



航天科技图书出版基金资助出版

航天器 在轨服务技术

陈小前 袁建平 著
姚 雯 赵 勇



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

航天器在轨服务技术

陈小前 袁建平 著
姚 雯 赵 勇



中国宇航出版社

· 北 京 ·

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

航天器在轨服务技术/陈小前等著. —北京:中国宇航出版社,
2009.1

ISBN 978 - 7 - 80218 - 447 - 3

I. 航... II. 陈... III. 航天器—在轨服务—技术 IV. V448.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 202209 号

责任编辑 马 航 封面设计 03 工舍 责任校对 祝延萍

出 版
发 行

中国宇航出版社

社 址 北京市阜成路 8 号
(010)68768548

邮 编 100830

网 址 www.caphbook.com / www.caphbook.com.cn

经 销 新华书店

发行部 (010)68371900

(010)88530478(传真)

(010)68768541

(010)68767294(传真)

零售店 读者服务部

北京宇航文苑

(010)68371105

(010)62529336

承 印 北京画中画印刷有限公司

版 次 2009 年 1 月第 1 版

2009 年 1 月第 1 次印刷

规 格 880×1230

开 本 1/32

印 张 14.375 彩 插 4 面

字 数 398 千字

书 号 ISBN 978 - 7 - 80218 - 447 - 3

定 价 75.00 元

本书如有印装质量问题,可与发行部联系调换

序

在人类历史上,每一种新的运输工具的出现,无论是古代的马车和帆船,还是现代的汽车和飞机,都会大大增强人类开发利用新的空间区域的能力。但只有在具备了对这类交通工具进行维护与补给的能力之后,这类运输工具才能够真正发挥其最大的潜力。联想一下古代的驿站和今天的汽车加油站/维修站对于运输工具的重要作用,就不难认识到这一点。

世界航天技术发展半个多世纪以来,人类已经向空间发射了几千枚航天器,实现了对空间的初步开发和利用。但在这么多的航天器中,能够进行在轨维护与补给等操作的航天器屈指可数,以至于其中的大多数航天器而言,一旦在轨出现遥控无法修复的故障或者是燃料耗尽等情况,则除了放弃别无选择。因此,从历史的发展规律来看,人们有理由相信,今天的航天器技术还远远没有达到成熟的地步。

未来的航天器技术如何发展,这是一个非常值得今天的航天工作者思考的问题。本书作者认为:航天器在轨服务技术将是今后航天器技术最重要的发展方向之一。在未来,一旦对于航天器的在轨装配、在轨维护和后勤支持等服务,能像今天对于汽车的维修与加油那样变成常规操作,那将意味着航天器技术本身走向了成熟,人类将成为更广阔宇宙空间的主人。

航天器在轨服务技术在我国航天领域属于一个新的研究方向。本书作者在对国内外大量研究计划及实例进行归纳和总结的基础上,分析了在轨服务的概念与任务,研究了有人在轨服务与自主在轨服务的特点;并重点针对自主在轨服务讨论了可接受在轨服务航天器技术、服务航天器技术以及在轨服务操作技术等。作为我国第一部系统论述航天器在轨服务技术的学术著作,具有非常重要的意义。

本书的出版恰逢我国神舟7号飞船成功发射,我国航天员成功地

进行了舱外活动,这是我国航天史上一个新的里程碑,同时也意味着我国的航天器有人在轨服务技术有了坚实的基础。正如本书所介绍的那样,美俄等航天大国最初的在轨服务技术研究与应用都是以航天员的舱外活动为基础的。我由衷地希望,在这样一个灿烂的新起点上,我国的航天器在轨服务技术能得到更加快速的发展,愿相关领域所有的航天工作者共同为之不懈努力!



