



国防科技图书出版基金

“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

航天器自主天文导航 原理与方法(第2版)

Principles and Methods of Spacecraft
Celestial Navigation (Second Edition)

房建成 宁晓琳 刘劲◎著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版社

房建成 宁晓琳 刘 劲 著

航天器自主天文导航 原理与方法(第2版)

Principles and Methods of Spacecraft
Celestial Navigation(Second Edition)

Introduction
Sensors in Spacecraft Celestial Navigation
Orbit Dynamics and Attitude Dynamics of Spacecraft
Measurement Model and Filter Methods of Spacecraft Celestial Navigation
Satellite Direct Sensing Horizon Celestial Navigation Method and Performance Analysis
Satellite Celestial Navigation Method by Stellar Refraction and Performance Analysis
Principle and Methods of Celestial Navigation Using Angle Measurements for Deep Space Explorers
The Principle and Methods of Pulsar Navigation for Deep Space Explorers
Integrated Navigation of Celestial Navigation for Deep Space Explorers
Principle and Methods of Celestial and Integrated Navigation for Rovers
Principle and Methods of INS/CNS Integrated Navigation for Spacecrafts
Computer Simulation by STK
Star Image Preprocessing and Star Matching Technology in Celestial Navigation
Semi Physical Simulation System for Spacecraft Celestial Navigation
Prospect of Spacecraft Celestial Navigation



国防工业出版社
National Defense Industry Press

图书在版编目(CIP)数据

航天器自主天文导航原理与方法/房建成,宁晓琳,刘劲著.
—2版.—北京:国防工业出版社,2017.5

(航天器和导弹制导、导航与控制)

ISBN 978-7-118-11090-6

I. ①航… II. ①房… ②宁… ③刘… III. ①航天器—
天文导航—研究 IV. ①V249.32

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第096243号

航天器自主天文导航原理与方法(第2版)

著 者 房建成 宁晓琳 刘 劲 著

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 49¼

印 数 1-2000册

字 数 955千字

版 印 次 2017年5月第2版第1次印刷


定 价 198.00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,需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,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

天文导航技术是一门既古老又年轻的技术,起源于航海,发展于航空,辉煌于航天。自20世纪60年代以来,随着航天事业的发展,尤其是载人航天和深空探测任务的实施,都对航天器的自主导航技术提出了新的要求。作为航天器的主要自主导航方式之一,航天器天文导航技术也获得了高速发展。

早在20世纪60年代,国外就开始研究基于天体敏感器的航天器天文导航技术。与此同时,不断发展与天文导航系统相适应的各种传感器,包括地球传感器、太阳传感器、星传感器、自动空间六分仪等。例如,美国的林肯试验卫星-6、“阿波罗”登月飞船、苏联“和平”号空间站以及与飞船的交会对接等航天任务都成功地应用了天文导航技术。从70年代开始,随着深空探测任务的发展,天文导航技术也在深空探测器上获得应用,“水手”9号、“旅行者”1号和2号、“伽利略”号和“卡西尼”号探测器上均使用了天文导航技术。从90年代开始,天文导航系统作为完全独立的自主导航系统,在“深空”1号、星尘号、深度撞击等探测器上获得成功,开启了航天器天文导航技术的新篇章。

我国近年来航天事业快速发展,2005年“神舟”五号第一次实现了中国的载人梦想,此后,“神舟”六号到“神舟”十号也相继成功。在深空探测方面,“嫦娥”一号到“嫦娥”三号分别实现了绕月探测、月球着陆和巡视勘测,在不久的将来还将实现月球的采样返回。这些激动人心的航天任务都为航天器的自主天文导航研究带来了新的挑战。天文导航技术作为地球卫星、深空探测器和空间站自主导航的主要方式和远程弹道导弹、运载火箭和高空远程侦察机等的重要辅助导航手段,在未来人类探索宇宙的星际

航行中也必将发挥重要的作用。

本书重点研究航天器天文导航的基本原理和方法。全书内容共分 15 章。第 1 章~第 4 章,主要介绍了天文导航的相关基础知识和基本理论,其中:第 1 章,主要综述了天文导航技术的发展过程,简要介绍了航天器天文导航中常用的坐标系、时间系统和天体运动等基础知识;第 2 章简要介绍了天文导航中常用的天体敏感器;第 3 章概述了航天器的轨道姿态动力学方程;第 4 章介绍了航天器天文导航的测角、测距和测速三种主要量测信息和相应的量测方程,以及非线性滤波方法。第 5 章和第 6 章系统地论述了地球卫星自主天文导航的原理与方法。由于地球卫星的轨道动力学模型为二体问题,目前已有较精确的模型,因此天文量测信息尤其是制约导航精度的地平信息就成为地球卫星天文导航的关键。根据敏感地平方式的不同,地球卫星自主天文导航方法可分为直接敏感地平和利用大气星光折射间接敏感地平两种,因此本书用两个章节分别对这两种方法的原理、数学模型、滤波方法、计算机仿真结果以及相应的系统可观性进行了全面、深入的研究。第 7 章~第 9 章专门研究了深空探测器的自主天文导航原理与方法。根据测量方式的不同,深空探测器天文导航方法可分为测角、测距和测速。本部分分别针对测角、测距的不同特点和要求,研究了相应的自主天文导航方法。在此基础上,利用不同测量方法之间的互补性,研究了多种测角/测距/测速组合导航方法。天文导航的另一个重要的应用领域,是在深空探测巡视器和弹道导弹中作为辅助导航手段与惯性、视觉等导航技术相结合进行组合导航。第 10 章和第 11 章主要介绍了作者课题组将惯性/天文组合导航应用在巡视器和弹道导弹上取得的部分研究成果。第 12 章~第 14 章介绍了天文导航的计算机仿真和半物理仿真技术,其中:第 12 章阐述了如何利用 STK 软件生成卫星和深空探测器的轨道和姿态数据文件进行天文导航的计算机仿真的方法;第 13 章、第 14 章则介绍了作者课题组研制的天文导航半物理仿真系统及其设计方法,以及星图匹配和星体识别等关键技术。最后在第 15 章还对天文导航未来的发展趋势进行了展望。

