

国防科技大学学术
专著出版基金资助

空间交会对接任务规划

唐国金 罗亚中 张进 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是空间交会对接技术领域的一本专著,共分14章,主要内容包括:交会对接任务规划问题、交会对接飞行任务和飞行程序、交会动力学模型和最优交会理论、规划算法模型、线性和非线性最优交会路径规划、调相策略规划、多目标最优交会路径规划、交会中的偏差因素和偏差分析方法、交会安全性分析和设计方法、偏差路径规划、发射窗口规划、交会轨道设计以及任务规划软件等。全面系统地阐述了交会对接任务规划的问题建模、求解理论、算法模型和规划软件等内容。本书内容丰富翔实,具有较强的前沿性和实用性。

本书可供从事航天任务设计的研究人员和工程设计人员参考,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参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

空间交会对接任务规划/唐国金,罗亚中,张进著. —北京:科学出版社, 2007

ISBN 978-7-03-020110-2

I. 空… II. ①唐…②罗…③张… III. 对接(航天)-空间交会测量法 IV. P204 V526

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 182215 号

责任编辑:王志欣 王向珍/责任校对:陈玉凤

责任印制:刘士平/封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年1月第一版 开本:B5(720×1000)

2008年1月第一次印刷 印张:20

印数:1—2 500 字数:376 000

定价:60.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

序

空间交会对接是实现航天飞行器在轨组装、维修、维护、物资交换、补给以及人员访问载人航天器等高级空间操作的前提，是我国载人航天工程后续任务必须解决的关键技术。

航天飞行器空间交会对接是一项技术难度大、系统复杂性高的系统工程，需要解决一系列关键技术。空间交会对接任务规划的主要研究内容包括交会对接轨道方案设计、发射窗口规划、交会策略规划、偏差分析、安全轨道设计和实时轨道控制等关键技术问题。这些关键技术问题贯穿于交会对接设计的全寿命周期，具有相当的理论深度和技术难度。《空间交会对接任务规划》是国内第一本系统论述交会对接任务规划的专著，对交会对接任务的建模、求解理论、规划模型和算法以及规划软件等内容进行了全面、系统的阐述。

该书对航天飞行器空间交会对接任务规划的国内外发展现状进行了系统的概括和总结，涉及大量的理论问题，部分内容是作者的最新研究成果，具有较强的前沿性，同时又面向工程应用，给出了实际工程问题的求解策略，具有较高的实用价值。该书对于从事空间交会对接任务设计的工程技术人员和高等院校相关专业教师及研究生有很好的参考价值。

王永志

中国载人航天工程总设计师

中国工程院院士

2007年8月于北京

前 言

空间交会对接 (rendezvous and docking, RVD) 技术是指两个航天器 (一个称为目标航天器, 另一个称为追踪航天器) 于同一时间在轨道同一位置以相同速度会合, 并在结构上连成一个整体的技术。空间交会对接技术是载人航天三项基本技术之一, 它是实现空间站、空间实验室、空间通信和遥感平台等大型空间设施在轨装配、回收、补给、维修以及空间救援等高级空间操作的先决条件。

空间交会对接系统是一项规模宏大、复杂程度高的航天应用系统。国际上交会对接工程实践发展的经验表明, 通过地面仿真试验对交会对接系统进行论证设计和验证分析是交会对接技术研究的最佳途径。在进行地面交会对接系统设计和验证分析时, 交会对接任务规划问题是其中一个重要的研究内容。交会对接任务规划是对交会对接全过程进行规划, 在满足各种约束条件下寻找优化或可行的交会对接方案, 分析各种约束和干扰对交会对接的影响。交会对接任务规划问题包括以下内容: 目标轨道和追踪轨道方案设计问题、飞行任务编排问题、测控配置设计问题、发射窗口规划问题、交会变轨策略设计问题、交会路径偏差分析和实时对策设计问题等。

本书是以作者完成的“交会对接任务规划与仿真”相关科研成果为基础撰写的交会对接任务规划研究专著, 它系统阐述了交会对接任务规划的问题建模、求解理论、算法模型和规划软件等。本书结合作者的工作系统地总结了该领域的理论研究成果, 同时面向实际工程应用, 尽可能地给出了各类实际工程问题的求解策略。

