

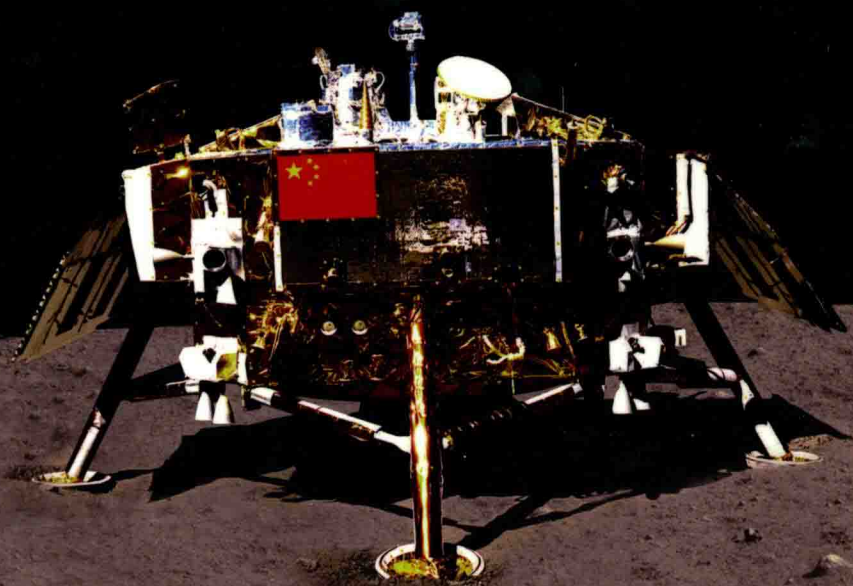


“十二五”国家重点出版规划项目

月球软着陆探测器技术

Technology of Lunar Soft Lander

于登云 等编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



“十二五”国家重点出版规划项目

月球软着陆探测器技术

Technology of Lunar Soft Lander

于登云 等编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

· 北京 ·

内 容 简 介

本书是作者在“嫦娥”三号月球软着陆探测器成功研制的基础上归纳总结完成的。主要包含:月球软着陆探测器总体设计,主要分系统的研制设计,地面总装、测试与试验验证技术,着陆探测技术,着陆探测技术的未来展望等几方面内容。系统论述了月球软着陆探测器从论证、设计、研制、试验到最终成功发射、完成预定探测任务全过程所必需的理论和技術,为我国地外天体软着陆探测器研制提供重要的理論和技术支撑。

本书既可为航天科技工作者,特别是从事深空探测器设计的航天工作者提供参考,也可在校大学生提供月球软着陆探测器设计的基本知识。

图书在版编目(CIP)数据

月球软着陆探测器技术 / 于登云等编著. — 北京 :
国防工业出版社, 2016.5 重印

“十二五”国家重点出版规划项目

ISBN 978-7-118-10407-3

I. ①月… II. ①于… III. ①月球探测器-软着陆
IV. ①V476.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 260690 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 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880×1230 1/16 印张 30 $\frac{1}{2}$ 字数 752 千字

2016 年 5 月第 1 版第 2 次印刷 印数 501—2000 册 定价 298.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717



在举国上下欢庆“嫦娥”五号飞行试验器成功飞行并返回的时刻，由于登云等编著的《月球软着陆探测器技术》一书就要出版发行了。可喜可贺！

我国探月工程的发展目标分三步走，即“绕、落、回”。随着“嫦娥”一号和“嫦娥”二号绕月探测器及“嫦娥”三号月球软着陆探测器的飞行成功，我们圆满实现了“绕”和“落”的预定目标。《月球软着陆探测器技术》就是航天科技人员在“嫦娥”三号月球软着陆探测器研制归纳总结基础上编写完成的。它不仅是广大一线科研工作者实践经验的总结，而且是我国探月工程研制中取得的又一重要成果和我国航天事业宝贵的文化精神财富。

