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

航天器热控制技术

Spacecraft Thermal Control Technology

苗建印 钟奇 赵啟伟 赵欣 编著

中国工信出版集团

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



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION 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

航天器热控制技术

Spacecraft Thermal Control Technology

苗建印 钟奇 赵啟伟 赵欣 编著

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

内 容 简 介

本书重点阐述了与航天器热控制相关的空间环境、设计、分析、试验方法以及针对热量吸收、传输、排散环节进行调控的常用热控制技术，给出了典型的技术应用案例，并对相关新技术进行了展望。

本书主要供从事航天器热控制研究、设计的工程技术人员参考，亦可作为高等院校航天器热控制专业的教学参考书。

版权专有　侵权必究

图书在版编目（CIP）数据

航天器热控制技术/苗建印等编著．—北京：北京理工大学出版社，2018.5

（空间技术与科学研究丛书／叶培建主编）

国家出版基金项目　“十三五”国家重点出版物出版规划项目

国之重器出版工程

ISBN 978-7-5682-5615-5

Ⅰ.①航…　Ⅱ.①苗…　Ⅲ.①航天器-热控制　Ⅳ.①V448.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 085177 号

出　版／北京理工大学出版社有限责任公司

社　址／北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮　编／100081

电　话／（010）68914775（总编室）

（010）82562903（教材售后服务热线）

（010）68948351（其他图书服务热线）

网　址／http：//www.bitpress.com.cn

经　销／全国各地新华书店

印　刷／固安县铭成印刷有限公司

开　本／710 毫米×1000 毫米　1/16

印　张／33

彩　插／1

字　数／575 千字

版　次／2018 年 5 月第 1 版　2018 年 5 月第 1 次印刷

定　价／126.00 元

责任编辑／杜春英

文案编辑／杜春英

责任校对／周瑞红

责任印制／王美丽

图书出现印装质量问题，请拨打售后服务热线，本社负责调换



《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）

王大轶　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，在五十年的发展历程中，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。

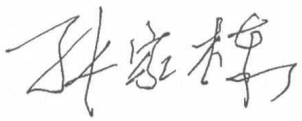
在中国空间技术研究院成立五十周年之际，院领导和专家们觉得很有必要把几十年来的技术、管理成果进行系统地梳理、凝练、再创作，写出一套丛书，用于指导空间工程研制和人才培养，为国家，为航天事业，也为参与者留下宝贵的知识财富和经验沉淀。

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





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，在五十年的发展历程中，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。

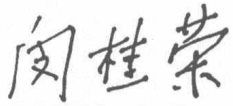
薪火相传、历久弥新。中国空间技术研究院勇挑重担，以自身的空间学术地位和深厚积累为依托，肩负起总结历史、传承经验、问路未来的使命，组织一批空间技术专家和优秀人才，共同编写了《空间技术与科学研究丛书》，共计23分册。这套丛书较为客观地回顾了空间技术发展的历程，系统梳理、凝练了空间技术主要领域、专业的理论和实践成果，勾勒出空间技术、空间应用与空间科学未来的发展方向。

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中历练、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





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



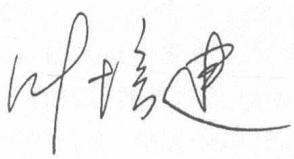
来的理论、方法与技术，涉及他人的应尽可能分清、少用，也可简并。作品要有鲜明的团队特点，而团队特点应是某一领域、某一专业的中国特点，是“中国货”。从写作结果来看，我认为，丛书作者们努力实践了这一要求，丛书的质量是有保证的，可经得起历史的检验。

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

《航天器热控制技术》是《空间技术与科学研究丛书》23分册之一。按照丛书“面向空间领域一线科研人员、相关领域的研究者和高校专业师生的一套既有理论高度又有实践指导意义的权威著作”的总定位，本书立足于航天器热控制技术总体和专业两个方面的特色，强调航天器热控制技术系统性工程应用经验及热控制专业的自身发展、应用，凝练和总结了热控制技术的相关知识和系统设计要素。

航天器热控制专业的主要基础知识源于传热学、工程热力学和流体力学，但因为服务的对象是航天器，所以还涉及空间环境、材料、化学、力学、光学、可靠性等诸多专业学科。伴随着我国航天器工程的实践，航天器热控制工程研制和研究人员也积累了丰富的经验，并撰写了若干高水平的航天器热控制技术专著，这些专著在指导航天器热控制从业人员方面发挥了重要作用。随着近年我国航天事业的蓬勃发展，航天器热控制专业人员的工程实践案例迅猛增多，研发和应用的热控制技术也日见丰富，进行及时的整理、提炼，对于总结经验、促进技术的进一步发展是必要的、有价值的，这正是编著本书的出发点。本书的读者主要是航天器系统或部件热控制的从业或学习人员，他们应当已经掌握传热学、工程热力学的基础理论和知识；经过国内航天事业50年的发展，航天器热控制专业知识的普及程度已大为提高；当前航天器热控制设计工具手段也有诸多改进，使用成熟软件分析，解决早期需手工计算或编程求解的问题已经成为主流。考虑到这三点，对于教科书和国内现有航天器热控制专著中已有较为详细论述的部分概念、原理和理论，本书予以从简叙述，更多的是从当今航天器研制活动中开展热控制设计“应知应会”的角度，阐述相关技术的原理、应用原则、禁忌和典型案例。当然，即使在当前研制手段和模式下，为保证高水平的设计，仍有若干技术的原理和内涵需要设计者有深入的理解，对这类问题的理论阐述本书也未吝笔

