

美国自由飞行太空机器人发展分析^①

贾平,李云,刘笛,特日格乐

(中国航天系统科学与工程研究院,北京 100048)

摘要:近年,美国自由飞行太空机器人发展呈现出持续进步、领先其他国家初步实现工程应用的活跃发展态势。归纳总结了美国自由飞行太空机器人的主要发展现状、特点、发展方向和几点认识。主要结论包括:服务保障类率先实现工程应用,在轨制造与装配类即将在轨验证,全球首套共识性无人人在轨操作标准制定完成;未来将向多机器人自主协同作业、操控非合作目标、多种操作功能一体化等方向发展。在上述研究基础上,从美国太空机器人的平战两用潜能、制定无人人在轨操作标准的动机、军民协同发展模式等方面提出几点认识。反映了美国自由飞行太空机器人的最新进展,且具有全面系统性,对于了解其发展情况、影响、发展经验等具有一定借鉴意义。

关键词:太空机器人;服务保障;在轨制造与装配;太空环境治理;无人人在轨操作标准

中图分类号:TN911.4

文献标识码:A

文章编号:1674-7135(2021)02-0079-06

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2021.02.013

The development analysis of US free flying space robotics

JIA Ping, LI Yun, LIU Di, TERIGELE

(China Aerospace Academy of Systems Science and Engineering, Beijing 100048, China)

Abstract: US free flying space robotics continue progressing in recent years and have been used for engineering. In view of the fact that, the status quo of US free flying space robotics, development features, development trend and some conclusions are summarized. The major conclusions include: servicing and supporting space robotics have been applied, on orbit manufacturing and assembling space robotics are about to be demonstrated on orbit, the first consensus unmanned on orbit operation standard was set. US free flying space robotics will develop towards directions that multiple robotics could work coordinately and autonomously, operate non-coordinately objects, and multiple functions are integrated in one robotic. Based on the above study, some cognitions are proposed about potential applying capability in peace and war times, the motivation of setting unmanned on orbit operation standard, the civil-military coordination development mode. This paper reflects latest progresses of US free flying space robotics comprehensively and systematically. It has referential values to understand US free flying space robotics development situations, threats, impacts and experiences.

Key words: space robotics; servicing and supporting; on orbit manufacturing and assembling; space environment governing; unmanned on orbit operation standard

0 引言

自由飞行太空机器人是可在太空环境下工作的一类新型机器人,通常具有一定自主、感知和机动能力,可通过机械臂等执行机构为航天器提供延寿、在轨装配和寿命终期离轨等服务。近年,随着航天器

的高可靠、长寿命、快速部署等需求持续增长,机械臂、人工智能等技术不断进步,美国自由飞行太空机器人(后文简称太空机器人)呈现出项目多、领域全、进展快、持续进步的活跃发展态势。商业公司已于2020年实现全球首次工程应用,政府和军方也将

^① 收稿日期:2020-07-20;修回日期:2021-03-22。

作者简介:贾平(1986—),博士/高级工程师。主要研究方向为前沿技术情报研究。E-mail:jiaping@spacechina.com

在 2022 年后陆续开展系统在轨验证。通过紧密的军民协作,美国正引领全球太空机器人发展方向,充分挖掘其平战两用潜能。

1 发展现状与特点

美国在 21 世纪初利用诸多小卫星验证了在轨交会对接技术,通过机械臂专项验证了机械臂操作技术,并将相关技术转移至后续太空机器人项目^[1]。目前,美国太空机器人项目按功能主要分为三类:一是用于在轨加注推进剂、维修维护、辅助控制姿态和轨道等的服务保障类;二是用于制造装配航天器零部件和大型结构的在轨制造与装配类;三是用于移除太空碎片的太空环境治理类。军方、政府和商业界将开展以上项目过程中积累的技术和经验用于支撑全球首套无人在轨操作标准的制定,从而促进太空机器人的发展。

