



· 总装部队军事训练“十二五”统编教材 ·

交会对接轨道 控制规划

JIAOHUI DUIJIE GUIDAO KONGZHI GUIHUA

李革非 主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

总装部队军事训

材

交会对接轨道 控制规划

李革非 主编

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

交会对接轨道控制规划 / 李革非主编. — 北京:
国防工业出版社, 2016. 9

总装部队军事训练“十二五”统编教材

ISBN 978 - 7 - 118 - 11053 - 1

I. ①交... II. ①李... III. ①交会对接 - 航天
器轨道 - 航天测控 IV. ①V526②V556.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 223096 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 880 × 1230 1/32 印张 7 字数 208 千字

2016 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 21.00 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

总装备部军事训练统编教材
编审委员会
(2014)

主任委员	张学宇		
副主任委员	王福通	蔡洙虎	
委 员	钟方平	张海洋	刘卫东
	李恒年	王泽民	姚志军
	吴颖霞	汪连栋	单志伟
	康建勇	姜国华	真 溱
	童 斌		
秘 书	石根柱	欧阳黎明	

交会对接轨道控制规划

主 编 李革非

副 主 编 谢剑锋 宋 军

编写人员 李革非 谢剑锋 宋 军

张 磊 颜 华 李翠兰

主 审 李恒年

前 言

航天器交会对接技术是航天工程中的一项关键技术,是空间组装、在轨服务、卫星捕获等各种复杂航天任务的基石,而交会对接轨道控制规划则是决定交会对接任务成败的核心技术。我国已多次成功实施载人航天工程交会对接任务,在航天器交会对接轨道控制规划领域积累了丰富的成果。这些研究成果不仅保证了我国载人航天工程第二步一阶段的交会对接任务的成功,还将会在后续空间实验室、空间站工程以及其他工程中得到进一步验证。本书作者来自北京航天飞行控制中心,长期从事航天器轨道控制规划,在系统总结以往成果的基础上撰写了本书,供航天器交会对接领域的研究设计人员和工程实施人员使用。

本书在阐述交会对接轨道控制基本概念、原理和方法的基础上,从总体分析、数学建模、策略制定、实时规划等方面系统介绍了交会对接轨道控制规划关键技术。书中内容兼具前沿性和实用性,对交会对接任务全寿命周期的轨道控制规划技术进行了论述,在问题建模、求解理论、算法模型和规划设计等方面进行了深入研究,仿真分析案例丰富,可为交会对接轨道控制规划提供专业理论指导、方案设计和任务实施参考。

本书共分9章,由李革非完成大纲编写和审改。第1章、第3章、第5章由李革非编写;第2章由宋军、张磊编写;第4章、第6章由李革非、宋军编写;第7章由李革非、谢剑锋编写;第8章由李革非、颜华编写;第9章由谢剑锋、李翠兰编写。李革非、宋军完成统稿和校对,李革非完成终版的审改,李恒年完成主审。

本书初稿完成于2014年底,经修改补充和完善,终稿完成于2015年底。总装备部教材办李国华高工提出了许多宝贵意见,北京航天飞行控制中心的领导和机关给予了大力支持,在此致以深深的谢意。

限于作者水平和书中涉及的数学模型及算法较多,难免存在不足甚至谬误之处,恳请读者批评指正。书中引述或有遗漏,也在此向相关学者表示歉意和感谢。

李革非
2015年12月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 交会对接技术	1
1.1.1 国外交会对接技术发展和现状	1
1.1.2 我国交会对接技术发展和现状	6
1.2 交会对接轨道控制规划技术	7
1.2.1 交会对接飞行阶段划分	7
1.2.2 交会对接任务剖面规划和轨道机动规划	10
1.3 本书主要内容	12
第 2 章 交会对接轨道控制基础	15
2.1 轨道摄动动力学模型	15
2.1.1 摄动运动方程的解析计算方法	16
2.1.2 摄动运动方程的数值计算方法	18
2.2 交会轨道动力学模型	20
2.2.1 C-W 相对轨道动力学模型	20
2.2.2 近圆偏差动力学模型	22
2.2.3 椭圆轨道相对运动动力学模型	24
2.3 交会调相策略	26
2.3.1 调相基本原理	26
2.3.2 调相特殊点变轨策略	28
2.3.3 调相综合变轨策略	30
2.4 交会远距离导引规划求解方法	33
2.4.1 采用柱坐标描述的近圆偏差方程	33
2.4.2 采用轨道根数描述的近圆偏差方程	44
2.4.3 近圆偏差方程的求解	52

