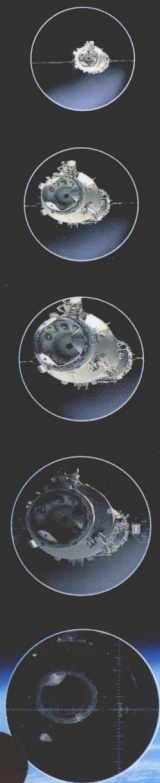


# S

# Space Rendezvous and Docking Technology

## 空间交会对接技术

周建平 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

013032978

V526  
07

# 空间交会对接技术

Space Rendezvous and Docking Technology

周建平 著



国防工业出版社

·北京·



北航

C1640699

V526

07

## 内 容 简 介

本书结合工程实践,系统阐述了交会对接任务的系统设计与任务规划、运载火箭弹道设计与控制、航天器轨道测量与确定、远距离导引控制与优化设计、自主交会导航与控制、对接机构设计与试验、系统建模仿真,反映了我国交会对接飞行试验的主要原理、方法和特点。

本书内容全面、系统性强,且具有较强的理论深度,对交会对接技术理论研究和工程实践有很好的参考价值。本书适合于航天领域科技工作者,尤其是从事载人航天技术的研究和管理人员,同时对高校航天技术及相关领域师生和航天兴趣爱好者也有所帮助。

### 图书在版编目(CIP)数据

空间交会对接技术/周建平著. —北京:国防工业出版社,2013.2

ISBN 978-7-118-08727-7

I. ①空... II. ①周... III. ①对接(航天) - 交会对接 IV. ①V526

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第041719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)

北京嘉恒彩色印刷责任有限公司

新华书店经售

\*

开本 710 × 1000 1/16 印张 20 $\frac{3}{4}$  字数 450 千字

2013年2月第1版第1次印刷 印数 1—3000册 定价 88.00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

# 前 言

空间交会对接技术是指两个飞行器(一个称为追踪飞行器,另一个称为目标飞行器)在轨道上按预定的位置、速度和时间会合,并在结构上连接成一体的技术。

空间交会对接技术是发展航天技术、增强人类探索和开发太空能力的一项重大技术,与载人天地往返技术、出舱活动技术并称为载人航天三大基本技术。交会对接技术的作用主要体现在三个方面:一是为在轨长期运行的空间设施提供物资补给和人员运输服务;二是为大型空间设施的建造和运行服务;三是进行飞行器重构以实现系统优化。交会对接技术为长期载人航天飞行、大型空间设施的在轨建造及维护和使用、月球和深空载人探测等规模巨大的航天任务提供了可能,降低了这类大型航天工程对大型运载工具的需求,也降低了实施的技术难度和风险。

我国自 20 世纪 90 年代组织交会对接关键技术攻关以来,到 2011 年—2012 年圆满完成天宫一号目标飞行器与神舟八号飞船自动交会对接、神舟九号飞船手动控制交会对接飞行任务,成功突破和掌握了空间交会对接技术,积累了丰富研制经验,培养了一批优秀人才。

交会对接包括交会和对接两个相互衔接的过程。交会是指两个飞行器相互接近的飞行全过程,自火箭点火起飞至两飞行器接近到满足对接捕获条件。对接是指从两飞行器捕获到完成锁紧、密封和气、电、液路连接,最终形成组合体的过程。空间飞行器交会对接任务,需要目标飞行器、追踪飞行器和相应的运载火箭,以及执行发射、测控任务的地面支持系统协同完成。载人航天器交会对接还需要航天员以及负责载人航天器回收的地面支持系统参与。我国交会对接飞行任务在载人飞船工程的基础上,研制了目标飞行器;以载人飞船为追踪飞行器,增加了无线电和光学高精度相对测量设备、对接机构、平移发动机和相应的交会对接自主导航制导与控制功能;运载火箭提高了惯性测量系统精度,并采用组合导航技术和迭代控制方法,以保证升交点赤经、轨道倾角和轨道高度等较高的人轨精度要求;测控通信构建了由地面测控站、海上测控船和中继卫星组成的陆海天基测控网,完成飞行全程测控任务和飞船远距离导引控制任务。我国在交会对接技术研发中解决了总体设计、运载火箭高精度导航制导与控制、自主相对测

