国际空间站在轨服务技术验证发展分析

闫海江^{1,2*}, 靳永强^{1,2}, 魏祥泉^{1,2}, 肖余之³

1. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201109;

2. 中国航天科技集团公司第八研究院空间科学总体部, 上海 201109;

3. 上海航天技术研究院, 上海 201109

* E-mail: yhj_shanghai@126.com

收稿日期: 2017-08-25; 接受日期: 2017-09-13; 网络版发表日期: 2018-02-01

国家自然科学基金项目(批准号: 61573247)和上海市科学技术委员会项目(编号: 14XD1423400)资助

摘要 先期在轨技术验证, 再逐步扩展, 最终走向工程应用是开展空间项目的一般模式. 本文梳理了国际空间站上开展的燃料加注和增材制造等在轨服务技术验证项目及其后续发展, 分析了制约工程应用的关键技术, 包括灵巧机械臂、协同操作、安全交会停靠、空间增材制造和非合作目标推进剂补加等, 最后总结了国际空间站在轨服务项目的发展启示, 并根据我国空间站的发展现状提出了开展相应在轨服务项目的建议.

关键词 国际空间站, 在轨服务, 燃料加注, 3D打印, 空间组装

1 引言

航天活动在政治、经济、军事、社会等方面所产生的影响和效益驱动各国大力发展航天产业. 同时, 航天产业也存在着高投入、高风险等特性: 航天器发生故障或燃料提前耗尽将严重影响其任务效益, 带来巨大的经济损失; 废弃航天器不仅占用宝贵的轨位资源, 还影响其他在轨航天器的安全运行. 据统计¹⁾, 一方面, 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, 2颗卫星进入错误轨道, 20颗卫星因寿命到期退役. 另一方面, 受限于

目前运载火箭整流罩包络的限制和运载发射主动段的影响, 大型天线²⁾、大口径天文望远镜^{1,2)}对在轨制造与组装也提出了需求. 针对在轨卫星的故障维修、燃料加注、辅助机动以及在轨制造与组装航天器等在轨服务活动为提高航天活动效益提供了新思路, 也为航天产业发展带来了新机遇.

美国国家航空航天局(NASA)是在轨服务活动的先行者, 曾于1984年4月依托航天飞机成功实施了针对太阳峰年任务卫星的维修任务, 并在1993~2009年期间依托航天飞机对哈勃太空望远镜成功开展了5次维修任务³⁾. NASA依托国际空间站于2011年开始实施“机

1) Ambrose R O. Satellite servicing technology development. http://www.nasa.gov/pdf/60536main_carter_8_2_11.pdf

2) NASA. NASA_Facts_SALSSA: Space Assembly of Large Structural System Architectures. http://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/fs_salssa_150624.pdf

引用格式: 闫海江, 靳永强, 魏祥泉, 等. 国际空间站在轨服务技术验证发展分析. 中国科学: 技术科学, 2018, 48: 185–199

Yan H J, Jin Y Q, Wei X Q, et al. Review of on-orbit servicing technique demonstrations on international space station and developments (in Chinese). Sci Sin Tech, 2018, 48: 185–199, doi: 10.1360/N092017-00285

机器人燃料加注任务(RRM)³⁾, 在2011年启动“零重力3D打印技术验证”项目⁴⁾, 探索及验证故障维修、在轨加注、性能升级、重定位、在轨组装等服务任务所需的技术。同时, NASA还提出了“低轨卫星恢复(Restore-L)”⁵⁾以及“建筑师(Archinaut)”项目⁶⁾等独立飞行验证计划, 推广依托空间站所取得的在轨服务技术成果, 推动航天产业发展。

本文系统梳理了国际空间站开展的在轨服务项目及相关技术的后续发展, 归纳相关的关键技术, 分析国际空间站在轨服务项目的启示, 提出我国空间站在轨服务项目发展建议, 为我国在轨服务发展提供参考。

2 国际空间站在轨服务技术验证项目

目前, 燃料加注在轨应用的成功案例包括俄罗斯空间站、国际空间站和“轨道快车”飞行器, 目标航天器预留被补加接口, 由货船或服务飞行器进行补给。而目前在轨的卫星并无被补加口, 为非合作目标, 即设计之初未考虑后续在轨服务需求的卫星, 补加难度大。因此, NASA启动并实施了针对非合作目标在轨补加的技术验证计划RRM。

对于在轨组装而言, 目前仅有空间站是由多个独立发射的大型组件在轨组装而成, 且构建过程中需要航天员出舱参与。虽然有人参与效率高, 但对安全性

要求高, 增加了任务成本, 且受目前运载火箭能力制约。鉴于此, NASA利用国际空间站对空间制造与组装技术进行验证。

2.1 机器人燃料加注任务

NASA戈达德太空飞行中心的卫星服务能力办公室(SSCO)于2009年启动RRM(图1)。

RRM所有的空间操作均由地面控制, 由国际空间站上的21.34 m长的机械臂(Dextre和Canadarm2组合体)操作, 利用RRM模块模拟非合作目标, 任务目的并不局限于燃料加注, 还包括维修、更换。RRM分为三个阶段^[4,5]。

(1) 第一阶段: RRM1(2011年9月~2013年5月)

RRM1主要验证燃料加注的相关操作工具性能和技术。参与RRM1包括Dextre, RRM模块(图2, 其中任务面板如图3所示), 4个末端工具及适配器(如图4所示), 具体功能如表1所示^[6,7]。

RRM1划分为6个子任务³⁾, 如表2所示。

(2) 第二阶段: RRM2(2013年8月~2016年1月)

RRM2主要验证在轨监测、修复故障以及制冷剂补加等在轨服务所需的技术、工具和工艺。新增的试验系统和RRM2试验内容分别如表3和表4所示^[8]。RRM2的任务面板和VIPIR如图5所示。第二阶段的RRM模块布局和适配器如图6和图7所示。

