

面向航天器自主维护的空间机器人发展战略研究

赵亮亮, 李雪皑*, 赵京东, 刘宏

(哈尔滨工业大学机器人技术与系统全国重点实验室, 哈尔滨 150006)

摘要: 空间机器人能够适应空间极端环境, 突破人类太空探索的极限, 极大地提高空间操控的安全性和经济性, 是提升空间科学技术水平的核心装备, 可为航天事业发展提供重要支撑和有力保障。本文详细阐述了发展航天器自主维护空间机器人技术对于推动我国航天强国建设、促进国防科技发展以及引领变革性技术创新等方面的重大价值; 从政策、技术、市场等角度, 分析了国内外空间机器人的发展现状及趋势; 剖析了目前我国航天器自主维护空间机器人的技术挑战与面临的问题; 基于国家重大战略需求、研究基础及发展方向, 论证了面向航天器自主维护空间机器人的发展体系和突破路径。研究建议: 加快科技创新 2030—在轨服务重大专项实施, 加大空间机器人智能操控基础研究支持力度, 加速构建政府—企业—高校协同发展创新机制, 加强空间机器人国际合作、引进国际高端人才。

关键词: 空间机器人; 航天器自主维护; 智能操控; 太空作业; 太空经济

中图分类号: V11 **文献标识码:** A

Development Strategy of Space Robots for Autonomous Repair and Maintenance of Spacecraft

Zhao Liangliang, Li Xueai*, Zhao Jingdong, Liu Hong

(State Key Laboratory of Robotics and Systems, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China)

Abstract: Space robots can adapt to the extreme environment of space, break through the limits of human space exploration, and greatly improve the safety and economy of space operation and control. Moreover, space robots are the core equipment to improve the level of space science and technology, providing important support and a strong guarantee for promoting space industry development. This study elaborates on the great values of developing space robot technology for the autonomous repair and maintenance of spacecraft, which include promoting the construction of strengthening China's space power industry, promoting the development of national defense science and technology, and leading transformative scientific and technological innovation. The progress and development trends of domestic and foreign space robotics technologies in China and abroad are analyzed from the policy, technology, and market perspectives. In addition, technical challenges and problems faced by China are dissected toward the autonomous repair and maintenance of spacecraft. The development system and breakthrough path of China's space robot technologies for autonomous repair and maintenance of spacecraft are demonstrated based on major national strategic needs, research foundation, and development directions. Furthermore, the following suggestions are proposed: (1) accelerating the implementation of major special projects for on-orbit services (Scientific and Technological Innovation 2030), (2) increasing support for basic research on intelligent operation and control of space robots, (3) accelerating the construction of a government-enterprise-university collaborative innovation mechanism, and (4) strengthening international cooperation to attract foreign science and technology talents to China.

收稿日期: 2023-08-21; 修回日期: 2023-11-28

通讯作者: *李雪皑, 哈尔滨工业大学机器人技术与系统全国重点实验室助理教授, 主要研究方向为空间机器人技术; E-mail: xueaili@hit.edu.cn

资助项目: 国家自然科学基金项目(T2388101、92148203、52305017); 中国工程院咨询项目“我国空间机器人在轨建造发展战略研究”(2022-XY-30)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

Keywords: space robots; autonomous repair and maintenance of spacecraft; intelligent operation and control; space operations; space economy

一、前言

空间机器人是在经历火箭发射的强冲击后，能够在高真空、大温差、强辐射、微/低重力、复杂光照等空间极端环境条件下，自主或协同航天员长时间执行地外空间作业服务的机器人系统。根据工作环境的差异，可将空间机器人技术研究领域主要分为两个：在轨服务和行星机器人^[1]。典型的在轨服务空间机器人包括国际空间站加拿大臂和针对卫星在轨服务的机器人。行星机器人系统一般通过在星表移动和操作，完成行星探测任务，未来的作业对象将会扩展到山丘、溶洞、海洋等环境。此外，在小行星、彗星等应用场景中，由于具有微重力的星表环境，可能会模糊在轨服务机器人和行星机器人两者之间的区别^[2]。

空间机器人可极大提高空间操控的安全性和经济性，支持并扩展航天员的操作能力，突破人类太空

探索的极限，正在改变我们对未来太空探索的思考模式。作为一种典型的空间操控装备，空间机器人在空间碎片清除、空间飞行器维护、地外设施建造等空间科学探索活动中至关重要，是加快航天强国建设的关键。同时，空间机器人是机械、电气、材料和控制等现代多领域科技成果的体现，更能展现综合国力和提升国际影响力。此外，空间机器人技术与国家安全和利益密切相关，是各航天强国在重要科技领域的必争制高点，其技术水平将对世界航天事业领先地位的归属产生决定性影响，事关国家安全。

空间机器人先后发展了遥操作、局部自主操作、全局自主操作等操控模式，以满足日益发展变化的空间作业任务需求。如图1所示，20世纪80年代，早期的空间机器人完全依赖人类远程操控，只能完成简单的抓取、搬运和探测等任务，智能化水平较低。进入21世纪，随着机械、计算机、控制等基础学科的蓬勃发展，以及智能优化算法、视觉识别等



图1 空间机器人操控能力的发展过程与发展方向

注：ETS-VII为工程试验卫星-VII；SRMS为航天飞机遥操作机械臂系统；SSRMS为空间站遥操作机械臂系统；ROTEX为空间机器人技术试验；SPDM为专用灵巧机械臂；MRV为任务机器人飞行器；MEV为任务扩展飞行器；OSAM为在轨服务装配及制造；RSGS为地球同步轨道卫星机器人服务。