量、追踪飞行器导航制导与控制、地面测量与控制、对接机构以及交会对接仿真试验等关键技术。

本书详细介绍了交会对接任务设计、运载火箭飞行控制、地面远距离导引控制、飞船近距离自主控制、对接以及仿真验证技术,反映了我国交会对接飞行试验的主要原理、方法和特点。全书共7章。第1章为绪论,介绍了交会对接的概念、历史发展及我国交会对接技术概况;第2章为空间交会对接任务分析与设计,主要包括交会对接动力学方程、系统设计和任务规划等内容;第3章为运载火箭弹道设计与控制,主要包括火箭弹道设计及交会对接任务的特殊需求、飞行控制制导方法、地面试验和发射控制技术等内容;第4章为测定轨与远距离导引控制,主要包括交会对接轨道确定及轨道预报、远距离导引优化控制、远距离导引精度分析等内容;第5章为自主交会导航、制导与控制技术,主要包括相对导航、自动交会制导控制、手动控制交会和交会对接物理仿真试验等内容;第6章为空间对接技术,主要包括对接机构技术、对接动力学与仿真、对接机构地面试验等内容;第7章为交会对接任务系统仿真,主要包括系统仿真总体设计、仿真建模、仿真试验分析与应用等内容。张崇峰、宋征宇、胡军、唐歌实、李海阳、吕新广、李新明、陈莉丹、李颢、刘志、郑云清、时军委、胡海霞、张昊、王华、罗亚中等同志参加了有关章节的编写。

交会对接任务是由一个复杂的大系统协同完成的,是在我国载人航天工程发展20年和我国航天事业发展50多年积累的技术基础支撑下实现的,是我国几代航天人共同奋斗的结果,是集体智慧的结晶。

交会对接涉及的技术领域众多,本书主要对总体设计和交会对接飞行过程控制实现的相关技术进行了比较详细的介绍,其它技术内容读者可以参考有关著作或文献。

本书主要面向从事航天及相关领域科研工作的科技人员,也可供从事飞行器设计、力学、系统工程、自动控制、测控等专业的高等院校教学科研工作的教师和学生参考。

空间交会对接技术涉及航天各个学科领域的相关知识,本书不可能、也不追求面面俱到。书中难免有不足和疏漏之处,欢迎广大读者批评指正。



二〇一三年一月

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 空间交会对接技术概述 .....	1
1.1.1 空间交会对接的概念 .....	1
1.1.2 空间交会对接的作用 .....	2
1.1.3 空间交会对接的基本过程 .....	3
1.1.4 空间交会对接的关键技术 .....	4
1.2 国外空间交会对接技术发展概况 .....	6
1.2.1 空间交会对接技术的发展历程 .....	6
1.2.2 美国 .....	7
1.2.3 俄罗斯/苏联 .....	12
1.2.4 欧洲 .....	14
1.2.5 日本 .....	16
1.3 中国空间交会对接技术 .....	17
1.3.1 中国载人航天工程的发展概况 .....	17
1.3.2 中国载人航天工程空间交会对接飞行 .....	18
参考文献 .....	19
第 2 章 空间交会对接任务分析与设计 .....	21
2.1 坐标系统 .....	21
2.1.1 时间系统 .....	21
2.1.2 惯性坐标系 .....	25
2.1.3 地固坐标系 .....	26
2.1.4 升交点轨道坐标系 .....	26
2.1.5 航天器当地轨道坐标系 .....	26
2.2 交会对接轨道动力学 .....	27
2.2.1 高精度轨道动力学方程 .....	27
2.2.2 近圆轨道相对运动动力学方程 .....	27
2.2.3 椭圆轨道相对运动动力学方程 .....	33
2.3 交会对接任务的系统设计 .....	36

