

空间在轨 装配任务规划

Mission Planning for On-Orbit Assembly

■ 郭继峰 王平 崔乃刚 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

空间在轨装配任务规划

Mission Planning for On-Orbit Assembly

郭继峰 王平 崔乃刚 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书研究与论述了大型空间结构系统在轨装配的任务规划技术。全书内容分为十章,分别为绪论、空间在轨服务体系及任务分析、空间大型桁架结构装配模型的建立、服务航天器模型的建立、基于蚁群优化算法的空间自主装配序列规划、面向空间自主装配任务的智能协同规划、基于连续推力模式的敏捷服务航天器运动规划研究,基于脉冲推力模式的近距离在轨服务航天器运动规划研究、多服务航天器协同运动规划研究,以及空间自主装配规划的评价方法研究。

本书作为一本论述大型空间结构系统在轨装配任务规划技术的专著,既可以作为飞行器设计、空间科学与工程等相关专业的本科生、研究生教材,也可以供从事大型空间系统设计、空间任务设计与分析、空间在轨服务技术研究和应用的科研人员作为参考与指导。

图书在版编目(CIP)数据

空间在轨装配任务规划/郭继峰,王平,崔乃刚著.—北京:
国防工业出版社,2014.9
ISBN 978-7-118-09557-9

I. ①空... II. ①郭...②王...③崔... III. ①星际
站—研究 IV. ①V476.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 212126 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 15 字数 279 千字

2014 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 58.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

序

“地球是人类的摇篮,但人类不可能永远被束缚在摇篮里。”宇宙航行之父齐奥尔科夫斯基先生早在一百五十多年前就预言了人类不断探索宇宙的宏伟景象。随着航天事业的发展与科学技术的进步,人类不断发展出许多新兴的、富有极大应用潜力的先进空间技术。憧憬人类未来大规模的空间探索活动,空间太阳能电站等空间大型设施的建设、自主空间机器人在轨维修、推进剂在轨补加等将不再是科幻电影里的场景,而是作为人类空间技术的伟大成就造福社会。

我国已经发展了自己的空间站,这也是未来一段时期内探索宇宙的重要空间基地之一,相关技术的研究发展为更大型空间系统的构建奠定了基础。然而类似空间太阳能电站这样的巨型空间系统需要更复杂的、更自主的构建技术,现有技术难以满足发展要求。尽管当前人类对未来大规模的空间活动认识还很有限,但这些空间系统将作为空间探索的前哨站,成为空间战略的重点和资源探索的基地,这将关系到国家未来长远的利益。美国、欧洲、日本等已经在这一领域取得了令人鼓舞的研究成果,考虑将自主空间装配机器人、大型空间太阳能电站等空间工程列入战略发展计划。因此,尽早开展大型空间系统在轨构建活动,符合我国航天长远发展战略,研究用于构建大型空间系统的相关技术是十分必要的。

《空间在轨装配任务规划》一书的作者们长期从事富有挑战的先进空间在轨装配技术研究工作,他们收集、整理了大量国内外大型空间结构系统在轨装配技术的研究资料,分析并提出了相关概念和任务体系,研究了空间在轨装配任务规划关键技术,对系统地谋划我国未来空间技术发展战略具有积极作用和重要价值。本书既可以为从事空间在轨装配、维护与服务技术研究的人员提供参考,也可以作为高等院校相关专业的教材或参考书。本书的出版将为我国未来航天技术的持续发展和进步做出应有的贡献。



2014年5月

前 言

本书是作者及其团队从事大型空间结构系统在轨装配技术科研与教学工作十余年的总结。书中以大型空间结构系统为主要研究背景,在对空间在轨装配概念与任务体系分析的基础上,较为全面地对空间在轨装配任务规划方法进行了研究与分析。全书共分为10章,第1章介绍空间在轨装配技术的发展概况,第2章分析空间在轨装配概念与任务体系,第3章和第4章分别阐述大型空间桁架结构装配模型和近距离操作服务航天器模型的建立,第5章的研究基于蚁群优化算法的空间自主装配序列规划方法,第6章的论述面向空间自主装配任务的智能协同规划,第7章和第8章的研究分别基于连续推力模式和脉冲推力模式的服务航天器运动规划方法,第9章研究了多服务航天器协同运动规划方法,第10章阐述空间自主装配规划的评价方法。