先进技术的跨越式进步，空间机器人技术也进入自动化与智能化时代，可通过局部自主操控方式，以“机器人助手”的形式帮助人类航天员快速执行在轨任务，其工作效率、安全性和成本得到了进一步提升。近年来，空间机器人融合了人工智能的关键决策作用，使空间机器人能够进行智能感知、学习、推理和决策等活动，提高了复杂空间环境的适应能力和操控能力，此时的空间机器人已经成为人类在太空的“机器人伙伴”，代替人类完成空间任务。未来，随着空间探索的持续深入，伴随着先进材料、高性能传感器、人工智能等技术的快速发展，智能操控能力将会在空间机器人演变过程中发挥重要作用，与人类智慧、感知能力和学习能力进行深度融合将会是空间机器人实现智能操控的重要方法和发展方向，届时空间机器人可以实现完全自主操控，成为探索太空危险、未知领域的“机器人探险家”。

本文在中国工程院“我国空间在轨服务机器人发展战略研究”项目的支持下，分析了发展航天器自主维护空间机器人的战略需求；从技术和应用方面介绍了国内外空间机器人的发展现状及趋势；同时剖析了我国航天器自主维护空间机器人的技术挑战与面临问题，论证了其发展体系和突破路径；最后提出了发展对策与建议，以期为我国航天器自主维护空间机器人的发展提供参考。

二、发展航天器自主维护空间机器人的战略需求

（一）推动航天强国建设的战略要点

据统计，2021年，我国航天发射次数首破50次，发射量位居世界第一。2022年，我国航天共完成64次发射任务，再创新高，其中包括6次载人航天重大任务：2次货运飞船、2次神舟飞船、1次问天实验舱、1次梦天实验舱发射。航天事业的快速发展有效支撑了国家重大战略需求，为重大航天工程与空间探索任务提供了重要保障。在航天器维护领域，目前我国在轨工作的航天器数量已经超过600颗，2023年完成航天发射67次，涉及载荷200余个，未来还将开启探月工程四期和行星探测工程等一系列航天重大工程。然而，在地球同步轨道（GEO），平均每年有2颗卫星因故障需要作

离轨处理，4颗卫星提前耗尽燃料，20颗卫星因寿命到期退役，严重制约我国航天事业的进一步发展，迫切需要进行故障维修、辅助展开、燃料加注等在轨维护任务。

在未来的航天器维护任务中，空间机器人将作为核心装备，发挥至关重要的作用。随着空间机器人技术的不断进步，利用空间机器人系统自主完成复杂、危险的在轨任务已成为国内外航天机构的研究热点。因此，实施面向航天器自主维护的空间机器人发展战略，有助于推动我国空间科学技术水平的整体跃升、促进航天事业的科学发展，为建设航天强国提供重要支撑和有力保障。

（二）促进国防科技发展的重点领域

太空是军事战略制高点，航天器的发展进步对于国防科技的高质量发展有着显著的引领作用。目前，世界各军事强国在空间领域的博弈日趋激烈，以美国为代表的航天强国正以航天器故障维修、航天器燃料补加等在轨服务名义持续开展空间操控技术试验。同时，我国和美国在航天领域的竞争日趋激烈，都在进行多方面的探索活动。自2014年以来，美国太空军多次利用其军事监视卫星对他国卫星进行近距离跟踪、观测和数据收集，目的是为了侦察监视他国军事情报，威慑其潜在的太空对手。2015年，美国太空探索技术公司（SpaceX）开始实施“星链计划”，目的是将约4.2万颗通信卫星送入太空近地轨道，其军事价值和用途对世界各国的太空安全造成了严重威胁^[3]。

发展并提升航天器的自主维护能力，保护航天器安全、稳定与可靠运行，空间机器人将会发挥不可替代的重要作用。利用空间机器人形成航天器的自主维护维修、自主模块更换和自主燃料加注等能力，将会深刻影响现代军事中空间战略的优势地位，并对国防军事科技发展有着极大的促进和推动作用。因此，强化我国空间国防科技力量，促进空间国防科技发展，需要发展面向航天器自主维护的空间机器人技术，并坚持以空间战略性需求为导向，抢占空间国防科技创新的制高点，将和平利用太空的主动权把握在自己手中。

（三）引领变革性技术创新的不竭动力

航天器自主维护空间机器人是建立在多学科前

沿研究基础上的交叉融合与集成创新，是深度融合多学科先进技术的前沿机器人科学。不仅涵盖机械、电子信息、数学、物理、材料等多个基础学科，还与机器人、控制、电气、航空宇航、空间科学、通信、传感、计算机等技术深度交叉融合，同时横跨高端制造、精密测量、新材料、空间应用、航天等产业，并应用于载人航天、空间新技术试验等国家航天重大工程。同时，其成果往往是科技进步的催化剂，可带动材料学、工程学、计算机科学等领域的创新发展。科技创新催生出的新技术、新产品和新产业，将会带动供应链和产业链优化升级，推动形成更加完整的经济结构，促进经济高质量发展^[4]。

近十年，我国空间机器人技术发展迅速，所开展的空间操作技术科学试验是一个良好的开端，对未来航天器自主维护空间机器人的发展将起到极大的推动作用。同时，我国空间站的建设也为航天器自主维护技术提供了良好的试验和应用平台，新试验、新演示持续开展，这些计划的实施将显著增强我国空间机器人在轨服务能力。但航天器自主维护空间机器人研究仍然需要我们前瞻擘画，针对其面临的严峻挑战和良好的发展机遇，从太空宏观视角和未来国家战略层面上进行优化和改进。研究方向与时俱进，在新形势、新条件下占据太空资源开发和利用的先机，牢牢把握正确的科技攻关方向，促进我国空间机器人事业走向更远的未来，充分发挥其科技创新的引领作用。