2.3.1	系统构成 .....	37
2.3.2	航天器 .....	37
2.3.3	运载火箭 .....	40
2.3.4	发射场 .....	41
2.3.5	测控通信 .....	41
2.3.6	着陆场和航天员应急救生区 .....	43
2.3.7	航天员 .....	44
2.4	交会对接飞行任务规划 .....	45
2.4.1	任务规划约束条件 .....	46
2.4.2	发射窗口规划 .....	47
2.4.3	轨道设计 .....	52
2.5	天官一号/神舟八号交会对接过程 .....	56
2.5.1	上升段 .....	57
2.5.2	远距离导引段 .....	58
2.5.3	自主控制段 .....	58
2.5.4	对接段 .....	60
2.5.5	组合体飞行段 .....	61
2.5.6	二次对接段 .....	62
2.5.7	分离撤离段 .....	62
	参考文献 .....	62
<b>第3章</b>	<b>运载火箭弹道设计与控制 .....</b>	<b>64</b>
3.1	国内外运载火箭控制技术发展概述 .....	64
3.1.1	国外情况 .....	64
3.1.2	国内情况 .....	67
3.2	弹道设计及交会对接任务的特殊需求 .....	68
3.2.1	火箭运动方程 .....	68
3.2.2	火箭弹道设计及制约因素 .....	73
3.2.3	交会对接的特殊需求 .....	74
3.3	运载火箭飞行控制技术 .....	75
3.3.1	飞行控制系统的组成及工作原理 .....	75
3.3.2	制导系统 .....	82
3.3.3	姿态控制系统 .....	84
3.4	运载火箭制导方案与方法 .....	99
3.4.1	组合导航方案 .....	99
3.4.2	摄动制导 .....	106

3.4.3	迭代制导 .....	108
3.5	运载火箭发射控制技术 .....	115
3.5.1	火箭射前工作及流程 .....	115
3.5.2	诸元准备及生成 .....	118
3.5.3	初始状态的确定 .....	120
3.5.4	零窗口发射 .....	122
3.6	地面试验与仿真技术 .....	126
3.6.1	六自由度仿真试验技术 .....	126
3.6.2	制导姿控联合六自由度仿真试验系统 .....	127
	参考文献 .....	128
<b>第4章</b>	<b>测定轨与远距离导引控制 .....</b>	<b>130</b>
4.1	国内外技术现状 .....	130
4.1.1	测定轨技术现状 .....	130
4.1.2	远距离导引控制技术现状 .....	131
4.2	轨道确定及轨道预报 .....	133
4.2.1	轨道力学基础 .....	133
4.2.2	轨道测量方法和模型 .....	138
4.2.3	测量数据处理与误差修正 .....	142
4.2.4	交会对接中轨道确定及轨道预报的技术特点 .....	143
4.2.5	空间环境模型参数辨识及其在交会对接中的应用 .....	145
4.3	远距离导引优化控制 .....	147
4.3.1	远距离导引变轨任务规划模型 .....	147
4.3.2	远距离导引变轨任务规划策略 .....	152
4.3.3	远距离导引应急控制策略 .....	158
4.4	远距离导引精度分析 .....	160
4.4.1	影响远距离导引精度的误差因素 .....	160
4.4.2	远距离导引精度评估方法 .....	161
4.4.3	远距离导引精度仿真分析结论 .....	163
	参考文献 .....	164
<b>第5章</b>	<b>自主交会导航、制导与控制技术 .....</b>	<b>166</b>
5.1	国内外技术发展概述 .....	166
5.1.1	联盟/进步号飞船 .....	166
5.1.2	阿波罗飞船 .....	168
5.1.3	航天飞机 .....	170
5.1.4	DART .....	171



5.1.5	ATV .....	172
5.1.6	HTV .....	173
5.2	系统设计 .....	174
5.3	相对导航技术 .....	179
5.3.1	相对测量系统 .....	179
5.3.2	相对导航算法 .....	183
5.3.3	相对导航滤波器设计 .....	185
5.4	自动交会制导控制技术 .....	189
5.4.1	霍曼交会 .....	189
5.4.2	兰勃特交会 .....	190
5.4.3	C-W 制导 .....	191
5.4.4	视线制导 .....	193
5.4.5	平行交会 .....	195
5.4.6	姿态控制 .....	196
5.4.7	自动交会制导控制仿真验证 .....	197
5.5	手动控制交会技术 .....	199
5.5.1	概述 .....	199
5.5.2	手控交会对接 GNC 系统组成及工作原理 .....	201
5.5.3	控制方案及数学仿真验证 .....	204
5.6	空间交会对接物理仿真试验技术 .....	206
5.6.1	概述 .....	206
5.6.2	欧洲交会对接 GNC 分系统半物理仿真 .....	207
5.6.3	美国交会对接 GNC 系统半物理仿真 .....	207
5.6.4	日本交会对接 GNC 系统半物理仿真 .....	208
5.6.5	法国十二自由度对接动力学仿真 .....	209
5.6.6	美国交会对接十自由度全物理仿真 .....	210
5.6.7	我国九自由度交会对接半物理仿真 .....	211
	参考文献 .....	212
<b>第 6 章</b>	<b>空间对接技术 .....</b>	<b>214</b>
6.1	空间对接技术概述 .....	214
6.1.1	空间对接任务和过程 .....	214
6.1.2	对接技术的发展概述 .....	216
6.2	对接机构技术 .....	232
6.2.1	系统组成和功能划分 .....	233
6.2.2	工作过程 .....	235

