



“十二五”国家重点出版规划项目

航天器和导弹制导、导航与控制

航天器交会对接制导 导航控制原理和方法

Theory and Methods of Guidance,
Navigation and Control for
Spacecraft Rendezvous and Docking

解永春 陈长青 刘涛 王敏 © 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

解永春 陈长青 刘涛 王敏 著

航天器交会对接制导 导航控制原理和方法

Theory and Methods of Guidance, Navigation and
Control for Spacecraft Rendezvous and Docking

Introduction

Rendezvous Kinematics and Dynamics

Navigation Method and Schematic Design for Rendezvous and Docking

Guidance Method and Schematic Design for Rendezvous and Docking

Automatic Control Method and Scheme Design for Rendezvous and Docking

Manual Control Method and Scheme Design for Rendezvous and Docking

Theory and Design of Thruster Configuration and Control Allocation

Method and Scheme Design of Safety for Rendezvous and Docking

Simulation Verification of Rendezvous and Docking

RVD Verification in Orbit Flight



国防工业出版社
National Defense Industry Press

图书在版编目(CIP)数据

航天器交会对接制导导航控制原理和方法/解永春等著. —北京:国防工业出版社,2018. 1

(航天器和导弹制导、导航与控制丛书)

ISBN 978-7-118-11407-2

I. ①航… II. ①解… III. ①交会对接—会合制导—控制方法 IV. ①V448.234

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 267403 号

航天器交会对接制导导航控制原理和方法

著 者 解永春 陈长青 刘涛 王敏

责任编辑 肖姝 王华

出版发行 国防工业出版社(010-88540717 010-88540777)

地址邮编 北京市海淀区紫竹院南路23号,100048

经 售 新华书店

印 刷 三河市腾飞印务有限公司

开 本 710×1000 1/16

印 张 31¼

印 数 1-2000册

字 数 494千字

版 印 次 2018年1月第1版第1次印刷

定 价 158.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致读者

本书由中央军委装备发展部国防科技图书出版基金资助出版。

为了促进国防科技和武器装备发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。这是一项具有深远意义的创举。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在中央军委装备发展部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由中央军委装备发展部国防工业出版社出版发行。

国防科技和武器装备发展已经取得了举世瞩目的成就,国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。开展好评审工作,使有限的基金发挥出巨大的效能,需要不断摸索、认真总结和及时改进,更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 杨崇新

秘书长 杨崇新

副秘书长 邢海鹰 谢晓阳

委员（按姓氏笔画排序）

才鸿年 马伟明 王小谟 王群书 甘茂治

甘晓华 卢秉恒 巩水利 刘泽金 孙秀冬

芮筱亭 李言荣 李德仁 李德毅 杨伟

肖志力 吴宏鑫 张文栋 张信威 陆军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起 郭云飞

唐志共 陶西平 韩祖南 傅惠民 魏炳波

《航天器和导弹制导、导航与控制》 丛书编委会

顾 问 陆元九* 屠善澄* 梁思礼*

主任委员 吴宏鑫*

副主任委员 房建成*
(执行主任)

委员 (按姓氏笔画排序)

马广富	王 华	王 辉	王 巍*	王子才*
王晓东	史忠科	包为民*	邢海鹰	任 章
任子西	刘 宇	刘良栋	刘建业	汤国建
孙承启	孙柏林	孙敬良*	孙富春	孙增圻
严卫钢	李俊峰	李济生*	李铁寿	杨树兴
杨维廉	吴 忠	吴宏鑫*	吴森堂	余梦伦*
张广军*	张天序	张为华	张春明	张弈群
张履谦*	陆宇平	陈士橹*	陈义庆	陈定昌*

陈祖贵	周 军	周东华	房建成*	孟执中*
段广仁	侯建文	姚 郁	秦子增	夏永江
徐世杰	殷兴良	高晓颖	郭 雷*	郭 雷
唐应恒	黄 琳*	黄培康*	黄瑞松*	曹喜滨
崔平远	梁晋才*	韩 潮	曾广商*	樊尚春
魏春岭				

常务委员 (按姓氏笔画排序)

任子西	孙柏林	吴 忠	吴宏鑫*	吴森堂
张天序	陈定昌*	周 军	房建成*	孟执中*
姚 郁	夏永江	高晓颖	郭 雷	黄瑞松*
魏春岭				

秘 书 全 伟 宁晓琳 崔培玲 孙津济 郑 丹

注:人名有*者均为院士。

总序

航天器(Spacecraft)是指在地球大气层以外的宇宙空间(太空),按照天体力学的规律运行,执行探索、开发或利用太空及天体等特定任务的飞行器,例如人造地球卫星、飞船、深空探测器等。导弹(Guided Missile)是指携带有效载荷,依靠自身动力装置推进,由制导和导航系统导引控制飞行航迹,导向目标的飞行器,如战略/战术导弹、运载火箭等。