三、国内外空间机器人的发展现状及趋势

(一) 国外发展现状及趋势

1981年，加拿大麦克唐纳-德特威尔联合有限公司(MDA)研制出了世界上第一个轨道空间机械臂——航天飞机机械臂(SRMS)，先后顺利完成了哈勃太空望远镜维修、国际空间站建设与维护等任务，由此正式揭开了空间机器人技术发展的序幕。2010年，美国政府发布了《国家太空政策》，指出美国需要在太阳系中保持机器人的持续存在，以进行空间科学研究，并为未来人类探索太空做准备^[5]。2016年，美国19所大学联合推出的《美国机器人技术路线图》重点论述了空间机器人关键技术的未来发展路线，指出了空间机器人潜在的社会效益和

经济效益^[6]。2020年，美国又先后更新《美国机器人技术路线图》和《美国太空政策》，提出将前沿技术应用于机器人太空探索任务，确保美国在空间机器人技术领域的领导地位^[7,8]。同时，美国航天局(NASA)发布的《航天技术分类路线图》于2010年、2015年、2020年连续三次将空间机器人系统列为重要技术领域。此外，2014年欧盟制定了《SPARC机器人发展路线图》，该路线图从空间机器人未来市场的角度阐述了其发展的重要性^[9]；2021年英国发布了首个《国家太空战略》报告，明确空间机器人在轨服务与建造是未来太空领域的重点建设项目，以确保太空的可持续性、安全性和保障性发展^[10]。

从空间机器人技术水平看，美国、加拿大、俄罗斯、欧洲、日本等国家和地区已具备空间机器人制造能力，并拥有国际顶尖的空间机器人研究机构和试验设施，掌握着关键核心技术及未来发展趋势。其中，美国处于国际领先地位，凭借其类型完备、学科全面的空间科学体系，建立了设计研发、地面试验测试、最终发射入轨并完成在轨服务任务的一套完整的空间机器人产业体系，面向航天器自主维护全方位开展了在轨技术验证及任务规划，完成了空间机器人在太空领域的多次重大突破(见表1)。2007年，轨道快车(Orbital Express)任务实现了国际首次合作目标的自主捕获^[11]，在此基础上，2011年美国国防局(DARPA)提出了凤凰计划(Phoenix Program)^[12]，计划对GEO退役卫星中仍可发挥功能的部件进行再利用，将在轨服务技术从单项技术演示扩展到系统集成。2011年启动的机器人在轨加注任务(RRM)已在国际空间站完成了第三阶段技术验证^[13]，首次遥操作机械臂实现了仿真实卫星的燃料加注试验，为未来在轨服务、装配和制造任务(OSAM-1)奠定了技术基础^[14]。2011年，NASA将首个仿人型空间机器人Robonaut 2送入国际空间站^[15]，在轨验证了机器人灵巧作业及人机交互技术。美国诺思罗普·格鲁曼公司(Northrop Grumma)于2020年、2021年两次完成了卫星的接管控制，率先实现了高轨卫星的在轨延寿。DARPA的RSGS服务将携手诺格公司开展MRV在轨验证^[16,17]，通过机器人实现多个任务拓展舱的灵活安装，有望实现航天器自主维护的目标。

此外，加拿大在空间站机械臂方面处于领先

表1 美国主要空间在轨服务机器人项目

时间/年	名称	经费	意义
2007	Orbital Express	超过3.0亿美元	首次实现合作目标的在轨自主捕获
2011	RRM	约7.5亿美元	首次遥操作实现仿真实卫星的燃料加注试验
2011	Robonaut 2	超过1700万美元	首个仿人空间机器人
2011	Phoenix Program	约1.9亿美元	多机械臂、高轨道、非合作目标
2016	RSGS	2015—2017财年：4900万美元，2020财年：6460万美元	集合感知、攻击、维护于一体的多功能项目
2018	OSAM	OSAM-1：2.3亿美元，OSAM-2：7370万美元	首个在轨服务、装配、制造任务
2020	MEV, MRV	MEV-1：2019—2024年，平均每年1300万美元	首次实现卫星的在轨延寿

地位，迄今为止已设计了 Canadarm 和 Canadarm2 两款空间机械臂^[18]，并正在研发针对月球轨道空间站的 Canadarm3 空间机械臂，预计于2026年发射入轨。德国和日本也是较早开展空间机器人技术研究的国家，其中，德国在1993年和2004年分别实施了 ROTEX 项目和 ROKVISS 项目^[19,20]，主要进行地面遥操作机器人系统的技术验证；日本的 ETS-VII 项目（1997年）、OMS 项目（2004年）和 SDMR 项目（2009年）主要进行空间碎片的在轨捕获和离轨操作的技术验证^[21-23]。

在市场方面，随着在轨卫星数量、空间碎片数量的急剧增长，以及大型空间设施建设需求的日益迫切，对辅助宇航员出舱活动、空间碎片清除、在轨维修、在轨燃料加注、在轨建造和制造的需求正在推动对空间机器人的需求。2019年空间机器人的全球市场规模为38.9亿美元，预计10年内复合年增长率为5.7%。人工智能和先进材料等技术的快速发展，在增强空间机器人在太空中的应用范围和机动性的同时，也极大地提升了其商业应用效益。2018年，德国宇航中心（DLR）推出了首个人工智能空间机器人 CIMON，并于同年6月份抵达国际空间站，以帮助和陪伴宇航员完成日常任务。鉴于航天器自主维护任务引入的空间产业变革价值，部分私人商业公司也逐渐开始发展空间机器人技术，如 Motive、Redwire、Space Applications 和 GITAI 等。此外，将空间机器人技术向私营部门转让，以空间科学技术为基础带动发展技术密集型产业，并转化为商业产品和服务，可引领社会经济和技术的跨越式发展，扩展空间机器人项目的利益范围。NASA 在2013年成立的太空技术任务部（STMD）的一项重要职能就是向其他部门转让其技术，并通过投资和合作等