6.2.3	捕获导向机构	235
6.2.4	传动缓冲机构	237
6.2.5	连接密封分离机构	244
6.2.6	对接分离控制	251
6.2.7	温度控制	252
6.3	对接过程的仿真	252
6.3.1	对接过程仿真目的和模型假设	252
6.3.2	坐标系定义和对接初始条件	253
6.3.3	对接动力学建模	254
6.3.4	对接过程动力学仿真	263
6.3.5	典型对接情况的仿真结果	264
6.4	对接机构地面试验	270
6.4.1	任务	270
6.4.2	对接机构地面试验方法	271
6.4.3	对接机构的大型地面试验设备	275
	参考文献	282
<b>第7章</b>	<b>交会对接任务系统仿真</b>	<b>284</b>
7.1	系统仿真技术发展概况	284
7.2	交会对接工程系统仿真总体设计	287
7.2.1	系统仿真需求	287
7.2.2	仿真系统平台与架构	291
7.2.3	仿真系统组成	300
7.3	交会对接仿真建模	302
7.3.1	交会对接仿真模型体系	302
7.3.2	轨道动力学模型	303
7.3.3	GNSS 测量仿真模型	303
7.3.4	USB 外测仿真模型	305
7.3.5	中继卫星仿真模型	308
7.4	仿真试验设计与分析	310
7.4.1	仿真试验设计	311
7.4.2	仿真结果分析	315
	参考文献	319
	常用简称与缩写词	320

# 第 1 章 绪 论

2011 年—2012 年,我国成功实施了神舟八号飞船、神舟九号飞船与天宫一号目标飞行器空间交会对接,标志着我国全面突破和掌握了空间交会对接技术,为建造和运营空间站迈出了关键的一步<sup>[1]</sup>。本章概述了空间交会对接的概念、作用、基本过程和关键技术,介绍了美国、俄罗斯/苏联、欧洲、日本的交会对接技术发展概况,最后介绍了我国载人航天工程的发展概况、空间交会对接方案和飞行过程。

## 1.1 空间交会对接技术概述

### 1.1.1 空间交会对接的概念

空间交会对接(RVD)技术是指两个飞行器于同一时间在轨道同一位置以相同速度会合并再在结构上连成一个整体的技术<sup>[2-4]</sup>。参与交会对接的两个飞行器分别称为被动飞行器和主动飞行器。交会对接飞行前,被动飞行器先由地面控制进入预定对接轨道后,一般不做机动或仅做少量机动,称为目标飞行器或目标器,例如天宫一号目标飞行器、国际空间站等。主动飞行器需要执行一系列的轨道机动接近目标飞行器,称为追踪飞行器或追踪器,例如神舟飞船、航天飞机等。

交会对接任务除了涉及追踪和目标两个飞行器外,还需要地面系统支持,甚至航天员的直接操作。空间交会对接要求交会时两个飞行器的位置和速度逐渐趋于一致,与导弹拦截交会具有明显区别。

交会对接包括交会和对接两个相互衔接的过程。交会是指两个飞行器相互接近的飞行过程,自火箭点火起飞至两飞行器接近到满足对接捕获条件。对接是指两飞行器从捕获到完成锁紧、密封和气、电、液路连接,最终形成组合体的过程。

根据交会飞行最终接近段控制方式的不同,可以将交会对接分为自动交会、手动交会和遥操作交会三类。

自动交会是由地面飞行控制中心完成远距离导引控制后,由追踪飞行器依靠本身的测量敏感器及相应的控制设备自主控制实现交会。自动交会具有控制精度高、适用距离范围大、燃料消耗少的优点,但系统构成复杂。