毛泽东同志说过：“人类要不断地总结经验，有所发明，有所发现，有所创造，有所前进。”探索宇宙奥秘，开发利用月球资源将是人类长期的实践活动。该书的出版发行有两个作用：一是对过去所做技术工作通过较系统总结，上升为经验或理论，用来指导我们今后月球着陆器研制的专业技术工作，并给后人以启示，为人类继续探索月球及其他星球资源提供可借鉴的经验或理论；二是倡导我们从事航天事业的科研工作者及时总结经验，写我所做，做我所写，把归纳、总结当作自己的职责，使之成为一种风气、一种习惯。

当前，我国航天事业正在由航天大国向航天强国迈进。建设航天强国，不仅要有优质可靠的航天器产品作支撑，而且需要强大的专业技术、科学文化作支撑，这是我们的软实力。无疑，出版航天专业技术著作也是我们航天事业的重要组成部分。我们的航天事业要一代一代干下去，与航天事业相关的专业技术著作也要一代一代写下去。我们要以《月球软着陆探测器技术》出版发行为契机，积极推动“探月工程系列”图书的出版工作，使之能够涵盖我国探月工程研制的各专业技术领域。我热诚希望该书能够带动我国探月工程研制其他各专业技术领域相关技术著作的出版发行。

最后，向参加该书写作、出版发行的全体工作人员表示感谢，并对在该书立项审批过程中给予支持帮助的国家主管部门领导和同志表示最诚挚的谢意，预祝《月球软着陆探测器技术》的出版发行取得圆满成功。

雷凡培

中国航天科技集团公司董事长

2014年11月

序 2



月球是地球唯一的天然卫星，既是深空探测的起点，也是世界航天传统国家和新兴国家竞相探测的重点。随着我国探月工程的发展，我国在 2007 年实现了“嫦娥”一号卫星的绕月探测，在 2013 年实现了“嫦娥”三号的月球软着陆探测，未来还将实现月球样品的取样返回。

着陆在星球表面的探测，使我们可以近距离探测，更清晰、更深入地了解这个星球，同时也可以利用这个星球独特的地理和环境特性开展对太阳系及其他天体的观测活动。月球软着陆探测肩负着“探月、测地、观天”的科学探测使命。

从地球起飞，着陆到月球表面，不是一段轻松的旅程。38 万千米的漫长旅途后要稳稳地站在月球表面，要适应月面高低起伏的地形和松软的月壤，要面对月尘和高、低温昼夜交替等复杂环境，月球着陆器需要突破一系列新技术才能完成自己的任务。月球软着陆探测任务的实施，标志着航天技术水平迈上了一个新台阶。

《月球软着陆探测器技术》是国内第一部全面、系统、深入地介绍月球着陆器技术的专著。参与本书编著的作者是很熟悉和器重的一群中青年科技人员，他们中的不少人从 21 世纪初就和我共同参加了“嫦娥”一号的研制工作，后来分别承担了“嫦娥”二号、“嫦娥”三号的研制工作。可以说，他们都是在探月工程一线多年担任重要岗位的技术人员，具有较为深厚的理论基础和丰富的工程研制经验。作者从月球着陆器所面临的环境、总体设计、分系统设计、总装、测试、地面试验验证等多个方面，对设计方法、典型技术、验证方法等内容，结合“嫦娥”三号任务的工程实践进行了系统的阐述。

《月球软着陆探测器技术》可为月球及深空探测领域的航天工作者提供技术参考，也可所高校等相关研究部门的研究人员提供相关知识。该书的出版将对总结积累我国月球探测领域的工程经验、推动深空探测任务的持续发展提供有力的技术支持。

中国科学院院士

“嫦娥”三号探测器首席科学家

2014 年 11 月



地外天体表面的软着陆探测，是人类探索宇宙奥秘的重要手段。相比地球轨道航天器以及绕月航天器，月球软着陆探测器（简称月球着陆器）在总体设计、制导导航控制技术、推进系统设计、着陆缓冲设计、热控设计等方面，需要突破大量的新技术，并要在地面进行大量的试验验证。

