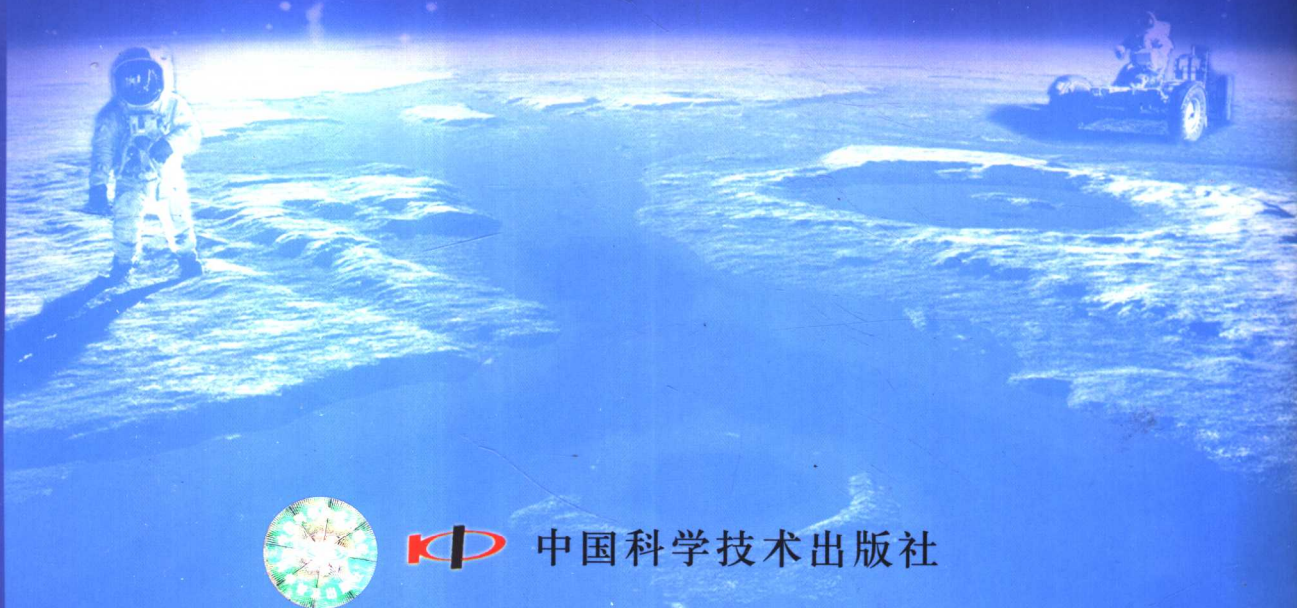


月球

探测器技术

褚桂柏 张 焯 主编



中国科学技术出版社

月球探测器技术

褚桂柏 张 熇 主编

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

月球探测器技术/褚桂柏,张熹主编. —北京:中国科学技术出版社,2007.7
ISBN 978-7-5046-4559-3

I. 月... II. ①褚...②张... III. 月球探测器 IV. V476.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 090274 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。

责任编辑 崔 玲
责任校对 林 华
责任印制 王 沛

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印刷

*

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16 印张:34.25 字数:1000 千字
2007 年 8 月第 1 版 2007 年 8 月第 1 次印刷
印数:1~1600 册 定价:106.00 元
ISBN 978-7-5046-4559-3/V·37

(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)

序

对未知世界的探索是人类发展的永恒动力,对茫茫宇宙的探测是人类拓展生存空间的必由之路。多少年来,人类企盼飞向太空探索宇宙奥妙,我国很早就流传着嫦娥奔月的美好传说。随着我国科技水平的不断发展以及综合国力的逐步提高,中国的航天事业已经在地球应用卫星、载人航天等领域取得了巨大的成就,为国民经济和国防建设发挥着重要作用。深空探测是继地球应用卫星、载人航天之后人类航天活动的第三大里程碑,月球一直是各航天大国开展深空探测的首选目标。我国空间飞行器研制单位从20世纪90年代就开始了月球探测的系统论证工作,提出了我国无人月球探测分三个阶段实施的总体思路。2004年1月国务院批准了月球探测一期(绕月探测)工程立项,标志着中国月球探测工程的正式启动。在国务院2006年2月颁布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020年)》中,又明确将“载人航天与探月工程”列入十六个重大专项之一。

