

黄本诚 马有礼 著

# 航天器空间环境试验技术

## Space Environment Test Technology *of* Spacecraft



国防工业出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

航天器空间环境试验技术 / 黄本诚, 马有礼著. —北京: 国防工业出版社, 2002.1

ISBN 7-118-02581-X

I. 航... II. ①黄... ②马... III. 航天器环境—环境模拟—模拟试验 IV. V524.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 039903 号

国防工业出版社出版发行  
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 18 1/4 399 千字

2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 42.00 元

---

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

# 致 读 者

**本书由国防科技图书出版基金资助出版。**

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,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。

**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总装备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,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业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。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作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 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄 宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允 曾 铎

秘 书 长 崔士义

委 员 于景元 王小谟 尤子平 冯允成

(以姓氏笔划为序) 刘 仁 朱森元 朵英贤 宋家树

杨星豪 吴有生 何庆芝 何国伟

何新贵 张立同 张汝果 张均武

张涵信 陈火旺 范学虹 柯有安

侯正明 莫梧生 崔尔杰

# 前 言

航天器与地面设备的重要不同之处是所处的环境不同。太空环境运行的航天器在发射前,必须在地面模拟的空间环境中进行各种空间环境模拟试验(简称空间环境试验),以确保可靠性。世界各国至今已发射了 5 000 多颗航天器,每颗航天器都做了大量、充分的空间环境试验,投入了大量的人力、物力开展试验技术研究,并对实践经验进行总结。美国军标还特别规定环境试验投资应占航天器发射投资的 35%,否则,会发生各种各样的故障。因此,航天器空间环境试验技术是随着航天技术发展而产生的新的技术学科之一。本书系统概述了航天器发射之前在地面做空间环境试验的试验技术、试验方法、试验理论、试验可靠性及试验测试技术等;并论述了初样试验、鉴定试验、验收试验以及试验规范、试验剪裁、空间环境试验预示技术以及整星级的热真空试验、热平衡试验、磁试验和材料与组件级的空间特殊环境试验等。其试验方法还论及物理模拟试验、效应模拟试验、数值模拟试验等。空间环境试验直接关系到航天器研制的性能、寿命、可靠性、安全性等。

本书内容来自作者多年从事空间环境试验技术工作的经验,并取材于国内外科学技术文献,因此,既反映了作者的经验和见解,也反映了国内外空间环境试验方面的新技术、新成果。

全书共分 9 章。第 1 章为航天器空间环境试验概论,包括:概述;试验的分类与主要试验项目;试验方法与试验技术研究;试验剪裁与试验规范;真空热试验;其他空间环境试验。第 2 章介绍空间环境与航天器可靠性,包括:空间环境对航天器可靠性的影响;空间真空热环境与航天器可靠性;高能粒子辐照环境与航天器可靠性;空间污染环境对航天器可靠性;空间碎片环境与航天器可靠性;微流量环境与航天器可靠性;空间等离子体环境、磁层亚暴环境与航天器可靠性;空间磁场环境与航天器可靠性;空间微重力环境与航天器可靠性;空间原子氧环境与航天器可靠性;空间大气环境与航天器可靠性。第 3 章介绍航天器空间热环境试验误差分析及航天器热缩比模型试验,包括:空间热环境;空间热环境试验的误差分析;航天器热缩比模型试验简介;不稳定热平衡试验方法。第 4 章概述航天器热平衡与热真空试验技术,包括:航天器热平衡试验技术;航天器热真空试验技术。第 5 章介绍载人航天的空间环境试验技术,包括:空间环境与载人航天的可靠性;模拟微重力的中性浮力试验技术;载人航天器热平衡与热真空试验技术;人机组合舱外活动的空间环境试验技术;载人航天其他空间环境试验技术。第 6 章介绍航天器特殊组件的空间环境试验技术,包括:红外多光谱遥感器辐射定标试验技术;航天器外伸构件的空间环境试验技术;火箭分离和整流罩分离试验技术;火箭发动机的空间环境试验技术。第 7 章论述空间辐照环境试验技术,包括:空间等离子体环境与表面充电试验技术;空间高能粒子辐照与单粒子翻转试验技术;电子、质子、紫外综合辐照环境试验技术;原子氧、紫外综合辐照环境试验技术。第 8 章介绍其他空间环境试验技术,包括:空间碎片与微流星环境试验

技术;航天器空间环境防污染试验技术;航天器磁环境试验技术。第9章论述航天器空间环境试验中的测试技术,包括:空间环境试验中的质谱测试技术;真空检漏测试技术;空间环境模拟室内的压力测量技术;航天器热平衡与热真空试验的温度测量技术;热流和电功率测试技术。