图1 (网络版彩图)Dextre(a)和RRM模块(b)^[6]

3) Satellite Servicing Capability Office, NASA. Robotic refueling mission. http://ssco.gsfc.nasa.gov/robotic_refueling_mission.html

4) NASA. 3D printing in zero-g technology demonstration. http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/1115.html

5) NASA. Restore-L mission. <http://ssco.gsfc.nasa.gov/restore-L.html>

6) NASA. Emerging space capabilities and Tipping Point summaries. <http://www.nasa.gov/feature/emerging-space-capabilities-and-tipping-point-summaries>

图 2 (网络版彩图)阶段1的RRM模块^[6] 图 3 (网络版彩图)任务面板1(a)和任务面板2(b)示意图^[7]

完成第二阶段的试验后, RRM模块将随货船一同进入大气层烧毁。

(3) 第三阶段: RRM3(2017年~)^[5]

针对未来载人深空探测等任务对制冷剂补充和电推进使用的氦气补给需求, NASA规划了第三阶段任务, 届时将使用新模块开展验证。

RRM是国际空间站机械臂首次用于空间技术验证, 通过旋拧、剪切、夹持、剥离、插拔等验证, 为燃料加注、故障维修、在轨组装等独立飞行任务打下了

良好的基础。

2.2 空间3D打印技术验证

NASA于2011年启动了“在国际空间站上试验零重力环境下的3D打印技术”项目, 用于验证微重力环境下3D打印的可行性, 并将空间打印产品带回地面, 与同一个3D打印机在发射前制造的产品进行比较分析, 为按需定制零部件奠定基础^[7]。在“小企业创新研究(SBIR)”计划的支持下, NASA马歇尔太空飞行中心选

7) Harbaugh J. Space station 3D printer builds ratchet wrench to complete first phase of operations. http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/news/3Dratchet_wrench

图 4 (网络版彩图)阶段1的工具和适配器^[7]

择太空制造公司(Made In Space)开展该项目研究^[8]。

2011年12月, 太空制造公司获得第一阶段合同, 设计国际空间站上的3D打印机; 2013年1月, 获得第二阶段合同, 制造并试验3D打印机; 2013年2月, 获得第三阶段合同, 在国际空间站开展3D打印试验^[9]。

首台3D打印机于2014年9月抵达国际空间站(图8)。截至2014年12月15日, 3D打印机成功完成了14类产品共计24个样品的打印, 其中有13类产品的打印文件在发射前就已预装载在3D打印机内, 棘轮扳手首次尝试了由地面设计文件并上传至空间站, 验证按需在轨制造能力^[9]。

2016年3月23日, 首台商用3D打印机“增材制造设备(AMF)”送入国际空间站(图9)。AMF采用可升级设计, 当零部件老化或损坏时只需更换相应零部件即可使用, 能以30多种聚合物为原材料, 太空制造公司正在考虑添加金属打印能力。首台技术验证3D打印机和首台商用3D打印机参数如表5和表6所示^[10]。

NASA和私营公司联合在国际空间站进行3D打印

试验, 验证微重力环境下增材制造技术可行性; 生产商业级产品, 在实际使用环境中考核3D打印产品的性能。通过上述研制、生产、应用活动, 为空间制造的大规模开展积累先期经验。

3 在轨服务项目后续发展

利用空间站对燃料加注和在轨制造与组装技术进行验证后, NASA推出了旨在满足在轨独立开展任务需求的系统级验证项目Restore-L和Archinaut。

3.1 低轨卫星恢复

2014年NASA启动了Restore-L任务的论证工作, 见表7。计划使用恢复服务飞行器(restore servicing vehicle, RSV)对政府运营的极轨卫星进行加注等服务, 如图10所示。Restore-L将采取公司合作的方式进行, 由政府提供服务载荷, 私营公司提供飞行器平台^[11]。

Restore-L的任务流程包括发射入轨(1 d)→在轨测

8) Made In Space. Introduction. <http://www.madeinspace.us/presskit>

9) Kohlenberg B. Made In Space announce in-vacuum additive manufacturing breakthrough. <http://additivemanufacturing.com>

10) Made In Space. 3D Printer & Additive Manufacturing Facility. <http://www.madeinspace.us/projects>

11) NASA. Request for information: Spacecraft bus concepts to support the Asteroid Redirect Robotic Mission and In Space Robotic Servicing. http://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/arm-block-0-5-bus_rfi-final.pdf.

