

在轨服务若干关键技术研究进展

肖余之¹, 靳永强², 陈欢龙², 顾冬晴², 徐峰²

(1. 上海航天技术研究院, 上海 201109; 2. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201109)

摘要: 近年来在轨服务技术发展迅速, 国外已经完成了合作目标在轨服务关键技术验证, 并正在开展针对已经在轨目标提供服务的關鍵技术研究及验证。国内在翻滚目标运动特性探测识别、主被动探测成像测量、协同抓捕、维修操作工具等关键技术方面取得了一系列研究成果, 为推进剂补加、模块更换维修和碎片清理等提供了良好的技术基础。本文对上述关键技术的难点与研究进展情况进行了分析综述, 并对后续的发展方向进行了展望。

关键词: 在轨服务; 研究进展; 关键技术

中图分类号: V 11 **文献标志码:** A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2021.03.011

Research Progress on Several Key Technologies of On-Orbit Service

XIAO Yuzhi¹, JIN Yongqiang², CHEN Huanlong², GU Dongqing², XU Feng²

(1. Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China; 2. Aerospace System Engineering Shanghai, Shanghai 201109, China)

Abstract: On-orbit service technology has developed rapidly in recent years. Foreign countries have completed the verification for the key technologies of on-orbit service for cooperative targets, and are carrying out the research and validation of the key technologies of on-orbit service for existing targets. In China, a series of research achievements have been made in the key technologies such as detection and recognition of tumbling targets, active and passive detection imaging measurement, coordinate grasp, and service operation tools, which provide a good foundation for the on-orbit applications of service tasks such as refueling, module replacement, and debris cleaning. In this paper, the difficulties and research progress of the aforementioned key technologies are analyzed and summarized, and the follow-up development direction is prospected.

Key words: on-orbit service; research progress; key technology

0 引言

在轨服务(On-Orbit Servicing)一般是指通过人、机器人或两者协同完成涉及延长各种卫星寿命、提升执行任务能力的一类空间操作^[1-2], 本文主要论述机器人在轨服务。在轨服务的概念内涵非常丰富, 一般来说包括故障维修、碎片清理、物资补给、在轨组装等几类^[3]。

故障维修是指对在轨发生故障的卫星执行辅助展开、功能模块更换等修复性操作, 广义上也包含对未能正确入轨卫星的辅助入轨、对寿命末期卫星的接管控制等; 碎片清理是指对滞留在轨道上的

空间碎片、废弃卫星进行主动和被动的捕获清除, 维护轨道环境; 物资补给是指对卫星的消耗品进行补给, 延长使用寿命, 最典型的是补加推进剂; 在轨组装是指利用功能模块在轨构建大型设施, 比如超大型天线的在轨组装等。随着3D打印技术的发展, 利用轨道环境开展在轨制造也得到了重视。

由于轨位的稀缺性, 对地球静止轨道(Geostationary Orbit, GEO)高价值卫星的故障维修、接管、补加延寿和废弃卫星清除意义重大。在过去的20多年中, 主要航天大国重点围绕高轨卫星服务需求开展关键技术研究 and 地面试验, 并接连在低轨开展关键技术验证, 部分技术已经转向应用, 取得了显著的

收稿日期: 2021-03-27; 修回日期: 2021-04-20

作者简介: 肖余之(1964—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为空间在轨服务系统总体设计。

进展。在轨服务的对象,包括已经在轨的卫星,这类卫星无配合服务的设计,一般作为非合作目标处理,技术难度也最大。主要涉及的关键技术包括各类目标的运动特性辨识、复杂环境导航测量、平台与机械臂协同抓捕等。随着在轨服务技术的发展,也带动了卫星设计理念的变革,开始逐步具备软件可升级、推进剂可补加、功能模块可更换等功能。本文在介绍国内外研究现状的基础上,介绍了关键技术攻关研究的进展,同时也介绍了几种典型的服务模式,最后给出了在轨服务的未来发展趋势和展望。

1 国外研究现状

卫星在轨发生故障后,大多束手无策。早在 20

世纪 60 年代就提出了“在轨服务”的概念设想,以期解决故障卫星的在轨维修问题。20 世纪 80 年代至本世纪初,伴随国际空间站的在轨运行,有人在轨服务得到快速发展与直接应用。从本世纪初至今,是无人在轨服务持续发展的 20 年,各种在轨服务的概念不断被提出,关键技术逐步在轨验证,接管技术在高轨初步应用,新的验证计划也一一排上日程。

1) 围绕在轨服务需求,基于合作目标由易到难持续在轨开展技术验证,实现了自主交会与零距离高精度的对接。典型的包括日本的工程试验卫星项目(ETS-VII,1997 年)、美国轨道快车项目(Orbital Express,2007 年)、日本的太空垃圾清理卫星项目(ELSA-d,2021 年)等,如图 1 所示。

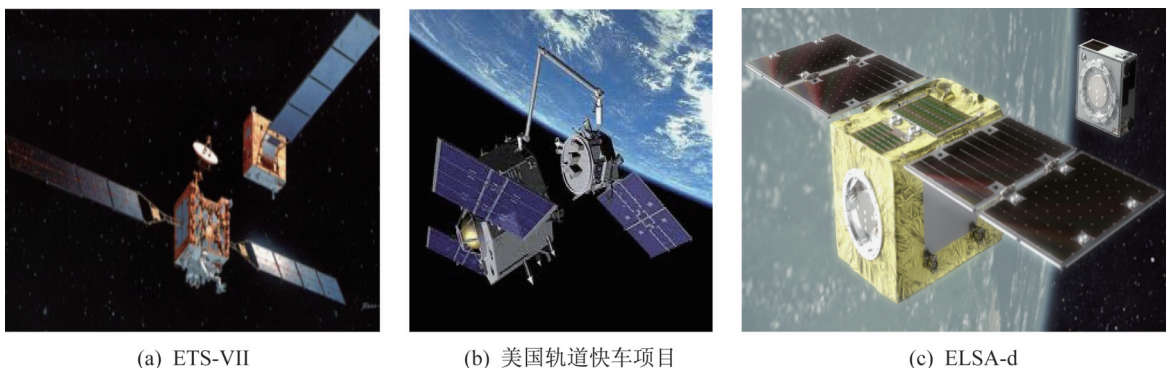


图 1 合作目标在轨服务相关技术验证

Fig.1 Validation of orbit service technologies for cooperative targets

轨道快车项目包括两个航天器,自主空间转移及机器人轨道器(ASTRO)是任务中的服务星,较小的 NextSat 既扮演补给站,又扮演被修复的客户星的角色。轨道快车项目在轨验证了太空机器人自主逼近三轴稳定的合作目标、抓捕停靠、模块更换和在轨燃料补加等技术。

