



“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

航天器自主导航技术

Autonomous Navigation Technology for Spacecraft

王大轶 魏春岭 熊凯 © 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

王大珩 魏春岭 熊

航天器自主导航技术

Autonomous Navigation Technology for Spacecraft

Introduction

Basic Principles for Autonomous Navigation

Methods of Navigation Filtering and Performance Evaluation

Autonomous Navigation Based on Infrared Earth Sensor and Star Sensor

Autonomous Navigation Based on Integrated Earth, Sun and Moon Sensor

Autonomous Navigation Based on Ultraviolet Sensor

Autonomous Navigation with Aid of Inter-Satellite Measurement

Systematic Error Modeling and On-Orbit Calibration

Ground Experiment Technique of Autonomous Navigation

Prospects of Spacecraft Autonomous Navigation Technique

Astronomic Constants

Multiple-Model Adaptive Estimation Algorithm

Glossary



国防工业出版社

National Defense Industry Press

图书在版编目(CIP)数据

航天器自主导航技术/王大轶,魏春岭,熊凯著. —北京:
国防工业出版社,2017.4

(航天器和导弹制导、导航与控制丛书)

ISBN 978 - 7 - 118 - 11263 - 4

I. ①航… II. ①王… ②魏… ③熊… III. ①航
天导航 IV. ①V556

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 044251 号

航天器自主导航技术

著 者 王大轶 魏春岭 熊 凯

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 20 $\frac{3}{4}$

印 数 1 - 2000 册

字 数 320 千字

版 印 次 2017 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

定 价 112.00 元


(本书如有印装错误,我社负责调换)



国防工业出版社

“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”“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

序

当今,人类社会正处在一个科技创新成果不断涌现的重要时期,世界科技发展的势头非常迅猛,正孕育着新的重大突破。航天技术促进了人类对太空资源的开发利用,已成为推动经济发展和知识传播应用的重要引擎,吸引着众多有理想、有抱负的年轻人投身于这项事业,并为之奋斗。

经过 40 多年的发展,我国已成为世界上拥有地球卫星最多的国家之一,成功实现了载人航天和绕月探测,建设了“北斗”卫星导航定位系统,同时,火星探测、登月等项目也在进行之中。航天器数量逐年增加、任务能力不断提升,对不依赖地面测控的自主导航技术提出了迫切需求。开展新机理新体制自主导航技术研究,能够提升高价值空间系统的自主态势感知和持久信息保障能力,对保障国家利益和公共安全具有重要意义。

本书在大量参考国外资料的前提下,与我国的工程实践紧密结合,系统、深入地阐述了航天器自主导航的基本原理、关键技术、数据处理和试验方法,并对未来研究方向进行了分析与展望,比较充分地反映了自主导航技术的飞速发展状况。本书的出版为我国下一代智能高品质卫星平台和空间机器人导航系统的研发提供了理论依据,对将来小行星和木星系探测、地外生命探寻等重大工程方案的论证具有借鉴价值,较好地满足了当前日益增长的技术需求。

我曾担任北京控制工程研究所所长,本书作者王大轶、魏春岭和熊凯发扬老一辈航天人的科学精神和工作态度,坚持理论和方法创新,做出了卓有成效的工作,解决了一系列技术难题,取得了具有应用价值的研究成

果,本书是作者十多年科研、教学成果的总结与提炼。

殷切希望本书能够为我国航天控制领域的科研人员,尤其是新加入航天科技攻关队伍的年轻人提供有价值的参考,并为航天器自主导航技术的推广应用起到积极的促进作用,衷心祝愿作者在今后的科研工作中取得更大进步,同时祝愿从事相关研究的学者们为我国航天科技发展做出更大贡献。

刘良栋

2017年2月

前 言

航天器自主导航指的是在不依赖地面支持的情况下,仅利用自身携带的测量设备在轨实时确定航天器位置和速度的技术。自主导航能够降低航天器对地面测控的依赖程度,提高航天器的自主性和安全性。本书以地球轨道航天器为应用对象,重点论述以自然天体为测量目标的天文导航技术,内容涉及天文导航的基础理论、导航滤波算法、基于光学导航敏感器的目标测量和误差校正方法,以及地面试验验证技术等。

