DOI: 10.3901/JME.2021.20.215

航天器对接与捕获技术综述*

王文龙 杨建中

(北京空间飞行器总体设计部 北京 100094)

摘要: 航天器对接与捕获技术(Docking & capture technology, DCT)是实现航天器之间在轨连接、控制与分离,建立组合体间人员或资源交互的技术。对航天器对接与捕获技术的研究背景、发展历程、发展趋势、应用前景、技术内涵等内容进行了综述,首先从运载局限性催生对接技术发展、在轨服务需求爆发促进对接技术发展、空间碎片清理任务推动捕获技术发展等角度阐述了航天器对接与捕获技术的研究背景。从时间维度总结了该技术发展的三个历程,从技术途径角度概括了该技术的五个发展趋势。从在轨延寿、在轨手术、地外基建、轨道修正四个方面梳理了该技术的应用前景,提炼了该研究领域的八项关键技术。最后,给出了我国在该领域开展研究的方向和建议,为航天器在轨对接与捕获技术的未来研究提供参考。

关键词: 在轨服务; 对接机构; 捕获机构

中图分类号: V526

Spacecraft Docking & Capture Technology: Review

WANG Wenlong YANG Jianzhong

(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094)

Abstract: Spacecraft docking and capture technology (DCT) is a technique for to realize on-orbit connection, control and separation, and to establish crew or resource interaction between spacecrafts. the research background, development history, development trend, application prospect and technical connotation of spacecraft DCT are summarized. Firstly, the research background of spacecraft DCT is elaborated from three perspectives, which are launch vehicle size limitations generating on-orbit assembly, on-orbit service mission explosion promoting process, as well as space debris cleanup mission pushing revolution, to promote the development of DCT. Secondly, the three development history phases of the technology are extracted from the time dimension. the five development trends of the technology from the angle of the technical approaches are refined. The application prospects of this technology, from four aspects: on-orbit life extension, on-orbit operation, off-earth infrastructure and orbit modification are demonstrated. The eight key technologies in this research field are abstracted. Finally, the research direction and suggestions in this field in China are given, which is expected to provide reference for the research of DCT.

Key words: in-orbit services; docking mechanism; capture mechanism

0 前言

空间交会对接技术(Rendezvous and docking, RVD)是指两个空间航天器于同一时间在轨道同一位置以相同速度会合,并在结构上连成一个整体的技术,完整的交会对接包括交会任务和对接任务,两者有时序关系,交会任务包括两航天器远程导引、

近程导引、抵近调姿等飞行阶段,对接任务包括两航天器捕获、校正、连接、保持和分离等阶段^[1-4]。

航天器对接与捕获技术(Docking and capture technology, DCT)是实现航天器之间在轨连接、控制与分离,建立组合体间人员或资源交互的技术。DCT不同于RVD,不涵盖RVD的交会任务,是RVD中对接任务的发展及延伸。“对接”面向合作目标,两航天器预留了适配对接的接口;“捕获”面向非合作目标,两航天器未预留适配对接接口。航天器对接与捕获技术作为对接技术和捕获技术的统称,无

* 国家高层次人才特殊支持计划资助项目(2019495)。20210425 收到初稿, 20210905 收到修改稿

论是在轨服务任务或是深空探测任务都需要该技术来完成多器/多设备的在轨组合与分离,因此对接与捕获技术是扩展航天器功能、提升航天器性能的重要手段。它一般通过对接与捕获机构来实现^[5-8]。

21 世纪人类在空间领域的不断突破和空间技术的飞速发展将对航天器对接与捕获技术的依赖越来越强,航天器对接与捕获机构的应用需求也将更趋多元化。

1 研究背景

对接与捕获机构是对接机构与捕获机构的统称,是集捕获、连接、释放、分离、重复使用等多种功能于一体的系统,通常由两部分组成,即主动端和被动端,分别安装于两个航天器或同一航天器的两个舱段上。对接与捕获机构种类有很多,如德国 iBOSS(intelligent Building Blocks for on-orbit Satellite Serving, iBOSS)项目的异体同构连接分离装置,用于国际空间站货物(货盘)装卸的停泊装置、用于月壤标本转移前两器(轨道器与上升器,亦称服务航天器与目标航天器)对接的捕获装置、用于微纳卫星在轨释放与回收的重复使用装置等,以及不区分主动端与被动端的用于空间非合作目标捕获的网捕装置、用于卫星与火箭对接的星箭解锁装置等,都可以认为是对接与捕获机构^[9-11]。

不同的对接与捕获机构,其捕获、连接、释放、分离、重复使用等主要功能的设计过程相似,只是具体的设计侧重点不同。但不是所有对接与捕获机构都同时具有上述功能,对于某一对接与捕获机构产品而言,有时将捕获与连接功能、释放与分离功能融合设计。无论如何,对接与捕获机构至少包含捕获、连接与分离功能。

1.1 运载局限性催生对接技术

早期的航天器,无论是侦查卫星、导航卫星、通信卫星、遥感卫星,还是深空探测航天器,大多作为一个整体由运载火箭发射送入轨道,这些航天器的外形、重量在设计过程中往往受火箭发射能力和火箭整流罩尺寸的制约。随着航天器任务的不断扩展,火箭运载能力和发射包络约束的瓶颈问题越来越凸显。20 世纪中期,美苏争霸将政治、经济的竞争延伸至航天领域的载人登月任务,将人类探索宇宙的进程推向新的高度。若想完成载人登月并从月球载人返回的任务,受限于当时的火箭运载能力,设计师提出了多次发射在轨对接的解决方案,由此诞生了空间对接概念、技术及产品。

空间对接是航天器在空间交会任务完成的前提下,两航天器建立机械连接^[1-2]。对接技术涉及到至少两个航天器的 12 个自由度的动力学与控制问题,且自由度之间存在较强的动力学耦合和非线性问题,因此具有较大的技术难度。

1966 年美国双子座 8 号飞船与阿金纳火箭的上上级(图 1)实现了世界上首次在轨对接任务,为美国的阿波罗载人登月计划完成了技术储备。1969 年前苏联的联盟 4 号飞船与联盟 5 号飞船(图 2)实现了有人在轨对接任务。至此美苏成为首批掌握空间对接技术的国家,之后美苏包括欧盟相关国家不断完善该技术,研制一系列对接机构,并依此建立了国际空间站,并一直运行至今^[12-14]。

图 1 美国双子座飞船与阿金娜火箭上上级对接图^[15]

图 2 联盟号飞船的杆-锥式对接机构^[16]

1.2 在轨服务促进对接技术发展

由于维修难度大,故要求航天器上各设备要具有高可靠性;由于发射费用高昂,故要求航天器的服役寿命长,所以贯彻航天器整个设计过程的两个关键词就是“高可靠”、“长寿命”。

为了满足高可靠与长寿命要求,航天器大量采用成熟技术及成熟产品,但由于设计、制造等自身因素以及空间环境影响,航天器在轨运行期间无法避免所有故障。实际上,即使无故障工作,对于动辄 15 年的长寿命航天器,随着时间推移航天器上的电子类仪器设备也会老化导致性能下降,为了解决上述问题,“在轨服务”成了有效手段^[17-19]。

在轨服务目前没有统一的定义,1986 年美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)曾资助洛克希德导弹与航天公司开展某研究,在其“在轨服务技术研究报告”

中首次提出航天器在轨服务技术(On-orbit servicing, OOS)是指在空间通过人、机器人或两者协同完成涉及延长各类航天器寿命、提升执行任务能力的一类空间操作。随着航天技术的发展和航天任务的多样化,在轨服务的定义越来越广泛,比较典型的任务包括在轨组装与构建、高价值卫星模块升级、高轨卫星延寿等^[20-25]。

随着空间技术的不断发展和应用需求的不断提高,面向航天器在轨组装、在轨维修、在轨更换、在轨加注等任务的在轨服务新型无人自主对接机构迎来了蓬勃发展,像美国“轨道快车”、中国“嫦娥五号”上应用的对接机构都属于无人自主对接机构,且获得了在轨飞行验证。