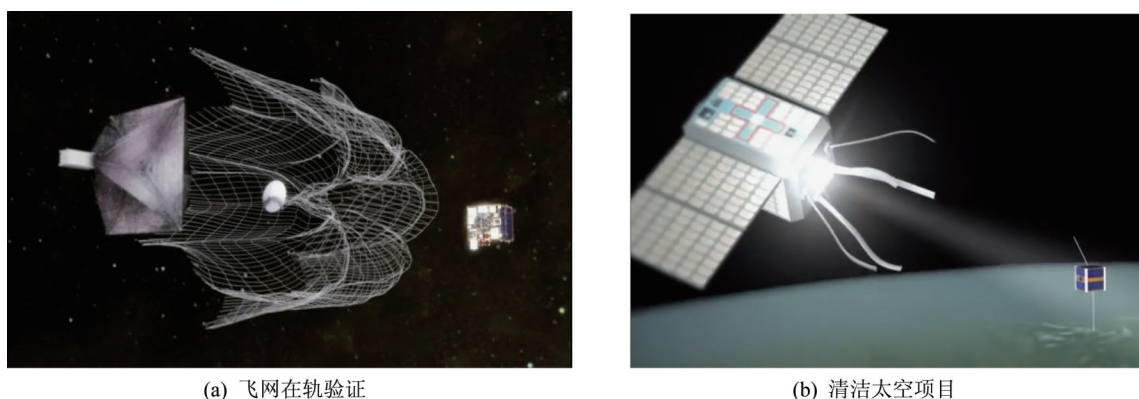
2021 年 3 月,以垃圾清理为名义发射入轨的 ELSA-d 项目,将在轨验证目标翻滚情况下,服务机器人完成自主绕飞、跟飞、对接捕获的全过程,主要验证机器人平台的能力。在第 1 个演示中,服务星将释放客户星,在经过导航及检测后重新与客户星进行磁对接,完成无旋抓捕;在第 2 个演示中,客户星将按照设定姿态翻滚,服务星对其进行实时跟踪并动态机动到对接位置,完成目标翻滚姿态下的磁对接抓捕;第 3 个演示的内容为丢失客户星后的重新定位、追踪、交会及捕获。

2) 针对已经在轨目标的服务需求,由于目标的

非合作特征,导航逼近与对接的难度加大,目前已实现了对稳定目标的零距离“喷管级精度”的对接和接管控制,并转入应用。

美国的试验小卫星项目 XSS-10(2003 年)、XSS-11(2005 年)等,针对非合作目标,验证了导航逼近与伴飞绕飞技术,没有实现零距离接触。英国萨里大学的“太空碎片移除”项目,在轨开展了缩比的发射飞网、网捕目标技术验证试验(2018 年),缩比尺寸鱼叉发射并捕获模拟靶板的技术验证试验(2019 年),未来还将开展全尺寸在轨试验,可用于移除太空碎片,维护轨道交通环境。欧洲空间局(ESA)于 2020 年 3 月启动了“清洁太空”(Clear Space)项目,计划于 2025 年发射“清道夫”清理 ESA 位于轨道上一块 100 kg 的碎片。非合作目标在轨服务相关技术验证情况如图 2 所示。

2020 年,美国诺格公司的任务延寿飞行器(MEV-1)采用喷管对接的技术手段接管 Intel-



(a) 飞网在轨验证

(b) 清洁太空项目

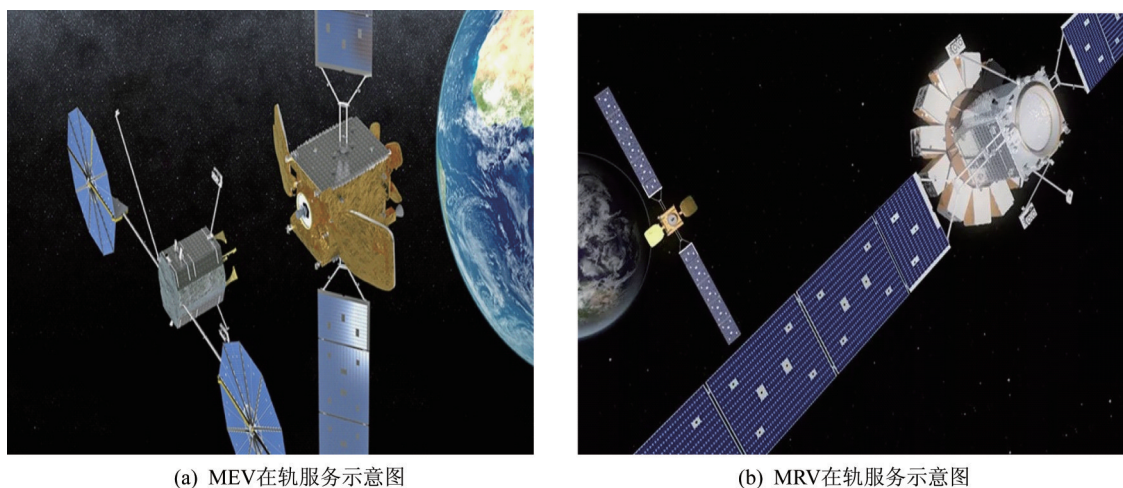
图 2 非合作目标在轨服务相关技术验证

Fig.2 Validation of orbit service technologies for non-cooperative targets

Sat901 卫星辅助延寿是一个标志性事件,实现了对稳定非合作目标的“零距离”对接。

2021 年 4 月,MEV-2 又对另一颗在轨卫星实现了喷管对接。2020 年美国 DARPA 向诺格公司

签发了一项合同,研制 MRV 飞行器,计划 2024 年发射,除了延寿,还将开展修理和其他在轨服务。已在轨目标在轨服务相关技术验证情况如图 3 所示。



(a) MEV在轨服务示意图

(b) MRV在轨服务示意图

图 3 已在轨目标在轨服务相关技术验证

Fig.3 Validation of on-orbit service technologies for existing targets

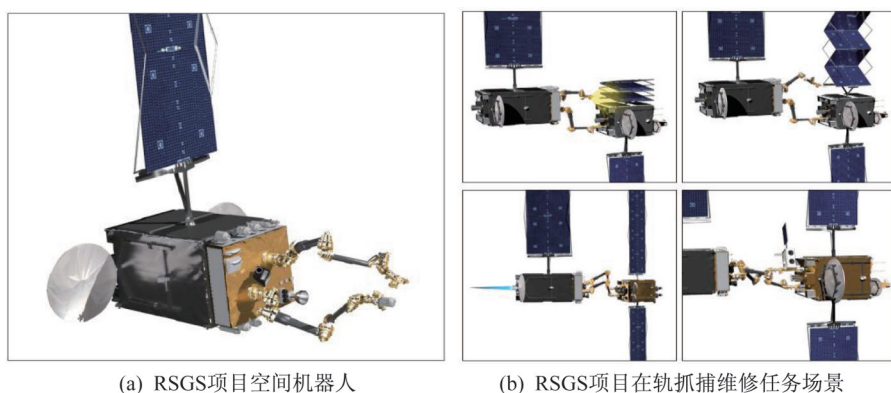
3) 为了真正实现对已在轨目标的服务需求,美国有多个计划被提出,由于自主高精度对接与维修操作的难度都太大,目前都还处于关键技术地面攻关验证阶段。