全书共分 14 章: 第 1 章概述了交会对接技术发展概况和交会对接任务规划问题; 第 2 章介绍了交会对接飞行任务和飞行程序; 第 3 章总结了交会动力学模型和最优交会理论; 第 4 章给出了应用于交会对接任务规划求解的规划算法模型; 第 5~第 8 章给出了标称最优交会路径规划方法, 包括线性交会、非线性交会、调相策略和多目标交会等; 第 9~第 11 章给出了偏差情况下的交会路径分析和规划方法, 包括交会对接中的偏差因素和偏差分析方法、交会对接中安全性

分析和设计方法、考虑偏差鲁棒交会路径规划和实时规划等内容；第 12、第 13 章讨论了交会对接任务剖面参数规划问题，包括发射窗口规划、轨道设计和任务编排等；第 14 章介绍了交会对接任务规划软件系统。本书由唐国金制定编写提纲。第 2、第 10 章由张进、罗亚中撰写，第 12 章由周英、罗亚中撰写，其余章节由罗亚中撰写。全书由唐国金统稿和审校。

本书涉及的研究工作得到了中国载人航天工程办公室和中国空间技术研究院相关科研项目的支持，并得到中国载人航天专家和中国空间技术研究院众多专家的诸多关心和指导。同时，国防科技大学航天与材料工程学院的程文科、李海阳、周黎妮、谭丽芬、彭祺擘、李九人等审阅了初稿，并提出了宝贵的修改意见。本书部分内容参考了王忠贵、张丽艳、王华等的研究工作。在此一并向他们表示感谢。

本书的出版得到了“国防科技大学学术专著出版基金”的资助，并有幸得到我国载人航天工程首任总设计师、中国工程院院士王永志先生的关心和支持，为本书亲自作序，在此深表谢意。

由于作者水平有限，书中难免有不足之处，敬请读者批评指正。

作 者

2007 年 6 月于长沙

目 录

序

前言

第 1 章 交会对接任务规划问题	1
1.1 空间交会对接基本概念	1
1.2 交会对接技术发展现状	2
1.3 我国交会对接技术的发展概况	13
1.4 交会对接仿真技术	15
1.5 交会对接任务规划问题	22
1.6 本书的主要内容	29
参考文献	31
第 2 章 交会对接飞行任务和飞程序	35
2.1 交会对接飞行阶段划分和控制类型	35
2.2 交会对接飞行任务分类	40
2.3 典型飞程序	46
参考文献	55
第 3 章 交会动力学模型和最优交会理论	57
3.1 交会动力学模型	57
3.2 最优交会问题概述	68
3.3 最优脉冲交会理论	70
参考文献	76
第 4 章 规划算法模型	79
4.1 参数优化问题的一般模型	79
4.2 经典的非线性规划算法	81
4.3 智能优化算法	86
4.4 多目标优化算法	101
4.5 物理规划方法	106
参考文献	110
第 5 章 线性最优交会路径规划	115
5.1 线性最优交会研究进展	115
5.2 基于主矢量理论的线性脉冲最优交会	118

5.3	线性多脉冲交会非线性规划求解	122
5.4	脉冲受限的最短时间交会	124
5.5	有限推力最优交会	128
	参考文献	135
第 6 章	非线性最优交会路径规划	138
6.1	非线性最优交会研究进展	138
6.2	霍曼交会算法	140
6.3	Lambert 交会算法	141
6.4	基于 Lambert 算法的多脉冲最优交会	145
6.5	摄动和路径约束的非线性最优交会	151
	参考文献	158
第 7 章	调相策略规划	161
7.1	调相问题及研究进展	161
7.2	调相特殊点变轨规划策略	165
7.3	基于近圆偏差方程的调相策略综合变轨优化	173
7.4	基于多圈 Lambert 算法的调相策略综合变轨优化	178
	参考文献	184
第 8 章	多目标最优交会路径规划	186
8.1	交会轨道被动安全性指标	186
8.2	线性多目标最优交会	188
8.3	非线性二体多目标最优交会	193
8.4	非线性摄动多目标最优交会	200
	参考文献	205
第 9 章	交会中的偏差因素和偏差分析方法	206
9.1	偏差因素	206
9.2	偏差传播的分析方法	213
9.3	线性交会协方差分析	215
9.4	非线性交会偏差协方差分析	216
9.5	远距离导引终点偏差分析方法	222
	参考文献	230
第 10 章	交会安全性分析和设计方法	232
10.1	轨道安全及设计要求	232
10.2	保证轨道安全的防护措施	235
10.3	主动轨道防护	235
10.4	典型轨道的被动防护安全特性分析	237