本书可供从事航天器研制、试验及从事空间环境试验技术研究的科技人员阅读;也可作为高等院校有关专业的教科书及研究生的参考书。

负责各章撰写的有:黄本诚(第1章、第2章、第5章至第9章),马有礼(第3章、第4章、第6章、第9章)。宋佑诒提供8.3节部分材料,李立强提供6.2节部分材料。杨叔楹为全书做了审核,龚吉君、童靖宇、冯伟泉、易忠等为部分章节做了审核。陈金明、周传良、刘松、裴一飞、臧卫国、李高、孙立臣、黄瑞琼等为本书出版做了很多工作。

本书是我国第1本系统介绍这一技术的学术专著。由于作者水平有限,书中错误和缺点在所难免,欢迎读者批评指正。

黄本诚 马有礼

# 目 录

|                          |    |
|--------------------------|----|
| <b>第 1 章 航天器空间环境试验概论</b> | 1  |
| 1.1 概述                   | 1  |
| 1.2 试验的分类与主要试验项目         | 1  |
| 1.2.1 按航天器研制程序进行试验的分类    | 1  |
| 1.2.2 主要试验项目             | 3  |
| 1.3 试验方法与试验技术研究          | 4  |
| 1.3.1 空间环境试验方法           | 4  |
| 1.3.2 试验技术研究的主要方向        | 4  |
| 1.4 试验剪裁与试验规范            | 5  |
| 1.4.1 试验剪裁               | 5  |
| 1.4.2 试验规范               | 6  |
| 1.5 真空热试验                | 7  |
| 1.5.1 热平衡试验              | 7  |
| 1.5.2 热真空试验              | 8  |
| 1.6 其他空间环境试验             | 8  |
| <b>第 2 章 空间环境与航天器可靠性</b> | 11 |
| 2.1 空间环境对航天器可靠性的影响       | 11 |
| 2.1.1 空间环境对在轨航天器可靠性的影响   | 11 |
| 2.1.2 空间环境试验中航天器故障与可靠性分析 | 12 |
| 2.1.3 空间环境试验的必要性         | 13 |
| 2.2 空间真空热环境与航天器可靠性       | 13 |
| 2.2.1 空间真空热环境试验与航天器可靠性   | 13 |
| 2.2.2 改进真空热试验方法,提高航天器可靠性 | 14 |
| 2.2.3 空间真空环境与航天器可靠性      | 15 |
| 2.2.4 太阳辐照环境与航天器可靠性      | 17 |
| 2.2.5 空间冷黑环境与航天器可靠性      | 18 |
| 2.3 高能粒子辐照环境与航天器可靠性      | 19 |
| 2.3.1 高能粒子辐照环境           | 19 |
| 2.3.2 高能粒子辐照环境对航天器可靠性的影响 | 20 |
| 2.4 空间污染环境 with 航天器可靠性   | 22 |
| 2.4.1 空间污染环境的来源          | 22 |
| 2.4.2 污染与自污染环境对航天器可靠性的影响 | 23 |

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 2.5 空间碎片环境与航天器可靠性                 | 24 |
| 2.5.1 空间碎片的成分、来源与数量               | 24 |
| 2.5.2 空间碎片环境对航天器可靠性的影响            | 26 |
| 2.5.3 空间碎片破坏航天器的概率                | 27 |
| 2.6 微流星环境与航天器可靠性                  | 28 |
| 2.6.1 空间微流星环境                     | 28 |
| 2.6.2 微流星环境对航天器可靠性的影响             | 29 |
| 2.7 空间等离子体环境、磁层亚暴环境与航天器可靠性        | 30 |
| 2.7.1 空间等离子体环境                    | 30 |
| 2.7.2 空间磁层亚暴环境                    | 31 |
| 2.7.3 空间等离子体环境、空间磁层亚暴环境对航天器可靠性的影响 | 31 |
| 2.8 空间磁场环境与航天器可靠性                 | 33 |
| 2.8.1 空间磁场环境对航天器可靠性的影响            | 33 |
| 2.8.2 空间磁场环境的利用                   | 34 |
| 2.9 空间微重力环境与航天器可靠性                | 34 |
| 2.9.1 空间微重力环境对航天器可靠性的影响           | 34 |
| 2.9.2 空间微重力环境的利用                  | 35 |
| 2.10 空间原子氧环境与航天器可靠性               | 35 |
| 2.10.1 空间原子氧环境                    | 35 |
| 2.10.2 空间原子氧环境对航天器可靠性的影响          | 36 |
| 2.11 空间大气环境与航天器可靠性                | 37 |
| 2.11.1 影响航天器的运行寿命                 | 37 |
| 2.11.2 影响航天器的轨道                   | 38 |
| 2.11.3 空间大气密度对航天器的阻尼影响            | 38 |
| <b>第3章 航天器空间热环境试验误差分析及航天器热缩</b>   |    |
| <b>比模型试验</b>                      | 39 |
| 3.1 空间热环境                         | 39 |
| 3.1.1 真空                          | 39 |
| 3.1.2 低温与黑背景                      | 40 |
| 3.1.3 空间外热流                       | 40 |
| 3.2 空间热环境试验的误差分析                  | 42 |
| 3.2.1 航天器在宇宙空间的热平衡                | 42 |
| 3.2.2 航天器空间热环境试验的误差分析             | 43 |
| 3.3 航天器热缩比模型试验简介                  | 52 |
| 3.3.1 辐射-导热系统航天器的热相似准则            | 52 |
| 3.3.2 热相似稳态模拟的几个技术问题              | 54 |
| 3.3.3 热缩比模型试验的应用趋势                | 57 |
| 3.4 不稳定热平衡试验方法                    | 58 |
| 3.4.1 不稳定热平衡试验方法简介                | 58 |