1.2.1 在轨组装

在轨组装(Space assembly and maintenance, SAM)是指在空间中将不同的部件连接起来构建成一个结构、子系统等空间设施的过程,它包括空间飞行器、空间系统或空间结构的在轨连接、构建或组装,小到如电池阵、天线的安装与展开,大到大型独立舱段的在轨对接,以及更大规模的大型空间结构的构建。

国际空间站是目前在轨运行最大的空间设施(图 3),自 1993 年开始建造,目前已达总重 370 t,长 109 m,宽 51 m,其总体设计采用桁架与舱段式混合的结构模式,主体结构由航天飞机携带入轨,后续的扩展舱段由不同的运载火箭发射入轨。截止到 2021 年,粗略统计国际空间站已完成 100 多次有人或无人对接任务,是在轨组装与构建最典型的例子^[17]。

图 3 国际空间站 ISS^[19]

1.2.2 在轨维修

哈勃空间望远镜(Hubble space telescope, HTS),长 13.3 m,直径 4.3 m,重 11.6 t,由航天飞机送入轨道。自 1990 年哈勃空间望远镜升空以来,经历了 1993 年、1997 年、1999 年、2002 年和 2009 年的 5 次维修。每次都维修了相应部件,增加了新设备,使哈勃的功能有所提高,从而不

断增强其探测能力^[19]。

1.2.3 在轨更换

在轨更换是指对在服役中的航天器故障单机或关键部组件进行替换,被替换的故障单机或关键部组件统称为轨道替换设备(Orbit replace unit, ORU),通过更换 ORU 设备使故障航天器恢复正常或提升性能。

日本于 1997 年发射了 ETS-VII(Engineering test satellite VII)工程的双星系统(图 4),完成了自动空间对接飞行试验^[20]。2007 年美国轨道快车项目(Orbital express, OE)用于服务的追踪星及用于接收服务的目标星发射成功(图 5),在轨验证了自主捕获与对接技术,以及卫星对卫星输送燃料和替换星上设备^[26]。

图 4 ETS-VII 目标星与服务星对接图

图 5 轨道快车计划任务示意图

1.2.4 在轨加注

在轨加注又称为“太空加油”,用于在空间轨道上为卫星、空间站等航天器进行气、液补给,延长航天器的工作寿命。2017 年天舟一号与天宫二号完成在轨加注(图 6),标志着中国成为世界上第三个掌握在轨加注技术的国家。其对接机构采用了内翻型异体同构的周边式对接构型,这种对接机构优点是在承受冲击方面、振动抑制方面和阻尼、刚性方面具有优越的性能,对控制系统要求低,缺点是加大了机构整体结构复杂性、重量较重^[23]。

图 6 天舟一号与天宫二号在轨加注

1.2.5 在轨重构

在轨重构指两个以上处于分离状态的航天器通过建立刚性连接组成一个整体,或通过改变航天器自身不同舱段间的位置关系实现不同的功能,它不同于航天器入轨后某些功能部件的展开(如航天器入轨后展开大型天线或太阳翼),典型的标志是需要对接与捕获机构实现,且这种重构是可逆的。2020 年 12 月 6 日,嫦娥五号探测器的上升器、着陆器、返回器、轨道器作为一个组合体到达月球轨道后,轨道器与返回器的组合体留在轨道上,仅着陆器与上升器的组合体落月,月面采样任务完成后上升器独自从月面起飞进入月球轨道,上升器与轨返组合体完成中国首次月球轨道无人对接任务,该过程即称为在轨重构,执行任务的对接机构为一种抱爪式对接机构(图 7)。

图 7 嫦娥五号上升器与轨返组合体月轨对接

1.3 太空垃圾清理推动捕获技术发展

自人类 1957 年发射第一颗人造地球卫星以来,人类遗留在太空的痕迹越来越明显,这些遗留物统称空间碎片。空间碎片作为广义概念,包括退役不受控制的航天器、空间活动抛弃的残骸以及空间爆炸或撞击产生的碎片。这些碎片尺度从几厘米至几十米,严重影响了正常的空间活动。空间碎片问题影响的严重性已受到各航天国家、组织越来越多的重视。

对于太空垃圾的清理,当前各国一致倾向于“捕获+离轨”式清除方案,从抓捕手段、抓捕机构的方面看,主要措施包括机械臂捕获、吸附式捕获(如纳米吸附、静电吸附、电磁吸附等)、专用机构特殊部位捕获(如抓捕废弃卫星的太阳翼根部或喷管喉

部)、包覆式飞网捕获等,其关键技术即对接与捕获技术。

1.3.1 机械臂捕获

机械臂技术是在轨应用最多的刚性捕获技术,也是最早投入实际航天工程应用的技术。美国“凤凰”计划中机械臂捕获废弃 GEO 卫星,属于典型非合作目标捕获。从“凤凰”计划公布视频看,采用 FRENDD(Front end robotic enabling near-term demonstration, FRENDD)机械臂抓捕废弃卫星的对接环,该机械臂长 2 m,重 78 kg,可在肩-肘-腕关节的支持下实现机械臂末端工具的 7DOF 运动。该机械臂的夹具、螺栓孔钳,以及精确安装模块等工具安装到机械臂末端(图 8),支持其执行抓捕载荷输送系统、剪切天线、安装细胞星等操作^[26-27]。

图 8 机械臂末端工具

1.3.2 喉管捕获

2019 年美国商业航天公司诺斯罗普格鲁曼公司实施了 MEV-1(Mission extension vehicle-1)项目,完成了人类历史上首次对退役的航天器(Intelsat901, IS-901)喉管的捕获,MEV-1 飞行器能够与在轨的目标航天器实现对接并最终在结构上与目标航天器锁紧连接为一体,为其提供额外 5 年的燃料供给和姿轨控服务。此外 MEV 捕获机构还能够对没有延寿价值的航天器执行离轨操作,即将其推离静止轨道区域。其捕获机构(图 9)包括:胀杆、拉杆、锁紧机构、弹簧等。MEV 捕获机构属于典型的非合作目标捕获机构,通过该机构对目标航天器轨控推力器的喉管进行捕获,且该机构对于不同规格喉管有自适应功能^[28-32]。

图 9 MEV-1 与目标航天器捕获机构^[41]

1.3.3 包覆捕获

2018 年 9 月 16 日, 英国萨瑞大学利用国际空间站实施“太空碎片移除”任务, 成功开展世界首次真实太空环境下飞网抓捕立方星的技术验证。该任务由主星释放立方星, 立方星内部的 6 根柔性空心杆在气压作用下伸直, 并撑起薄膜形成直径约 1 m 的“气球”, 模拟非合作目标, 当“气球”飞离试验卫星 7 m 远时, 试验卫星打开飞网顶盖(图 10), 均匀分布在网口的 6 个重约 1 kg 的功能质量块通过弹簧弹出, 牵拉飞网舒展形成 5 m 口径的网兜, 飞向“气球”套住目标, 功能质量块在惯性作用下缠绕收紧网口, 完成目标抓捕^[33-37]。

图 10 飞网式空间碎片捕获装置

1. 顶盖 2. 功能质量块 3. 系绳储存装置 4. 飞网释放装置
5. 电源 6. 飞网贮藏间

2 发展历程

虽然在轨服务技术 1986 年才提出, 但随着在轨服务概念的不断延伸, 自 20 世纪 60 年代兴起的对接技术亦可以纳入在轨服务技术的范畴^[38-40]。

自 1966 年至 2021 年, 全世界成功实现在轨对接与捕获近 400 次。回顾与总结对接与捕获技术的发展历史, 其发展历程大致可分为三个阶段: 概念提出与初步实用阶段(1960—1980 年)、自主对接验证与实施阶段(1980—2000 年)以及全面应用与升级换代阶段(2000 年至今)。

2.1 概念提出与初步实用阶段(1960—1980 年)

在美苏争霸期间, 受限于运载火箭的条件, 设计师提出了在轨对接概念。前苏联 1967 年研制了第一代对接与捕获机构(图 11), 这种杆锥式对接机构在主动端装有可伸缩传动机构, 被动端为接纳锥, 主动对接框与被动对接框可以形成密封结构, 中间连杆可以收回并露出过渡通道。杆锥式对接机构具有简单、轻质、可靠性高的特点。美国利用锥销相容性原理也研制了一种杆锥式对接机构, 该机构采用液压式缓冲方式, 缓冲能力强, 但控制系统复杂。