美国 DARPA 支持的地球静止轨道服务机器人(RSGS)项目最具代表性^[4],如图 4 所示。该项目在 2016 年启动,目标是发展可对地球同步轨道卫星进行在轨检测与维修的机器人技术,建立地球同步轨道上的灵巧自主操作能力,预计将于 2023 年发射。

另一个典型项目是 2017 年美国国家航空航天局(NASA)戈达德航天飞行中心提出的 Restore-L

项目,旨在研制太空机器人,对现有的一颗低地球轨道卫星进行捕获、加注燃料和重新定位,目标是演示验证能在未来在轨服务任务中使用的工具、技术和方法,并对 Landsat-7 卫星进行补加。该项目目前已经演变为在轨服务、装配和制造任务(OSAM-1),如图 5 所示。该任务 2020 年通过了评估,并全面进入硬件生产测试阶段,计划 2023 年 12 月发射,将组装一个 3 m 天线,制造 10 m 的横梁,实现对无合作补加口目标的补加。

通过上述项目跟踪研究不难看出,要实现在轨服务关键是 2 个过程:第 1 个过程是实现合作或非合作、翻滚或稳定目标的自主对接;第 2 个过程是

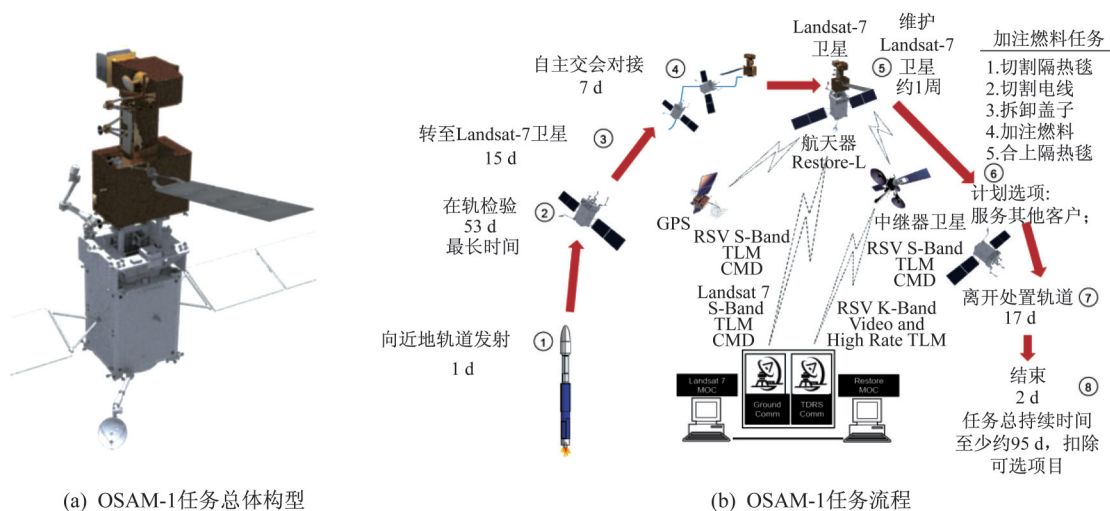


(a) RSGS项目空间机器人

(b) RSGS项目在轨抓捕维修任务场景

图 4 RSGS 项目示意图

Fig.4 Schematic diagram of RSGS program



(a) OSAM-1任务总体构型

(b) OSAM-1任务流程

图 5 OSAM-1 任务

Fig.5 Schematic diagram of OSAM-1 mission

实现对目标的维修操作服务,包括接管、补加、模块更换、组装等。碎片清理任务对服务飞行器操作精细程度有所降低,但因载荷不能重复使用,需要发展廉价的清理载荷。

2 在轨服务任务相关关键技术

典型的在轨服务,不管是合作目标还是非合作目标,都包括目标运动特性辨识、超近距离相对导航逼近、绕飞、跟飞与悬停、自主抓捕或对接、维修操作服务、网捕拖曳等过程。相对于合作目标有先验信息、有预先设计的适配性接口等特点,对非合作目标服务的技术难度更大。本文对在轨服务过程相关的翻滚目标运动特性探测识别、主被动探测成像测量、协同抓捕、网捕拖曳等关键技术的研究及试验进展进行介绍。

2.1 翻滚目标运动特性探测识别技术

需要维修的故障目标可能由于姿态失控而处于翻滚状态。相比于逼近一个姿态稳定目标,逼近翻滚目标难度更大。1个中心本体和2个大尺寸帆板是具有代表性的一类卫星构型特征。在不受外力矩作用下,自旋物体角动量轴方向是固定不变的,且沿最大惯量轴的旋转是稳定的。沿角动量轴(大致位于帆板连线的垂线方向附近)逼近是最安全可行的路径,可以避开帆板而逼近至本体附近,如图6所示。

这就要求能够准确识别目标运动特性,包括目标的角速度大小、角动量轴的空间方位。对于缺乏先验信息的目标,还需要识别目标形貌特性,包括目标本体表面适合抓捕的特征部位、目标尺寸等。这些信息对于合理选择逼近方位、实现安全逼近是至关重要的。

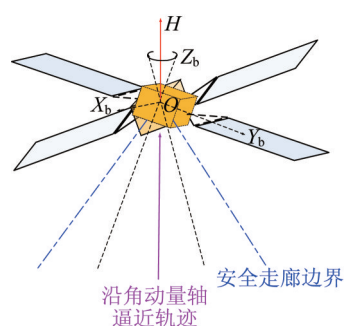


图6 沿角动量轴逼近翻滚目标

Fig.6 Approaching a tumbling target along the angular momentum

采用可见光相机多视角成像与序列图像处理的三维重建技术^[5-8]结合目标运动状态估计方法,能够实现翻滚目标运动特性探测识别。在相机性能确定前提下,光照条件是影响图像质量的关键因素。在合适的光照角条件下(一般不超过 60°)开展绕飞机动探测^[9],如图7所示,在 $A_1 \sim A_2$ 的绕飞弧段内对目标进行观测成像。为了确保一次绕飞观测获得的图像足以支撑三维重建的需要,要求拍摄图片不少于3 000张,图像分辨率达到毫米级。绕飞探测地面试验系统如图8所示。

