



载人航天出版工程

总主编：周建平
总策划：邓宁丰

CAMBRIDGE

航天器自动交会对接

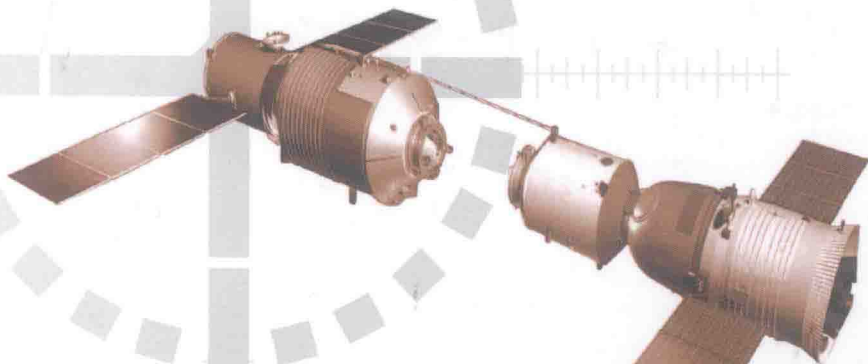
Automated Rendezvous and Docking
of *Spacecraft*

[德] 韦格伯特·费热 著

王忠贵 主译

李程 董能力 袁永刚 合译

吴树范 审校



中国宇航出版社



载人航天出版工程

总主编：周建平

总策划：邓宁丰

航天器自动交会对接

AUTOMATED RENDEZVOUS AND
DOCKING OF SPACECRAFT

[德] 韦格伯特·费热 著

王忠贵 主译

李程 董能力 袁永刚 合译

吴树范 审校



中国宇航出版社

Automated Rendezvous and Docking of Spacecraft, 1st edition, ISBN 0 521 82492 3 hard-back, by Wigbert Fehse, first published by Cambridge University Press, 2003.

All rights reserved.

This simplified Chinese edition for the People's Republic of China is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

©Cambridge University Press & China Astronautic Publishing Co. Ltd. 2011.

This book is in copyright. No reproduction of any part may take place without the written permission of Cambridge University Press and China Astronautic Publishing Co. Ltd.

This edition is for sale in the mainland of People's Republic of China (excluding Hong Kong SAR, Macau SAR and Taiwan Province) only.

著作权合同登记号:图字:01—2009—1748号

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

航天器自动交会对接 / (德) 费热著; 王忠贵等译. --北京:中国宇航出版社, 2013. 12

国家出版基金项目

ISBN 978-7-5159-0011-7

I. ①航… II. ①费… ②王… III. ①航天器对接 IV. ①V526

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 134906 号

责任编辑 马 航

封面设计 姜 旭

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

经 销 新华书店

发行部 (010)68371900
(010)68768541

(010)88530478(传真)

(010)68767294(传真)

零售店 读者服务部
(010)68371105

北京宇航文苑

(010)62529336

承 印 北京画中国画印刷有限公司

版 次 2013 年 12 月第 1 版

2013 年 12 月第 1 次印刷

规 格 880 × 1230

开 本 1/32

印 张 17.125

字 数 475 千字

书 号 ISBN 978-7-5159-0011-7

定 价 88.00 元

本书如有印装质量问题,可与发行部联系调换

《载人航天出版工程》总序

中国载人航天工程自1992年立项以来，已经走过了20多年的发展历程。经过载人航天工程全体研制人员的锐意创新、刻苦攻关、顽强拼搏，共发射了10艘神舟飞船和1个目标飞行器，完成了从无人飞行到载人飞行、从一人一天到多人多天、从舱内实验到出舱活动、从自动交会对接到人控交会对接、从单船飞行到组合体飞行等一系列技术跨越，拥有了可靠的载人天地往返运输的能力，实现了中华民族的千年飞天梦想，使中国成为世界上第三个独立掌握载人航天技术的国家。我国载人航天工程作为高科技领域最具代表性的科技实践活动之一，承载了中国人民期盼国家富强、民族复兴的伟大梦想，彰显了中华民族探索未知世界、发现科学真理的不懈追求，体现了不畏艰辛、大力协同的精神风貌。航天梦是中国梦的重要组成部分，载人航天事业的成就，充分展示了伟大的中国道路、中国精神、中国力量，坚定了全国各族人民实现中华民族伟大复兴中国梦的决心和信心。