月球探测工程是一项多学科、高技术集成的系统工程,月球探测器技术是现代科学技术的结晶,集中应用了当今众多工程技术的新成就,是对卫星技术的继承和发展。《月球探测器技术》从月球探测器基础技术出发,与工程实际紧密结合,较为详尽地阐述了月球探测器的轨道设计、测控通信、制导导航与控制、热控、推进、电源、软着陆与月表巡视等技术。

本书各章作者都是具有长期从事空间飞行器研制工作经验的工程技术人员,各章内容既是他们对基础理论的阐述,也是对多年工程实践的经验总结和技术提升。相信本书不但可以为从事月球探测的工程技术人员提供较为具体的设计技术指导,还可以作为航天院校的教材和参考书,为进一步深化月球探测技术研究,加速月球探测工程的实施提供有益的借鉴。

刘 强

2007年3月

前 言

遨游太空,探索浩瀚的宇宙,是人类千百年来的美好愿望。

人类为了扩大社会生产活动,必然要不断地开拓新的天地。人类活动的范围,经历了从陆地到海洋,从海洋到大气层,从大气层到宇宙空间的逐渐扩展过程。人类活动范围的每一次飞跃,都大大增强了认识和改造自然的能力,促进了生产力的发展和社会的进步。

空间探测是人类航天活动的三大领域之一。空间探测的主要目的是:了解太阳系的起源、演变和现状;通过对太阳系内的各主要行星及其卫星的比较研究进一步认识地球环境的形成和演变;探索生命的起源和演变;开发和利用空间资源。

月球是地球唯一的天然卫星,自然成为空间探测活动的第一个科学目标。直接考察月球有助于更好地了解地-月系统的起源。月球将是人类在地球外第一个建立的科学研究基地和开发利用月球资源的生产基地,月球还将是未来航天飞行理想的中间站和人类进入太阳系空间的第一个定居点。

月球探测器技术属航天技术范畴,是现代科学技术的结晶,它以基础科学和技术科学为基础,集中应用了20世纪许多工程技术的新成就,力学、热力学、材料学、医学、电子技术、光电技术、自动控制、喷气推进、计算机、半导体技术、真空技术、低温技术、新材料与制造工艺等对航天的科技进步发挥了重要作用。这些科学技术在航天应用中互相交叉和渗透,产生了一些新学科,使航天科学技术形成了完整的体系。航天技术的发展不断提出新的要求,又促进了这些科学技术的进步。

编著本书有两个目的:第一,本书是为刚参加航天事业的大学生们和研究生们撰写的教材,使他们基本了解月球探测器技术的基础知识;第二,本书可以作为航天科技工作者的参考书。

月球探测器技术是航天器技术的继承和发展。在本书中,著者们想要说明的是月球探测器技术比卫星技术更复杂,例如轨道设计、通信和测控技术、导航和控制技术、热控制技术、推进技术、电源技术、软着陆技术、返回技术等将在本书中阐述。

本书由褚桂柏、张熹主编,参加本书编著的有:第1章褚桂柏、张熹;第2章蔡震波;第3章邹永廖、欧阳自远、李春来、刘建忠、郑永春;第4章褚桂柏、张熹;第5章杨维廉、王鹏基、李颐黎;第6章柴洪友、杨建中;第7章左光;第8章王大珩、李铁寿;第9章魏延明、沈岩;第10章韩国经;第11章姜昌、范晓琳;第12章王九龙、赵蕾;第13章郭维长;第14章贾阳;第15章朱凤梧。本书作者都是我国从事航天科技活动的各学科科学家和技术专家。

参加审稿的专家有刘强、殷礼明、朱文明、褚桂柏、张熹、李颐黎、冯纪生、华诚生、李铁寿、张银玉、雪亚林、吴学英、王同桓、肖名鑫、陈建新、赵煜;刘强教授、殷礼明教授负责主审,褚桂柏教授负责策划、统稿和终审定稿。

感谢殷礼明教授始终支持和帮助本书的编著和出版。

申振荣、巫晓彤、潘艳华同志为本书初稿的完成做了许多工作,谨此表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