商业方式与公司或高校合作，共同推动空间技术创新。

（二）国内发展现状及趋势

空间机器人是我国重大战略需求的重大科学研究方向，是加快建设航天强国，实现空间高水平科技自立自强的重要抓手，为此，我国制定了一系列发展规划。国务院于2006年发布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》就已经将“载人航天和探月工程”列入国家科技重大专项^[24]。2016年，国家航天局制定了《空间机器人发展路线图》，指出将开展空间机器人在轨服务等一系列关键技术攻关，使我国空间机器人技术达到世界先进水平。同年，“十三五规划纲要”根据未来发展的重大需求提出了《科技创新2030—重大项目》，其中将“深空探测及空间飞行器在轨服务与维护系统”列为待启动项目之一，拟重点突破星球探测机器人和空间机器人技术，提高我国空间资产使用效益^[25]。此外，多项国家规划也将发展空间机器人作为重要的推广应用计划^[26]。2021年，《“十四五”机器人产业发展规划》提出将大力推动面向航天领域的机器人研发创新，结合具体空间场景开发机器人产品和解决方案^[27]。

在国家政策的支持和空间在轨服务需求牵引下，我国空间机器人技术发展迅速（见表2）。2013年，试验七号卫星由长征四号丙火箭发射入轨，标志着我国卫星服务空间机器人系统完成了从“0”到“1”的突破^[28]。2016年，天宫二号灵巧机械臂系统发射入轨，突破了空间机器人人机协同操作关键技术，国际上首次实现在轨手持电动工具旋拧螺钉、插拔航天电连接器等在轨维修科学试验任务^[29]。空间站机

械臂系统是我国空间站四项关键攻关技术之一，核心舱、实验舱机械臂系统已分别于2021年、2022年发射至空间站，在轨完成了当前全部预定的在轨测试、支持航天员出舱、载荷安装等任务，还将持续协助完成空间站长期运行维护任务，其中首次实现了大小组合臂协同空间操作^[30,31]。目前，我国已经掌握了空间机器人的设计、制造、控制、测试与试验技术，其中位姿精度、操作容差等居世界领先地位。

结合上述国内外研究进展，可总结得到空间机器人技术的发展趋势：作业形式由简单抓持发展到复杂精细操作；作业构型由单机械臂过渡到多机械臂协调控制；作业工具由单夹持器发展至多种工具灵巧操作手；作业对象由低轨航天器到高轨非合作航天器；操控方式由位姿主从遥操作发展至物理临场感遥操作。

四、我国航天器自主维护空间机器人面临的技术挑战与问题

(一) 技术挑战

如图2所示，空间机器人需要工作于高真空、高低温交替、微重力、复杂光照、强辐射等环境，极端空间环境作业方式对空间机器人提出了极高的要求。尤其是微重力漂浮环境下的灵巧、自主作业在地面环境下无法进行充分验证，在轨执行任务时可能发生不可预知的情况，导致任务失败。此外，传统地面机器人的关键零部件制造、设计理论、控制方法、感知技术、测试模拟等难以满足极端环境对机器人的创新发展需求，且无法直接移植到空间机器人中，不能指导空间机器人的设计、生产与检验。

目前针对航天器维护等在轨任务，主要以航天员出舱作业和空间机器人辅助航天员在轨作业两种

表2 我国主要空间在轨服务机器人

时间/年	名称	类型	主要任务
2013	试验七号	机械臂	空间碎片观测和空间机械臂操作等空间维护技术科学试验
2016	天宫二号空间灵巧作业机器人	6自由度机械臂和五指仿人灵巧手	验证服务机器人软硬件设计、人机协同关键技术、遥操作技术
2021	空间站天和舱机械臂	7自由度机械臂	舱段转移，设备安装、维修更换，辅助航天员转移，舱外状态监视等
2022	空间站问天舱机械臂	7自由度机械臂	载荷照料、支持航天员舱外活动、舱外状态检查

