

多任务在轨服务模块化智能航天器技术研究

杨自鹏, 胡声超, 周佑君, 张绪斌, 周文勇

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 首先介绍了在轨服务技术的分类及国内外近期研究进展, 结合各国已开展项目的验证情况, 分析了在轨服务模式、适应多任务在轨服务航天器的发展思路。为适应卫星发射和在轨服务的任务需要, 提出了多任务服务航天器的方案设想, 以期降低在轨服务操作的难度, 提升在轨服务系统执行多任务的能力。最后初步分析了用于演示验证任务的服务航天器总体参数及任务规划。

关键词: 在轨服务; 服务模式; 在轨服务航天器; 在轨服务系统

中图分类号: V475.4

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2019) 04-0015-06

Research on Multi-Mission Intelligent Vehicle On-Orbit Service Technology

YANG Zipeng, HU Shenchao, ZHOU Youjun, ZHANG Xubin, ZHOU Wenyong

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: This paper introduced the classification of on-orbit service technology and the research progress in China and abroad. Combined with the verification of the projects in various countries, the paper analyzed the service mode of on-orbit service and the development idea of multi-mission orbital servicing vehicle. In order to meet the mission requirements of satellite launching and on-orbit service, a scheme of multi-mission service vehicle was proposed. The goal was to reduce the difficulty of on-orbit service operation and improve the ability of service system to perform multi-tasks. Finally, the overall parameters and mission planning of the service vehicle used to demonstrate and verify the mission were preliminarily analyzed.

Key words: On-orbit service; Service mode; Orbital servicing vehicle; On-orbit system

0 引言

随着空间技术的迅速发展, 人类开发空间、利用空间的步伐越来越快, 航天系统越来越复杂, 规模也越来越大。由于航天任务高成本、高风险的特点, 一旦不能入轨或入轨后发生严重故障, 将导致巨大损失。因此, 从第一颗航天器上天起, 在轨服务技术即引起了各航天国家的重视, 开展了大量的研究和试验, 试图在空间通过人、机器

人或两者协同操作, 以延长航天器寿命, 提升执行任务能力及清除轨道垃圾等^[1-3]。在轨服务是一种效率驱动型的技术, 可以大大降低航天器的全寿命周期成本, 使得不可维护的高可靠性工业产品变成可维护的工业产品; 同时还将引起传统航天器设计理念的变化, 即航天器设计向低冗余度、低成本和高可维护性方向发展。

目前的航天器基本上都未考虑接受在轨服务的能力, 普遍采用“整体式设计、一次性使用”

收稿日期: 2018-11-05; 修订日期: 2019-02-25

基金项目: 航天系统部专用技术项目 (30506050301)

作者简介: 杨自鹏 (1987-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为航天运输系统总体设计。E-mail: 229585729@qq.com

的设计思想，从而使得飞行器接受服务存在较大难度，难以实现在轨维护的一些空间操作。未来的航天器将普遍应用接受在轨服务设计，引入标准机电热接口、模块化可更换接口、在轨加注接口、可重构智能系统等概念，其中模块化是提升航天器接受在轨服务能力的有效手段^[4]。模块化技术这一工业界所普遍采用的“化繁为简、聚零为整”的技术^[5]，目前广泛应用于汽车、计算机等工业领域，它的核心思想是将庞大系统分解为复杂程度较低的子系统进行设计、生产，再将各子系统集成为完整系统。本文开展了航天器在轨服务模式分析及发展思考，在提出多任务智能航天器方案构想的基础上，进一步分析了演示验证在轨服务航天器的总体参数，并初步规划了飞行任务剖面，以先期验证在轨服务航天器执行多任务的能力。

1 在轨服务技术概述

1.1 在轨服务技术分类

为了保证航天器在空间环境中高质量地在轨运行，“在轨服务”概念应运而生。航天器在轨服务是指在太空通过人、机器人（或类机器人卫星）或两者协同来完成涉及延长卫星、空间平台、空间站附属舱和空间运载器等航天器寿命，提升其执行任务能力的一类空间操作。主要包括在轨装配、在轨维护和后勤支持3类，内容涵盖轨道转移、在轨组装、空间碎片清理等广阔领域（见图1）。