编著本书，是在我国圆满完成“嫦娥”三号月球软着陆任务的基础上，对月球着陆器设计与研制技术的一个总结。本书共分17章：第1~3章为总体概述，分别介绍月球软着陆探测的发展历程，月球软着陆探测的任务和环境，月球着陆器总体设计；第4~11章是月球着陆器主要分系统的设计，包括结构与机构、热控、电源、制导导航与控制、推进、数据管理、测控与通信、着陆缓冲共8个主要分系统；第12~15章为月球着陆器的地面总装、测试与试验验证技术，包括集成装配、专业测量、电性能综合测试和地面大型试验；第16章介绍月球软着陆探测的科学探测技术；第17章为月球着陆器技术的未来展望。

本书由于登云、林益明、刘国青、孙泽洲、张焱编著。参与本书编著的专家还有吴学英、王闯、邓湘金、柴洪友、李新立、徐燕菱、刘自军、张明、雷英俊、程铭、金广明、曹伟、赵蕾、黄晓峰、刘适、满剑锋、曾福明、杨建中、何晓宇、权爽、王劲榕、邹昕、樊世超、易旺民、冯伟、杨再华、师立侠、杜晨、高庆华。全书由于登云、张焱统稿。

本书编写历时2年，得到航天科技集团公司雷凡培董事长、吴燕生总经理、袁洁副总经理以及时任中国空间技术研究院院长的杨保华副总经理和叶培建院士等专家的大力支持。李春来、彭成荣、冯纪生、赵坚成、华诚生、范含林、韩国经、韩宏印、张洪华、王宪文、闫荣鑫、赵和平、张庆君、鲍晓萍、饶炜、蔡震波等专家对书稿进行了审阅，提出了宝贵的意见和建议。范含林、刘雪光、谈纓、郭璠、黄俊、张传军等同志对本书的出版做了大量工作。在此一并感谢。

限于作者水平有限，书中难免有不足之处，恳请读者批评指正。

编著者
2015年11月

目录



第 1 章 绪 论

- 1.1 月球探测的意义及主要方式 / 003
 - 1.1.1 月球探测的意义 / 003
 - 1.1.2 月球探测的主要方式 / 004
- 1.2 国外月球着陆器技术发展状况 / 006
 - 1.2.1 苏联月球着陆器技术发展状况 / 006
 - 1.2.2 美国月球着陆器技术发展状况 / 010
- 1.3 我国探月工程 / 014
 - 1.3.1 探月工程总体规划 / 014
 - 1.3.2 “嫦娥”系列探测器概况 / 015
- 1.4 月球着陆器面临的技术难点 / 016
- 1.5 小结 / 017
- 参考文献 / 018

第 2 章 月球软着陆探测面临的 环境分析

- 2.1 引言 / 021
- 2.2 月球辐射环境 / 021
 - 2.2.1 银河宇宙射线 / 021
 - 2.2.2 太阳能量粒子 / 022
 - 2.2.3 月球轨道等离子体环境 / 023
- 2.3 月球热环境 / 024
 - 2.3.1 太阳辐射 / 024
 - 2.3.2 月面反照 / 025
 - 2.3.3 月面辐射 / 025