大型空间结构在轨装配技术将对未来更大规模、更深远的空间探索计划起到至关重要的作用,是未来航天领域发展的重要技术之一。由于大型空间结构的尺寸和复杂性,在复杂多空间机器人操作环境下,大型空间结构的装配、反装配或者维修任务都要求仔细的规划和协同控制,以保证所有部件按照一个正确、有效的顺序进行操作。另外,由于设计人员在复杂规划过程中很难保证规划结果的正确性,而且规划速度无法与计算机相比,因此只能通过计算机系统的、自动的、快速的生成装配序列,从而保证装配过程按照一个正确、完整、有效的顺序进行。装配序列规划和协同规划的好坏将直接影响整个空间在轨装配过程的性能、质量及自动化程度。因此,装配序列规划、装配协同规划以及自主装配机器人运动规划是研究空间在轨装配任务规划的关键技术之一,也是本书研究的三个主要内容。本书涉及的内容是属于未来航天领域需求的热点与瓶颈,符合学科发展与国内科研、生产的需求。

在本书的初稿完成后,承蒙中国空间技术研究院郭宝柱研究员的认真审阅,提出了宝贵的意见和建议,并为本书作序。在此表示衷心的感谢。

同时,还要感谢哈尔滨工业大学航天工程系飞行器总体设计实验室的所有老师和研究生,感谢他们在进行该书相关研究工作时给予的帮助和支持。特别感谢程兴、史晓宁、陈诚博士为本书书稿整理工作所做的重要贡献。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,欢迎广大读者对本书提出意见和建议。

作者

2014年5月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 空间在轨服务技术研究发展概况	2
1.2.1 空间在轨服务技术发展概况	2
1.2.2 空间后勤技术研究概述	8
1.3 空间在轨装配技术研究发展概况	13
1.3.1 具有装配辅助的航天员手动装配阶段	14
1.3.2 空间机器人装配阶段	17
1.4 装配序列规划的研究发展概况	20
1.4.1 经典装配序列规划方法	20
1.4.2 虚拟装配序列规划方法	20
1.4.3 软计算装配序列规划方法	21
1.4.4 基于网络的装配序列规划方法	21
1.5 航天器运动规划方法研究概况	22
1.5.1 运动规划方法研究概况	22
1.5.2 航天器运动规划研究概况	25
1.6 装配协同规划的研究发展概况	28
1.6.1 协同体系结构	28
1.6.2 协同规划方法	29
1.6.3 航天器协同问题的研究现状	30
1.7 航天器自主体系研究概况	33
1.8 本书主要内容	35

第2章 空间在轨服务体系及任务分析	37
2.1 引言	37
2.2 空间在轨服务的概念	37
2.3 空间在轨服务体系	38
2.3.1 服务体	38
2.3.2 服务对象	42
2.4 空间在轨服务任务分析	43
2.4.1 任务内容	43
2.4.2 实现方式	45
2.5 空间在轨装配任务体系研究	47
2.5.1 装配任务体系分析的目的	47
2.5.2 装配任务体系分析策略	47
2.5.3 装配任务体系分析的步骤与流程	49
2.6 大型空间桁架结构构建方法研究	52
2.6.1 可展开结构构建	52
2.6.2 太空成形结构构建	53
2.6.3 可直立桁架结构构建	54
2.7 自主服务航天器近距离操作运动规划体系	55
2.7.1 单个自主服务航天器的规划体系	56
2.7.2 多自主服务航天器协同规划体系	58
2.8 本章小结	59
第3章 空间大型桁架结构装配模型的建立	60
3.1 引言	60
3.2 大型空间桁架结构的装配定义	61
3.2.1 桁架装配定义的数学描述	61
3.2.2 结构容积单元	62
3.2.3 桁架结构的装配可行性准则	63
3.3 基于连接矩阵的大型空间桁架结构装配表示模型	65

