

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.05.023

## 空间在轨服务技术进展

李岩, 党常平

(装备指挥技术学院航天装备系, 北京 101416)

**摘要:** 为解决当前在轨系统面临的诸多难题, 对国内外空间在轨服务技术进展进行研究。介绍在轨服务技术的发展背景及发展意义, 分析人工在轨服务技术现状和自主式在轨服务技术进展。结果表明: 在轨服务技术能有效地延长在轨航天器的寿命, 提升其性能; 基于 OSV 技术的自主式在轨服务已成为发展低成本、高可靠空间维护和服务技术的必然选项, 下一步将向智能化自主式方向发展。

**关键词:** 在轨服务; 在轨服务飞行器; 在轨系统

**中图分类号:** TJ86 **文献标志码:** A

## The Development of Orbital Servicing Technology in Space

Li Yan, Dang Changping

(Dept. of Spaceflight Equipment, Institute of Command & Technology of Equipment, Beijing 101416, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of orbital system, the development of domestic and foreign orbital servicing technology is researched. The development background and significance of orbital servicing technology are introduced, and the status quo of manual and automatic orbital servicing are analyzed. The result indicates that orbital servicing technology could extend the life of spacecraft and enhance their performance. The automatic orbital servicing based on OSV becomes the inevitable option for the low cost and high reliability of space maintenance technology, and it will develop in the direction of intelligent and autonomous.

**Key words:** on-orbit service; orbital servicing vehicle; on-orbit system

### 0 引言

在空间轨道上运行的人造航天器系统可通称为“在轨系统”或“空间系统”, 包括在轨卫星、飞船、航天飞机、空间站(实验室)、空间探测器和太空望远镜等。在轨服务技术将为在轨系统的后勤维护提供全新的模式。这种模式不但比传统模式成本低, 而且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。更为突出的是, 在轨服务技术将催生一种新概念航天器, 即专门用于执行在轨服务任务的智能航天器——在轨服务飞行器(on-orbit/orbital service vehicle, OSV)。因此, 笔者对其进行研究。

### 1 在轨服务技术的发展背景

目前, 在轨系统往往面临这样的困境:

1) 故障频发且维护成本高昂。1991—2008年, 平均每年约有十多颗卫星损坏或出现故障, 在此期间发生故障的航天器占总数的15%左右。对于国际空间站和哈勃望远镜等造价高昂的在轨系统, 航天飞机搭载宇航员的人工维护方式, 目前能够解决其维护和维修问题; 但对于其它众多的航天器, 这种方式的维护往往得不偿失。因此, 大多数的在轨系

统尚未得到有效的在轨维护。

2) 一次性可携带的消耗品有限且难以补给航天器上可消耗流体物质包括: 推进剂、制冷剂和电源介质等, 这些流体物质一旦耗尽, 航天器的寿命也将终结。因此, 航天器寿命受到航天器上消耗品装载量的限制。例如: 地球静止轨道通信卫星的工作寿命主要取决于卫星携带的用于轨道保持和姿态控制的燃料量, 一旦燃料耗尽, 卫星就失去控制而报废。目前, 众多航天器的消耗品都难以实现补给。

3) 设计之初功能有限, 难以随需求变化而更新。目前航天器的设计寿命往往在10年以上, 而航天器的设备和功能不能随着市场需求的变化和技术的更新而升级换代。现代技术的发展日新月异, 军事和商业需求变化也难以预料, 设计者无法确保10年前用于航天器上的技术和设备一定能够满足10年后的实际应用需求。所以, 造价高昂的航天器系统很可能在远没有达到退役期时就失去了实际效用。

4) 包括报废航天器在内的轨道垃圾长期占据轨道位置, 难以清除。目前, 正常工作的在轨运行卫星有1000颗左右, 而失效卫星则有2000多颗。这些失效卫星往往成为空间碎片和空间垃圾的主要来源。由于空间环境影响, 低轨失效卫星可在较短