载人航天工程是十分复杂的大系统工程，既有赖于国家的整体科学技术发展水平，也起到了影响、促进和推动着科学技术进步的重要作用。载人航天技术的发展，涉及系统工程管理，自动控制技术，计算机技术，动力技术，材料和结构技术，环控生保技术，通信、遥感及测控技术，以及天文学、物理学、化学、生命科学、力学、地球科学和空间科学等诸多科学技术领域。在我国综合国力不断增强的今天，载人航天工程对促进中国科学技术的发展起到了积极的推动作用，是中国建设创新型国家的标志性工程之一。

我国航天事业已经进入了承前启后、继往开来、加速发展的关键时期。我国载人航天工程已经完成了三步走战略的第一步和第二

步第一阶段的研制和飞行任务，突破了载人天地往返、空间出舱和空间交会对接技术，建立了比较完善的载人航天研发技术体系，形成了完整配套的研制、生产、试验能力。现在，我们正在进行空间站工程的研制工作。2020年前后，我国将建造由20吨级舱段为基本模块构成的空间站，这将使我国载人航天工程进入一个新的发展阶段。建造具有中国特色和时代特征的中国空间站，和平开发和利用太空，为人类文明发展和进步做出新的贡献，是我们航天人肩负的责任和历史使命。要实现这一宏伟目标，无论是在科学技术方面，还是在工程组织方面，都对我们提出了新的挑战。

以图书为代表的文献资料既是载人航天工程的经验总结，也是后续任务研发的重要支撑。为了顺利实施这项国家重大科技工程，实现我国载人航天三步走的战略目标，我们必须充分总结实践成果，并充分借鉴国际同行的经验，形成具有系统性、前瞻性和实用性的，具有中国特色的理论与实践相结合的载人航天工程知识文献体系。

《载人航天出版工程》的编辑和出版就是要致力于建设这样的知识文献体系。书目的选择是在广泛听取参与我国载人航天工程各专业领域的专家意见和建议的基础上确定的，其中专著内容涉及我国载人航天科研生产的最新技术成果，译著源于世界著名的出版机构，力图反映载人航天工程相关技术领域的当前水平和发展方向。

《载人航天出版工程》凝结了国内外载人航天专家学者的智慧和成果，具有较强的工程实用性和技术前瞻性，既可作为从事载人航天工程科研、生产、试验工作的参考用书，亦可供相关专业领域人员学习借鉴。期望这套丛书有助于载人航天工程的顺利实施，有利于中国航天事业的进一步发展，有益于航天科技领域的人才培养，为促进航天科技发展、建设创新型国家做出贡献。



2013年10月

中文版前言

在本书英文版于2003年出版面世的时候，当时世界上只有两大太空集团，即俄罗斯和美国，能够执行空间飞行器的交会和捕获操作任务。两大集团中，仅有俄罗斯能够实现完全意义上的自动交会与对接任务。另外的两大太空集团，欧洲空间局和日本，当时也为了国际空间站（ISS）交会和对接任务，着手研发各自的航天器。欧洲研发的这类航天器，欧洲空间局称之为自动货运飞船（ATV），日本将自己研发的这类航天器称之为H-II货运飞船（HTV）。欧洲ATV已于2008年首次与国际空间站上的俄罗斯舱实现了自动交会和对接；日本的HTV也于2009年经过一段自动逼近过程后，被ISS上的机械臂捕获，执行了停靠作业。

随着执行交会任务的航天器的种类不断增加，如美国的航天飞机、俄罗斯的礼炮号空间站和进步号货运飞船、欧洲的ATV及日本的HTV等，交会、捕获和对接已经成为不同太空集团间进行航天员运输和后勤保障的工作界面。在执行交会任务过程中，至少两个参与者的控制中心和航天器上的航天员都要投入到监测和控制对接航天器的逼近和对接操作过程中。

中国作为第三种太空势力，有能力将自己的航天员独立送上太空，并让他们安全返回地面。其载人飞行始于神舟计划，2003年实现了载人往返太空安全飞行。下一步的大动作是在太空实现载人航天器和不载人航天器的交会对接。更进一步的宏大计划还包括建造有人照料的载人空间站计划和载人登月探险计划。要实现这些计划，都需要具备空间交会对接技术。然而，对于中国而言，这些技术尚