3.3.1	共同杆连接方式的连接矩阵	65
3.3.2	共同点连接方式的连接矩阵	66
3.3.3	连接杆连接方式的连接矩阵	67
3.3.4	连接矩阵建模示例	68
3.4	大型空间桁架结构的分层规划表示模型	69
3.4.1	分层状态和规划表示	69
3.4.2	分层规划建模策略	70
3.5	大型空间桁架结构的图形表示模型	72
3.5.1	四面体桁架结构的坐标系定义	73
3.5.2	四面体桁架结构的图形表示	74
3.5.3	四面体桁架结构装配规划的有向图表示	76
3.6	本章小结	78
第4章	服务航天器模型的建立	79
4.1	引言	79
4.2	坐标系定义与转换	79
4.2.1	坐标系定义	79
4.2.2	坐标系转换	81
4.3	相对轨道运动模型	82
4.3.1	动力学模型	82
4.3.2	相对运动显式方程模型	84
4.4	本章小结	91
第5章	基于蚁群优化算法的空间自主装配序列规划	92
5.1	引言	92
5.2	蚁群优化算法	92
5.2.1	蚁群优化原理	93
5.2.2	基本蚁群优化算法	95
5.2.3	蚁群优化算法的改进与应用	98
5.3	用于空间自主装配序列规划的改进蚁群优化算法	99

5.3.1	装配序列的表示	100
5.3.2	改进蚁群优化算法	101
5.4	基于改进自适应蚁群优化算法的空间自主装配序列规划	103
5.4.1	装配序列的表示	104
5.4.2	改进自适应蚁群优化算法	104
5.5	改进免疫—蚁群算法在空间自主装配序列规划中的应用	106
5.5.1	人工免疫算法	107
5.5.2	改进免疫—蚁群算法	110
5.6	算例仿真及结果分析	113
5.6.1	仿真算例	113
5.6.2	仿真结果及分析	114
5.6.3	算法比较	117
5.7	本章小结	118
第6章	面向空间自主装配任务的智能协同规划	119
6.1	引言	119
6.2	基于集合势函数描述的空间自主协同装配问题	119
6.2.1	基于集合势函数的空间自主装配控制规律	119
6.2.2	基本装配问题描述	120
6.3	分布式多空间自主机器人环境下的协同装配规划策略	123
6.3.1	分布式多空间自主机器人环境	123
6.3.2	面向协同装配规划的模型表述	124
6.3.3	协同装配规划策略	126
6.4	多空间自主机器人协同装配的两级递阶智能规划算法	127
6.4.1	空间桁架结构的分层表示法	127
6.4.2	多空间自主机器人连续装配策略	128
6.4.3	两级递阶规划概念	128
6.4.4	两级递阶智能规划算法	129
6.4.5	算例研究及分析	131
6.5	本章小结	132

第 7 章 基于连续推力模式的敏捷服务航天器运动规划研究	133
7.1 引言	133
7.2 快速搜索随机树规划方法	134
7.2.1 规划理论的基本要素	134
7.2.2 离散规划	135
7.2.3 基于采样的规划方法	140
7.2.4 快速搜索随机树规划方法理论与应用	143
7.3 约束条件	149
7.3.1 运动动力学约束	149
7.3.2 几何约束	149
7.4 基于连续推力模式的敏捷服务航天器运动规划	150
7.4.1 运动状态的确定与度量	150
7.4.2 局部规划器	151
7.4.3 规划问题的基本描述	153
7.4.4 必然碰撞区	153
7.4.5 规划方法	154
7.5 仿真算例	157
7.6 本章小结	168
第 8 章 基于脉冲推力模式的近距离在轨服务航天器运动规划研究	170
8.1 引言	170
8.2 概率路标算法	171
8.2.1 预处理阶段	171
8.2.2 查询阶段	172
8.3 约束条件	172
8.3.1 运动动力学约束	172
8.3.2 几何约束	173
8.4 基于脉冲推力模式的近距离服务航天器运动规划	173
8.4.1 平动运动规划	174

8.4.2 转动运动规划	178
8.5 仿真算例	182
8.6 本章小结	193
第9章 多服务航天器协同运动规划研究	194
9.1 引言	194
9.2 协同问题概述	194
9.2.1 协同	194
9.2.2 协同运动规划	195
9.3 多服务航天器协同运动规划方法	196
9.3.1 运动规划算法	197
9.3.2 协调策略	197
9.4 仿真算例	198
9.4.1 连续推力模式的敏捷服务航天器协同规划	198
9.4.2 脉冲推力模式的近距离服务航天器协同规划	203
9.5 本章小结	208
第10章 空间自主装配规划的评价方法研究	209
10.1 引言	209
10.2 空间自主装配规划的评价标准	209
10.2.1 空间自主装配规划评价指标的确定	210
10.2.2 主要评价指标的量化模型	211
10.3 经典装配规划评价方法	213
10.4 面向空间自主装配规划的协同式专家决策综合评价方法	216
10.4.1 专家系统	216
10.4.2 协同式专家决策系统的设计	217
10.4.3 装配规划协同式专家决策综合评价方法	219
10.5 空间自主装配规划的评价流程	221
10.6 本章小结	222
参考文献	223

