国防科技图书出版基金

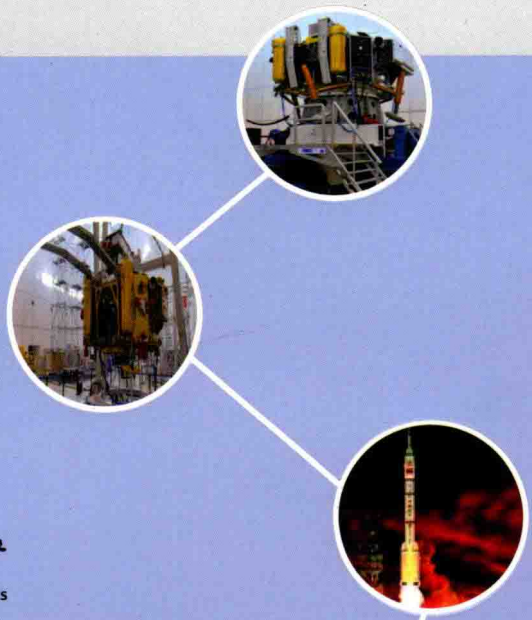
“十三五”国家重点出版规划项目

空间飞行器工程丛书

航天器电性能测试技术

Electrical Test Technology of Spacecraft

王华茂　闫金栋　著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

需要全本请访问 www.ertongbook.com

国防科技图书出版基金

“十三五”国家重点出版规划项目
空间飞行器工程丛书

航天器电性能测试技术

Electrical Test Technology of Spacecraft

■ 王华茂　闫金栋　著

国防工业出版社
·北京·

图书在版编目（CIP）数据

航天器电性能测试技术/王华茂，闫金栋著. —北京：国防工业出版社，2017.10
（空间飞行器工程丛书）
ISBN 978-7-118-11050-0

Ⅰ.①航… Ⅱ.①王… ②闫… Ⅲ.①航天器—测试技术 Ⅳ.①V41

中国版本图书馆CIP数据核字（2017）第264800号

航天器电性能测试技术

丛书策划 管明林
责任编辑 管明林
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 北京龙世杰印刷有限公司
开 本 710×1000 1/16
印 张 37½
印 数 1-2000册
字 数 714千字
版 印 次 2017年10月第1版第1次印刷

定 价 158.00元 （本书如有印装错误，我社负责调换）

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　赵伯桥
秘书长	赵伯桥
副秘书长	许西安　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

需要全本请访问 www.ertongbook.com

“空间飞行器工程丛书”
编审委员会

顾　　问　吴宏鑫　叶培建

主任委员　李　明

副主任委员　刘瑞生

委　　员　王　翔　王永富　朱北园　刘天雄
（按姓氏笔画排序）　刘战捷　向树红　李　杰　李劲东
邱家稳　张　明　张柏楠　周志成
赵和平　徐　鹏　曹桂兴

秘　　书　蒋耀光　管明林

序1

当前航天器研制模式正在悄然发生转变，航天器产业化能力提升与转型升级已正式提上日程。对于航天器任务来讲，其核心测试需求就是对航天器进行充分的测试验证。我是从一名计量、测试人员走向航天器总设计师岗位的，深知航天器电性能测试是航天器系统研制过程中的重要环节之一，承担着航天器系统“体检”的重要任务，既是评价航天器系统研制质量的重要手段，也是提升航天器产业化能力的重要支撑，其技术水平的高低直接影响航天器研制的质量和效率。

《航天器电性能测试技术》是一本关于航天器电气性能测试验证的工程技术专著。该书由中国空间技术研究院的两位专家共同创作，是他们对过去几十年卫星、飞船、月球探测器研制中，航天器电性能测试工程实践的经验总结和提炼，作者参阅和吸取了相关书籍的部分内容，融入了很多新的技术，体现了航天器电性能测试技术的发展现状和趋势。书中全面、系统地介绍了航天器电性能测试的基本概念、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、测试实施过程组织、测试故障分析方法、测试结果评估等，几乎覆盖了航天器 AIT 阶段电性能测试的各个要素，反映了航天器电性能测试技术的最新研究成果和发展趋势，是从事航天器电性能测试的广大工程技术人员不可多得的一本专业参考书。