全书内容分为四部分,共10章。第一部分是基本概念和基本原理,其中第1章为绪论,介绍了自主导航的基本概念,综述了在航天任务中的发展历程和技术特点;第2章和第3章分别介绍了自主导航的基本原理以及自主导航滤波方法和性能分析方法。第二部分研究了针对不同传感器配置方案的自主导航技术和提高自主导航精度的实用方法,包括第4章~第8章,分别是:基于红外地球敏感器和星敏感器的自主导航技术、基于一体化日-地-月敏感器的自主导航技术、基于紫外敏感器的自主导航技术和星间测量辅助的自主导航方法,以及自主导航系统误差建模与在轨校正技术。第三部分(第9章)主要介绍了自主导航的数学仿真和半物理仿真试验技术。第四部分(第10章)是全书总结和对技术发展趋势的展望。

本书是作者十多年相关研究成果的总结和提炼,重点论述了地球轨道航天器自主导航的理论、方法和技术问题,分析了提高自主导航精度的技术途径,是一本融基础理论方法与仿真试验技术为一体的学术专著,既可作为航天工程领域科研人员的参考书,也可作为高等院校相关专业研究生和高年级本科生的教材。

本书成稿过程中,得到了“空间智能控制技术”重点实验室航天器自主

导航技术研究团队的大力支持,其中李骥、李茂登、黄翔宇、张斌等参与了本书仿真试验以及数据整理工作。

承蒙刘良栋研究员、吴宏鑫院士对本书给予了指导,李果研究员、李铁寿研究员和何英姿研究员提出了宝贵意见,国防工业出版社做了大量工作,在此一并致谢。

本书研究工作得到了国家杰出青年科学基金(61525301)、国家自然科学基金(61690215、61673057、61573059)、北京市自然科学基金(4162070)、民用航天项目、国家973计划和北京控制工程研究所的大力支持,本书的出版得到了国防科技图书出版基金的资助,作者在此表示衷心的感谢。

自主导航技术发展迅速,加上作者水平所限,难以全面、完整地就研究前沿一一深入探讨。书中错误及不当之处,恳请广大读者批评指正。

作者

2017年1月于北京

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	001	Chapter 1 Introduction	001
1.1 航天器自主导航基本概念	002	1.1 Basic Concept for Spacecraft Autonomous Navigation	002
1.2 地球轨道航天器自主导航方法	003	1.2 Main Methods for Earth Orbit Spacecraft Autonomous Navigation	003
1.3 本书主要内容	026	1.3 Contents of This Book	026
参考文献	028	References	028
第 2 章 自主导航的基本原理	033	Chapter 2 Basic Principles for Autonomous Navigation	033
2.1 参考坐标系	034	2.1 Reference Coordinate System	034
2.2 时间系统	037	2.2 Time System	037
2.3 日、月星历计算	040	2.3 Calculation of Sun and Luna Ephemeris	040
2.4 轨道动力学模型	044	2.4 Orbital Dynamics Model	044
2.5 地球测量特性	050	2.5 Measurement Character of Earth	050
2.6 远天体测量方法	056	2.6 Measurement Method for Far Celestial Bodies	056
2.7 天文自主导航原理	062	2.7 Principles for Autonomous Celestial Navigation	062
参考文献	066	References	066
第 3 章 导航滤波与性能分析方法	067	Chapter 3 Methods of Navigation Filtering and Performance Evaluation	067
3.1 卡尔曼滤波方法	068	3.1 Kalman Filtering Method	068
3.2 UKF 滤波方法	073	3.2 Unscented Kalman Filtering Method	073
3.3 鲁棒滤波方法	082	3.3 Robust Filtering Method	082
3.4 方差下界分析方法	092	3.4 Covariance Lower Bound Evaluation Method	092
3.5 小结	094	3.5 Summary	094
参考文献	095	References	095