图 11 苏联杆锥式对接与捕获机构

1975 年, 美国阿波罗-18 飞船与前苏联的联盟-19 飞船成功进行对接, 为实现这次对接, 两国专门研制了第二代异体同构周边式对接机构(图 12)。该机构形式的出现是航天器对接机构的一个重大进步, 至今国际通用的载人飞船对接机构仍以此为基础^[41-43]。

图 12 阿波罗-18 与联盟-19 的异体同构周边式对接机构

在该阶段, 受限于国际政治形势和技术发展水平, 对接与捕获技术主要面向载人航天器的对接, 围绕有人参与进行方案探索、技术评估和在轨验证, 为在轨服务技术的发展奠定了坚实基础。

2.2 自主对接验证与实施阶段(1980—2000 年)

随着 1986 年在轨服务概念的提出, 基于先进传感器、遥操作、计算机技术的发展以及高价值航天器在轨组装、维修和深空探测任务规划的现实需要, 面向无人的自主对接技术得到了蓬勃发展。此外, 也由于载人航天高昂成本投入, 以德国、日本为代表的航天大国企图绕过有人的在轨服务高昂投入国家而直接开展了无人自主对接技术, 包括空间自主对接、航天器在轨设备更换、在轨装配与维修等研究, 从而摆脱有限的运载能力对大型空间设施建设的制约, 增强航天器的在轨自主能力和延长航天器的在轨寿命。

加拿大机械臂末端执行器作为一种典型的无人自主对接机构, 是第一个在航天飞机上正式使用的对接与捕获机构。不仅在空间站的建设中起到关键作用, 而且进行了多次在轨对哈勃望远镜的维修和升级。该机构采用类锥杆式连接装置作为连接执行环节, 实物及其对应的接口如图 13 所示^[44-46]。

图 13 加拿大机械臂末端执行器

面向在轨加注, 欧空局、德宇航合作开展“赫耳墨斯”项目, 该任务收集已经损坏但有燃料剩余的卫星、有多余燃料的正常卫星和火箭上面级中的燃料, 然后利用这些燃料给 GEO 轨道上需要燃料的通信卫星进行在轨加注。

2012 年 7 月, 美国 DARPA 启动了“凤凰”计划

(图 14), “凤凰”计划的设想是演示验证从报废卫星上抢救、再利用零部件(如天线)的技术, 其方案是从一颗退役卫星上“剥离”大型天线置于 GEO 上, 搭建分布式航天器功能部件。

20 世纪 90 年代以来, 各国充分认识到在轨对接与捕获技术是在轨服务当中的一项关键技术, 是人类在空间活动能力的一种延伸和拓展, 同时具有极高的军民两用价值。在该阶段以美国的轨道快车计划、日本的 ETS-VII 试验卫星计划为代表, 各国展开了大量的自主在轨对接技术研究, 并衍生发展了航天器模块化技术、先进机械臂技术、在轨加注技术等, 形成了初步的标准接口体系, 但该阶段的对接与捕获技术还偏重在合作目标的“对接”, 非合作目标的捕获技术尚处于探索 and 地面试验阶段。

图 14 凤凰计划的在轨演示验证设想

2.3 全面应用与升级换代阶段(2000 年至今)

随着空间站在轨组装、火星探测、重返月球等重大航天工程的启动, 面向不同任务特点的航天器对接与捕获机构逐渐形成系列化、型谱化, 并建立了相应的研制接口标准。

2.3.1 载人对接机构形成标准

以载人航天器对接机构为例, 针对各型对接机构, 设计师们更倾向于对产品进行优化, 力求用更少的资源实现同样性能, 使产品重量更轻、包络更小、功耗更低。

当前服役的有国际空间站上的杆锥式对接机构

(如阿波罗飞船对接机构)及异体同构内翻式对接机构(如 APAS-89), 以及中国的周边式异体同构对接机构, 这些传统的碰撞式对接机构经历了几十年的发展和在轨验证, 演变出了多种形式, 技术已很成熟^[47-49]。

为了统一接口、满足国际合作和空间救援等载人航天器的现实需求, 国际空间站多边协调委员会推出了国际对接系统标准(International docking system standard, IDSS), 并于 2011 年 5 月公布了接口定义文件(Interface definition document, IDD)A 版本, IDSS 标准的应用范围包括国际空间站任务、月球探测任务、深空探测任务以及乘员营救任务、国际合作任务

等各式载人航天器。截至 2021 年 2 月, 该标准更新至 2016 年 E 版本, 遗憾的是由于中国不是国际空间站 16 成员国, 所以未参与该标准制定^[15]。

为进一步完善已有对接机构并匹配 IDSS 标准, 目前美国和欧洲相继开发了兼容 IDSS 标准接口的第三代新型对接系统。美国开发的 LIDS(Lower impact docking system, LIDS)对接系统(图 15)^[22]将应用于猎户座多用途乘员飞行器、商用乘员飞行器等未来空间探测飞行器项目中。ESA 为了占据美、俄、中之外载人航天器研发能力的第四席, 自 20 世纪 90 年代启动 IBDM(International berthing docking mechanism, IBDM)对接系统研制(图 16)^[24], 采用主动控制的 Stewart 平台方案, 配置了电磁捕获装置、力传感器等, 可实现两航天器的柔性捕获和缓冲。

图 15 美国 LIDS 对接系统

图 16 欧洲 IBDM 对接系统

2.3.2 自主对接机构全面应用

在航天任务多样性发展及商业航天的推动下, 多种中小型航天器、微纳卫星上应用的自主对接与捕获机构在该阶段呈现井喷式发展, 国外此类机构

典型的有美国轨道快车项目的三爪式对接机构和柔性杆式对接机构、日本的 ETS VII 试验卫星的卡爪式对接机构、德国 iBOSS 项目的异体同构连接分离装置、中国嫦娥五号卡爪式对接机构等, 且都已完成在轨验证或应用。

轨道快车项目中, 萨瑞公司为轨道快车设计的三爪式对接机构(图 17), 其工作原理为: 对接初始状态下主动部分处于展开状态, 建立对接与捕获姿态后, 系统接收到对接指令后, 电机带动滚珠丝杆转动, 促使与滚珠丝杆配合的滑块(丝杆螺母)向下滑动。滑块与三组独立的四杆机构相连, 这些四杆机构末端能起捕获被动部分的作用。滑块向下滑动带动四杆机构末端向内收拢, 执行捕获动作。被动部分楔形结构能够引导连杆进入中心凹槽, 直至被动部分被连杆锁住, 捕获动作完成。建立刚性连接同时建立液体及电气连接^[50-51]。

图 17 轨道快车项目三爪式对接机构

日本舱暴露平台是 ISS 空间暴露试验的载体, 其外形尺寸 $5.7\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3.8\text{ m}$, 配置有两种对接与捕获机构(图 18)。一种是用于暴露平台与日本舱连接的停泊机构(Berthing Mechanism, BM), 另一种是用于暴露载荷设备与暴露平台连接的设备更换单元(Equipment exchange unit, EEU)。两种机构具备机械臂辅助下的自动对接功能, 对接后支持机械、能源、信息、流体工质的传输交互^[52-54]。

图 18 日本舱暴露平台的 BM 和 EEU

2.3.3 非合作捕获机构蓬勃发展

进入 21 世纪,随着在轨加注需求以及轨位资源清理需求愈加迫切,各航天大国针对面向非合作目标的对接与捕获机构的研究及产品开发投入越来越多。最典型的两种非合作目标的捕获方式即为废弃卫星主发动机喷管捕获或失控卫星整体网捕。

ESA 实施了航天器寿命延长系统项目 CX-OLEV 飞行器(Cone xpress orbital life extension vehicle, CX-OLEV, 图 19),研制一个轨道拖船,它接近目标卫星与之对接后,接管原来卫星的姿态和轨道控制——它提供推进、制导、导航和控制,使目标卫星保持合适的轨道和姿态,使其有效载荷继续发挥作用^[55-57]。