表 1 RRM1 试验系统组成

名称	组成与功能	备注
主结构	为任务面板、末端工具加注/排出阀门、多层隔热毯以及软管提供安装位置	
流体传输系统	由储箱、泵、管路、阀门、温度、压力传感器、温度调节器组成, 用于验证燃料加注和传输	RRM 载荷质量为 250 kg, 包络为 109 cm×84 cm×114 cm,
电子器件	由控制器、传感器以及与 ExPA 的机电接口组成, 完成与空间站的信息交互、对 RRM 模块进行监测和管理	装有 1.7 L 乙醇;
RRM 模块	包括对接环模拟件、SMA 适配器存储装置、扳手适配器存储装置、安全螺帽(无保险丝)、第三螺帽(无保险丝)、SMA 螺帽等组成, 主要用于机械臂视觉训练和操作任务	ExPA: EXPRESS Plate Adapter, 即国际空间站暴露试验平台适配器;
任务面板 1	包括安全螺帽(有保险丝)、第三螺帽(有保险丝)、多层隔热毯、爆炸螺栓孔、J 型挂钩、门闩, 主要用于机械臂视觉训练和操作任务	SMA: Sub-Miniature A, 一种微小型螺帽;
任务面板 2	包括安全螺帽(有保险丝)、第三螺帽(有保险丝)、多层隔热毯、爆炸螺栓孔、J 型挂钩、门闩, 主要用于机械臂视觉训练和操作任务	第三螺帽: 加注/排出阀门的最外面的螺帽
制冷剂阀门面板	包括 T 型阀门和圆形阀门, 主要用于验证机械臂捕获、旋拧、移除和存储能力	
安全螺帽工具	配有旋拧工具和两个小相机, 用于拆除加注/排出阀门上的安全螺帽	
多层隔热毯/金属线切割工具	配有切割工具和两个小相机, 用于夹持多层隔热毯以及切割安全螺帽和第三螺帽上的保险丝	末端工具采用通用型主结构, 具有统一的机电接口
末端工具	配有喷嘴连接工具、软管和两个小相机, 用于打开/关闭阀门以及传输燃料	
多功能工具	配有转换接口和两个小相机, 通过与适配器连接, 完成相应操作	
第三螺帽适配器	用于旋拧第三螺帽	
T 型阀适配器	用于移除 T 型阀门	
圆形螺帽适配器	用于旋拧圆形螺帽	
插头操作适配器	用于移除阀门上的插头	

试(53 d)→转移至目标星轨道(15 d)→与目标星交会停靠(7 d)→对目标星进行燃料加注(7 d)→服务其他卫星(拓展任务)→转移至弃置轨道(17 d)→退役处理(2 d), 如图 11 所示^[5].

Restore-L 启动的时间是 2014 年, 恰逢 NASA 于 2013 年成功开展 RRM 第一阶段的试验. 从时间和任务分析, Restore-L 是 RRM 的独立飞行验证版. Restore-L 将在真实空间环境下对在轨服务所需的关键技术进行全流程、系统性的验证.

3.2 建筑师

2015 年 11 月, NASA 太空技术任务部选择太空制

造公司、诺·格公司和海洋工程太空系统公司组成的团队开展下一代空间制造系统 Archinaut 的研究. Archinaut 的正式名称为“多功能太空机器人精确制造与装配系统”, 预计 2018 年在轨验证^[12].

Archinaut 是国际空间站的外部载荷, 将在 3D 打印机上配置机械臂, 制造所需零部件, 并与地面发射上来的零部件(如传感器、电子元器件和电池)进行组装, 验证真实太空环境的增材制造技术适应性、大型系统在轨制造和组装能力. 太空制造公司负责 3D 打印机, 海洋工程太空系统公司负责机械臂, 诺·格公司提供系统工程、控制器以及软件(用于 Archinaut 与国际空间站的接口测试)^[13].

12) Werner D. NASA, Made in Space think big with Archinaut, a robotic 3D printing demo bound for ISS. <http://spacenews.com/nasa-made-in-space-think-big-with-archinaut-a-robotic-3d-printing-demo-bound-for-iss>

13) Grunewald S J. NASA and Made In Space are building a multi-armed 3D printing space robot named Archinaut. <https://3dprint.com/121831/nasa-made-in-space-archinaut>

表 2 RRM1试验内容

子任务名称	时间	内容	操作工具
拆除发射锁紧装置和辅助视觉学习	2011-09-06~2011-09-07	(1) 解除末端工具以在发射入轨阶段使用的锁紧装置; (2) 在真实太空环境中不同光照条件下验证和改进机器视觉算法	Dextre
拆除气液加注装置	阶段一: 2012-03-07~2012-03-09 阶段二: 2012-06-19~2012-06-22	阶段一: (1) 从RRM模块中取出安全螺帽工具、多层隔热毯/金属线切割工具和多功能工具, 并进行机电功能检查; (2) 解除工具适配器的锁紧装置; (3) 切断两根直径为0.5 mm的保险丝 阶段二: (1) 移除并安装T型阀; (2) 移除并安装圆形螺帽; (3) 对圆形螺帽下方的插头进行操作; (4) 将多功能工具和第三螺帽适配器放回相应的工具箱	阶段一: Dextre、多功能工具、金属线切割工具、第三螺帽适配器 阶段二: Dextre、多功能工具、T型阀适配器、插头操作适配器
加注燃料	2013-01-14~2013-01-25	(1) 切割第三螺帽的保险丝; (2) 拆除第三螺帽; (3) 切割安全螺帽的保险丝; (4) 拆除安全螺帽; (5) 与阀门连接并传输乙醇; (6) 加注完毕后在阀门上自动加装“快速断开”装置, 方便下次加注	Dextre、金属线切割工具、多功能工具、安全螺帽工具、喷嘴工具、第三螺帽适配器
拆除SMA螺帽	2013-05-01~2013-05-03	拆除SMA螺帽(用于保护同轴射频连接器)并存储	Dextre、安全螺帽工具
拆除螺钉	2013-05-03~2013-05-05	拆除螺钉并存储	Dextre、安全螺帽工具、螺丝起子适配器
操作隔热毯	2013-05-09~2013-05-11	(1) 切开隔热毯的胶结面; (2) 卷起隔热毯; (3) 剪断地线; (4) 对通过“纽扣式”连接散热面的隔热毯进行操作	Dextre、多层隔热毯切割工具

表 3 RRM2试验系统组成

名称	功能
任务面板3	用于制冷剂补给流程测试试验
任务面板4	用于寄宿试验和可视检查等验证
可视检查灵活无骨机器人(VIPIR)	含变焦相机、定焦相机和内窥镜相机, 用于验证卫星内部故障维修中的可视化检查能力
适配器	用于完成即插即用、制冷剂补给流程测试等试验
RRM组件在轨转移架(ROTC)	用于转移从RRM拆除下来的组件