中国工程院院士
西北工业大学教授
2008 年 12 月

前 言

2007年3月8日,美国的大力神5号运载火箭携带着轨道快车计划的航天器ASTRO和NEXTSat从佛罗里达州卡纳维拉尔角空军基地发射入轨。在此后的3个月中,这两个航天器之间先后进行了自主交会与接近、自主捕获与对接、燃料在轨传输、电源和姿控计算机在轨更换等一系列在轨服务技术试验。2007年7月,在宣布试验达到预期目标、取得圆满成功之后,美国国防高级研究计划局(Department of Advanced Research Project Agency, DARPA)宣布结束轨道快车计划,为这项历时近8年、耗资3亿多美元的计划画上了圆满的句号。

与前几年国外的其他各种空间计划相比,这一计划的成功引起的反响并不算巨大,一个很突出的例证就是,这一计划并未能进入我国每年由两院院士投票评选的“世界科技十大进展”中。而在此之前,2006年美国的星尘号飞船将彗星样本带回地球、欧洲的智能1号探测器成功撞击月球,2005年美国的惠更斯号探测器成功登陆土卫6号以及“深度撞击”计划获得成功,2004年勇气号和机遇号火星车登陆火星以及卡西尼号飞船进入土星轨道,等等,均成功入选当年的“世界科技十大进展”。

但作者认为,相比于以上提到的各飞行器计划,轨道快车计划的成功作为“航天器在轨服务技术”发展的一个里程碑,其设计思想和设计方法对于未来航天技术的发展必然会产生深远而更加重要的影响。

与一般的单航天器技术不同,航天器在轨服务技术本质上是一个体系的概念,它既要考虑提供服务的能力,还要考虑接受服务的能力。因此,在开展在轨服务技术研究的时候,必须综合考虑服务系统、客户系统、在轨服务操作技术,以及相关的辅助系统等。以轨道快车计划为例,ASTRO作为提供服务的航天器,具备提供“在轨加注”和“在轨部件更换”等在轨服务的能力,而为便于接受这种在轨服务,专门设计

了可接受在轨服务的航天器 NEXTSat,其中包括接受上述服务的接口、可在轨更换的模块等。值得一提的是,该计划的倡导者认为,“可接受在轨服务”代表了未来航天器的发展方向,因此在该计划中,将上述接受在轨服务的航天器命名为“下一代航天器”(NEXTSat)。此外,在该计划的长远规划中,还设计了能在轨道上长期驻留的燃料和配件仓库,作为后勤支持的辅助系统。这也正是本书的第1个观点:必须按照体系的观点来规划和研究航天器在轨服务技术。

事实上,“在轨服务”本身并不是一个新概念,美国和苏联早在20世纪60年代载人飞船发射成功之后不久就已经开始了“在轨服务”相关技术的研究。而从20世纪90年代开始,美国航天员利用航天飞机对哈勃空间望远镜进行在轨维修以及对国际空间站的在轨组装与维护都已经成为人们耳熟能详的例子。但以往成功的在轨服务例子都是由航天员直接参与进行的,轨道快车计划的重要意义就在于,它代表了另一种思路,即以空间机器人为主体的自主在轨服务技术。在轨道快车计划中,所完成的在轨试验大部分是全自主完成的(地面人员仅对试验操作过程进行监视,不进行干预控制,可参看本书第2章)。从试验的效果来看,这一计划证明了自主在轨服务技术的可行性与优越性,必然会在全世界范围内掀起“在轨服务技术”研究的高潮。这也就是本书的第2个观点:在未来,“自主在轨服务”将可能成为航天器在轨服务更重要的一种形式。