该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、全面地了解和掌握航天器测试需求分析、测试设计、测试实施、测试诊断、测试评估分析等基

础理论与工程方法。以年轻人为主要成员的一线科研人员写成此书，我曾和他们共同工作与攻坚克难，所以对该书的出版表示由衷的高兴和祝贺。电测好比一门武功，流程方法是套路，设备工具是武器，有简单的“花拳绣腿”，也有深奥的“少林武功”，玩好必须下苦功夫。相信该书的出版必将对促进航天器电性能测试技术的持续、快速发展产生积极而深远的影响。



序2

航天器作为高技术产品同其他产品一样,从设计到交付用户的全过程中都离不开试验和测试,试验需要测试支持,没有测试支持的试验毫无意义。航天器离开发射坪升空之前的每个阶段都需要测试的支持,测试获取的定性和定量数据是鉴定航天器电气性能是否合格、改进航天器设计和确保无故障发射的必要依据。我从20世纪70年代就开始从事和涉足航天器测试工作,目睹了多颗航天器测试过程和经历了测试技术发展的全部历程,深感测试工作的重要性和繁琐性。进入21世纪,根据中国空间技术研究院研究生教学的需要,连续十几年为在读硕士研究生讲授了航天器电测技术专业课程。实践和教学使我更加体会到,一个合格航天器测试工程师不仅需要工程实践地磨练,还需要掌握测量原理、电子电路、信号与处理、调制与解调、计算机应用和系统工程等很多相关的基础知识。

由中国空间技术研究院王华茂研究员和闫金栋研究员编写的《航天器电性能测试技术》是一本关于航天器电气性能测试技术的专著。据我所知作者一直从事航天器电测设计和组织工作,他们自身具有多年航天器电性能测试工程实践经验,为了使本书更具理论和工程性,他们参考了大量有关测试技术文献的一些论述,还对很多工作在一线技术人员提供的素材加以总结和提炼。这本书较已经出版的同类书籍内容新颖,全面、系统地介绍了航天器电性能测试的基础知识、测试的基本原理与测试方法、可测试性设计、测试方案设计、测试系统设计、测试技术流程、测试覆盖性分析、测试用例设计、测试实施过程组织、测试故障分析方法、测试文件编写和测试结果评估等,内容翔实、实用,覆盖了航天

器 AIT 阶段电性能测试的各个要素，反映了航天器电性能测试技术的最新研究成果和发展趋势，无疑具有很高的理论意义和工程实用价值，是从事航天器电性能测试的工程技术人员学习吸取专业知识和经验的不可多得的一本专业参考书。

我衷心祝贺《航天器电性能测试技术》一书的出版，也希望从事航天测试工作的广大读者能够将书中的理论与方法运用到自己的工程实践中，在应用中不断积累新的经验，不断提升我国航天测试技术水平，为我国航天事业的发展做出新的贡献。



2016.11

前 言

同任何工程和科研项目一样，航天器型号项目在研制过程中自始至终离不开大量的试验及测试工作。为了确认航天器的各项性能和功能是否满足设计要求，为了在试验中获取定性、定量参数并进行处理和评定，需要进行测试。因此，测试与试验是航天器型号研制流程的重要组成部分，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，测试所得到定性或定量的数据是研究、改进设计及试验分析的依据。测试工作在航天器研制过程中起到举足轻重的作用，如何对各个总装和试验阶段的航天器进行可信和全面的测试是航天器设计人员一直探讨和研究的问题。

航天器研制过程中，需要对其机械特性、热设计特性、电特性等开展全面的测试验证，其中电特性测试覆盖初样电性星、正样飞行星的全部研制流程。而机械特性、热设计特性的测试验证主要以初样的结构热控星为主，在正样飞行星研制阶段结合系统级力学和热学试验进行验证。本书重点介绍航天器电特性测试验证技术。