10.5 被动安全交会轨道设计方法	242
10.6 避撞机动	246
10.7 各阶段轨道安全总结	248
参考文献	248
第 11 章 考虑偏差的交会路径规划	250
11.1 不确定性设计优化概述	250
11.2 燃料最优鲁棒线性最优交会规划	251
11.3 考虑偏差的线性多目标最优交会	255
11.4 考虑偏差的非线性二体交会路径规划	257
11.5 非线性交会 Lambert 实时制导算法	260
11.6 调相轨道机动实时规划算法	262
参考文献	265
第 12 章 发射窗口规划	267
12.1 影响发射窗口的约束条件	267
12.2 约束条件的数学模型	268
12.3 发射窗口的求解算法	273
12.4 算例及分析	275
12.5 小结	278
参考文献	278
第 13 章 交会对接任务剖面规划	280
13.1 目标轨道设计	280
13.2 目标和追踪轨道参数设计模型	284
13.3 交会路径编排模型	287
13.4 测控站配置规划	290
参考文献	292
第 14 章 交会对接任务规划软件系统	293
14.1 国内外交会对接任务规划软件概述	293
14.2 RVD_MPS 的开发方法	299
14.3 RVD_MPS 功能介绍	302
参考文献	306

第 1 章 交会对接任务规划问题

1.1 空间交会对接基本概念

交会对接(rendezvous and docking, RVD)技术是指两个航天器(一个称为目标航天器,另一个称为追踪航天器)于同一时间在轨道同一位置以相同速度会合,并在结构上连成一个整体的技术。空间交会对接包括两部分相互衔接的空间操作:空间交会和空间对接。所谓空间交会是目标航天器(即被动航天器)不做任何机动(或做少量机动),在已知轨道上稳定的飞行,而追踪航天器(主动航天器)执行一系列的轨道机动,与目标航天器在空间轨道上按预定位置和时间相会。交会的预定位置范围随着空间交会目的的不同有不同的规定,如以目标航天器为中心,若干公里为半径的球形范围。所谓空间对接是指在完成交会后,两个航天器在空间轨道上接近、接触、捕获和校正,最后紧固连接成一个复合航天器的过程。

一般来讲,航天器要进行空间对接,必须先进行交会,但是进行空间交会的航天器不一定要进行对接,如一个航天器向另一个航天器靠拢。空间拦截也是交会的一种形式。

从控制的观点来讲,交会和对接属于航天器轨道控制和姿态控制的范畴。这种控制对象是一个复杂的多变量系统,它具有三维相对位置和三轴相对姿态角的六个变量,如果进一步考虑两个航天器的相对运动,它涉及 12 个自由度的轨道和姿态控制问题。这就意味着交会对接涉及空间控制的整个技术内容。空间控制一般包括四个部分:①轨道确定(空间导航);②轨道控制(制导);③姿态确定(包括测量敏感器);④姿态控制。为了测量两个航天器相对距离和姿态,需要上述轨道确定和姿态确定的技术和知识,为了使两个航天器相对距离和姿态发生变化,以便交会和对接,需要上述轨道控制和姿态控制的技术和知识。交会对接,特别是自主和自动交会对接控制是空间控制全部内容的体现。

当轨道控制和姿态控制不能独立分开,或者两者不能解耦的时候,空间交会对接无论在理论上还是在技术上都是相当复杂的。由于交会对接的高精度多自由度控制难度和安全经济等因素的要求,目前对交会对接的研究方法几乎都采用系统仿真方法,以确保交会对接系统的技术性能和可靠性。