|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 3.4.2 不稳定热平衡试验方法的应用            | 58         |
| <b>第4章 航天器热平衡与热真空试验技术</b>      | <b>60</b>  |
| 4.1 航天器热平衡试验技术                 | 60         |
| 4.1.1 试验目的                     | 60         |
| 4.1.2 对航天器技术状态的要求              | 60         |
| 4.1.3 试验工况的确定                  | 61         |
| 4.1.4 空间外热流模拟方法、空间外热流模拟装置及选用原则 | 62         |
| 4.1.5 对空间环境模拟器的要求              | 65         |
| 4.1.6 舱内充气对航天器热平衡试验的影响及克服方法    | 66         |
| 4.1.7 试验前的检查                   | 68         |
| 4.1.8 航天器的安装                   | 69         |
| 4.1.9 试验过程                     | 69         |
| 4.1.10 试验后的检查                  | 71         |
| 4.1.11 试验结果分析及试验评价             | 71         |
| 4.1.12 试验实例                    | 72         |
| 4.1.13 航天器热平衡试验技术的发展趋势         | 83         |
| 4.2 航天器热真空试验技术                 | 84         |
| 4.2.1 试验的重要性                   | 84         |
| 4.2.2 试验类型                     | 85         |
| 4.2.3 试验目的                     | 85         |
| 4.2.4 试验量级和持续时间                | 85         |
| 4.2.5 对试验航天器技术状态的要求            | 89         |
| 4.2.6 温度控制区的划分                 | 90         |
| 4.2.7 温度控制点的选择                 | 90         |
| 4.2.8 关于自动控温的仪器                | 91         |
| 4.2.9 热循环的实现方法                 | 91         |
| 4.2.10 试验过程                    | 91         |
| 4.2.11 试验评价                    | 92         |
| 4.2.12 航天器组件热真空试验              | 92         |
| 4.2.13 国内航天器热真空试验概况            | 93         |
| 4.2.14 国外一些商业公司卫星热真空试验的特点      | 95         |
| 4.2.15 常压热循环试验及其与热真空试验的关系      | 97         |
| 4.2.16 航天器热真空试验技术的发展趋势         | 98         |
| <b>第5章 载人航天的空间环境试验技术</b>       | <b>100</b> |
| 5.1 空间环境与载人航天的可靠性              | 100        |
| 5.1.1 概述                       | 100        |
| 5.1.2 载人飞船的故障与空间环境试验           | 100        |
| 5.1.3 空间环境对载人航天的影响             | 103        |
| 5.1.4 空间环境试验与载人航天器的可靠性         | 106        |