编著者

2007年1月

目 录

第1章 绪 论	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 我国开展月球探测的意义	(2)
1.3 国外月球探测发展历程	(4)
1.3.1 国外早期的月球探测活动	(4)
1.3.2 国外近期和未来的月球探测活动	(13)
1.4 太阳系	(17)
1.5 航天系统工程	(22)
1.6 月球探测器的分类和系统组成	(29)
1.6.1 月球探测器的分类	(29)
1.6.2 月球探测器的系统组成	(31)
1.7 月球探测器的研制阶段	(33)
1.7.1 概念性研究阶段	(33)
1.7.2 可行性论证阶段	(33)
1.7.3 方案确定阶段	(34)
1.7.4 工程研制阶段	(35)
1.7.5 发射前准备阶段	(36)
1.7.6 运营和管理阶段	(37)
参考文献	(37)
第2章 月球环境	(38)
2.1 概述	(38)
2.2 月球热环境	(38)
2.2.1 太阳直接辐射	(39)
2.2.2 月球反照	(40)
2.2.3 月面辐射	(40)
2.3 月球大气	(41)
2.4 带电粒子辐射	(42)
2.4.1 太阳宇宙线(SCR, Solar Cosmic Ray)	(42)
2.4.2 银河宇宙线(GCR, Galactic Cosmic Ray)	(43)
2.4.3 太阳风(Solar Wind)	(44)
2.4.4 太阳扰动对月球探测器的影响	(44)
2.5 微流星体	(51)
2.5.1 NASA TN D-2747 模型	(51)

2.5.2	NASA - CR - 68189 模型	(51)
2.5.3	NASA SP - 8013 模型	(51)
2.5.4	微流星体质量—密度分布	(52)
2.6	引力场	(52)
2.7	月球地形	(53)
2.7.1	月面地貌分布图	(53)
2.7.2	月球地形特点	(53)
2.7.3	月面撞击坑统计模型	(56)
2.7.4	月面石块统计模型	(57)
2.8	月尘环境	(59)
2.8.1	粒度分布	(59)
2.8.2	颗粒形态	(59)
2.8.3	月壤密度	(59)
2.8.4	相对密度	(60)
2.8.5	孔隙度	(60)
2.8.6	压缩性	(60)
2.8.7	抗剪性和承载力	(61)
	参考文献	(62)
第3章	月球基本概况和月球探测的科学目标	(63)
3.1	月球基本概况	(63)
3.1.1	月球的运动	(63)
3.1.2	月球的地形地貌	(65)
3.1.3	月球上的水	(66)
3.1.4	月壤	(68)
3.1.5	月球的物质成分	(72)
3.1.6	月球内部结构	(79)
3.1.7	月球的起源与演化	(80)
3.2	中国月球探测科学目标	(83)
3.2.1	月球探测与研究的关键科学问题	(83)
3.2.2	我国月球探测的总体规划	(84)
3.2.3	我国绕月探测工程科学目标	(84)
	参考文献	(88)
第4章	月球探测器总体设计	(89)
4.1	概述	(89)
4.2	月球探测器总体设计的一般原则	(90)
4.3	月球探测工程的顶层设计	(91)
4.3.1	月球探测工程的任务目标确定	(92)
4.3.2	任务需求分析	(93)
4.3.3	工程的具体实施步骤规划	(94)

4.3.4	工程各大系统总体初步可行性方案研究	(95)
4.3.5	工程的技术继承性与衔接性分析	(96)
4.4	月球探测器总体性能指标的确定和分配	(96)
4.5	月球探测器构形设计	(101)
4.5.1	月球探测器构形设计的一般原则	(102)
4.5.2	月球探测器构形设计过程	(103)
4.5.3	月球探测器外形选择	(105)
4.5.4	月球探测器总体布局	(106)
4.5.5	月球探测器的质量分配	(118)
4.5.6	质量特性分析	(120)
4.6	月球探测的飞行过程	(123)
4.6.1	绕月探测的飞行过程	(123)
4.6.2	着陆探测的飞程序	(127)
4.6.3	返回探测的飞程序	(130)
	参考文献	(131)
第5章	月球探测器轨道设计	(133)
5.1	概述	(133)
5.1.1	月球的基本物理参数	(133)
5.1.2	月球的轨道	(134)
5.2	月球探测器地月转移轨道设计	(135)
5.2.1	二体问题近似	(135)
5.2.2	圆锥截线拼接法	(138)
5.2.3	地月转移轨道的精确求解	(142)
5.2.4	如何将探测器送入地月转移轨道	(145)
5.2.5	地月转移轨道的测量与中途修正	(146)
5.2.6	发射机会和发射窗口	(147)
5.3	月球卫星的轨道设计	(150)
5.4	月球探测器软着陆轨道设计	(152)
5.4.1	月球软着陆方式	(152)
5.4.2	月球软着陆过程	(153)
5.4.3	制动段轨道设计	(154)
5.4.4	接近段轨道设计	(158)
5.4.5	着陆段轨道设计	(159)
5.4.6	软着陆下降轨道的技术要求	(160)
5.5	月球探测器返回轨道设计	(161)
5.5.1	月球探测器返回轨道设计方法	(161)
5.5.2	月球探测器返回轨道设计理论	(165)
	参考文献	(174)