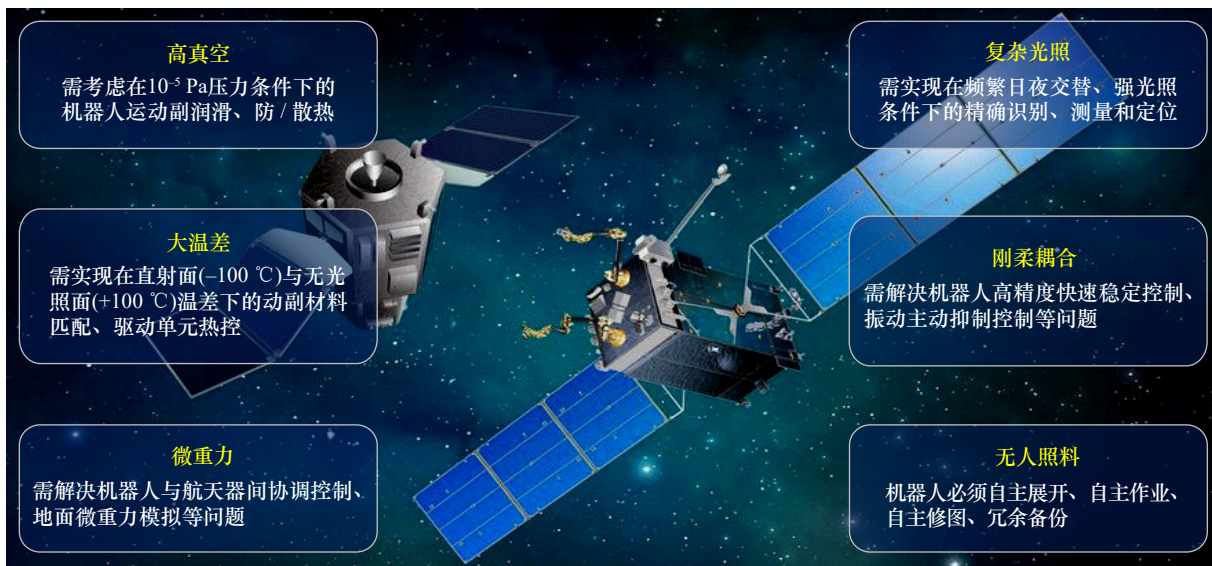


图2 空间极端环境下机器人操控面临的问题

形式完成。随着对航天器在轨维护任务复杂度要求的不断提高,目前的空间作业形式难以满足需求。第一,在恶劣太空环境下航天员出舱活动风险和成本极大,同时受到操作能力的限制,不能完成大型设施安装,复杂精细操作等任务,此外,目前航天员还不能实现高轨区域的出舱活动。第二,空间机器人产生的背景之一就是代替航天员出舱活动和前往航天员无法到达的深空区域,大幅度降低风险和成本。但现有空间机器人受尺寸和自由度限制,难以实现狭小空间灵巧、精细操作,还不具备自主作业能力,不能在高轨和深空环境进行连续作业,同时环境感知与遥操作控制能力的不足也是限制其进一步应用的关键因素。

随着空间探索的不断深入,空间作业形式向大范围、多样化和复杂化方向发展,如何在复杂、受限、变化的空间环境中实现空间机器人高效、安全、精细的自主操控,提升空间机器人在极端作业环境下多模态环境感知的实时性、自主决策的可靠性、行为预测的超前性与智能控制的稳定性,最终实现航天员-机器人-空间环境的和谐共融,是航天器自主维护空间机器人新的挑战和使命,具体可以总结为“空间机器人8S”(见表3)。

(二) 面临的问题

1. 空间机器人操控智能化程度低,技术水平和原创能力存在很大的进步空间

空间机器人属于多学科交叉领域,相关技术的发展日新月异,尤其是针对前沿性和原始创新性技术。目前,我国在空间机器人操控方面的研究总体投入不足,还未实现空间机器人操控领域核心技术的完全自主可控,其技术水平和原创能力仍存在

很大的进步空间。首先,在非合作航天器智能识别与测量、非合作航天器自主抓捕方面尚未实现重大突破,同时还不具备高精度、长时间的在轨操控能力,亟需针对不同航天器尺寸、形状、运动状态,设计具有强适应性的抓捕方式;其次,我国空间机器人技术在柔性环节影响高性能运动控制、多机器人协同控制技术、遥操作控制技术等方面也与国际先进水平有着一定差距。2008年,国际空间站灵巧操作空间机械臂就已经采用多臂协同技术,并经过了实际验证与运用,技术较为成熟,而这些都还属于我国空间机器人领域的空白。未来,在轨服务的作业环境将更加极端、作业任务更加复杂,如何实现灵巧操控、自主操控和协同操控是我国航天器自主维护领域空间机器人面临的巨大科学挑战。

2. 供应链、产业链结构不完整,存在卡点和未涉及领域

航天器自主维护空间机器人产业是技术和资金高度密集型产业,其结构与航天产业结构类似,主要包括:基础与保障设施、产品与服务领域以及政府空间机器人预算。其中,上游供应链主要提供原材料和零部件,是空间机器人产业的基础部分,目前我国已实现部组件和原材料全部国产化,关键核心元器件自主可控。但是,部分关键零部件(如轴承、减速器和传感器等)的寿命、稳定性及精度保持性等关键技术与国外仍然存在较大差距;中游生产链的卡点主要体现在空间机器人控制系统、微重力环境机器人设计、分析和仿真平台、关节控制分系统以及传感器分系统等。特别是控制系统和软件平台,国内目前还是通过采购国外产品和使用开源内核的方式进行使用和开发,尚未掌握其核心技术;在下游应用链中,航天科

表3 空间机器人新的挑战和使命

序号	挑战	使命
1	Survive (生存)	恶劣环境的长寿命、可靠、稳定工作
2	Safe (安全)	目标的安全接近停靠,航天员的安全保证
3	Soft (软体)	仿生软组织机构,自旋目标柔性捕获
4	Sensing (敏感)	复杂光照条件下的目标精确测量、视觉触觉融合
5	Swift (敏捷)	能工巧匠式的精细柔顺操作
6	Smart (智慧)	未知空间环境的知识学习与自主作业
7	Slave (奴隶)	沉浸感遥操作及大时延监督控制
8	Service (服务)	自主维修、燃料加注、模块更换

研机构、高校等传统空间机器人研发机构仍然占据主导地位，新兴商业空间机器人企业较少，同时还未涉及空间定制化商业服务、空间机器人产品销售等应用领域。

3. 设计、制造及发射成本高，不具备大规模进入太空的能力

据统计，国际空间站一名航天员一年的成本约为4.4亿美元，目前通过空间机器人替代航天员可以将空间作业的成本降低至现在的10%左右，未来预计可以降低到1%。考虑空间机器人工作环境的特殊性（高真空、大温差、强辐射等），其设计、制造以及地面试验成本将会大幅度上升。同时，空间机器人作为我国新兴行业，尚未建造完整的零部件生产线，加之供应链和产业链结构不完整，都会导致较长的生产周期，增加时间成本。此外，模块化技术、可重复利用技术、非定制设计制造技术和自我修复等技术的缺失，也是制约我国空间机器人发展和掌握低成本、大规模进入太空能力的重大问题。特别需要指出的是，空间机器人需要搭载运载火箭进入太空，其发射成本同样也是制约空间机器人规模提升的瓶颈。目前，我国卫星发射成本与单次发射数量方面落后于美国，不利于我国未来对地球轨道，月球、火星和其他小行星带的开发和利用。