阿波罗飞船多次成功登月,俄罗斯(原苏联)和平号空间站在轨长期运行以及美国阿波罗飞船与原苏联联盟号飞船对接联合飞行,美国航天飞机与俄罗斯和平

号空间站的对接飞行等,表明美国和俄罗斯(原苏联)已经掌握了成熟的载人交会对接技术。俄罗斯(原苏联)的礼炮号和和平号空间站分别实现了自动交会对接,而且是多对接口和侧向对接,把交会对接推向了一个新水平。国际空间站的建造、组装与投入使用,充分利用了已有的成熟技术,并实现了多国航天器之间的交会对接,推动交会对接技术达到更高水平。

未来的交会对接将在全球导航系统和数据中继卫星支持下,越来越向自主自动交会对接方向发展,并且各国的交会对接技术将越来越趋向标准化。

1.2 交会对接技术发展现状

1962年8月12日,苏联发射载有波波维奇中校的东方4号飞船上天。该飞船与东方3号首次在太空实现交会飞行,最近相距5km,第一次从太空传回电视。

1966年3月16日,美国发射载有阿姆斯特朗和斯科特的双子座8号,绕地球飞行6.5圈,历时10h41min。飞行中首次实现载人飞船与一个名叫阿金纳的对接舱体对接。

1967年10月30日,苏联发射宇宙188号无人飞船。飞行49圈与宇宙186号飞船在太空实现自动对接。对接飞行了3.5h,船上电视摄像机拍摄了对接过程图像。两艘飞船还于10月31日、11月2日各自分离出一个密封回收舱返回地面。这是首次不载人航天器的对接。

1969年1月14日,苏联发射载有沙塔洛夫的联盟4号飞船升空。1月16日与联盟5号对接成功,第一次实现了两艘飞船在太空对接飞行。飞船17日返回。

1975年苏联的联盟19号飞船与美国的阿波罗飞船对接成功,实现了两国的太空握手。

1998年底,俄罗斯研制的曙光号功能货舱与美国研制的节点舱对接成功,标志着交会对接技术已经步入成熟阶段。

自从20世纪60年代以来,美苏(俄)已经进行了200多次交会对接。80年代,载人航天发展到实用阶段,永久性的载人空间站和深空探测也在蓬勃发展,这些都进一步促进了交会对接技术向更高水平、自主和自动方向发展。除了美国和俄罗斯继续大力发展交会对接技术外,西欧和日本也正在积极开展交会对接技术的研究工作。

林来兴(1995)在其专著中对20世纪90年代以前的世界各国的交会对接技术发展概况进行了详细总结,本节引用其论述对早期交会对接的发展概况作简单阐述,并补充介绍了最近十年国际上开展的交会对接工程项目。

1.2.1 美国的交会对接技术

1. 美国早期的发展概况

美国的交会对接技术在下列计划中得到了发展:

(1)阿波罗计划(1965~1972年);

(2)天空实验室(1973~1974年);

(3)航天飞机的卫星修复任务(开始于1984年的Solar Max卫星维修),航天飞机与和平号空间站对接任务(1994~1998年);

(4)航天飞机与国际空间站对接任务(1998年至今)。

美国的空间交会对接技术开始于阿波罗登月计划。为了此计划,美国做了大量技术准备,1965年3月~1966年11月,美国共进行了10次载人飞行试验,专门发射了双子星座号飞船。主要目的是在轨道上进行机动飞行、交会、对接和航天员尝试做舱外活动等。美国首次实现载人交会对接是在1966年3月,利用发射双子星座号飞船的第三级火箭阿金纳作目标航天器,双子星座号飞船作追踪航天器,采用交会微波雷达和电视摄像机作为测量敏感器。对接机构为“锥-环”结构形式,它由一个捕获环机构和一个对接锥机构组成。捕获环装在双子星座飞船的通道口上,阿金纳尾部装有一个大型的对接锥。对接采用自动和航天员手动两种操作,对接后自然形成航天员通行通道。