1.1 服务保障类率先实现工程应用

美国太空机器人的服务保障能力世界领先,于 2007 年完成针对低轨、合作目标¹、主要以遥操作²模式运行的在轨模块更换和推进剂加注试验。目前主要研究:针对具有部分非合作特性的目标进行操作;以遥操作模式和人员监控下的自主模式运行;在高轨进行多功能操作、在低轨加注推进剂、在高轨辅助控制姿态和轨道。其中具有在高轨辅助控制姿态和轨道功能的机器人已于 2020 年率先实现工程应用,其他将在 2022 年后陆续开展系统在轨验证。

多功能操作方面,DARPA 通过“公私合作伙伴关系”开展的“地球同步轨道卫星机器人服务”项目研制的机器人具有检查、维修、辅助变轨以及升级(安装附加有效载荷)等多种功能,可针对无专门交会对接接口或抓捕点的目标进行操作^[2]。其平台将在诺斯罗普·格鲁曼(以下简称诺格)公司“任务扩展飞行器”衍生型号的平台基础上研制。机械臂由军兵种实验室研制,2020 年进行总装。该机器人将

在完成在轨验证后由诺格公司运营。在轨加注方面,NASA 的“机器人推进剂加注”项目近年在国际空间站外部开展了多次关键技术试验^[3]。“在轨服务、装配与制造任务”-1 项目继承了该项目验证的关键技术,已完成平台关键设计评审,未来相关技术将转移给商业公司,两个项目都可针对无专门加注接口的目标进行操作,“在轨服务、装配与制造任务”-1 还与 DARPA 的“地球同步轨道卫星机器人服务”项目开展了技术交流^[4];辅助控制姿态和轨道方面,诺格公司的“任务扩展飞行器”-1 机器人于 2020 年 4 月使耗尽推进剂的“国际通信卫星”-901 在地球静止轨道恢复运行,将以充当姿态和轨道控制系统的方式为其服务 5 年,预计之后还将为其他卫星累计服务 10 年。诺格公司称该机器人可与 80% 以上地球静止轨道卫星对接^[5]。

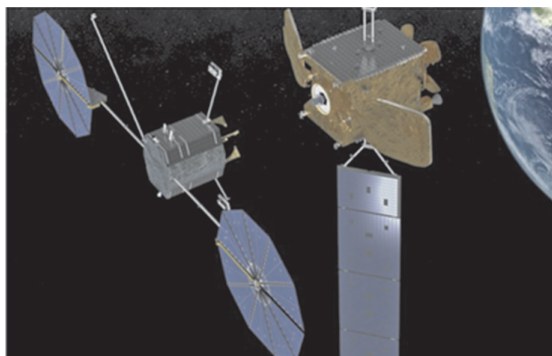


图 1 “任务扩展飞行器”在轨服务概念图

Fig. 1 On orbit service by MEV

服务保障类项目发展具有如下特点:一是军民商各有侧重,DARPA 关注高轨多功能一体化,NASA 关注低轨在轨加注,商业公司关注高轨辅助控制姿态和轨道;二是军民商间紧密协作,商业公司作为主承包商为 NASA 和 DARPA 研制机器人;NASA 和 DARPA 为商业公司提供技术和资金支持;DARPA 和军兵种实验室以及 NASA 间也有合作。

注:¹合作目标通常具有如下特性:姿态可控、有合作对接接口和标识、可传递相对运动状态,非合作目标相反。

² 自主水平从低到高如下:遥操作、个体自主操作(人员监控下的个体自主、个体完全自主)、群体智能协同。

表 1 美国服务保障类太空机器人主要在研项目
Table 1 Major programs of US servicing and supporting space robotics

