

空间多功能在轨维护机器人系统 及其末端执行器设计*

丰 飞^{1,2}, 唐丽娜³, 韩 锋¹

(1. 华中科技大学机械科学与工程学院, 武汉 430074;

2. 上海翼人机器人有限公司, 上海 200245;

3. 上海航天设备制造总厂有限公司, 上海 201108)

[摘要] 空间机器人是空间在轨服务的一种重要工具。以合作目标与非合作目标的在轨维护为目的,通过对现有空间机器人研究现状的调研和分析,提出了基于末端工具可快换的多功能在轨维护机器人系统,并提出多种末端执行器设计方案。其中三指-三瓣式末端执行器作为末端工具快换装置,不仅具有机械接口捕获对接的功能,还具有电力/信号传输功能,以及机械臂动力传输功能;钢丝绳缠绕式末端执行器具有优越的容差和软捕获性能,适合用于实现对安装有捕获接口的合作目标以及非合作目标卫星发动机喷管的捕获;而欠驱动三指末端执行器具有良好的待捕获目标物体形状自适应功能以及软捕获功能,因此可用于对空间形状不规则的太空垃圾等目标进行非合作目标捕获。通过对多功能在轨维护机器人系统及其末端工具快换过程以及末端执行器对目标捕获操作的研究,所提出的基于末端工具快换的多功能在轨维护机器人系统有较好的应用前景。

关键词: 空间在轨维护; 空间机器人; 多功能末端执行器; 三指-三瓣式; 钢丝绳缠绕式

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.10.014



丰 飞

工程师,从事空间/核工业等极端环境作业特种机器人研究,2018年入选江苏省产业技术研究院集萃青年研究员。

空间在轨服务及在轨维护是一项处于前沿的空间技术研究热点,主要涉及空间对接、空间捕获、空间机器人等技术。基于空间机器人在轨服务及维护技术一直是各航天强国的研究重点,传统在轨维护机器人系统均为特定功能而设计,所操作的目标载荷多为合作目标^[1-4]。最早开展实际应用的空间机械臂是加拿大为美国航天飞机研制的机械臂系统SRMS (Shuttle Remote Manipulator System),美国的航天飞机都安装了SRMS系统。在航天飞机空间机械臂SRMS的基础上,进行了升级改造设计开发并研制了应用于空间站的大型机械臂系统SSRMS (Space Station Remote Manipulator System)^[5-10]。欧空局也针对国际空间站俄罗斯舱段

以及欧洲货运飞船的对接等操作,联合研制了ERA (European Robotics Arm) 机器人系统,采用了全新的末端执行器设计方案,其末端执行器容差空间相对较小,在对目标机械接口的捕获过程中需要通过机械臂精准位置和主动柔顺控制结合才能实现可靠的捕获,有学者也尝试通过在ERA末端执行器上新增一个末端执行器以增强其末端执行器的容差性能^[11-14]。此外,日本借鉴了加拿大空间站机械臂技术,研制开发了安装在国际空间站日本舱段的实验舱机械臂系统JEMRMS (Japan Experiment Module Remote Manipulator System),用于国际空间站日本舱段的在轨组装、维护和试验载荷的日常照料^[15-18]。以卫星在轨

* 基金项目: 国家自然科学基金 (51601117)。

维护为需求,日本和美国先后开展了卫星作为机器人搭载平台的在轨维护机器人系统的研制和在轨试验工作,分别为1997年发射升空的试验卫星七号 ETS-VII 以及2008年发射的轨道快车(Orbital Express)^[19-20]。目前,美国正在开展基于模块化设计思想的在轨卫星维修和维护机器人技术的研究工作,主要通过失效卫星的可用功能模块的快速切割、转运和安装,从而构建具有所需功能的可用卫星,该研究方向的初步预研项目包括凤凰计划(Phoniex Program),以及基于3D打印技术实现轨大尺度基础构建和维护的SpiderFab项目。除此之外,德国也开展了卫星在轨维护上述空间机器人系统,均按照特定功能开展机械臂功能和末端执行器功能设计,功能相对专一^[21-22]。

综上所述,随着人类的脚步向更深邃浩渺的太空挺进,空间机器人将在行星探测、空间在轨维护、大型结构件在轨组装、空间试验载荷照料等领域获得更广泛的应用。随着新型的航天器在轨建造工艺及先进的在轨维护技术的快速发展,空间机器人与这些技术的结合,将进一步促进空间在轨维护机器人技术的快速发展。空间在轨作业的多样性和复杂性,以及面对复杂非结构化环境下的复杂操作等,对空间机器人的灵巧性、自主性、智能性以及多功能作业等功能提出了更高的要求。因此,面向空间在轨维护,开展多功能在轨维护机器人系统及其多功能末端执行器系统的设计及研发工作,具有促进空间在轨维护技术快速发展的重要作用。

空间在轨维护机器人系统

针对空间在轨服务和在轨维护的操作需求,采用灵活性及柔性较强的空间机械臂作为捕获机构的载体,开展在轨捕获系统的研究工作。所采用的空间机械臂系统需要实现空间合作与非合作两类目标载荷的捕

获操作,需要针对两类目标载荷的在轨捕获操作设计对应的空间在轨捕获机构,以及满足机械臂“尺蠖行走”定位和捕获末端执行器快换功能的多功能末端执行器的设计。由于空间机械臂工作在微重力环境中,且空间机械臂存在臂杆细长且采用谐波减速作为关键传动系统,因此要求用于空间在轨维护捕获操作的机械臂的末端执行器具有“大容差、软捕获”的基本性能要求。其中,大容差性能主要是弥补由于空间机械臂臂杆细长、柔性大,关节柔性大等特点导致大型机械臂的末端定位精度较差且存在残余振动的缺点,即当接口与末端执行器之间存在较大的位置和姿态偏差的情况下,末端执行器也能实现对接口的可靠捕获;而软捕获性能主要是针对空间自由漂浮和自由飞行的小质量、小惯量目标载荷,捕获机构与目标载荷之间的较大的碰撞产生的接触力会导致对目标载荷捕获失效。为了保证机械臂和载荷系统的安全,捕获过程中要求末端执行器与接口之间的接触力不会导致较大冲击和碰撞产生,能实现柔顺捕获。