第1章 绪 论

1.1 引 言

随着航天运载器(如航天飞机、空天飞机等)、空间材料、空间智能化及自动化技术的不断发展,直接推动了空间在轨服务(On - Orbit Servicing, OOS)技术在空间科学研究计划中的应用,使得人类可以在太空中开展更加广泛、更加深入、更有创意的探索活动。

从广义上讲,空间在轨服务的范围非常广泛,包括空间装配、维护与服务技术(Space Assembly, Maintenance and Servicing, SAMS)。其中,空间在轨装配作为一项重要的技术,为更好地开展整个空间在轨服务任务奠定了基础。

现在的许多科学研究计划,如空间科学计划、地球科学计划和人类宇宙探索计划都要求有大型的空间结构,而一些具有潜在应用价值的空间任务,如陆地行星成像系统、大孔径红外空间望远镜、空间太阳能电站平台以及人类火星任务,也需要直径大于10m的望远镜、千米级尺寸的太阳电池阵平台和直径大于10m的减速伞。在未来,还将会出现像拓展人类视野的科学前哨站、星际航行所需的太空中转基地以及丰富人类生活的太空宾馆等这些巨型空间设施,它们与今天的卫星、航天飞机和空间站相比有很大的差别。这些大型空间结构的特点是体积巨大,现有的运载工具都无法满足其装载体积要求,这样就排除了从地球以独立单元发射的可能,只能将结构部件运送至轨道上,在太空中构建。

空间在轨装配就是在太空中将不同的部件连接起来构建成一个由结构、子系统或子系统的单元体等组成的空间设施,主要包括空间飞行器、空间系统或空间结构的在轨连接、构建或组装,以及太阳电池阵、天线和其他附加体的在轨展开。因此,大型空间结构的在轨装配长期以来被认为是一种构建大型空间平台的有效且适宜的方法。空间在轨装配发生在一个空间系统可以正常工作之前。空间装配的基本形式从最初的空间飞行器检验、排列、校准和展开,发展到目前的大型独立舱段的在轨对接。空间在轨装配的更高水平既包括将小型部件通过焊接、组装或类似连接过程构建出大型空间结构,也包括在空间环境中使用独特的成形材料生产部件。

由此可见,大型空间结构在轨装配技术将对未来更大规模、更深远的空间探索

计划起到至关重要的作用,是未来航天领域发展的重要技术之一。过去,在轨装配都被限制在航天员舱外活动和空间机械臂装配上,存在着一定的危险。随着遥控或自主模式的自由飞行空间机器人的出现,使得在轨装配可应用于更复杂、大型的空间结构。通过多自主空间机器人来执行空间在轨装配任务将是未来构建大型空间结构的主要方法。随着空间机器人技术的不断发展,大型空间结构在轨装配技术将发挥出更大的潜力。

然而,由于大型空间结构的尺寸和复杂性,在复杂多空间机器人操作环境下,大型空间结构的装配、反装配或者维修任务都要求仔细的规划和协同控制,以保证所有部件按照一个正确、有效的顺序进行操作。另外,由于设计人员在复杂规划过程中很难保证规划结果的正确性,而且规划速度无法与计算机相比,因此只能通过计算机系统地、自动地、快速地生成装配序列,从而保证装配过程按照一个正确、完整、有效的顺序进行。装配序列规划和协同规划的好坏将直接影响整个空间在轨装配过程的性能、质量及自动化程度。因此,装配序列规划、装配协同规划以及自主机器人运动规划是研究空间在轨装配的关键技术之一。

由于装配序列的搜索与优化可以看成是一个难以用确定性描述的组合(所有可能装配序列的集合)优化问题,因此作为解决这类问题的一种有效方法——人工智能法,在装配序列规划中的应用已逐渐受到重视。人工智能法将退火、神经网络、遗传算法、蚁群算法等模拟自然过程的算法陆续运用到装配序列规划中,由于其高效性,近年来得到了广泛的应用。尤其是蚁群算法,由于其自身正反馈及分布式计算的特点,引起了越来越多研究者的兴趣,成为解决装配规划问题的一类新方法。随着人工智能和分布式系统的不断发展,智能规划也将在空间在轨装配规划中发挥不可估量的作用。而针对自主运动规划研究方面,在考虑多约束条件的情况下,采用基于随机搜索的算法来实现规划的目的是目前较为可行的方法之一。

