



★ ★ ★  
“十三五”

国家重点出版物出版规划项目



国之重器出版工程  
国防现代化建设

空间技术与科学研究丛书

主编 叶培建 副主编 张洪太 余后满

## Spacecraft Autonomous Navigation Technology Based on Multi-source Information Fusion

# 航天器多源信息 融合自主导航技术

王大珩 李茂登 黄翔宇 张晓文 著



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLISHING FOUNDATION

★ ★ ★ ★ ★  
“十三五”

国家重点出版物出版规划项目

空间技术与科学研究丛书

主编 叶培建 副主编 张洪太 余后满



# 航天器多源信息 融合自主导航技术

Spacecraft Autonomous Navigation  
Technology Based on Multi-source  
Information Fusion



王大轶 李茂登 黄翔宇 张晓文 著



 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLISHER FOUNDATION

# 《空间技术与科学研究丛书》

## 编写委员会

主 编 叶培建

副主编 张洪太 余后满

编 委 (按姓氏笔画排序)

|     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|
| 王大珩 | 王华茂 | 王海涛 | 王 敏 |
| 王耀兵 | 尤 睿 | 邢 焰 | 孙泽洲 |
| 李劲东 | 杨 宏 | 杨晓宁 | 张 华 |
| 张庆君 | 陈 琦 | 苗建印 | 赵和平 |
| 荣 伟 | 柴洪友 | 高耀南 | 谢 军 |
| 解永春 |     |     |     |

# 《空间技术与科学研究丛书》

## 组织工作委员会

主任 张洪太

副主任 余后满 李明

委员 (按姓氏笔画排序)

马强 王永富 王敏 仇跃华

卢春平 邢焰 乔纪灵 向树红

杨宏 宋燕平 袁利 高树义

办公室 梁晓珩 梁秀娟

# 《空间技术与科学研究丛书》

## 出版工作委员会

主任 林杰 焦向英

副主任 樊红亮 李炳泉

委员 (按姓氏笔画排序)

王佳蕾 边心超 刘派 孙澍

李秀梅 张海丽 张慧峰 陈竑

国珊 孟雯雯 莫莉 徐春英

梁铜华



## 序言一

中国空间技术研究院到如今已经走过五十年，在五十年发展历程中，从无到有，从小到大，从东方红一号到各类应用卫星，从近地到月球探测，从卫星到载人飞船，形成了完整、配套的空间飞行器系统和分系统的规划、研制、设计、生产、测试及运行体系，培养造就了一支高水平、高素质的空间飞行器研制人才队伍，摸索出了一套行之有效的工程管理方法和国际合作路子，可以说，中国空间技术研究院已经成为了中国空间技术事业的主力军、中流砥柱。

在中国空间技术研究院成立五十周年之际，院领导和专家们觉得很有必要把几十年来的技术、管理成果进行系统地梳理、凝练、再创作，写出一套丛书，用于指导空间工程研制和人才培养，为国家，为航天事业，也为参与者留下宝贵的知识财富和经验沉淀。

在各位作者的努力之下，由北京理工大学出版社协助，这套丛书得以出版了，这是一件十分可喜可贺的大事！丛书由中国空间事业实践者们亲自书写，他们当中的许多人，我们都一起工作过，都已从一个年轻的工程师成长为某个专业的领军人物、某个型号系列的总设计师，他们在航天科研实践中取得了巨大成就并积累了丰富的经验，现在他们又亲自动手写书，真为他们高兴！更由衷地感谢他们的巨大付出，由这些人所专心写成的著作，一定是含金量十足的！再加之这套丛书的倡议者一开始就提出了要注意的几个要素：理论与实践相结合；处理好过去与现在的关系；处理好别人与自己成果的关系，所以，我相信这套丛书一定是有鲜明的中国特色的，一定是质量上乘的，一定是会经得起历史检验的。

我一辈子都在航天战线工作，虽现已年过八旬，但仍愿为中国航天如何从航天大国迈向航天强国而思考和实践。和大家想的一样，我也觉得人才是第一



等重要的事情，现在出了一套很好的丛书，会有助于人才培养。我推荐这套书，并希望从事这方面工作的工程师、管理者，乃至在校师生能读好这套书，它一定会给你启发、给你帮助、有助于你的进步与成长，从而能为中国空间技术事业多做一点贡献。

中国科学院院士

孙家栋



## 序言二

以1968年中国空间技术研究院创立为起点，中国空间技术的发展经历了波澜壮阔、气势磅礴的五十年。五十年来，我国空间技术的决策者、研究者和实践者为发展空间技术、探索浩瀚宇宙、造福人类社会付出了巨大努力，取得了举世瞩目的光辉成就。

