- 国家“十一五”出版规划重点图书
- 空间飞行器设计专业系列教材
- 航天一线专家学术专著

航天器电测技术

ELECTRICAL TEST TECHNOLOGY OF SPACECRAFT

王庆成　　编著

中国科学技术出版社

·北京·

需要全本请访问 www.ertongbook.com

图书在版编目(CIP)数据

航天器电测技术/王庆成编著. —北京:中国科学技术出版社,2007.1
(空间飞行器设计专业系列教材)
ISBN 978-7-5046-4499-2

Ⅰ.航… Ⅱ.王… Ⅲ.航天器-电测-教材
Ⅳ.V556.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 020174 号

自 2006 年 4 月起本社图书封面均贴有防伪标志,未贴防伪标志的为盗版图书。

中国科学技术出版社出版
北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081
电话:010-62103208 传真:010-62183872
http://www.kjpbooks.com.cn
科学普及出版社发行部发行
北京长宁印刷有限公司
*
开本:787 毫米×960 毫米 1/16 印张:32.75 字数:620 千字
2007 年 3 月第 1 版 2008 年 3 月第 2 次印刷
印数:1501-3000 册 定价:48.00 元

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换)

内 容 提 要

航天器电测技术指发射前对各个阶段航天器电气功能和性能指标进行测试所需要的技术，包括测试策略、方法、测试的支撑技术、测试过程的组织实施等。本书首先介绍了航天器电测试的基本任务以及它在各个阶段的主要工作内容，论述了航天器电测的基本原理和方法，包括基本概念和定义、基本方法和流程、测试的数据分析方法。分别讲述了航天器分系统级和系统级测试的任务和实施的要点，并且给出了实际应用的例子。介绍了支持航天器电测的电气地面支持设备（EGSE）设计的基本知识、系统设计和构建方法，作为范例给出了一个典型的 EGSE 规范以及 EGSE 常用的标准接口技术。最后讲述了航天器电测技术发展的趋势。

这是一本强调工程性和实践性的专业教材，它把测试原理、数据处理、计算机应用等知识与航天器工程应用要求相结合，总结和吸收了多年来行业专家们的工程经验。通过本书，读者可了解航天器电性能测试的基本原理和方法，掌握电测实施过程和任务，掌握组建测试设备所需要的一些基本知识。本书可以作为航天器信息与电总体研究生的专业课程，也可以供有关工程技术人员参考。

作 者 简 介

王庆成　1941 年生，研究员，1965 年毕业于中国科学技术大学无线电系。毕业后在中国科学院应用地球物理研究所工作，1967 年调入中国空间技术研究院，先后从事卫星测试设备研制、测试系统总体设计、卫星综合测试管理和实施等工作，现为中国空间技术研究院神舟学院研究生导师。

责任编辑　崔　玲
封面设计　莱　瑞
责任校对　刘红岩
责任印制　王　沛

总　　序

我国航天技术走过了 40 多年的光荣历程，正面临着 21 世纪更加蓬勃发展的形势，需要人才，需要知识。

空间飞行器即航天器，包括卫星、飞船、空间站、深空探测器等等。空间飞行器设计专业是航天技术领域的一门主要学科，它所涵盖的知识面很宽，涉及光、机、电、热和系统工程等，是一门多学科交叉综合和工程性很强的新型学科。

本丛书是根据空间飞行器设计专业培养研究生的课程教学需求，同时考虑到空间技术领域的在职中、高级技术人员研究生水平进修的需要而编写的。因此，本丛书全面讲授空间飞行器设计专业领域的基础理论和系统的专门知识，在内容上具有足够的纵深度和宽广度、前沿性和前瞻性。

本丛书的作者都是从事了几十年航天工程的高级设计师和研究员，他们把自己丰富的知识和经验很好地融入到这套丛书中，理论与实践密切结合，使本丛书具有很高的学术水平和工程实用价值。

本丛书将陆续出版。它的出版是非常值得祝贺的，相信它不仅是一套不错的研究生教材，能够为培养高级航天技术人才服务；同时又是一套优秀的学术专著，将对我国航天科学与技术的发展做出贡献。



2001 年 9 月

需要全本请访问 www.ertongbook.com

前　言

航天器型号在研制过程中自始至终离不开大量的试验工作。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，测试所得的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关注的问题。根据中国空间技术研究院神舟学院的教学安排，编写了《航天器电测技术》讲义初稿，并从2002年开始作为有关专业研究生的专业课程每年进行讲授。根据教学情况和技术发展，教材经过了多次修改和完善，现在终于要出版了。