第 3 章

月球着陆器总体设计

- 2.3.4 地面反照 / 025
- 2.3.5 地面辐射 / 026
- 2.4 月面地貌地形 / 026
 - 2.4.1 月面地貌 / 026
 - 2.4.2 月面地形 / 027
- 2.5 月壤和月尘 / 033
 - 2.5.1 物理特性 / 034
 - 2.5.2 机械特性 / 035
 - 2.5.3 电磁特性 / 037
- 2.6 其他月球环境 / 039
 - 2.6.1 月球引力场 / 039
 - 2.6.2 月球近真空环境 / 039
 - 2.6.3 月面光照环境 / 040
- 2.7 小结 / 042
- 参考文献 / 043
- 3.1 引言 / 047
- 3.2 总体设计的基本原则 / 047
- 3.3 任务分析 / 049
 - 3.3.1 任务特点分析 / 049
 - 3.3.2 着陆区分析 / 049
 - 3.3.3 任务过程分析 / 051
 - 3.3.4 环境影响分析 / 054
 - 3.3.5 载荷配置分析 / 065
- 3.4 轨道设计 / 066
 - 3.4.1 飞行过程概述 / 066
 - 3.4.2 轨道设计约束 / 067
 - 3.4.3 着陆时机选择 / 067
 - 3.4.4 环月轨道分析 / 068
 - 3.4.5 地月转移轨道选择 / 069
 - 3.4.6 发射窗口分析 / 069
- 3.5 系统组成及主要技术指标 / 070
 - 3.5.1 组成 / 070
 - 3.5.2 主要技术指标 / 071
 - 3.5.3 推进剂预算 / 073

第 4 章

月球着陆器结构与机构技术

第 5 章

月球着陆器热控技术

- 3.6 总体构型布局设计 / 073
 - 3.6.1 设计原则与基本思路 / 073
 - 3.6.2 总体构型 / 074
- 3.7 测控通信链路规划 / 077
- 3.8 着陆过程设计 / 078
 - 3.8.1 着陆初始条件与状态设置 / 078
 - 3.8.2 着陆过程 / 078
 - 3.8.3 着陆缓冲 / 080
 - 3.8.4 着陆图像下传 / 080
- 3.9 着陆稳定性分析仿真 / 080
- 3.10 小结 / 082
- 参考文献 / 083

- 4.1 引言 / 087
- 4.2 月球着陆器结构与机构特点 / 088
 - 4.2.1 月球着陆器结构特点 / 088
 - 4.2.2 月球着陆器机构特点 / 090
- 4.3 月球着陆器结构设计与验证 / 093
 - 4.3.1 结构设计 / 093
 - 4.3.2 着陆器结构分析 / 098
 - 4.3.3 着陆器结构试验 / 103
- 4.4 着陆器机构设计与验证 / 106
 - 4.4.1 太阳翼机构 / 106
 - 4.4.2 月球车连接解锁机构 / 113
 - 4.4.3 月球车转移机构 / 117
- 4.5 小结 / 123
- 参考文献 / 124

- 5.1 引言 / 127
- 5.2 技术发展现状 / 128
- 5.3 技术特点分析 / 129
 - 5.3.1 设计约束 / 129

第 6 章

月球着陆器电源技术

- 5.3.2 技术特点 / 135
- 5.4 设计方法 / 135
 - 5.4.1 热设计思路 / 135
 - 5.4.2 热控设计方案 / 136
 - 5.4.3 热分析计算 / 140
- 5.5 典型技术 / 142
 - 5.5.1 可变热导技术 / 142
 - 5.5.2 发动机高温防护技术 / 144
 - 5.5.3 RHU 综合利用技术 / 146
 - 5.5.4 两相流体回路技术 / 148
- 5.6 设计验证 / 149
 - 5.6.1 着陆器热平衡试验 / 149
 - 5.6.2 可变热导热管试验 / 152
 - 5.6.3 高温隔热屏真空隔热性能试验 / 152
 - 5.6.4 两相流体回路试验 / 155
 - 5.6.5 在轨飞行试验 / 157
- 5.7 小结 / 159
- 参考文献 / 159
- 6.1 引言 / 163
- 6.2 技术发展现状 / 163
- 6.3 任务需求和特点分析 / 165
 - 6.3.1 功能需求 / 165
 - 6.3.2 性能需求 / 165
 - 6.3.3 任务特点分析 / 166
- 6.4 设计原则与方法 / 168
 - 6.4.1 设计原则 / 168
 - 6.4.2 光照条件分析 / 168
 - 6.4.3 轻量化分析 / 171
 - 6.4.4 空间环境影响分析 / 172
 - 6.4.5 能量平衡分析 / 173
 - 6.4.6 供配电体制分析 / 174
- 6.5 典型技术 / 175
 - 6.5.1 电源控制装置设计技术 / 175
 - 6.5.2 蓄电池组设计技术 / 176