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| 5.2 模拟微重力的中性浮力试验技术 .....                | 108 |
| 5.2.1 概述 .....                          | 108 |
| 5.2.2 国外中性浮力试验技术的进展与应用 .....            | 110 |
| 5.2.3 试验技术与试验方法 .....                   | 111 |
| 5.3 载人航天器热平衡与热真空试验技术 .....              | 115 |
| 5.3.1 载人航天器热平衡试验技术 .....                | 115 |
| 5.3.2 载人航天器热真空试验技术 .....                | 115 |
| 5.3.3 中国 KM6 设备 .....                   | 120 |
| 5.4 人机组合舱外活动的空间环境试验技术 .....             | 128 |
| 5.4.1 概述 .....                          | 128 |
| 5.4.2 试验方案与试验技术 .....                   | 128 |
| 5.4.3 环境控制系统试验技术 .....                  | 133 |
| 5.4.4 消噪声系统试验技术 .....                   | 136 |
| 5.4.5 其他系统试验技术 .....                    | 136 |
| 5.4.6 试验程序 .....                        | 137 |
| 5.5 载人航天其他空间环境试验技术 .....                | 138 |
| 5.5.1 模拟微重力环境的微重力飞机(又称失重飞机)试验技术 .....   | 138 |
| 5.5.2 其他模拟微重力条件的试验技术 .....              | 141 |
| <b>第 6 章 航天器特殊组件的空间环境试验技术</b> .....     | 142 |
| 6.1 红外多光谱遥感器辐射定标试验技术 .....              | 142 |
| 6.1.1 概述 .....                          | 142 |
| 6.1.2 试验目的 .....                        | 142 |
| 6.1.3 遥感器的红外辐射定标试验 .....                | 143 |
| 6.1.4 遥感器的可见光、近红外辐射定标 .....             | 158 |
| 6.2 航天器外伸构件的空间环境试验技术 .....              | 161 |
| 6.2.1 太阳电池阵伸展机构空间环境下展开试验技术 .....        | 161 |
| 6.2.2 航天器复合材料结构空间环境下的冷热交变辐照试验技术 .....   | 165 |
| 6.2.3 航天器抛物面型天线的热变形试验技术 .....           | 169 |
| 6.3 星箭分离和整流罩分离试验技术 .....                | 175 |
| 6.3.1 星箭解锁系统超高真空解锁分离试验技术 .....          | 175 |
| 6.3.2 整流罩真空分离试验技术 .....                 | 180 |
| 6.4 火箭发动机的空间环境试验技术 .....                | 183 |
| 6.4.1 试验的必要性与试验类型 .....                 | 183 |
| 6.4.2 航天器姿控用液体火箭发动机的环境试验 .....          | 187 |
| 6.4.3 世界主要空间大国火箭发动机高空及空间环境试验技术的发展 ..... | 190 |
| <b>第 7 章 空间辐照环境试验技术</b> .....           | 193 |
| 7.1 空间等离子体环境与表面充电试验技术 .....             | 193 |
| 7.1.1 航天器表面充电过程 .....                   | 193 |
| 7.1.2 表面充电试验方法 .....                    | 195 |

|       |                            |     |
|-------|----------------------------|-----|
| 7.1.3 | 静电放电试验 .....               | 200 |
| 7.1.4 | 飞行试验 .....                 | 200 |
| 7.1.5 | 数值模拟试验技术 .....             | 201 |
| 7.1.6 | 中国的试验研究 .....              | 201 |
| 7.2   | 空间高能粒子辐照与单粒子翻转试验技术 .....   | 202 |
| 7.2.1 | 铜源模拟试验技术 .....             | 202 |
| 7.2.2 | 低能重离子加速器模拟试验技术 .....       | 202 |
| 7.2.3 | 中能重离子加速器模拟试验技术 .....       | 203 |
| 7.2.4 | 高能加速器模拟试验技术 .....          | 203 |
| 7.2.5 | 散射源模拟试验技术 .....            | 203 |
| 7.2.6 | 激光器模拟试验技术 .....            | 203 |
| 7.2.7 | 单粒子效应地面加速器模拟专用装置 .....     | 203 |
| 7.3   | 电子、质子、紫外综合辐照环境试验技术 .....   | 204 |
| 7.3.1 | 电子、质子、紫外综合辐照环境试验效应分析 ..... | 204 |
| 7.3.2 | 电子、质子、紫外综合辐照环境试验技术 .....   | 205 |
| 7.4   | 原子氧、紫外综合辐照环境试验技术 .....     | 208 |
| 7.4.1 | 原子氧、紫外综合辐照环境试验设备 .....     | 208 |
| 7.4.2 | 试验方法与试验技术 .....            | 209 |
| 7.4.3 | 空间飞行试验技术 .....             | 210 |
| 7.4.4 | 数值模拟试验技术 .....             | 211 |
| 第8章   | 其他空间环境试验技术 .....           | 214 |
| 8.1   | 空间碎片与微流星环境试验技术 .....       | 214 |
| 8.1.1 | 地面模拟试验技术 .....             | 214 |
| 8.1.2 | 计算机模拟试验技术 .....            | 216 |
| 8.1.3 | 空间飞行探测试验技术 .....           | 216 |
| 8.1.4 | 地面探测技术 .....               | 217 |
| 8.1.5 | 碎片防护试验技术 .....             | 217 |
| 8.2   | 航天器空间环境防污染试验技术 .....       | 218 |
| 8.2.1 | 概述 .....                   | 218 |
| 8.2.2 | 空间环境试验中污染物的来源 .....        | 218 |
| 8.2.3 | 污染对航天器的影响 .....            | 219 |
| 8.2.4 | 污染对空间环境模拟器的影响 .....        | 220 |
| 8.2.5 | 防止污染的方法 .....              | 220 |
| 8.2.6 | 污染的检测 .....                | 222 |
| 8.2.7 | 卫星空间环境试验时污染检测的实例 .....     | 223 |
| 8.3   | 航天器磁环境试验技术 .....           | 225 |
| 8.3.1 | 概述 .....                   | 225 |
| 8.3.2 | 磁试验分类 .....                | 226 |
| 8.3.3 | 磁试验对环境场的要求 .....           | 226 |