2.4.4	近圆偏差方程的变轨策略规划	58
2.4.5	脉冲解向有限推力解的转化	63
第3章	交会对接发射窗口规划	67
3.1	发射窗口约束条件	67
3.2	发射窗口计算模型	68
3.2.1	轨道日照角模型	68
3.2.2	阳光抑制角模型	69
3.2.3	轨道共面模型	70
3.3	发射窗口规划方法	72
3.3.1	目标器发射窗口	72
3.3.2	追踪器发射窗口	72
3.3.3	追踪器与目标器共面发射窗口	74
3.4	仿真分析	74
3.4.1	发射窗口计算	74
3.4.2	发射窗口验证	82
第4章	目标器交会对接轨道控制规划	86
4.1	目标器交会对接轨道特性要求	86
4.1.1	目标器的轨道选择	86
4.1.2	轨道相位设计	90
4.2	轨道控制算法	92
4.2.1	共面及相位计算模型	92
4.2.2	高度、相位、偏心率联合求解模型	93
4.3	轨道控制策略	96
4.4	仿真分析	97
4.4.1	标称共面与虚拟共面的比较	97
4.4.2	目标航天器轨道控制算例	98
第5章	追踪器远距离导引轨道控制规划	102
5.1	远距离导引轨道设计	102
5.1.1	远距离导引设计约束条件	103
5.1.2	交会对接轨道设计	104
5.1.3	追踪器入轨轨道设计	104

5.1.4	远距离导引段终点状态设计	105
5.1.5	远距离导引轨道机动设计	105
5.2	远距离导引轨道机动规划	108
5.2.1	轨道机动规划变量求解算法	108
5.2.2	轨道机动规划策略	112
5.3	仿真分析	120
5.3.1	标称初始轨道的控制分析	120
5.3.2	偏差初始轨道的控制分析	122
第6章	追踪器寻的导引轨道控制规划	125
6.1	寻的段轨道特性要求	126
6.2	轨道控制算法	127
6.2.1	双脉冲控制量的初值求解	127
6.2.2	首脉冲控制量的比例修正	129
6.2.3	水平双脉冲控制时刻的求解	129
6.3	轨道控制策略	132
6.4	仿真分析	133
6.4.1	寻的导引水平双脉冲算例	133
6.4.2	不同目标器轨道水平双脉冲算例	137
第7章	联合飞行轨道控制规划	139
7.1	组合体与飞船联合轨道控制规划	139
7.1.1	组合体与飞船轨道特性要求	139
7.1.2	轨道控制算法	140
7.1.3	轨道维持策略	144
7.1.4	仿真分析	146
7.2	伴随绕飞轨道控制规划	153
7.2.1	伴随绕飞轨道特性要求	153
7.2.2	摄动因素对伴随绕飞的影响	156
7.2.3	接近和绕飞轨道控制算法	159
7.2.4	绕飞保持轨道控制算法	162
7.2.5	仿真分析	165
第8章	远距离导引终点误差分析	171

8.1	远距离导引终点的误差因素	171
8.2	飞行控制过程分析和建模	173
8.2.1	飞行控制过程分析	173
8.2.2	飞行控制过程建模	174
8.3	误差因素描述形式	176
8.3.1	变轨策略	176
8.3.2	定轨误差形式	177
8.3.3	模型误差形式	179
8.3.4	控制误差形式	179
8.4	仿真分析	182
8.4.1	蒙特卡罗法仿真	182
8.4.2	边界条件法仿真	184
第9章	安全轨道设计及控制规划	186
9.1	追踪器与目标器的安全轨道设计	186
9.1.1	轨迹安全性设计	186
9.1.2	轨迹偏差分析	188
9.1.3	轨迹偏差保护策略	189
9.1.4	轨迹碰撞规避机动	194
9.2	空间碎片规避轨道控制规划	195
9.2.1	碎片碰撞预警分析	195
9.2.2	碎片规避机动方法	198
9.2.3	碎片规避机动策略	204
9.2.4	仿真分析	205
参考文献	210

第 1 章 概 论

1.1 交会对接技术

航天器空间交会对接(Rendezvous and Docking, RVD),是实现航天器在轨组装、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任务必须解决的关键技术。

交会对接技术是指两个航天器(目标航天器和追踪航天器)于同一时间在轨道同一位置以相同速度会合,并在结构上组合成一个整体的技术。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。空间交会是指目标航天器(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的目的不同的规定,如以目标航天器为中心,若干千米为半径的球形范围。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。

1.1.1 国外交会对接技术发展和现状

自从 20 世纪 60 年代以来,美苏(俄)已经进行了近 300 次交会对接。20 世纪 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,欧洲和日本也正在积极开展交会对接技术的研究工作。