空间交会对接技术在美国阿波罗计划中得到了工程实践和发展。阿波罗飞船登月往返飞行一趟,需要在空间进行两次交会对接。第一次指挥舱和服务舱需要调头180°,先分离,然后与登月舱对接。由于两舱活动距离很近,这次主要是对接技术。第二次是登月舱返回月球轨道,先与在轨道上的指挥舱和服务舱交会,然后登月舱与指挥舱和服务舱实现对接。阿波罗飞船对接机构采用一种“栓-锥”结构形式。栓装在阿波罗飞船指挥舱的通道里,锥装在登月舱通道内。当航天员从指挥舱进入登月舱时,要人工拆卸对接栓和导向锥结构,并移出通道。阿波罗飞船对接机构不具备互换性能,也就是说追踪航天器与目标航天器的对接面 and 对接机构不同。

从1969年7月16日成功发射阿波罗11号飞船到1972年12月为止,美国相继7次发射阿波罗登月飞船,其中6次登月成功。这说明阿波罗飞船所使用的交会对接设备和技术是完全可靠的,而且适合多次使用。

美国继阿波罗飞船登月以后,在1973年5月14日又成功发射了天空实验室,这是美国第一个实验性空间站。为了运送和接回空间站的航天员,美国同年先后发射了3艘阿波罗飞船与天空实验室进行交会对接。天空实验室专门设有一个对接舱,称为“多用途对接舱”,该舱能同时提供两个对接口,一个沿纵轴方向,另一个

在侧面。此外,该舱还可以作为实验设备和胶卷盒等物品的储藏室。

天空实验室对接机构和阿波罗登月所使用的对接机构基本上相同,但是在对接技术上有两大发展:首先,对接口有两个,天空实验室设计上要考虑同时接受两个航天器的连接;其次,天空实验室是一个多体组合航天器,它由轨道舱、过渡舱、多用途舱、多用途对接舱和大型挠性太阳望远镜以及阿波罗飞船五大部分组成,在交会对接过程中需要考虑多体和挠性动力学的影响。

1975年7月15日由美国阿波罗飞船和苏联联盟19号飞船在空间进行的交会对接,在世界航天史上留下了精彩的一笔:利用交会对接技术实现了美国和苏联的太空握手。

苏联首先发射联盟号飞船,经过两昼夜的飞行,过渡到225km的交会圆轨道,在这里同阿波罗飞船对接。阿波罗飞船完成逼近操作所必需的机动飞行后,在飞行的第36圈(即联盟号起飞后51h55min)两飞船进行对接。联合飞行两昼夜,两船分离,再次进行对接。第一次联盟号飞船作为目标航天器,阿波罗飞船作为追踪航天器。第二次,阿波罗飞船作为目标航天器,联盟号飞船作为追踪航天器。

这次阿波罗飞船与联盟号飞船的交会对接,除了对交会对接技术的发展起了很大的推动作用外,对航天技术和航天设备的相容性也提出了很高的要求,并且找到了工程解决途径。

1984年1月,美国总统里根正式下令研制永久载人空间站,此后邀请加拿大、西欧及日本等盟国参加空间站的建设,该空间站即自由号空间站,也是现在的国际空间站(少数媒体称阿尔法空间站,图1-1)的原型。航天飞机和正在轨组装的国际空间站的交会对接是美国当前交会对接研制的最大的一个工程项目。