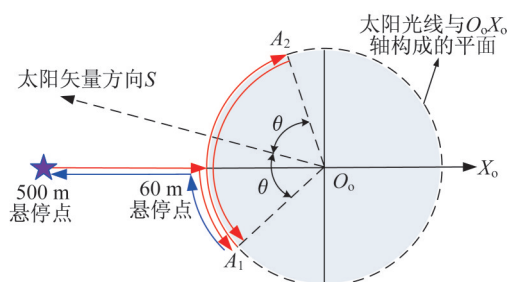


图7 三维重建绕飞观测路径

Fig.7 Schematic diagram of three-dimensional reconstruction of the observation path

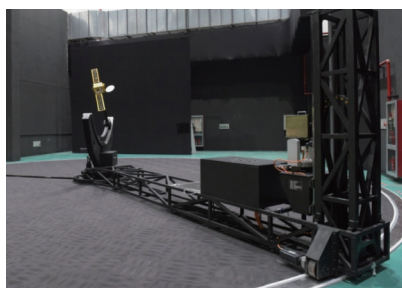


图8 绕飞探测地面试验系统

Fig.8 Ground test system of fly around detection

序列图像三维重建技术已经有较多的研究成果可以借鉴。利用图像处理获取的目标相对姿态测量数据,结合目标姿态运动的动力学、运动学,可设计运动特性估计滤波器,从而得到目标角速度大小、角动量轴方位等运动特性信息。受到在轨处理能力的限制,采用了“在轨拍照探测、地面重建估计”的技术方案,模拟空间光照条件下的实物照片如图9所示,重建后的目标三维构型如图10所示。经过地面实物测试验证,目标尺寸重建精度可达到厘米级,能够较清晰识别目标表面厘米级以上的特征部位轮廓,角动量轴方位估计精度可达 3° 以内,足以满足判断目标外形特征和运动特性的需求,为后续选择逼近路径、确定抓捕维修部位奠定了基础。

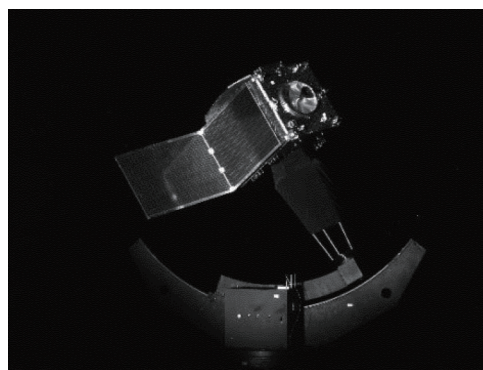


图9 模拟空间光照条件下的实物照片

Fig.9 Target image under simulated space lighting condition

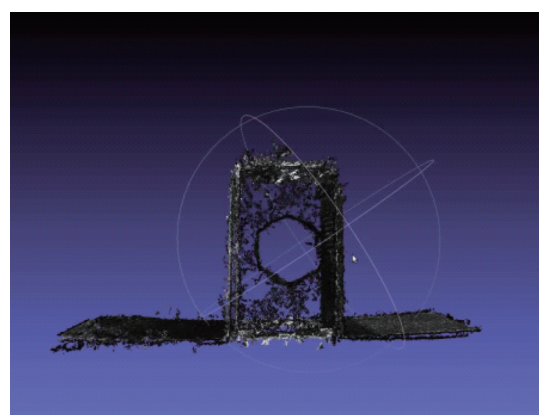


图10 重建后的目标三维构型

Fig.10 Three-dimensional configuration of the target after reconstruction

2.2 主动探测成像测量技术

合理选择并融合运用多种相对测量手段,以实

现超近距离内高精度、连续稳定可靠的相对测量的目的。光电成像探测敏感器是实现空间非合作失稳目标超近距离相对导航必不可少的单机设备,分为主动探测成像测量和被动探测成像测量^[10-13]。主动探测成像包括激光成像雷达、飞行时间(Time of Flight, TOF)相机、结构光等测量手段,优势是受太阳光照条件限制和干扰影响较小。

激光成像雷达在超近距离段远场范围获取实时测量点云^[14],与预存目标参考点云进行匹配,通过粗匹配、精匹配两个过程得到相对位姿信息。激光成像雷达也可以工作在点目标测量模式,只提取点云形心,输出视线距和视线角测量信息。两种测量模式可根据需要进行切换。1 太阳常数空间光照环境测量试验结果表明,激光成像雷达对阳光干扰不敏感,除去阳光直接入射视场时不能正常工作以外,其余工况均能可靠输出测量值。影响相对位姿测量的主要是以下因素:

1) 大曲率反射表面易形成点云稀疏区域,稀疏区域较大会导致点云误匹配,通过多工况实测结果,合理设置点云匹配的权值可改善该情况;

2) 对称目标因对称面难以区分,会导致错匹配,结合目标形貌和运动特性先验信息可正确匹配;

3) 快速运动目标点云成像畸变明显,需进行运动补偿;

4) 由远到近过程中,越到近处测量点数越多,精匹配计算量成倍增加,使得逼近至近距离时测量实时性变差。需要对点云进行抽稀处理,保持点数在逼近过程基本稳定。

TOF 相机采用调制光源投射目标,计算反射信号与发射信号的相位差,进而得到发射光的飞行时间,获取物体的深度点云。通过在镜头上安装滤光片可滤除大部分杂光干扰,受环境杂散光干扰较小。其测量原理与激光成像雷达相似,优点是功耗更低、体积更小;缺点是能量较弱,探测距离有限。

结构光相对测量是采用将结构光投射到目标表面后被目标表面高度调制,对被调制结构光计算还原后得出被测物三维面型数据。此处介绍一种线结构光测量卫星星箭对接环相对位姿的技术方案。3 条平行线结构光照射卫星星箭对接环区域,将在对接环上形成 3 条直线段。利用图像处理技术提取直线段的 6 个端点,再利用对接环直径和宽度