收稿日期: 2011-12-11; 修回日期: 2012-01-05

基金项目: 部委资助项目

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、自动化测试与控制研究。

时间内坠入大气,而远在 35 000 km 以上的 GEO(静止轨道)失效卫星在理论上可以在空间运行百万年,长期占据轨道定点位置,限制了其它航天活动的开展。为了减缓空间垃圾堆积问题,联合国对地球同步轨道通信卫星的退役处理提出了明确要求。按规定,寿命期满退役的同步通信卫星必须放置在其近地点至少比地球同步轨道高出 300 km 置轨道(disposal orbit)或称遗弃轨道。如果能提供在轨牵引服务,将对轨道垃圾的处理方式提供更多的选择<sup>[1]</sup>。

总之,由于自身条件的限制和空间环境的影响,在轨系统目前并没有得到系统的维护和保养,其功能和效益也没有得到充分的发挥。因而各国纷纷开始致力于在轨服务技术的研究。

## 2 发展在轨服务技术的意义

在轨服务为空间任务的实施提供了更多选择,其意义主要表现在<sup>[2-4]</sup>:

### 1) 实现传统方式不可能实现的空间任务

许多平均寿命短和取代成本高的航天任务只能依赖在轨服务来实现;需要进行在轨装配的大型航天系统也离不开在轨服务。

### 2) 降低航天任务的初始成本

在没有在轨服务的情况下,为了尽可能延长寿命和提高可靠性,在轨系统的设计必须考虑装载尽可能多的燃料,搭载冗余度高的设备,这都会在有效载荷之外,增加在轨系统的结构重量。而在轨服务却能使低成本、轻捷型系统的设计成为可能。在轨燃料补给和在轨维修能够大大降低航天任务寿命周期成本。

### 3) 通过降低风险来提高在轨系统的性能

及时和廉价的在轨服务能够提高航天器全寿命性能,降低风险。对偏离轨道的航天器进行轨道校正,能够降低发射阶段风险;对物理元器件故障进行维修,能够延长航天器使用寿命,降低故障带来的风险;对元器件进行更新换代,能够维持元器件的技术寿命,降低因设备陈旧而被淘汰的风险。

### 4) 增强在轨系统功能灵活性和适应性

通过在轨服务,航天器可按照不同需求而实施机动以改变运行轨道,也可接受更新升级以完善初始设计功能。

可见,作为一种延长寿命和提升性能的有效方法,在轨服务技术在空间系统的维护中发挥重要作用,能够使在轨系统不断更新,以适应市场需求的变化和科学技术的进步。

此外,在轨服务技术的军事意义也显而易见。在以信息化为特点的新军事变革时期,在轨服务技术在军事航天领域的应用能够有效提高空间战略威慑力。对各种军用侦察卫星、导航卫星、通信卫星甚至即将出现的空间机动作战平台进行在轨维护和服务,能够有效地提高空间态势感知能力、第一时间情报获取能力和应急作战能力。同时,在轨服务系统在战时可以适时参与空间作战,对敌方航天器实施空间干扰、捕获或损毁,从而保证我方掌握制天权和制信息权,提升空间作战部队的整体战斗力。

所以,构建空间在轨服务系统,开展在轨服务以及相关技术的研究,能够有效地延长在轨航天器的使用寿命,为进行长期频繁的空间活动提供强有力的后勤保障。

## 3 在轨服务技术进展

从在轨维修、模块更换、燃料加注和在轨救援等在轨服务需求出发,世界各国争相开展 OSV 快速变轨和机动、空间交会对接以及自主导航控制等相关技术的研究,为实施在轨服务提供技术解决方案。根据是否有宇航员提供在轨支持或直接参与服务任务的情况,方案分为“人工”和“自主式”2种<sup>[5]</sup>。