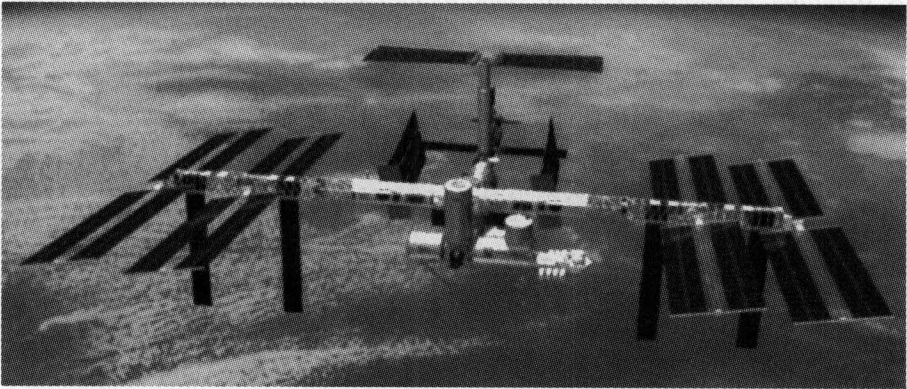


图 1-1 国际空间站

在航天飞机和国际空间站的交会对接中,美国继承了阿波罗飞船和天空实验室手动操作交会对接的成熟经验,仍采用手动为主的控制策略。由于受美国航天

飞机结构形式的限制,航天飞机和国际空间站采用垂直接触方式。以前美国进行的对接都是水平(或称为轴向)方式的,其优点是在飞行方向(轴向)上进行,对接受力近轴线,邻质心,具有较小的干扰力矩,这对航天器姿态稳定和控制大有好处。而垂直接触方式,由于对接时冲击力作用点偏离航天飞机的质心,将产生旋转力矩,这对交会对接姿态控制和稳定带来不利影响。1998~2006年,航天飞机共完成了20次与国际空间站的交会对接。

2. 最近十年的发展概况

最近十年,美国除持续进行了航天飞机与国际空间站的交会对接飞行外,还着力发展了自主交会对接技术(Machula et al.,2005;Zimpfer et al.,2005;Machula et al.,2004;Rumford,2002;Gottselig,2002),有关的项目包括:

- (1)自动交会技术验证(demonstration of autonomous rendezvous technology,DART);
- (2)试验卫星系列(experimental small system,XSS);
- (3)轨道快车(orbital express)卫星服务演示计划。

在俄罗斯较早地掌握了无人驾驶飞船的自动对接技术的情况下,美国国家航空航天局(NASA)很早也意识到,需要一艘能够自动导引对接和停靠的机器人航天器。美国轨道科学公司的DART计划是在NASA的“航天发射倡议”(目的是研制第二代可重复使用运载器)下进行的,用来为NASA第二代可重复使用运载器提供交会领域所需的关键技术。作为研制计划的一部分,轨道科学公司使用由马歇尔航天中心制造的交会传感器,该传感器已在航天飞机的STS-87和STS-95航天飞行任务中成功地得到验证。同时还使用马歇尔航天中心开发的飞行软件进行自主交会和接近操作控制。2003年哥伦比亚号航天飞机失事后,NASA加速了DART航天器的开发进程。

DART航天器长约1.8m、直径0.9m,呈圆柱形,航天器的质量约为360kg。圆柱形的第四级飞马座火箭附着在一个稍窄的圆柱形结构上,这个碳纤维结构支撑着DART航天器的实验制导传感器和推进系统。第四级火箭在整个任务中始终保持与DART航天器结构相连,两者可视为一个航天器。第四级火箭包含一个飞行计算机,它将使用轨道公司编写的11万行软件代码进行实验。第四级火箭还使用了肼推进器,试验开始后,推进器将DART航天器推离约480km的停泊轨道,飞向名为MUBLCOM(multipath beyond-line-of-sight communications,多路径超视距通信)的一颗退役军事卫星。试验结束时,第四级火箭将把DART航天器送回地球,以使它不会成为危险的太空碎片。根据要求,它必须重返大气并在25年内烧毁。DART航天器最早定于2004年10月26日进行发射,但因MUBLCOM的GPS问题而推迟,最终于2005年4月15日进行了首次试验,由于

航天器推进剂消耗额大幅度增加,任务提前结束,DART 仅获得部分成功,即仅验证了一个完全由计算机控制的航天器能够在太空中定位一颗卫星。NASA 公布的事态调查报告显示,软件失灵、继而导航失误,以及燃料额外消耗导致 DART 试验失败。

试验卫星系列是美国空军研究实验室、空军航天与导弹系统中心、海军研究实验室等机构联合开展的一项研究项目。美国实施试验卫星系列项目计划的目的是研制一种全自主控制的微小卫星。这种卫星具有在轨检查、交会对接以及围绕轨道物体近距离机动的能力。这种微型卫星最终将增强美国空军航天司令部执行太空维修、维护以及其他特殊任务的能力。XSS-10 系统是 XSS 系列计划中的第一个系统。XSS-10 微小卫星是该系统中的第一颗微小卫星,于 2003 年 1 月 29 日与导航卫星 GPS-2R8 一起由德尔它-2 型运载火箭发射入轨,主要用来演示验证空间航天器之间的近距离检查操作以及自主导航等技术。