基于多功能末端执行器实现末端捕获工具快换多功能机器人系统,主要包括自由飞行机器人平台、七自由度冗余机械臂系统、三指-三瓣式末端执行器及其行走定位及捕获机械接口系统、钢丝绳缠绕式捕获末端执行器及其机械接口系统、欠驱动自适应末端夹持/捕获末端执行器系统、待维护目标载荷系统等。

具有合作目标与非合作目标在轨捕获功能的在轨服务飞行器系统的基本组成和原理如图1所示。

以美国正在开展的Phoniex Project以及SpiderFab为蓝本,以现有的通用卫星的维护为对象,结合中国空间站实验舱机械臂研制的基本技术要求,开展多功能在轨维护机器人系统及其末端执行器设计与在轨维护技术研究,是对在轨维

护前沿技术的跟踪和技术积累。基本设计及依据是在轨维护载荷的质量为5000kg,外形尺寸不大于2.5m×2.5m×2.5m;机械臂臂展不小于5m,末端负载不低于5000kg。

以空间大型机械臂作为捕获机构的搭载平台,自由飞行器作为机械臂的搭载平台构建在轨维护系统。其中空间大型机械臂系统采用具有7个转动关节冗余自由度且关于肘关节对称的构型,机械臂搭载两套多功能末端执行器系统;自由飞行器作为机械臂的搭载平台,上面安装了多个多功能机械臂机械接口,并各有一个合作目标与非合作目标捕获末端执行器储存坞,在合作目标或者非合作目标捕获末端执行器不用时,机械臂将对应的末端执行器定位到相应的储存坞位置,通过末端执行器捕获储存坞内的机械接口或者固定装置,机械臂末端的多功能末端执行器释放机械接口,从而实现了合作目标与非合作目标末端执行器的释放和储存,机械臂进行下一任务需求的末端执行器更换或者尺蠖行走重定位。

尺蠖行走操作:尺蠖行走主要通过机械臂两端搭载的多功能末端执行器实现,通过七自由度对称机械臂两端安装的多功能末端执行器,交替捕获安装在飞行器外表面的多功能末端执行器机械接口,从而完成机械臂的尺蠖行走和重定位。

合作目标捕获操作:机械臂搭载飞行器机动靠近待捕获合作目标,机械臂尺蠖行走重定位达到满足捕获要求位置,机械臂通过多功能末端执行器捕获并精确连接合作目标捕获末端执行器,采用综合机械臂捕获策略和末端执行器捕获策略,完成合作目标捕获。