|                                      |            |
|--------------------------------------|------------|
| 8.3.4 磁场和磁矩测量方法 .....                | 228        |
| 8.3.5 充、退磁试验技术 .....                 | 233        |
| 8.3.6 磁补偿试验技术 .....                  | 234        |
| 8.3.7 中国卫星磁试验技术 .....                | 235        |
| <b>第9章 航天器空间环境试验中的测试技术 .....</b>     | <b>236</b> |
| 9.1 空间环境试验中的质谱测试技术 .....             | 236        |
| 9.1.1 空间环境试验中残余气体质谱分析 .....          | 236        |
| 9.1.2 其他空间环境试验中的残余气体质谱分析 .....       | 238        |
| 9.1.3 在载人航天试验中的质谱分析和气体成分控制 .....     | 239        |
| 9.1.4 空间环境探测中的质谱分析 .....             | 239        |
| 9.2 真空检漏测试技术 .....                   | 239        |
| 9.2.1 真空检漏测试 .....                   | 239        |
| 9.2.2 压力检漏测试 .....                   | 241        |
| 9.3 空间环境模拟室内的压力测量技术 .....            | 242        |
| 9.3.1 空间环境模拟室内压力测量的特殊性及其需研究的问题 ..... | 242        |
| 9.3.2 压力测量的范围 .....                  | 243        |
| 9.3.3 真空计的选择 .....                   | 244        |
| 9.3.4 规管的布置位置 .....                  | 244        |
| 9.3.5 计算机控制的真空测量技术 .....             | 245        |
| 9.4 航天器热平衡与热真空试验的温度测量技术 .....        | 246        |
| 9.4.1 航天器热平衡与热真空试验过程中温度测量的任务 .....   | 246        |
| 9.4.2 航天器热平衡与热真空试验中温度测量的特点 .....     | 247        |
| 9.4.3 热电偶测温 .....                    | 247        |
| 9.4.4 热敏电阻测温 .....                   | 252        |
| 9.4.5 测温程序的编制要求 .....                | 255        |
| 9.4.6 数据采集系统的正确使用 .....              | 256        |
| 9.4.7 温度测量误差的主要因素 .....              | 257        |
| 9.5 热流和电功率测试技术 .....                 | 258        |
| 9.5.1 热流测量 .....                     | 258        |
| 9.5.2 功率测量 .....                     | 266        |
| <b>参考文献 .....</b>                    | <b>266</b> |

# Contents

|                  |                                                                              |    |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Chapter 1</b> | <b>Space Environment Test Outline of Spacecraft</b>                          | 1  |
| 1.1              | Summary                                                                      | 1  |
| 1.2              | Classification and Major Program of the Test                                 | 1  |
| 1.2.1            | Classification according to Process of Spacecraft Development Phase          | 1  |
| 1.2.2            | Major Test Program                                                           | 3  |
| 1.3              | Research of Test Method and Technology                                       | 4  |
| 1.3.1            | Method of Space Environment Test                                             | 4  |
| 1.3.2            | Major Direction of Test Technology Research                                  | 4  |
| 1.4              | Specification and Tailoring of Test                                          | 5  |
| 1.4.1            | Test Specification                                                           | 5  |
| 1.4.2            | Test Tailoring                                                               | 6  |
| 1.5              | Vacuum Thermal Test                                                          | 7  |
| 1.5.1            | Thermal Balance Test                                                         | 7  |
| 1.5.2            | Thermal Vacuum Test                                                          | 8  |
| 1.6              | Other Space Environment Test                                                 | 8  |
| <b>Chapter 2</b> | <b>Space Environment and Spacecraft Reliability</b>                          | 11 |
| 2.1              | Space Environment Effects on Spacecraft Reliability                          | 11 |
| 2.1.1            | Space Environment Effects on Orbital Spacecraft Reliability                  | 11 |
| 2.1.2            | Spacecraft Fault and Reliability Analysis in the Space Environment Test      | 12 |
| 2.1.3            | Necessary of Space Environment Test                                          | 13 |
| 2.2              | Space Vacuum Thermal Environment and Spacecraft Reliability                  | 13 |
| 2.2.1            | Space Vacuum Thermal Environment Test and Spacecraft Reliability             | 13 |
| 2.2.2            | Improvement of Vacuum Thermal Test Method and Spacecraft Reliability         | 14 |
| 2.2.3            | Space Vacuum Environment and Spacecraft Reliability                          | 15 |
| 2.2.4            | Solar Radiation Environment and Spacecraft Reliability                       | 17 |
| 2.2.5            | Space Cold and Black Environment and Spacecraft Reliability                  | 18 |
| 2.3              | High Energy Particle Radiation Environment and Spacecraft Reliability        | 19 |
| 2.3.1            | High Energy Particle Radiation Environment                                   | 19 |
| 2.3.2            | High Energy Particle Radiation Environment Effects on Spacecraft Reliability | 20 |
| 2.4              | Space Contamination Environment and Spacecraft Reliability                   | 22 |