本书的第3个观点是:“在轨服务技术”将对未来的航天器设计理念带来革命性变化。由于不考虑接受在轨服务的需求,加上现有的航天器大多为一次性使用,因此,航天器的核心设计理念就是尽可能提高其可靠性,常用的方法包括采用冗余设计、尽量采用成熟部件和成熟技术等。但是,冗余设计降低了航天器设计的灵活性,同时增加了质量和成本;采用成熟部件和成熟技术则大大限制了新技术的应用和发展。更重要的是,由于航天器设计、制造、运输、发射和空间运行存在各类不确定性因素,因此,即使采用高可靠性设计也难以保证航天器百分之百可靠,在轨运行的过程中出现各种故障及意外情况不可避免。对于部分故障问题,可以通过地面遥控进行恢复解决。而对于大部分硬件损坏、燃料耗尽问题,则地面遥控也无能为力,往往只能靠制

造和发射新的航天器来取代原有航天器,由此造成极大的经济损失。航天器在轨服务技术是解决这些问题的最有效途径之一。一旦航天器可以低成本地接受日常保养、定期维护、维修加注等在轨服务,将对于航天器的设计理念带来巨大的冲击,例如:可以适当降低可靠性的要求从而减少冗余部件,可以提高先进技术在航天器中的应用比例,快速响应市场和技术的变化,可以增强任务的灵活性和运行的简易性,可以降低对航天器元器件的寿命、可靠性等要求,甚至直接应用商用器件,从而降低研制周期和成本等。

本书的第4个也是最核心的一个观点,即“在轨服务技术”将带来航天技术的巨大飞跃。目前,有人在轨服务技术已经比较成熟,但成本高、风险大。例如,进行一次哈勃空间望远镜的维护需要花费近3亿美元。因此,在轨服务技术的巨大价值尚未得到展现。但随着技术的进步,特别是自主在轨服务技术的快速发展,在轨服务体系将不断完善,在轨服务将逐步成为一种常规技术,其服务的成本与风险也将随之不断降低。在轨服务将能够对故障或失效航天器进行维护维修,从而大大降低航天任务的风险;在轨服务能够对航天器进行保养补给,从而延长航天器的在轨寿命,降低全寿命周期费用;在轨服务能够对航天器软、硬件进行更新升级,从而保持航天器的技术先进性,提高航天器执行任务的能力;在轨服务能够对航天器进行在轨组装,由此摆脱当前发射运载器对航天器规模的限制,从而提高发展大型空间系统的水平。人们有理由相信,就像“加油站”和“汽车维修站”的普遍出现为汽车的普及和汽车行业的蓬勃发展带来巨大推动作用一样,在轨服务也将为航天器的推广应用和航天领域的飞跃发展插上前进的翅膀,为全人类的生存发展带来巨大利益。

本书的撰写正是围绕着以上4个观点展开的。全书共分为10章:第1章介绍了在轨服务的背景与基本概念;第2章概要介绍了国外在轨服务技术的研究进展;第3章进行了在轨服务典型任务的分析与规划;第4章对在轨服务的轨道动力学基础问题进行了探讨;第5章和第6章分别阐述了有人在轨服务和自主在轨服务两类在轨服务方式;第7章~第9章则重点分析了自主在轨服务的三项核心技术,即可接受在轨服务航天器设计技术、服务航天器设计技术和在轨服务

操作技术;第10章对于在轨服务未来的发展进行了展望。

本书的完成是集体智慧的结晶,除作者之外,黄奕勇、李京浩、李悦、杨维维、欧阳琦、魏月兴、傅娟等同志也做了大量工作,在此一并表示感谢。感谢侯建文、李果、孙富春、敬忠良、段广仁、谭春林、陈小武、李智、张守华、师鹏等同志给予的大力支持。最后,特别感谢中国宇航出版社邓宁丰社长与马航编辑为本书的出版所付出的大量工作。

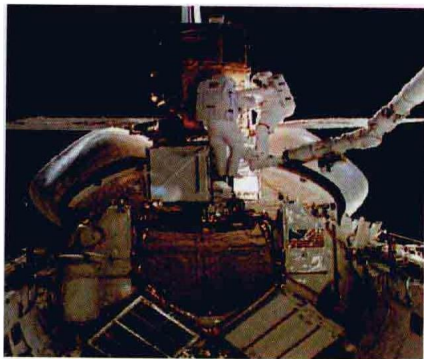
本书可供从事飞行器设计的工程技术人员参考,也可作为高等院校飞行器设计及相关专业研究生和本科高年级学生的辅助教材。希望本书的出版对于推动航天器在轨服务技术在我国的研究与应用起到良好的作用。