项目名	机构	研发时间	研究内容	轨道	进展
任务扩展飞行器(MEV)	诺格公司	2010	提供辅助控制姿态和轨道服务	地球同步轨道	2019 年发射 MEV-1, 2020 年 4 月使一颗商业通信卫星恢复运行; 2020 年 8 月发射 MEV-2
“在轨服务、装配与制造任务”-1 (OSAM-1)	NASA、麦克萨技术公司	2014	验证推进剂在轨加注技术(新增在轨装配天线和制造横梁技术验证任务), 并为“陆地卫星”-7 提供加注服务(可重置目标轨道)	低轨	2019 年完成平台关键设计评审; 2020 年 1 月, 在轨装配制造机械臂系统“蜘蛛”计划安装在该平台上进行在轨验证; 计划 2023 年进行系统在轨验证
地球同步轨道卫星机器人服务(RSGS)	DARPA、诺格公司等	2015	验证高分辨率检查、维修、辅助变轨、升级(安装附加有效载荷)技术并提供服务	地球同步轨道	2020 年 3 月, 选择诺·格公司作为新主承包商; 2020 年进行机械臂等有效载荷总装; 计划 2023 年进行系统在轨验证

1.2 在轨制造与装配类即将在轨验证

虽然美国在轨制造与装配机器人项目启动时间略晚于欧洲,但内容全面、技术先进,未来有望厚积薄发。这些项目分别从高轨装配卫星部件、高/低轨装配大型结构系统、低轨制造与装配一体化等不同角度发展相关能力;目前多处于系统地面验证阶段;部分项目研发的机器人采用人员监控下的自主运行模式;有望在 2023 年后陆续在低轨开展验证。

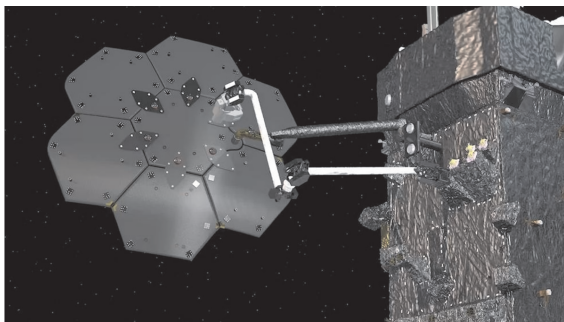


图 2 “蜘蛛”机械臂系统在轨装配概念图

Fig. 2 On orbit assembly by SPIDER manipulator system

安装卫星部件方面,NASA 资助的“蜘蛛”³ 机械

臂系统用于在轨安装大型天线,采用人员监控下的自主运行模式,已完成地面装配试验,计划 2023 年在低轨验证^[6,7];装配大型结构系统方面,NASA 的“大型结构系统太空装配”项目于 2019 年开始研发用于在轨装配的货物存储平台^[8];制造与装配一体化方面,NASA 的“在轨服务、装配与制造任务”-2⁴已完成增材制造与系统装配地面试验,计划 2023 年在低轨验证。此外,DARPA“凤凰”项目的原目标是验证通过太空机器人将退役卫星的天线拆卸下来,并将其与新型模块化可重构平台在轨装配成新卫星的技术,后被拆分为致力于研究模块化可重构航天器的新“凤凰”和研究在轨服务保障机器人的“地球同步轨道卫星机器人服务”项目。目前新“凤凰”已开展在轨试验,未来模块化可重构航天器可由机器人在轨装配而成。

在轨制造与装配类项目发展具有如下特点:一是在服务保障项目发展到一定程度后启动,继承了较多技术和经验;二是主要由 NASA 牵头商业公司研发;三是同步发展太空增材制造技术和模块化可重构技术等。

注:³原名“蜻蜓”。
⁴原名“太空建筑师”。

表 2 美国在轨装配制造类机器人主要在研项目
Table 2 Major programs of US on orbit assembly and manufacturing space robotics

项目名	机构	研发时间	研究内容	轨道	进展
蜘蛛 (SPIDER)	NASA、麦克 萨技术公司 等	2015	重点验证机械臂系统在轨 装配大型卫星天线技术	地球同步轨 道	2017 年完成系统首次地面 装配试验;2020 年 1 月,授 出系统在轨验证合同,计 划 2023 年安装在“复元”- L 平台上,先在低轨开展验 证
大型结构系统 太 空 装 配 (SALSSA)	NASA、原绳 系有限公司 等	2015	研究大型模块化结构系统 的自动装配、升级、重构及 再利用系统技术	低轨、高轨、 月球	2019 年 6 月,授出货物存 储平台研发合同
“在轨服务、装 配与制造任 务”-2 (OSAM- 2)	NASA、太空 制造、诺格 公司等	2015	验证在轨增材制造与装配 大型、复杂卫星部件和结 构技术	低轨验证、 未来高轨	2019 年在模拟太空环境下 完成增材制造与装配试 验;授出验证合同;计划 2023 年开展在轨验证