1.1.1.1 美国的交会对接技术

美国的交会对接技术在诸多空间计划中得到了发展,如“阿波罗”计划(1965—1972年)、天空实验室(1973—1974年)、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)、航天飞机与国际空间站对接任务(1998—2011年)等。

美国的空间交会对接技术开始于“阿波罗”登月计划。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。

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。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,美国开始研制永久载人空间站,此后,邀请加拿大、西欧及日本等参加空间站的建设,该空间站即“自由”号空间站,也是现在的国际空间站的原型。航天飞机和在轨组装的国际空间站的交会对接是美国交会对接的最大的一个工程项目。1998—2006年,航天飞机共完成了20次与国际空间站的交会对接。

近些年,美国除持续进行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,有关的项目包括自动交会技术验证(Demonstration of Autonomous Rendezvous Technology, DART)、试验卫星系列(Experimental Small System, XSS)、轨道快车(Orbital Express)卫星服务演示计划。

1.1.1.2 俄罗斯(苏联)的交会对接技术

俄罗斯(苏联)的交会对接技术在以下计划中得到了发展:飞船与飞船交会对接(1967—1971年)、“礼炮”号系列空间站(1971—1986年)、“联盟”号/“进步”号与“和平”号空间站的交会对接(1986—2001年)、“联盟”号/“进步”号与国际空间站的交会对接(1998年至今)。俄罗斯(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,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。

苏联在第一代和第二代空间站先后11年期间进行的交会对接活动不下70次,其中公开报道交会对接失败的有八九次,主要发生在初期阶段。“礼炮”6号空间站与各种航天器进行过32次交会对接。“礼炮”7号空间站与各种航天器进行了25次交会对接。

1986年2月,苏联成功发射了“和平”号空间站,它属于第三代空间站——永久性载人空间站。“和平”号空间站从发射到2001年3月坠毁,前后与它进行的交会对接达30多次。“和平”号空间站的这些交会对接活动把世界交会对接技术推到一个崭新的水平。1995年2月6日,“发现”号航天飞机到达“和平”号空间站最近的距离11.3m,进入停靠阶段,航天飞机与“和平”号空间站进行了交会和停靠飞行。这是美国航天飞机与俄罗斯“和平”号空间站的首次交会飞行。1995年6月29日,“阿特兰蒂斯”号航天飞机与“和平”号空间站实现了首次对接。

1993年10月16日,美国、欧洲、日本和加拿大等成员正式接受俄罗斯为空间站的合作伙伴,俄罗斯成为国际空间站的一员,并在其中发挥着重要作用。

1.1.1.3 欧洲的交会对接技术

欧空局(ESA)从事航天活动虽然比美国和俄罗斯(苏联)晚,但是航天技术发展很快,大有超越美、俄的势头。尽管西欧各国至今尚无自己的在轨交会对接活动,但研制工作和地面试验在20世纪80年代就已经开始了。其交会对接主要采用自主自动方式,应用了多项新技术。

为了实现从参加美国“自由”号空间站起步,从而建立自主的载人航天系统的计划,1987年11月,欧空局成员正式批准了“阿里安”(Ariane)-5运载火箭,“使神”号(Hermes)航天飞机和“哥伦布”(Columbus)空间站三项载人航天计划。为了实现这些计划,欧空局对自动交会对接技术进行了多方面的研究。但是“使神”号航天飞机和“哥伦布”空间站计划相继取消。最近十几年内,欧空局的交会对接技术项目主要是研制自动转移航天器(Automated Transfer Vehicle, ATV),主要用途是作为往返国际空间站的货运飞船。ATV于2008年发射,并于4月成功与国际空间站对接。ATV的优势在于,它是迄今为止运载能力最强的飞船。在未来,经过改进的ATV有可能成为往返地球和月球的运输器。ATV的另一优势是具有自动交会对接能力,与国际空间站对接时不需要航天员或地面操作人员的干预。

1.1.1.4 日本的交会对接技术

日本的交会对接技术主要在两项具体交会对接工程任务中得到发展。

(1) 研制日本空间实验舱控制设备和控制技术,发射后与国际空间站进行交会对接,这种对接技术和美国航天飞机与空间站的交会对接技术基础一样,即先交会,后停泊在空间站附近,最后由空间站机械臂抓获,按要求组装在空间站上。

(2) 为了研究用于对国际空间站补给的H-II运输航天器(H-II Transfer Vehicle, HTV),日本将独立研制一套交会对接系统。

HTV是日本最新研制的飞船,其主要目的是向国际空间站运输货物,与日本空间实验舱进行对接。由于日本的空间实验舱和HTV都是无人航天器,因此日本第一代交会对接系统将重点突破不载人航天器自主交会对接的关键技术。HTV于2009年9月11日成功发射,7天后成功与国际空间站对接。