### 3.1 人工在轨服务技术现状

#### 1) 哈勃太空望远镜(Hubble space telescope, HST)的维修和更新

哈勃太空望远镜在离地球表面 580 km 高空的轨道上运行,重 1.1 万 kg。它的镜面直径达 240 cm。1990 年 4 月 24 日,该望远镜随发现号航天飞机发射升空。由于制造的镜片厚度有误,首批传回地球的影像产生了严重的球差,影像比较朦胧<sup>[6]</sup>。此后哈勃多次接受由宇航员操作的在轨服务,服务任务类型多是设备的更新、维修和校正。例如最近一次(也是最后一次)维护任务 STS-125(2009 年 5 月 11 日至 24 日),宇航员更换了哈勃望远镜上的陀螺仪、电池和其它一些能够保证哈勃工作到 2014 年或 2015 年的设备,使哈勃的工作能力达到极点<sup>[7]</sup>。

#### 2) 航天飞机在轨检查和维修

在美国,航天飞机作为可重复使用的载人航天器在在轨服务任务中起到举足轻重的作用,它承载了宇航员成功完成了 20 多年的在轨服务操作,包括卫星回收、救援和维修的实践,4 次哈勃望远镜的维护,空间站维护等等。

#### 3) 空间站维护

前苏联和平号空间站(Mir)从 1986 年 2 月 20

日升空到 2001 年 3 月 23 日坠毁, 运行 15 年来事故频出, 多达 1 500 次。通过 12 个国家的 100 多位宇航员的在轨维护, 和平号才能超期服役。国际空间站 (ISS) 于 2000 年 11 月开始组装, 目前还未最终完成。该空间站的维护以宇航员直接参与为主, 空间机器人 (机械臂/手) 的试验性操作为辅。

从上述在轨服务任务可以看出, 目前对在轨系统开展维护与服务往往离不开宇航员的直接参与。人的参与使在轨服务任务易于操控, 灵活性更强。在轨服务系统在航天器服务市场中的发展潜力很大, 实际的服务需求较广, 如: 电源模块等消耗品的更换和补给、计算机处理器等部件的在轨装配、硬件系统的升级更新等。所以, 建立功能完善的、低成本的在轨服务系统是必要且可行的。

### 3.2 自主式在轨服务技术进展

航天员的直接参与使得专用的在轨服务飞行器 (OSV) 的作用表现得并不突出。不过, 人的直接参与与必定要增加生命保障系统的投入, 大大提高了任务成本, 而且风险过大, 因此有许多国家开始研究和构建以 OSV 为核心的自主式在轨服务系统, 并取得了初步的试验性成果。自主式在轨服务, 利用智能的在轨服务飞行器自主完成空间在轨服务任务, 各个国家对于在轨服务飞行器的称谓不同, 但其性质和作用大体一致, 笔者在论述过程中采用“OSV”的名称作为此类飞行器的统称。

#### 1) 自主交会技术验证计划 (demonstration for autonomous rendezvous technology, DART)

2005 年 4 月 15 日, NASA 发射第一艘全自动化太空船, 这次发射计划的目的是在没有宇航员干预的情况下实现太空船和其它卫星于轨道中会合的技术<sup>[8]</sup>。DART 太空船发射升空后, 与一颗名为多路径超视距通信 (multipath beyond-line-of-sight communications, MUBLCOM) 的退役军事卫星会合, 并且在环绕它的过程中实现交会对接和脱离。该技术可用于太空船至空间站的自主运输, 航天器之间的自动对接和维修等, 还可对敌方卫星进行近距离侦察。美国“轨道快车”计划也采用了 DART 飞行器的相关技术。

#### 2) 试验卫星系统 (experimental satellite system, XSS)

XSS 计划最突出的成就是 XSS-II。美国空军已经利用 XSS-II 卫星研究了包括维护、修理和再补给在内的多种有前景的太空应用。XSS-II 是空间

交会对接演示器, 其星载电子设备中有交会对接操作规划器, 用以辅助开发用于未来概念与任务的自主操作技术。此外, 自主飞行的 XSS-II 可以减少未来太空任务的人员数量和设备数量<sup>[9-10]</sup>。