表 4 RRM2试验内容

类型	名称	目的
机械臂辅助试验	制冷剂补给流程验证试验	通过流程测试, 为后续在轨实施制冷剂补给奠定基础
	可视化检查试验	通过VIPIR试验, 支撑狭窄空间内的故障维修
	电连接试验	验证即插即用的部件的机电性能
	机器视觉辅助试验	验证基于特征点的相对位置和方向测量
RRM模块寄宿试验	太阳电池片试验	验证新型太阳电池片的光电转换效率和空间环境的耐受性
	热控涂层试验	验证新型热控涂层在真实太空环境下的性能

图 5 (网络版彩图)VIPIR(a)和任务面板3(b)与任务面板4(c)^[8]

图 6 (网络版彩图)阶段1(a)和阶段2(b)的RRM模块布局^[8]

图 7 (网络版彩图)阶段2的适配器^[8]

如果2018年成功验证Archinaut, 太空制造公司和海洋工程太空系统公司希望进一步发展Archinaut, 即在能力更强的3D打印机上安装3个机械臂, 具备自主机动等能力, 可维修故障、升级零部件以及回收退役航天器的高价值部件。样机原型及在轨工作示意如图12所示。

4 关键技术

在轨服务类型多样, 见表8, 服务对象涵盖故障卫星、废弃卫星和寿命末期卫星, 可能是合作目标, 也可

表 5 首台技术验证3D打印机基本参数

名称	参数
打印材料	丙烯腈-丁二烯-苯乙烯(ABS)
分辨率	0.2 mm
细丝直径	1.7 mm
线轴重量	0.454 kg
打印物体包络	100 mm(L)×50 mm(W)×50 mm(H)
打印机箱体包络	330 mm(L)×240 mm(W)×295 mm(H)
电子控制箱包络	270 mm(L)×185 mm(W)×70 mm(H)

图 8 (网络版彩图)首台技术验证3D打印机⁸⁾

表 6 首台商用3D打印机基本参数

名称	参数
打印材料	丙烯腈-丁二烯-苯乙烯(ABS)、高密度聚乙烯(HDPE)、聚酯亚胺(PEI)、聚碳酸酯(PC)
分辨率	0.1~0.44 mm(与材料相关)
高度分辨率	0.075 mm
打印物体包络	140 mm(L)×100 mm(W)×100 mm(H)
最大壁厚	1 mm
突出物长度	76.2 mm
螺纹孔	M10

图 9 (网络版彩图)首台商用3D打印机⁸⁾

表 7 Restore-L任务概述

名称	说明
发射时间	2020年中期
任务目标	(1) 与目标星交会, 并进行在轨检查; (2) 自主捕获目标星; (3) 向目标星加注燃料肼; (4) 接管目标星轨道并重新部署
任务轨道	地球极轨
服务对象	政府运营的卫星(暂定Landsat-7)
服务载荷	(1) 两个7DOF机械臂; (2) 交会与接近传感器; (3) 末端工具; (4) 推进剂传输子系统
推进系统	化学推进或电推进
关键技术	(1) 自主实时相对导航系统; (2) 高速容错计算机; (3) 灵巧机械臂; (4) 先进末端工具; (5) 推进剂传输系统
任务操作	地面遥操作机械臂
任务时间	92 d
飞行器寿命	≥1年
管理机构	NASA总部的太空技术任务部和戈达德太空飞行中心的卫星服务能力办公室

能是非合作目标. 因此, 技术验证走向工程应用, 需突破非合作目标自主接近于安全停靠、复杂任务下多臂协同精细操作、复杂零部件空间增材制造、面向工程应用的高可靠推进剂补给等关键技术.

4.1 适应多任务的灵巧机械臂

机械臂是实施在轨服务的主要载荷, 而在轨服务类型的多样性、服务对象的差异性对机械臂的任务适应能力提出了较高要求.

图 10 (网络版彩图)Restore-L任务的飞行器构型(a)和在轨任务(b)示意^[11]

图 11 (网络版彩图)Restore-L任务流程示意^[11]

首先,一方面,抓捕、维修、更换、装配等任务可能针对不同的抓捕部位、故障部件和待升级组件,涉及抓持、旋拧、剪切、插拔等精细操作,机械臂末端工具和适配器种类较多,需要进行轻量化设计;另一方面,通过末端工具与不同的服务对象形成可靠的组合体,对末端工具的刚度、强度提出了更强的要求。

其次,关节是机械臂的核心部件,由动力源、传动机构、传感器、轴系和壳体以及热控组件等组成,是典型的机、电、热、控一体化的集成部件,系统复杂且精度要求高,需要综合考虑布局、测量、装配工艺等因素。同时为保证非合作目标在轨抓捕的可靠性、连接的安全性以及任务操作的灵活性,机械臂本身应

图 12 (网络版彩图)Archinaut原型(a)和在轨建造天线(b)示意^[13]

表 8 在轨服务类型

在轨服务类型		典型要求	典型服务对象	说明
功能维护类	故障维修	自主安全逼近、精细操作	故障卫星	通过功能维护,使服务对象按照既定的业务水平正常执行业务
	辅助变轨	非合作目标抓捕	因发射导致未能入轨或定点的卫星	
延寿类	燃料加注	精细操作、补加过程控制	燃料耗尽的寿命末期卫星	通过延寿服务,使服务对象的寿命延长,增加其在轨效益
	姿轨接管	非合作目标抓捕		
环境清理类	主动清除	非合作目标的探测识别、	未离轨的废弃卫星或寿命末期卫星	通过环境清理,减少空间碎片的存量和增量,为其他卫星的正常运行提供安全的轨道环境
	被动清除	自主安全逼近		
生产制造类	增材制造	高精度姿态控制、高效散热、振动抑制	标准化组件、大型天线	通过空间打印标准化部组件,在轨组装大型设施,提供快捷高效和高品质服务,避免运载火箭带来的发射时间、发射成本、整流罩包络约束及主动段力学环境等问题
	在轨组装	精细操作、高精度姿态控制		
后勤保障类	物资运输	高精度交会停靠	大型空间设施	通过物资运输,使得其他在轨服务活动能够顺利开展