著者

2008年12月



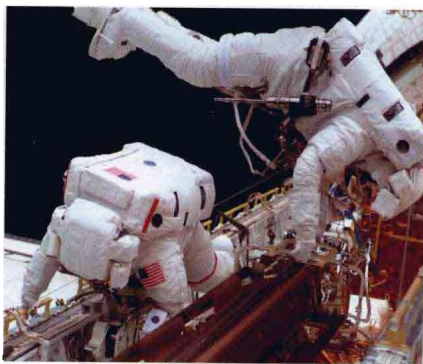
1965 年美国航天员进行的首次太空行走



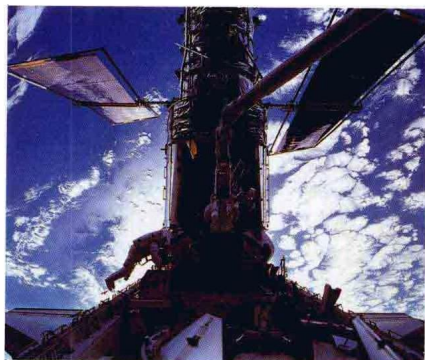
1984年美国航天员对太阳峰年任务卫星的在轨维修



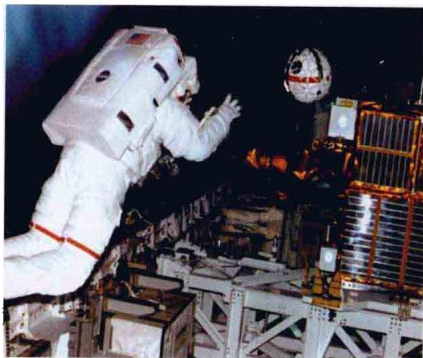
1992年奋进号航天飞机航天员对国际通信卫星 6 号进行在轨捕获和维修



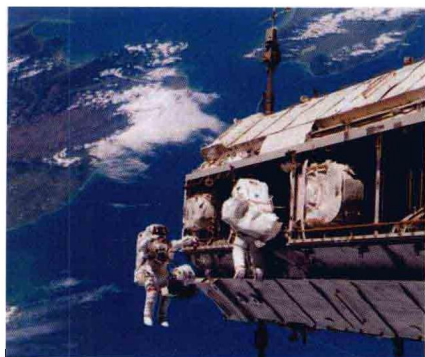
2002年为哈勃空间望远镜在轨维修并更换其太阳能电池阵



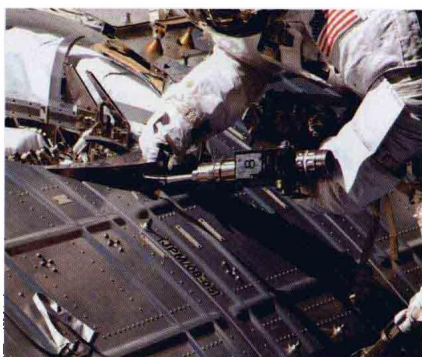
1999 年哈勃空间望远镜的第三次在轨维修



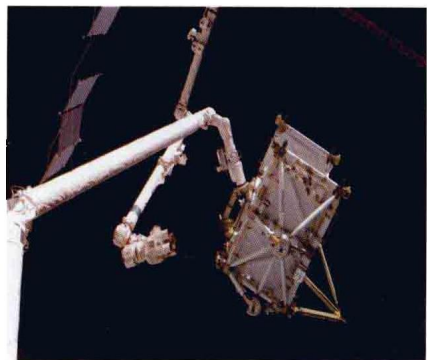
航天员在微型自主舱外机械照相机协助下进行舱外活动