图 19 CX-OLEV 的在轨捕获原理图

欧空局 ROGER(Robotic geostationary orbit restorer, ROGER)项目的应用包括对目标航天器的绕飞监测和抓捕等。该系统具备视觉系统、抓捕机构,可对合作及非合作性的目标卫星进行抓捕操作,一方面可以利用 ROGER 飞网抓捕机构(图 20)来清除地球同步轨道上的失效航天器,并转移到坟墓的轨道上;另一方面利用 Roger 的飞爪装置抓捕(图 21)未正常进入地球同步轨道的航天器,并将其送入指定轨道^[19]。

图 20 ROGER 项目飞网装置

图 21 ROGER 项目飞爪装置

飞网属于一种非合作目标包覆式捕获装置。由于是非合作目标,飞网装置没有主动端和被动端之分,且捕获过程中属于柔性包覆过程,冲击载荷很小^[58-60]。飞网装置的优点是飞网张开后的口径能达到十几米甚至几十米,所以可以捕获尺度很大的目标。缺点是飞网发射后姿态不可控制,且不可重复使用。

3 发展趋势

纵观国外相关领域的发展经验和国内技术基础,对接与捕获技术的发展一直遵循系统总体方案牵引、关键技术突破、飞行演示验证、技术拓展应用的螺旋上升发展规律。无论从早期的载人航天器对接需求下诞生的杆锥式对接机构和异体同构周边式对接机构,还是美国轨道快车项目牵引的柔性杆式对接机构和三爪式对接机构,对接与捕获机构的研制都离不开大型工程的牵引和长期的经费支持。

当前国内外对接与捕获机构呈现两极化发展,即大型载人对接与捕获机构和中小型对接与捕获机构。大型载人对接机构以异体同构式对接机构为主,无人的大型机电液一体化对接机构鲜有研制,由于载人对接与捕获机构的高度复杂性和人因工程的要求,到目前为止世界上只有美国、俄罗斯、中国掌握了该技术,即使是整个欧空局在研的 IBDM 仍未在轨验证。而对于大型载人对接与捕获机构,哪怕占据三甲,中国现有载人航天工程研发的周边式对接机构已经过在轨 10 次对接,技术成熟度及可靠性得到充分验证,设计验证基础设施齐备,仍不能满足未来载人登月的轻量化要求。

欧洲和日本等航天大国一直想“弯道超车”,把目光投向了中小型无人对接与捕获机构领域,日本 ETS-VII 卡爪式对接机构就是代表。中国已经在轨验证的中小型对接与捕获机构仅有嫦娥五号对接机构,随着中国在研的空间站工程的全面铺开,一批中小型对接机构也将陆续在轨验证并服役^[61-63]。

如果第一极——大型载人对接与捕获机构是美国、俄罗斯、中国的垄断场,第二极——中小型自主对接与捕获机构则是各航天大国角逐的竞技场。在这个竞技场中,基于不同机理驱动器、介电高弹体、表面逻辑感知材料和柔顺触控控制等技术,实现差异化智能感知和操控行为,可构造高灵敏度、自驱动、无差别抓捕与附着的新型柔性对接与捕获机构,对空间目标对接和抓捕、地外天体着陆与附着、航天器表面智能爬行机器人、敌对侦查卫星致盲等各类航天任务论证产生了颠覆性影响。

3.1 介电材料捕获

介电材料是一种新兴的“智能材料”,它在外界电激励下可以改变形状或体积,当外界电激励撤销后,它又能恢复到原始的形状或体积,该材料用作驱动器具有可以直接对外做功、无需传动机构、结构简单、体积小、质量小;动作平滑、无相对摩擦运动部件、无热、无工作噪声;高能量密度(3.4 J/g)、能量转换效率高(60%~90%)、响应速度较快、变形大(最大 380%)、可产生较大位移;疲劳寿命高,小应变的情况下,循环次数可超过 107 次;环境适应性强、对温度和湿度不敏感,可在多种复杂环境下工作等诸多优点^[64-65]。

2012 年 2 月,瑞士航天中心利用该材料研制了太空清理 1 号(图 22)卫星,以清除目前瑞士在轨的一颗立方体卫星。太空清理 1 号正是充分利用介电材料的优点,设计了可展开式触手捕获系统,它具有结构简单,体积小,重量轻,稳定性好等优点。并且由于介电弹性材料具备智能可设计特性,可通过改变电压来控制抓捕机构的形状,可自动适应非合作目标的结构形态、相对姿态,准确完成目标的捕获和离轨,整个捕获过程智能可控。因此介电捕获触手是捕获小型空间非合作目标及清除小型碎片的理想装置。

图 22 介电软材料抓捕系统示意图

3.2 吸附捕获

2012 年美国 NASA 喷气推进实验室为凤凰计

划研制一种“壁虎-黏附器”的黏合垫,该黏合垫材料模仿壁虎微纳米黏附阵列,安装在一根可展开吊杆上,用于进行在轨捕获,如图 23 所示。其工作原理是模仿壁虎脚趾面的粘附机理,利用柔性微纳米阵列与固体表面之间的范德华力实现黏附。该黏附结构具有粘附力大,对任意形貌的材料表面的适应性,对物体表面不会造成损伤,自洁、反复使用等优点。目前,国内外在仿壁虎黏附阵列的研制方面已经做了大量工作,并取得很大的进展。这些微纳米黏附阵列能确保足底和墙壁接触面积大,进而使范德华黏性达到最大化。目前,仿壁虎微纳米黏附阵列还未在空间实际应用,其在空间超低温、冷热循环下的稳定性,以及空间辐照环境下的影响效应等多项关键技术尚待突破。

图 23 可展开吊杆及“壁虎-黏附器”

3.3 动能捕获

动能捕获技术基于自然界动物捕食过程,它不同于将目标完全包裹的包裹式捕获,通过捕获航天器瞬间迅速释放某种装置,使装置“穿刺”进入被捕获目标,达到捕获的目的。

2018 年英国萨里航天中心联合空客防务公司等多家欧洲机构联合成功完成世界首次飞网抓捕立方星技术在轨验证。试验卫星尺寸 0.5 m×0.55 m×0.72 m,质量约 100 kg,装有鱼叉等任务载荷和模拟太空碎片的铝制靶板(图 24),靶板尺寸 10 cm×10 cm×8 mm。鱼叉头安装有机械联动的卡板与倒刺。试验中,试验卫星内卷曲缠绕的柔性支杆在电机作用下伸出,带动模拟太空碎片的铝制蜂窝靶板外伸 1.5 m;鱼叉在高压气体作用下,以 20 m/s 速度穿透,在尾部挡板作用下静止;鱼叉头部倒刺打开,勾住靶板,鱼叉尾部系绳收缩,带动靶板、支杆与鱼叉收拢^[66-67]。

此次试验中,靶板与发射鱼叉的试验卫星通过柔性支杆连接,因而靶板的运动一定程度受限。鱼叉、飞网等太空碎片捕获方式简单易行,成功率较高,不仅可用于移除太空碎片,维护轨道交通环境,也可用于捕获在轨运行卫星,具备太空对抗应用潜力。

图 24 鱼叉和模拟太空碎片的靶板

3.4 电磁捕获

电磁对接技术可以极大简化传统对接系统的复杂性,同时可减少燃料消耗和羽流污染,增强对接过程的姿态和速度可控性,实现真正的弱撞击、低冲击对接和重复使用,有望在未来的微小卫星编队飞行、大型航天器在轨组装及在轨服务任务中实现广泛应用。

欧洲帕多瓦大学提出了柔性拉索式电磁对接机构的概念,并设计了 FELDS(Flexible electromagnetic leash docking system, FELDS)系统及其对接试验。对接过程主要分为发射拉索、软对接、回收拉索和硬对接 4 个阶段,如图 25 所示。

图 25 FELDS 系统工作过程^[67]