已知等先验信息,可分别拟合出对接环的内圆和外圆。通过对接环圆平面、圆心信息可解算出以目标星箭对接环面为基准的相对位置和姿态信息。合理选择结构光线的距离和条数可提升测量的精度和冗余度,在镜头前安装窄带滤光片或采用闪烁结构光相邻图像作差的办法可以有效减少背景干扰。对接环结构光图像如图 11 所示,滤光以后的结构光图像如图 12 所示。该技术方案通过了 1 太阳常数下的成像测试与相对位姿测量等考核试验。结构光相对测量可用于目标逼近过程相对位姿测量或者机械臂抓捕目标的局部近距离相对位姿测量^[15]。

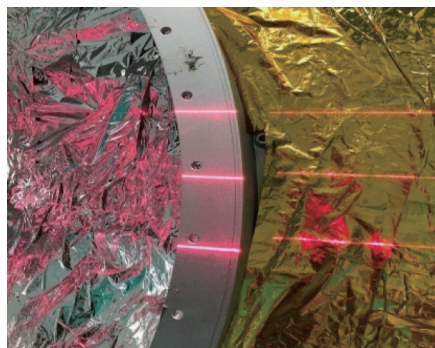


图 11 对接环结构光图像

Fig.11 Structured light image of the docking ring

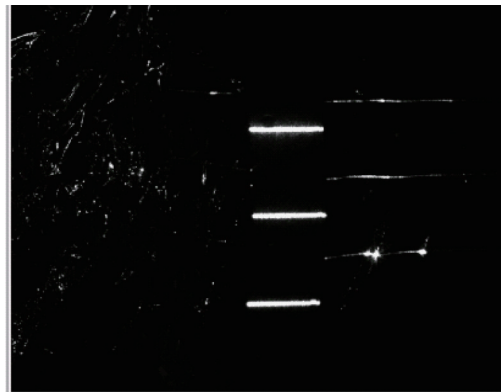


图 12 滤光以后的结构光图像

Fig.12 Structured light image after filtering

2.3 被动探测成像测量技术

被动探测成像测量重点介绍可见光视觉测量技术。合作目标可以设计视觉导航靶标配合相对测量,如图 13 所示。非合作目标则以目标表面的对接环、发动机喷管或太阳电池阵连接架等相对通用的部位为特征进行相对测量,如图 14 所示。

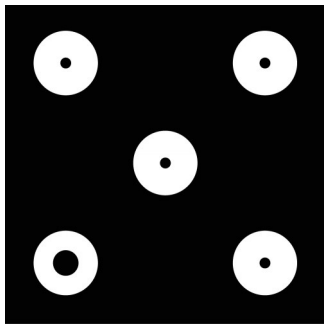


图 13 一种合作目标靶标

Fig.13 A kind of cooperative target

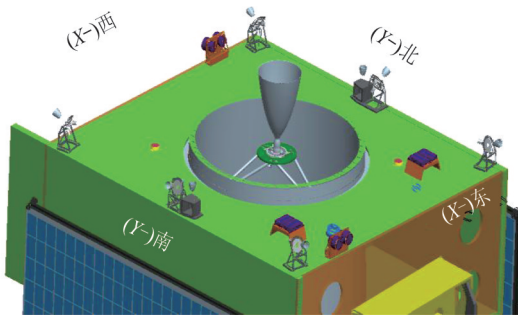


图 14 星箭对接环、发动机喷管等特征部位

Fig.14 Characteristic positions such as docking ring and nozzle

可见光相机高精度测量主要用于超近距离段近场范围(一般不超过几十米)。相对位姿测量本质是利用双目视觉相机二维图像求解非合作目标的相对位置和姿态^[16-17]。在立体视觉极线约束下进行特征匹配并采用计算机视觉的 N 点透视(Perspective- n -Points, PnP)位姿求解算法^[18]。采用3台相机等边三角形布局,可实现冗余测量并能够有效避免遮挡。非合作目标双目视觉测量相对位置姿态精度大约为4 cm和 3° ,合作靶标相对位置姿态测量精度为2 cm和 1° 以内。模拟空间光照环境动态运动过程中能够可靠输出相对测量值。在工程应用中需要注意以下问题并加以解决:

1) 相对俯仰、偏航角度测量较为稳定连续,而滚动角测量跳动较多。主要原因是对接环圆形特征所导致。需要结合其他非对称特征点提高滚动角测量精度。

2) 在空间太阳光照环境下,由远到近目标亮度变化剧烈,相机应具备积分时间自动调整功能,确保图像明暗适中,便于后续相对位姿计算。

3) 相对距离更近时,对接环可能会有部分超出相机视场、机械臂运动会遮挡部分对接环,导致测

量输出不稳定。这是在轨服务过程中必然出现的情况,完全由相机视觉测量算法解决难度较大。需要利用相机测量信息和多源测量信息融合的导航滤波信息进行互判校验,利用导航滤波系统的鲁棒性弥补相机测量输出不稳定的固有不足。

4) 在计算实时性方面,由远逼近过程中目标由小变大到充满视场,近场处图像处理计算量大幅增大,计算实时性会显著下降,需尽可能剔除无关区域,或降低图像分辨率,减轻计算压力。通过反复地面试验确定合适的图像预处理措施可改善该问题。

地面试验测试中远场和近场观测对比如图 15 所示,物体遮挡了部分对接环情况如图 16 所示,喷管和对接环特征同时被检测如图 17 所示。

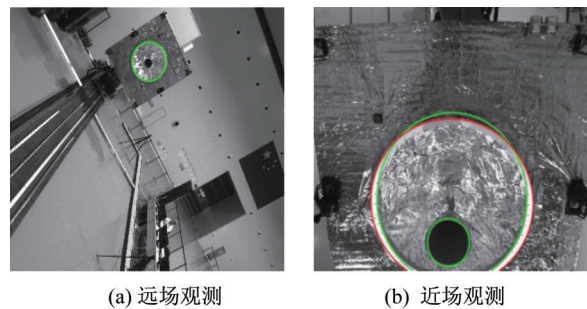


图 15 地面试验测试中远场和近场观测对比

Fig.15 Comparison of far-field and near-field observations

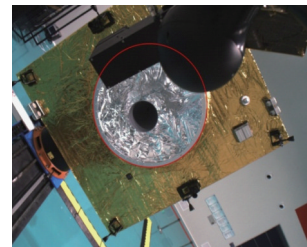


图 16 物体遮挡了部分对接环情况

Fig.16 Docking ring partly obscured by objects

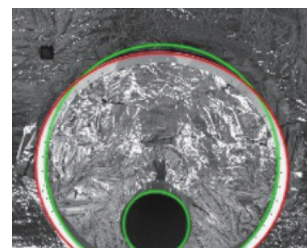


图 17 喷管和对接环特征同时被检测

Fig.17 Simultaneous detection of nozzle and docking ring features

非合作目标被动探测成像测量的特点是受光照条件影响较大,对杂散光干扰较敏感。只能在光照条件合适的时间段内工作,并且在相机镜头设计、相机周围防杂散光散射等方面需开展针对性设计。