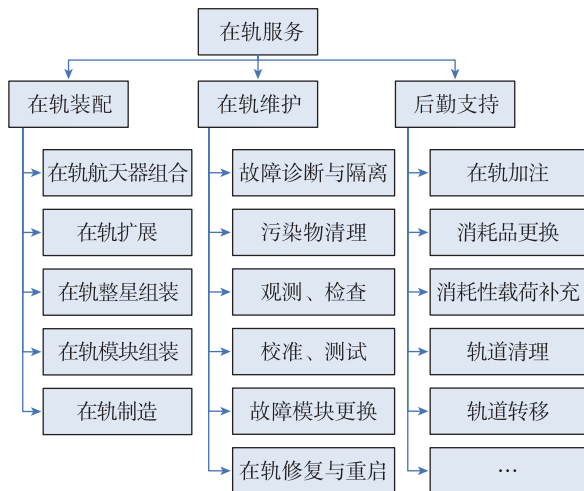


图1 在轨服务任务分类示意图

Fig. 1 The diagram of on-orbit service classification

1.2 国内外近期研究进展

自1973年人类历史上第一次出舱对太阳能电池翼和舱外热控进行修复以来，在轨服务技术已经历了40多年的发展。美国国家航空航天局（NASA）是开展在轨服务技术验证的先行者^[6]，俄罗斯、欧空局（ESA）、加拿大、德国、日本等先后开展了自主交会对接、自主捕获、在轨加注、在轨维修、在轨模块更换、辅助入离轨和碎片清理等相关内容的在轨服务计划，并完成了多方面的试验验证。美国DARPA开展的轨道快车（Orbital Express）计划，完成了航天器与卫星的自主交会和对接工作^[7]；日本JAXA的工程技术试验卫星ETS-VII验证了空间机器人在轨抓捕技术，利用机器人手臂进行配件更换、燃料补给、桁架结构和试验天线在轨组装等任务^[8]；德国宇航中心DLR、加拿大航天局CSA、俄罗斯航天局RKA合作的太空系统演示验证技术卫星TECSAS，用于验证空间机器人的GEO目标追踪、接近和交会、抓捕、稳定等在轨服务技术^[9]，于2006年9月停止，转而启动德国在轨服务任务DEOS项目。在轨服务技术将成为航天技术发展的重要方向，下面介绍几个近期在轨道运输、在轨组装或制造、在轨维修或升级等方面的典型项目。

1.2.1 无人延寿飞行器（MEV）

“无人延寿飞行器”（MEV）是地球静止轨道卫星延寿项目（见图2），采用Orbital ATK公司的GEOSTAR3平台与“天鹅座”（Cygnus）交会对接技术。MEV的设计寿命是15~20年，将执行3~4次任务^[10]，在MEV飞行器与地球静止轨道（GEO）目标卫星交会对接形成刚性连接的组合体后，为目标卫星提供1~5年延寿任务，同时还可以执行辅助离轨任务。

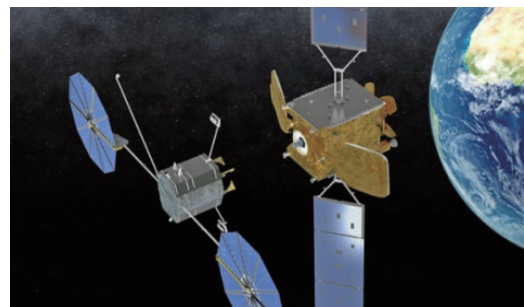


图2 MEV在轨服务

Fig. 2 MEV on-orbit service

1.2.2 “蜻蜓” (Dragonfly)