FELDS 系统主要由发射系统和探头接收系统组成,如图 26 所示。这套机构的电磁对接主要体现在探头接收系统捕获对接球上,其对接平台采用分层结构,嵌入电磁铁产生电磁力,用来捕获磁铁制成的对接球。FELDS 系统机构的地面演示试验已经完成,目前其研制团队正在研究将该系统应用于立方体卫星的可行性。

图 26 FELDS 组成

将电磁对接技术应用于航天器远距离导引、捕

获、校正、缓冲及锁紧全过程,目前还受制于关键技术的突破;但仅仅利用电磁技术实现对接过程中的捕获、校正或缓冲,是一种成熟的工程设计思路。例如 Mini AERCam(Miniature autonomous extravehicular robotic camera, Mini AERCam)项目、EGADS(Electromagnetically guided autonomous docking and separation, EGADS)项目及 SLIPP(Secondary launch interface parasitic payload project, SLIPP)项目等,均开展了基于电磁力导引实现地面一维或二维的对接试验验证,利用电磁对接机构成功实现了对目标的捕获、校正和辅助锁紧功能;SPHERES(Synchronized position hold engage and reorient experimental satellite, SPHERES)项目基于“国际空间站”舱内的在轨环境完成了考虑避免障碍物碰撞等多种约束条件的自主对接试验。

3.5 仿生捕获

国内外学者模仿象鼻、章鱼触角等提出了多种不同构型的连续体机器人。图 27 为 Festo 公司研制的一种仿象鼻气动连续体机器人,该机器人由三个模块组成,每个模块包含三个独立波纹状气腔,分别对不同气腔通气可实现机器人的柔顺运动,与机器人前端部的气动抓持机构相配合可以完成对不同物体的抓捕^[65-66]。

图 27 Festo 象鼻机器人

中国科学技术大学^[65]基于 HPN(Honeycomb pneumatic network)结构提出了一种新颖的蜂窝状气动连续体机器人,如图 28 所示。该机器人的每个气腔都呈现六边形构型,通过对气腔的布置可以实现机器人在两个面内的弯曲动作,轻松实现对装满水的玻璃杯的抓取操作。此外,该机器人由于蜂窝结构的特点,具有很大的折叠比,适宜用在对操作空间有苛刻限制的场合。

图 28 蜂窝状气动连续体机器人

综上所述,气动连续体机器人由于兼顾刚性捕获装置和柔性捕获装置的特点,使其更能适应未来非合作目标的在轨捕获操作,具有很好的应用前景。但气动连续体机器人属于刚柔混合系统,其在力/动力学建模、精确和稳定控制、刚度保持、与被捕获物体之间的相互作用机理等方面的研究才刚刚开始,还需要进行更加深入的研究以支撑其未来的在轨应用^[66]。

4 应用前景

4.1 在轨延寿

GEO(Geostationary earth orbit, GEO)轨道是一条独特的轨道,也是一条拥挤的轨道,在该轨道上运行着大量高价值的航天器,包括通信、导航、预警、气象等民用和军用领域航天器。对于设计寿命 15 年的高价值航天器而言,在建造阶段制造商从材料、技术、冗余设计、可靠性设计等维度做了大量工作,导致大部分航天器的退役往往不是因为航天器本身故障,而是源于燃料耗尽。

在轨延寿即是通过实施推进剂加注和部件更换来延长航天器的使用寿命。尤其对于组网的军事卫星例如导航卫星、数据中继卫星等,利用在轨加注或加挂推进舱可以有效降低星座卫星更新频率,延长航天器在轨寿命。航天器延寿模式有两种:燃料加注和加挂推进舱,对于有合作接口的航天器,可以进行燃料加注;对于无合作接口的航天器可以采用 MEV-1 卫星的方式,加挂推进舱。而无论何种延寿模式,都离不开航天器对接与捕获机构的支持。

2017 年 NASA 开始研制可为在轨运行卫星提供燃料的新型 Restore-L 航天器。Restore-L 航天器(图 29)就像一个移动加油站,能够对在轨运行卫星进行燃料加注,以延长在轨卫星寿命。

图 29 Restore-L 航天器在轨加注

从成本角度,以寿命 15 年的大型高轨通信卫星为例,包括卫星、火箭和保险在内的研制总费用约为 4 亿美元。按照美国诺格公司报价,一颗包括发射、卫星制造在内的总成本不高于 1.2 亿美元的 MEV 卫星可以为 4 颗造价 4 亿美元的卫星各提供 5 年的延寿服务,其经济效益是显著的。

4.2 在轨手术

当前航天器都是基于特定的任务要求进行定制化设计,比如用于特定范围的观测、遥感、通信等。对于动辄十几亿或几十亿的高价值航天器,为了保证系统的可靠性,常采用冗余措施,一颗航天器的冗余设计一般要占到 30% 的比重,即使如此也不能完全避免航天器在轨故障。

2019 年美国 DARPA 公布了机器人维修有效载荷系统项目(Robotic servicing vehicle & envision missions, RSVEM)并计划于 2022 年将一颗航天器送入太空轨道对该系统进行测试。RSVEM 旨在研发一艘地球静止轨道航天器,能够在地球静止轨道上为卫星等航天器进行在轨维修和其他工作。

航天器在轨手术包含三层含义。

(1) 航天器故障处理。航天器在轨不出现任何故障是空间系统设计和研制的终极目标,但由于技术及经济上的限制,特别是空间系统的特殊工作环境,在轨故障是不可避免的,具备对航天器在轨故障模块进行处理的能力,是确保空间系统正常工作的基本条件。因此,为了避免因为航天器个别器件与模块发生偶然性事故,严重影响航天器的正常运行,需要对故障航天器进行必要的在轨维修或在轨更换。从另一个角度讲,航天器故障处理也是降低冗余设计比重的有效手段。

(2) 航天器功能升级。随着技术的快速发展,特别是信息技术的飞速进步,动辄寿命 15 年的航天器会使得数年前设计的电子类产品显得落伍。而通过对某些部组件进行更换或升级,即可实现整个系统能力的大幅提升。比如可为光学遥感卫星更换先进的光学设备以提高分辨率,为电子侦察卫星更换先进的电子侦察设备以增强侦察功能,更换高性能的计算机系统以增强数据处理功能等。

(3) 航天器功能扩展。航天器功能扩展是指对预留标准化机械和电子即插即用接口的航天器采用加挂设备,从而使航天器的本体功能得到扩展;或是通过多个航天器组网达到超越单个航天器性能的提升。比如利用对接与捕获机构对干涉 SAR 遥感卫星的 SAR 天线进行延长,达到成倍提升成像分辨率的效果。

4.3 地外基建

为了拥有先进的天基系统和对深空探索的能力,以保持对太空的领导权和自由行动权,2017 年 3 月,美国推出了新一代太空探索计划——深空之门(Deep space gateway, DSG)计划(图 30),该计划是美国雄心勃勃的 Artemis 计划的重要组成部分。

DSG 实际上是一个深空空间站,由居住舱、气压过渡舱、可开展研究的后勤舱以及大功率电力推进系统组成,将在距地球约 38 万千米外,沿着接近直线的光晕轨道环绕月球飞行。

图 30 深空之门示意图

作为首个环月球轨道的空间站,DSG 可作为中转站,减少飞行器前往深空的速度增量,降低载人深空任务的难度。未来将成为深度探索太阳系并将登陆舱和载人探索组合体送往月球、小行星甚至火星的基地,以及探索月球表面及宇宙深处的一个平台,还能够作为月球车的中继通信平台和前往其他轨道的枢纽。深空之门计划将于 2050 年左右竣工,该计划的相关研究将为重回月球、探索深空奠定坚实的基础^[30-31]。

随着人类进军太空步伐的加快,超过国际空间站(低轨)规模的大型空间平台会陆续出现,对此各航天大国规划了雄心勃勃的大型空间设施计划,如太空燃料站(在太空为航天器建设加油站)、高轨服务站(在高轨道为高价值航天器打造太空建造与维修服务站)、太阳能电站(太空太阳能发电厂)、月球基地等。

这些动辄重量几百吨、尺度几千米的大型空间基建,由于运载能力有限,需要将各功能模块分批发射,在太空利用对接与捕获机构进行在轨对接和组装,届时大型、中型、小型、刚性、柔性等各类对接与捕获机构将成为地外基建的主力。