2.4 协同抓捕技术

维修操作在轨服务任务中,机械臂抓捕目标是操作的前提条件。当前已在轨的故障卫星并没有事先安装适应机械臂抓捕工具的适配器,并且自身可能存在复杂的自旋、章动等运动,对机械臂动态抓捕能力要求极高。主要难点是机器人平台和机械臂协同的翻滚目标动态跟踪抓捕技术。

非合作目标抓捕是一个复杂动力学与控制耦合过程^[19],需要从动力学建模、相对测量、视觉伺服跟踪、协同控制、数学仿真、地面试验等多方面协同攻关研究和充分验证,才能确保任务实施的可行性和可靠性^[20]。

以机械臂抓捕目标星箭对接环为例,协同抓捕过程主要解决以下 3 个问题:

1) 平台导引机械臂运动。机器人平台将对接环相对测量信息发送至机械臂,机械臂利用该信息规划末端运动路径,将机械臂末端运动至对接环正前方附近 1 m 以内,手眼相机开机,对接环位于相机视场中央,具备相对测量的条件,机械臂工作在位置伺服控制模式。

2) 机械臂视觉伺服跟踪。基于机械臂手眼视觉测量信息采用时间一致性路径规划,规划出两条机械臂基本上同时到达对接环抓捕部位的运动路径。机械臂运动过程中不断根据实时测量信息修正运动路径,最终两条机械臂基本上同时到达抓捕部位,对接环进入抓捕工具包络容差范围。

3) 双臂可靠抓捕。两臂满足抓捕容差条件后,抓捕工具收拢并锁紧,抓捕目标对接环完成。抓捕接触目标之后,机械臂由位置伺服控制模式切换进入阻抗控制模式,通过臂的柔顺缓冲降低接触碰撞力,保护机械臂不受损伤。

视觉伺服开始至抓捕完成仅几分钟时间,无法通过天地大回路方式人为干预抓捕过程,必须也只能依靠机器人平台和机械臂高度自主完成抓捕任务。这期间可能存在一臂可抓、另一臂不可抓的情况;可能存在跟踪过程某个臂丢失目标、数据中断

情况;可能存在一臂抓捕成功、另一臂抓捕失败情况。在上述多种复杂情况下,既不错失抓捕目标机会,又要保证抓捕过程安全,有待于根据大量的地面试验、仿真分析的结果不断优化完善抓捕和故障处置的逻辑关系。

在地面重力环境下很难用 1:1 试验系统来验证协同抓捕关键技术,数学仿真也很难精确模拟机械臂对目标操控过程中的接触动力学。为此建设一套半物理试验系统,如图 18 所示。试验系统配置 2 套在直线导轨上运动的大型工业机械臂模拟 2 个空间航天器的相对运动、2~3 套小型 6 自由度机械臂模拟操控机械臂。在相对导航、手眼视觉等相对测量传感器的配合下,验证机器人平台与机械臂协调控制下对空间目标逼近、跟踪、多机械臂协同抓捕、消旋稳定、精细操作等关键技术,系统验证翻滚目标抓捕维护技术方案。目前已经基于该试验系统完成了稳定目标、慢旋目标、自旋章动目标等不同类型的不同旋转角速度、0.1 太阳常数模拟空间光照环境下的复杂组合工况试验,全面验证了超近距离导航、安全逼近和多机械臂协同抓捕关键技术。

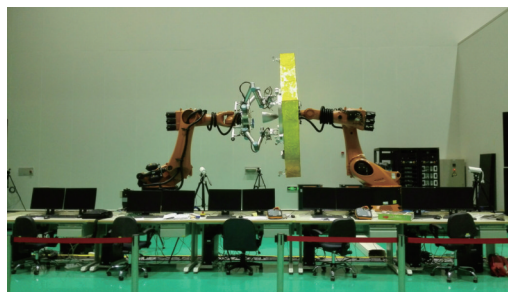


图 18 非合作目标协同抓捕技术试验系统

Fig.18 Test system of non-cooperative target coordinate grasp

2.5 维修操作工具技术

抓捕目标后即可开展故障维修操作。尽管空间机械臂技术近年来得到了快速发展,但是能够在轨开展的维修操作仍然十分有限,并且要依靠地面遥控操作控制完成维修操作任务。目前主要围绕帆板展开故障维修、合作目标接管等任务开展操作工具设计。包括抓捕对接环的工具在内共有 5 种:对接环抓捕工具,用于抓捕目标卫星的星箭对接环;喷管抓捕工具,用于伸入目标卫星 490 N 发动机喷管喉部,抓捕目

标;夹持工具,用于维修过程中夹持约束帆板,防止帆板意外弹开损伤机械臂;切割工具,用于切割帆板压

紧杆周围的基板;剪切工具,用于剪断帆板同步展开钢丝绳。部分工具如图 19 所示。

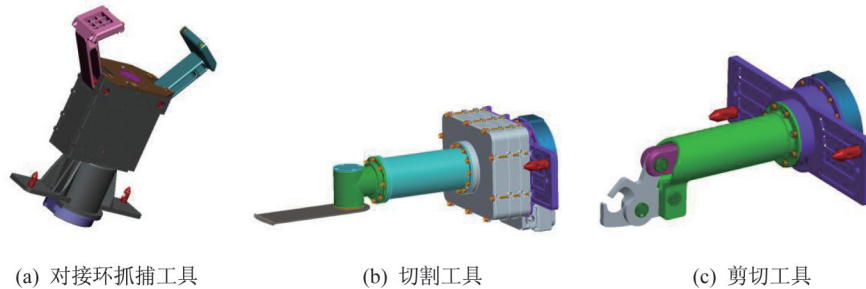


图 19 部分操作工具

Fig.19 Schematic diagram of several operation tools

对接环抓捕工具和喷管抓捕工具是采用不同方式抓捕目标的抓捕工具。夹持工具、切割工具和剪切工具是配合使用,完成帆板辅助展开维修任务的操作工具。在不同的操作阶段,机械臂需要通过末端快换接口安装相应的操作工具实现不同的操作功能。上述工具均已完成地面更换工具、工具操作性验证以及防止工具意外脱落、防止工具超限损伤等安全性可靠性措施的验证,具备在轨验证条件。