“蜻蜓”是“凤凰”计划在 2015 年的衍生工程项目之一，归属 NASA “新兴空间能力转折点”系列专题^[10]，计划 2020 年后实现在轨演示验证。该项目旨在克服发射限制，将封装发射的标准组件在轨组装与重构大型固体射频反射器，演示在轨自主装配天线，提高卫星固体发射器的数量和尺寸，改变现有卫星的装配模式（见图 3）。目前“蜻蜓”项目处于地面演示及关键设计阶段，尚无技术细节可查。



图 3 “蜻蜓”在轨自主装配天线

Fig. 3 Dragonfly on-orbit independently assembled the antenna

1.2.3 “建筑师” (Archinaut)

2015 年年底，NASA 资助商业公司发展“多功能空间机器人精密制造与装配系统”，又名“建筑师”技术平台，可在轨自主制造并组装航天器系统^[10]，从根本上改变航天器制造的方法，打破发射限制，降低成本与风险。“建筑师”计划安装在空间站舱外，利用已验证的 3D 打印技术进行在轨增材制造、通信卫星反射器制造与装配或在轨机械维修等（见图 4）。

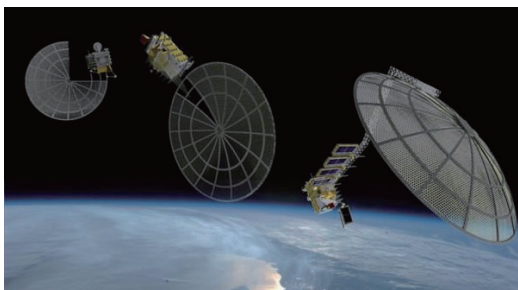


图 4 “建筑师”在轨制造、组装

Fig. 4 Archinaut on-orbit manufactured and assembled components

1.2.4 “地球同步轨道卫星自主服务” (RSGS)

2015 年，“地球同步轨道卫星自主服务”

(RSGS) 作为“凤凰”的衍生项目（见图 5）^[10]，以实现 GEO 卫星的自主在轨检查、维修、重定位和升级等多项在轨服务能力。该项目计划在 2021 年发射，在轨完成 6~9 个月演示任务后，再开展为商业和客户卫星提供有偿的在轨服务。

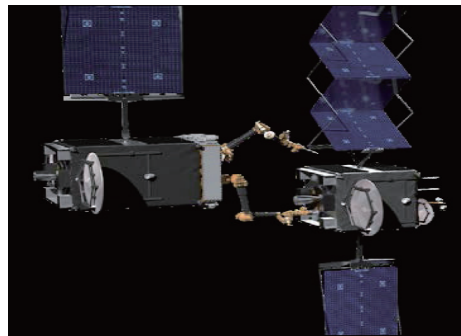


图 5 RSGS 概念图

Fig. 5 The concept diagram of RSGS

我国在航天器在轨服务技术的研究处于起步阶段，但发展迅速。天宫飞行器与神舟飞船开展了交会对接、在轨维修、故障诊断等技术试验；“遨龙一号”空间碎片主动清除器，旨在验证机械臂抓取废弃卫星和空间碎片并将其抛入大气层烧毁；“天源一号”在轨加注卫星，开展了基于表面张力贮箱的在轨加注试验，验证了微重力循环加注流体管理、加注燃料贮箱等多项太空燃料补充加注技术。上述在轨服务项目的开展，标志着我国已具有构建面向在轨服务的航天技术，为推动轨道运输、在轨组装、在轨加注及空间碎片清除等空间在轨服务技术的发展迈出了坚实有力的一步。

2 在轨服务模式

航天器的发展在不同时期设计理念及思路不同，其可接受在轨服务的方式及程度不同。从在轨服务的实现方式上来说，航天器在轨服务主要包括有人在轨服务和自主在轨服务两类^[2]。由于自主在轨服务代表未来的发展方向，本文仅对自主在轨服务航天器的在轨服务模式进行分析。

2.1 非合作式服务接口

早期研制的航天器根据任务需求进行整体设计、生产和组装，一般没有在轨服务接口，一旦入轨则接受在轨服务难度较大，往往某一部件或分系统损坏就会导致整个航天器报废。

在轨服务航天器需为目标对象量身定制专门的机械对接接口（包带或其他可夹持接口），便于

在轨完成交会对接组成刚性组合体。针对此类航天器,服务模式大致分为以下几种:

1) 若未进入预定轨道或出现严重故障报废,提供轨道转移服务,辅助其进入预定轨道或离轨服务;

2) 若仅燃料即将耗尽,提供动力模块,延长航天器在轨运行姿态维持;

3) 若仅天线、相机等载荷出现故障,提供载荷模块,弥补原航天器的功能缺失。

2.2 合作式服务接口

近年来,随着空间交会对接、空间机器人等技术的进步,自主在轨服务逐渐在航天活动中进行验证。自主在轨服务技术的实施预期可降低任务成本,但是对目标航天器的可服务性也提出了较高的要求。

在轨服务航天器与此类航天器根据接受在轨服务特点约定着不同的接口,包括机械对接接口(包带接口或其他形式交会对接接口)、电气接口、在轨加注接口等。针对此类航天器,在上述服务模式基础上,还包括以下几种:

1) 若仅燃料即将耗尽,提供在轨加注,延寿服务;

2) 若仅天线、相机等载荷出现故障,提供在轨维修、升级或模块更换,功能恢复或提升服务;

3) 针对限于运载器规模需在轨组装的航天器,提供在轨组装服务;

4) 针对降低微小卫星进入中高轨门槛,提升微小卫星快速组网能力,提供“Wifi”在轨服务平台,为其提供通信中继等服务。

在轨服务航天器的辅助入轨、延寿或功能修复等功能具有显著的经济价值,离轨服务提升了对有限的空间轨道资源的利用率,辅助离轨技术的应用减少了由于航天器解体导致大量空间碎片对其他航天器的威胁。

3 在轨服务发展思考

世界各航天强国及组织均在在轨服务技术领域开展了大量研究,已有多个项目完成了在轨飞行演示验证。分析各国发展现状可知:

1) 地球静止轨道是一条轨道资源极其珍贵的独特轨道,高轨卫星价值也非常高,因此高价值的高轨资源直接决定了 GEO 卫星作为在轨服务的优先对象。

2) 部分项目已完成在轨验证,其中低轨居多,高轨较少。

3) 接管延寿是在轨服务的基础,已呈商业化之势,在轨加注、模块更换、在轨维修等拓展功能也正在发展中。

据统计,2016—2017年国际宇航发射任务共计176次,其中直接入轨发射的空间运输共计35次,占全部宇航发射任务的20%。结合目前商业航天发展迅猛的态势,未来卫星、探测器等载荷对直接入轨、星座组网、各种空间科学试验等需求将呈高速增长的趋势,因此具备多星部署能力的运载器在多星发射方面将具有巨大的市场需求。

结合世界各航天强国在在轨服务技术领域的进展与多星发射的高速增长趋势,多任务在轨服务航天器可采取以下发展思路:

第一步,以“姿轨控功能正常、燃料即将耗尽的客户星”为服务目标,研制具备将有效载荷送入预定轨道,与合作目标自主交会对接,提供长寿命高可靠姿轨控能力的多任务在轨服务航天器,完成飞行演示验证;

第二步,利用航天器轨道机动能力,通过交会对接测量设备,对准(非)合作目标进行交会、逼近、对接等拓展任务,进一步验证对准(非)合作目标在轨服务可行性;

第三步,以多任务在轨服务航天器平台为基础,进一步发展在轨加注、在轨维修、在轨组装技术,研制之初与在轨服务对象共同约定在轨服务的机、电、热、气液等接口,进行即插即用的模块化设计,同时发展空间灵巧机械臂技术,研制系列化服务飞行器,通过平台或灵巧机械臂提供模块更换、升级、故障诊断与处理等多样化在轨服务。