通过对接与捕获机构将大型地外基建(如天基太阳能电站、月球基地等)以小舱段的形式逐一发射后再实行在轨组装,一方面可以降低对运载工具的要求,提高发射的灵活性并降低成本,另一方面可以加强航天器的模块化、批量化设计和制造,降低各航天器发射过程中抗力学环境设计的难度,缩短了研制周期。

4.4 轨道修正

2020 年美国发布了《在轨服务与空间态势感知市场报告》,报告中列举了在轨延寿、机器人操作、发射后轨道修正服务、重新定轨服务、离轨服务是

未来在轨服务与空间态势感知领域最有前景的领域。

轨道修正即是对各类未入轨、入轨轨道偏离、轨道面需要调整或需辅助离轨的航天器提供轨道变更任务。发射后轨道修正服务指航天器发射部署过程中由于火箭故障导致入轨不正确或航天器自身故障不能自行入轨而需要进行救助的业务。重新定轨服务指入轨轨道偏离、轨道面需要调整的航天器所需要的服务,如美国转移飞行器能够提供“太空拖车”服务内容包括轨道提升、轨道脱离、SSO 轨道平面调整。离轨服务指非正常退役或寿命末期仍占据轨位而不能自身前往坟墓轨道或降轨坠毁的航天器所需要的服务。开展轨道修正业务的前提是利用对接与捕获机构对被服务对象进行接管控制。

5 关键技术

在轨对接与捕获技术研究是航天高技术领域当中的一项极具前瞻性和挑战性的课题,其内容涉及航天器总体、动力学、机构学、控制等多个学科,同时要适应复杂空间环境的苛刻要求,满足高可靠工程要求,具有跨学科、跨领域的特点。

5.1 系统设计与优化技术

为满足多样化的在轨对接与捕获任务要求,对接与捕获机构一般由捕获模块、拖动模块、锁紧模块、气/液/电路连接模块、传感遥测模块等构成。其设计需要综合考虑各种因素,如基于功能的系统构型与布局设计,需面向全任务阶段各任务剖面,综合考虑方案可行性、指标满足性以及各种重量、空间、功耗等的约束;在保障机构具备所要求的功能和性能前提下,对接与捕获各个阶段的可靠性要高,要面向轻量化、模块化开展设计,满足长寿命和可靠的重复使用性等要求。另外如何保证系统的综合使用效率最高、性能最优也是一个难题,这些都需要通过系统的优化设计来解决。

5.2 自适应捕获技术

捕获技术历来是对接与捕获机构的关键技术之一,捕获过程难度主要体现在两个方面,一是克服初始偏差,包括姿态和位置偏差,二是消除相对速度,捕获过程需要在符合初始捕获包络条件下完成两航天器连接,并消除相对速度。消除速度偏差的主要方式是采用缓冲阻尼系统,而位置偏差则通过导向机构的校正完成补偿。随着对接与捕获机构小型化、自主化的发展,低冲击捕获(软捕获)、自适

应捕获成为研究热点及可靠性捕获的关键。

5.3 高可靠锁紧技术

对于需要加注或维修等操作的对接与捕获任务,在完成捕获后就要对两航天器实施锁紧,确保建立刚性连接,对于载人对接与捕获机构还需要建立密封通道。锁紧就是要提供一个较大的预紧载荷,使航天器间具有较强的连接刚度,保证在轨道机动、微振动等情况下,两航天器仍能正常联合飞行,进行工质传输等任务。由于所需的预紧载荷较大,并且要经受轨道机动飞行中的冲击载荷,还要保证在轨服务任务完成后能顺利解锁,这对锁定机构的锁定动力源小型化、多点锁定载荷一致性、应力松弛影响等高可靠锁紧提出了更高要求。

5.4 气/液/电路连接、断开技术

气/液/电路连接、断开技术用于航天器在轨补给任务,实现两航天器之间电路、液路和气路的快速自动接通,提供二者之间的气/液体工质及电路、信息通道;在完成任务后,能跟随两航天器在轨分离实现电路、液路和气路的自动分离。在具体设计时,主要是管路接通、断开两种工况下的可靠密封问题,为了补偿两航天器之间的对接偏差,需要考虑浮动连接与断开技术,确保两航天器之间管路的可靠连接与断开。此外,与不同工作介质的相容性问题,也是确保良好密封性的一个关键因素。

5.5 对接动力学建模与仿真技术

航天器的对接与捕获过程是一个复杂的动力学过程,涉及到两航天器相互接触碰撞的动量能量交换以及对接与捕获机构内部的缓冲、阻尼、变形等多个动力学参数,对于软捕获变刚度对接与捕获机构还涉及到更复杂的非线性问题。动力学建模与仿真工作的目的是对机构系统原理进行分析验证,并用于指导设计。动力学模型的建立需综合考虑对接过程机构接触碰撞模型和接触碰撞力计算模型的建立与评估、缓冲阻尼系统的多(柔)体精细非线性模型的建模、分时分段非线性模型的建立与模型切换等问题。

5.6 地面演示与验证技术

航天器对接与捕获机构是各类航天任务中多航天器建立联系的执行系统,是任务成败的关键所在。如何验证对接与捕获机构的技术可行性、设计可靠性是一个难题。地面测试与验证要真实模拟在轨工作状态,克服地面与在轨环境的差异性,达到充分验证对接与捕获机构功能与性能的目的。而地面再现微重力、高真空、温度交变的耦合环境难度极大,再加上对接与捕获机构验证时需考虑两航天器的空

间姿态、质量、质心、惯量等参数,进一步提高了地面测试与验证的难度。

5.7 消旋控制技术

在执行非合作目标的对接捕获任务时,有一项前置任务是对非合作目标的失控姿态进行匹配,即测绘非合作目标的尺寸、惯量、转轴等,通过对接与捕获机构或其他执行机构对其进行消旋控制,确保最终可靠捕获。针对特定目标选择消旋方法要综合考虑目标几何形状、材料特性、运动特性、执行机构、任务时间及能量消耗等问题^[32-33]。

5.8 智能驱动技术

随着材料科学、纳米技术、生物工程等相关基础科学的进步,仿生对接与捕获技术是模仿自然界中生物的外部形状、运动原理和行为方式的技术,基于智能驱动技术开发的柔性对接与捕获机构具有柔韧且较好强度的机械结构、多自由度机动灵活特性以及较强的抓握能力。智能驱动技术按照动机理分为:流体驱动,如液体驱动和气体驱动;智能材料驱动,如形状记忆合金(Shape memory alloy, SMA)驱动、电活性聚合物驱动、磁流变材料驱动;以及化学反应驱动和活体细胞驱动等。智能驱动技术是最有可能颠覆传统按“动力源+执行机构”的组合模式,达到“动力源即是执行机构”的共体模式,在未来非合作目标对接与捕获技术领域有很大的潜在应用价值^[34-35]。

6 启示与展望

自 1967 年首次在轨对接至今,已有五十多年。当前如何规划航天器对接与捕获技术的发展将成为各国抢占先机、打造制天权的现实问题,我国在该领域尚处于起步阶段,载人航天三期工程与嫦娥三期工程的顺利实施为我国在有人与无人对接机构领域发展奠定了坚实基础,在轨服务与载人登月任务全面启动也为我国发展航天器对接与捕获技术提出了新的要求。

(1) 注重基础科学与技术研究,加速智能材料技术、先进控制理论、遥操作与智能感知等基础科学与技术研究成果向航天器对接与捕获技术的应用转化,以实现功能高度集成与性能跨代升级。