具有关节机构上的柔顺特性并能够感知关节及末端所受到的外部力/力矩等信息。另外,执行精细操作对高精度伺服控制提出了要求^[10,11]。

4.2 非合作目标自主探测与安全停靠

目前在轨的卫星绝大多数都没有安装合作标志灯、抓捕适配器等合作化装置,且系统设计也未考虑后续服务的需求,且地面无法准确获取在轨状态,因此将服务对象按照非合作目标来处理。

服务飞行器执行抓捕、维修、更换、加注、重定位等任务,需要准确获取目标的运动状态,为确定合适的抓捕停靠以及操作位置、在轨规划逼近路径提供可靠输入,特别是当目标处于失稳状态时,需要通过三维

重建重构目标的几何构型,通过解算获取旋转矢量等参数。空间环境下,考虑到探测距离、光照特性等因素,特定部位成像对探测器能力提出了较高要求。同时,在逼近服务对象的过程中,受限于作用范围、精度以及目标无明显特征点等,需要综合考虑光学、微波等多种主、被动探测器的能力进行配置,通过多源信息融合和滤波估计,获取相对导航参数信息^[12~14]。

针对非合作目标的在轨服务任务,特别地,逼近失稳慢旋目标开展维修维护以及离轨清除,本质上是空间交会问题,但由于接触操作,目标应作体目标来处理,而失稳目标的姿态存在翻滚状态,导致拟操作部位也随目标本体一起在空间中旋转,且目标本体具有太阳帆板、天线等大型附件,需要服务飞行器根据实

时测量的与操作部位的相对位置、姿态, 规划逼近停靠路径和安全走廊. 当相对位置和相对姿态误差过大时, 很可能导致服务飞行器无法接近目标, 甚至有可能与目标发生局部碰撞^[15]. 另外, 超近距离逼近过程中, 相对姿轨耦合严重, 需要开展姿轨联合设计, 对鲁棒性强的控制律设计提出了挑战.

4.3 复杂任务下多臂协同精细操作

相比于单机械臂, 多机械臂在复杂任务适应性、灵活性、可靠性等方面的优势, 使得其在未来在轨服务任务中有较为广阔的应用前景. 多臂协同操作需要在运动学与动力学、运动规划、协调控制等方面需要解决多臂系统非线性、强耦合等特性引入的问题.

由于多臂系统是一个自由度高度冗余的机械系统, 系统自由度的冗余带来了运动学上的不确定性, 即确定的末端位姿对应的多臂空间构型不唯一; 运动学关系的不确定性又会使系统在动力学特性上具有不确定性, 即使被服务对象达到特定运动速度、加速度时, 各机械臂的末端作用力并不唯一. 因此, 传统的单臂系统研究方法并不适用, 需要对多臂运动学求解和动力学建模进行深入分析, 进而实现协同控制^[16].

多臂系统通过运动规划实现从初始位姿达到执行任务所需的位姿, 需要克服机械臂与路径障碍物, 机械臂之间的碰撞, 以及多臂位姿误差造成在被服务对象上产生的作用力. 而任务环境动态变化, 增加了运动规划的难度, 同时在线规划时还需要综合考虑求解速度与最优解的矛盾. 常见的方法包括集中式规划和分散式规划. 集中式规划方法由全局规划器决策, 同时为所有机械臂产生运动路径, 计算量大, 需要进行降维处理; 分散式规划方法由各机械臂分别进行路径规划, 避免与障碍物发生碰撞, 然后通过协调, 避免机械臂之间发生碰撞. 这种方法降低了计算的复杂性, 但它不具有完备性, 而且无法保证得到最优解^[17].

由于多臂操作过程中有接触, 对位姿和力/力矩都提出了精度要求, 对多臂之间的相互位姿、相互作用力也有一定要求. 主从位置控制仅考虑末端位姿关系, 难以完成复杂精细任务; 主从位置/力控制方法没有考虑主机机械臂末端执行器同操作对象间的作用力的控制问题, 精度及任务效果较差; 混合位置/力控制方法将任务空间分为位置子空间和力子空间, 子空间独立控制, 双臂均采用位置/力, 该方法对位置控制方向和力控制

方向不能同时作用在一个方向, 需要实时计算和选择方向, 计算量大; 动态协调控制考虑了服务对象的动力学特性, 将服务对象的位姿变化引入控制器设计, 但服务对象建模的不准确性使得控制难度增加^[18,19].

4.4 复杂零部件空间增材制造

目前, 空间增材制造主要使用塑料作为打印材料, 产品功能简单, 不能完全满足空间系统对产品的功能、尺寸、精度等方面的要求, 需要对传统的增材制造方法进一步改进以适应空间微重力、真空等环境, 以及空间设施所能提供的资源保障条件.

考虑到金属零部件在空间系统的广泛使用以及金属增材制造在结构复杂、小批量定制、制造成本、效率和质量等方面的显著优势, 以金属为打印材料的空间增材制造是必然趋势. 常用的工艺主要包括直接金属激光烧结、激光直接金属沉积、电子束熔融和电子束自由成形制造等方法. 直接金属激光烧结和电子束熔融制造的产品结构复杂、表面光洁度较高, 抛光、机加工等后处理也较少, 但零件尺寸较小; 直接金属沉积和电子束自由成形制造方法可制造中大型产品, 产品结构较简单, 成型精度差, 表面粗糙, 需要较多的后处理. 鉴于直接金属激光烧结和电子束熔融在产品复杂度、光洁度等方面的独特优势, 在空间应用具有广阔的前景, 而这两种技术使用的是金属粉末, 在空间应用须解决粉末易于漂浮、难以附着的问题^[20]. 同时, 微重力环境下熔融的金属微溶池可能会自由运动, 将影响金属的堆积, 直接影响成形金属零件的致密度. 因此需要开展微重力环境下的粉末控制以及熔融金属控制研究.