4. 缺乏有效的技术转让方式，商业化、产业化程度低

航天器自主维护空间机器人技术是深度融合多门类学科的创新性、引领性技术，可带动我国机器人技术的变革升级，辐射经济发展，助力抢占世界机器人领域的制高点。目前，我国空间机器人技术主要侧重服务于航天、国防等国家重大战略需求，尚未成立专门的技术转化执行机构，并缺乏高效的技术转让方式，造成其成果转化数量和转化率不足。同时，空间机器人设计、研发、地面测试以及空间操作等核心技术的开源和共享度不足，私营科技创新公司等机构无法深度融入空间机器人核心技术生态体系。此外，我国空间机器人项目经费主要来源于国家根据航天发展情况所制定的政府预算，项目经费来源没有实现面向社会的广泛筹措和募集，尚未形成空间机器人运营及终端应用产业，不能通过产业发展、衍生新产业等方式获取利润。在轨维修、在轨加注，在轨模块更换等在轨服务需求的市场化程度和拓展程度低，空间机器人不能够针对不

同类型在轨任务提供不同的服务，影响其商业化、产业化发展。

五、面向航天器自主维护空间机器人的发展体系和突破路径

（一）发展体系

航天器自主维护空间机器人需要针对我国重大战略需求和空间机器人技术研究前沿，按照基于多学科深度交叉融合的高质量发展要求，建立“理论研究-技术突破-空间验证”全链条协同攻关模式，突破空间机器人灵巧操控、自主操控、协同操控等科学挑战，自主研发高性能空间机器人操控装备，实现空间机器人在航天器维护领域的全面覆盖，在载人航天、在轨服务、深空探测等型号任务中进行空间试验和应用验证。针对航天器自主维护空间机器人的发展体系，可着重在以下4个方面开展工作。

1. 空间机器人创新设计与核心部组件

围绕机器人空间极端环境的机构学、运动学与动力学等前沿基础理论和创新设计方法，以及关键基础零部件短板等，重点研发空间机器人灵巧与可重构本体、多功能与可更换末端执行器、极端空间环境机器人用高端轴承、特种电机和高精度传感器等，并进行核心技术攻关及工程应用验证，结合现有基础理论和核心技术基础，形成空间机器人自主创新设计体系和关键基础件生态，解决空间机器人高端部组件的“卡脖子”难题。

2. 空间机器人操作系统与应用软件

针对空间环境的微重力、高低温、复杂光照等特点，重点开发国际先进、具有自主知识产权的通用机器人操作系统、空间机器人微重力高保真度实时仿真系统、复杂空间环境机器人灵巧与自主操控软件平台、复杂空间环境人机/多机协同交互软件平台，复杂光照环境下视觉开发软件平台，建立极端空间环境下机器人操控数据库、规则库和知识库，解决空间机器人核心操作系统、应用软件和仿真软件的“卡脖子”难题。

3. 空间极端环境机器人操控装备创新集成

研制针对复杂非合作航天器抓捕的空间机器人装备，实现非合作航天器（无法辨别和定位、无对接接口、处于翻滚状态，复杂光照条件）的稳定在

轨抓捕；研制可重构、可再生、多功能、全感知空间机器人在轨维护装备，实现大型复杂航天器（跨度大、设施遍布、接口容差小）的自主维护，以保证航天器安全可靠运行；研制多空间机器人智能交互协同装备，实现人、机器人、环境共融的协同作业。

4. 国家重大空间型号任务应用

以高价值航天器在轨自主维护为主要任务，建立空间机器人智能操控创新性技术体系，促进形成产品标准化、服务个性化的空间机器人应用体系，实现空间机器人操控系统在载人航天、在轨服务、深空探测等型号任务中的试验和应用验证，保障国家重大工程任务高水平顺利实施。

（二）突破路径

（1）围绕目前已完成在轨测试的试验七号空间机器人、天宫二号空间灵巧作业机器人、空间站天和舱和问天舱机械臂等空间机器人系统，开展航天器自主维护空间机器人基础理论、技术攻关及工程应用等研究，充分利用空间站平台探索空间机器人新技术，为国家重大工程提供核心技术支撑。

（2）针对航天器自主维护任务的复杂化趋势，进一步突破针对空间苛刻环境的机器人设计、制造、集成、控制、以及视觉识别和智能操控等方面的关键问题，发展在轨建造、在轨增材制造、空间攻防对抗等技术，强化空间机器人技术对国防安全、全球空间战略部署的支撑作用。

（3）建立国际顶尖、面向航天器自主维护的空间机器人科研机构 and 设施，建设汇聚国内顶尖、世界一流、富有活力的科研队伍，促进学科交叉融合，形成特色鲜明的学科体系。实现航天器自主维护空间机器人前沿变革性技术和颠覆性技术创新，助力国家抢占世界航天领域的制高点。

（4）推动航天器自主维护空间机器人技术转化为商业产品，推动该领域的商业化、产业化进程，孵化出一批优秀的高科技公司，打造一流空间机器人营商环境；向社会广泛投资，并进行技术转让，以取得创新理念和方法。

（5）构建下一代智能空间机器人系统，扩大空间探索活动，助力我国未来太空计划的实施。建立类型完备、学科全面的空间机器人科学计划，培养空间机器人领域高端技术人才，加大国际交流与