非合作目标捕获:其捕获过程与合作目标类似,只是机械臂末端通过多功能末端执行器快换捕获的是非合作目标捕获末端执行器。

多功能机械臂及其末端执行器

组成如图 2 所示。

末端执行器设计

1 三指-三瓣式多功能末端执行器设计

针对空间合作与非合作目标捕获机器人系统的末端工具快换和重定位操作需求,完成了三指-三瓣式末端执行器的改进和优化,设计一套结构紧凑、适合空间机械臂末端工具

快换和机械臂尺蠖行走重定位操作要求的捕获机构,如图 3 所示。该机构通过一套驱动系统即可实现对接口包络捕获、拉近固化、机械及电气连接。因此,末端执行器的机构和电

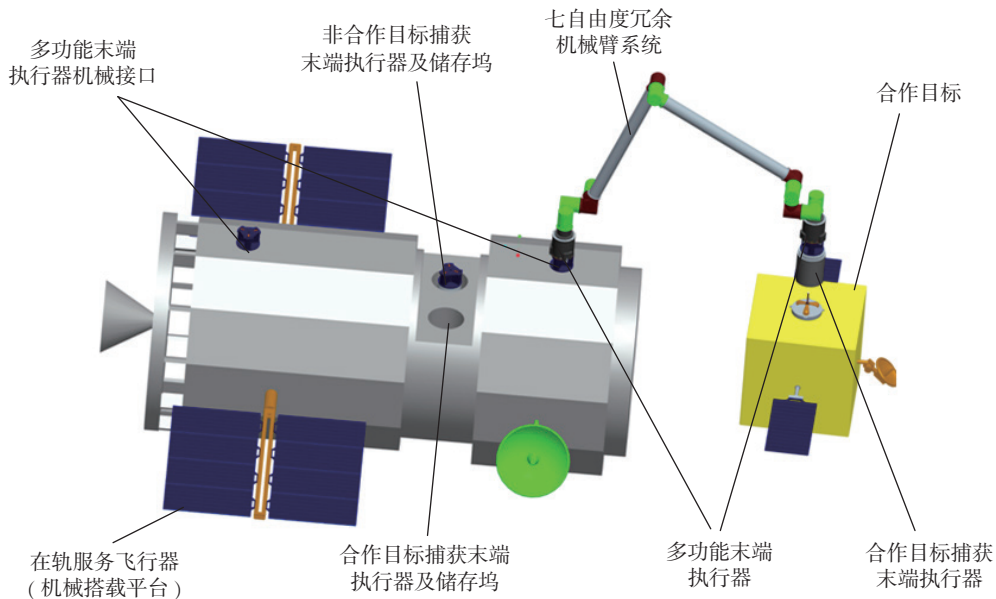


图1 空间多功能在轨维护机器人系统组成

Fig.1 Composition of multi-function on-orbit servicing robot system

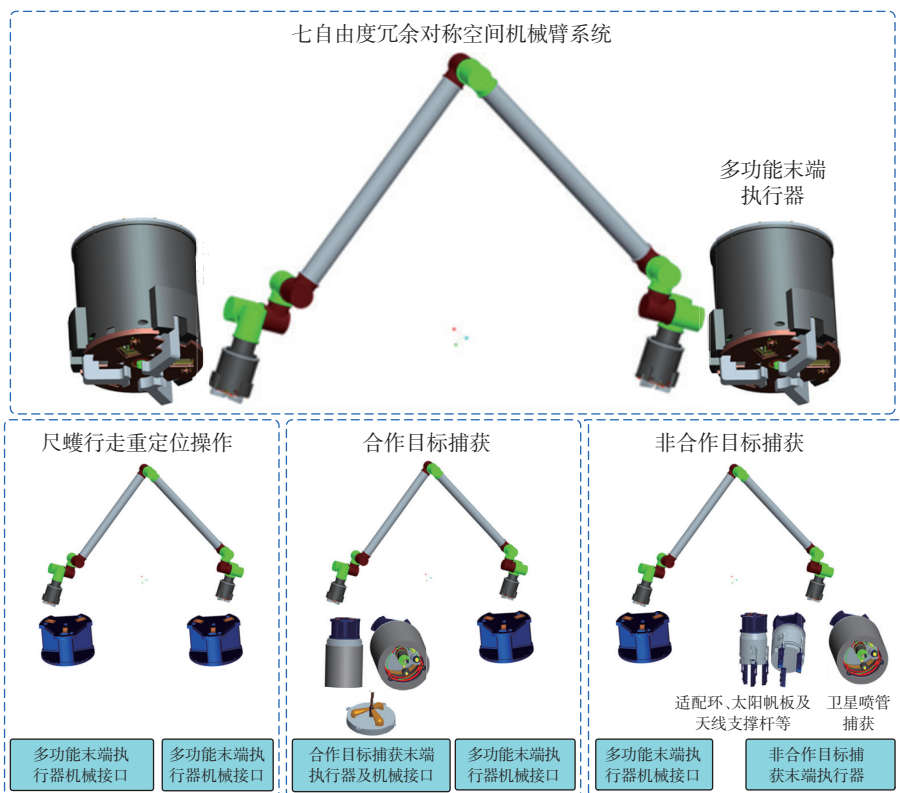


图2 多功能在轨维护机器人系统及其末端执行器系统

Fig.2 Multi-function on-orbit servicing robot system and its end-effectors

控系统相对比较简单,可靠性较高。

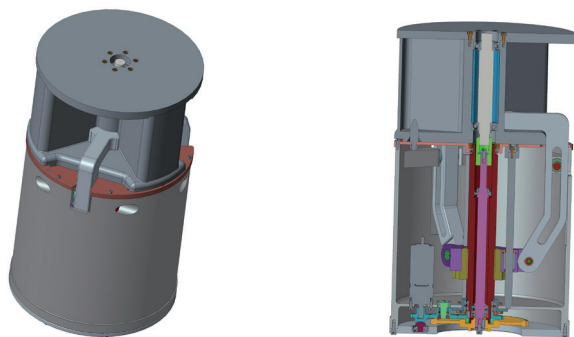
因此,三指-三瓣式末端执行器作为空间合作目标与非合作目标在轨捕获空间机械臂系统的适配末端执行器,不仅可以作为捕获末端执行器,完成合作目标载荷的捕获和抓取操作,而且还可以实现末端工具、末端捕获机构的快换,以及实现空间机械臂的重定位操作,从而扩大其工作范围。七自由度机械臂系统的组成如图4所示。

七自由度机械臂系统5通过安装在肩关节(腕关节)三指-三瓣式末端执行器一5-1或者三指-三瓣式末端执行器二5-1',与安装在自由飞行移动平台上的三指-三瓣式末端执行器捕获接口2实现高刚度机械连接和可靠的电力/型号连接,从而实现七自由度机械臂系统5的尺蠖行走重定位。所述七自由度机械臂构型实施方式及各部件连接实施方式为三指-三瓣式末端执行器一5-1与肩关节Roll自由度关节5-2的输出端连接,肩关节Roll自由度关节5-2的固定端则采用关节偏置的方式与肩关节Yaw自由度关节5-3的输出端连接,肩关节Yaw自由度关节5-3的固定端则同样采用关节偏置的方式与肩关节Pitch自由度关节5-4输出端连接,肩关节Pitch自由度关节5-4固定端与臂杆一5-5连接,臂杆一5-5的另一端与肘关节5-6的输出端连接,肘关节为Pitch自由度,肘关节5-6的固定端与臂杆二5-7连接,臂杆二5-7的另外一端与腕关节Pitch自由度关节5-4'的固定端连接,腕关节Pitch自由度关节5-4'的输出端则与腕关节Yaw自由度关节5-3'的固定端连接,腕关节Yaw自由度关节5-3'的输出端与腕关节Roll自由度关节5-2'的固定端连接,腕关节Roll自由度关节5-2'的输出端与三指-三瓣式末端执行器二5-1'连接。

三指-三瓣式末端执行器系统

(图5)由三指-三瓣式末端执行器5-1及其捕获接口2组成。其中三指-三瓣式末端执行器的捕获机构由3个具有时序动作凸轮槽的手指5-1-1实现,每个手指的凸轮槽根据末端执行对载荷捕获时的基本动作时序

(张开→闭合捕获→拖动固化→电气连接)进行设计,从上而下依次是直线段、过渡段和斜线段。3个手指5-1-1与直线移动平台5-1-10上通过铰链连接,直线移动平台5-1-10的往复直线运动通过丝杠螺母副5-1-7



