



★ ★ ★
“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 Electrical Test Technology

航天器综合测试技术

王华茂 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



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

航天器综合测试技术

Spacecraft Electrical Test Technology



 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

《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

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



自序

伽利略 400 多年前就赋予了科学家测量的使命：使不可测成为可测（What is not measurable make measurable）。

——很多早期人类不能测量的，如时间、温度、速度等现在都很容易被测量，这是前辈科学家对人类的贡献。

——在物理、医学、经济，甚至在社会科学领域，以前不能测量的属性逐渐地也都能测量了，如人的智能、空气质量、通货膨胀。

——科学的目标是找到测量实体属性的方法。科学家的任务是应该找到这些方法，对于已经能测量的要使之测量得更好，改善方法。

——科学技术发展和探索的基础在于如何使之能够测量，如何改进测量和提高测量的品质。

测量或测试是获得反映事物物理属性信息的过程。对一个系统进行测试的过程，实际上是为了获取表征被测试系统特性的信息的过程。例如，在影视作品里经常看到这样的镜头，匪兵抢了银元，拿着银元吹一吹，再听一听，就能辨别出真假，这里用到的就是典型的“激励—响应”测试基本原理，而整个过程则是获得反映事物物理属性信息的过程。

航天器设计的实物测试验证，同样是对设计产品施加各种形式的外部激励，包括机、电、热、压、磁等，获取产品产生的响应，根据判别准则，判定航天器产品设计的正确性，或发现产品存在的故障和隐患。实物测试验证方法能够解决目前航天器设计中存在的大部分问题，但仍有很多实物测试没有办法在地面完成，如在轨环境下的失重、真空、起爆、伸展等。好在我们还可以通过重力卸载、抽真空等手段模拟在轨环境进行有限的测试验证。但在在轨姿态



和轨道控制的测试验证方面就彻底没有了办法。

使不可测试的成为可测试的，也是航天测试人的使命。实物、半实物、数字化建模仿真等测试手段很好地解决了地面无法完成的实物的测试验证，航天器设计的虚拟测试验证技术应运而生。

从国防计量，到导弹测试，再到航天器测试，30年来都在从事计量测试工作，参与完成了不少国家任务，也取得了一些研究成果，以至写成了这本书。在此，特别感谢闫金栋研究员，我们有着对航天器综合测试事业共同的热爱与情感；感谢指引我走上航天器测试之路，并毫无保留地传授给我综合测试专业知识，长期以来对综合测试工作关心与支持的王庆成研究员、陈逢田研究员和老一辈测试专家们，是你们在极端困难的条件下，奠定了航天器综合测试专业发展的坚实基础，我永远心存敬意；还有航天五院、总体部历任领导和五院航天器测试中心全体员工，是你们的不懈努力和付出，才成就了今天的航天器综合测试事业的成就与辉煌。最后，特别感谢叶培建院士长期以来对本人、对综合测试工作的支持与指导，以及策划本套丛书为空间技术和综合测试技术发展做出的巨大贡献。

作者

2017年9月



前 言

测试是人类认识客观世界、获取定性或定量信息的首要方法，航天器的系统研制同样离不开测试。航天器型号在研制过程中自始至终离不开大量的试验与测试工作。试验与测试是航天器型号研制过程中重要的组成部分，并与现代航天器系统的设计、制造和总装集成构成一个完整的整体。任何航天领域的科学理论和现代装备的成功试验和定型，都需要先进的测试技术的支持。航天器综合测试是航天器系统工程研制的关键环节之一，是评价航天器研制质量的重要基础，是实现航天器产业化能力提升的重要支柱，其技术水平的高低直接影响航天器系统研制的质量和效率。

《航天器综合测试技术》是《空间技术与科学研究丛书》中关于航天器综合测试的工程技术专著。该书是中国空间技术研究院综合测试工程技术人员技术研究和工程实践的结晶，是对过去几十年航天器综合测试技术成果和工程经验的总结和提炼。书中全面、系统地介绍了航天器综合测试的基本概念、测试目的与要求、可测试性设计、测试方案设计、测试系统设计、测试原理与测试方法、测试技术流程、测试用例设计、测试过程组织与实施、测试故障分析方法、测试结果评估等，覆盖了航天器各阶段电性能测试的基本要素，反映了航天器综合测试技术的最新研究成果和发展趋势。

本书既有航天器测试的基础理论，又有航天器测试的工程实践经验，理论与实践密切结合，具有很高的工程实用价值，能够帮助读者系统、全面地了解 and 掌握航天器从测试需求分析、测试设计、测试实施，到测试诊断、测试评估分析等全流程的测试基础理论与工程方法。

全书共分 10 章，主要内容安排如下。

第 1 章 绪论 概括介绍航天器综合测试的基本概念、基本原理与方法、主要



研究内容，以及当前技术研究的难点、热点和发展历程。

第2章 航天器测试性分析与验证 简要介绍航天器测试性分析与验证的要求、原则、程序、工具、方法和实例等内容。

第3章 航天器综合测试需求分析 概要介绍航天器测试需求建模、测试覆盖性分析、测试需求矩阵与跟踪机制等内容。

第4章 航天器综合测试方案设计 重点介绍航天器测试方案设计的原则、依据、程序、测试内容、测试策略、测试方法等内容。

第5章 航天器综合测试详细设计 详细介绍航天器综合测试用例设计、测试数据处理及判读设计、测试流程设计、测试数据包设计等内容。

第6章 航天器综合测试系统研制 全面介绍航天器地面测试支持系统(EGSE)的组成、功能、接口、设计要点和典型实例等内容。

第7章 航天器综合测试组织与实施 简要介绍航天器综合测试准备、测试组织模式、技术状态控制、自动化判读分析等内容。

第8章 航天器综合测试故障诊断与定位 着重介绍航天器综合测试故障处理和诊断的方法、原则、步骤和注意事项等内容。

第9章 航天器综合测试评估技术 主要介绍航天器综合测试结果评估基本概念、工作流程、指标体系、评估方法和应用实例等内容。

第10章 航天器综合测试技术展望 对虚拟测试、基于模型的数字化测试、故障预测与健康评估、云计算与大数据、人工智能、“互联网+测试”等测试新技术的展望。

本书由中国空间技术研究院(CAST)王华茂研究员负责编写。其中，王华茂研究员负责全书的策划、组稿、审定、修改和校对工作，撰写了全书大部分章节的内容；闫金栋研究员作为航天器综合测试一线青年专家，参与了本书的策划、组稿、审定和修改工作，并提供了初稿的部分素材；王劲榕研究员作为测试专家参与了本书的编写工作；王庆成研究员作为我国航天器综合测试专业的开拓者和奠基人之一，为本书编写提供了素材和指导；陈逢田研究员作为航天器综合测试资深专家，为本书编写提出了很好的意见和建议。

本书由中国空间技术研究院一线技术人员参与编写或提供支持，他们是刘一帆、安亮、刘鹤、于忠江、时光、常进、魏振超、陆文高、潘顺良、宋宏江、储海洋、卢成志、宋世民、富小薇、李鹏、张海祥、任忠、李勇、于澎、权爽、尹卿、张巍、张田甜、矫轲、刘彬、崔永军、彭亏、杨黎、肖鹏、梁致民、朱琳、高何、白力舸、吕笑慰等。

本书由中国空间技术研究院王庆成研究员担任学术顾问，胡其正、王庆成、陈逢田、刘杰荣、赵吉明、刘民研究员担任审稿专家。胡其正、王庆成、