|                  |                                                                                                                        |           |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.4.1            | Source of Space Contamination Environment .....                                                                        | 22        |
| 2.4.2            | Environment of Contamination and Self-Induced Contamination<br>Effects on Spacecraft Reliability .....                 | 23        |
| 2.5              | Space Debris Environment and Spacecraft Reliability .....                                                              | 24        |
| 2.5.1            | Element, Source and Quantity of Space Debris .....                                                                     | 24        |
| 2.5.2            | Space Debris Environment Effects on Spacecraft Reliability .....                                                       | 26        |
| 2.5.3            | Probability of Spacecraft Damaged by Space Debris .....                                                                | 27        |
| 2.6              | Micrometeorite Environment and Spacecraft Reliability .....                                                            | 28        |
| 2.6.1            | Space Micrometeorite Environment .....                                                                                 | 28        |
| 2.6.2            | Micrometeorite Environment Effects on Spacecraft Reliability .....                                                     | 29        |
| 2.7              | Spacecraft Reliability and Environment of Space Plasma and<br>Magnetic Substorm .....                                  | 30        |
| 2.7.1            | Space Plasma Environment .....                                                                                         | 30        |
| 2.7.2            | Space Magnetic Substorm Environment .....                                                                              | 31        |
| 2.7.3            | Environment of Space Plasma and Space Magnetic<br>Substorm Effects on Spacecraft Reliability .....                     | 31        |
| 2.8              | Space Magnetic Field Environment and Spacecraft Reliability .....                                                      | 33        |
| 2.8.1            | Space Magnetic Field Environment Effects on Spacecraft Reliability .....                                               | 33        |
| 2.8.2            | Application of Space Magnetic Field Environment .....                                                                  | 34        |
| 2.9              | Space Microgravity Environment and Spacecraft Reliability .....                                                        | 34        |
| 2.9.1            | Space Microgravity Environment Effects on Spacecraft Reliability .....                                                 | 34        |
| 2.9.2            | Application of Space Microgravity Environment .....                                                                    | 35        |
| 2.10             | Space Atomic Oxygen Environment and Spacecraft Reliability .....                                                       | 35        |
| 2.10.1           | Space Atomic Oxygen Environment .....                                                                                  | 35        |
| 2.10.2           | Space Atomic Oxygen Environment Effects on Spacecraft Reliability .....                                                | 36        |
| 2.11             | Space Atmosphere Environment and Spacecraft Reliability .....                                                          | 37        |
| 2.11.1           | Effects on Spacecraft Operation Life .....                                                                             | 37        |
| 2.11.2           | Effects on Spacecraft Orbit .....                                                                                      | 38        |
| 2.11.3           | Resistance of Spacecraft Affected by Space Atmosphere Density .....                                                    | 38        |
| <b>Chapter 3</b> | <b>Error Analysis of Spacecraft's Space Thermal Environment<br/>Test, Spacecraft Thermal Subscale Model Test .....</b> | <b>39</b> |
| 3.1              | Space Thermal Environment .....                                                                                        | 39        |
| 3.1.1            | Vacuum .....                                                                                                           | 39        |
| 3.1.2            | Cryogenic and Black Background .....                                                                                   | 40        |
| 3.1.3            | Space External Heat Flux .....                                                                                         | 40        |
| 3.2              | Error Analysis of Space Thermal Environment Test .....                                                                 | 42        |
| 3.2.1            | Spacecraft Thermal Balance in Astrospace .....                                                                         | 42        |
| 3.2.2            | Error Analysis of Spacecraft's Space Thermal Environment Test .....                                                    | 43        |
| 3.3              | Introduction of Spacecraft Thermal Subscale Model Test .....                                                           | 52        |