手动交会用于载人飞行器(如载人飞船及航天飞机等),由航天员在追踪飞

飞行器上利用控制手柄和靶标图像等完成最终接近段交会控制。手动交会可以作为主要的交会对接手段(如航天飞机),也可作为自动交会的备份手段以提高交会对接任务的可靠性(如联盟系列载人飞船)。手动交会具有系统构成简单、可以充分发挥人的智能优势处理复杂情况的优点,但作用距离范围较小,在地面导引结束到手动控制之间的时段,仍需要自动交会控制系统工作。

遥操作交会是另一种形式的人工控制,可用于不载人追踪飞行器的交会控制<sup>[5]</sup>。遥操作交会由目标飞行器上的航天员或地面人员,利用追踪飞行器获得并通过无线信道传送给操作者的图像等信息,通过控制手柄等手段以无线方式控制追踪飞行器完成最后阶段交会飞行。它可用作自动交会飞行控制方式的备份或用于空间非合作目标间的交会控制,提高飞行任务的可靠性。和平号空间站及国际空间站上均采用了 TORU 遥操作交会对接系统。遥操作方法及其优缺点类似于手动控制,但信息延时更大,尤其是地面操控的情况下。

目前各国飞行器交会对接均由地面飞行控制(简称飞控)中心支持完成远距离导引。测控系统对两个飞行器进行测定轨,制定和生成飞控策略,注入到飞行器后由飞行器控制实现,这是一种程序控制下的自动交会控制方式。卫星导航和中继卫星技术使得开发完全自主的合作目标间交会飞行成为可能。利用导航卫星星座进行自主测定轨并通过中继卫星进行信息交换,追踪飞行器可以自主生成飞控策略并完成交会飞行的全程自主控制。但这种控制方式并无突出需求,在地面能够可靠实现的前提下,将复杂任务搬到天上无疑会增加风险和飞行器的复杂性,而且出于安全考虑,地面所有的功能都是不能缺省的。

飞行器对接有两种实现方式。一种是采用具有捕获功能的对接机构,追踪飞行器在对接机构的轴线方向以预定的相对速度、相对位置和姿态精度与目标飞行器接触,由对接机构完成捕获、拉近、锁紧等动作,实现对接。另一种方式是采用机械臂进行捕获,追踪飞行器与目标飞行器接近到指定相对位置后,保持悬停状态,由安装在目标或追踪飞行器上的机械臂捕获对方,并将其转移到对接口上实现对接。目前大多数飞行器的交会对接采用第一种方式。采用后者的有 H-II 转移飞行器(HTV)、龙飞船与国际空间站对接,以及航天飞机捕获卫星。

### 1.1.2 空间交会对接的作用

交会对接技术是进行高级空间操作的一项重大技术,其主要应用包括<sup>[2-6]</sup>:

#### 一、空间站物资补给及人员轮换

为长期运行的载人空间站提供物资补给和人员运输服务是空间交会对接最频繁和最主要的应用,也是载人空间站建造和持续运行的基础。例如,除早期试验阶段外,俄罗斯联盟号载人飞船和进步号货运飞船的全部飞行任务,以及美国航天飞机与和平号空间站及国际空间站对接的主要任务都是如此。

## 二、大型飞行器或空间平台的在轨组装

和平号空间站的6舱段构型是由交会对接直接在轨对接组装完成的,而国际空间站的建造既利用了交会对接直接对接组装舱段,又利用了航天飞机强大的运输能力和航天员操作完成了包括桁架、太阳能电池帆板和舱段的组装。没有交会对接技术,这类复杂空间设施的建造和可靠运行无法实现。

## 三、飞行器在轨服务

现有飞行器大多设计为一次性使用。飞行器能否正常在轨工作、工作寿命长短等取决于发射前飞行器的设计、生产质量及设备的冗余备份和推进剂装载量等。为了改进完善飞行器性能、延长在轨工作寿命、降低费用和风险等,基于空间交会对接开展飞行器在轨服务具有重要的工程意义和应用价值。例如,利用航天飞机及航天员对哈勃望远镜进行在轨维修就是由交会对接技术支撑的在轨维修服务活动的典范事例。2007年,美国轨道快车计划开展了自动交会对接技术支持下的在轨服务试验,成功进行了电源等在轨可更换单元(ORU)的在轨更换。