中国空间技术研究院作为中国空间技术的主导性、代表性研制中心和发展基地，在五十年发展历程中，从无到有，从小到大，形成了完整、配套的空间飞行器系统和分系统的规划、研制、设计、生产、试验体系，培养造就了一支高水平、高素质的空间飞行器研制人才队伍，摸索出了一套行之有效的系统工程管理方法，成为中国空间技术事业的中流砥柱。

薪火相传、历久弥新。中国空间技术研究院勇挑重担，以自身的空间学术地位和深厚积累为依托，肩负起总结历史、传承经验、问路未来的使命，组织一批空间技术专家和优秀人才，共同编写了《空间技术与科学研究丛书》，共计23分册。这套丛书较为客观地回顾了空间技术发展的历程，系统梳理、凝练了空间技术主要领域、专业的理论和实践成果，勾勒出空间技术、空间应用与空间科学未来的发展方向。

中国空间技术研究院领导对丛书的出版寄予厚望，精心组织、高标准、严要求。《空间技术与科学研究丛书》编写团队主要吸收了中国空间技术研究院方方面面的型号骨干和一线研究人员。他们既有丰富的工程实践经验，又有深厚的理论功底；他们是在中国空间技术发展历练、成长起来的一代新人，也是支撑我国空间技术持续发展的核心力量。在丛书编写过程中，编写队伍克服时间紧、任务重、资料分散、协调复杂等困难，兢兢业业、精益求精，以为国家、为事业留下成果，传承航天精神的高度责任感开展工作，共同努力完成了



这套系统性强、技术水平高、内容丰富多彩的空间技术权威著作，值得称赞！

我一辈子都在从事空间技术研究和管理工作，深为中国空间事业目前的成就而感到欣慰，也确信将来会取得更大的成果，一代更比一代强。作为航天战线上的一名老战士，希望大家能够“读好书、好读书”，通过阅读像《空间技术与科学研究丛书》这样的精品，承前启后、再接再厉，为我国航天事业和空间技术的后续发展做出更大的贡献。

中国科学院院士 中国工程院院士

闵桂荣





## 序言三

1970年4月24日，中国成功发射了第一颗人造地球卫星，进入了世界航天国的行列。我国空间技术这几十年来取得了发射多种航天器、载人航天、深空探测等领域的多项成就。通信、导航、遥感、空间科学、新技术试验等卫星，已广泛应用于经济、政治、军事等各个领域，渗透到人们日常生活的每一个角落。从首次载人航天飞行到出舱活动，从绕月探测到月球表面着陆、巡视，空间技术以丰富多彩的形式扩大了中国人的生活空间和活动范围，进一步激发了中国人探索、创新、发展的勇气，展现了中国人的智慧和才智。

对未知领域的不断探索是知识的积累和利用效率的提高，是人类社会发展的不竭动力。空间活动从来就不仅仅是单纯的科学或技术活动，其中包含着和被赋予了更多的内涵。从科学角度看，它研究的是宇宙和生命起源这一类最根本也是最前沿的问题；从人才角度看，它能够吸引、培养和锻炼一大批顶尖人才；从经济角度看，它立足非常雄厚的经济实力，并能够创造新的经济增长点；从政治角度看，它争取的是未来的领先地位和国际影响力；从思想角度看，它代表的是人类追求更强能力、更远到达、更广视野、更深认知的理想。空间技术的发展可对一个国家产生多方面、多维度、综合性影响，促进多个领域的进步，这正是开展空间活动的意义所在。

当前我国空间技术发展势头强劲，处于从航天大国向航天强国迈进的重要阶段、战略机遇期和上升期。空间技术的发展，特别是一系列航天重大工程和型号任务的实施，不仅突破了一大批具有自主知识产权的核心技术和关键技术，也取得了一系列科技创新成果。系统总结空间技术发展经验和规律，探索未来发展技术路线，是航天人的重要使命。丛书作者团队对长期从事技术工作的体会进行系统总结，使之上升为知识和理论，既可以指导未来空间技术的发



展，又可成为航天软实力的重要组成部分。

我衷心祝贺，这套内容丰富、资料翔实、思维缜密、结构合理、数据客观的丛书得以出版。这套丛书有许多新观点和新结论，既有广度又有深度。丛书具有较好的工程实践参考价值，会对航天领域管理决策者、工程技术人员，以及高等院校相关专业师生有所启发和帮助，助推我们事业的发展！