本书将航天器电性能测试原理方法与工程实践紧密结合，对航天器电性能测试的概念、方法、策略、必要的支撑技术、测试过程的组织实施等做了比较全面的介绍，力求使读者能够系统、全面地掌握航天器电性能测试所需要的技术。

第 1 章 绪论，结合航天器研制的主要阶段和基本组成，重点介绍了航天器 AIT 的基本过程以及电测的目的和任务。结合国内外技术的发展，简述了航天器电测技术发展的历史。

第 2 章 航天器电测基础知识，介绍了电测的基本原理和方法、基本概念和定义，讨论了测试技术研究的主要内容，包括测试模型、测试的基本原理、测试接口、测试环路、测试级别以及测试数据的获取和常用的数据处理方法。简要

需要全本请访问 www.ertongbook.com

介绍了传统的误差分析和数据表示的知识。

第3章 航天器测试方案设计,从测试任务分析开始,根据航天器研制的主要阶段和分系统组成,给出了航天器测试验证策略和方案。重点介绍了分系统测试方案,较详细描述了供配电、测控(TT&C)、数管(OBDH)、热控、姿态与轨控(AOCS)以及典型的有效载荷等的测试原理和测试设备的组成等,简要介绍了系统级测试包括专项测试、整星模式测试、全任务模飞测试等要点。

第4章 航天器系统级测试及实施,为航天器系统级测试详细设计和实施过程,介绍了系统级测试的流程、分类、特点、详细设计、实施要点以及测试故障的分析和判断方法,并且列举了一些典型的故障案例。

第5章 航天器电气地面测试设备(EGSE)设计,介绍了EGSE研制程序、接口设计和选择、模拟器应用以及可靠性问题,并介绍了常用测试总线以及在电测中的应用。

第6章 航天器电气地面测试设备(EGSE)实例,从国内外EGSE技术发展情况和特点,介绍了EGSE系统的组成原理,以及具有代表性的EGSE的设计规范,并给出了几个典型的系统设计实例。

第7章 发展趋势与展望,介绍了航天器测试技术发展趋势,包括通用和开放的EGSE设计、地面测试与在轨操作设备的共性研究、虚拟测试技术的应用以及人工智能技术的应用、形式化验证方法等。

本书由中国空间技术研究院(CAST)王庆成研究员担任顾问。王庆成老师作为我国航天器电性能测试专业的开拓者和奠基人之一,以其深厚的理论功底和宽广的专业知识,几十年航天型号的工程经验,十几年研究生教学实践,多部专业著述的总结凝练,对本书的编写提出了宝贵意见并承担了本书的大部分内容的校对和审核工作。在此,对王庆成老师和老前辈们在航天器电测专业上做出的贡献和取得的成就、严谨的治学态度和孜孜以求的探索精神、对专业发展和人才培养的使命感和责任感以及对作者的支持和帮助,表示由衷的敬佩和衷心感谢!

本书由中国空间技术研究院王华茂、闫金栋著。王华茂研究员负责完成全书的策划、组稿、审定、修改和校对工作,编写了全书大部分章节的内容。闫金栋研究员参与了全书的策划、审定和修改工作,编写了部分章节的内容。