1.2 空间在轨服务技术研究发展概况

在轨装配是空间在轨服务技术领域的一个重要分支,首先对空间在轨服务技术的发展概况做简要介绍。

1.2.1 空间在轨服务技术发展概况

有人参与或主导的空间在轨服务技术的研究与实践已有数十年的历史,早在美国阿波罗登月计划中,就曾利用空间对接技术实现了命令舱和着陆舱的在轨再连接。苏联的礼炮空间站用空间对接技术来进行在轨装配,由航天员(原书稿为宇航员,后全部统一称为航天员)参与完成来进行在轨服务。此后,美国更为重视空间装配和服务问题,如果航天员能支持其他空间任务,如对军事通信卫星和侦察卫

星等空间飞行器的发射、装配、在轨维修及回收等服务,那么人类空间计划的成本就会大大降低。因此,美国投入大量经费重点发展了航天飞机计划,用来支持空间在轨服务任务,并曾多次成功使用“挑战者”号、“哥伦比亚”号等航天飞机实施在轨修理、回收、释放、重展开等在轨服务行为,也多次利用航天员实施出舱操作。自1984年起,空间在轨服务已从概念研究转向现实操作,重要的空间在轨服务事件有:

(1) 美国使用航天飞机对 Solar Maximum Mission(SMM) 卫星实施在轨捕获和修复(见图1-1)。此次任务的目的是主要是测试航天飞机在轨服务的应用能力。1984年4月10日,航天飞机(“挑战者”号)利用遥测系统和机械臂捕获 SMM 卫星,并于次日修复了该卫星的姿态控制系统,更换了一些电子元件箱和一个碟形卫星天线。这样 SMM 卫星就成为人类历史上第一个利用航天飞机进行在轨捕获、维修的空间飞行器。

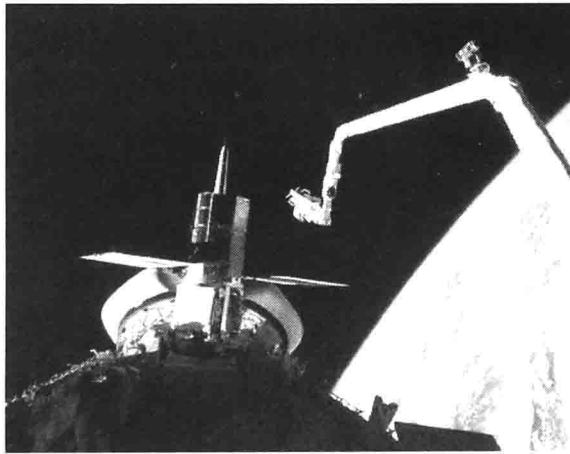


图1-1 航天飞机捕获 SMM

(2) Palapa B2 和 Westar VI通信卫星的太空取回,返回地球维修。美国休斯公司设计及制造的 Palapa B2 和 Westar VI人造卫星于1984年由航天飞机发射,在太空脱离航天飞机后未能准确地射入轨道。1984年11月,美国航天员展开“卫星拯救行动”将这两颗卫星收回并交回制造商予以维修。

(3) SYNCOM IV-3 通信卫星在轨取回、修理和重展开(见图1-2)。1985年4月,美国利用航天飞机发射 SYNCOM IV-3 通信卫星。发射后,该卫星未能正常启动,为此航天飞机与其交会伴飞,并由两名航天员对其进行手动启动,但未能取得成功。1985年8月至9月,航天飞机再次与其交会并由两名航天员手动取回至载荷舱,为其重新安装新的电池和启动装置,并将卫星再次发射、在轨展开,卫星成功启动。

