

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.04.001

在轨服务飞行器总体技术分析

李岩¹, 蔡远文², 崔晓阳³

(1. 装备指挥技术学院 航天装备系, 北京 101416; 2. 装备指挥技术学院 试验指挥系, 北京 101416;
3. 装备指挥技术学院 研究生院, 北京 101416)

摘要: 在轨服务飞行器 (on-orbit service vehicle, OSV) 因功能多样、结构复杂、种类繁多而难以进行总体设计, 为此, 对其进行深入的技术分析。从服务需求和任务过程的要求出发, 分析 OSV 的主要功能需求, 提出需要突破的关键技术; 按照各分系统的不同功能, 将 OSV 分为平台和载荷 2 部分进行组成结构分析; 按照 OSV 功能多样化程度以及服务任务周期的特点, 对 OSV 进行分类研究。该研究可为 OSV 的整体规划与总体设计提供技术支持。

关键词: 在轨服务飞行器; 功能需求; 载荷; 机械臂

中图分类号: V423.9 **文献标志码:** A

General Technology Analysis of On-Orbit Service Vehicle

Li Yan¹, Cai Yuanwen², Cui Xiaoyang³

(1. Dept. of Aerospace Equipment, Institute of Command & Technology of Equipment, Beijing 101416, China;
2. Dept. of Test Command, Institute of Command & Technology of Equipment, Beijing 101416, China;
3. College of Graduate, Institute of Command & Technology of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: It is difficult to carry out the overall design for on-orbit service vehicle (OSV) because of its multiple functions, complex structure and various categories. To solve the problem, the depth technical analysis should be carried out. According to the demand of servicing mission procedure, the main function of OSV is analyzed, and the key technology needing breakthrough is put forward. Based on the different function of subsystems, the structure of OSV is analyzed, which is divided into two parts: platform and load. The OSV classification is investigated according to the diversification and mission period characteristic. The function demand, key technology, component structure and classification of the OSV derived from this article provide necessary technical support, and point out a proper direction for the macro plan and gross design of the OSV system.

Keywords: on-orbit service vehicle; function demand; load; manipulator

0 引言

在轨服务飞行器 (on-orbit service vehicle, OSV) 是一种新概念的智能航天器, 专用于对服务对象实施在轨服务, 是自主式在轨服务系统的核心^[1]。在轨服务任务需求多样、过程复杂。为了自主完成服务任务, OSV 需要满足各种功能需求、突破多种关键技术, 因而其结构相当复杂、类型多种多样, 为其技术分析和总体设计带来了一定困难。笔者针对上述难题, 对在轨服务飞行器的功能需求、关键技术、基本结构和主要类型等方面进行深入分析。

1 OSV 的功能需求

OSV 是自主式在轨服务系统的核心。在轨服务任务的完成很大程度上依赖于 OSV 服务功能(或能力)的实现。服务对象的各种需求和服务任务的执行过程对 OSV 的功能提出了苛刻的要求。除一般在轨系统必备的功能(如: 温度自动控制功能、防护功能、信息传输功能、三轴稳定功能等等)外, OSV

需要具备以下特殊功能(或能力)^[2-4]:

1) 空间目标跟踪、探测与识别

能够对服务对象进行识别、跟踪和测量是在轨服务的前提之一, 通过在一定范围内对服务对象进行搜索、捕获、跟踪、测量, 为实现对目标的接近、伴飞或交会对接等操作提供必要条件。OSV 需要具备微波、红外、可见光、激光的探测和测量功能, 具备多传感器信息融合与处理能力等。

2) 轨道机动

主要指 OSV 在轨机动至服务对象所在轨道, 为在轨服务操作提供基本条件。主要包括: 轨道机动规划能力、轨道机动动力学计算, 机动过程中的制导、导航与控制, 组合体轨道机动与动力学计算, 先进的推进系统等。