再者, 受限于增材制造技术固有的“瞬态熔融过程”机理, 所制造产品的内部具有微观缺陷, 如裂纹、空洞等, 以及会产生内应力, 需要开展打印材料预处理、产品热处理等, 这增加了在轨制造流程的复杂性, 对资源受限的空间设施形成挑战. 此外, “瞬态熔融过程”要求将热量迅速带走, 若熔融材料无法快速冷却, 将导致材料难以快速凝固成型, 影响产品性能, 这对真空高效散热提出了挑战. 同时, 空间热环境变化剧烈, 而金属增材制造对温度控制要求较高, 因此长时间、高精度空间热控也是难点^[21,22].

绝缘件、接插件、天线、电路、电池、芯片等电气零部件是实现航天器功能的重要组成部分. 目前的

电子元器件增材制造技术存在原材料单一无法满足组合件制造、电性能不高无法满足高可靠性要求、成形精度有限导致大规模集成电路的制造受限等问题,需要对原材料、通用化多种材料统一供给、空间微振动环境下多喷射头机构高精度控制、电路布线精度及电性能可靠控制、同层异材打印工艺等开展深入研究^[23,24]。

4.5 面向工程应用的高可靠推进剂补给

不同于空间站使用的金属膜盒储箱,当前在轨卫星大多使用表面张力贮箱,针对表面张力贮箱的推进剂补加尚无在轨应用实践。而表面张力贮箱工作在落压模式和恒压模式下对补给方式也提出了不同要求。一般的补给流程涉及管路连接、泄露检测、液体传输、管路吹除和管路断开等步骤。

根据补给方式的不同,管路连接可能包括电路、气路(高压、低压)、液路,目前管路连接都使用浮动断接器,通过机构锁紧连接形成刚性组合体^[25]。而寿命末期的卫星姿控精度下降,这对停靠对接精度提出了高要求。当高压补气时会在连接面形成较大压力,对停靠机构设计提出了高强度要求;补给过程中,需要实时测量推进剂和增压气体的补给量以及流量,为安全控制提供依据,防止欠补加和过补加现象发生,需要对高精度测量与检测技术进行研究。

目前广泛使用的常温化学推进剂,具有腐蚀性,在管路吹除时须避免对其他设备的污染,须对喷口尺寸及外形,排放推进剂的温度、饱和蒸气压、气体含量、压力等进行深入研究;当补加需要液体泵时,需要解决泵的出口压力、流量范围、电机转子与推进剂的相容性等问题。同时,长时间补给可能还需经历高低温空间环境,需要对管路进行温度控制^[26-28]。

5 项目发展启示与建议

NASA充分利用国际空间站作为试验平台的优良特性稳步推进在轨服务技术验证,为我国空间站未来开展在轨服务试验提供了有益参考。

5.1 启示

分析NASA在国际空间站开展的在轨服务试验,有如下启示。

(1) 基础性和示范性: 以国际空间站为平台,瞄准

在轨服务关键环节,演示验证在轨服务的可行性。

一方面,与航天员在轨维修哈勃太空望远镜不同,为降低风险和成本,未来的在轨服务任务使用服务飞行器自主操作机械臂或人机融合操作将是重要发展趋势。因此,机械臂设计及操作相关技术是无人在轨服务的关键环节。RRM由美国约翰逊太空飞行中心的工作人员地面控制国际空间的Dextre进行精细操作,对遥操作、末端工具、机器人视觉、路径规划等技术进行验证。另一方面,空间环境下制造的零部件走向工程应用必须验证其功能、性能和可靠性。通过可视化技术对整个RRM过程进行监视,将空间3D打印样品带回地面进行测试、比较和分析,向企业界、学术界展示机械臂操作和空间制造的可行性,通过示范效应带动在轨服务发展。

(2) 延续性和系统性: 以工程应用为目标,集成前期研究成果,适时启动独立飞行验证计划。

无人在轨服务的服务对象分布在不同的轨道,对其实施检查、维修、更换、加注等任务。与此相适应,国际空间站在轨服务试验的最终目的是从技术验证走向工程应用。一方面,通过继承原有的技术成果,加速研究进程,降低风险。NASA在开展RRM时便借鉴了维修哈勃太空望远镜的成功经验。另一方面,通过服务飞行器在轨演示验证计划将国际空间站验证的技术进行集成,开展全系统设计,形成可独立执行飞行任务的系统。NASA于2012年在国际空间站开展RRM,2014年启动了Restore-L;在2014年完成了国际空间站3D打印技术验证,2015年启动了Archinaut。在先期技术验证的基础上,通过独立飞行计划牵引,推动在轨服务走向工程应用。

(3) 带动性和战略性: 以在轨服务任务为合作窗口,发掘民营企业创新能力,服务国家空间技术战略。

私营企业在美国创新体系中扮演着重要的角色,同时也是美国商业航天的重要推动力量,还是在轨服务的潜在用户。NASA通过发布信息征询书、创新计划等措施将私营企业纳入在轨服务技术创新体系和工程应用体系。NASA小企业创新研究计划(SBIR)将空间3D打印合同授予太空制造公司^[4];通过“临界点”创新计划将“航天器与空间设施的机器人空间制造与组装”项目分别授予轨道ATK、太空制造和劳拉太空系统公司^[15]。通过征询书和创新研究计划,NASA与私营企业保持沟通,利用私营企业的机制、效率和创新能力的,推动在轨服务技术攻关,维持美国空间技术的领

先地位, 服务其空间战略. 同时, 通过在轨服务牵引, 也大大提升了美国私营企业在国际上的产业竞争力, 为其争夺在轨服务市场铺平道路.