(a)三指-三瓣式末端执行器 (b)三指-三瓣式末端执行器剖视图

图3 三指-三瓣式末端执行器及其机械接口

Fig.3 Three-finger-three-petal end-effector and its mechanical interface

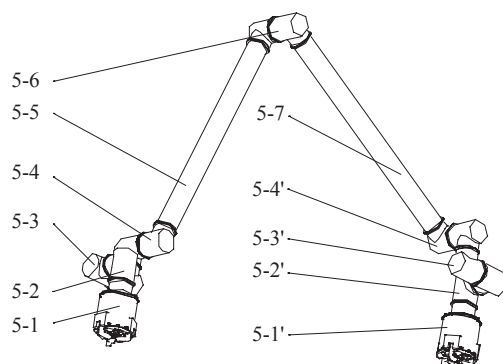


图4 多功能在轨维护机器人机械臂系统对称构型及其系统组成

Fig.4 Symmetric configuration and its composition of multi-function on-orbit servicing robot system

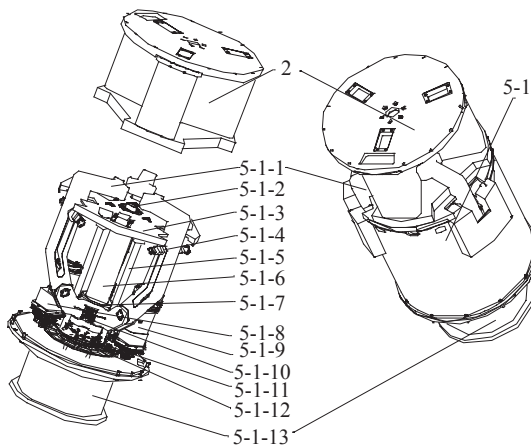


图5 三指-三瓣式末端执行器组成及其机械接口

Fig.5 Composition of three-finger-three-petal end-effector and its mechanical interface

与空心丝杠 5-1-6 实现,并且通过 3 根圆周均布的导向杆 5-1-5 与端盖 5-1-3 及底座连接,丝杠 5-1-6 的传动则通过捕获驱动电机 5-1-9,经过齿轮副 5-1-11 实现;3 个手指 5-1-1 的凸轮槽与固定在端盖和外壳上的导向轴 5-1-4 配合,用于辅助丝杠螺母副 5-1-7 与空心丝杠 5-1-6,从而实现手指的展开和闭合;即导向轴 5-1-4 插入导向槽内实现对手指运动轨迹的限制,从而当丝杠转动,通过螺母副 5-1-7 带动直线运动平台 5-1-10 向端盖 5-1-3 的方向运动时,首先是 3 根手指的直线段与导向轴 5-1-4 接触,从而实现 3 个手指的同步伸出末端执行器外壳,当运动到直线段和斜线段交叉的过渡段时,过渡段与导向轴 5-1-4 接触,手指开始展开。

此外,所述的三指-三瓣式末端执行器还具有机械动力传输功能,通过套筒扳手的方式与接口上的工具动力传动轴实现连接,末端执行器上的套筒扳手 5-1-2 通过滚动轴承两端支撑的方式安装在空心丝杠 5-1-6 内部,即嵌套在空心丝杠 5-1-6 内部,套筒扳手的传动则通过套筒扳手驱动电机 5-1-8 实现,并通过套筒扳手传动齿轮副 5-1-12 将电机输出轴转动传动到套筒扳手 5-1-2 的下端,从而实现套筒扳手的转动。

2 钢丝绳缠绕式柔顺捕获式末端执行器设计

该末端执行器主要用于实现空间小型漂浮合作目标以及具有凸出杆状接口的非合作目标的在轨捕获,如图 6 所示。这两类载荷的捕获需要末端执行器具有足够大的容差包络空间和软捕获能力,其中大容差取决于末端载执行器形成的包络捕获空间与被捕获目标接口之间的尺寸差,两者相差越大,容差空间越大。由于末端执行器需要考虑发射时机械臂固化锁紧装置对机械臂系统外形尺寸和质量的要求,末端执行器通常具有轻质、结构紧凑以及外形尺寸

严格限制等要求。因此,在外形尺寸受限制的约束条件下,需要优化设计末端执行器的容差空间和捕获接口的外形尺寸,从而获得最优的末端执行器容差性能。

钢丝绳缠绕式末端执行器 3 包括捕获环节和拖动环节,如图 7 所示。捕获环节主要实现钢丝绳缠绕式末端执行器捕获接口 3-7 上捕获杆 3-7-1 的缠绕捕获,捕获环节的 3 根钢丝绳 3-5 各自的一段分别与固定环 3-6 铰链连接,另外一端分别与转动环 3-4 铰链连接,固定环 3-6 与捕获-拖动安装外壳固定连接,转动环 3-4 与捕获环传动内齿圈 3-10 固定连接,整体通过大直径薄壁轴承与捕获-拖动安装外壳连接,捕获环节的齿轮-滚珠花键部件 3-2 的齿轮与捕获环传动内齿圈 3-10 啮合,滚珠花键则通过角接触轴承安装在捕获-拖动安装外壳底部的平台上,滚珠花键靠近底部的一端通过直齿轮与捕获驱动电机 3-1 的输出轴上的齿轮啮合,从而实现捕获环节转动