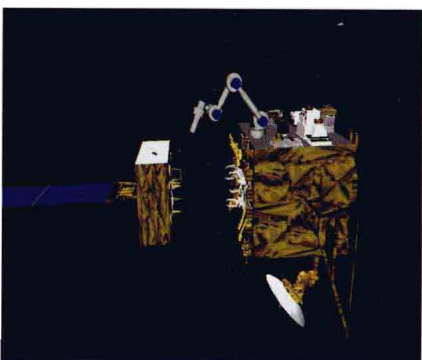
2006 年国际空间站的在轨组装



2008 年国际空间站的在轨维修



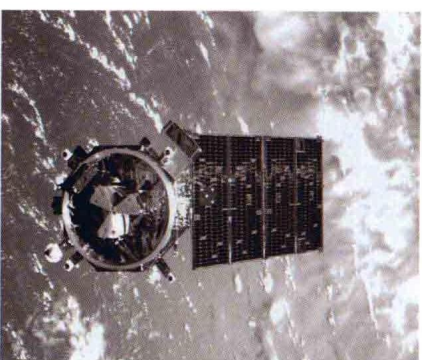
2006 年国际空间站的在轨维修，机械臂在航天员遥操作下搬运安装组件



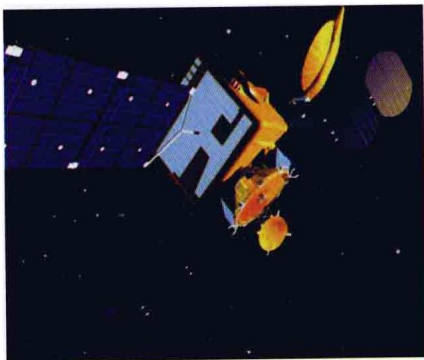
1997 年日本 ETS-VII 计划，演示空间机器人遥操作在轨服务



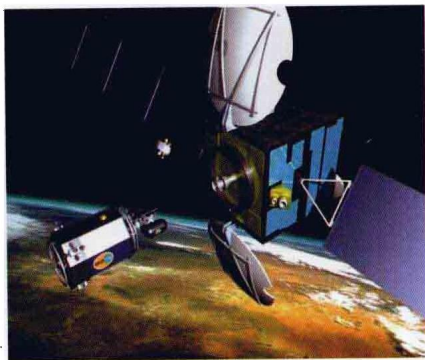
2007 年美国轨道快车计划，演示空间机器人自主目标捕获、模块更换和在轨加注等在轨服务



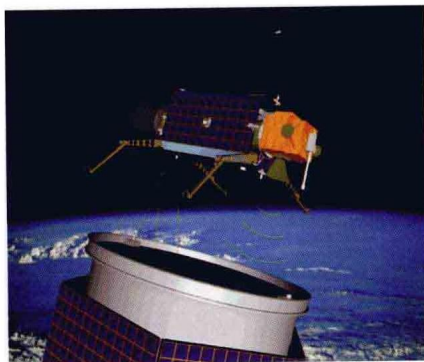
轨道快车计划中服务航天器 ASTRO 与接受服务航天器 NEXTSat 距离 14 米时拍摄的图片