本书的主要目标是广度而不是深度，尽量涵盖主题，不是只集中在几种技术或概念上展开描述，尽管有些技术可能已经或即将过时，但是其基本原理却是永恒的。书中从不同的层次和应用的需求出发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气性能测试所需要的技术。

第1章结合被测试对象航天器的基本组成和研制的主要阶段，重点介绍了航天器的AIT(总装和试验)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，简述了电测试技术应用和发展的历史。

第2章为电测的基本原理和方法，在给出了相关的基

本概念和定义之后，讨论了测试的基本原理、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。简要介绍了传统的误差分析和数据表示的知识。

第 3 章为航天器分系统级测试，分系统级测试是航天器 AIT 过程中最重要的测试。在概要介绍分系统级测试的基本目的和任务之后，较详细地对电源分系统、测控(TT&C)分系统、姿态和轨道(AOCS)分系统以及典型的有效载荷分系统的测试原理和测试设备的组成等做了描述。

第 4 章为航天器系统级测试，介绍了系统级测试的分类、特点、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、6、7、8 章为构建航天器电器地面测试设备(EGSE)的主要技术，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，介绍了 EGSE 系统的组成原理，并给出了典型的设计实例，还给出了一个具有代表性的 EGSE 的设计规范。根据 EGSE 的应用情况，分别介绍了 CAMAC、IEEE488、VXI、RS 系列和局域网等通信总线。

第 9 章介绍了航天器测试技术发展的趋势，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、虚拟仪器技术的应用、虚拟卫星技术的应用以及人工智能技术的应用。

编写过程中，编者吸收了多年来行业专家的工程经验，引用了有关专业著作的内容，参考了众多专家提供的材料，因而本书是集体智慧的结晶和经验的总结。中国空间技术研究院的赵吉明提供了第 3、4 章的初稿，陈逢田提

供了第5章的初稿，艾晓然提供了第7章的初稿，李长俊提供了第3.3节的素材，刘元默提供了第3.2节的素材，纪强提供了第3.5.2节的初稿，王家传、董万有、吴乐群、张丽华和李立等提供了第4.5.6节的素材，倪润立提供了第6.5.2节的初稿，胡凌云和李砥擎提供了第9.4节的初稿，此外在编写中还征询了很多专业人士的意见。本书的出版还得到了中国空间技术研究院神舟学院的领导和各位同事的支持和帮助。在此编者向上述和所有支持出版的人士表示由衷的感谢。

航天器电测是集测试原理、电子技术、数据处理、计算机应用技术等为一体的强调工程性和实践性的专业教材。由于涉及的知识面广，技术发展非常迅速，而编者水平有限，书中难免存在疏漏和错误，殷切希望各位读者提出批评指正。