环 3-4 的转动传动,进而通过转动环转动驱动 3 根捕获钢丝绳 3-5 向中心闭合,闭合的过程中推动捕获杆 3-7-1 向中心运动,直至完成缠绕-捆紧-捕获。

拖动环节的拖动电机 3-9 安装在捕获-拖动安装外壳底部的平台上,并通过安装在输出轴上的齿轮与安装在底部的外齿圈(图 7 中未显示)啮合实现运动传动,底部外齿圈通过安装在其上的内齿圈与安装在 3 套拖动丝杠螺母副 3-3 的丝杆底端的直齿轮啮合,将电机转动同步传递到丝杆上,3 套拖动丝杠螺母副 3-3 的螺母则固定在捕获-拖动单元安装外壳的内壁顶端,从而在 3 套拖动丝杠螺母副 3-3 的作用下,完成捕获-拖动安装外壳与载荷的拖动固化操作。此外,拖动过程中接口与末端执行器之间的定位是通过捕获接口 3-7 上的 3 个定位凸轮 3-7-2 与末端执行器 3 上对应的 3 个定位槽 3-8 配合实现接口的位姿定位,当捕获接口 3-7 上接口安装板 3-7-3 的端面与

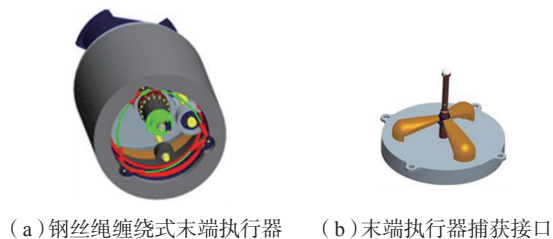


图6 钢丝绳缠绕式末端执行器及其机械接口三维模型

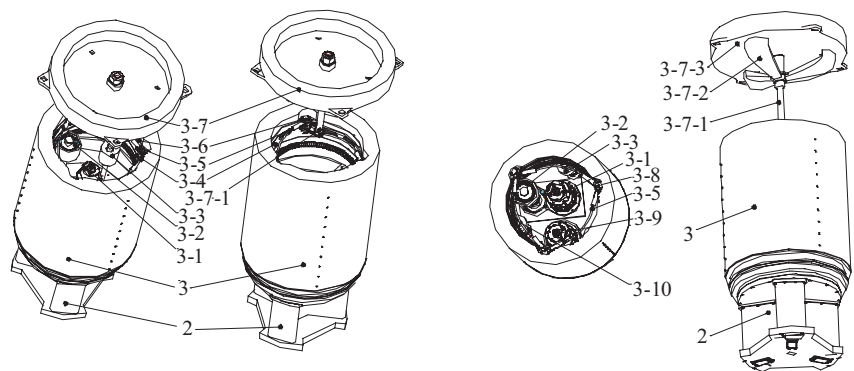


图7 钢丝绳缠绕式末端执行器组成及其机械接口

末端执行器的端面完全贴合时,即完成了接口(目标载荷)的捕获和拖动固化。

钢丝绳缠绕式末端执行器3的更换及搭载方式如图8所示,钢丝绳缠绕式末端执行器3上安装有三指-三瓣式末端执行器捕获接口2,使得七自由度机械臂5可以通过捕获和夹持三指-三瓣式末端执行器捕获接口2,实现对钢丝绳缠绕式末端执行器3的搭载。即通过控制七自由度机械臂,将安装在七自由度肩关节(腕关节)三指-三瓣式末端执行器-5-1或者三指-三瓣式末端执行器-5-1'定位到钢丝绳缠绕式末端执行器3上方,并使得三指-三瓣式末端执行器-5-1或者三指-三瓣式末端执行器-5-1'进入到对接口的捕获范围内,从而实现对三指-三瓣式末端执行器捕获接口2的捕获,并建立起高刚度的机械连接和稳定可靠的电力/信号连接,从而完成对钢丝绳缠绕式末端执行器3的更换及搭载。

简化版钢丝绳缠绕式末端执行器安装有与三指-三瓣式末端执行器捕获机构相兼容的捕获机械接口,通过该机械接口,钢丝绳缠绕式末端执行器可以被安装在机械臂末端的三指-三瓣式末端执行器实施捕获,并且可以从三指-三瓣式末端执行器端获得电力和控制信号,从而作为机械臂的扩展末端执行器,完成三指-三瓣式末端执行器不能完成的捕获工作。钢丝绳缠绕式末端执行器对非合作目标卫星喷管的捕获方式如图9所示。

3 欠驱动非合作目标捕获末端执行器

欠驱动非合作目标捕获末端执行器的设计,采用了具有对被捕获目标形状具有被动自适应功能的连杆耦合机构。该欠驱动末端执行器采用了模块化设计思想,3个手指的结构基本一致,如图10所示。3个手

指的闭合和展开通过一套梯形丝杠实现,具备一定的自锁能力,可以保证目标载荷稳定而可靠的包络抓取,其中两个手指可以调整相对于第3个手指的位置,从而满足对球形和圆柱体大直径杆件的稳定包络抓取。

该欠驱动末端执行器采用连杆耦合欠驱动捕获机构设计方案,其中3个手指连杆耦合传动方案相同,因此,具有以下特点:(1)小卫星喷管、小尺寸太空固体垃圾等非合作目标捕获;(2)连杆耦合欠驱动;(3)对目标物体形状具有自适应包络能力,可实现不同外形目标物体的包络抓取;(4)末端执行器姿态可调整;(5)夹持力大。

欠驱动自适应末端夹持/捕获末端执行器的基本组成如图11所示,采用3个欠驱动手指作为捕获执行机构,分别为欠驱动自适应手指

4-1、4-2和4-3,其中手指4-2与末端执行器端盖4-4为固定连接,手指4-1和4-3采用滚动轴承与末端执行器的盖4-4连接,从而通过手指4-1的构型调整电机4-5可以驱动手指4-1转动,调整手指4-1相对手指4-2的位置,同样也可以通过手指4-3的构型调整电机4-6可以驱动手指4-3转动,调整手指4-3相对手指4-2的位置。手指4-1和手指4-3相对手指4-2的位置调整,可以构建不同的末端执行器构型,以满足对不同形状物体的捕获和抓取。