后续还将根据多种在轨服务操作需求,开发其他操作工具。只要采用标准化的工具快换接口,就能够安装在机械臂末端完成相应操作任务。

3 典型在轨服务应用

基于上述关键技术攻关与验证基础,可形成实用化的在轨服务能力,开展在轨试验试用,包括推进剂补加、功能模块更换、碎片清理等类型的在轨服务。

3.1 推进剂补加服务

推进剂补加是延长航天器使用寿命、增加机动能力的最有效方法和最根本解决途径。推进剂补

加服务的成熟应用还将促进航天器设计变革,大幅减少贮箱容量和推进剂携带量,承载更多载荷入轨。在轨补加任务是面向合作目标的在轨服务。被补加航天器需要配置相对导航标志、机械臂合作抓捕手柄来配合服务航天器逼近、抓捕,还需要配置停靠补加装置被动端,配合服务航天器完成机械停靠和推进剂传输。其中,停靠补加装置被动端是实现在轨补加的关键部件。

一套合作目标停靠补加装置方案如图 20 所示,可以实现两航天器停靠过程位姿检测、捕获校正、机电液接口连接保持和自主分离。该方案采用了一体化、模块化设计思路,机械连接分离的同时完成管路、电接头连接分离。管路接头包括 2 路高压气路接头、4 路低压液路接头,配置了 1 路电接头。全面考虑了适应恒压式/落压式推进系统补气/补液的功能需求。具体可根据任务需求选配相应的接头类型和数量。为确保分离过程可靠性,还具备火工品应急分离能力。该产品已经完成了充分的地面验证,具备开展在轨试验试用的条件。

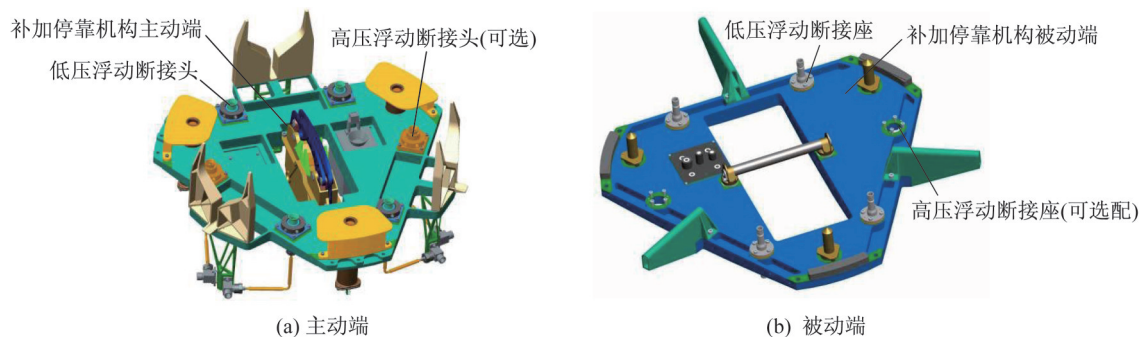


图 20 一体化停靠补加机构

Fig.20 Integrated docking and refueling mechanisms

为促进推进剂补加任务大规模、低成本应用,应尽快立足当前技术基础形成包含相对导航标志、机械臂抓捕手柄、停靠补加装置在内的补加技术标准,并在新研发的航天器上进行推广,促进推进剂补加服务广泛应用,逐步构建常态化运营的在轨补加服务体系。

3.2 模块更换维修服务

针对非合作目标的维修技术难度大、通用性差,难以大面积推广应用,更多的还是对采用可维修设计的合作目标开展功能模块更换维修服务,效率比更高。目前机械臂已经具备从工具箱中更换不同工具的能力,该技术可直接应用于更换功能模块的操作过程。需要解决的是功能模块标准化机械封装、标准化操作工具问题,这并非模块更换的技术难点。关键问题在于功能模块的标准化电气、软件接口和系统功能重构技术。要求被服务航天

器新更换模块后具备即插即用能力。该技术通过近几年的研究已取得了技术突破并走向工程试用。

已制定一种标准化即插即用协议。该协议中,设备类型表示设备类别,每个类别编号代表一类即插即用设备。设备自描述是模块即插即用实现的基础,借鉴 IEEE 1451 标准,建立电子数据表格(TEDS)。每一类设备具有专用 TEDS,专用 TEDS 模板因设备类型而异,但遵守共同的规范。TEDS 中还包括可定制参数,便于不同设备描述信息的扩展。

在软件方面,设备即插即用管理主要完成设备自主识别(如图 21 所示)与设备通信管理,图中,DDS(Device Discovery Service)为设备发现服务,EDS(Electronic Data Sheet)为电子数据表格。在 TEDS 基础上设计了数据包接口服务、设备发现服务、设备访问服务和设备数据池服务等,以此实现自主识别与即插即用通信管理功能。

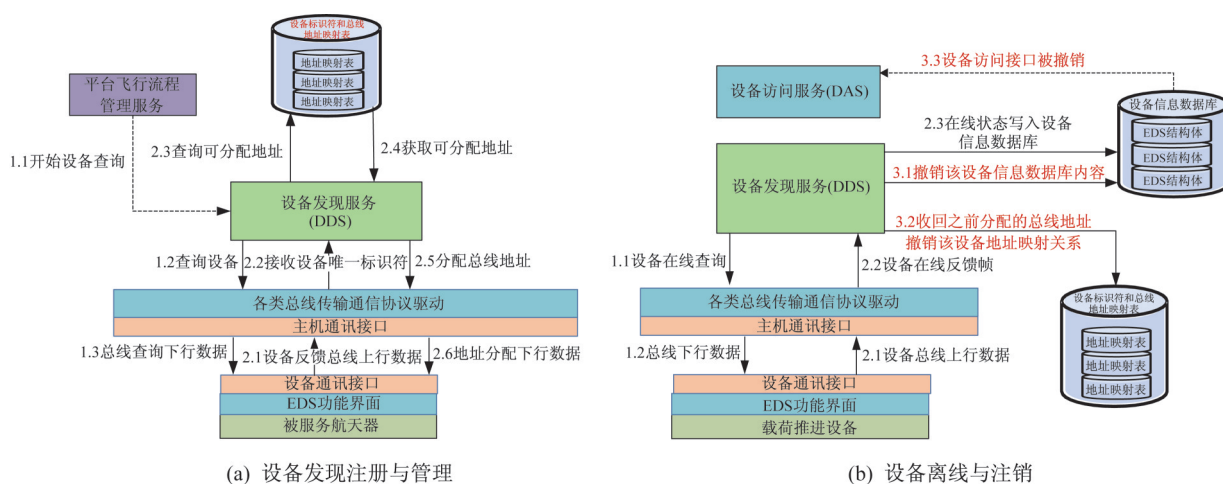


图 21 设备自主识别流程

Fig.21 Flowchart of instruments autonomous identify

标准先行也是模块更换维修服务得以大量应用推广的前提条件。目前已经在轨的航天器均没有采用可更换设计,自然也无法接受模块更换服务。应基于当前研制技术基础形成模块更换的机械、电气、软件接口标准,在新研航天器中执行,逐步开展模块更换任务推广应用,进一步为后续模块化航天器、在轨组装航天器奠定技术基础。