作　者

2006年8月

目　录

第 1 章　绪论 …… 1

1.1　**航天器研制的主要阶段** …… 2

1.2　**航天器系统的基本构成** …… 5

1.3　**航天器总装和试验技术概述** …… 8

1.3.1　**总装和试验技术常用术语** …… 8

1.3.2　**总装和试验计划** …… 10

1.3.3　**试验与测试应注意的问题** …… 14

1.4　**航天器电测的基本任务和内容** …… 20

1.4.1　**航天器电测的目的及要注意的问题** …… 21

1.4.2　**航天器电测的任务** …… 22

1.4.3　**航天器电测阶段的划分及其主要内容** …… 28

1.5　**航天器测试技术和测试设备发展概述** …… 36

1.5.1　**从手动操作起步的综合测试** …… 36

1.5.2　**计算机进入卫星测试领域** …… 37

1.5.3　**标准化接口的应用** …… 38

1.5.4　**卫星测试自动化技术** …… 43

1.5.5　**自动化测试技术发展历程概述** …… 46

复习参考题 …… 47

第 2 章　航天器电测的基本原理和方法 …… 48

2.1　**信息与测量的基本概念** …… 48

2.1.1　**信息、消息与测量** …… 48

2.1.2　**信号与测量** …… 49

2.2　**测试的有关概念和定义** …… 50

2.2.1　**试验、测试、检测和测量** …… 50

2.2.2　**国际单位制**(SI) …… 52

2.2.3　**分贝**(dB—decibel) …… 52

2.2.4　**测试常用的几个术语** …… 54

2.2.5　**总线与通信协议**(communication protocol) …… 58

2.2.6　**测试技术研究的主要内容和系统测试的概念** …… 59

2.2.7 自动化测试的含义 …… 60
2.3 测试信号的基本流程和测试系统的基本结构 …… 60
2.3.1 测试信号的基本流程 …… 60
2.3.2 测试系统的基本结构 …… 62
2.4 测试设计和 EGSE 构建概述 …… 63
2.4.1 测试设计 …… 64
2.4.2 EGSE 的构建 …… 65
2.4.3 测试软件的选择 …… 67
2.4.4 测试实施策略 …… 73
2.5 测试接口和测试环路 …… 75
2.5.1 测试接口 …… 75
2.5.2 航天器电性能综合测试基本流程 …… 78
2.5.3 测试环路选择 …… 79
2.6 测试级别 …… 83
2.6.1 单元级测试 …… 84
2.6.2 分系统级测试 …… 84
2.6.3 系统级测试 …… 85
2.7 可测试性 …… 85
2.7.1 可测试性的概念 …… 85
2.7.2 可测试性工作项目 …… 86
2.7.3 可测试性的要求 …… 86
2.7.4 测试点的选择 …… 87
2.8 误差及误差分析 …… 89
2.8.1 测量误差及其表示方法 …… 89
2.8.2 系统误差与随机误差 …… 91
2.8.3 测量误差对测量结果的影响 …… 95
2.8.4 误差合成和分配技术 …… 98
2.9 参数数值估算方法 …… 102
2.9.1 数据表示 …… 102
2.9.2 数值估算方法 …… 104
2.10 航天器测试数据的获取和处理方法 …… 112
2.10.1 航天器跟踪测轨的基本原理 …… 113
2.10.2 航天器遥测遥控系统结构 …… 115
2.10.3 航天器遥测 …… 116

2.10.4 航天器遥控 …… 121
2.10.5 航天器遥测数据处理方法 …… 123
复习参考题 …… 133
第3章 航天器分系统级测试 …… 135
3.1 分系统级测试概述 …… 135
3.1.1 分系统级测试的作用 …… 135
3.1.2 分系统测试的主要内容 …… 136
3.1.3 分系统测试的主要目的 …… 137
3.2 电源分系统测试 …… 137
3.2.1 地面专用测试设备 …… 139
3.2.2 测试的主要内容和方法 …… 140
3.3 遥测、跟踪和遥控(TT&C)分系统测试 …… 144
3.3.1 TT&C 分系统测试设备(SCOE)配置 …… 145
3.3.2 测试内容和要求 …… 146
3.3.3 测试原理和方法 …… 150
3.4 姿态和轨道控制(AOCS)分系统测试 …… 152
3.4.1 AOCS 的基本组成 …… 152
3.4.2 AOCS 分系统测试设备(SCOE)配置 …… 154
3.4.3 测试内容和要求 …… 157
3.5 有效载荷分系统测试 …… 163
3.5.1 通信卫星转发器(Transponder)分系统测试 …… 163
3.5.2 对地观测遥感分系统测试 …… 174
复习参考题 …… 181
第4章 航天器系统级测试及实施 …… 183
4.1 综合测试的任务及制约因素 …… 183
4.1.1 综合测试的任务 …… 183
4.1.2 综合测试的制约因素 …… 184
4.2 综合测试分类 …… 186
4.2.1 按测试场地或环境分类 …… 186
4.2.2 按供电方式分类 …… 187
4.2.3 按测试通道分类 …… 188
4.3 综合测试内容及状态 …… 191
4.3.1 综合测试内容 …… 191