空间技术对富民强军、强国有重要的支撑作用，世上未有强国而不掌握先进空间技术者。深邃宇宙，无尽探求。相信这套丛书的出版能够承载广大空间技术工作者孜孜探索的累累硕果，推动我国空间技术不断向前发展，丰富对客观世界的认知，促进空间技术更好地服务国家、服务人民、服务人类。

中国科学院院士

王希季



## 主编者序

2018年，中国的空间事业已经走过了六十多年！这些年来，中国的空间事业从无到有、由小到大、正在做强！以东方红一号卫星、神舟五号载人飞船、嫦娥一号月球探测器为代表的三大里程碑全方位代表了200余个空间飞行器的研制历程和丰富内涵。这个内涵既是人文的，又是技术的，也是管理的。从人文角度看，“两弹一星”精神在新一代航天人身上传承、发扬，他们在推动中国空间技术发展和壮大的道路上留下了锐意进取、顽强拼搏、砥砺前行的清晰足迹；从技术角度看，一批新理论、新技术和新方法不断被提出、被验证和被采用，一次又一次提升了我国空间技术水平的高度；从管理角度看，中国空间事业孕育了中国特色的管理理念与方法。这些年，产生了一大批科技报告、学术著作与论文、管理规范、软件著作权、技术专利等。但遗憾的是这些成果分散在各个不同的单位、不同的研制队伍、不同的专业里，有待进一步提高其系统性、完整性和受益面。中国空间技术研究院的领导和专家们认为很有必要进行系统地梳理、凝练、再创作，编写出一套丛书，用于指导空间工程系统研制和人才培养，为国家，为航天事业，也为参与者留下宝贵的知识财富和经验沉淀。

基于此，在中国空间技术研究院与北京理工大学的共同推动下，决定由中国空间技术研究院第一线工作团队和专家们亲自撰写，北京理工大学出版社负责编辑，合力出版《空间技术与科学研究丛书》。这是我国学术领域和航天界一件十分重要而有意义的事！这套丛书的出版也将成为纪念中国空间技术研究院成立五十周年的一份厚礼！

如此一套丛书，涉及了空间技术、空间科学、空间应用等许多学科和专业，如何策划丛书框架和结构就成为首要问题。经对空间技术发展历史、现状



和未来综合考虑,结合我国实际情况和已有的相关著作,几经讨论、增删、合并,确定了每分册一定要有精干专家主笔的原则,最后形成了由23分册构成的《空间技术与科学研究丛书》。具体名称如下:《宇航概论》《航天器系统设计》《空间数据系统》《航天器动力学与控制》《航天器结构与机构》《航天器热控制技术》《航天器电源技术》《航天器天线工程设计技术》《航天器材料》《航天器综合测试技术》《航天器空间环境工程》《航天器电磁兼容性技术》《航天器进入下降与着陆技术》《航天器项目管理》《航天器产品保证》《卫星通信技术》《卫星导航技术》《卫星遥感技术(上下册)》《载人航天器技术》《深空探测技术》《卫星应用技术》《空间机器人》《航天器多源信息融合自主导航技术》,丛书围绕中国空间事业的科学技术、工业基础和工程实践三条主线,几乎贯穿了空间科学、空间技术和空间应用的所有方面,并尽量反映当前“互联网+”对航天技术的促进及航天技术对“互联网+”的支持这两方面所取得的成果。正因为如此,它也被优选为“‘十三五’国家重点出版物出版规划项目”和“国家出版基金项目”。

如此一套丛书,参与单位众多,主笔者20余人,参与写作百人以上,时间又较紧迫,还必须保证高质量,精心组织和科学管理一定是必需的。我们用管理航天工程的方法来管理写作过程,院领导亲自挂帅、院士专家悉心指导,成立以总体部科技委为主的日常工作班子,院科技委和所、厂科技委分级把关,每一分册都落实责任单位,突出主笔者负责制,建立工作信息交流平台,定期召开推进会以便交流情况、及时纠正问题、督促进度,出版社同志进行培训和指导等。这些做法极大地凝聚了写作队伍的战斗力,优化了写作过程,从而保证了丛书的质量和进度。