(4) 空间结构舱外活动装配试验;可直立空间结构构建装配概念的太空论证。

(5) 美国利用哥伦比亚号航天飞机于1990年成功在轨发射和展开休斯公司

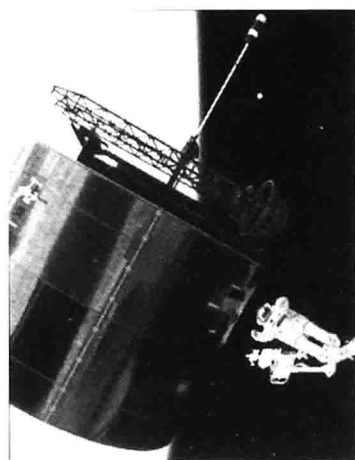


图 1-2 修理 SYCOM IV-3 通信卫星

的 SYCOM 4-F5 军事通信卫星,同年回收了长时期裸露星(Long Duration Exposure Facility,LDEF),并带回地球进行分析。

(6) 1991 年 4 月 5 日,由美国“亚特兰蒂斯”号航天飞机在轨发射并展开 NASA 当时质量最大的在轨天体物理观测平台 Gamma Ray Observatory 卫星,并由航天员手动展开高增益天线。

(7) 通过轨道输送装置,在大型结构上将航天员从一个位置移动到另一位置,并对此方法进行了在轨评估。

(8) 1991 年 5 月,美国应用航天飞机捕获并回收了在轨失效的 Intelsat 6/F3 通信卫星。首次让三名航天员手动将卫星取回至载荷舱,并重新安装火箭发动机,而后成功将其发射、展开(见图 1-3)。



图 1-3 取回 Intelsat 6/F3

空间装配、维护和服务功能固有的可行性保证了这些空间任务的成功。同时,这些空间在轨服务的成功也证明了这项新技术的可行性。

现在,空间在轨服务最多的对象是国际空间站,它接受了广泛的、成功的、持续的空间在轨服务活动(见图1-4)。由于国际空间站相比任何运载工具而言体积都更为庞大,因此必须进行空间在轨装配;又由于国际空间站非常昂贵,所以只能接受空间在轨服务。另外,一些非常昂贵的空间系统,如哈勃太空望远镜,也都非常依赖空间在轨服务。

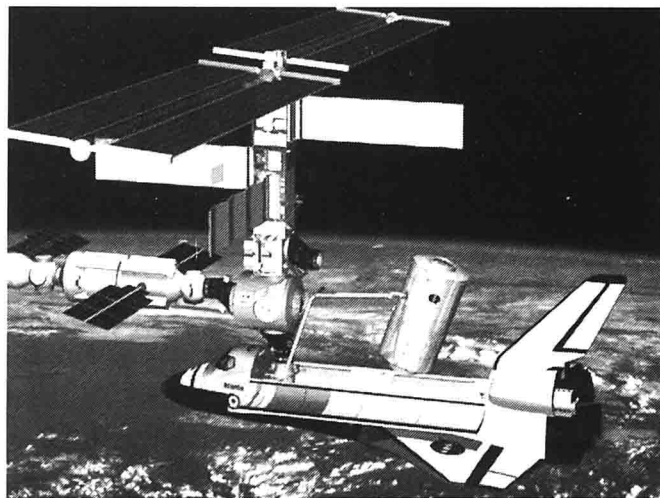


图1-4 航天飞机为空间站安装舱段

目前,执行空间在轨服务任务的主要是航天员、航天飞机和一些空间机械臂等辅助机械设备。而一些空间服务卫星和空间服务机器人计划正在概念设计阶段和试验研究阶段。相比航天员执行空间在轨服务任务的危险性以及航天飞机等服务飞行器的大型、复杂和昂贵而言,小型、简单、智能的服务飞行器和卫星等具有更小的组件、更快的处理器、更智能的算法、更小的尺寸和更有用的服务活动等特点。因此,设计可加注燃料、模块化、智能化的在轨自主服务飞行器将成为未来在轨服务工具的发展方向。主要的研究项目有:

1) 试验卫星系统论证项目

美国针对自主服务飞行器的诸多特点,提出模块在轨服务的概念(Modular On-orbit Servicing, MOS)。该概念的核心是研究微小卫星提供自主在轨服务,其研究项目是对试验卫星系统(Experimental Satellite System, XSS)的论证与试验。参与研究的机构有空军研究实验室(Air Force Research Laboratory, AFRL)、空军航空技术学院(Air Force Institute of Technology, AFIT)、美国太空指挥部(United States Space Command, USSC)、美国空军太空指挥部(Air Force Space Command, AFSC)和太空与导弹系统中心(Space and Missiles Systems Center, SMSC)。MOS的系统包括五个部分:新一代卫星、微小服务卫星、在轨机器人、轨道运输飞行器和发射飞行器。此