航天器和导弹技术是现代科学技术中发展最快,最引人注目的高新技术之一。它们的出现使人类的活动领域从地球扩展到太空,无论是从军事还是从和平利用空间的角度都使人类的认识发生了极其重大的变化。

制导、导航与控制(Guidance Navigation and Control, GNC)是实现航天器和导弹飞行性能的系统技术,是飞行器技术最复杂的核心技术之一,是集自动控制、计算机、精密机械、仪器仪表以及数学、力学、光学和电子学等多领域于一体的前沿交叉科学技术。

中国航天事业历经 50 多年的努力,在航天器和导弹的制导、导航与控制技术领域取得了辉煌的成就,达到了世界先进水平。这些成就不仅为增强国防实力和促进经济发展起了重大作用,而且也促进了相关领域科学技术的进步和发展。

1987 年出版的《导弹与航天丛书》以工程应用为主,体现了工程的系统性和实用性,是我国航天科技队伍 30 年心血凝聚的精神和智慧成果,是多种专业技术工作者通力合作的产物。此后 20 余年,我国航天器和导弹的制导、导航与控制技术又有了突飞猛进的发展,取得了许多创新性成果,这些成果是航天器和导弹的制导、导航与控制领域的新理论、新方法和新技术的集中体现。为适应新形势的需要,我们决定组织撰写出版《航天器

和导弹制导、导航与控制》丛书。本丛书以基础性、前瞻性和创新性研究成果为主,突出工程应用中的关键技术。这套丛书不仅是新理论、新方法、新技术的总结与提炼,而且希望推动这些理论、方法和技术在工程中推广应用,更希望通过“产、学、研、用”相结合的方式使我国制导、导航与控制技术研究取得更大进步。

本丛书分两个部分:第一部分是制导、导航与控制的理论和方法;第二部分是制导、导航与控制的系统和器部件技术。

本丛书的作者主要来自北京航空航天大学、哈尔滨工业大学、西北工业大学、国防科学技术大学、清华大学、北京理工大学、华中科技大学和南京航空航天大学等高等学校,中国航天科技集团公司和中国航天科工集团公司所属的科研院所,以及“宇航智能控制技术”“空间智能控制技术”“飞行控制一体化技术”“惯性技术”“航天飞行力学技术”等国家级重点实验室,而且大多为该领域的优秀中青年学术带头人及其创新团队的成员。他们根据丛书编委会总体设计要求,从不同角度将自己研究的创新成果,包括一批获国家和省部级发明奖与科技进步奖的成果撰写成书,每本书均具有鲜明的创新特色和前瞻性。本丛书既可为从事相关专业技术研究和应用领域的工程技术人员提供参考,也可作为相关专业的高年级本科生和研究生的教材及参考书。

为了撰写好本丛书,特别聘请了本领域德高望重的陆元九院士、屠善澄院士和梁思礼院士担任丛书编委会顾问。编委会由本领域各方面的知名专家和学者组成,编著人员在组织和技术工作上付出了很多心血。本丛书得到了中央军委装备发展部国防科技图书出版基金资助和国防工业出版社的大力支持。在此一并表示衷心感谢!

期望这套丛书能对我国航天器和导弹的制导、导航与控制技术的人才培养及创新性成果的工程应用发挥积极作用,进一步促进我国航天事业迈向新的更高的目标。

丛书编委会
2010年8月

前 言

航天器交会对接是完成诸如空间站在轨组建、航天器在轨服务、天体采样返回、载人空间探测等复杂空间任务的关键步骤,而交会对接制导、导航与控制技术是实施航天器交会对接的核心技术之一。交会对接的制导是考虑燃料消耗以及交会时间等约束,规划合理的交会运动轨迹,并给出实现该运动轨迹的变轨速度增量;交会对接的导航是利用测量敏感器的测量信息,结合航天器的运动模型,通过设计滤波算法,得到制导与控制环节所需要的平动和转动参数的估计值;交会对接的控制是基于导航信息,依据制导和姿态控制要求,通过一定的算法计算得到需要施加在航天器(通常是追踪器)上的控制力和控制力矩,并通过发动机等执行机构实施控制作用。交会对接制导、导航与控制的最终目标是在两航天器对接机构接触前,通过控制追踪器相对于目标器的位置、速度、姿态角和姿态角速度,满足两对接机构对接需要的初始条件。