建立在 XSS-10 技术基础上的 XSS-11 系统(图 1-2)不同于 XSS-10 的最大特点是可在轨运行最少一年并可对多个目标实施紧密接近操作。XSS-11 系统的主要目的包括以下几方面:①检查飞行物体的状态(包括获取临近飞行物体的照片);②协助地面操作人员对在轨卫星进行综合诊断,为未来在轨维修飞行系统奠定基础;③实现自主共轨式飞行的能力;④实现太空航天器燃料补给操作。XSS-11 计划的主要任务是验证星载监视设备对目标的监视能力、验证先进的轨道机动和位置保持能力、演示其自身对空间威胁的感知能力、感知自身是否受到干扰或激光武器的攻击。因此,XSS-11 试验的实质就是结合太空的自主交会控制与对接技术开展如下演示验证试验:①演示空间自主交会;②演示鲁棒性、自主性和接近空间目标的持续时间;③演示接近空间目标的控制与管理方法的可用性;④探索低成本太空集成与制造卫星技术的可行性。

XSS-11 卫星原计划于 2004 年 11 月 9 日发射,后来推迟到 2005 年 4 月 11 日发射。用人牛怪火箭从美国范登堡空军基地成功发射入轨。XSS-11 卫星按照预先制定的程序进行接近美国废弃火箭的试验(演示 XSS-11 卫星自主与附近空间目标会合的能力)。星箭分离后,XSS-11 卫星环绕人牛怪火箭上面级飞行(绕飞)。试验结果优于预期结果。燃料消耗和效率均较理想,未出现重大技术故障和异常。

在执行任务期间,卫星与位于同一轨道内的六七个空间物体进行了自主交会,包括失效的火箭上面级与休眠卫星。XSS-11 卫星的首次交会任务在上天后的 3~6 周内进行。卫星在距离人牛怪火箭上面级 1.6km 的位置与其进行交会,后来与人牛怪上面级又交会三四次,交会距离近至 0.5km,以测试交会敏感器及其相关技术。在为期 12~18 月的飞行中,每次交会试验都有几个确定的演示目标,如使用不同的传感器、不同的制导算法等。卫星还与数个临近其轨道的美国发射的太空物体进行会合和接近,演示验证更高的自主性。XSS-11 卫星由人工控制飞

行,美国地面控制中心主动参与任务初期的交会。地面上的每一位工程师依靠计算结果进行航向修正。因为 XSS-11 卫星运行性能良好,加上星载自主能力的提高,地面控制中心执行控制任务的试验队员先从最初的 30 人减为 15 人,后来又再次减少,直至由卫星在无人参与的情况下完成交会。

美国国防高级研究计划局早在 1999 年就公布了“轨道快车”计划(图 1-3),目的在于开发研究未来空间在轨补给和修复与重构技术,并且通过在轨飞行演示和验证达到发展该技术的目的,重点突破利用交会对接技术的卫星在轨服务技术。在轨飞行演示具体的要求包括:①研制和验证非专业卫星在轨服务接口技术的要求与指标;② 研制和验证自主交会对接的制导、导航与控制(GNC)系统,以及追踪星(服务星)和目标星技术;③ 在轨飞行验证自主交会、靠近操作技术以及捕获与对接方式;④在轨飞行验证燃料输送(从追踪星到目标星);⑤ 在轨飞行验证轨道更换单元(ORU)输送。“轨道快车”计划需要研制 2 颗卫星,1 颗称为“自主空间运输和机器人轨道器”(ASTRO),也就是交会对接追踪星;另 1 颗称为目标星(NEXTSat),它是 1 颗接受追踪星提供服务、模拟需要维修或补给的卫星。追踪星由六个模块组成:卫星平台、燃料输送系统、轨道更换单元、对接机械臂系统、交会、接近传感器和捕获系统。为了满足飞行演示的目的,“轨道快车”安排了 20 项有关自主交会对接在轨飞行的演示和试验。