手指4-1、4-2和4-3分别通过各自对应的动力传动连杆4-7与安装在直线往复运动平台4-10上的转动关节4-12连接,转动关节4-12套在各自对应的导向杆4-8上,因此,3个欠驱动手指对应3根动力传动连杆4-7、3个转动关节4-12以及3根

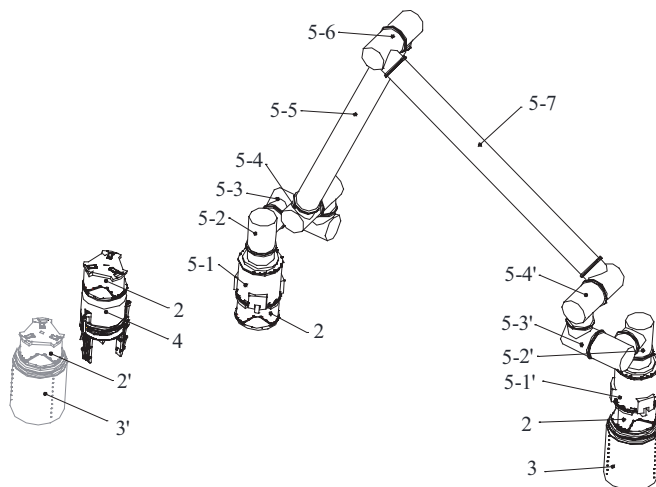


图8 钢丝绳缠绕式末端执行器快换方式
Fig.8 Fast-changeable mode of steel cable-snared end-effector

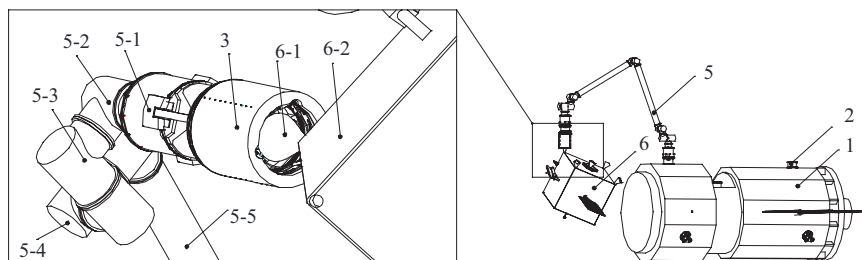
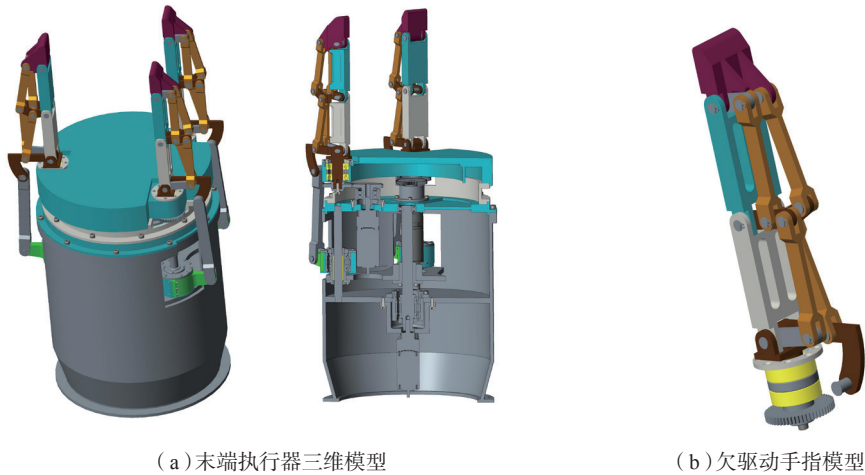


图9 钢丝绳缠绕式末端执行器捕获非合作目标卫星接口
Fig.9 Capturing mode of steel cable-snared end-effector for engine nozzle of non-cooperative satellite



(a) 末端执行器三维模型

(b) 欠驱动手指模型

图10 连杆耦合欠驱动手爪及其单手指结构

Fig.10 Three-finger end-effector with underactuated linkage mechanism and its finger

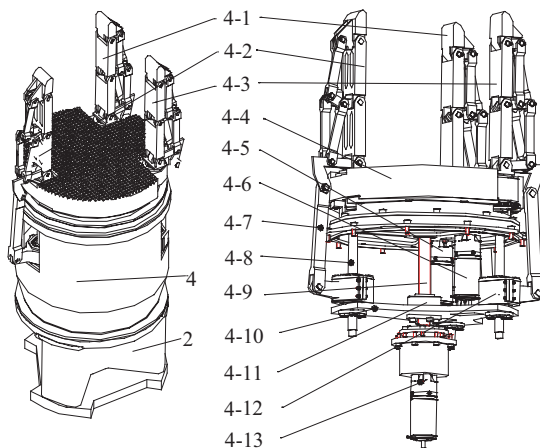


图11 连杆耦合欠驱动手爪组成

Fig.11 Composition of three-finger end-effector with underactuated linkage mechanism

导向杆 4-8, 3 个导向杆 4-8 一端与末端执行器的盖 4-4 固定连接, 另外一端与末端执行器外壳的底端固定连接。直线往复运动平台 4-10 与丝杆螺母副的螺母 4-11 固定连接, 丝杆 4-9 的一端通过深沟球轴承与末端执行器的盖 4-4 连接, 另外一端通过一对深沟球轴承与末端执行器外壳的地面连接, 螺母 4-11 与丝杆 4-9 组成丝杠螺母副, 并通过减速器与手指驱动电机 4-13 连接, 将驱动电机 4-13 的输出转换成直线往复运动平台 4-10 的往复运动, 并在 3 根动力传动连杆 4-7 的传动下, 实现手指的闭合或展开, 从而实现对载荷的捕获