如此一套丛书,我们期望它成为可传世的作品,所以它一定要是精品。如何保证出精品,丛书编委会一开始就拟定了基本思路:一是理论与实践相结合,它不是工程师们熟悉的科技报告,更不是产品介绍,应是从实践中总结出来,经过升华和精炼的结晶,一定要有新意、有理论价值、有较好的普适性。二是要处理好过去和现在的关系,高校及航天部门都曾有过不少的空间技术方面的相关著作,但这十年来空间技术发展很快,进步很大,到2020年,随着我国空间站、火星探测、月球采样返回和月球背面探测、全球导航等重大工程相继完成,我们可以说,中国进入了航天强国的行列。在这个进程中,有许多新理论、新技术和新事物就已呈现,所以丛书要反映最新成果。三是处理好别人和自己成果的关系,写书时为了表达的完整性、系统性,不可避免要涉及一些通用、基础知识和别人已发表的成果,但我们这次的作品应主要反映主笔者为主的团队在近年来为中国空间事业发展所获的成果,以及由这些成果总结出



来的理论、方法与技术，涉及他人的应尽可能分清、少用，也可简并。作品要有鲜明的团队特点，而团队特点应是某一领域、某一专业的中国特点，是“中国货”。从写作结果来看，我认为，丛书作者们努力实践了这一要求，丛书的质量是有保证的，可经得起历史的检验。

丛书可以为本科生、研究生，以及科研院所和工业部门中的专业人士或管理人员提供一系列涵盖空间技术主要学科和技术的专业参考，它既阐述了基本的科学技术概念，又涵盖了当前工程中的实际应用，并兼顾了今后的技术发展，是一套很好的教科书、工具书，也一定会成为书架的亮点。

在此，作为丛书主编者，一定要向为这套丛书出版而付出辛勤劳动的所有人员表示衷心感谢！尤其是中国空间技术研究院张洪太院长、余后满副院长，北京理工大学胡海岩校长和张军校长，北京理工大学出版社社长林杰副研究员，各分册主笔者和参与写作的同志们。没有中国空间技术研究院总体部科技委王永富主任和秘书处团队、北京理工大学出版社社长助理李炳泉女士和出版团队的辛勤、高效工作，丛书也不可能这么顺利地完成。

谢谢！

中国科学院院士



# 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。基于多源信息融合的自主导航是对多种信息源(多观测目标、多传感器、先验知识等)进行融合处理的一种自主导航方式。基于多源信息融合的自主导航技术在深空探测领域有着很大的应用前景,相比单一传感器、单一观测源的自主导航方式,其在增强信息冗余性、扩展时间/空间覆盖性以及减少信息获取成本等方面有着较大的优势。本书以深空探测航天器为应用对象,重点论述多源信息融合理论方法及其在深空探测自主导航中的应用,内容涉及估计理论、融合算法、性能分析、信息融合自主导航技术以及地面仿真试验技术等。

全书内容分为四部分,共13章。第一部分为第1章绪论,介绍自主导航的基本概念,对深空探测航天器自主导航的主要方法进行梳理和归纳,对多源信息融合自主导航技术进行介绍,并对全书的主要内容进行了概括。第二部分为理论篇,包括第2~第4章,分别是估计理论、融合算法和性能分析,这几章构成多源信息融合自主导航技术的理论基础。第三部分为应用篇,包括第5~第12章,分别是时空系统、动力学模型与环境模型、惯性自主导航技术、光学自主导航技术、脉冲星自主导航技术、光学与脉冲星融合自主导航技术、惯性与测距测速/光学融合自主导航技术、航天器多源信息融合自主导航仿真试验技术。第四部分是第13章——航天器多源信息融合自主导航技术的发展展望。

本书的主要特色如下:

(1) 本书中的估计、融合理论强调的是基础部分,其主要论述思路是先给出一般情形,再具体到特殊情形,这样更有利于读者对问题根本的把握。此外,本书在叙述信息融合基础理论部分时,尽可能给出一种算法的多种形式,



这样有助于科研工作者查阅以及便于建立不同形式的概念联系。

(2) 本书中涉及的航天器自主导航技术, 强调的是实用性, 其中部分已经应用在“嫦娥三号”软着陆探测器等实际飞行任务中, 还将应用在“嫦娥四号”和“嫦娥五号”等后续任务中。

(3) 本书注重的是估计、融合理论与自主导航技术的结合, 因此在叙述技术应用时会对相关的理论方法进行简单的回顾, 以便于读者建立理论与应用之间的联系。

本书在编写过程中, 得到了中国空间技术研究院航天器动力学与自主导航技术研究团队的大力支持, 其中褚永辉、李骥、熊凯、徐超等参与了本书部分内容的编写、仿真试验以及数据整理工作。