1.3 太空环境治理类进展不显著

美国政府和军方很少开展太空环境治理机器人专项,进展不如欧洲显著,主要资助商业公司研发废弃卫星自行离轨装置,原绳系有限公司的“终结者带”项目已于 2019 年开展在轨试验。未来这些离轨装置可通过机器人安装到废弃卫星上。虽然专项较少,但实际美国已通过“任务扩展飞行器”等具有携带多数地球静止轨道卫星变轨功能的服务保障机器人掌握了一定的太空环境治理机器人技术和能力。

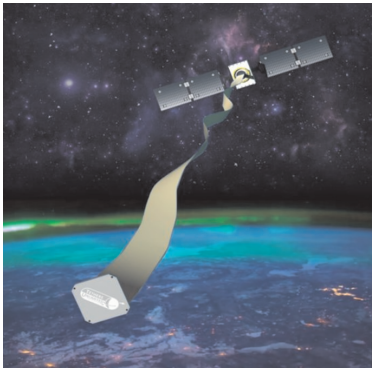


图 3 “终结者带”装置在轨展开示意图
Fig.3 The Terminator Tape with deployed tape

1.4 全球首套共识性无人在轨操作标准制定完成

DARPA 于 2016 年开始组建“交会与服务操作执行联盟”(CONFERS),拟通过该联盟牵头制定无人在轨操作技术和安全标准。该标准涉及被服务航天器界面设计、太空机器人交会逼近和在轨操作行为、数据交换和共享机制、信任机制等内容^[9]。目前该联盟已制定完成《卫星服务安全框架技术和操作指南文件》(已公开发布)与“共识性标准”(未公开发布),拟与联合国外空和平利用委员会等国际机构共享并推广该标准,正带领国际标准组织制定《CONFERS 标准操作原则与实践》,计划 2021 年发布。标准制定工作由 CONFERS 以召开研讨会的形式开展,美国和多国航天专家参与其中,并共享数据和经验。CONFERS 将逐步从 DARPA 资助转变为自筹资金运营。

2 发展方向

综合 NASA 发布的相关报告^[10]、技术路线图,以及上述项目分析,太空机器人将朝智能协同水平更高、操控能力更强、功能更全的方向发展^[11]。

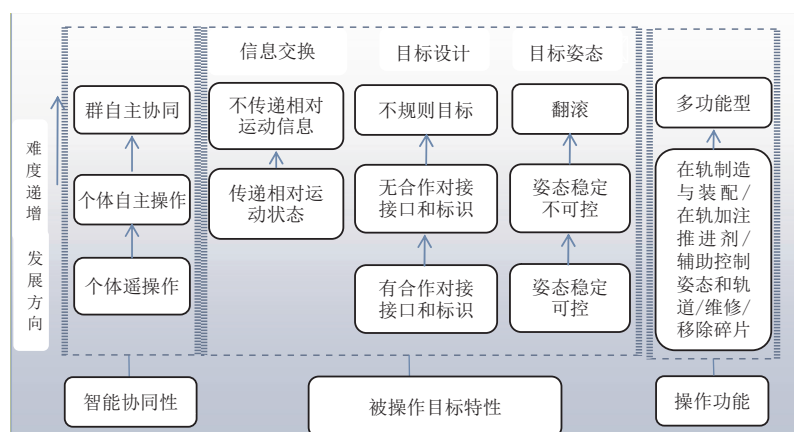


图4 太空机器人发展方向

Fig. 4 Development directions of space robotics

2.1 向多机器人自主协同作业方向发展

随着人工智能等技术的不断发展,太空机器人在个体自主水平不断提升的同时,将向群自主协同方向发展。“任务扩展飞行器”“地球同步轨道卫星机器人服务”等项目均计划发射多个机器人同时提供在轨服务。一方面,群体工作可满足更多老旧和损坏卫星的快速、大量服务需求;另一方面,群体互联互通,可随时根据任务变化和群内其他机器人情况规划和调整自身操作,实现对群资源的合理利用,增强数据处理和任务执行速度。