本书作者团队从事交会对接制导、导航与控制领域研究近 20 年,并参与了中国载人航天工程和探月工程的研制工作。本书是作者在交会对接制导、导航与控制理论方法研究和工程实践中所取得的成果总结。基于这些成果设计的交会对接制导、导航与控制方案已成功应用于中国“神舟”八号、“神舟”九号、“神舟”十号与“天宫”一号的交会对接任务,这些成果对于中国后续的载人登月、深空探测、在轨服务等任务的工程研制具有重要借鉴意义。全书共计 10 章:第 1 章概述交会对接的基本概念和交会对接飞行方案;第 2 章介绍交会对接运动学和动力学;第 3 章介绍交会对接导航方法及方案设计;第 4 章介绍交会对接制导方法及方案设计;第 5 章介绍交会对接自动控制方法及方案设计;第 6 章介绍交会对接人工控制方法

及方案设计;第7章介绍发动机配置及控制指令分配理论与设计;第8章介绍交会对接的安全性设计;第9章介绍交会对接地面仿真;第10章介绍交会对接在轨飞行验证。

本书由解永春、陈长青、刘涛、王敏进行策划。解永春负责第5章、第6章、第10章的撰写,并参加了第1章至第4章、第9章的撰写;陈长青负责第2章、第4章和第8章的撰写;刘涛负责第1章和第3章的撰写;王敏负责第7章和第9章的撰写。此外,北京控制工程研究所的胡海霞、张昊、王勇、于欣欣、胡勇、梁静静、石磊、唐宁、辛优美、王颖等参与了本书相关内容的研究工作,并对本书撰写给予了大力支持。

在本书的撰写过程中,得到了中国空间技术研究院相关领导、专家和同事的大力支持和帮助,特别是“神舟”载人飞船研制团队的大力支持。衷心感谢吴宏鑫院士长期以来给予的鼓励和指导;衷心感谢屠善澄院士、周建平院士、戚发轫院士、杨保华研究员、张柏楠研究员、尚志研究员、刘良栋研究员、孙承启研究员、王南华研究员、陈祖贵研究员、胡军研究员、罗谷清研究员等专家在作者多年的研究工作中所给予的指导和帮助;衷心感谢张笃周研究员和袁利研究员对本书提出的宝贵意见。成稿后,国防科学技术大学汤国建教授对书稿做了详细的审阅并提出宝贵意见,在此表示衷心感谢。

本书的研究内容得到多项“国家自然科学基金”项目、“国家重点基础研究发展计划”项目(批准号:2013CB733100)的支持;本书的出版得到了国防科技图书出版基金的资助,国防工业出版社在本书的出版过程中给予了大力支持。在此,作者深表谢意。

由于作者水平有限,书中难免有不妥和错误之处,敬请读者指正。

作者

2017年6月

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	001	Chapter 1 Introduction	001
1.1 交会对接的基本概念	001	1.1 Basic Concept of Rendezvous and Docking	001
1.2 交会对接的阶段划分	002	1.2 Phases of Rendezvous and Docking	002
1.2.1 待发段	002	1.2.1 Before Launch Phase	002
1.2.2 发射段	003	1.2.2 Launch Phase	003
1.2.3 远距离导引段	003	1.2.3 Far Range Rendezvous Phase	003
1.2.4 近距离自主控制段	003	1.2.4 Near Range Autonomous Control Phase	003
1.2.5 对接段	005	1.2.5 Docking Phase	005
1.2.6 组合体运行段	006	1.2.6 Complex Flight Phase	006
1.2.7 撤离段	006	1.2.7 Departure Phase	006
1.2.8 返回再入段	006	1.2.8 Reentry Phase	006
1.3 交会对接技术发展概况	006	1.3 Overview of Rendezvous and Docking	006
1.3.1 概述	006	1.3.1 Introduction	006
1.3.2 交会对接任务分类	013	1.3.2 Classification of Rendezvous and Docking Missions	013
1.3.3 典型的交会对接飞行案例	019	1.3.3 Typical Rendezvous and Docking Flight Missions	019
1.3.4 交会对接技术未来发展趋势	028	1.3.4 Development Trend of RVD Technique	028
1.4 交会对接制导、导航与控制系统	029	1.4 Guidance Navigation and Control System for RVD	029
1.4.1 测量敏感器	029	1.4.1 Sensors	029
1.4.2 执行机构	032	1.4.2 Actuators	032
1.4.3 控制器	033	1.4.3 Controllers	033
参考文献	034	References	034