第 7 章

月球着陆器制导、 导航与控制技术

- 6.5.3 太阳能电池电路设计技术 / 177
- 6.5.4 休眠唤醒控制方案设计技术 / 177
- 6.5.5 多器间能源复用设计技术 / 179

6.6 设计验证 / 180

- 6.6.1 验证项目 / 180
- 6.6.2 休眠唤醒功能验证 / 180
- 6.6.3 太阳能电池大入射角验证 / 180
- 6.6.4 太阳能电池极端温度性能验证 / 181

6.7 小结 / 182

参考文献 / 182

7.1 引言 / 187

7.2 技术发展现状 / 187

7.3 特点分析 / 189

7.4 设计方法 / 189

- 7.4.1 系统组成 / 189
- 7.4.2 工作模式 / 190
- 7.4.3 部件设计 / 192
- 7.4.4 软件设计 / 198
- 7.4.5 故障自主诊断与处置逻辑设计 / 201

7.5 典型技术 / 203

- 7.5.1 动力下降段制导、导航与控制框架流程 / 203
- 7.5.2 动力下降段轨迹设计 / 204
- 7.5.3 动力下降段导航方法 / 205
- 7.5.4 动力下降段制导律设计 / 207
- 7.5.5 障碍识别与安全着陆点选取方法 / 209
- 7.5.6 动力下降段姿态控制方法 / 211

7.6 设计验证 / 212

- 7.6.1 分系统关键导航敏感器标定试验 / 212
- 7.6.2 分系统挂飞试验 / 214
- 7.6.3 半物理仿真试验 / 216

7.7 小结 / 218

参考文献 / 219

第 8 章

月球着陆器推进技术

- 8.1 引言 / 223
- 8.2 技术发展现状 / 223
- 8.3 设计约束与分析 / 228
 - 8.3.1 构型约束 / 228
 - 8.3.2 功能约束 / 229
 - 8.3.3 主要性能指标约束 / 230
 - 8.3.4 飞行环境约束 / 231
 - 8.3.5 着陆后月面长期储存环境 / 232
- 8.4 推进系统设计 / 233
 - 8.4.1 设计基本条件 / 233
 - 8.4.2 推进系统主要参数确定 / 235
 - 8.4.3 推进系统输送系统方案设计 / 237
 - 8.4.4 推进系统电路系统方案设计 / 240
 - 8.4.5 推进系统总装方案设计 / 240
 - 8.4.6 推进系统主要组件方案设计 / 242
 - 8.4.7 推进系统地面测试及推进剂加注设计 / 244
- 8.5 推进系统试验验证 / 246
 - 8.5.1 全系统地面试车 / 246
 - 8.5.2 变推力轨道控制发动机试验 / 247
 - 8.5.3 推进剂储箱试验 / 248
 - 8.5.4 高压气瓶长期承压储存试验 / 249
 - 8.5.5 推进剂加注试验 / 249
- 8.6 小结 / 250
- 参考文献 / 251

第 9 章

月球着陆器数据管理技术

- 9.1 引言 / 255
- 9.2 技术发展现状 / 255
- 9.3 技术特点分析 / 257
 - 9.3.1 任务分析 / 257
 - 9.3.2 设计约束 / 258
- 9.4 设计方法 / 258
 - 9.4.1 设计思路 / 258
 - 9.4.2 体系结构与组成 / 259
 - 9.4.3 轻小型化系统集成设计 / 261

第 10 章

月球着陆器测控与通信技术

第 11 章

月球着陆器着陆缓冲技术

- 9.4.4 总线网络设计 / 262
- 9.4.5 航天器信息管理设计 / 264
- 9.4.6 航天器自主管理设计 / 266
- 9.4.7 高集成轻小型设备可靠性设计 / 266
- 9.4.8 软件设计 / 270