在研发过程中。

虽然许多空间集团都在致力于研发大型载人航天器，但是，历史的经验表明，空间开发任务，尤其是类似于大型永久性有人照料地球轨道空间站任务、未来有人照料月球基地任务以及载人火星探险任务等，由于费用昂贵，在很长时期内，都需要通过各个太空集团之间的国际合作才能实现。显然，能使这种合作成为可能的关键操作界面就是空间交会、捕获和对接技术。可以预期的是，在不久的将来，中国迟早会成为这种国际合作任务中的一员。

由于两个航天器之间的对接操作实际上是一种控制它们碰撞的过程，加之，逼近到接触的操作一定是发生在碰撞过程中，因而在安全上，所有的空间交会、捕获和对接操作任务都是关键作业，这就要求所有涉及到的操作单元至少具有2个备份。在空间国际合作任务中，至少有两个太空集团要参与交会操作任务中，因此，让对方充分了解己方的逼近方案、了解己方控制交会对接操作的自动船载系统的设计特征和安全特征就显得非常重要。从国际合作这个意义上讲，空间交会和捕获任务中的设计技术以及所涉及到的船载系统概念不应当有所谓的保密问题。

作者非常高兴地看到，本书现在被翻译成了简体中文版，并与广大的中国专业读者见面。我也真诚希望通过阅读本书，中国的空间技术人员和学生能够基本理解空间复杂作业、船载系统和地面系统设施的概念、安全需求和安全特征，这些概念对于成功实现交会任务是必不可少的。

本书提到的许多概念和技术在欧洲自动货运飞船与国际空间站的空间对接任务中已经实现。我要再一次感谢欧洲空间局在此任务期间给予我参加各种科研活动的机会，感谢他们允许本书引用一些研究成果。

我还要感谢本书译者所付出的努力，他们将书中复杂的、晦涩的概念译成中文。最后，我要特别感谢我的同事吴树范博士，他作

为制导、导航和控制方面的专家，就书中部分章节的概念的确切含义与作者进行了无数次的沟通，并花费了大量的时间和精力从技术角度对本书的中文译文进行了仔细审校，使本书更便于中国读者阅读。

韦格伯特·费热
2010年8月

前 言

本书概括介绍了自动交会对接系统开发过程中经常遇到的主要问题，所有讨论并非针对某个具体项目，旨在解释一般的设计原理或原则。书中所引用的开发实例，仅仅是为了说明这些原理。由于涉及面太广，因此对每一个问题的讨论深度都有局限性。

1981~1998年期间，作者在欧洲空间局（ESA）工作并负责交会对接技术的开发，本书就是根据作者的这些实际经历和经验写成的。ESA曾经进行过庞大的开发计划，授权欧洲企业开展了大量的交会对接技术研发活动，先是为赫尔姆斯—哥伦布自由飞行器项目（Hermes—Columbus Free—Flyer）做准备，后来在1992年该项目终止后，又为欧洲自动货运飞船和国际空间站项目（ATV—ISS）的交会对接做技术预研。欧洲自动货运飞船是欧洲对国际空间站项目的贡献之一。本书的内容涉及了两次最大的技术开发活动：

- Hermes—Columbus 项目的对接交会技术预研（1989~1993）；
- ATV 交会技术预研（1994~1998）。

虽然这两次技术活动为 ATV 自动交会控制系统的研制奠定了基础，但真正对开发该系统的推动力量在很大程度上还是来源于 ISS 确定的对接要求。这一点需要与世界各有关合作方进行广泛而又细致的探讨。因此，本书关于自动交会对接的技术资料主要来自：1) ESA 指导下的欧洲企业对上述项目的技术开发准备活动；2) 在国际空间站计划框架下与国际合作伙伴（NASA, RSC—Energia, NASDA）的合作过程。

如果没有欧洲空间局的航天器交会对接研发计划，没有欧洲空

间局及相关业界中每个成员所做的巨大努力，本书就难以出版面世。对此，作者深表谢意。这些工业团队的主要成员有：

- MATRA Marconi 空间公司和 DASA 公司，现已合并为 Astrium 公司。
- Aerospatiale 公司，现在是 EADS 公司的子公司。
- Alenia 公司。
- GMV 公司。
- Sener 公司。

在此还要感谢国际空间站计划，有了这个合作计划，才可以得到大量有关俄罗斯、日本和美国等国研发的自动交会对接系统情报资料。在这个国际合作项目中，装备不同空间能源系统的运载工具，通过交会对接把不同的操作界面和物理界面结合为一体。要做到这一点，合作各方必须进行充分的信息资料交流与沟通，这在以往是闻所未闻的。