第 6 章 月球探测器结构与机构系统	(177)
6.1 概述	(177)
6.1.1 着陆器结构	(177)
6.1.2 软着陆机构	(179)
6.2 月球着陆器结构设计	(181)
6.2.1 结构方案设计	(181)
6.2.2 结构详细设计	(186)
6.2.3 桁架式结构设计	(189)
6.3 月球着陆器结构分析与验证	(192)
6.3.1 月球着陆器结构分析	(192)
6.3.2 结构设计的验证方法	(197)
6.3.3 结构静强度的验证	(199)
6.3.4 结构动力特性的验证	(200)
6.4 软着陆机构设计	(201)
6.4.1 着陆腿的数量、构型与几何参数设计	(201)
6.4.2 缓冲方法的确定	(203)
6.4.3 缓冲器设计	(209)
6.4.4 其他组件方案确定	(211)
6.5 软着陆机构试验	(211)
6.5.1 静力试验	(211)
6.5.2 冲击试验	(212)
6.5.3 缓冲器性能试验	(213)
6.5.4 展开试验	(213)
6.5.5 单个着陆腿的缓冲试验	(213)
6.5.6 着陆腿组合缓冲性能试验	(214)
参考文献	(214)
第 7 章 月球探测器热控系统	(216)
7.1 概述	(216)
7.2 航天器热控系统设计基础	(216)
7.2.1 环境条件的影响	(216)
7.2.2 航天器在宇宙空间的热平衡分析	(218)
7.2.3 热控设计的基本依据和主要原则	(220)
7.2.4 热控措施的选择	(221)
7.3 常用的热控材料和装置	(221)
7.3.1 热控涂层	(222)
7.3.2 多层隔热材料	(223)
7.3.3 热管	(224)
7.3.4 电加热器	(225)
7.3.5 无源主动式热控装置	(226)

7.3.6	流体循环换热装置	(228)
7.3.7	热辐射器	(229)
7.3.8	同位素温差热源在热控设计方案中的应用	(229)
7.4	热分析计算	(231)
7.4.1	外热流计算	(232)
7.4.2	航天器温度计算	(233)
7.5	热平衡试验	(234)
7.5.1	空间热环境的模拟	(234)
7.5.2	热控试验星	(237)
7.5.3	试验工况	(237)
7.6	月球探测卫星热控措施简介	(237)
7.6.1	散热面设计和星表面多层设计	(237)
7.6.2	卫星内部热控设计	(238)
7.6.3	热管设计	(238)
7.6.4	温度传感器设计	(238)
7.6.5	电加热器	(238)
7.6.6	加热控制器	(238)
7.7	月球着陆探测器热控措施简介	(239)
	参考文献	(241)
第8章	月球探测器制导、导航和控制(GNC)系统	(243)
8.1	概述	(243)
8.1.1	月球探测器的飞行方式	(243)
8.1.2	月球探测器 GNC 系统任务	(244)
8.1.3	月球探测器 GNC 系统的特点	(247)
8.1.4	月球探测器 GNC 系统的设计内容	(247)
8.1.5	GNC 系统部件	(252)
8.2	月球探测器的轨道控制技术	(253)
8.2.1	轨道控制概述	(253)
8.2.2	导航	(255)
8.2.3	轨道预报误差分析	(255)
8.2.4	逃逸轨道控制	(256)
8.2.5	转移轨道控制	(258)
8.2.6	进入段轨道控制	(262)
8.3	月球卫星的制导、导航和控制系统	(268)
8.3.1	工作轨道和入轨过程	(268)
8.3.2	GNC 系统功能	(269)
8.3.3	GNC 系统组成	(269)
8.3.4	GNC 系统工作模式	(271)
8.4	月球软着陆探测器的制导、导航和控制系统	(272)