计划中的欧洲轨道寿命延长系统计划 (SLES)，将支持航天器延寿和在轨营救



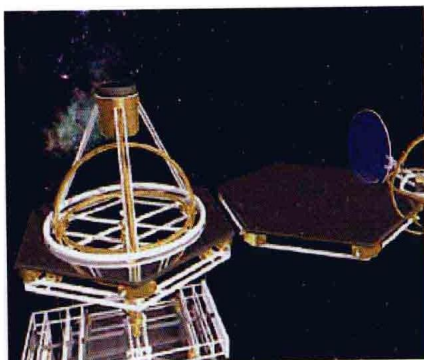
计划中的欧洲赫耳墨斯 (Hermes) 计划，将支持在轨加注和辅助变轨



在轨维修



在轨加注



在轨组装



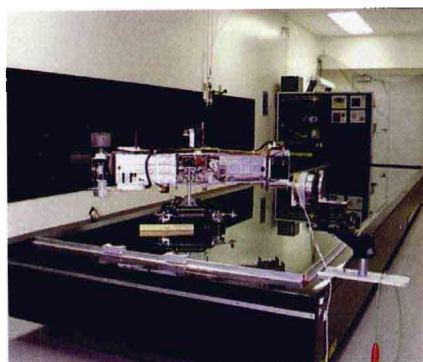
在轨监视



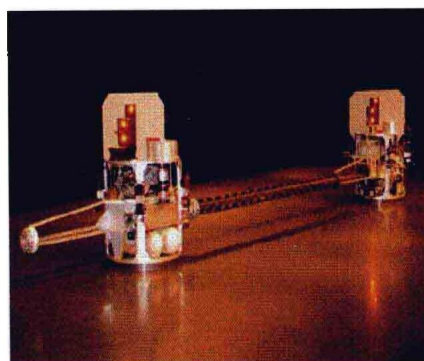
美国 NASA 的空间机器人航天员 Robonaut



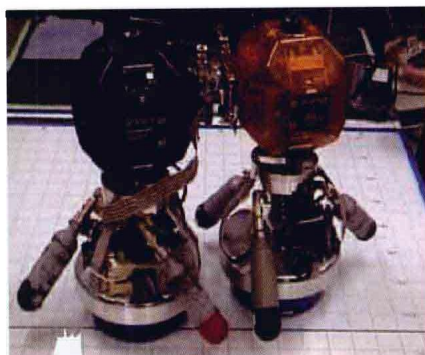
德国 DLR 的空间机器人灵巧手



美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室进行的微小卫星自主追踪与接近目标地面试验



美国NASA马歇尔航天飞行中心进行的在轨组装地面试验



美国麻省理工学院进行的SPHERE微小航天器伴飞与自主对接地面试验



美国马里兰大学进行的自由飞行机器人“巡逻兵”零浮力飞行器RNBV的地面水浮模拟试验

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 航天器在轨服务技术的研究背景	(1)
1.2 航天器在轨服务的概念	(3)
1.3 航天器在轨服务体系的组成	(4)
1.3.1 服务系统	(5)
1.3.2 客户系统	(12)
1.3.3 辅助系统	(16)
1.4 航天器在轨服务的效益分析	(18)
1.5 航天器在轨服务技术的应用前景	(20)
第 2 章 在轨服务技术研究进展	(23)
2.1 概述	(23)
2.2 美国的在轨服务技术	(25)
2.2.1 航天飞机在轨服务任务	(27)
2.2.2 空间遥操作机器人(STP)计划	(32)
2.2.3 机器人航天员计划	(38)
2.2.4 试验卫星系统(XSS)计划	(40)
2.2.5 自主交会技术验证卫星计划	(42)
2.2.6 轨道快车计划	(43)
2.2.7 部分地面试验计划	(48)
2.3 日本的在轨服务技术	(59)
2.3.1 国际空间站的日本实验舱及机械臂	(60)
2.3.2 工程试验卫星-7(ETS-VII)	(61)
2.3.3 H-2 转移飞行器(HTV)	(72)