如果得不到外界的帮助，包括本书在内的任何项目都不可能获得成功。因此，作者真诚感谢支持并帮助过自己的同事和朋友，尤其要感谢两位对写作内容有直接贡献的同事，他们是：

F. Ankersen, ESA—ESTEC 对附录 A “运动动力学” 和第 6 章 “航天器船载交会控制系统” 有直接贡献，他是欧洲空间局全部交会研发活动中控制系统方面的领军人物。

J. Sommer, Astrium Bremen，也是上述两个技术项目中的资深工程师，对第 6 章的顺利完成也作出了贡献。

除了感谢他们对本书的顺利付印作出的贡献外，作者在此也非常感谢他们为交会项目的研发工作作出的努力。

此外，一些国际交会对接领域的同行和朋友帮助审阅了部分章节，并提出了修改意见和建议，这里一并表示感谢，他们是：Sener 公司的 E. Belikov，ESA—ESTEC 公司的 Ch. Beskow, G. Ortega, I. Rasmussen 和 S. Mancuso, Astrium 公司的 J.-L. Gonnaud 和 D. Wilde, RSC 能源公司的 V. Semyachkin, NASDA 公司的 K. Yamanaka。

在欧洲空间局的允许下，一些研究成果报告得以公开发表，使本书的出版成为可能。并且，欧洲空间局的控制和数据系统部为作者提供了办公条件，并提供了计算机软硬件设施和管理支持。

本书文字部分用 LaTeX 软件书写，插图用 Xfig 软件描绘，轨道曲线用欧洲空间局研发的“快速交互交会仿真工具”计算。这是一个在集成系统公司的计算机辅助动态分析环境下 (MATRIX_x) 开发的一个轨道分析软件。

韦格伯特·费热
2003 年 5 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 背景	1
1.2 交会过程的复杂性	3
1.3 目的和范围	6
第 2 章 交会任务的各个阶段	9
2.1 发射和入轨	9
2.1.1 发射窗口	9
2.1.2 轨道面和轨道参数的定义	11
2.1.3 发射作业的适应度	12
2.1.4 发射末段航天器的状态	12
2.2 调相并转移到目标航天器轨道附近	13
2.2.1 调相的目标和终了状态	13
2.2.2 修正时间偏差和轨道参数	14
2.2.3 交会中参考坐标系	14
2.2.4 前向/反向调相	15
2.2.5 各个任务阶段的不同调相策略	16
2.2.6 初始瞄准点的定位	17
2.2.7 进入门替代瞄准点方案	17
2.2.8 开环机动的最终精度	18
2.3 远程交会作业	18
2.3.1 远程交会的目的和目标	18
2.3.2 交会时的相对导航	19

2.3.3	轨道因素和弹性时间因素	19
2.3.4	与目标航天器的通信联系	20
2.4	近程交会操作	21
2.4.1	接近	21
2.4.2	最后逼近	23
2.5	对接或停靠	26
2.5.1	目标和终极条件	26
2.5.2	关于捕获问题的讨论	27
2.6	撤离	28
2.6.1	撤离段的目标和终端条件	28
2.6.2	撤离的限制和问题	29
第3章	轨道动力学和轨道要素	32
3.1	参考坐标系	32
3.1.1	地心赤道坐标系 F_{eq}	33
3.1.2	轨道平面坐标系 F_{op}	33
3.1.3	航天器本体轨道坐标系 F_{l_0}	34
3.1.4	航天器姿态坐标系 F_a	36
3.1.5	航天器几何坐标系 F_{ge}	37
3.2	轨道动力学	38
3.2.1	围绕某一中心体的轨道运动	38
3.2.2	轨道修正	41
3.2.3	在目标参考坐标系中的运动方程	44
3.3	关于轨道类型的讨论	46
3.3.1	自由漂移运动	48
3.3.2	脉冲机动	54
3.3.3	连续推力机动	65
3.4	关于运动方程的总结	80