需要全本请访问 www.ertongbook.com

4.3.2 被测试航天器的状态 …… 192
4.4 综合测试实施要点 …… 195
4.4.1 航天器各研制阶段的综合测试内容 …… 195
4.4.2 初样电性产品综合测试 …… 197
4.4.3 航天器环境试验测试 …… 198
4.4.4 正样航天器综合测试 …… 200
4.5 综合测试故障分析和判断 …… 203
4.5.1 故障的定义和分类 …… 203
4.5.2 常见的故障模式 …… 204
4.5.3 故障判定的方法 …… 205
4.5.4 故障分析的基本方法 …… 206
4.5.5 故障处理的原则 …… 209
4.5.6 故障案例及分析 …… 211
复习参考题 …… 228
第 5 章 EGSE 系统概述 …… 229
5.1 EGSE 发展的几个阶段 …… 230
5.1.1 分散式体制 …… 230
5.1.2 部分集中管理式体制 …… 231
5.1.3 集中式体制 …… 231
5.1.4 分级管理体制 …… 232
5.2 EGSE 的主要功能 …… 233
5.2.1 供电与供电测试 …… 234
5.2.2 状态控制 …… 234
5.2.3 测量与测试 …… 235
5.2.4 参数监视 …… 236
5.2.5 测试过程的管理 …… 236
5.2.6 时间基准 …… 237
5.2.7 数据记录及归档 …… 237
5.2.8 后台准备工作 …… 238
5.3 分级管理的 EGSE 描述 …… 238
5.3.1 总控设备(OCOE) …… 239
5.3.2 分系统专用测试设备(SCOE) …… 243
5.4 欧洲空间局的 ETOL 系统 …… 244
5.4.1 监视参数表产生 …… 245

5.4.2 ETOL 测试程序编写 …… 245
5.4.3 测试图形定义 …… 247
5.4.4 测试数据库生成 …… 248
5.4.5 测试运行 …… 248
5.4.6 链路管理和通信规程 …… 251
5.4.7 ETOL 系统实例 …… 252
5.5 中国开发的典型分级管理 EGSE 系统介绍 …… 253
5.5.1 STOS 测试程序用函数 …… 255
5.5.2 STOS 键盘命令 …… 256
复习参考题 …… 257
第 6 章 EGSE 系统设计 …… 258
6.1 EGSE 技术要求 …… 258
6.2 EGSE 研制程序 …… 261
6.2.1 用户要求定义 …… 262
6.2.2 设备要求定义 …… 262
6.2.3 系统总体方案设计 …… 264
6.2.4 详细技术设计和生产 …… 266
6.2.5 验收、应用和维护 …… 267
6.3 EGSE 费用和效益分析 …… 268
6.3.1 EGSE 寿命期费用因素的确定 …… 269
6.3.2 10 项定性分析要素 …… 270
6.3.3 选择方案的定性分析 …… 271
6.4 EGSE 与航天器间接口设计的问题 …… 274
6.4.1 EGSE 与航天器间电气接口 …… 274
6.4.2 传输信号类型及接口设计 …… 276
6.4.3 干扰及抗干扰措施 …… 284
6.5 模拟器的应用 …… 295
6.5.1 模拟器的必要性 …… 295
6.5.2 国内外技术状态和发展趋势 …… 296
6.5.3 EGSE 的模拟器举例 …… 300
6.6 计算机及接口选择 …… 303
6.6.1 计算机的选择 …… 304
6.6.2 接口(总线)的选择 …… 305
6.7 可靠性设计 …… 307

6.7.1 可靠性及其参数 …… 307
6.7.2 硬件可靠性设计 …… 308
6.7.3 软件可靠性设计 …… 310
复习参考题 …… 312
第 7 章 中巴地球资源卫星 EGSE 规范介绍 …… 313
7.1 文件要求 …… 314
7.2 详细需求 …… 315
7.2.1 EGSE 的基本组成 …… 315
7.2.2 接口与功能需求 …… 317
7.2.3 设计与建造要求 …… 345
7.2.4 环境要求 …… 349
7.2.5 EMC 要求 …… 350
7.2.6 文件需求 …… 350
7.3 验证需求 …… 351
7.3.1 设计验证矩阵 …… 351
7.3.2 验收测试 …… 351
第 8 章 常用通信总线在 EGSE 中的应用 …… 352
8.1 通信总线概述 …… 352
8.1.1 通信总线分类 …… 352
8.1.2 总线技术基础 …… 353
8.1.3 通信协议的基本概念 …… 356
8.1.4 数据通信的常用术语 …… 359
8.2 CAMAC …… 363
8.2.1 什么是 CAMAC 总线 …… 363
8.2.2 CAMAC 数据路工作原理 …… 364
8.2.3 应用举例 …… 370
8.3 IEEE 488 总线 …… 371
8.3.1 什么是 IEEE 488 总线 …… 371
8.3.2 IEEE 488 总线结构 …… 372
8.3.3 IEEE 488 接口功能 …… 373
8.3.4 三线挂钩技术 …… 378
8.3.5 IEEE 488 的消息编码格式 …… 382
8.3.6 IEEE 488 自动测试系统举例 …… 386