3) 交会对接与绕飞、伴飞

空间交会对接与绕飞、伴飞是在轨服务的先决条件之一。只有通过交会对接, 才能对服务对象实施补给、设备更新、维修等操作; 通过绕飞或伴飞,

收稿日期: 2010-11-26; 修回日期: 2010-12-27

作者简介: 李岩(1981—), 男, 河南人, 博士, 讲师, 从事兵器发射理论与技术研究。

才能完成检测、成像观察等相关任务。交会对接功能的实现除了需要具备灵活的交会对接机械装置外,还需要许多技术支持,主要包括:自主交会策略及轨迹规划、交会对接测量、姿态测量与跟踪、视线制导和精细控制等。

4) 智能自主运行管理

要提高在轨服务系统的智能化水平,智能自主运行与管理是必须具备的功能。主要包括:OSV 自主任务规划与管理、OSV 自主决策、OSV 自主导航、航天器整体信息综合、航天器信息收集与处理、航天器实时状态监测以及航天器自主健康管理等。

5) 具备可灵活操控的机械臂

在轨服务很多工作需要机械臂的直接参与,所以 OSV 必须具备可灵活控制的星载机械臂。这就要求 OSV 具备变质心、变构型动力学控制功能、机械臂运动规划和协调控制功能等。

6) 适合遥操作

遥操作将人工智能引入在轨服务任务,以便能更灵活地操控机械臂等执行部件。需要 OSV 适合于大时延遥操作、有效测控时间内和有限通信带宽下的遥操作,能够对力、位进行精细感知。

7) 其它功能要求

OSV 需要有足够的空间用于存储补给品和可更换单元(ORU);为实现流体补给,OSV 需要具备较通用的流体管路接口以适应多种服务对象的需求;而在轨更换或装配操作,则需要 OSV 存储空间设计能配合机械臂对 ORU 的存取;OSV 能够接受自身消耗品的在轨补给,如推进系统燃料和气瓶气体的在轨补给等。

2 OSV 的关键技术

作为新概念的航天器系统,要实现 OSV 的设计、制造和在轨自主运行需要突破许多关键技术,包括轨道机动交会、自主运行管理等支撑技术,也包括在轨加注、在轨更换模块等具体服务操作技术^[5-10]。限于篇幅,笔者仅概述以下关键技术:

1) 全自主控制、导航技术

为满足卫星高精度导航的需求,美国、俄罗斯、法国等近期都研究和建立了基于无线电测距方法的卫星自主导航系统,其导航精度均达到几米的量级。其中,美国的麦氏自主导航系统利用传感器获得的地球、太阳、月球在轨测量数据,实时确定航天器的轨道,同时确定航天器的三轴姿态,是完全意义上的自主系统。美法等国的星光折射法自主导航研

究,利用星敏感器测量恒星星光在通过地球边缘大气层时所发生的折射间接得到地平的信息,由此确定卫星的轨道。俄罗斯还研制了基于雷达高度计的自主导航系统。此外,美国等还研究了基于地磁场测量的自主导航系统。

2) 自主交会对接技术

从技术发展角度看,交会对接(rendezvous and docking, RVD)技术将逐步向自主交会对接方向发展。所谓自主交会对接就是在无地面测控站的参与下,靠航天器本身的测控系统完成交会对接任务。其关键技术主要指交会对接过程的自主测量和控制技术。自主测量技术的研究主要以自动跟踪系统的设计以及测量系统的无盲区和抗干扰设计为主要方向。自主控制技术的研究主要考虑在控制系统中加入“智能”,把人的经验、规则融入到交会对接控制系统当中。常用的智能控制有:PID 控制、全系数自适应控制和模糊控制。

3) 微重力条件下的流体管理技术

流体管理主要指流体的传输和存储。传输技术包括流体泵设计、流体耦合(coupling)、容器和流量传感器技术;存储技术则要求解决流体抗老化、抗辐射、抗低温和抗毁伤能力,同时注意污染最小化设计。

4) 低能耗推进技术

采用传统化学推进剂的飞行器,为了维持其在空间的飞行状态,必须携带大量燃料以及氧化剂,其质量占了很大比例,燃料利用率不高,限制有效载荷的扩展空间。离子推进技术是低能耗推进技术的主要研究方向。离子推进发动机的燃料利用效率是传统化学燃料发动机的 10 倍,是目前燃料利用效率最高的发动机。