1.1.1.5 快速交会对接技术

美、俄(苏)两国航天器交会对接技术的发展变化,大致可以分为三个阶段:一是交会对接技术发展期,该阶段主要开展技术验证试验,交会对接过程在一天内完成;二是以空间站和航天飞机应用等为主的交会对接技术成熟期,该阶段交会对接过程持续两天;三是以自主交会

为特征的拓展期,该阶段航天领域科技水平的不断提升使得大型航天器的快速交会对接成为现实。

1) 发展期

苏联发展了两种交会对接方式,分别是直接交会对接和一天交会对接。直接交会对接是指后发射的航天器入轨后,直接进入先发射航天器的交会雷达系统作用距离范围内,然后进行自动交会对接。1967年10月,试验飞船“宇宙186”号和“宇宙188”号采用该方式完成了世界上第一次无人航天器自动交会对接,全过程仅用了62min。6个月 after,“宇宙212”号和“宇宙213”号又进行了类似的交会对接试验,取得了成功。

一天交会对接是指在地面测控网的支持下,两个航天器采用一天调相策略进行交会对接。该方式要求极高的地面测控能力,并且在轨目标航天器需要提前进行轨道调整。“联盟”号飞船和“礼炮”号空间站采用该方式实现了交会对接。在苏联地面测控网的支持下,航天器每天的不可见圈数只有两圈,并且在“联盟”号发射前15~30天就开始对“礼炮”号进行轨道调整。

美国在初期也发展了快速调相的交会对接方式,并在“双子星座”号飞船和“阿金纳”目标航天器的交会对接任务中采用。这种快速调相方式,有其自身的特殊性,主要是卡纳维拉尔角发射场位置合适,能够在很短间隔内(一天以内)连续发射两个航天器,并且入轨后两个航天器之间的相位角很小。“双子星座”号飞船的交会对接成果应用到了天空实验室的交会对接任务中,1973年5月、7月和11月,“阿波罗”飞船三次与天空实验室交会对接,均采用了5圈快速调相策略,以7月份的交会对接任务为例,耗时8h30min。

2) 成熟期

俄罗斯(苏联)发展了两天交会对接方式,主要是因为大型航天器“和平”号空间站的发射升空。相比“礼炮”号空间站,“和平号”空间站更大、更重,若采用一天交会对接,在当时为了交会对接而提前对“和平”号空间站进行轨道调整具有很大难度,因此调整了调相策略,一天交会对接改为了两天33圈交会对接。相比一天交会对接,两天交会对接无需对在轨目标航天器提前进行轨道调整,节省了空间站的燃

料,并且能够应对处理突发事件或者是发射时间的改变等。

此期间的美国,因为天气等原因,航天飞机的发射推迟的现象经常出现,因此,在航天飞机和“和平”号空间站,以及之后和国际空间站的交会对接中,美国也采用了两天交会对接方式。

3) 拓展期

两天交会对接具有很多优点,但对于载人交会对接任务而言,狭小空间内的两天太空飞行对航天员是个很大的考验。随着科技水平的发展,美国和俄罗斯具备了大型航天器的快速交会对接能力,如高精度发射入轨、在轨的高精度制导导航控制自主计算执行等,凝聚了高科技的新的快速交会对接顺势而生。

2012年8月2日,俄罗斯进步M-16M飞船和国际空间站成功进行了快速交会对接试验,耗时5h43min。此后,俄罗斯多次成功实施了“进步”号货运飞船和“联盟”号载人飞船与国际空间站的快速交会对接,快速交会对接技术更加成熟。

1.1.2 我国交会对接技术发展和现状

1.1.2.1 载人航天工程目标

1992年1月,中国开始载人航天工程,中国载人航天办公室成立了交会对接工程总体方案论证组,对以我国飞船和空间实验室(空间站)为背景的交会对接技术进行了总体研究。中国空间技术研究院、上海航天技术研究院、国防科技大学、北京航空航天大学、哈尔滨工业大学等单位对交会对接技术进行了更为细致的研究,取得了面向工程实用的一系列研究成果。在此基础上,我国提出了载人航天工程分三步实施的目标。

(1) 以飞船起步、发射几艘无人飞船和一艘有人飞船,将航天员安全地送入近地轨道,进行适量的对地观测及空间实验,并使航天员安全返回地面,实现载人航天的历史突破。

(2) 除继续进行对地观测和空间实验外,重点完成交会对接、出舱活动(Extra-vehicular Activity, EVA)实验和发射长期自主飞行、短期有人照料的空间实验室,尽早建成我国完整配套的空间工程大系统,解决我国一定规模的空间应用问题。