



“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

椭圆轨道航天器 导航制导与控制技术

Navigation Guidance and Control Technology of
Spacecraft on Elliptical Orbit

刘付成 卢山 孙玥 ©等著

刘付成 卢山 孙玥 等著

国防科技图书出版基金

椭圆轨道航天器 导航制导与控制技术

Navigation Guidance and Control Technology of
Spacecraft on Elliptical Orbit

Preface

Orbit Design of Spacecraft on Elliptical Orbit

Formation Configuration Design of Elliptical Orbit

Autonomous Navigation Technology of Whole Space

Autonomous Navigation Technology of Regional Constellation

Relative Navigation Technology

Technology of Formation Configuration Maintenance on Elliptical Orbit

Autonomous Rendezvous Technology of Elliptical Orbit



国防工业出版社
National Defense Industry Press

图书在版编目(CIP)数据

椭圆轨道航天器导航制导与控制技术/刘付成等著.

—北京:国防工业出版社,2016.7

(航天器和导弹制导、导航与控制)

“十二五”国家重点出版规划项目

ISBN 978-7-118-10891-0

I. ①椭… II. ①刘… III. ①椭圆轨道—航天器—
航天导航 ②椭圆轨道—航天器—制导 ③椭圆轨道—
航天器—飞行控制 IV. ①V412.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 159938 号

椭圆轨道航天器导航制导与控制技术

编 著 者 刘付成 卢山 孙玥 等著

责 任 编 辑 肖 姝

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 15

印 数 1-2000 册

字 数 218 千字

版 印 次 2016 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

定 价 75.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)



“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》丛书

Spacecraft 
Guided Missile

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

致读者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,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。

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总装备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,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业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。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作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 赵伯桥

秘书长 赵伯桥

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研究院所,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”和“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。

为了撰写好该丛书,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。本丛书得到了中国人民解放军总装备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

《椭圆轨道航天器导航制导与控制技术》 编写委员会

主	任	刘付成		
副	主	任	卢山	孙玥
委	员	武海雷	谭龙玉	詹鹏宇
		徐帷	田少雄	侯月阳
		王有峰	彭杨	贾成龙
		王奉文		

前言

自从1957年第一颗人造卫星上天伊始,人类探索太空的步伐就从未停止过,迄今为止全球已发射近6000颗卫星,目前在轨900多颗,这些卫星根据不同的任务需求大多分布在近地轨道、中轨道、地球同步轨道等近圆轨道。在不断提高卫星控制精度和能力的同时,以空间站为代表的交会对接技术也日趋成熟完善,并在人类开发空间的任务中发挥了重要作用。

纵观世界各国已发射的航天器,绝大多数运行在圆轨道或近圆轨道,这主要是综合考虑航天器实时定位、姿轨控制的难易程度以及地面测控站分布等因素后决定的。而另一类轨道——椭圆轨道近年来不断被各国开发利用,运行在该类轨道上的航天器与地球之间的距离在一个轨道周期内不断变化,在远地点运行速度慢,而经过近地点时的运行速度快。特别是近地点高度在近地轨道附近、远地点高度在地球同步轨道附近的大椭圆轨道,航天器可长时间运行在远地点附近。利用这一特性,航天器可在远地点对特定区域保持长时间的对地观测、通信等能力,特别是利用大倾角的大椭圆轨道,可实现圆轨道航天器无法实现的对地球上高纬度地区的长时间观测、通信,比较典型的例子就是俄罗斯的闪电(Molniya)系列通信卫星和美国的红外天基预警系统(SBIRS)。

严格来说,任何轨道都无法实现真正的圆轨道,但对于轨道偏心率非常小的近圆轨道,我们可以将其近似为圆轨道,从而简化航天器的定位与控制等任务要求。本书研究的重点是大椭圆轨道,特别是近地点高度在近地轨道附近、远地点高度在地球同步轨道附近此类具有较高实用价值的大椭圆轨道。

要利用好大椭圆轨道,航天器的导航、制导与控制(GNC)系统设计将

面临一系列挑战。首先,根据不同任务需求,如何设计大椭圆轨道才能有针对性地发挥出航天器的优势,这是采用大椭圆轨道的前提。其次,大椭圆轨道航天器的轨道高度变化大,传统的适用于圆轨道的自主导航方式有很大局限性,特别是大椭圆轨道航天器运行到远地点附近时,无法利用GPS等导航卫星实现自主定位,因此大椭圆轨道航天器的自主导航必然需要寻求新的方法。同时,大椭圆轨道上的自主交会和编队飞行是进一步发挥大椭圆轨道价值的技术方向,但由于相对轨道动力学与圆轨道有本质的区别,航天器之间的相对运动制导和控制需要采用全新的方法。因此,针对椭圆轨道的导航、制导与控制技术研究必将推动世界航天技术进一步发展与完善。

本书内容分为8章。第1章主要介绍椭圆轨道的特点、应用发展前景以及值得研究的控制系统关键问题。第2、3章主要介绍针对不同任务需求的大椭圆轨道设计方法,以及椭圆轨道下编队飞行的构型设计方法。第4~6章主要介绍椭圆轨道上单个航天器的自主导航方法、区域星座的自主导航方法以及星间相对导航方法。第7、8章主要介绍椭圆轨道编队构型维持和交会对接的控制方法。