作者及其课题组从 20 世纪末开始航天器天文导航方向的研究工作,在总结多年的教学实践和科研成果的基础上于 2006 年出版了《航天器自

主天文导航原理与方法》,获得了同行专家及相关科研人员的好评。本书在此基础上整合了近年来在国家自然科学基金重点项目(61233005)和国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2014CB744202)等支持下取得的最新科研成果,对大部分内容进行了更新,尤其是在深空探测器的自主天文导航技术方面,大幅增加了测角、测距、测速及其组合导航方法的研究进展。本书内容涉及多门学科前沿,内容较新。由于作者水平有限,难免存在不妥和错误之处,恳请广大同行、读者批评指正。最后,感谢在本书撰写过程中所有给予关心、支持和帮助的人们。

作者

2016年10月

目 录

CONTENTS

第 1 章 概论	001	Chapter 1 Introduction	001
1.1 航天器自主导航和天文导航		1.1 Overview of Spacecraft Autonomous	
概述	001	Navigation and Celestial Navigation	001
1.1.1 地球卫星的自主导航技术	002	1.1.1 Autonomous Navigation of	
1.1.2 深空探测器的自主天文导		Satellites	002
航技术	005	1.1.2 Autonomous Navigation of	
1.1.3 天文导航特点	010	Deep Space Explorers	005
1.2 坐标系	011	1.1.3 Characteristics of Celestial	
1.2.1 天球坐标系	011	Navigation	010
1.2.2 地球坐标系	014	1.2 Coordinate Systems	011
1.2.3 太阳坐标系	016	1.2.1 Celestial Coordinate System	011
1.3 时间系统	017	1.2.2 Terrestrial Coordinate System	014
1.3.1 世界时	017	1.2.3 Solar Coordinate System	016
1.3.2 恒星时	018	1.3 Time Systems	017
1.3.3 原子时	019	1.3.1 Universal Time	017
1.3.4 力学时	019	1.3.2 Sidereal Time	018
1.4 天体和天体运动	020	1.3.3 Atomic Time	019
1.4.1 天体	020	1.3.4 Dynamical Time	019
1.4.2 天体运动	023	1.4 Celestial Bodies and Their Motions	020
1.5 小结	025	1.4.1 Celestial Bodies	020
参考文献	025	1.4.2 The Motion of Celestial Bodies	023
		1.5 Summary	025
		References	025

第2章 天文导航的天体敏感器	031
2.1 引言	031
2.2 天体敏感器分类	031
2.3 恒星敏感器	032
2.3.1 恒星敏感器简介	032
2.3.2 恒星敏感器分类	033
2.3.3 恒星敏感器设计	034
2.3.4 恒星敏感器误差分析与标定	041
2.4 太阳敏感器	042
2.4.1 太阳敏感器简介	042
2.4.2 太阳敏感器分类	042
2.4.3 太阳敏感器设计	043
2.4.4 太阳敏感器试验与标定	046
2.5 地球敏感器	047
2.5.1 地球敏感器简介	047
2.5.2 地球敏感器分类	048
2.5.3 地球敏感器设计	050
2.5.4 地球敏感器试验与标定	051
2.6 其他天体敏感器	051
2.7 空间六分仪自主天文定位系统	054
2.8 MANS 自主天文导航系统	056
2.8.1 MANS 自主导航系统原理	056
2.8.2 MANS 自主导航系统硬件	057
2.8.3 MANS 自主导航系统软件	058
2.8.4 MANS 自主导航系统特点	059
2.9 X 射线敏感器	059
2.10 光谱摄仪	062
2.11 小结	065
参考文献	065

Chapter 2 Sensors in Spacecraft Celestial Navigation	031
2.1 Introduction	031
2.2 Classification of Sensors	031
2.3 Star Sensors	032
2.3.1 Overview of Star Sensors	032
2.3.2 Classification of Star Sensors	033
2.3.3 Design of Star Sensors	034
2.3.4 Error Analysis and Calibration of Star Sensors	041
2.4 Sun Sensors	042
2.4.1 Overview of Sun Sensors	042
2.4.2 Classification of Sun Sensors	042
2.4.3 Design of Sun Sensors	043
2.4.4 Test and Calibration of Sun Sensors	046
2.5 Earth Sensors	047
2.5.1 Overview of Earth Sensors	047
2.5.2 Classification of Earth Sensors	048
2.5.3 Design of Earth Sensors	050
2.5.4 Test and Calibration of Earth Sensors	051
2.6 Other Sensors	051
2.7 Space Sextant-Autonomous Navigation and Attitude Reference System (SS-ANARS)	054
2.8 Microcosm Autonomous Navigation System (MANS)	056
2.8.1 Overview of the MANS	056
2.8.2 Hardware of the MANS	057
2.8.3 Software of the MANS	058
2.8.4 Characteristic of the MANS	059
2.9 X-Ray Sensors	059
2.10 Spectrometer	062
2.11 Summary	065
References	065