3.3 碎片清理服务

大尺寸柔性飞网捕获目标并将目标拖曳离轨

是目前研究较多的碎片清理技术。柔性飞网可在数十米处发射并捕获目标,飞网尺寸可以设计足够大,并且因飞网的柔性特点,整个网捕过程对两飞行器相对位姿控制精度要求较为宽松,技术难度相对较小。主要技术难点在于飞网捕获目标后的拖曳控制。

当前技术基础已经具备针对废弃卫星大型空间碎片的飞网捕获清理能力。在 GEO 轨位资源日趋紧张的情况下,可优先研制部署高轨碎片清理飞行器,将占据轨位的废弃卫星捕获并拖曳至坟墓轨道。碎片清理服务关键是要尽可能降低成本,采用

成熟可靠简单的技术完成废弃卫星逼近悬停捕获和拖曳。因飞网载荷不能重复使用的特点,碎片清理航天器可携带多个飞网,在轨运行寿命期间清理多个废弃卫星,降低单次清理任务的平均成本。

4 结束语

从当前关键技术攻关验证进展来看,废弃卫星捕获清理、推进剂补加技术基础较好,近期内有望得到应用。面向非合作目标的故障维修开展了关键技术攻关,储备了目标抓捕和精细操作的关键技术,但更应着重发展可维修航天器技术,对合作式可维修航天器的在轨维修操作效果更好,更有实用意义。大型空间设施的在轨组装任务的需求也正在逐步显现,但受限于大范围的精密操作、精细装调等技术能力仍然不足,处于技术储备阶段^[21]。

在轨服务的大规模推广应用进展缓慢,主要原因是现有卫星并未预留服务操作接口,导致在轨服务技术难度极大。为充分发挥在轨服务效益,应推动建立在轨服务标准规范。卫星基于标准化接口设计,实现故障自主诊断识别与隔离、功能模块化、任务可重构等能力。对于服务航天器而言,结合最近发展的人工智能^[22]、多航天器协同等技术进一步发展智能自主目标识别、任务规划、协同服务等能力。卫星设计变革和在轨服务技术发展相向而行,必然会促使在轨服务走向成熟应用。

参考文献

- [1] 梁斌,杜晓东,李成,等.空间机器人非合作航天器在轨服务研究进展[J].机器人,2012,34(2):242-256.
- [2] 陈小前,袁建平,姚雯,等.航天器在轨服务技术[M].北京:中国宇航出版社,2009:4-5.
- [3] 崔乃刚,王平,郭继峰,等.空间在轨服务技术发展综述[J].宇航学报,2007,28(4):805-811.
- [4] 闫海江,范庆玲,康志宇,等.DARPA地球静止轨道机器人项目综述[J].机器人,2016,38(5):632-640.
- [5] 陈凤,张泽旭,王盈,等.基于序列图像的三维重建方法在空间目标探测识别中的应用研究[J].载人航天,2016,22(6):732-736.
- [6] 闫世博.基于图像的三维重建及网格化算法研究[D].上海:上海交通大学,2013.
- [7] RUPNIK E, PIEMOT-DESEILLIGNY M, DELORME A. 3D reconstruction from multi-view VHR-satellite images in MicMac [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2018, 139(3): 201-211.
- [8] XU B, YANG L F, LEI B, et al. A study of the accuracy improvement strategy for multi-view 3D reconstruction instrument based on automatic calibration technology [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38(2): 243-248.
- [9] 肖余之,陈记争.基于轨道机动的高轨目标自主感知技术[J].航天返回与遥感,2021,42(1):1-10.
- [10] SELL J L. Pose performance of LIDAR-based relative navigation for non-cooperative objects [D]. Morgantown: West Virginia University, 2015.
- [11] RUEL S, LUU T, BERUBE A. Space shuttle testing of the TriDAR 3D rendezvous and docking sensor [J]. Journal of Field Robotics, 2012, 29(4): 535-553.
- [12] SHARMA S, D'AMICO S. Comparative assessment of techniques for initial pose estimation using monocular vision [J]. Acta Astronautica, 2016, 123 (1/2): 435-445.
- [13] 王大轶,胡启阳,胡海东,等.非合作航天器自主相对导航研究综述[J].控制理论与应用,2018,35(10):1392-1404.
- [14] 李荣华,李金明,陈凤,等.高轨失稳目标单载荷相对位姿测量方法[J].宇航学报,2017,38(10):1105-1113.
- [15] 郝颖明,付双飞,范晓鹏,等.面向空间机械臂在轨服务操作的视觉感知技术[J].无人系统技,2018(1):54-65.
- [16] ENGLISH C, OKOUNEVA G, SAINTEYR P, et al. Real-time dynamic pose estimation systems in space: lessons learned for system design and performance evaluation [J]. International Journal of Intelligent Control and Systems, 2011, 16(2): 79-96.
- [17] SHARMA S, D'AMICO S. Comparative assessment of techniques for initial pose estimation using monocular vision [J]. Acta Astronautica, 2016, 123 (1/2): 435-445.
- [18] 束安,裴浩东,丁雷,等.空间非合作目标的双目视觉位姿测量方法[J].光学学报,2020,40(17):107-117.
- [19] 陈欢龙,王碧,沈晓凤,等.空间机器人慢旋失稳目标抓捕动力学与控制研究[C]//第十届全国多体动力学与控制暨第五届全国航天动力学与控制学术会议论文摘要集.2017:22.
- [20] 汤奇荣,黎杰,张凌楷,等.基于空间机械臂的柔顺抓捕技术研究综述[J].上海航天,2019,36(3):111-119.
- [21] 沈晓凤,曾令斌,靳永强,等.在轨组装技术研究现状与发展趋势[J].载人航天,2017,23(2):228-236,244.
- [22] 陈萌,肖余之,张涛.空间服务与操控中的人工智能技术[J].载人航天,2018,24(3):285-291.