2.2 向操控非合作目标方向发展

迄今,在轨运行的卫星都没有专用对接接口和标识,属于非合作或具有部分非合作特性的目标,未来,美国将逐步发展针对完全非合作目标的操控能力,更符合工程应用需求。除已应用的“任务扩展飞行器”能与大部分地球静止轨道卫星对接并服务外,“地球同步轨道卫星机器人服务”“在轨服务、装配与制造任务”-1等项目都在研究针对具有部分非合作特性的目标进行操作。

2.3 向多种操作功能一体化方向发展

未来,太空机器人可通过更换机械臂终端工具进行多种操作,向集成在轨加注推进剂、移除太空碎片、辅助控制姿态和轨道,以及在轨制造与装配等能力的多功能一体化方向发展。“任务扩展飞行器”将在辅助控制姿态和轨道的基础上,扩展维修、替换零部件等多种能力;“地球同步轨道卫星机器人服务”项目的初始研究目标就是发展具有多种功能的机器人^[12];主要用于加注推进剂的“在轨服务、装配

与制造任务”-1 机器人不仅从2020年4月开始增加了在轨制造与装配技术验证任务,还将为维修和升级,移除太空碎片等任务储备技术基础。NASA称其有望成为首个开展工程应用的多功能机器人。

3 几点认识

美军已在《太空作战》条令等文件中明确提出将太空机器人相关技术和能力作为军事航天发展重点。美国政府和军方利用商业力量提升相关技术与能力,积蓄军事应用潜力的策略,有望使其发挥最大价值。

3.1 美国太空机器人具有较全面的平战两用潜能

“任务扩展飞行器”的应用使美国太空机器人具备了和平时提供姿态和轨道控制服务,战时开展一定程度攻防操作的能力。综合其他在研项目看,美国太空机器人未来将具备更全面的平战两用能力。和平时可为军民商用航天器提供如下服务:通过在轨加注推进剂、辅助控制姿态和轨道、维修等方式提供延寿服务;通过在轨装配制造提供生产和部署服务,间接提升航天器结构和性能设计上限,使其突破当前运载能力限制;通过捕获废弃航天器并携其离轨,提供寿命终期处理服务并维护太空环境。随着技术水平和操作能力不断提升,战时有可能提供如下攻防操作:通过捕获、操作、机动能力破坏对手航天器或使其脱轨;通过绕飞和巡视己方航天器,在发现威胁时告警,利用机动能力携带己方航天器躲避。

3.2 美国率先制定无人在轨操作标准将抢占政治、军事和商业先机

除美国外,德国、英国和日本等也在力促太空机

机器人发展,已形成美国领先、多国竞逐的发展态势。鉴于太空机器人的平战两用特性,美国国防机构率先牵头制定无人在轨操作标准,不仅为促进其发展和应用,还有抢占政治、军事和商业先机的深层动因。政治方面:不仅有助于争夺国际话语权还可降低外交风险。例如,机器人在机动过程中可能与他国航天器发生碰撞或在操作中损坏被服务航天器,该标准提出的数据交换和信任机制等内容,有助于使相关活动透明化。军事方面:国防机构牵头制定标准,“以军带民”促进商业化发展;反过来,商业技术和经验在标准制定过程中被军方吸纳,商业机器人可在和平时服务军方,战时转为军用,实现“以民养军”。商业方面:通过标准进行规范和约束,不仅有助于降低政府监管难度,还可避免行业垄断,为投资方、客户等提供经济和安全保障,有利于可持续发展。太空机器人的商业化可持续发展,将开辟经济价值巨大的新商业航天市场。以“任务扩展飞行器”为例,其累计可为老旧地球同步轨道卫星延寿15年,相当于节省了一颗寿命15年、平均建造和发射费用达10亿美元的卫星成本,并使老旧卫星继续创造更多商业价值或军事价值。