- 9.5 设计验证 / 275
 - 9.5.1 分系统仿真测试环境 / 275
 - 9.5.2 设计验证项目 / 276

- 9.6 小结 / 276

参考文献 / 277

- 10.1 引言 / 281

- 10.2 技术发展现状 / 282

- 10.3 技术特点分析 / 283
 - 10.3.1 任务需求 / 283
 - 10.3.2 任务特点 / 285
 - 10.3.3 设计约束 / 286

- 10.4 测控通信设计 / 287
 - 10.4.1 测控通信设计概述 / 287
 - 10.4.2 测控通信设计方法 / 288
 - 10.4.3 器地测控通信 / 289
 - 10.4.4 器间通信 / 296

- 10.5 设计验证 / 299
 - 10.5.1 紧缩场试验 / 299
 - 10.5.2 天地对接试验 / 300
 - 10.5.3 UHF 频段外场试验 / 301

- 10.6 小结 / 302

参考文献 / 303

- 11.1 引言 / 307

- 11.2 技术发展现状 / 308

- 11.3 着陆缓冲机构的组成与技术特点 / 309

- 11.4 常见缓冲方法及其特点 / 310

第 12 章

月球着陆器系统集成 装配技术

- 11.4.1 多胞材料变形法 / 310
- 11.4.2 薄壁金属管变形法 / 311
- 11.4.3 液压阻尼法 / 312
- 11.4.4 特殊材料拉伸法 / 313
- 11.5 着陆缓冲机构设计 / 314
 - 11.5.1 技术要求分析 / 314
 - 11.5.2 设计与仿真验证 / 316
- 11.6 着陆缓冲机构地面测试与验证 / 326
 - 11.6.1 缓冲材料性能验证 / 326
 - 11.6.2 展开及缓冲摩擦力测试 / 327
 - 11.6.3 触月指示性能测试 / 330
 - 11.6.4 单套着陆缓冲机构缓冲性能验证 / 332
 - 11.6.5 组合缓冲性能模拟验证 / 333
- 11.7 小结 / 334
- 参考文献 / 335
- 12.1 引言 / 339
- 12.2 系统集成装配技术发展现状 / 339
- 12.3 系统集成装配特点 / 343
 - 12.3.1 任务分析 / 343
 - 12.3.2 装配技术特点 / 343
- 12.4 系统集成装配方案设计 / 345
 - 12.4.1 工艺总方案设计 / 345
 - 12.4.2 工艺装备规划 / 346
 - 12.4.3 工艺试验规划 / 346
 - 12.4.4 技术流程设计 / 347
 - 12.4.5 数字化装配仿真 / 348
- 12.5 典型系统集成装配应用 / 349
 - 12.5.1 月球着陆器推进系统装配 / 349
 - 12.5.2 月球着陆器仪器装配 / 350
 - 12.5.3 月球着陆器电缆装配 / 351
 - 12.5.4 月球着陆器结构装配 / 352
 - 12.5.5 月球着陆器机构装配 / 353
 - 12.5.6 月球着陆器热控单元装配 / 355
 - 12.5.7 月球着陆器翻转调姿 / 358

第 13 章

月球着陆器专业测量技术

- 12.5.8 月球着陆器吊装 / 359
- 12.5.9 月球着陆器转运及运输 / 360
- 12.5.10 月球着陆器携带放射性同位素设备的
装配 / 361
- 12.5.11 月球着陆器发射场再装配 / 362