第 4 章 逼近安全和避撞	84
4.1 轨道安全与轨迹偏离	84
4.1.1 故障公差和轨道设计要求	85
4.1.2 轨道安全的设计原则	86
4.1.3 轨道偏差的成因	87
4.2 轨道摄动	88
4.2.1 残留大气的阻力	89
4.2.2 地球势能异常产生的摄动	95
4.2.3 太阳压力	96
4.2.4 羽流在追踪航天器和目标航天器之间的动态作用	98
4.3 航天器系统产生的轨道偏差	99
4.3.1 导航偏差引起的轨道偏差	100
4.3.2 推进偏差引起的轨道偏差	103
4.3.3 推进器故障导致的轨道偏差	107
4.4 轨道偏差的防护措施	108
4.4.1 主动轨道保护	108
4.4.2 被动轨道保护	111
4.5 避撞机动	117
第 5 章 逼近策略的设计因素	123
5.1 逼近策略的约束条件概述	123
5.2 发射和调相的约束	125
5.2.1 交点的漂移	125
5.2.2 到达时间的调整	126
5.3 几何约束和设备约束	127
5.3.1 目标捕获接口的位置和方向	127
5.3.2 交会敏感器的作用范围	136
5.4 同步监控的需要	138
5.4.1 日光照明	139

5.4.2	通信窗口	146
5.4.3	航天员的活动	149
5.4.4	调相和逼近中的时间—弹性因素	150
5.5	船载资源和操作储备	153
5.6	由目标站确定的逼近原则	155
5.7	逼近方案实例	158
5.7.1	逼近方案：案例 1	158
5.7.2	逼近方案：案例 2	170
5.7.3	逼近方案：案例 3	180
第 6 章	航天器船载交会控制系统	188
6.1	任务和功能	188
6.2	制导、导航和控制	190
6.2.1	导航滤波器	191
6.2.2	制导功能	198
6.2.3	控制功能	202
6.3	模式排序和设备管理	225
6.4	故障识别和修复概念	230
6.5	与自动系统的远程交互	237
6.5.1	与 GNC 功能的交互	238
6.5.2	对自动 GNC 系统的人工状态更新	239
6.5.3	人工在回路的自动 GNC 系统	240
第 7 章	交会导航敏感器	243
7.1	基本的测量需求和概念	244
7.1.1	测量需求	244
7.1.2	测量原理	256
7.2	射频敏感器	258
7.2.1	距离和距离变化率的测量原理	258

7.2.2	方向和相对姿态的测量原理	265
7.2.3	测量环境和干扰	270
7.2.4	对射频敏感器应用的综合评估	271
7.2.5	实例：俄罗斯 Kurs 系统	273
7.3	绝对卫星导航和相对卫星导航	280
7.3.1	导航卫星系统简介	280
7.3.2	用户部分的导航处理	284
7.3.3	差分 GPS 和相对 GPS 的功能原理	291
7.3.4	测量环境和干扰	296
7.3.5	空间交会对接中卫星导航的总体评估	297
7.4	光学交会敏感器	298
7.4.1	激光扫描测距仪	299
7.4.2	摄像交会敏感器	304
7.4.3	测量环境和干扰	310
7.4.4	对交会光学敏感器的总体评估	312
第 8 章	结构对接系统	317
8.1	对接和停靠的基本概念	317
8.1.1	对接操作	318
8.1.2	停靠操作	320
8.1.3	对接和停靠的共同点和主要不同点	323
8.2	对接和停靠装置类型	325
8.2.1	设计动因	325
8.2.2	中心对接装置和周边对接装置的比较	328
8.2.3	对接装置的导体同构设计	330
8.2.4	非加压的对接/停靠装置	332
8.2.5	对接和停靠装置举例	333
8.3	接触动力学/捕获	341
8.3.1	接触时的动量转换	341

8.3.2	冲击减振动力学	344
8.3.3	动量转换和冲击减振举例	348
8.3.4	捕获中冲击减振装置和对准装置	352
8.3.5	捕获装置	358
8.3.6	GNC 和对接系统的接口	365
8.4	最终连接的组件	367
8.4.1	结构锁	368
8.4.2	密封	372
第 9 章	空间和地面的系统设置	375
9.1	空间和地面段的功能和任务	376
9.1.1	交会任务中的一般系统设置	376
9.1.2	控制职责和控制级别	379
9.2	地面段对 RVD 的监视和控制	383
9.2.1	监管控制的概念	383
9.2.2	地面操作员所用的支持工具的功能	385
9.2.3	目标站航天员的监测和控制功能	391
9.3	通信限制	394
9.3.1	数据传递的可靠性	395
9.3.2	数据传输限制	398
第 10 章	验证与确认	405
10.1	验证与确认的局限性	406
10.2	开发过程中的 RVD 验证/确认方法	407
10.2.1	交会和对接的独有特性	409
10.2.2	开发周期中的验证阶段	410
10.3	验证的方法和工具	412
10.3.1	任务定义和可行性分析阶段	413
10.3.2	设计阶段	414