3.3 美国采取政军主导、军民协同、各有侧重的发展模式值得借鉴

目前NASA和DARPA是美国太空机器人的主要牵头研发和投资机构,商业公司主要作为承包商积极参与,同时也独立研发和运营。这些机构各有侧重、密切协作:NASA牵头商业公司优先发展在轨加注能力,牵引维修、在轨装配制造等复杂操作能力发展,后续将发展多功能机器人;以DARPA为代表的军方牵头各方研究多功能机器人,并制定无人在轨操作标准;商业公司为政府和军方提供研制和运营服务,同时主攻太空碎片移除、辅助姿态和轨道控制能力,逐步拓展多种功能。这些组织机构在无人在轨操作标准的制定过程中共享相关技术和经验。随着应用规模的扩大和标准的推广,未来多数美国太空机器人将由商业公司运营,平时可为政府和军方卫星服务,战时转为军用装备。以上发展模式有利于快速、全面、深入挖掘太空机器人的平战两用潜能。我国在发展太空机器人的过程中,也可考虑借鉴这种模式,由军方牵头重点发展难度较高、军用前景较好的技术和能力,加速推进专项计划;鼓励民间资本投入,重点发展难度较低、商业价值较高的技术和能力。

4 结束语

除美国外,欧洲、日本、俄罗斯等都在积极发展太空机器人,已形成美国领先、多国竞逐的发展态势。未来,太空机器人将成为一种新型航天器,作为航天装备体系的重要组成部分,变革卫星运用方式和太空后勤保障能力,催生新的商业航天市场。

参考文献:

- [1] 陈小前,袁建平. 航天器在轨服务技术[M]. 北京:中国宇航出版社,2009.
- [2] DARPA-PS-19-01 for Robotic Servicing of Geosynchronous Satellites(RSGS)[R]. Arlington :DARPA,2019.
- [3] NASA. Administration robotic refueling mission [EB/OL]. 2017. http://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/rrm3_factsheet_110718_final.pdf.
- [4] NASA. Restore-L Servicing Technologies [EB/OL]. 2019. <http://sspd.gsfc.nasa.gov>.
- [5] ORBITAL ATK. Mission extension vehicle (MEV) fact sheets[EB/OL]. 2017. http://www.northropgrumman.com/Capabilities/SpaceLogistics/Documents/MEV_Factsheet.pdf.
- [6] NASA. NASA funds in-space manufacturing demo that will test Tethers Unlimited technology[EB/OL]. January 31, 2020. <http://www.geekwire.com/2020/nasa-funds-space-manufacturing-demo-aims-put-tethers-unlimited-tech-test/>. January 31, 2020.
- [7] Techstartups. Maxar wins \$142 million NASA robotics mission. [EB/OL]. 2020. <http://techstartups.com/2020/01/31/maxar-work-nasa-demonstrate-orbital-manufacturing-spacecraft-assembly-new-robotic-arm/>. January 31, 2020.
- [8] 李军,董士伟,等. 空间大型载荷平台在轨构建技术探讨[J]. 空间电子技术,2018,15(2):8-15.
- [9] Consortium for Execution of Rendezvous and Servicing Operations. Guiding Principles for Commercial Rendezvous and Proximity Operations(RPO) and On-Orbit Servicing(OOS)[R]. 2018.
- [10] NASA. On-Orbit Satellite Servicing Study-Project report [R]. 2010.
- [11] 贾平. 国外在轨服务空间机器人发展分析[C]//中国宇航学会2016年学术年会论文集,北京,2016.
- [12] FLORES A A,MA Ou. A review of space robotics technologies for on-orbit servicing[J]. Progress in Aerospace Sciences,2014,68(8):1-26.