|                  |                                                                                                         |           |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.3.1            | Principal of Spacecraft Thermal Similarity in the Radiation and Thermal Transmission System .....       | 52        |
| 3.3.2            | Technical Issues of Thermal Similarity Steady Simulation .....                                          | 54        |
| 3.3.3            | Application Tapering of Thermal Subscale Model Test .....                                               | 57        |
| 3.4              | Unsteady Thermal Balance Test Method .....                                                              | 58        |
| 3.4.1            | Introduction of Unsteady Thermal Balance Test Method .....                                              | 58        |
| 3.4.2            | Application of Unsteady Thermal Balance Test Method .....                                               | 58        |
| <b>Chapter 4</b> | <b>Spacecraft Thermal Balance and Thermal Vacuum Test Technology .....</b>                              | <b>60</b> |
| 4.1              | Spacecraft Thermal Balance Test Technology .....                                                        | 60        |
| 4.1.1            | Test Purpose .....                                                                                      | 60        |
| 4.1.2            | Requirement of Spacecraft Technology Configuration .....                                                | 60        |
| 4.1.3            | Confirmation of Test Operating Mode .....                                                               | 61        |
| 4.1.4            | Orbital Heat Flux Simulating Method, Space Heat Flux Simulating Equipment and Selection Principle ..... | 62        |
| 4.1.5            | Requirement of Space Environment Simulator .....                                                        | 65        |
| 4.1.6            | Spacecraft Thermal Balance Test Effects on Full Air Spacecraft and Resolving Method .....               | 66        |
| 4.1.7            | Examination before Test .....                                                                           | 68        |
| 4.1.8            | Spacecraft Installation .....                                                                           | 69        |
| 4.1.9            | Test Process .....                                                                                      | 69        |
| 4.1.10           | Examination after Test .....                                                                            | 71        |
| 4.1.11           | Test Result Analysis and Test Evaluation .....                                                          | 71        |
| 4.1.12           | Test Example .....                                                                                      | 72        |
| 4.1.13           | Development Trend of Spacecraft Thermal Balance Test Technology .....                                   | 83        |
| 4.2              | Thermal Vacuum Test Technology of Spacecraft .....                                                      | 84        |
| 4.2.1            | Test Importance .....                                                                                   | 84        |
| 4.2.2            | Test Types .....                                                                                        | 85        |
| 4.2.3            | Test Purpose .....                                                                                      | 85        |
| 4.2.4            | Test Level and Duration .....                                                                           | 85        |
| 4.2.5            | Requirement of Test Spacecraft Technology Postural .....                                                | 89        |
| 4.2.6            | Dividing of Temperature Control Section .....                                                           | 90        |
| 4.2.7            | Selection of Temperature Control Points .....                                                           | 90        |
| 4.2.8            | Instrument of Automatic Temperature Control .....                                                       | 91        |
| 4.2.9            | Implementation Measure of Thermal Circulation .....                                                     | 91        |
| 4.2.10           | Test Process .....                                                                                      | 91        |
| 4.2.11           | Test Evaluation .....                                                                                   | 92        |
| 4.2.12           | Thermal Vacuum Test of Spacecraft Component .....                                                       | 92        |
| 4.2.13           | General Situation of Spacecraft Thermal Vacuum Test in China .....                                      | 93        |

|                                                               |                                                                                                          |     |
|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.14                                                        | Feature of Satellite Thermal Vacuum Test of Some Foreign Commercial Companies .....                      | 95  |
| 4.2.15                                                        | Relation between Thermal Cycle Test under Atmospheric Pressure and Thermal Vacuum Test .....             | 97  |
| 4.2.16                                                        | Development Trend of Spacecraft Thermal Vacuum Test Technology ...                                       | 98  |
| <b>Chapter 5 Space Environment Test Technology of Manned</b>  |                                                                                                          |     |
|                                                               | <b>Spacecraft</b> .....                                                                                  | 100 |
| 5.1                                                           | Space Environment and Manned Spacecraft Reliability .....                                                | 100 |
| 5.1.1                                                         | Introduction .....                                                                                       | 100 |
| 5.1.2                                                         | Manned Spacecraft Anomaly and Space Environment Test .....                                               | 100 |
| 5.1.3                                                         | Space Environment Effects on Manned Spacecraft .....                                                     | 103 |
| 5.1.4                                                         | Space Environment Test and Manned Spacecraft Reliability .....                                           | 106 |
| 5.2                                                           | Neutral Buoyancy Test Technology of Microgravity Simulation .....                                        | 108 |
| 5.2.1                                                         | Introduction .....                                                                                       | 108 |
| 5.2.2                                                         | Evolution and Application of Neutral Buoyancy Test Technology in the World .....                         | 110 |
| 5.2.3                                                         | Test Technology and Test Measure .....                                                                   | 111 |
| 5.3                                                           | Thermal Balance and Thermal Vacuum Test Technology of Manned Spacecraft .....                            | 115 |
| 5.3.1                                                         | Thermal Balance Test Technology of Manned Spacecraft .....                                               | 115 |
| 5.3.2                                                         | Thermal Vacuum Test Technology of Manned Spacecraft .....                                                | 115 |
| 5.3.3                                                         | KM6 Facility in China .....                                                                              | 120 |
| 5.4                                                           | Space Environment Test Technology of Crew and Mechanism Combinative Activity out of Spacecraft .....     | 128 |
| 5.4.1                                                         | Introduction .....                                                                                       | 128 |
| 5.4.2                                                         | Test Scheme and Test Technology .....                                                                    | 128 |
| 5.4.3                                                         | Test Technology of Environment Control System .....                                                      | 133 |
| 5.4.4                                                         | Test Technology of Noise Elimination System .....                                                        | 136 |
| 5.4.5                                                         | Other System Test Technology .....                                                                       | 136 |
| 5.4.6                                                         | Test Procedure .....                                                                                     | 137 |
| 5.5                                                           | Other Space Environment Test Technology of Manned Space .....                                            | 138 |
| 5.5.1                                                         | Microgravity Flight (Weightlessness Flight) Test Technology of Simulating Microgravity Environment ..... | 138 |
| 5.5.2                                                         | Other Test Technology of Simulating Microgravity Environment .....                                       | 141 |
| <b>Chapter 6 Space Environment Test Technology of Special</b> |                                                                                                          |     |
|                                                               | <b>Spacecraft Assembly</b> .....                                                                         | 142 |
| 6.1                                                           | Infrared Multi-Spectrum Remote Sensor Radiation Calibration Test Technology .....                        | 142 |