按照发展思路,先期发展多任务在轨服务航天器,提供多星发射、姿轨控制、辅助入轨或离轨服务,后续拓展在轨加注、模块更换、垃圾清理等业务(见图6)。

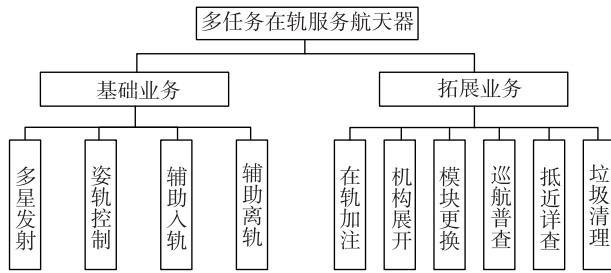


图 6 接管控制服务飞行器业务内容

Fig. 6 Service business of on-orbit service vehicle

4 多任务航天器方案构想

多任务在轨服务模块化智能航天器是一种兼具多星发射、轨道转移和自主为目标航天器提供在轨服务（姿态控制、入轨/离轨、载荷服务等）的多用途航天器。

在轨服务航天器以在轨服务 GEO 卫星为目标，宏观上由轨道转移动力舱、平台舱、在轨服务舱（载荷模块、动力模块）等部段组成。多个舱段均采用正八棱柱外形的模块化设计思路，各模块采用纵向串联层叠式连接，各功能舱段被分解、封装成独立的功能模块，每个模块物理独立、功能独立，通过舱段分界面的公口和母口相互耦合实现机械、电气、热控和数据接口连接。与在轨服务对象约定机、电、热、气液等在轨服务接口（一般按服务飞行器为公口、服务对象为母口进行接口约定）。多任务在轨服务航天器根据任务规划，在先期完成服务舱在轨使命后，与平台舱分离，继续发挥平台的多任务优势。平台舱及服务舱功能如下：

1) 平台舱在模块化设计的基础上引入模块化即插即用的思想，其不同功能单元具备自适应连接的能力，使得平台舱易于通过空间机械臂进行自主在轨服务操作，具备实施和接受在轨服务的能力。

2) 服务舱根据目标星在轨服务需求进行定制，可以是具备独立的在轨服务姿态控制系统的动力模块，或是提供通信或功能修复服务的即插即用载荷模块等。

多任务在轨服务航天器演示验证任务以在研的大中型运载火箭运载能力为研制背景，航天器及载荷组合体质量不大于 7t，能够适应火箭整流罩 $\Phi 4\ 200\ \text{mm}$ 包络要求，其中载荷（含合作目标、

搭载载荷及任务拓展载荷等）运载能力约为 2t，具备与合作目标或准合作目标（已知位置、姿态，无合作标志器）交会能力，对卫星完好抓捕对接能力，提供姿轨控服务及辅助离轨的能力等。对在轨服务航天器进行总体参数预分解及推进剂初步分析，结果见表 1。

表 1 主要总体参数

Tab. 1 Main overall parameters

项目	参数
组合体质量/kg	7000
有效载荷质量/kg	2000
结构质量/kg	1300
推进剂加注量/kg	3700
轨道转移推进剂消耗/kg	2950
试验可用推进剂量/kg	580
推进剂安全余量及不可用量/kg	170
平台包络直径/mm	3700
最大高度/mm	7100

多任务在轨服务航天器从与火箭分离开始，自主任务规划完成 5 项演示验证工作，总体任务规划见图 7，依次完成轨道转移、多星发射、合作目标的演示验证、拓展卫星发射、准合作目标的拓展验证等任务。

(1) 多星发射任务

多任务在轨服务航天器具备多个卫星搭载发射的能力，在目标轨道进行多载荷的轨道部署。

(2) 演示验证任务

多星发射完成后，离轨机动进入试验轨道，分离轨道转移舱。将所搭载的合作目标进行释放，分离一段时间后轨道机动，进行与合作目标的交会对接、抓捕固连，演示在轨提供姿态控制、机械臂操作等，最后完成合作目标的分离及入轨。