5) 空间机器人技术

在研究 OSV 机械臂系统运动策略时,可以将 OSV 等效为空间机器人系统。NASA 的 AERCam(自主舱外机器人照相机)在这方向上迈进了一步。欧洲航天局也尝试过在一个大型飞船上安装一个机器人操作器。日本发射的 ETS(工程测试卫星) VII 也已经论证了许多有关在轨服务空间机器人的基础技术^[9]。空间机器人技术研究的主要方向包括:传感器数据处理和数据融合技术、灵活的姿态监测和控制、集成的实时系统控制、高级人机接口(虚拟现实和远程可视技术)、制动器、控制器和传感器系统、空间环境智能评估以及集成数据库系统等。

6) ORU 相关技术

ORU 设计需要进行模块和接口的标准化和通用化设计, 同时还要求 ORU 的存储容器方便开闭, 以便 OSV 的机械臂对其进行存取和安装。根据人工在轨服务的成功经验, ORU 单元可以包括照相机、太阳帆板、磁力计、计算机、传感器、陀螺仪、固体存储器、反作用轮装置、绝缘材料和制冷系统等^[10], 需要对相关单元进行在轨可更换改造。

3 OSV 的组成结构

OSV 是一种新概念的航天器, 它既具备一般航天器必须的各种分系统, 又有适合于执行在轨服务操作的特殊装备(如图 1)。与一般航天器系统相比, OSV 的显著特点是载荷设备更多样, 功能更复杂, 智能化水平更高, 机动性更好。按照各分系统的功能不同, OSV 的组成为平台和载荷 2 部分^[11]。

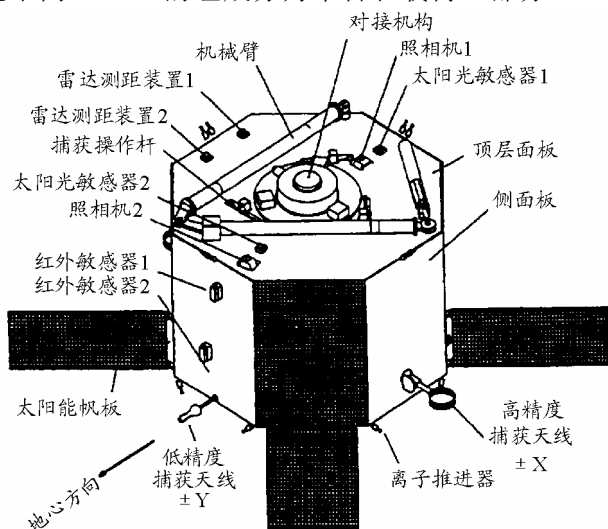


图 1 在轨服务飞行器的基本构型和部分装备

平台主要包括为载荷提供支持的保障分系统, 为 OSV 提供能源、温控和通信保障等。平台主要由结构与机构、热控、电源、姿态与轨道控制、推进、测控、数据管理、总体电路等分系统组成。

1) 结构与机构分系统用于支撑、固定 OSV 上各种仪器设备, 传递和承受载荷, 并能保持飞行器完整性。OSV 结构可采用分舱段设计, 如载荷舱、推进舱、补给品储备仓等, 也可采用模块化设计。

2) 热控分系统用于控制 OSV 内外热交换过程, 使平衡温度处于要求范围内, 也可称为温度控制分系统。

3) 电源分系统用于产生、存储、变换电能。OSV 可采用太阳能电池和蓄电池联合供电系统。

4) 姿态与轨道控制分系统是姿态控制系统和

轨道控制系统的总称, 可简称为姿轨控分系统或控制系统。OSV 的控制系统具有制导、导航、控制的功能, 又可称之为制导、导航和控制系统 (guidance, navigation and control system, 简称 GNC 系统)。

5) 推进分系统是为姿态控制和轨道控制提供动力的分系统。目前, 在空间得到应用的航天器推进系统有冷气推进、固体推进、液体推进和电推进。新型的推进系统有太阳帆推进、离子推进、核推进和激光推进等, 都处于研究或设想阶段。