本书还有中国空间技术研究院很多一线专家、技术人员给予了指导或提供

了支持，他们是叶培建、胡其正、谭维炽、王庆成、王宪文、董万有、陈逢田、王家传、胡建知、袁茂起、殷礼明、赵吉明、朱维宝、王世波、赵振岩、艾晓然、魏振超、李鸿飞、陆文高、王劲榕、安亮、刘一帆、孙波、何晓宇、王瑞、卢成志、宋宏江、白少华、储海洋、张海祥、任忠、宋世民、李勇、刘滕冲、于澎、权爽、于忠江、刘鹤、张雷、张田甜、于海峰、刘彬、崔永军、赵利民、彭亏、肖鹏、富小薇、梁致民、李鹏、吕伟、幺飞、时光、张巍、杨黎、王清泉、白力舸、吕笑慰等，其中，宋宏江提供了2.8节遥测处理和4.4节测试准备章节的部分素材，安亮提供了2.9节、4.7节的有关测试总结评估内容的初稿，幺飞提供了3.8节数管分系统测试和4.2节复杂信息流测试设计素材，吕伟提供了3.9节热控分系统测试素材，刘彬提供了3.11节导航卫星载荷测试素材，卢成志提供了4.1节综合测试流程的素材，富小薇提供了4.2节系统模飞测试设计素材，权爽提供了5.12节总线相关素材，刘一帆提供了6.4节国产EGSE系统简介的部分素材，刘鹤提供了7.5节、7.6节数字化虚拟测试和PHM技术的相关素材。

本书撰写过程中，还吸收和引用了本专业的老前辈和同行相关专业论文和著作的内容，参考了相关资料，因而本书是集体智慧的结晶和经验成果的总结。此外，本书的出版还得到了中国空间技术研究院总体部、神舟学院的领导和五院航天器测试中心各位同事的支持和帮助，在此一并表示衷心的感谢。

航天器电性能测试是一项工程性和实践性很强的专业技术。本书既可作为从事航天器总体设计和电性能测试的工程技术人员的工作手册，也可作为航天器总体设计、航天器信息与电总体专业研究生的学习教材。由于涉及的知识面广，技术发展非常迅速，而作者水平有限，书中难免存在疏忽和错误，殷切希望各位读者批评指正。

作者

2016年10月

目 录

第 1 章　绪论 …… 001

1.1　航天器研制的主要阶段 …… 002
1.2　航天器系统的基本构成 …… 005
1.3　航天器总装、测试与试验概述 …… 008
1.3.1　总装、测试与试验术语 …… 009
1.3.2　总装与测试 …… 011
1.3.3　试验与测试 …… 020
1.4　航天器电测的目的和任务 …… 027
1.4.1　综合测试方案设计 …… 028
1.4.2　综合测试系统设计 …… 029
1.4.3　综合测试详细设计 …… 030
1.4.4　综合测试组织和实施 …… 031
1.4.5　综合测试故障处理对策 …… 032
1.5　航天器电测技术发展概述 …… 034
1.5.1　早期的航天器综合测试 …… 034
1.5.2　首次计算机应用 …… 035
1.5.3　标准接口测试系统的研制与微机应用 …… 036
1.5.4　引进总控设备与测试新理念 …… 037
1.5.5　国产分布式总控测试系统研制成功并推广 …… 037
1.5.6　航天器测试技术的新进展 …… 037

第 2 章　航天器电测基本原理与方法 …… 039

2.1　概述 …… 039
2.2　基本概念 …… 039
2.2.1　信息、消息与测量 …… 040

2.2.2 试验、测试与检测 …… 042
2.2.3 测量 …… 043
2.2.4 计量 …… 045
2.2.5 国际单位制 …… 045
2.2.6 模拟信号 …… 048
2.2.7 数字信号 …… 048
2.2.8 信号噪声比 …… 049
2.2.9 量化与量化误差 …… 049
2.2.10 误码率 …… 050
2.2.11 接地和搭接 …… 050
2.2.12 准确度 …… 051
2.2.13 灵敏度 …… 051
2.2.14 线性度 …… 051
2.2.15 误差及误差分析 …… 052
2.2.16 测量误差对测量结果的影响 …… 059
2.2.17 误差合成和分配技术 …… 061
2.2.18 参数数值估算方法 …… 065
2.2.19 测量算法 …… 068
2.3 测试性要求 …… 076
2.3.1 测试性概念 …… 076
2.3.2 测试性工作 …… 077
2.3.3 测试性要求 …… 078
2.3.4 测试点的选择 …… 079
2.3.5 测试性技术应用研究 …… 081
2.3.6 测试性设计举例 …… 081
2.4 测试原理与测试环路 …… 084
2.4.1 测试接口 …… 085
2.4.2 测试基本流程 …… 087
2.4.3 测试信号变换流程 …… 087
2.4.4 测试系统基本结构 …… 089
2.4.5 测试环路 …… 091
2.4.6 EGSE 配置和测试环路选择 …… 091
2.4.7 典型的测试环路举例 …… 094
2.5 测试建模 …… 095
2.5.1 测试系统模型 …… 096