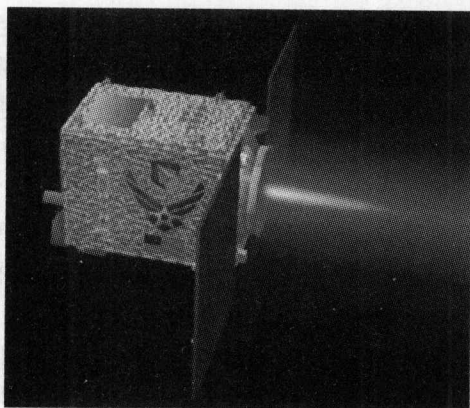


图 1-2 XSS-11 卫星



图 1-3 “轨道快车”试验卫星

“轨道快车”计划分为两个阶段:第一阶段为概念研究阶段(2000 年 9 月~2002 年 2 月);第二阶段为工程研制阶段(2002 年 3 月~2005 年 3 月)。“轨道快车”试验卫星原定 2006 年 9 月由波音公司建造的德尔它-4 型火箭发射,但因波音公司的不道德行为,受到美国空军的制裁,最后改由洛克希德-马丁公司建造的宇宙神-5 型火箭发射。2007 年 3 月 8 日晚,美国的宇宙神-5 型火箭在卡纳维拉尔角

发射升空。该火箭携带 6 颗卫星,其中 2 颗就是“轨道快车”试验卫星。

1.2.2 俄罗斯(原苏联)的交会对接技术

俄罗斯(原苏联)的交会对接技术在下列计划中得到发展:

- (1)飞船与飞船交会对接(1967~1971 年);
- (2)礼炮号系列空间站(1971~1986 年);
- (3)联盟号、进步号与和平号空间站的交会对接(1986~2001 年);
- (4)联盟号、进步号与国际空间站的交会对接(1998 年至今)。

俄罗斯(原苏联)是世界上进行交会对接活动最多的国家。无人航天器自动交会对接于 1967 年首先在苏联实现。在这以后,原苏联航天器交会对接经常采用自动方式。到目前为止,俄罗斯自动交会对接技术水平一直处于世界领先地位。在此以前,1962 年苏联在东方 2 号和东方 3 号第一代载人飞船上就进行了空间编队飞行,这种编队飞行对空间交会技术要求比较低。

原苏联在发射联盟 4 号和 5 号飞船中首次使用载人航天器的交会对接技术。交会对接采用手动和自动接合的方式。航天员根据交会雷达测量的距离与相对速度和光学瞄准器来机动飞行,也就是改变两个航天器的距离,使它们交会。飞船姿态是根据姿态敏感器和速率陀螺测量信息实现自动控制的。对接机构采用一种“撞杆-接收锥”结构。一艘飞船在对接面装有接收锥形体,另一艘飞船在接收面装有碰撞杆。在航天器最后接近时,碰撞杆渐渐指向接收锥内,接收锥将杆锥锁定,然后收缩对接杆长度,最后在结构上实现全部对接。这种对接机构的特点是,能吸收两航天器对接相碰和相互振动所产生的能量,能实现刚性连接。但是这种对接机构不具备既有主动又有被动的能力,即两个对接面机构不能互换,在空间活动中难以实现营救。

联盟号飞船交会对接方式基本上采用视线运动平行控制,这种过程有手动和自动两种方式。若采用手动方式,则航天员借助电视摄像机和光学瞄准器,以目视方式,手动操作轨道和姿态控制执行机构,从而达到对接。若采用自动对接,则飞船相对距离和姿态的测量在采用雷达的基础上,还需要附加各种天线测量设备,以便获得满足需要的轨道位置和姿态变化信息。以上这种交会对接控制方式经过联盟号飞船试验、应用和发展,形成了原苏联主要交会对接技术,一直沿用至今。

1971 年 4 月 19 日,苏联首次发射了世界上第一个空间站——礼炮 1 号。这个空间站曾经有联盟 10 号和联盟 11 号两艘飞船与它对接。到 1982 年 4 月 19 日,苏联成功发射礼炮 7 号为止,总共发射了 9 个空间站,即礼炮 1~7 号以及宇宙 557 号和宇宙 1443 号两个航天器,礼炮 1~5 号属于第一代空间站,称为实验性空间站。这种空间站,只有一个对接口,是单模块的,无法进行专门补给。礼炮 6 号、礼炮 7 号为第二代空间站,称为简易空间站。这种空间站,相对于第一代,主要的