第2章 交会对接运动学和

动力学	035
2.1 坐标系定义	035
2.2 航天器轨道动力学	037
2.2.1 二体运动	037
2.2.2 轨道根数	037
2.2.3 轨道摄动方程	038
2.2.4 摄动加速度	039
2.3 航天器姿态运动学和动力学	040
2.3.1 姿态运动学方程	040
2.3.2 姿态动力学方程	043
2.3.3 空间环境力矩	045
2.4 相对位置运动描述	046
2.4.1 圆轨道直角坐标系下的 相对运动	046
2.4.2 椭圆轨道直角坐标系下的 相对运动	050
2.4.3 视线坐标系下的相对运动	051
2.4.4 圆柱坐标系下的相对运动	054
2.5 相对姿态运动描述	058
2.5.1 目标姿态小角度相对 姿态动力学方程	058
2.5.2 旋转目标相对姿态 动力学方程	060
2.6 坐标系和动力学方程选择	061
参考文献	062

Chapter 2 Rendezvous Kinematics and

Dynamics	035
2.1 Reference Frames	035
2.2 Orbit Dynamics	037
2.2.1 Two-body Problem	037
2.2.2 Orbit Elements	037
2.2.3 Orbit Perturbation Motion Equations	038
2.2.4 Perturbation Acceleration	039
2.3 Attitude Kinematics and Dynamics	040
2.3.1 Attitude Kinematics	040
2.3.2 Attitude Dynamics	043
2.3.3 Spacial Environmental Torques	045
2.4 Relative Motion	046
2.4.1 Relative Motion in Circular Orbital Frame	046
2.4.2 Relative Motion in Elliptical Orbital Frame	050
2.4.3 Relative Motion in Light of Sight Frame	051
2.4.4 Relative Motion in Cylindrical Frame	054
2.5 Relative Attitude	058
2.5.1 Relative Attitude Dynamics for Stable Target	058
2.5.2 Relative Attitude Dynamics for Rotating Target	060
2.6 Selection of Reference Frames and Dynamics Equation	061
References	062

第3章 交会对接导航方法及 方案设计	063
3.1 概述	063
3.1.1 相对测量系统	063
3.1.2 相对导航算法	067
3.2 测量敏感器	067
3.2.1 惯性测量敏感器	067
3.2.2 卫星导航设备	070
3.2.3 微波雷达	072
3.2.4 激光雷达	075
3.2.5 成像式交会对接敏感器	077
3.3 导航滤波方法	085
3.3.1 贝叶斯估计理论	085
3.3.2 线性最小方差估计	086
3.3.3 卡尔曼滤波	087
3.3.4 确定性采样滤波	088
3.3.5 粒子滤波	113
3.4 导航方案设计	116
3.4.1 概述	116
3.4.2 绝对轨道参数估计	117
3.4.3 相对位置参数估计	119
3.4.4 相对姿态参数估计	129
3.4.5 相对位姿参数联合估计	136
3.5 导航系统设计要点	142
参考文献	142

Chapter 3 Navigation Method and Schematic Design for Rendezvous and Docking	063
3.1 Introduction	063
3.1.1 Relative Measurement System	063
3.1.2 Relative Navigation Algorithms	067
3.2 Sensors	067
3.2.1 Inertial Navigation Sensors	067
3.2.2 Satellite Navigation Equipments	070
3.2.3 Microwave Radar	072
3.2.4 Laser Radar	075
3.2.5 Camera - Type Rendezvous and Docking Sensor	077
3.3 Filtering Method for Navigation	085
3.3.1 Theory of Bayesian Estimation	085
3.3.2 Linear Minimum Variance Estimation	086
3.3.3 Kalman Filter	087
3.3.4 Deterministic Sampling Filter	088
3.3.5 Particle Filter	113
3.4 Scheme Design of Navigation	116
3.4.1 Introduction	116
3.4.2 Orbit Parameter Estimation	117
3.4.3 Relative Motion Parameter Estimation	119
3.4.4 Relative Attitude Parameter Estimation	129
3.4.5 Relative Motion and Attitude United Estimation	136
3.5 Key Points of Navigation System Design	142
References	142