(3) 拓展任务

演示验证任务完成后，轨道机动，向准（非）合作目标近距离交会及逼近，拓展完成与准合作目标的交会对接、抓捕固连，根据准（非）合作目标在轨运行需要，提供轨道调整、姿态控制等在轨服务。完成拓展任务后，多任务在轨服务航天器依据地面指令变轨到工作轨道，利用自身配置的载荷作为中继平台提供通信中继等后续服务。

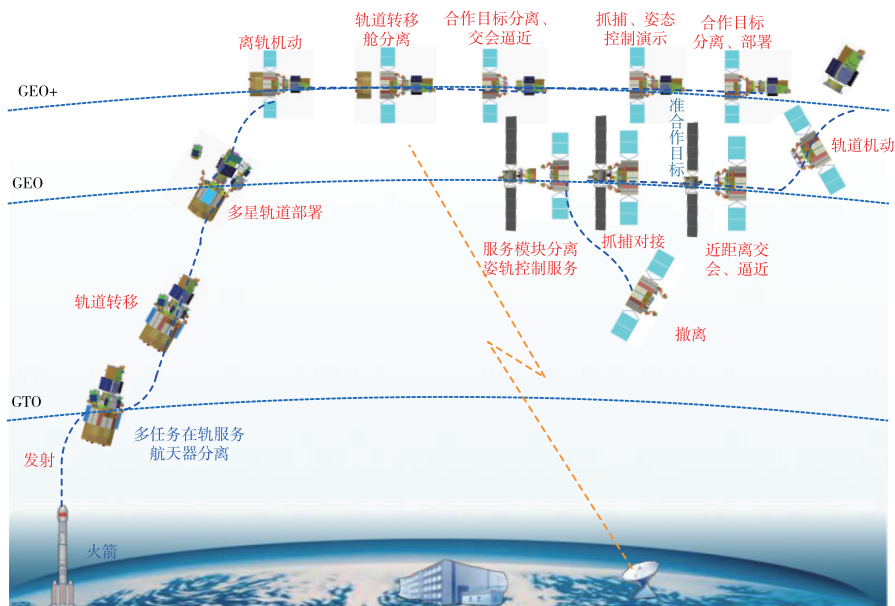


图7 总体任务规划

Fig. 7 Overall mission planning

5 结论

本文根据国内外近期研究进展情况,分析了在轨服务航天器的服务模式;结合目前在轨服务技术的发展与商业航天对进入空间需求呈高速增长趋势,分析了多任务在轨服务航天器的发展思路。最后给出了兼具多星发射和在轨服务的多用途智能航天器的方案设想,以期降低在轨服务的难度,提升卫星发射或在轨维护的经济性,并初步分析了演示验证任务服务航天器的总体参数及任务规划。

参考文献

- [1] Tatsch A, Fitz-Coy N, Gladun S. On-orbit servicing: A brief survey [C]. Proceedings of the 2006 Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop, 2006: 276-281.
- [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.
- [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] Reynerson C M. Spacecraft modular architecture design for on-orbit servicing [C]. IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2000.
- [5] 贾延林. 模块化设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [6] 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 [J]. 中国科学, 2018 (2): 185-199.
- [7] Friend R B. Orbital express program summary and mission overview [C]. Sensors and Systems for Space Applications II, International Society for Optics and Photonics, 2008: 695803.
- [8] Oda M, Kibe K, Yamagata F. ETS-VII, space robot in-orbit experiment satellite [C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1996.
- [9] Sommer B. Automation and Robotics in the German Space Program-Unmanned on-orbit servicing (OOS) & the TECSAS mission [C]. 55th International Astronautical Congress, 2004.
- [10] 王雪瑶. 国外在轨服务系统最新发展 [J]. 国际太空, 2017 (10): 26-29.

引用格式: 杨自鹏, 胡声超, 周佑君, 等. 多任务在轨服务模块化智能航天器技术研究 [J]. 宇航总体技术, 2019, 3 (4): 15-20.

Citation: Yang Z P, Hu S C, Zhou Y J, et al. Research on multi-mission intelligent vehicle on-orbit service technology [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2019, 3 (4): 15-20.