或释放。

手指 4-1、4-2 和 4-3 采用连杆耦合的欠驱动传动方式, 连杆耦合的欠驱动传动方式具有对目标物体的被动自适应包络的性能, 适合用于形状不规则物体的捕获和抓取操作。

同样, 欠驱动自适应末端夹持/捕获末端执行器 4 上安装有三指-三瓣式末端执行器捕获接口 2, 使得七自由度机械臂 5 可以通过捕获和夹持三指-三瓣式末端执行器捕获接口 2, 从而实现对欠驱动自适应末端夹持/捕获末端执行器 4 的搭载, 连杆耦合欠驱动末端执行器的更换和搭载如图 12 所示。

末端执行器样机研制

根据末端执行器对容差性能、软捕获性能的基本要求, 在完成末端执行器样机研制基础上, 建立了末端执行器的地面试验系统, 从而通过地面模拟装置完成末端执行器的容差和软捕获性能测试。所研制的三指-三瓣式末端执行器及钢丝绳缠绕式末端执行器样机如图 13 所示。

结论

本文通过对空间在轨维护机器人系统的调研及操作形式分析, 提出了具有合作目标与非合作目标捕获的多功在轨服务机器人系统, 并提出了 3 种末端执行器设计方案, 完成样机研制。

(1) 完成了基于末端工具快换的多功能在轨维护机器人系统总体设计, 所设计的多功能在轨维护机器人系统可通过三指-三瓣式末端执行器在空间机器人基座上实现“尺蠖”式行走, 从而实现重定位操作以扩大机器人工作空间。

(2) 所设计的三指-三瓣式末端执行器不仅具有信号捕获抓取功能, 还具有电力/信号传输功能以及机械动力传输功能。

(3) 所设计的钢丝绳缠绕式末

端执行器,具有较大的容差空间和软捕获性能,可实现合作目标与非合作圆柱形目标的柔顺软捕获,具备较好的空间目标兼容性。

(4)所设计的连杆耦合欠驱动末端执行器,具有待捕获目标形状自适应功能,可实现形状不规则的空间目标及太空垃圾的捕获。

参考文献

[1] ZHAI G, QIU Y, LIANG B, et al. Development of on-orbit capture technology[J]. Robot, 2008, 30(5): 467-480.
 [2] 朱仁璋,王鸿芳,泉浩芳,等.载人航天器操作器系统述评(续)[J].载人航天,

2010(1): 48-58.
 ZHU Renzhang, WANG Hongfang, QUAN Haofang, et al. Review and survey of the end-effector of space vehicles (Continued)[J]. Manned Spaceflight, 2010(1): 48-58.
 [3] KING D. Space servicing: past, present and future[C]//Proceedings of the 6th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space i-SAIRAS 2001. Quebec, 2001.
 [4] CURRIE N J, PEACOCK B. International space station robotic system operations—a human factors perspective[C]// Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting,

Washington, 2002.
 [5] AIKENHEAD B A, DANIEL R G, DAVIS F M. Canadarm and the space shuttle[J]. Journal of Vacuum Science, 1983, A1(2): 132-136.
 [6] SACHDDEV S S. Canadarma review of its flight[J]. Journal of Vacuum Science, 1986, A4(3): 268-272.
 [7] HILTZ M, RICE C, BOYLE K, et al. Canadarm: 20years of mission Success through adaptation[C]// Proceedings of the 6th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space. Quebec, 2001: 1-8.
 [8] MARCOTTE B. Canadian ISS program involvement[J]. Acta Astronautica, 2004,54: 785-786.
 [9] CARON M. On-orbit operation support from the Canadian space agency flight control room[C]// Space Ops 2008 Conference. New York, 2008.
 [10] ABRAMOVICI A. The special purpose dexterous manipulator (SPDM) systems engineering effort[J]. Journal of Reducing Space Mission Cost, 1998, 1: 177-200.
 [11] HEEMSKERK C, PETERSEN H, ARIS L, et al. ERA operations verification: results and lessons learned[C]// Proceedings of the 8th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation' ASTRA 2004' ESTEC. Noordwijk, 2004.
 [12] BOUNMANS R, HEEMSKERK C. The European robotic arm for the international

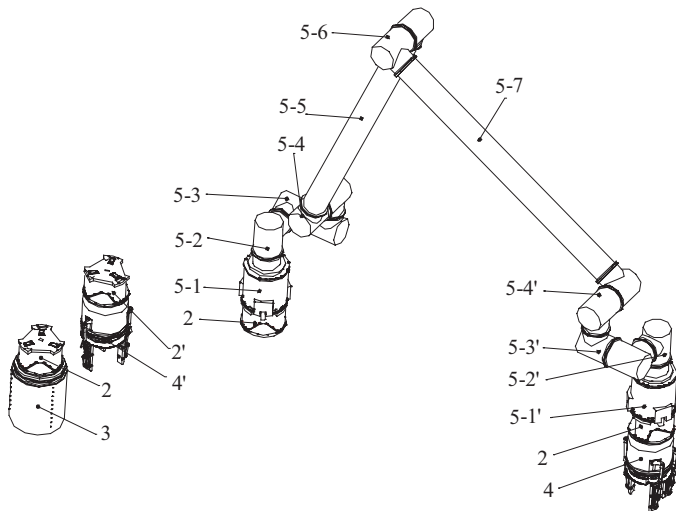
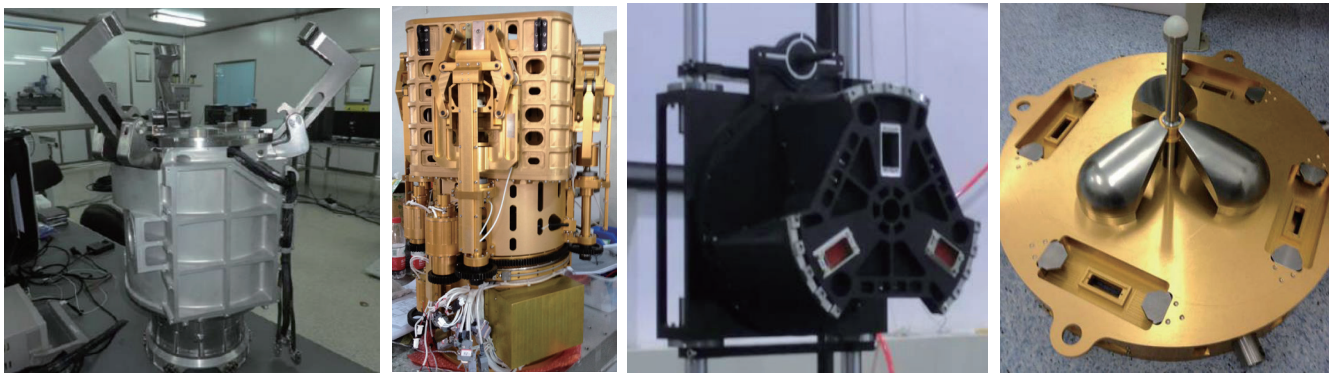