## 四、载人登月及深空探测任务支持

利用空间交会对接技术可进行载人登月及深空探测任务中的飞行器重构以实现系统优化。这些任务所需运载能力巨大,通过多次发射和交会对接技术,在地球、行星、月球轨道上或拉格朗日点完成飞行器的组装,是降低对单发运载火箭能力需求的有效途径,特别是对于诸如火星及其以远的载人登陆任务而言,这是目前技术水平上工程可实现的最佳甚至唯一途径。

在阿波罗登月任务中,在地球轨道和月球轨道要分别进行一次交会对接。地球轨道交会对接解决了降低火箭上升段逃逸质量与人员进入登月舱通道之间的矛盾;月球轨道交会对接实现了将登月舱与返回地球飞行器的功能区分和独立,大幅降低了火箭运载能力需求和飞船规模。

### 1.1.3 空间交会对接的基本过程

飞行器空间交会对接可分为运载火箭上升段和追踪飞行器交会对接飞行段两个阶段。火箭发射前,地面测控系统要精确测定目标飞行器轨道,必要时还需调整其轨道。火箭发射控制人员依据所提供的目标飞行器精密轨道数据,进行火箭控制参数计算和装订,火箭按预定程序自主飞行,将追踪飞行器送入与目标飞行器共面、满足入轨轨道高度和两飞行器相位差要求的初始轨道。

追踪飞行器入轨后,交会对接飞行段一般分为四个阶段:远距离导引段、近距离导引段、平移靠拢段和对接段,其中近距离导引段和平移靠拢段也可统称为自主控制段,而近距离导引段又可分为寻的段和接近段。从广义上来说,交会对接还包括组合体飞行段和撤离段。图1.1为典型的 $-V$ -bar交会对接飞行阶段划分<sup>[2]</sup>。

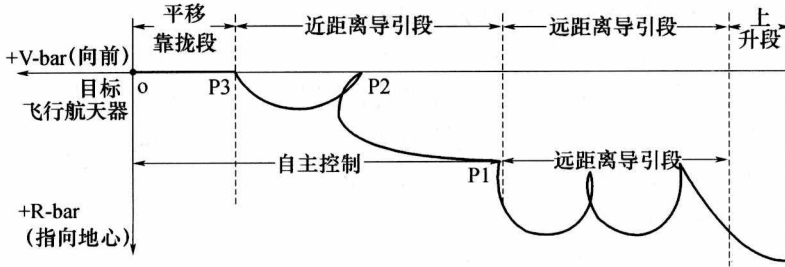


图 1.1 交会对接飞行阶段划分

**远距离导引段**——从追踪飞行器入轨开始,在地面控制下进行若干次轨道机动,直到追踪飞行器到达目标飞行器后下方约定距离范围内、其上的敏感器捕获到目标飞行器、追踪飞行器的控制由地面切换到飞行器自主进行为止。该飞行段控制的主要任务是调整追踪飞行器和目标飞行器的相位角,修正追踪飞行器入轨时的轨道倾角和升交点赤经偏差,提升追踪飞行器轨道高度并建立两飞行器间的自主相对导航测量能力。欧美国家及其学者通常将该阶段称为调相段 (Phasing Stage)。

**近距离导引段**——从追踪飞行器开始进行自主控制到进入距目标飞行器约几百米的停泊点 P3。其主要任务是捕获目标轨道,减小两个飞行器之间的相对距离和接近速度,将追踪飞行器导引到目标飞行器附近某一点(例如保持点或接近走廊外一点),此阶段通常采用 C - W 制导方式。

**平移靠拢段**——从停泊点 P3 到两个飞行器的对接机构接触为止。在平移靠拢段,追踪飞行器沿准直线做受迫运动逼近目标飞行器,在逼近过程中通过手动控制或自动控制精确调整两者之间的横向位置、相对姿态以及接近速度,以满足对接初始条件的要求,此阶段一般采用视线制导控制。