8.4.1	任务概貌	(272)
8.4.2	功能要求	(273)
8.4.3	GNC 系统组成	(274)
8.4.4	系统工作模式和方案设计	(275)
参考文献		(282)
第 9 章	月球探测器推进系统	(283)
9.1	概述	(283)
9.1.1	航天器推进系统简介	(283)
9.1.2	着陆器对推进系统的需求	(284)
9.2	推进系统基本原理	(285)
9.2.1	概述	(285)
9.2.2	火箭的结构	(286)
9.2.3	推进系统的分类	(287)
9.2.4	固体火箭发动机	(288)
9.2.5	液体推进系统	(289)
9.2.6	电推进系统	(290)
9.2.7	空间帆推进技术	(295)
9.2.8	磁层推进技术	(297)
9.3	国外典型着陆器推进系统	(299)
9.3.1	美国月球勘测者探测器 (Surveyor)	(299)
9.3.2	Apollo 着陆器	(300)
9.3.3	前苏联 Luna 系列月球探测器	(301)
9.3.4	通用月球着陆者 CLL (Common Lunar Lander)	(303)
9.3.5	美国月球前哨站 FLO (First Lunar Outpost)	(304)
9.3.6	乘员探索飞行器 CEV (Crew Exploration Vehicle) 计划	(305)
参考文献		(308)
第 10 章	月球探测器电源系统	(310)
10.1	概述	(310)
10.2	电源系统设计的要求	(310)
10.2.1	电源系统设计的基本要求	(310)
10.2.2	月球探测器的特殊要求	(311)
10.3	太阳能电池阵/蓄电池组联合电源	(314)
10.3.1	太阳阵	(314)
10.3.2	贮能装置	(320)
10.3.3	电源控制设备	(330)
10.3.4	几种典型的电源系统拓扑结构	(336)
10.4	放射性同位素温差发电机	(342)
10.4.1	概述	(342)
10.4.2	放射性同位素热源	(342)

10.4.3	热源盒	(344)
10.4.4	温差电换能器	(345)
10.4.5	热辐射器	(347)
10.4.6	放射性同位素温差发电器的进展	(348)
10.4.7	空间核电源的安全	(351)
参考文献		(351)
第 11 章	月球探测器跟踪通信系统	(353)
11.1	概述	(353)
11.2	测控(TT&C)技术	(354)
11.2.1	角跟踪和测角技术	(354)
11.2.2	测速技术	(357)
11.2.3	测距技术	(360)
11.2.4	遥测	(362)
11.2.5	遥控	(367)
11.3	通信技术	(371)
11.3.1	光机扫描成像遥感器	(372)
11.3.2	推扫式扫描成像遥感器	(372)
11.3.3	画幅式成像遥感器	(373)
11.4	调制和解调体制	(374)
11.4.1	残余载波调制体制(TT&C)	(374)
11.4.2	抑制载波调制体制(高速数据率通信/数传)	(376)
11.4.3	调制体制和误码率(BER)、信噪比(SNR)和占用带宽(B_c) 之间的关系	(376)
11.5	月球探测 C&T 的空间段	(380)
11.5.1	阿波罗(Apollo)计划的跟踪、遥测、遥控和通信系统	(381)
11.5.2	美国克莱门汀(Clementine)月球探测器所采用的 通信测控技术	(384)
11.5.3	美国月球勘探者号(Lunar Prospector, LP)采用的 C&T 技术 ...	(385)
11.5.4	前苏联/俄罗斯月球探测所用的 TT&C 技术空间段	(388)
11.5.5	日本探月计划极月轨道器(LPO)采用的 C&T 技术	(391)
11.5.6	日本 Selene(月神号)的 C&T 技术	(392)
11.5.7	欧空局月球探测拟采用的 C&T 技术	(393)
11.6	月球探测 C&T 的地面段	(393)
11.6.1	美国 NASA 的深空网(DSN)	(394)
11.6.2	俄罗斯的深空网	(397)
11.6.3	日本的深空站	(398)
11.6.4	德国的深空站	(400)
11.7	月球探测 C&T 运行模式特点	(400)
11.7.1	主动段	(400)