6) 测控分系统是遥测、遥控和跟踪测轨分系统的总称。遥测系统用于采集 OSV 各种仪器设备的工作参数, 实时或延时发送给地面测控站, 实现地面对 OSV 的监视。遥控分系统用于接收地面遥控指令, 直接或通过数据管理分系统传送给 OSV 设备并执行, 实现地面对 OSV 的控制。跟踪测轨分系统用于协同地面测控站, 测定 OSV 运行的轨道参数, 保持地面对 OSV 的联系与控制。

7) 数据管理分系统用于储存各种程序, 采集、处理数据以及协调管理 OSV 各分系统工作。

8) 总体电路分系统用于 OSV 的供电、信号转接、火工装置管理和设备间电路连接。

载荷包括用于执行在轨服务操作的各种设备, 如可灵活操控的机械臂、远程观测设备、测距设备、服务对象所需的补给品和 ORU 等, 可分为空间目标识别和探测分系统、对接机构分系统、机械臂及其控制分系统、补给品及其存储管理分系统等。

1) 空间目标识别和探测分系统用于在一定范围内对服务对象进行搜索、捕获、跟踪、测量, 为实现其它服务操作提供前提。

2) 对接机构分系统用于实现 OSV 与服务对象的连接和分离操作。大部分服务任务都需要用到对接机构来实现 OSV 与目标间的刚性或柔性连接。对接机构一般包括传动缓冲、捕获、连接密封、结构与附件以及控制等子系统。

3) 机械臂/手及其控制系统用于完成复杂的在轨服务操作, 如: 在轨装配、在轨维修、在轨模块更换等。OSV 是机器人技术与航天器技术相结合的产物, 机械臂/手的使用是 OSV 区别于其它航天器的明显特征。

4) 补给品及其储存管理分系统用于储存和管理燃料和 ORU 等补给品, 精确记录补给品的用量、库存量, 配合其它系统完成在轨加注和在轨模块更换任务。

4 OSV 的分类

在轨服务飞行器的功能需求多种多样，按照 OSV 功能多样化程度不同，可分为单一功能 OSV 和多功能 OSV。单一功能的 OSV 针对单一的服务类型或服务需求进行设计，完成单一的服务任务，如专门用于延长轨道寿命的 CX-OLEV^[12]飞行器。这类 OSV 的结构简单，功能单一，是在轨服务系统在试验阶段和应用初期普遍采用的设计。多功能 OSV 与单一功能 OSV 相比，能完成更多的服务任务。这类 OSV 结构更加复杂，功能更加多样，实用性更强，可以在系统实际运作阶段广泛应用。各国进行 OSV 的研究和试验过程中往往侧重于这种多功能的设计，如 Orbital Express^[13-15]和 TECSAS^[16-19]等研究计划。

根据在轨服务飞行器任务周期特点，可将 OSV 分为单任务型 (single-mission) OSV 和多任务型 (multi-mission) OSV。

1) 单任务型 OSV

单任务型 OSV 是指通过一次发射入轨，仅能完成一次服务任务的 OSV，包括一次性 OSV 和可重复使用 OSV。

一次性 OSV，完成任务后根据实际情况进行返回、降级或遗弃处理，其任务周期描述为：发射—待机轨道—机动至服务对象并进行服务—返回、降级或遗弃。

可重复使用 OSV 与一般可重复使用的航天器（如航天飞机）一样，经过一次发射入轨完成一次服务任务后，可返回地面进行补给和维护，然后再

次从地面发射完成下次在轨服务任务，如此往复，可完成多次任务。其单次任务周期可描述为：发射—待机轨道—机动至服务对象并进行服务—返回地面维护（等待下次发射）。

2) 多任务型 OSV

多任务型 OSV 通过一次发射入轨完成多次在轨服务任务。这种类型的 OSV 完成多种任务的方式分为 2 种，为便于论述，笔者分别称之为 MA 型 OSV 和 MB 型 OSV。