(2) 推行模块化设计理念,制定对接与捕获技术标准体系,加强多任务场景的体系化论证实现对接与捕获机构产品系列化、通用化、货架化,以缩短研制周期、降低研制成本。

(3) 开启商业采购模式,打破行业垄断、驱动

社会智力与资本投入, 加速关键技术攻关, 实现对接与捕获技术的跨越式发展, 满足在轨服务、载人登月等多任务目标的需要。

参 考 文 献

- [1] 周建平. 空间交会对接技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
ZHOU Jianping. Spacecraft rendezvous and docking technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [2] 周建平. 载人航天交会对接技术[J]. 载人航天, 2011, 17(2): 1-8.
ZHOU Jianping. Manned space rendezvous and docking technology[J]. Manned Space, 2011, 17(2): 1-8.
- [3] 翟光, 仇越, 梁斌, 等. 在轨捕获技术发展综述[J]. 机器人, 2008, 30(5): 467-480.
ZHAI Guang, QIU Yue, LIANG Bin, et al. Development of on-orbit capture technology[J]. Robot, 2008, 30(5): 467-480.
- [4] 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): 33-39.
CUI Naigang, WANG Ping, GUO Jifeng, et al. A review of on-orbit service technology[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(4): 33-39.
- [5] NILSON T, CHRISTIANSEN S. Docking system for autonomous, un-manned docking operations[C]//2008 IEEE Aerospace Conference, New York: IEEE, 2008: 2770-2783.
- [6] 田大可, 范小东, 郑夕健, 等. 空间可展开天线微重力环境模拟研究现状与展望[J]. 机械工程学报, 2021, 57(3): 11-26.
TIAN Dake, FAN Xiaodong, ZHENG Xijian, et al. Research status and prospect of micro-gravity environment simulation for space deployable antenna[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(3): 11-26.
- [7] 李海利, 姚建涛, 周盼, 等. 无系留大负载软体抓手机器人研究发展综述[J]. 机械工程学报, 2021, 56(19): 29-42.
LI Haili, YAO Jiantao, ZHOU Pan, et al. Untethered, high-load soft gripping robots: A review[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 56(19): 29-42.
- [8] 李小彭, 郭军强, 孙万琪, 等. 混合工作模式欠驱动手设计及其接触力分析[J]. 机械工程学报, 2021, 57(1): 8-18.
LI Xiaopeng, GUO Junqiang, SUN Wanqi, et al. Design and contact force analysis of under-actuated manipulator with hybrid working mode[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(1): 8-18.
- [9] 文桂林, 肖久如, 尹汉锋, 等. 全向式多室连通火星着陆缓冲气囊的多目标优化设计[J]. 机械工程学报, 2015, 51(15): 135-141.
WEN Guilin, XIAO Jiuru, YIN Hanfeng, et al. Multi-objective optimization design of omni-directional multi-chamber airbag for landing on Mars[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(1): 8-18.
- [10] QIN Shengfeng, CHENG Kai. Special issue on future digital design and manufacturing: Embracing industry 4.0 and beyond[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(6): 1045-1046.
- [11] DAVID B, LISA H, ERIN F, et al. A market for satellite cellularization: A first look at the implementation and potential impact of satlets[C]// Proceedings of AIAA Space 2013 Conference and Exposition. Washington DC: AIAA, 2013: 2579-2589.
- [12] VRIENDT de K, DITTMER H, VRANCKEN D, et al. Evolution of the IBDM structural latch development into a generic simplified design[C]//Proceedings of the 40th Aerospace Mechanisms Symposium, Florida, NASA Kennedy Space Center, 2010: 353-360.
- [13] 朱仁璋, 王鸿芳, 徐宇杰, 等. 从 ETS-VII 到 HTV—日本交会对接/停靠技术研究[J]. 航天器工程, 2011, 20(4): 6-31.
ZHU Renzhang, WANG Hongfang, XU Yujie, et al. From ETS-VII to HTV: Study of Japanese rendezvous and docking/berthing technologies[J]. Spacecraft Engineering, 2011, 20(4): 6-31.
- [14] BISCHOF B, STARKE J, GUENTHER H, et al. System for capturing and recovering free-flying objects in space: US7168660B2[P]. 2004-09-17.
- [15] 张崇峰, 陈宝东, 郑云青, 等. 航天器对接机构[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
ZHANG Chongfeng, CHEN Baodong, ZHENG Qingyun, et al. Spacecraft docking mechanism[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [16] 林来兴. 空间交会对接的发展历程[J]. 国际太空, 2018, 10(478): 40-42.
LIN Laixing. Space rendezvous and docking[J]. International Space, 2018, 10(478): 40-42.
- [17] 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.
CHEN Xiaolian, YUAN Jianping, YAO Wen, et al.

- Spacecraft on-orbit service technology[M]. Beijing: China Astronautics Publish House, 2009.
- [18] DONALD M W. On-orbit servicing of space systems[M]. Froride: Krieger Publishing Company, 1993.
- [19] 王明明, 罗建军, 袁建平, 等. 空间在轨装配技术综述[J]. 航空学报, 2021, 42(1): 523913.
- WANG Mingming, LUO Jianjun, YUAN Jianping, et al. In-orbit assembly technology : Review[J]. Acta Aeronautica, 2021, 42(1): 523913.
- [20] 刘宏, 刘冬雨, 蒋再男. 空间机械臂技术综述及展望[J]. 航空学报, 2021, 42(1): 524164.
- LIU Hong, LIU Dongyu, JIANG Zainan. Space manipulator technology: Review and prospect[J]. Acta Aeronautica, 2021, 42(1): 524164.
- [21] JASON L F, AGLIETTI G S, NAVARATHINAM N, et al. Remove debris: An in-orbit active debris removal demonstration mission[J]. Acta Astronautica, 2016, 127(10): 448-463.
- [22] 刘志, 崔宇新, 张崇峰. 国际对接系统标准探究[J]. 载人航天, 2014, 20(2): 152-160.
- LIU Zhi, CUI Yuxin, ZHANG Chongfeng. Study on international docking system standard[J]. Manned Spaceflight, 2014, 20(2): 152-160.
- [23] 刘志, 张崇峰. 空间对接机构技术综述[J]. 上海航天, 2016, 33(5): 1-11.
- LIU Zhi, ZHANG Chongfeng. Review of space docking mechanism and its technology[J]. Aerospace Shanghai, 2016, 33(5): 1-11.
- [24] International Docking System Standard (IDSS), Interface Definition Document(IDD)(RevisongA).[EB/OL]. [2011-05-13]. <http://International Docking Standard.com/>.
- [25] TobieLabauve. Low Impact Docking System (LIDS) [R/OL]. [2012-12-11]. http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20090007783_2009006897.pdf.
- [26] QinetiQ Space nv. IBDM. International Berthing & Docking Mechanism [R/OL]. [2011-03-07]. <http://www.qinet.com/what/capabilities/space/Document/international-Berthing-Docking-Mechanism.pdf>.
- [27] KAUDERER A. Space shuttle mission STS-129 press kit [EB/OL]. [2010-01-29]. <http://www.nasa.gov/pdf/398418mainsts129presskit.pdf>
- [28] ANTHONY B H, TCHORYK P, JANE C, et al. Advancements in design of an autonomous satellite docking system[C/CD]// Proc. of SPIE AIAA Space 2001 Conference, Albuquerque, New Mexico, AIAA. August, 2001.
- [29] KAISER C, SJÖBERG F, DELCURA J M, et al. SMART-OLEV: An orbital life extension vehicle for servicing commercial spacecrafts in GEO[J]. Acta Astronautica, 2008, 63(1-4): 400-410.
- [30] KRENN R, LANDZETTEL K, KAISER C, et al. Simulation of the docking phase for the smart-olev satellite servicing mission[C]//9th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space(iSAIRAS), Februar 25-29, 2008, Los Angeles, USA: DLR, 2008: 1-9.
- [31] 金宗耀, 刘永健, 谭春林. 美国小行星俘获任务及其启示[J]. 航天器工程, 2013, 22(5): 129-135.
- JIN Zongyao, LIU Yongjian, TAN Chunlin. Introduction and inspiration of American asteroid capture and return mission[J]. Spacecraft Engineering, 2013, 22(5): 129-135.
- [32] BROPHY J R, GERSHMAN R, LANDAU D, et al. Asteroid return mission feasibility study[C]// Proceedings of the 47th AIAA / ASME / SAE / ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibition. Washington D.C., AIAA, 2011: 1-10.
- [33] 路勇, 刘晓光, 周宇, 等. 空间翻滚非合作目标消旋技术发展综述[J]. 航空学报, 2018, 39(1): 021302.
- LU Yong, LIU Xiaoguang, ZHOU Yu, et al. Review of detumbling technologies for active removal of uncooperative targets[J]. Acta Aeronautica, 2018, 39(1): 021302.
- [34] 张秀丽, 郑浩峻, 陈慧, 等. 机器人仿生学研究综述[J]. 机器人, 2002, 24(2): 188-192.
- ZHANG Xiuli, ZHENG Haojun, CHEN Ken, et al. Research on robotic bionics[J]. Robot, 2002, 24(2): 188-192.
- [35] 张忠强, 邹娇, 丁建宁, 等. 软体机器人驱动研究现状[J]. 机器人, 2018, 40(5): 648-659.
- ZHANG Zhongqiang, ZOU Jiao, DING Jianning, et al. Research status of the soft robot driving[J]. Robot, 2018, 40(5): 648-659.
- [36] 杨建中, 王文龙. 航天器连接分离装置技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2019.
- YANG Jianzhong, WANG Wenlong. Spacecraft connecting and separating device technology[M]. Beijing: China Astronautics Publish House, 2019.
- [37] NILSON T, CHRISTIANSEN S. Docking system for autonomous, un-manned docking operations[C]//2008 IEEE Aerospace Conference, New York: IEEE, 2008: 2770-2783.
- [38] DAVID B, LISA H, ERIN F, et al. A market for satellite