合作，营造良好公平的竞争秩序。

六、对策建议

（一）加快科技创新2030—在轨服务重大专项实施

建议围绕国家重大战略需求、空间重大科技问题，加快推进科技创新2030—重大项目中“深空探测及空间飞行器在轨服务与维护”专项，加快进行在轨验证和应用。尽快讨论、制定与落实空间在轨服务机器人发展战略规划，由政府部门主导，主体为各科研单位、院校以及相关领域专家学者，鼓励私营企业、科技公司、研究人员积极参与。建议资助和研发多学科、多领域的空间机器人科学项目，重视基础性、前瞻性的新学科、新技术，并促进其在太空中的创新应用。建立完备的空间机器人型号任务发展机制，注重原始性创新工作和未来空间应用需求，可以在初期探索阶段给予充足的项目经费支持。进一步明确航天器自主维护空间机器人发展的指导思想、战略需求、具体任务和时间安排、短期发展计划和中长期战略目标，确保航天器自主维护空间机器人的安全、稳定、长期可持续发展，更好地服务于国家空间战略领域，保障国防安全。

（二）加大空间机器人智能操控基础研究支持力度

建议重点支持空间机器人智能操控等战略领域基础研究和前沿技术研究，主要研究方向包括：在轨抓捕、在轨维修等。围绕航天器抓捕与自主维护等国家重大战略项目中空间机器人的重大需求，解决传统空间机器人技术存在的运动灵活性、智能感知、自主控制和人机/多机协同等方面问题，实现“空间机器人智能操控”新模式。形成空间机器人高定位精度、高力感知精度能力以及高度智能的灵巧操控技能的学习、复杂作业环境的认知、复杂操控任务的规划决策、人机智能协同操控等高级能力。研发高性能空间机器人智能操控装备，满足国家重大航天工程任务需求。通过开展基础理论、关键技术、工程应用等方面的科研攻关，突破空间机器人“灵巧操控”“自主操控”“协同操控”等科学挑战，开创空间机器人智能操控学术新前沿，成为全球空间机器人智能操控技术创新策源地、打造成为国际一流的空间机器人研究基地。

(三) 加速构建政府—企业—高校协同发展创新机制

建议通过航天器自主维护空间机器人技术促进太空经济产业形成和增长,包括:为商业卫星提供维修、延寿等服务。同时,建议成立技术转化部门,为私营企业、高科技公司等机构提供参与空间机器人项目的机会,包括:私营部门托管政府商业空间机器人、从私营部分购买硬件和服务、公私合作进行关键技术开发等。给出未来航天器自主维护空间机器人的相关政策框架、政府预算、限制和挑战、探索计划及发展方向,积极扩大商业投资数量和规模,进一步促进技术密集型产业发展,释放航天器自主维护空间机器人技术的潜力,缩短研制周期,降低成本。在防止可用于军事的尖端技术外流的前提下,建立有效的出口政策,在不威胁国家利益的前提下,鼓励出口相关的设备、算法和服务。

(四) 加强空间机器人国际合作、引进国际高端人才

国际空间机器人技术发展突飞猛进,新试验、新演示持续开展,我们应该清醒地看到自己的差距。建议加强空间机器人国际合作,提高空间机器人科学任务的开放性。努力开展外交和公共外交,增进对国际面向航天器自主维护的空间机器人政策、计划和技术等方面的了解。采购国外先进材料、高端科学仪器、关键零部件等,并促进我国航天器自主维护空间机器人技术和在国际上应用。创新人才培养机制,利用空间机器人技术吸引国内外高端人才,培养、保持和留住空间机器人专业人才,建立国际一流、有自主创新能力和竞争力的团队。主导和参加国际合作研究项目,提供一定量的经费和设备支持,其中,我国主导项目可采用共同管理的方式进行。搭建科学家沟通交流平台,进一步发展合作渠道。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: August 21, 2023; **Revised date:** November 28, 2023

Corresponding author: Li Xueai is an assistant professor from the State Key Laboratory of Robotics and Systems, Harbin Institute of Technology. His major research field is space robotics. E-mail: xueaili@hit.edu.cn

Funding project: National Natural Science Fund Project (T2388101、92148203, 52305017); Chinese Academy of Engineering project

“Research on the Development Strategy of China’s Space Robot in Orbit” (2022-XY-30)

参考文献

- [1] 孟光, 韩亮亮, 张崇峰. 空间机器人研究进展及技术挑战 [J]. 航空学报, 2021, 42(1): 523963.
Meng G, Han L L, Zhang C F. Research progress and technical challenges of space robot [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(1): 523963.
- [2] Gao Y, Chien S. Review on space robotics: Toward top-level science through space exploration [J]. Science Robotics, 2017, 2(7): eaan5074.
- [3] 李元龙, 李志强. “星链计划”及其军事应用潜力研究 [C]. 中国指挥与控制学会. 第十届中国指挥控制大会论文集(上册). 北京: 兵器工业出版社, 2022: 86–92.
Li Y L, Li Z Q. The Starlink and its military application potential [C]. Chinese Institute of Command and Control. Proceedings of the 10th China Command and Control Conference (Volume I). Beijing: Ordnance Industry Press, 2022: 86–92.
- [4] 丁希仑, 高海波, 黄攀峰, 等. 蓬勃发展的空间机器人技术与应用 [J]. 机器人, 2022, 44(1): 1.
Ding X L, Gao H B, Huang P F, et al. The booming space robot technology and application [J]. Robot, 2022, 44(1): 1.
- [5] U. S. Department of State. National space policy of the United States of America [EB/OL]. (2010-06-28)[2023-03-20]. https://www.nasa.gov/sites/default/files/national_space_policy_6-28-10.pdf.
- [6] The Computing Community Consortium. A Roadmap for US robotics from Internet to robotics [EB/OL]. (2016-11-01)[2023-03-20]. <https://cra.org/ccc/wp-content/uploads/sites/2/2016/11/roadmap3-final-rs-1.pdf>.
- [7] Christensen H, Amato N, Yanco H, et al. A roadmap for US robotics—From Internet to robotics 2020 edition [J]. Foundations and Trends in Robotics, 2021, 8(4): 307–424.
- [8] U. S. Department of State. The national space policy [EB/OL]. (2020-12-09)[2023-03-20]. <https://www.federalregister.gov/documents/2020/12/16/2020-27892/the-national-space-policy>.
- [9] The Partnership for Robotics in Europe. Multi-annual roadmap for robotics in Europe [EB/OL]. (2016-12-02)[2023-03-20]. <https://vdocuments.net/robotics-2020-multi-annual-roadmap.html?page=1>.
- [10] Department for Business, Energy & Industrial Strategy, Ministry of Defence, and UK Space Agency. GOV.UK. National space strategy [EB/OL]. (2021-09-27)[2023-03-20]. <https://www.gov.uk/government/publications/national-space-strategy/national-space-strategy>.
- [11] Ogilvie A, Allport J, Hannah M, et al. Autonomous satellite servicing using the orbital express demonstration manipulator system [C]. Hollywood: The 9th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, 2008.
- [12] Barnhart D, Sullivan B, Hunter R, et al. Phoenix program status-2013 [C]. San Diego: AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition, 2013.
- [13] Gregory T, Newman M. Thermal design considerations of the robotic refueling mission (RRM) [C]. Oregon: 41st International Conference on Environmental Systems, 2011.