MA 型 OSV 通过自身一次性携带较多的推进剂和补给品，以满足多次服务任务的需求，其第一次任务周期描述为：发射—待机轨道—机动至服务对象并进行服务—返回待机轨道待命（等待下次任务指令）。

MB 型 OSV 需要有相应的在轨存储仓库或在轨服务站与之相配合完成服务任务。当接到服务任务指令后，OSV 根据任务需求机动至在轨存储仓库或服务站获取服务所需推进剂和补给品，然后再机动至服务对象进行服务操作，最后返回至待机轨道等待下次服务任务指令。在轨待命时间较长时，为了维护自身待命轨道保持的需求，OSV 可进行自主维护和补给。显然，这类 OSV 与其它类型 OSV 相比具有较高的机动性和智能化水平，是在轨服务飞行器未来的发展方向。MB 型 OSV 的第一次任务周期可描述为：发射—在待机轨道待命—机动至在轨仓库或服务站获取服务所需补给品—机动至服务对象并进行服务—返回待机轨道待命（等待下次任务指令）。

表 1 OSV 分类及特点对比

项目	OSV 分类			
	单任务型		多任务型	
	一次性 OSV	可重复使用型 OSV	MA 型 OSV	MB 型 OSV
任务过程描述	发射 → 待机轨道 → 机动至服务对象并进行服务 → 回收、降级或遗弃	发射 → 待机轨道 → 机动至服务对象并进行服务 → 返回地面维护（等待下次发射）	发射 → 待机轨道 → 机动至服务对象并进行服务 → 返回待机轨道待命（等待下次任务指令）	发射 → 在待机轨道待命 → 机动至在轨仓库或服务站获取服务所需补给品 → 机动至服务对象并进行服务 → 返回待机轨道待命（等待下次任务指令）
待命方式	地面待命，随用随发（地基）	地面待命，随用随发（地基）	在待机轨道待命（天基）	在待机轨道待命（天基）
OSV 补给类型	无补给	地面补给	无补给	在轨补给
能否返回地面维护后再用	否	是	否	否
优势	成本低，推进剂消耗低，服务任务过程简单，可有针对性地选择单一功能 OSV。	可重复使用，节约资源。	机动性和智能化水平高。在轨待命，应急性好。	机动灵活，智能化水平高，任务灵活性高，应急性好，OSV 无需大的存储空间，结构轻便，可自维护，方便多机组网。
不足	任务周期较长，智能化水平不高，机动性较低。	任务周期较长，需要额外设计返回再入装置。	推进剂消耗大，需要大的空间储备多任务所需消耗品。体积质量较大。	对机动性要求高，需要较复杂的配套在轨设施，操作复杂。
适用情况	多用于试验和技术验证阶段。	实际应用初期，需求间隔时间较长的情况。	任务间隔时间较短且任务次数较少的情况。	适用于各种任务需求，是实用系统的未来发展方向。

(下转第 7 页)

3 结束语

该模型考虑了各维修工艺间先后次序及任一维修工艺阶段的资源约束等条件,对车辆装备维修调度计划的科学制定、车辆装备维修信息化建设等具有积极意义。

参考文献:

- [1] 曹继平, 宋建社, 王正元, 等. 战时装备维修保障资源优化调度方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(6): 915-919.

(上接第4页)

表1中分析了各种类型OSV的特点和适用情况。OSV的分类并无明显界限,随着科技的发展,具备多种类型优点的综合型OSV也将成为在轨服务系统的发展选择。

5 结束语

该研究可为飞行器的总体设计理顺思路,提供支持。在后续工作中,可根据笔者提出的思路和分类方法,对OSV的功能实现、关键技术以及服务策略进行深入研究。

参考文献:

- [1] 李岩, 程龙. 构建空间在轨维护与服务系统的初步设想[J]. 导弹与航天运载技术, 2008, 29(7): 31-34.
- [2] 胡鹏翔, 郑钢铁, 等. 在轨服务技术的发展概论[C]//863-7领域空间在轨服务技术研讨会文集. 北京: 国家高技术863-7领域办公室, 2007: 9-16.
- [3] 刘永健, 谭春林, 等. 在轨服务体系研究[C]//863-7领域空间在轨服务技术研讨会文集. 北京: 国家高技术863-7领域办公室, 2007: 1-8.
- [4] 陈小前, 袁建平, 等. 航天器在轨服务技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009: 115.
- [5] 崔乃刚. 空间自主在轨服务飞行器自主规划与运行管理系统研究[C]//863-7领域空间在轨服务技术研讨会文集. 北京: 国家高技术863-7领域办公室, 2007: 186-192.
- [6] 肖刚. 基于多平台多源信息时空配准的空间目标形态测量与融合识别研究[C]//863-7领域空间在轨服务技术研讨会文集. 北京: 国家高技术863-7领域办公室, 2007: 372-381.
- [7] 李元祥. 空间非合作目标探测、跟踪与识别技术[C]//863-7领域空间在轨服务技术研讨会文集. 北京: 国家高技术863-7领域办公室, 2007: 382-389.
- [8] 孙富春. 天基空间目标监视与识别发展现状及趋势

- [2] 曹继平, 宋建社, 郭军, 等. 一种战时装备维修保障资源优化调度算法[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(15): 3390-3394.
- [3] 曲长征, 吴向东, 陈乐, 等. 维修机构性能评价参数体系[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(1): 4-5.
- [4] 朱昱, 宋建社, 王正元. 一种基于最大保障时间的战时装备维修任务调度[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(11): 1900-1903.
- [5] 舒华, 裴庆银, 陈适, 等. 战时车辆维修资源优化调度研究[J]. 军事交通学院学报, 2009, 11(2): 26-29.
- [6] 程翔宇. 基于遗传算法的多目标动态作业车间调度及应用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
- [C]//863-7领域空间在轨服务技术研讨会文集. 北京: 国家高技术863-7领域办公室, 2007: 398-405.
- [9] 宋爱国. 遥操作在轨维护卫星机器人[C]//863-7领域空间在轨服务技术研讨会文集. 北京: 国家高技术863-7领域办公室, 2007: 67-71.
- [10] 庞学亮, 王清. 高速飞行器背景磁场模型分析与改进[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(5): 22-24.
- [11] Jean-Claude Piedboeuf. On-orbit Servicing in Canada: Advanced Developments and Demonstrations[R]. Canada: Canadian Space Agency, 2004.
- [12] W.De Peuter, G.Visentin, W.Fehse & A.Elfving. Satellite Servicing in GEO by Robotic Service Vehicle[EB]. Satellite Servicing.
- [13] Donald M. Waltz. On-Orbit Servicing of Space Systems[M]. Malabar, Florida: Krieger Publishing Company, 1993.
- [14] Shane Stamm, Pejmun Motaghedi. Orbital Express Capture System: concept to reality[J]. Proc. Of SPIE, 2004, 5419: 78-91.
- [15] Pejmun Motaghedi, Shane Stamm. 6 DOF Testing of the Orbital Express Capture System[J]. Proc. Of SPIE, 2005, 5799: 66-81.
- [16] Xavier Cyril, Gilbert Jaar, Jean St-Pierre. Advanced Space Robotics Simulation For Training And Operations[J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics. 2000-2004.
- [17] Bernd Sommer. Automation & Robotics (A&R) within the German Space Program[R]. Germany: German Aerospace Centre (DLR), 2003.
- [18] Dennis Ray Wingo. Orbital Recovery's Responsive Commercial Space Tug For Life Extension Missions[C]. California: Space 2004 Conference and Exhibit, San Diego, 2004: 2004-2008.
- [19] Ralf Dittmann, Bernd Sommer. On-Orbit-Servicing Activities Within the German Space Agency[C]. Germany: General Technologies and Robotics German Aerospace Center, 2004.
- [20] Andrew Long and Daniel Hastings. Catching the Wave: A Unique Opportunity for the Development of an On-Orbit Satellite Servicing Infrastructure[J]. In: Space 2004 Conference and Exhibit, San Diego, California, 2004: 2008-2020.