2.5.2 测试目标模型 …… 097
2.6 测试验证策略 …… 100
2.6.1 一般测试验证策略 …… 100
2.6.2 分级测试验证策略 …… 101
2.6.3 综合测试验证策略及流程 …… 104
2.7 测试设计 …… 106
2.7.1 测试设计概述 …… 106
2.7.2 航天器测试用例设计 …… 108
2.7.3 航天器软件测试方法 …… 111
2.8 航天器测试数据获取与处理方法 …… 113
2.8.1 测试数据获取 …… 113
2.8.2 航天器测试数据处理方法 …… 116
2.9 航天器测试评估方法 …… 128
2.9.1 航天器测试评估概念 …… 129
2.9.2 航天器测试评估数据的来源 …… 129
2.9.3 航天器测试评估算法 …… 129
2.9.4 航天器测试评估流程 …… 130

第3章 航天器测试方案设计 …… 132

3.1 航天器测试覆盖性分析 …… 132
3.1.1 航天器测试覆盖性分析要素 …… 132
3.1.2 航天器测试覆盖性分析范围 …… 133
3.1.3 航天器测试覆盖性分析主要过程 …… 133
3.1.4 航天器测试覆盖性分析报告 …… 133
3.2 综合测试任务分析 …… 134
3.2.1 综合测试的任务 …… 134
3.2.2 综合测试制约因素 …… 135
3.3 综合测试分类 …… 136
3.3.1 按测试场地或环境分类 …… 136
3.3.2 按供电方式分类 …… 137
3.3.3 按测试通道分类 …… 139
3.4 系统级测试状态及内容 …… 142
3.4.1 系统级测试状态 …… 142
3.4.2 主要测试内容和要求 …… 145
3.5 分系统级测试概述 …… 147

3.5.1 分系统级测试的作用 …… 147
3.5.2 分系统级测试的主要内容 …… 148
3.5.3 分系统级测试的主要目的 …… 149
3.6 供配电分系统测试 …… 149
3.6.1 供配电分系统基本组成和功能 …… 149
3.6.2 供配电分系统主要测试内容和要求 …… 151
3.6.3 供配电分系统测试原理和方法 …… 151
3.7 测控分系统测试 …… 156
3.7.1 测控分系统基本组成和功能 …… 156
3.7.2 测控分系统主要测试内容和要求 …… 163
3.7.3 测控分系统测试原理和方法 …… 166
3.8 数管分系统(OBDH)测试 …… 172
3.8.1 数管分系统基本组成和功能 …… 172
3.8.2 数管分系统主要测试内容和要求 …… 172
3.8.3 数管分系统测试原理和方法 …… 173
3.9 热控分系统测试 …… 177
3.9.1 热控分系统基本组成和功能 …… 177
3.9.2 热控分系统主要测试内容和要求 …… 178
3.9.3 热控分系统测试原理和方法 …… 179
3.10 控制分系统测试 …… 182
3.10.1 控制分系统基本组成和功能 …… 182
3.10.2 控制分系统主要测试内容和要求 …… 184
3.10.3 控制分系统测试原理和方法 …… 185
3.11 有效载荷测试 …… 192
3.11.1 通信卫星转发器测试 …… 192
3.11.2 对地观测遥感载荷测试 …… 203
3.11.3 导航卫星载荷测试 …… 209

第4章 航天器系统级测试及实施 …… 215

4.1 航天器综合测试流程 …… 216
4.1.1 航天器全生命周期流程概述 …… 216
4.1.2 综合测试准入流程 …… 217
4.1.3 总装厂测试流程 …… 217
4.1.4 环境试验测试流程 …… 220

需要全本请访问 www.ertongbook.com