12.6 小结 / 363

参考文献 / 363

13.1 引言 / 367

13.2 技术发展现状 / 367

13.3 专业测量技术特点分析 / 368

13.4 月球着陆器特色专业测量技术应用 / 369

- 13.4.1 基于公共点转换的月球着陆器测距测
速天线端面法线测量 / 369
- 13.4.2 基于广义 USMN 平差的月球着陆器对
接环激光扫描测量 / 373
- 13.4.3 月球着陆器推进系统高精度自动化
检漏 / 376
- 13.4.4 月球着陆器推进系统快速泄漏定位
技术 / 379
- 13.4.5 月球着陆器多自由度变换的质量特性
测试 / 380
- 13.4.6 月球着陆器推进剂加注测试数据修正
技术 / 383
- 13.4.7 月球着陆器推进剂、配重块联合质心
参数修正技术 / 385

13.5 小结 / 386

参考文献 / 387

第 14 章

月球着陆器电性能综 合测试技术

14.1 引言 / 391

14.2 技术发展现状 / 391

14.3 任务需求与技术特点 / 392

- 14.3.1 任务需求 / 392
- 14.3.2 技术特点 / 393

第 15 章

月球着陆器系统级试验验证技术

- 14.4 综合测试方案 / 393
 - 14.4.1 测试流程 / 393
 - 14.4.2 测试模式 / 394
 - 14.4.3 测试覆盖性设计 / 397
 - 14.4.4 测试数据判读技术 / 398
- 14.5 地面测试系统 / 398
 - 14.5.1 器地供电关系 / 399
 - 14.5.2 器地信息流 / 400
 - 14.5.3 地面测试系统组成 / 401
 - 14.5.4 地面测试设备验证 / 402
- 14.6 综合测试方法 / 402
 - 14.6.1 综合测试项目 / 402
 - 14.6.2 全任务过程模飞测试 / 404
 - 14.6.3 动力下降段模飞测试 / 405
 - 14.6.4 器间通信功能测试 / 405
 - 14.6.5 休眠唤醒功能测试 / 406
- 14.7 小结 / 407
- 参考文献 / 408
- 15.1 引言 / 411
- 15.2 技术发展现状 / 411
 - 15.2.1 美国开展的试验 / 411
 - 15.2.2 苏联开展的试验 / 415
- 15.3 需求分析 / 417
 - 15.3.1 试验规划原则 / 417
 - 15.3.2 验证试验需求 / 417
- 15.4 悬停避障及缓速下降试验 / 418
 - 15.4.1 试验目的 / 418
 - 15.4.2 试验约束和试验方法 / 419
 - 15.4.3 试验系统设计 / 421
 - 15.4.4 应用实例 / 422
- 15.5 着陆冲击试验 / 423
 - 15.5.1 试验目的 / 423
 - 15.5.2 试验约束和试验方法 / 423
 - 15.5.3 试验系统设计 / 423

第 16 章

月球着陆器探测仪器技术

15.5.4 应用实例 / 424

15.6 着陆稳定性试验 / 425

15.6.1 试验目的 / 425

15.6.2 试验约束和试验方法 / 425

15.6.3 试验系统设计 / 426

15.6.4 应用实例 / 428

15.7 大推力发动机推力脉动对 GNC 敏感器的影响试验 / 428

15.7.1 试验目的 / 428

15.7.2 试验约束和试验方法 / 428

15.7.3 试验系统设计 / 429

15.7.4 应用实例 / 430

15.8 变推力发动机与中心控制单元联合试车试验 / 431

15.8.1 试验目的 / 431

15.8.2 试验约束和试验方法 / 431

15.8.3 试验系统设计 / 432

15.9 羽流对热控的影响试验 / 433

15.9.1 试验目的 / 433

15.9.2 试验约束和试验方法 / 433

15.9.3 试验系统设计 / 434

15.9.4 应用实例 / 435

15.10 小结 / 435

参考文献 / 436

16.1 引言 / 439

16.2 技术发展现状 / 439

16.2.1 “勘察者”系列探测器探测仪器及主要探测成果 / 440

16.2.2 “月球”系列探测器探测仪器及主要探测成果 / 441

16.3 任务需求分析 / 442

16.3.1 科学探测任务需求分析 / 442

16.3.2 工程测量任务需求分析 / 443

16.3.3 探测目标特性分析 / 445