墨。全书注重案例的丰富、全面和工程实用指导意义，希望对读者有参考价值。

基于以上考虑，全书内容安排为9章。第1章为绪论，包括航天器热控制的任务、航天器对热控制的需求、航天器热特性、航天器热控制的主要约束等内容；第2章为空间环境，包括发射阶段环境、地球轨道空间环境、月球和行星空间环境、再入或进入段热环境等内容；第3章为航天器热控制系统设计，包括任务特点、设计原则、设计方法、设计阶段及要点等内容；第4章为航天器热控制“六性”设计，包括可靠性、安全性、空间环境适应性等内容；第5章为航天器常用热控制技术，包括传热技术、隔热技术、加热技术、制冷技术和测控温技术等内容；第6章为航天热控制设计典型案例，包括热控制系统设计案例、部件热控制设计案例等内容；第7章为航天器热分析技术，包括外热流分析、辐射分析、特定问题模拟、热模型修正等内容；第8章为航天器地面热模拟试验，包括空间热环境模拟方法、外热流模拟装置与热流测量、热平衡试验方法等内容；第9章为航天器热控制新技术，包括大规模复杂系统热管理技术、能源再生与原位热利用技术，模块化、自适应在轨维护热控制技术等内容。

本书由苗建印、钟奇、赵啟伟、赵欣编著，苗建印、钟奇、赵啟伟负责全书统稿和审校。钟奇负责第1章及第7章的撰写；赵欣负责第2章及第3章的撰写；赵啟伟负责第4章及第6章的撰写；苗建印负责第5章及第9章的撰写。此外，参加编著的还有江海（第7章外热流分析部分内容）、向艳超（第2章空间环境部分内容和第8章航天器地面热模拟试验）、傅伟纯（第5章热控涂层部分）、张红星（第5章制冷技术部分）、何江（第9章深低温获取与高效热传输技术等内容）。

此外，在本书的编著过程中，还得到了赵亮、李一凡、陈建新、孙家林、余雷、宁献文、王玉莹、杨昌鹏、韩海鹰、薛淑艳、赵剑锋、丁汀、李文君等同志的大力支持，何江、徐亚威、刘畅、周强、刘思学同志负责全书的合稿与初步编辑工作，同时，在编著过程中，多位其他航天器热控制专家也提供了丰富的技术资料，在此一并表示感谢！

本书由文耀普任主审，胡金刚、范含林、姚伟任审稿专家，他们对本书进行了认真把关，并提出了许多宝贵意见。本书的编写过程得到了叶培建院士、王永富研究员的深切关注和悉心指导，得到了中国空间技术研究院、北京空间飞行器总体设计部各级领导的关心和支持，得到了北京理工大学出版社编辑的精心校阅和编辑。中国空间技术研究院总体部科技委梁晓珩、梁秀娟为本书的编写和出版做了大量工作。在此，作者一并表示诚挚的谢意。

囿于作者水平，本书难免存在疏漏和不足之处，恳请广大读者和专家批评指正。

作者

2017年12月



目 录

第 1 章 绪论 …… 001
1.1 航天器热控制的任务 …… 002
1.2 航天器对热控制的需求 …… 003
1.2.1 温度水平 …… 003
1.2.2 温度均匀性和稳定度 …… 005
1.2.3 风速和湿度 …… 006
1.3 航天器热特性 …… 007
1.3.1 热耗来源 …… 007
1.3.2 热耗水平及变化 …… 008
1.3.3 热流密度 …… 009
1.3.4 热容 …… 010
1.4 航天器热控制的主要约束 …… 011
1.5 航天器热控制的主要技术 …… 013
1.6 航天器热控制的主要工作 …… 015
参考文献 …… 016

第 2 章 空间环境 …… 017
2.1 概述 …… 018
2.2 发射阶段环境 …… 020
2.3 地球轨道空间环境 …… 023
2.3.1 地球轨道热环境 …… 024
2.3.2 其他地球轨道空间环境 …… 033
2.4 月球和行星空间环境 …… 041
2.4.1 月球环境 …… 042