- [14] Brannan J C, Carignan C R, Roberts B J. Hybrid strategy for evaluating on-orbit servicing, assembly, and manufacturing technologies [C]. Virtual Event: AIAA, ASCEND 2020, 2020.
- [15] Diffler M A, Mehling J S, Abdallah M E, et al. Robonaut 2—The first humanoid robot in space [C]. Shanghai: 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011.
- [16] Sullivan B R, Parrish J, Roesler G. Upgrading In-service spacecraft with on-orbit attachable capabilities [C]. Orlando, FL: AIAA, 2018 AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition, 2018.
- [17] Pyrak M, Anderson J. Performance of Northrop grumman's mission extension vehicle (MEV) RPO imagers at GEO [C]. Florida: Air, Sea and Space Vehicles and Infrastructure 2022, 2022.
- [18] Hiltz M, Rice C, Boyle K, et al. CANADARM: 20 years of mission success through adaptation [C]. Montreal: International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation, 2001.
- [19] Hirzinger G, Brunner B, Dietrich J, et al. Sensor-based space robotics-ROTEX and its telerobotic features [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1993, 9(5): 649–663.
- [20] Hirzinger G, Landzettel K, Reintsema D, et al. ROKVISS-robotics component verification on ISS [C]. Orlando: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006.
- [21] Oda M. Space robot experiments on NASDA's ETS-VII satellite—an overview of the project and experiment results [J]. The Journal of Space Technology and Science, 1998, 14: 3–8.
- [22] Kimura S, Mineno H, Yamamoto H, et al. Preliminary experiments on technologies for satellite orbital maintenance using Micro-LabSat 1 [J]. Advanced Robotics, 2004, 18(2): 117–138.
- [23] Nishida S I, Kawamoto S, Okawa Y, et al. Space debris removal system using a small satellite [J]. Acta Astronautica, 2009, 65(1–2): 95–102.
- [24] 中华人民共和国国务院. 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年) [J]. 国务院公报, 2006 (9): 7–37.
The State Council of the People's Republic of China. Outline of the national medium and long term science and technology development program (2006—2020) [J]. Gazette, 2006 (9): 7–37.
- [25] 中华人民共和国中央人民政府. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要 [EB/OL]. (2016-03-17)[2023-03-20]. http://www.gov.cn/xinwen/2016-03/17/content_5054992.htm.
National Development and Reform Commission (NDRC). Outline of the 13th Five-Year Plan for the National Economic and Social Development of the People's Republic [EB/OL]. (2016-03-17)[2023-03-20]. http://www.gov.cn/xinwen/2016-03/17/content_5054992.htm.
- [26] 工信部装备工业司. 《中国制造2025》推动机器人发展 [J]. 机器人技术与应用, 2015 (3): 31–33.
Department of Equipment Industry, Ministry of Industry and Information Technology. *Made in China 2025* promotes the development of robots [J]. Robot Technique and Application, 2015 (3): 31–33.
- [27] 中华人民共和国中央人民政府. 十五部门关于印发《“十四五”机器人产业发展规划》的通知 [EB/OL]. (2021-12-21)[2023-03-20]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-12/28/content_5664988.htm.
The State Council of the People's Republic of China. Issuance of the 14th five-year plan for robot industry development plan [EB/OL]. (2021-12-21)[2023-03-20]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-12/28/content_5664988.htm.
- [28] Gao X H, Jin M H, Xie Z W, et al. Development of the Chinese intelligent space robotic system [C]. Beijing: 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006.
- [29] 刘宏, 李志奇, 刘伊威, 等. 天宫二号机械手关键技术及在轨试验 [J]. 中国科学: 技术科学, 2018, 48(12): 1313–1320.
Liu H, Li Z Q, Liu Y W, et al. Key technologies of TianGong-2 robotic hand and its on-orbit experiments [J]. SCIENTIA SINICA Technologica, 2018, 48(12): 1313–1320.
- [30] 王友渔, 胡成威, 唐自新, 等. 我国空间站机械臂系统关键技术的发展 [J]. 航天器工程, 2022, 31(6): 147–155.
Wang Y Y, Hu C W, Tang Z X, et al. Key technologies development of the space station manipulator system [J]. Spacecraft Engineering, 2022, 31(6): 147–155.
- [31] 胡成威, 高升, 熊明华, 等. 空间站核心舱机械臂关键技术 [J]. 中国科学: 技术科学, 2022, 52(9): 1299–1331.
Hu C W, Gao S, Xiong M H, et al. Key technologies of the China space station core module manipulator [J]. SCIENTIA SINICA Technologica, 2022, 52(9): 1299–1331.