|                  |                                                                                                                                                   |            |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.1.1            | Introduction .....                                                                                                                                | 142        |
| 6.1.2            | Test Purpose .....                                                                                                                                | 142        |
| 6.1.3            | Infrared Radiation Calibration Test of Remote Instrument .....                                                                                    | 143        |
| 6.1.4            | Visible Light and Near Infrared Radiation Calibration of Remote<br>Instrument .....                                                               | 158        |
| 6.2              | Space Environment Test Technology of Deployable Structure of Spacecraft ...                                                                       | 161        |
| 6.2.1            | Deploying Test Technology of Solar Array Deployable Structure<br>in the Space Environment .....                                                   | 161        |
| 6.2.2            | Thermal Cycling Radiation Test Technology of Spacecraft's<br>Composite Material Structure in Space Environment .....                              | 165        |
| 6.2.3            | Thermal Distortion Test Technology of Spacecraft Parabolic Antenna ...                                                                            | 169        |
| 6.3              | Test Technology of Separating Satellite & Launch Vehicle and<br>Separating Fairing .....                                                          | 175        |
| 6.3.1            | Ultrahigh Vacuum Release and Separate Test Technology of<br>Satellite & Launch Vehicle Release and Separate System .....                          | 175        |
| 6.3.2            | Vacuum Separation Test Technology of Fairing .....                                                                                                | 180        |
| 6.4              | Space Environment Test Technology of Thruster .....                                                                                               | 183        |
| 6.4.1            | Test Type and Necessity of the Test .....                                                                                                         | 183        |
| 6.4.2            | Environment Test of Liquid Thruster for Spacecraft<br>Attitude Control .....                                                                      | 187        |
| 6.4.3            | Development of High Altitude and<br>Space Environment Test Technology of Thruster in<br>Main Space Developed Foreign Countries in the World ..... | 190        |
| <b>Chapter 7</b> | <b>Space Radiation Environment Test Technology .....</b>                                                                                          | <b>193</b> |
| 7.1              | Space Plasma Environment and Surface Charging Test Technology .....                                                                               | 193        |
| 7.1.1            | Spacecraft Surface Charging Process .....                                                                                                         | 193        |
| 7.1.2            | Surface Charging Test Measure .....                                                                                                               | 195        |
| 7.1.3            | Static Discharging Test .....                                                                                                                     | 200        |
| 7.1.4            | Flight Test .....                                                                                                                                 | 200        |
| 7.1.5            | Test Technology of Numerical Simulation .....                                                                                                     | 201        |
| 7.1.6            | Test Research in China .....                                                                                                                      | 201        |
| 7.2              | Space High Energy Particle Radiation and Single Particle Reversal<br>Test Technology .....                                                        | 202        |
| 7.2.1            | Californium Simulation Test Technology .....                                                                                                      | 202        |
| 7.2.2            | Low Energy Heavy Ion Accelerator Simulation Test Technology .....                                                                                 | 202        |
| 7.2.3            | Intermediate Energy Heavy Ion Accelerator Simulation Test<br>Technology .....                                                                     | 203        |
| 7.2.4            | High Energy Accelerator Simulation Test Technology .....                                                                                          | 203        |
| 7.2.5            | Scatter Source Simulation Test Technology .....                                                                                                   | 203        |