本书能够出版,特别感谢上海航天控制技术研究所和上海市空间智能控制技术重点实验室的支持,以及国防科技图书出版基金和上海市科技人才计划项目(项目编号:14XD1421400、14QB1401800)的资助。

本书是作者多年来从事航天工程技术研发的经验总结,可作为相关专业的高年级本科生和研究生的参考教材,同时也可作为从事航天器GNC系统开发的研究人员和工程技术人员提供必要的专业知识和工程借鉴。限于作者的水平,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请广大读者批评指正,不吝赐教。

作者

2016年1月

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	001	Chapter 1 Preface	001
1.1 椭圆轨道特点	001	1.1 Characteristics of Elliptical Orbit	001
1.2 椭圆轨道卫星应用发展	002	1.2 Application and Development of Satellites on Elliptical Orbit	002
1.3 椭圆轨道航天器控制系统的关键问题	003	1.3 Key Problem of Elliptical Orbit Spacecraft Control System	003
1.4 本书结构	005	1.4 Chapter Organization	005
参考文献	006	References	006
第 2 章 大椭圆轨道航天器轨道设计	007	Chapter 2 Orbit Design of Spacecraft on Elliptical Orbit	007
2.1 引言	007	2.1 Introduction	007
2.2 椭圆轨道绝对动力学分析	008	2.2 Absolute Dynamics Analysis of Elliptical Orbit	008
2.2.1 椭圆轨道的基本特性	008	2.2.1 Basic Features of Elliptical Orbit	008
2.2.2 椭圆轨道摄动	010	2.2.2 Elliptical Orbit Perturbation	010
2.3 椭圆轨道自主轨道预报	016	2.3 Autonomous Orbit Prediction of Elliptical Orbit	016
2.3.1 椭圆轨道自主预报	016	2.3.1 Autonomous Orbit Prediction	016
2.3.2 椭圆星载轨道预报算法	017	2.3.2 Onboard Orbit Prediction Algorithm of Elliptical Orbit	017
2.3.3 椭圆轨道动力学模型分析与简化	019	2.3.3 Analysis and Predigestion of Elliptical Orbit Dynamics Model	019
2.4 远地点交会轨道设计	021	2.4 Design of Apogee Rendezvous Orbit	021
2.4.1 椭圆轨道漂移特性分析	022	2.4.1 Drift Characteristics Analysis of Elliptical Orbit	022
2.4.2 冻结椭圆轨道设计	026	2.4.2 Design of Frozen Elliptical Orbit	026
2.4.3 小倾角椭圆轨道设计	040	2.4.3 Design of Little Inclination Elliptical Orbit	040
2.5 遍历高轨卫星的椭圆轨道交会策略	045	2.5 Elliptical Orbit Rendezvous Method for Inspecting GEO Satellites	045
参考文献	048	References	048

第3章 椭圆轨道编队构型设计	050	Chapter 3 Formation Configuration Design of Elliptical Orbit	050
3.1 引言	050	3.1 Introduction	050
3.2 基于代数法的编队构型设计	051	3.2 Formation Configuration Design Based on Algebraic Method	051
3.2.1 相对动力学方程	051	3.2.1 Relative Dynamics Equation	051
3.2.2 周期性相对运动	054	3.2.2 Relative Periodic Motion	054
3.2.3 相对运动轨迹特性分析	058	3.2.3 Characteristics Analysis of Relative Motion Trajectory	058
3.2.4 绕飞构型设计	059	3.2.4 Fly-around Configuration Design	059
3.2.5 伴飞构型设计	062	3.2.5 Accompanying Flying Configuration Design	062
3.3 基于几何法的编队构型设计	065	3.3 Formation Configuration Design Based on Geometry	065
3.3.1 精确相对运动模型	065	3.3.1 Precise Model of Relative Motion	065
3.3.2 一阶近似相对运动模型	068	3.3.2 First-order Approximation Model of Relative Motion	068
3.3.3 编队构型设计	069	3.3.3 Formation Configuration Design	069
参考文献	071	References	071
第4章 全天域自主导航技术	072	Chapter 4 Autonomous Navigation Technology of Whole Space	072
4.1 引言	072	4.1 Introduction	072
4.2 大椭圆轨道环境下常用自主导航方法	074	4.2 Common Autonomous Navigation Method of Elliptical Orbit	074
4.2.1 基于天文观测的大椭圆航天器自主导航技术	074	4.2.1 Autonomous Navigation Technology of Elliptical Orbit Based on Astronomical Observation	074
4.2.2 基于 GNSS 的大椭圆轨道航天器自主导航技术	079	4.2.2 Autonomous Navigation Technology of Elliptical Orbit Based on GNSS	079
4.3 基于 SINS/GNSS/CNS 组合的融合自主导航	093	4.3 Merge Autonomous Navigation Based on SINS/GNSS/CNS	093
4.3.1 空间惯性导航状态方程	094	4.3.1 State Equation of Inertial Navigation	094
4.3.2 SINS/星敏感器/GNSS 组合导航观测方程	098	4.3.2 Observation Equation of SINS/Star Sensor/GNSS Navigation	098
4.3.3 SINS/星敏感器/GNSS 组合系统信息融合方法	101	4.3.3 Merge Scheme of SINS/Star Sensor/GNSS System	101
参考文献	107	References	107