以形成在轨服务产业为远期目标, NASA利用国际空间站平台和机械臂, 持续推动在轨服务技术进步和项目发展, 关键点布局, 系统谋划, 不断开拓, 为我国空间站开展在轨服务项目提供了较好的借鉴.

5.2 建议

按照规划, 我国空间站预计2020~2022年间建成. 我国空间站由核心舱、实验舱I和实验舱II组成. 其中, 实验舱主要用于从事空间科学实验、空间应用和空间技术实验. 操作载荷配置上, 核心舱配置1个大型机械臂, 实验舱配置1个小型机械臂. 两个机械臂既可独立工作, 也能协同工作, 还可串联组合为一个机械臂, 扩大操作范围. 机械臂可完成舱段捕获与转移、设备安装、在轨维护、辅助舱外活动、舱外状态监视等任务^[29]. 因此, 我国可充分依托空间站的配置规划和开展在轨服务技术验证项目, 为我国航天技术发展和空间应用提供有力支撑. 根据表8所示的在轨服务类型分析, 同时基于空间站所能提供的平台资源和安全性等约束, 应重点开展故障维修、燃料加注、空间增材制造、在轨组装等对精细操作、平台保障要求高的试验项目.

针对在轨服务试验项目, 有如下发展建议.

(1) 项目遴选: 以机械臂操作为切入点, 注重开展基础性、带动性强的试验项目.

针对我国在轨服务尚无工程实践、技术储备相对薄弱的实际情况, 同时考虑到空间站试验项目较多, 空间站在轨服务试验项目还应重点突破, 注重选择基础性项目, 高效、扎实推进在轨服务发展. 从操控手段看, 机械臂不仅可实现针对非合作目标的近距离抓捕, 建立可靠连接, 还能实施精细操作. 通过分析NASA实施的后续在轨服务计划, 机械臂作为在轨服务实施的重要操作载荷, 是在轨服务的核心要素之一, 因此, 结合我国空间站机械臂配置和能力, 空间站在轨服务试验可重点围绕机械臂开展项目征求、遴选和设计, 攻关相关技术, 以点带面, 促进在轨服务技术发展.

(2) 系统验证: 以独立飞行任务为目标, 推动形成

在轨服务系统解决方案.

检验在轨服务能力的最终标准是以实际在轨目标为对象的独立飞行任务, 需综合考虑实际空间环境、服务对象状态、任务可靠性与安全性等约束, 系统论证, 形成工程可行性、任务经济性等综合较优的系统解决方案. 因此, 在我国空间站对若干项在轨服务技术摸底验证、掌握核心技术后, 及时启动相应的飞行任务计划, 有序衔接“单项突破→系统集成→飞行验证”, 推动在轨服务走向工程应用. 基于前述空间站适宜开展的验证类型分析, 首先并行开展空间增材制造与机械臂精细操作(配置试验面板)技术验证, 接着基于增材制造和精细操作技术能力开展在轨组装、故障维修(配置故障模拟件), 或再集成已验证的推进剂传输技术开展燃料加注, 最后基于空间站积累的技术研制服务飞行器进行独立飞行验证.

(3) 合作模式: 激发民营企业的积极性与创新能力, 促进在轨服务产业化发展.

高校、科研院所、企业是国家创新的三大主体, 其中企业的灵活机制和对市场的快速反应能力使得其在应用创新和产业推动上独具优势. 随着我国商业航天发展, 私营企业必将成为航天产业的一支重要力量. 借鉴美国在航天领域的公私合作模式, 我国也可预先启动相关的创新研究计划, 建立畅通的合作渠道, 提出创新性概念和实施方案, 在空间站运营阶段引入有资质的私营企业开展试验项目, 不仅符合空间站建设的目的, 还可利用其技术创新能力, 促进我国在轨服务整体快速发展, 在激烈的空间技术竞争、潜在的在轨服务市场争夺中形成有利态势, 确保我国在航天领域处于国际领先水平.

当前, 我国正在稳步推进空间站建设, 空间站科学、技术与应用试验项目也正在有条不紊地规划之中. 在轨服务作为未来航天产业的新增长极, 具有广泛的带动性. 因此, 在规划空间站在轨服务项目, 可充分吸收国外先进经验, 适应性拓展, 开展兼具“注重空间应用”和“注重运营效益”^[30]的试验.

6 结论

在轨服务因其潜在的效益受到越来越多的关注.

14) SBIR/STTR, NASA. Program schedule and selection announcements. http://sbir.nasa.gov/prg_sched_anncmnt

15) Space Technology Mission Directorate, NASA. Utilizing Public- Private Partnerships to advance Tipping Point Technologies. http://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/appendix_master_5_21_15.pdf

NASA作为美国在轨服务项目的重要推动者、实施者和受益者,近年来依托国际空间站实施了以“机器人燃料加注任务”和“零重力3D打印技术验证”为代表的在轨服务技术验证项目,为美国在轨服务走向工程应用、确保美国空间技术的领先优势奠定了坚实的基础。我国正处于由航天大国向航天强国迈进的过程中,

空间站将是我国空间科学与技术的重要试验平台,充分发挥其平台价值是空间站后续试验项目规划的应有之义。在轨服务技术验证必然是我国空间站试验的重要内容,因此,可借鉴美国依托国际空间站开展在轨服务技术验证的思路,促进我国在轨服务技术和产业快速发展。