**对接段**——从两个飞行器对接机构接触起到对接机构锁紧、密封,两个飞行器形成组合体为止。

### 1.1.4 空间交会对接的关键技术

在已有航天器和运载技术基础上,交会对接技术的研发尚需解决以下主要关键技术问题<sup>[6]</sup>。

#### 一、总体设计技术

交会对接任务总体设计涉及工程各个方面,包括运载火箭、目标飞行器和追踪飞行器方案,飞行器发射入轨、变轨调相、交会对接轨道设计与控制策略,测控网布局及飞行控制策略和故障对策等。在空间站运行阶段,还涉及空间站人员运输及轮换、物资补给等任务规划和在轨应急救援等。

## 二、运载火箭发射和高精度导航制导与控制技术

交会对接飞行任务要求运载火箭将追踪飞行器准确送入与目标飞行器共面的初始轨道,满足轨道倾角、升交点赤经、高度、相位差等要求。高精度的初始轨道可以大幅降低追踪飞行器修正轨道偏差的推进剂消耗。由于追踪飞行器携带推进剂有限,偏差过大将导致交会对接任务失败。

实现运载火箭高精度入轨,需要保证零窗口按时点火发射,这对火箭、飞行器和地面测发控系统提出了高可靠性要求。一旦出现故障将错失发射机会而等待一两天甚至更长时间才能重新组织发射,该问题在火箭加注后将变得尤为严重。

高精度入轨要求火箭具备高精度的导航、制导和控制能力。第一,具有高精度和高可靠性的惯性测量组合,再利用卫星导航系统进行时间累计误差的修正,是实现高精度导航的基础和前提。第二,要采用精度高、鲁棒性好、可靠的控制方法,如迭代制导方法。第三,火箭控制系统要具有在射前根据最新提供的入轨参数要求和高空风等环境数据,快速计算并装订控制参数的能力。

## 三、自主相对测量技术

与运载火箭一样,高精度测量是实现追踪飞行器高精度自主控制的前提和基础,测得准才能控得准。在交会对接飞行任务中,追踪飞行器可能需要进行绕飞以及从后向、前向和径向等不同方向进行交会对接,要求相对测量敏感器精度高、作用距离大和视场范围宽。相对测量敏感器的技术水平在一定程度上决定了交会对接飞行的自主能力和技术水平。

交会对接相对测量敏感器通常分为远场和近场敏感器两类。远场敏感器一般作用距离为上百千米到百米量级,用于交会对接寻的段和接近段。近场敏感器一般作用距离为几百米到零距离接触,用于交会对接的近距离接近段和平移靠拢段。远场敏感器通常只要求测量目标飞行器相对追踪飞行器的位置和速度,而近场敏感器还要求测量二者的相对方位和姿态。用于交会对接相对测量的手段包括卫星导航、微波、激光和光学成像等。

交会对接测量设备是交会对接任务成功的关键,在每个飞行阶段都应有冗余备份,并且能适应空间环境的要求。采用高精度的光学测量敏感器时,需要特别关注阳光干扰的抑制问题。

## 四、追踪飞行器导航制导与控制技术

追踪飞行器导航制导与控制技术除相对运动测量敏感器和由多种发动机组合构成的执行机构等关键设备外,另一关键问题是在综合考虑燃料消耗、测控覆盖和安全的约束条件下,设计容错能力强、鲁棒性好、自主功能强、优化高效的控制方法。

自动与手动控制(包括载人飞船的航天员手动控制和无人追踪飞行器的遥操作控制)是载人航天交会对接控制中均应具有的控制功能。正常情况下,使

用自动交会控制。自动系统不需要航天员操作,正常情况下可以避免交会对接给航天员带来过重的操作负担。需要指出的是,当距离较远时,追踪飞行器自主交会飞行也只有自动控制手段才是可行的。但是,自动系统复杂,保证设备可靠工作难度更大。手动控制系统相对而言要简单得多,设计手动控制作为第二种控制手段,从而使近距离交会控制具有系统冗余并且使人具有故障情况下的干预能力,可以提高交会对接任务的成功率,降低任务风险。

### 五、对接机构技术

对接机构是实现两个飞行器捕获和刚性密封连接的主要技术途径之一,与依靠机械臂完成捕获和密封连接相比,前者更为简单。对接机构是一套十分复杂、精密的机电设备,具有捕获、锁紧、密封、分离功能。对接完成并开启舱门后,形成追踪和目标飞行器间的人员和货物通道。