#### 3) 轨道快车 (orbital express, OE)

轨道快车计划于 1999 年 11 月提出, 是一项较为完整的在轨服务体系演示验证计划, 主要研发用于支持未来美国国家安全和商业应用的在轨服务技术<sup>[11-12]</sup>。2007 年 3 月 8 日, 宇宙神火箭将轨道快车送入低地球轨道, 开始为期 3 个月的自主交会对接能力验证试验。搭乘空间自主操作机器人的轨道服务飞行器 (autonomous space transfer and robotic orbiter, ASTRO) 和新一代可接受服务的试验卫星 (next generation satellite/commodity spacecraft, NextSat/CSC) 被一同发射升空。本次试验, 除进行自主交会对接和分离外, 还进行了在轨燃料补给和维修技术试验, 并通过机械臂安装电池、处理器以及其它轨道置换单元 (orbital replacement unit, ORU)。美国计划 2010 年部署实用系统, 构成在轨加注燃料、维修和卫星升级等置换卫星部件能力。

#### 4) 天基轨道运输网系统

轨道运输网系统概念由美国麻省理工学院的 Daniel E. Hastings 和 Nilchiani Roshanak 提出, 获得了美国国防部高级研究计划署 (DARPA) 支持<sup>[13-15]</sup>。该运输网是典型的天基在轨服务系统, 由天基燃料储备仓库 (Depot)、天基服务站、地面站以及运载器和 OSV 组成。运载器负责从地面到空间轨道的运输任务: 将空间服务站运送至特定轨道; 将燃料和配件等货物运输至空间仓库和服务站存储; 并将 OSV 运送至待命轨道。在地面站的指挥控制下, OSV 则负责空间轨道间的运输任务: 从仓库获取燃料运送至目标航天器实现轨上补给; 从服务站获取配件运送至故障目标航天器并进行在轨维修操作。该系统正处于理论研究和论证阶段。

#### 5) 欧空局的自动运输飞行器 (automated transfer vehicle, ATV)

1995 年 10 月, 欧洲航天局 (ESA) 开始为国际空间站研制自动运输飞行器 (ATV)<sup>[16]</sup>。该飞行器可以同国际空间站 (ISS) 自主交会对接, 并为其提供货物、饮用水、食物、空气以及推进剂的补给。对接之后, 利用 ATV 的 4 个主发动机和 28 个小推力发动机还可以为 ISS 提供轨道和姿态调整。

#### 6) 国际空间站机器人组件验证计划 (robotics component verification on ISS system, ROKVISS)

ROKVISS 是德国空间机器人研究计划的一部分,它于 2004 年 12 月 24 日在俄罗斯拜科努尔发射场发射升空<sup>[17]</sup>。机器人组件是一个长约 50 cm, 具有 2 个关节、1 个金属手指和 2 个内置照相机的机械臂装置, 2005 年 1 月 26 日由空间站 2 名宇航员进行太空行走时安装在空间站俄罗斯段“星辰”号服务舱外面。按照设计, 德国的地面控制中心和空间站“星辰”号服务舱内的电脑可以近乎实时地操纵机械臂, 使其在空间站外部进行一些危险、繁重的安装和维修工作。

7) 在轨服务验证和试验科学卫星 (technology satellite for demonstration and verification of a servicing system, TECSAS)

TECSAS 由德国、俄罗斯和加拿大航天部门联合开发, 旨在研究和论证自主式在轨服务过程中的相关技术<sup>[18]</sup>: 逼近和交会、观测绕飞、编队飞行、软捕获、卫星组合体的稳定和校准、卫星组合体的飞行机动、对目标卫星进行相关操作、通过可视化远程控制技术进行地面主动控制、自动操控期间的地面被动控制、轨道脱离和轨道操作的推力控制以及组合体脱离连接等。

8) 在轨寿命延长系统 (space life extension system, SLES)

Orbital Recovery Corporation 研究了延长通讯卫星寿命的新方法, 命名为航天器生命延长系统 (SLES)。利用这种方法能够减少设计和发射新卫星的费用<sup>[19]</sup>。据 Orbital Recovery 公司公布的资料, 利用 SLES 新工艺能使卫星延长工作 10 年以上。为了挽救自身燃料消耗殆尽的卫星, 利用延寿飞行器 (ConeXpress-orbital life extension vehicle, CX-OLEV) 与目标卫星的远地点发动机喷嘴进行对接, 借助于 CX-OLEV 飞行器的发动机将卫星牵引至工作轨道, 继续工作, 从而延长使用寿命。