2.3.4	轨道维护系统(OMS)	(74)
2.3.5	可重构机器人卫星簇计划	(79)
2.4	加拿大的在轨服务技术	(83)
2.4.1	航天飞机空间机械臂系统	(83)
2.4.2	国际空间站的活动服务系统	(84)
2.4.3	发展规划	(88)
2.5	欧洲的在轨服务技术	(89)
2.5.1	德国的空间机械臂技术	(90)
2.5.2	机器人技术试验(ROTEX)	(90)
2.5.3	试验服务卫星计划	(91)
2.5.4	同步卫星轨道重置机器人计划	(94)
2.5.5	轨道寿命延长系统	(95)
2.5.6	赫耳墨斯计划	(97)
2.5.7	空间系统演示验证技术卫星计划	(98)
2.5.8	自动转移飞行器	(98)
2.5.9	其他空间机械臂计划	(101)
第3章	航天器在轨服务的任务分析	(105)
3.1	在轨服务的典型任务	(105)
3.2	在轨服务的任务规划	(108)
3.2.1	服务执行方式	(109)
3.2.2	人一机服务方式	(115)
3.3	在轨服务任务的执行序列	(117)
第4章	航天器在轨服务的轨道动力学基础	(119)
4.1	在轨服务的轨道动力学问题	(119)
4.2	空间交会对接	(122)
4.2.1	空间交会	(123)
4.2.2	终端交会	(135)
4.3	在轨释放或发射	(140)
4.3.1	几何关系与坐标系	(140)

4.3.2	被释放航天器精确运动方程	(141)
4.3.3	基于极坐标的精确相对运动方程	(143)
4.4	在轨伴随运动	(144)
4.4.1	伴随航天器与主星的相对运动学关系与应用	(145)
4.4.2	伴随运动的运动学分析	(147)
4.5	在轨机动绕飞与接近	(153)
4.5.1	长期绕飞轨道设计	(154)
4.5.2	接近与机动绕飞轨道设计	(164)
第5章	有人在轨服务	(169)
5.1	概述	(169)
5.2	有人在轨服务典型应用	(171)
5.2.1	在轨维护	(172)
5.2.2	后勤支持	(176)
5.2.3	在轨装配	(177)
5.3	有人在轨服务的主要设备	(178)
5.3.1	舱外活动航天服与生命支持系统	(179)
5.3.2	空间载人机动装置	(193)
5.3.3	舱外维修工具	(200)
5.4	有人在轨服务特点分析	(204)
5.4.1	有人在轨服务的优势	(204)
5.4.2	有人在轨服务的局限	(205)
5.4.3	有人在轨服务的应用范围	(206)
第6章	自主在轨服务	(208)
6.1	概述	(208)
6.2	自主在轨服务典型应用	(211)
6.2.1	人员遥操作在轨服务	(212)
6.2.2	人员监控下自主服务	(215)
6.2.3	完全自主在轨服务	(215)
6.3	自主在轨服务的关键技术	(217)

6.3.1	客户系统	(217)
6.3.2	服务系统	(223)
6.3.3	服务操作技术	(230)
6.4	自主在轨服务特点分析	(232)
6.4.1	人员遥操作在轨服务	(232)
6.4.2	人员监控下自主服务	(233)
6.4.3	完全自主在轨服务	(235)
第7章	可接受在轨服务航天器设计技术	(238)
7.1	概述	(238)
7.2	面向在轨服务的模块化设计技术	(239)
7.2.1	典型实例	(241)
7.2.2	航天器模块化设计方法	(283)
7.2.3	航天器模块划分及体系结构	(285)
7.2.4	模块化标准接口与模块集成	(290)
7.3	ORU 模块设计技术	(297)
7.3.1	典型实例	(298)
7.3.2	航天器模块在轨可替换性分析	(300)
7.3.3	ORU 模块体系结构	(301)
7.4	先进星务管理技术	(307)
7.4.1	典型实例	(310)
7.4.2	健康管理系统总体框架	(313)
7.4.3	星务系统硬件体系结构	(317)
7.4.4	星务系统软件体系结构	(318)
第8章	服务航天器设计技术	(321)
8.1	概述	(321)
8.2	服务航天器典型实例	(322)
8.2.1	微小服务卫星	(322)
8.2.2	空间机器人	(327)
8.3	总体设计与布局	(338)