承蒙叶培建院士、刘良栋研究员与王永富研究员对本书出版的深切关注和大力支持, 吴宏鑫院士、杨孟飞院士、李果研究员、孙京研究员、何英姿研究员、魏春岭研究员和李铁寿研究员对本书给予了指导并提出宝贵意见。中国空间技术研究院总体部梁晓珩秘书长和北京理工大学出版社为本书的出版做了大量的工作, 在此一并致谢。

本书的研究工作得到了国家杰出青年科学基金(61525301)、国防科技卓越青年人才基金、国家自然科学基金(61690215、61673057、61503023)、民用航天项目、中国空间技术研究院总体部、北京控制工程研究所和空间智能控制技术重点实验室的大力支持, 作者在此表示衷心的感谢。

航天器多源信息融合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, 恳请读者批评指正。

作者

2017年12月



# 目 录

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 第 1 章 绪论 .....            | 001 |
| 1.1 航天器自主导航技术 .....       | 003 |
| 1.1.1 惯性自主导航 .....        | 003 |
| 1.1.2 光学自主导航 .....        | 012 |
| 1.1.3 脉冲星自主导航 .....       | 015 |
| 1.2 多源信息融合技术 .....        | 020 |
| 1.2.1 多源信息融合的定义 .....     | 020 |
| 1.2.2 多源信息融合的模式 .....     | 021 |
| 1.2.3 多源信息融合的分类 .....     | 022 |
| 1.2.4 多源信息融合的方法 .....     | 023 |
| 1.3 航天器多源信息融合自主导航技术 ..... | 025 |
| 1.3.1 研究应用与进展 .....       | 025 |
| 1.3.2 必要性和优势 .....        | 026 |
| 1.4 本书内容概要 .....          | 028 |
| 参考文献 .....                | 031 |
| 第 2 章 估计理论 .....          | 039 |
| 2.1 基本概念 .....            | 040 |
| 2.2 几种常用的最优估计方法 .....     | 042 |
| 2.2.1 最小均方误差估计 .....      | 042 |
| 2.2.2 极大似然估计 .....        | 043 |
| 2.2.3 极大后验估计 .....        | 043 |





|       |                         |     |
|-------|-------------------------|-----|
| 2.2.4 | 加权最小二乘估计 .....          | 044 |
| 2.3   | 估计算法的解析形式 .....         | 045 |
| 2.3.1 | 线性估计算法 .....            | 045 |
| 2.3.2 | 联合高斯分布的 MMSE 估计算法 ..... | 047 |
| 2.3.3 | 线性观测对应的估计算法 .....       | 047 |
| 2.4   | 动态系统中的状态估计算法 .....      | 051 |
| 2.4.1 | 递归贝叶斯估计算法 .....         | 051 |
| 2.4.2 | 卡尔曼滤波算法 .....           | 053 |
| 2.4.3 | 扩展卡尔曼滤波算法 .....         | 057 |
| 2.4.4 | 无迹卡尔曼滤波算法 .....         | 059 |
| 2.4.5 | 约束卡尔曼滤波 .....           | 066 |
| 2.5   | 小结 .....                | 074 |
|       | 参考文献 .....              | 075 |
| 第 3 章 | 融合算法 .....              | 077 |
| 3.1   | 融合结构 .....              | 078 |
| 3.2   | 线性融合模型和算法 .....         | 081 |
| 3.2.1 | 线性统一模型 .....            | 081 |
| 3.2.2 | 线性统一模型下的融合算法 .....      | 082 |
| 3.2.3 | 分布式融合中的协方差交叉算法 .....    | 085 |
| 3.3   | 动态系统的集中式融合卡尔曼滤波 .....   | 089 |
| 3.3.1 | 并行滤波 .....              | 090 |
| 3.3.2 | 序贯滤波 .....              | 092 |
| 3.3.3 | 数据压缩滤波 .....            | 092 |
| 3.4   | 动态系统的分布式融合卡尔曼滤波 .....   | 094 |
| 3.4.1 | 标准分布式卡尔曼滤波 .....        | 094 |
| 3.4.2 | 协方差交叉算法 .....           | 097 |
| 3.4.3 | 联邦滤波算法 .....            | 098 |
| 3.5   | 小结 .....                | 107 |
|       | 参考文献 .....              | 108 |
| 第 4 章 | 性能分析 .....              | 111 |
| 4.1   | 线性系统的可观性 .....          | 112 |
| 4.1.1 | 线性定常系统的可观性 .....        | 112 |
| 4.1.2 | 线性时变系统的可观性 .....        | 115 |