9) H-II 运载飞船 (H-II transfer vehicle, HTV)

日本宇航局 JAXA 于 2006 年 7 月推出了第一艘“H-II 运载飞船”(H-II transfer vehicle, HTV) 的原型。其主要目的是向国际空间站运输货物并处理垃圾<sup>[20-23]</sup>。HTV 宇宙飞船全长超过 10 m (含发动机), 最宽处直径超过 4.4 m, 总重量为 10.5 t, 运载能力达 6 t。HTV 飞船在轨道的飞行时间可达到 100 h, 与国际空间站对接后它能在轨道工作 30 d。

综上所述, 目前美国、俄罗斯、欧洲、日本等国家和组织开展的自主式在轨服务系统研究大多处

于论证和试验阶段, 没有获得大规模的商业应用。但基于 OSV 技术的自主式在轨服务已经成为发展低成本、高可靠空间维护和服务技术的必然选项, 是人类开展更持久、更深远的空间探索的必经之路。

与国外相比, 我国目前对航天器在轨服务技术的研究才刚刚起步<sup>[24]</sup>。在概念与体系研究方面, “十五”期间, 国家高技术研究发展计划某主题开展了空间实验室在轨维修技术、在轨加注技术、在轨支援与投送技术等概念的研究。“十一五”开始, 国内相关单位联合开展了对在轨服务的顶层设计、仿真模拟技术与验证评估手段的研究。在在轨服务应用研究方面, “十五”期间某主题进行了小型 OSV 系统重点项目研究, 以在轨监测、机械手在轨释放与抓捕为演示任务。

#### 4 结论

随着空间技术的发展和应用需求的增加, 在轨服务的技术内涵正逐步从最初的在轨维护与维修等恢复性服务向在轨装配、在轨升级、在轨加注、在轨投送和轨道垃圾清理等增效性服务扩展。在轨服务能否顺利完成, 取决于实施者和接受者 2 个方面:

1) 在轨服务飞行器 (OSV) 具备实施在轨服务操作的能力;

2) 服务对象 (服务接受者) 必须具备或增强自身的可维护性。

目前国内外各种文献对于在轨服务系统的研究表明, 基于 OSV 技术的自主式在轨服务已经成为发展低成本、高可靠空间维护和服务技术的必然选项, 下一步还需要对自主式在轨服务的部署和执行模式进行深入探讨。

#### 参考文献

- [1] 胡鹏翔, 郑钢铁, 等. 在轨服务技术的发展概论[C]. 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.
- [2] Koichi Wakata. Development of Orbiter Thermal Protection System On-orbit Inspection and Repair[EB/OL]. [2004-10-02]. [http://www.on-orbit-servicing.com/pdf/OOS2004\\_presentations\\_pdf/Keynote\\_Wakata.pdf](http://www.on-orbit-servicing.com/pdf/OOS2004_presentations_pdf/Keynote_Wakata.pdf).
- [3] Dan King. Current OOS Approaches[EB/OL]. 2004 On-Orbit Services Workshop. [2004-10-01]. [http://www.on-orbit-servicing.com/pdf/OOS2004\\_presentations\\_pdf/DefiningTheEnvironment\\_King.pdf](http://www.on-orbit-servicing.com/pdf/OOS2004_presentations_pdf/DefiningTheEnvironment_King.pdf).
- [4] Bernd Sommer. From OOS 2002 to Present Vision & Accomplishments [EB/OL]. [2004-10-01]. [http://www.on-orbit-servicing.com/pdf/OOS2004\\_presentations\\_pdf/SettingTheScene\\_Sommer.pdf](http://www.on-orbit-servicing.com/pdf/OOS2004_presentations_pdf/SettingTheScene_Sommer.pdf).