第4章 交会对接制导方法及 方案设计	145
4.1 引言	145
4.2 轨道控制交会制导	146
4.2.1 Hohmann 交会	146
4.2.2 Lambert 交会	147
4.2.3 基于轨道根数的交会	148
4.3 多脉冲最优交会制导方法	153
4.3.1 邻近圆轨道最优脉冲交会 模式分布	153
4.3.2 小偏心率椭圆轨道到圆 轨道最优脉冲交会模式分布	155
4.3.3 多脉冲最优交会制导律设计	168
4.4 CW 制导方法	170
4.4.1 两脉冲制导策略	170
4.4.2 交会时间和燃料消耗分析	172
4.4.3 两脉冲制导的交会时间确定	175
4.5 视线制导方法	176
4.5.1 视线制导策略	176
4.5.2 稳定性分析	177
4.6 远距离引导段制导方案设计	180
4.6.1 长周期远距离引导变轨方案	180
4.6.2 快速交会对接远距离导 引变轨方案	184
4.7 寻的段制导方案设计	191
4.7.1 寻的段初末状态和寻的 时间确定	191
4.7.2 多脉冲最优制导策略	192
4.7.3 制导精度分析	192
4.7.4 仿真分析	194
4.8 接近段制导方案设计	197
4.8.1 CW 制导策略	198
4.8.2 视线制导策略	198
4.8.3 联合制导策略	199
4.8.4 仿真分析	199
4.9 交会对接制导方案设计要点	203
参考文献	203

Chapter 4 Guidance Method and Schematic Design for Rendezvous and Docking	145
4.1 Introduction	145
4.2 Rendezvous by Orbital Maneuver	146
4.2.1 Hohmann Rendezvous	146
4.2.2 Lambert Rendezvous	147
4.2.3 Orbit Elements Based Rendezvous	148
4.3 Multiple - Impulse Optimal Rendezvous	153
4.3.1 Solutions of Optimal Impulsive Rendezvous between Two Near Circular Orbits	153
4.3.2 Solutions of Optimal Impulsive Rendezvous of Ellipse - to - Circle Orbits	155
4.3.3 Guidance Law with Multiple - Impulse Optimal Rendezvous	168
4.4 CW Guidance	170
4.4.1 Two - Impulse CW Guidance Law	170
4.4.2 Rendezvous Time and Fuel Consumption	172
4.4.3 Selection of Rendezvous Time	175
4.5 Light of Sight Guidance	176
4.5.1 Guidance Law	176
4.5.2 Stability Analysis	177
4.6 Scheme Design for Far Range Rendezvous Phase	180
4.6.1 2 ~ 3Day Guidance Scheme	180
4.6.2 Short Rendezvous Guidance Scheme	184
4.7 Scheme Design for Homing Phase	191
4.7.1 Determination of Initial and Final States, and Rendezvous Time	191
4.7.2 Multiple - Impulse Optimal Guidance Law	192
4.7.3 Analysis of Guidance Accuracy	192
4.7.4 Simulations	194
4.8 Scheme Design for Approaching Phase	197
4.8.1 CW Guidance Law	198
4.8.2 Light of Sight Guidance Law	198
4.8.3 United Guidance Law	199
4.8.4 Simulations	199
4.9 Key Points of Guidance System Design	203
References	203

第 5 章 交会对接自动控制方法及方案设计	205
5.1 引言	205
5.2 被控对象的特征建模	206
5.2.1 重要引理	206
5.2.2 特征模型	207
5.2.3 仿真验证	214
5.3 基于特征模型的智能自适应控制方法	220
5.3.1 黄金分割自适应控制	221
5.3.2 逻辑微分控制	225
5.3.3 黄金分割与相平面相结合的控制方法	249
5.3.4 逻辑微分与相平面相结合的控制方法	252
5.4 交会对接控制方案设计	254
5.4.1 变轨过程中的姿态稳定控制	254
5.4.2 高精度相对位置和相对姿态的六自由度控制	257
5.4.3 保持点的长时间相对位置控制	261
5.5 交会对接控制系统设计要点	262
参考文献	263

Chapter 5 Automatic Control Method and Scheme Design for Rendezvous and Docking	205
5.1 Introduction	205
5.2 Characteristic Modelling for the Plant to be Controlled	206
5.2.1 Important Lemma	206
5.2.2 Characteristic Model	207
5.2.3 Simulation Verification	214
5.3 Intelligent Adaptive Control Method Based on Characteristic Model	220
5.3.1 Golden - Section Adaptive Control	221
5.3.2 Logical Differential Control	225
5.3.3 Golden - Section Phase Plane Control	249
5.3.4 Logical Differential Phase Plane Control	252
5.4 Control scheme Design for RVD	254
5.4.1 Attitude Stable Control in Orbit Manoeuvre	254
5.4.2 Accurate 6 - DoF Relative Position and Attitude Control	257
5.4.3 Relative Position Control at the Holding Points for Long Period	261
5.5 Key Points of Control System Design	262
References	263