此外,对接机构上还配置了气、液、电对接接口,使其能够为目标飞行器补给推进剂和气体,并实现供电和信息并网。

### 六、地面测量与控制技术

交会对接飞行中,地面要同时对两个飞行器进行测控,在2天~3天时间内完成对追踪飞行器的4次~5次精确轨道预报和控制。与常规航天任务相比,每次机动前的测控弧段更短,精度和实时性要求更高,这些都对地面测控系统提出了新的挑战。

交会对接还要求地面飞行控制中心对交会对接的关键事件进行监视并在必要时进行干预,即使是进入寻的段,追踪飞行器转入自主控制后,全程监视和必要时进行干预的能力也是必须的。

陆海基测控网存在覆盖率和测轨精度低的问题,中继卫星的应用可以较好地解决这些问题。

### 七、交会对接仿真试验技术

飞行器飞行试验成本巨大,研发过程必须进行充分的地面试验,尽可能真实地模拟飞行环境和状态来验证设计的正确性。仿真试验是一种十分有效的系统设计、验证和测试方法,在交会对接研制中被广泛运用。仿真试验方法包括全数字仿真、半物理仿真、全物理仿真和人在回路的操作和训练仿真等。

## 1.2 国外空间交会对接技术发展概况

### 1.2.1 空间交会对接技术的发展历程

目前国际上有美国、俄罗斯、欧洲、日本研制的飞行器分别完成了与运行在轨道上的目标飞行器交会对接。1966年3月16日,美国双子座8号(Gemini8)飞船与由阿金纳火箭末级改装的对接目标实现了世界上首次交会对接



接,其中,最后的近距离交会对接是由航天员手动控制完成的。1967年10月,苏联宇宙188号飞船与宇宙186号飞船实现了世界上首次无人自动交会对接。1969年5月,美国阿波罗登月舱与指令服务舱实现了首次月球轨道交会对接。欧洲和日本分别于2008年和2009年实现了自动转移飞行器(ATV)和H-II转移飞行器(HTV)与国际空间站的交会对接。迄今为止,美国和俄罗斯/苏联共计进行了300多次交会对接飞行,美、俄的交会对接技术已经成熟并在空间站和载人登月中发挥了重要作用。

### 1.2.2 美国

美国在阿波罗、天空实验室、航天飞机、国际空间站和猎户座(Orion)飞船等载人航天计划中不断研究、发展、改进和完善了交会对接技术。美国的交会对接技术一直主要基于手控交会策略,20世纪80年代末90年代初开始致力于发展自动交会对接技术,相关试验项目包括“自主交会技术演示验证试验(DART)”、“试验小卫星系统(XSS)”、“轨道快车(OE)”等。

#### 一、双子座飞船

美国交会对接技术的研究和验证是从双子座(Gemini)系列飞船开始的。双子座交会对接仿真器如图1.2所示。

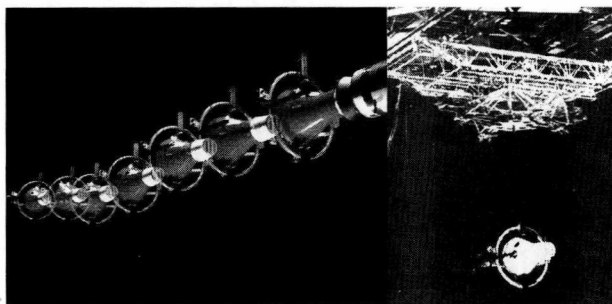


图1.2 双子座交会对接仿真器

1965年12月15日,美国发射双子座6号飞船与双子座7号飞船进行空间交会,并保持近距离编队飞行,最近时两者相距约0.3m。这是美国载人飞船第一次空间交会飞行。

1966年3月16日,由航天员操作双子座8号飞船实现与阿金纳目标飞行器的空间交会对接,从而完成了世界上首次空间交会对接活动。1964年—1966年,双子座飞船共进行了2次不载人和10次载人飞行,验证了多种交会对接方式下的任务规划、航天员手动操作控制、地面跟踪多飞行器等交会对接相关技术。

双子星座的交会测量系统采用微波雷达、电视摄像机等,对接机构为“环—锥”式结构,即由捕获环机构和对接锥机构组成。捕获环装在双子座飞船的