参考文献

- 1 Lillie C F. On-orbit assembly and servicing for future space observatories. In: AIAA Space 2006. San Jose, 2006
- 2 Dorsey J T, Doggett W R, Hafley R A, et al. An efficient and versatile means for assembling and manufacturing system in space. In: AIAA Space 2012 Conference & Exposition. Pasadena, 2012
- 3 Goddard Space Flight Center, NASA. On-orbit satellite servicing study project report. NASA Report, 2010
- 4 Gefke G G, Janas A, Pellegrino J, et al. Advances in robotic servicing technology development. In: AIAA Space 2015 Conference and Exposition. Pasadena, 2015
- 5 Reed B B. Overview of NASA's in space robotic servicing. In: Goddard Engineering Colloquium. Goddard, 2015
- 6 McGuire J. Robotic refueling mission: Paving the way for in-space robotic refueling and repair. In: The Second International Workshop On On-Orbit Satellite Servicing. Greenbelt, 2012
- 7 Gregory T H, Newman M. Thermal design consideration of the robotic refueling mission (RRM). In: The 41st International Conference on Environmental Systems AIAA. Portland, 2011
- 8 McGuire J. NASA's robotic refueling mission. In: The 2nd Annual ISS Research and Development Conference. 2013
- 9 孙红俊, 蒋宇平. NASA在国际空间站试验零重力环境下的3D打印技术. 军民两用技术与产品, 2013, 11: 58-60
- 10 于登云, 孙京, 马兴瑞. 空间机械臂技术及发展建议. 航天器工程, 2007, 16: 1-8
- 11 刘宏, 蒋再男, 刘业超. 空间机械臂技术发展综述. 载人航天, 2015, 21: 436-443
- 12 李文跃, 徐贵力, 周龙, 等. 空间非合作目标相对导航技术研究. 航空兵器, 2012, 3: 14-17
- 13 仇越, 郭碧波, 李成, 等. 航天器非合作目标相对导航的联邦滤波算法研究. 宇航学报, 2009, 30: 2206-2212
- 14 徐文福, 梁斌, 李成, 等. 空间机器人捕获非合作目标的测量与规划方法. 机器人, 2010, 32: 62-69
- 15 刘智勇, 何英姿. 慢旋非合作目标接近轨迹规划. 空间控制技术与应用, 2010, 36: 6-10
- 16 徐文福, 周瑞兴, 孟德山. 空间机器人在轨更换ORU的力/位混合控制方法. 宇航学报, 2013, 34: 1353-1361
- 17 王梅, 吴铁军. 多机器人协作运动规划及相关问题研究. 制造业自动化, 2005, 27: 42-47
- 18 王美玲. 面向救援任务的双臂机器人协作运动规划与控制方法研究. 博士学位论文. 合肥: 中国科学技术大学, 2015. 10-12
- 19 甘亚辉, 戴先中. 多机械臂协调控制研究综述. 控制与决策, 2013, 28: 321-333
- 20 王功, 刘亦飞, 程天锦, 等. 空间增材制造技术的应用. 空间科学学报, 2016, 36: 571-576
- 21 黄秋实, 李良琦, 高彬彬. 国外金属零部件增材制造技术发展概述. 国防制造技术, 2012, 10: 26-29
- 22 赵剑峰, 马智勇, 谢德巧, 等. 金属增材制造技术. 南京航空航天大学学报. 2014, 46: 675-683
- 23 古良玲, 全晓莉. 3D打印技术在电子元器件研制中的应用展望. 电子元件与材料, 2014, 33: 67-68
- 24 周德俭, 成磊, 吴兆华. 3D打印技术及其在电子产品制造中的应用探讨. 见: 2014年电子机械与微波结构工艺学术会议论文集. 中国电子学会电子机械工程分会, 2014. 180-184
- 25 刘海娃, 汤建华. 浮动断路器热控设计与仿真. 火箭推进, 2015, 41: 23-28
- 26 龚明方. 空间补加系统建模与仿真. 硕士学位论文. 长沙: 国防科技大学, 2007. 10-17
- 27 李虎林, 杨震春, 付朝辉. 推进剂在轨自动补加技术研究. 中国航天, 2012, 12: 36-39
- 28 左岁寒, 张峤, 孙威, 等. 国外航天器推进剂在轨吹除技术跟踪研究. 航天器环境工程, 2014, 31: 436-442
- 29 周建平. 我国空间站工程总体构想. 载人航天, 2013, 19: 1-10
- 30 王永志. 实施我国载人空间站工程, 推动载人航天事业科学发展. 载人航天, 2011, 17: 1-4

Analysis of on-orbit servicing technique demonstrations on international space station and developments

YAN HaiJiang^{1,2}, JIN YongQiang^{1,2}, WEI XiangQuan^{1,2} & XIAO YuZhi³

¹ Aerospace System Engineering Shanghai, Shanghai 201109, China;

² Research Center of Space Science, Shanghai Academy of Spaceflight Technology, China Aerospace Science and Technology Corp., Shanghai 201109, China;

³ Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China

The common practice for space programs is that orbital experiments aimed at engineering applications are carried out gradually. The on-orbit servicing (OOS) programs such as refueling and additive manufacturing on International Space Station (ISS) are reviewed firstly, then the continued programs are introduced. The key techniques which constrain the engineering application are analyzed including dexterous robotic manipulator, cooperative operation, safety rendezvous and docking, space additive manufacturing and refueling for non-cooperative target. Finally, the enlightenments of OOS programs on ISS are summarized and corresponding references are brought forward based on the development status of China's Space Station.

International Space Station, on-orbit servicing, refueling, 3D printing, space assembly

doi: [10.1360/N092017-00285](https://doi.org/10.1360/N092017-00285)