- cellularization: A first look at the implementation and potential impact of Satlets[C] //Proceedings of AIAA Space 2013 Conference and Exposition. Washington D. C., AIAA, 2013: 2579-2589.
- [39] 白绍竣. 包带连接建模与力学特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- BAI Shaojun. Studies into modeling and mechanic properties of marman clampband joint[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [40] 张晓天, 何宁泊, 王睿青, 等. 一种模块化微小型卫星对接机构建模仿真[J]. 宇航学报, 2018, 39(4): 86-93.
- ZHANG Xiaotian, HE Ningbo, WANG Ruiqing, et al. Modeling and simulation of a modular satellite docking mechanism[J]. Journal of Astronautics, 2018, 39(4): 86-93.
- [41] 张禹. 卫星喷管对接装置及捕获策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- ZHANG Yu. Research on satellite nozzle docking device and capture strategy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [42] BROPHY J, CULICK F, FRIEDMAN L. Asteroid retrieval feasibility study[M]. Tucson: The University of Arizona Press, 2012.
- [43] 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.
- LIANG Bin, DU Xiaodong, LI Cheng, et al. Advances in space robot on-orbit servicing for non-cooperative spacecraft[J]. Robot, 2012, 34(2): 242-256.
- [44] 李新刚, 裴胜伟. 国外航天器在轨捕获技术综述[J]. 航天器工程, 2013, 22(1): 113-119.
- LI Xingang, PEI Shengwei. On-orbit capture technology of spacecraft[J]. Spacecraft Engineering, 2013, 22(1): 113-119.
- [45] 夏艳. 基于差动机构的欠驱动自适应式空间捕获装置[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- XIA Yan. Research on an under-actuated self-adaptive space capture device based on differential mechanism[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [46] CHOI Junwoo, JUNG Jinwon, LEE Dongkyu, et al. Articulated linkage arms based reliable capture device for janitor satellites[J]. Acta Astronautica, 2019, 163(Part A): 91-99.
- [47] 朱黎辉. 电话性介电弹性体膜型材料电致应变特性的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- ZHU Lihui. Characteristics of electrical energy conversion for dielectric elastomer film [D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [48] 赵启龙, 康志宇, 韩亮亮. 静止轨道碎片清除飞行器概念研究[J]. 国际太空, 2014(1): 48-53.
- ZHAO Qilong, KANG Zhiyu, HAN Liangliang. Spacecraft concept research for space debris on the geostationary orbit[J]. Space International, 2014(1): 48-53.
- [49] 杜昊. 空间合作目标捕获对接装置优化设计的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- DU Hao. Research on design and optimization of capture and docking system for space cooperative object cooperative object[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [50] 范佐. 非合作目标对接机构的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- FAN Zuo. The research on uncooperative target docking mechanism[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [51] 刘传世. 空间非合作目标对接机构的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- LIU Chuanshi. Study on the docking mechanism for uncooperative space target[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [52] KONG E M C, OTERO A S, NOLET S, et al. SPHERES as a formation flight algorithm development and validation testbed: Current progress and beyond[C]// Proceedings of the 2nd International Symposium on Formation Flying Missions and Technologies. Paris: ESA, 2004: 1-13.
- [53] RODGERS L, HOFF N R, JORDAN E, et al. A universal interface for modular spacecraft[C]// Proceedings of the 19th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites. Washington DC: AIAA, 2005: 1-8.
- [54] LENNON Rodgers. Concepts and technology development for the autonomous assembly and reconfiguration of modular space systems[D]. Boston: Massachusettes Institute of Technology, 2005.
- [55] WOKES D, SMAIL S, PALMER P, et al. Pose estimation for in-orbit self-assembly of the intelligent self-powered modules[C]// Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2009. Washington DC: AIAA, 2009: 1-18.
- [56] NATHAN H, HAL D N. Magnetic capture docking system: US States, US7815149B1[P]. 2010-10-19.
- [57] PETRILLO D, CAVINATO A, GAINO M, et al. FELDs experiment from design to microgravity testing

- [C]//Proceedings of the 66th IAC. Paris: IAF, 2015: 1-9.
- [58] LORENZO O, RICCARDO M, FRANCESCO B, et al. CubeSat mission concept for TED demonstration [C]//Proceedings of 2014 Tartu Conference on Space Science and Technology. Tartu: Tartu Observatory Space Research Center, 2014: 1-10.
- [59] BOESSO A, FRANCESCONI A. ARCADE small-scale docking mechanism for micro-satellites[J]. *Acta Astronautica*, 2013(86): 77-87.
- [60] MARCO B, ALESSANDRO B, ADAM B, et al. Autonomous rendezvous, control and docking experiment: Reflight 2 [C]//Proceedings of The 4S Symposium. Washington D.C., AIAA, 2014: 1-14.
- [61] PETRILLO D, CAVINATO A, GAINO M, et al. Field experiment: A new flexible docking concept [C]//Proceedings of the 1st Symposium on Space Educational Activities. Padua, Italy, SSEA, 2015: 9-12.
- [62] DEIMEL R, BROCK O. A novel type of compliant and underactuated robotic hand for dexterous grasping[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2016, 35(1-3): 161-185.
- [63] MCMAHAN W, CHITRAKARAN V, CSENCISITS M, et al. Field trials and testing of the OctArm continuum manipulator[C/CD]//International Conference on Robotics and Automation, 2006.
- [64] KRISHNAN G, MOSER J B, KIM C, et al. Kinematics of a generalized class of pneumatic artificial muscles[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*. 2015, 7(4): 041014.
- [65] 邵铁锋. 气动柔性象鼻型连续机器人研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2014.
- SHAO Tiefeng. Research on flexible pneumatic trunk-type continuum robot[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2014.
- [66] JIANG Hao, LIU Xinghua, CHEN Xiaotong, et al. Design and simulation analysis of a soft manipulator based on honeycomb pneumatic networks[C]//International Conference on Robotics and Biomimetics, Qingdao, China December 3-7, 2016, IEEE, 2016: 350-356.
- [67] 王波, 庄原, 刘芃, 等. 航天器电磁对接技术发展综述[J]. *航天器工程*, 2018, 27(6): 92-101.
- WANG Bo, ZHUANG Yuan, LIU Peng, et al. Review of spacecraft electromagnetic docking technology development[J]. *Spacecraft Engineering*, 2018, 27(6): 92-101.
-
- 作者简介: 王文龙(通信作者), 男, 1983 年出生, 博士。主要研究方向为空间机构、在轨服务。
- E-mail: ww1607@126.com
- 杨建中, 男, 1969 年出生, 研究员。主要研究方向为空间机构。
- E-mail: yang18811038700@163.com