8.4 VXI 总线 …… 390
8.4.1 什么是 VXI 总线 …… 390
8.4.2 VME 总线介绍 …… 392
8.4.3 VXI 总线结构 …… 395
8.4.4 VXI 机械结构 …… 396
8.4.5 VXI 总线器件 …… 399
8.4.6 VXI 总线器件通信规程及资源管理器 …… 404
8.4.7 VXI 总线系统控制器 …… 407
8.4.8 应用举例 …… 411
8.5 RS 系列串行总线标准 …… 417
8.5.1 RS—232C 标准的基本内容 …… 417
8.5.2 其他常用的 RS 系列标准 …… 421
8.5.3 应用举例 …… 423
8.6 计算机网络总线 …… 424
8.6.1 计算机网络概述 …… 424
8.6.2 计算机网络体系结构 …… 427
8.6.3 局域网 …… 430
8.6.4 TCP/IP 协议 …… 436
8.6.5 应用举例 …… 447
复习参考题 …… 450
第 9 章 航天器电测技术发展趋势 …… 451
9.1 功能齐全和开放式的测试系统是发展的需要 …… 452
9.1.1 功能齐全的测试系统 …… 452
9.1.2 开放式的测试系统 …… 456
9.1.3 典型新系统举例 …… 458
9.2 航天器测试与飞行控制的通用性研究 …… 460
9.2.1 航天器检测和飞行任务操作 …… 461
9.2.2 CCS 和 FCS 的共性 …… 462
9.2.3 未来的应用和发展 …… 464
9.3 虚拟仪器系统的应用 …… 465
9.3.1 虚拟仪器的引入 …… 466
9.3.2 虚拟仪器系统构成 …… 467
9.3.3 虚拟仪器系统软件平台 …… 471
9.4 虚拟航天器技术的应用 …… 473

9.4.1 国外虚拟航天器技术的发展概况 …… 473
9.4.2 电性能虚拟航天器技术方案探索 …… 477
9.5 人工智能技术的应用 …… 483
9.5.1 专家系统 …… 484
9.5.2 航天领域专家系统应用示例 …… 489
9.5.3 开发专家系统的经验教训 …… 497
复习参考题 …… 498
附录:缩写和符号 …… 499
参考文献 …… 505

第1章 绪 论

为执行一定任务在地球大气层以外的宇宙空间，基本按照天体力学规律运行的各类人造飞行体，叫做航天器(S/C—Spacecraft)或空间飞行器(SV—Space Vehicle)，有时也叫做卫星(Satellite)。它通常可以分为无人航天器和载人航天器两大类。无人航天器又可分为人造地球卫星、空间探测器；载人航天器可分为载人飞船、空间站、航天飞机等。

同任何工程项目一样，航天器型号在研制过程中自始至终离不开大量的试验工作。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，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，测试所得定性或定量的数据是研究、改进设计及试验分析的依据。

航天器电测技术是对研制的各个阶段航天器上设备的电气功能和性能指标测试所需要的技术，是集测量技术、电子工程、通信技术、计算机应用技术、软件工程、工程管理等为一体的综合技术，它包括测试策略方法、测试的支撑技术、测试过程的组织实施等。我们所说的综合测试通常指的是航天器电气性能的测试，因此也称航天器电气性能综合测试，简称综合测试。支持综合测试的设备是电气地面支持设备(EGSE，Electrical Ground Support Equipment)，EGSE主要由总控设备(OCOE，Overall Check Out Equipment)和分系统专用测试设备(SCOE，Special Check Out Equipment)组成。OCOE与SCOE通过局域网(LAN)互相连接，因此EGSE是一个分布式的网络系统。

航天器发射升空后，仍然面临一系列的测试问题，这类测试称为在轨测试。在轨测试的重点是有效载荷性能的测试、姿态控制系统性能(包括主备份设备和各种工作模式情况下)的测试，航天器经过在轨测试合格后，才能够交给用户使用。尽管这种测试同发射前的测试有很多相同的地方，但是传统上，这应当属于两个不同的领域，目的不同，测试的内容不同，负责的部门也不同。在轨测试不

需要全本请访问 www.ertongbook.com