	证书号 第 4793489 号	西北工 业大学	孙冲, 赵迪, 袁源, 张震
5	发明专利	一种空间翻滚非合作目标观测过程中的特征信息传递与协作跟踪方法	中国	CN112307 981B	2024 年 6 月 18 日	证书号 第 7113119 号	西北工 业大学	孙冲, 赵迪, 郑子轩
6	发明专利	一种基于超冗余机械臂的失效卫星自适应包络抓捕方法	中国	CN110371 325B	2021 年 08 月 31 日	证书号 第 4649127 号	西北工 业大学	孙冲, 袁源, 万文 姬, 邓 李圣, 李琪, 崔尧
7	发明专利	一种基于形状记忆材料的空间变结构折纸系统	中国	CN117622 519B	2024 年 01 月 26 日	证书号 第 6849155 号	西北工 业大学 深圳研 究院、 中国人 民解放 军军事 科学院 国防科 技创新 研究院	孙冲, 吴君 豪, 张 翔, 付 康佳, 吴雪松
8	论文	Passive impact/vib	中国	SCI 检索:	2020 年 01 月 06	Internati onal	西北工 业大学	孙冲, 侯小磊

		ration control and isolation performance optimization for space noncooperative target capture		00051911 0400001	日	journal of advanced robotic systems, 2020, 17(1), 1-15.		
9	软著	飞行器运行段可见报及遮蔽情况快速分析软件	中国	2023SR0570919	2023 年 5 月 30 日	软著登字第 11158090	中国西安卫星测控中心	张力军, 董文亮, 王涛, 李文舒, 路毅, 王引娣, 徐国良, 杨敏英
10	其他	多航天器协同操作与地面实验研究	中国	ISBN: 9787561284506	2023 年 2 月 1 日	西北工业大学出版社	西北工业大学	孙冲, 朱战霞, 徐金涛, 方群

七、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
孙冲	1	无	副研究员	西北工业大学	西北工业大学	项目负责人, 牵头完成了柔性结构-传感一体化设计与制备、多源信息融合的目标与环境协同感知、非结构化环境柔性操作规划、主动-被动一体化捕获控制与冲击振动抑制等关键技术攻

						关，对创新点 1、2、3、4 做出创造性贡献。
张力军	2	无	副研究员	中国西安卫星测控中心	中国西安卫星测控中心	项目主要完成人，重点完成了目标协同观测与多源感知估计方法研究，提出了多源信息融合的环境感知与目标状态估计方法，对创新点 2、3 有贡献。
付康佳	3	研究室副主任	高级工程师	中国人民解放军军事科学院国防科技创新研究院	中国人民解放军军事科学院国防科技创新研究院	项目主要完成人，围绕空间非结构化环境下的柔性操作技术，重点完成了柔性大变形操控结构设计及运动控制方法研究，对创新点 1、4 有贡献。
万文姬	4	无	讲师	西安理工大学	西北工业大学	项目主要完成人，重点完成了面向非结构化环境的柔性操作规划与控制方法研究，对创新点 3、4 有贡献。
杨海涛	5	院长助理	教授	西北工业大学	西北工业大学	项目主要完成人，重点完成共形传感器与柔性臂贴合的一体化设计制备及臂体高精度位姿解算方法研究，对创新点 1、4 有贡献。
王涛	6	无	工程师	中国西安卫星测控中心	中国西安卫星测控中心	项目主要参与人，提出了多航天器异轨道协同观测与多视图几何快速重建方法，对创新点 2 有贡献。

八、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	牵头完成了柔性结构-传感一体化设计与制备、多源信息融合的目标与环境协同感知、非结构化环境柔性操作规划、主动-被动一体化捕获控制与冲击振动抑制等关键技术攻关。
中国西安卫星测控中心	2	项目主要完成单位，重点完成了目标协同观测与多源感知估计方法研究，提出了多源信息融合的环境感知与目标状态估计方法
中国人民解放军军事科学院国防科技创新研究院	3	项目主要完成单位，围绕空间非结构化环境下的柔性操作技术，重点完成了柔性大变形操控结构设计及运动控制方法研究。

九、完成人合作关系说明

孙冲副教授为西北工业大学航天飞行动力学技术国防科技重点实验室副主任。本项目由孙冲总体设计和统筹安排，张力军、付康佳、万文娅、杨海涛、王涛、李文舒、徐国良、郭博、杨敏英等人为项目组骨干成员，在孙冲的领导和组织下参加了多项课题研究，共同进行了一系列空间柔性操控的感知-规划-控制一体化关键技术攻关。

孙冲、万文娅共同完成了专利《一种基于多指机构的三维空间翻滚目标包络抓捕方法》、《一种基于超冗余机械臂的失效卫星自适应包络抓捕方法》申请。

孙冲、付康佳共同完成了专利《一种基于形状记忆材料的空间变结构折纸系统》申请。

张力军、王涛、李文舒、郭博、徐国良、杨敏英共同完成了软著《飞行器运行段可见报及遮蔽情况快速分析软件》申请。

孙冲、张力军共同完成了专利《一种空间对抗性非合作目标集群围捕准则快速求解方法》申请。

孙冲、张力军共同完成了论文《Space Noncooperative Target Trajectory Tracking Based on Maneuvering Parameter Estimation》。

孙冲、万文娅共同完成了论文《Non-cooperative Space Target De-tumbling Approach Using Multiple High-temperature Superconducting Coils》。

孙冲、杨海涛共同完成了软著《柔性机械臂感知与控制软件》，共同完成了中哈敏捷遥感载荷在轨试验验证。