图12 连杆耦合欠驱动手爪快换方式

Fig.12 Fast-changeable mode of three-finger end-effector with underactuated linkage mechanism



(a)三指-三瓣式末端执行器样机 (b)钢丝绳缠绕式末端执行器样机 (c)三指-三瓣式末端执行器接口 (d)钢丝绳缠绕式末端执行器接口

图13 三指-三瓣式末端执行器与钢丝绳缠绕式末端执行器样机

Fig.13 Prototype of the three-finger-three-petal end-effector and steel cable-snared end-effector

space station[J]. *Robotics and Autonomous System*, 1998, 23: 17-27.

[13] HEEMSKERK C J M, VISSER M, ZOT D, et al. Demonstrating the feasibility of ERA operations from ground [C]//*Proceedings of the 9th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation ASTRA 2006*. Noordwijk, 2006.

[14] HEEMSKERK C J M, VISSER M, VRANCKEN D. Extending ERA's capabilities to capture and transport large payloads[C]//*Proceedings of the 9th ESA workshop on advanced space technologies for robotics and automation ASTRA 2006*. Noordwijk, 2006.

[15] SATO N, WAKABAYASHI Y. JEMRMS design features and topics from testing[C]//*Proceedings of the 6th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space i-SAIRAS*

2001. Quebec, 2001.

[16] OGILVIE A, ALLPORT J, HANNAH M, et al. Autonomous robotic operations for on-orbit satellite servicing[C]//*Proceedings of SPIE*, 2008, 6958: 1-12.

[17] LARYSSA P, LINDSAY E. International space station robotics: a comparative study of ERA, JEMRMS and MSS[C]//*The 7th Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics Automation-ASTRA 2002*. Noordwijk, 2002.

[18] SACHDEV S, HARVEY W. Canada and the international space station program: overview and status since IAC 2005[C]//*International Astronautical Federation-Space Station Symposium IAC-06*. Paris, 2006.

[19] MOTAGHEDI P. On-orbit performance of the orbital express capture system[C]//*Sensors & Systems for Space*

Applications II. Florida, 2008.

[20] ODA M. Ground-space bilateral teleoperation of ETS-VII robot arm by direct coupling under 7s Time delay condition[J]. *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, 2004, 20(3): 499-511.

[21] BARNHART D A, SULLIVAN B, HUNTER R, et al. Phoenix program status-2013 DARPA's phoenix project[C]//*AIAA SPACE Conference & Exposition 2013*. San Diego, 2013.

[22] HOYT R, CUSHING J, SLOSTAD J. SpiderFab™: process for on-orbit construction of kilometer scale apertures[R]. Maryland: NASA Technical Report NNX12AR13G-FINAL, 2013.

通讯作者: 丰飞, E-mail: fengtang999@163.com。

End-Effector Design of Multi-Function Space Robot for Space on-Orbit Servicing

FENG Fei^{1,2}, TANG Lina³, HAN Feng¹

(1. School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Shanghai Wingman Robotics Co., Ltd., Shanghai 200245, China;

3. Shanghai Aerospace Equipments Manufacturer Co., Ltd., Shanghai 201108, China)

[ABSTRACT] The space robot is an important tool for space on-orbit service. According to the requirement of the maintenance of the cooperative and non-cooperative targets, a multi-function on-orbit servicing robot system based on fast-changeable end-tools is proposed by investigating and analyzing the current research status of space robots, and a variety of end-effector design schemes are proposed. The three-finger-three-petal end-effector, as the quick-changing device for end-effectors and end tools, not only has the function of mechanical interface capture and docking, but also has the function of power/signal transmission and the mechanical power transmission function. The steel cable-snared end effector has superior misalignments tolerance and soft capture performance. It is suitable for capturing cooperative target with cooperative mechanical interface and non-cooperative engine nozzles of target satellite. The three-finger end-effector with underactuated mechanism has excellent capability of shape adaptation for the target and soft capture function, so it can be used to capture non-cooperative targets such as space garbage with irregular spatial shape. Through the research of the multi-function on-orbit servicing robot system and the methods of end-effector quick changing, as well as the capture principles of the end-effectors, the multi-function on-orbit servicing robot system with fast-changeable end-effector and end tool has promising application prospects.

Keywords: On-orbit servicing; On-orbit space robot; Multi-function end-effector; Three-finger-three-petal end-effector; Steel cable-snared end-effector

(责编 大漠)