11.7.2	停泊轨道段	(400)
11.7.3	地月转移轨道段	(400)
11.7.4	环月轨道段	(401)
11.7.5	制动月面着陆段	(402)
11.7.6	着陆固定勘测或移动勘测段——建立月球站	(402)
参考文献		(402)
第 12 章	月球探测器综合电子系统	(404)
12.1	概述	(404)
12.2	深空探测器综合电子系统的主要功能和设计特点	(405)
12.2.1	主要功能	(406)
12.2.2	设计特点	(407)
12.3	深空探测器综合电子系统体系结构和分层模型	(407)
12.3.1	集中式体系结构	(408)
12.3.2	分布式体系结构	(409)
12.3.3	分层模型	(411)
12.4	深空探测器综合电子系统计算机技术应用	(418)
12.4.1	嵌入式系统	(418)
12.4.2	总线技术	(421)
12.4.3	大容量存储技术	(425)
12.4.4	COTS 器件应用	(426)
12.5	深空探测器综合电子系统功能设计	(427)
12.5.1	遥控遥测功能设计	(427)
12.5.2	时钟管理设计	(427)
12.5.3	深空探测器程序控制功能设计	(428)
12.5.4	数据处理功能设计	(429)
12.5.5	自主控制功能设计	(429)
12.5.6	综合电子系统内务管理设计	(430)
12.5.7	其他功能	(431)
12.6	深空探测器综合电子系统软件	(432)
12.6.1	概述	(432)
12.6.2	软件设计特点	(432)
12.6.3	软件在轨维护	(433)
12.7	综合电子系统集成设计和测试	(435)
12.7.1	航天器系统功能和信息流分析	(435)
12.7.2	电子系统硬件综合设计平台	(435)
12.7.3	星载软件开发、测试、评测、配置项管理和软硬件协同 仿真平台的建设	(436)
12.7.4	航天器电子系统信息数据库建设	(436)
12.7.5	航天器电子系统故障检测验证	(437)

参考文献	(437)
第 13 章 月球探测器可靠性设计	(438)
13.1 概述	(438)
13.2 航天器可靠性的指标确定、分配和可靠性预计	(440)
13.2.1 航天器的可靠性指标	(440)
13.2.2 可靠性指标分配	(441)
13.2.3 可靠性预计	(441)
13.3 航天器故障预想	(442)
13.3.1 故障模式及其影响分析	(442)
13.3.2 故障树分析(FTA)	(444)
13.4 航天器可靠性评估(Bayes 方法)	(451)
13.4.1 指数寿命型系统可靠度	(451)
13.4.2 成败型系统可靠度	(454)
13.4.3 正态分布下的性能可靠度	(456)
13.4.4 威布尔分布的性能可靠度近似解	(457)
13.4.5 系统可靠性评估示例	(461)
13.5 软件可靠性简述	(462)
13.5.1 软件的特点	(463)
13.5.2 软件的可靠性验证试验	(463)
13.5.3 软件的无失效考核交付试验	(463)
13.5.4 软件可靠性评价	(464)
13.6 可靠性管理简述	(464)
13.7 航天器可靠性发展趋势	(465)
参考文献	(466)
第 14 章 月球车	(468)
14.1 概述	(468)
14.2 国外相关情况	(469)
14.2.1 国外成功的不载人月球车、行星车	(469)
14.2.2 国外月球探测计划中的月球车	(471)
14.2.3 国外典型的地面试验车	(472)
14.2.4 国外探测车的启示	(473)
14.3 系统组成及功能	(474)
14.3.1 系统组成	(474)
14.3.2 工作程序	(475)
14.3.3 主要工作模式	(475)
14.4 月球环境的影响分析	(476)
14.4.1 地月几何特征分析	(476)
14.4.2 辐射环境效应分析	(476)
14.4.3 真空环境效应分析	(477)

14.4.4	低重力影响分析	(477)
14.4.5	地形地貌影响分析	(477)
14.4.6	月壤以及月尘的影响分析	(477)
14.4.7	月表温度影响分析	(478)
14.4.8	月面光照条件分析	(478)
14.5	月球车任务分析	(479)
14.5.1	移动类型	(479)
14.5.2	轮子数量	(479)
14.5.3	运动速度和路程确定	(480)
14.5.4	爬坡和越障分析	(480)
14.5.5	安全防护和自主导航控制能力分析	(480)
14.5.6	工作寿命与过夜分析	(481)
14.6	移动技术	(481)
14.6.1	移动子系统	(481)
14.6.2	六轮运动学分析	(483)
14.6.3	正反四边形悬架	(488)
14.6.4	月球车移动机构性能及其评价体系	(492)
14.7	制导、导航与控制技术	(494)
14.7.1	GNC 系统结构	(494)
14.7.2	GNC 硬件系统	(496)
14.7.3	导航与控制技术	(496)
14.8	月球车试验场	(499)
14.8.1	国外试验场情况	(499)
14.8.2	重力模拟	(502)
14.8.3	内场与外场试验	(504)
	参考文献	(504)
第 15 章	月球探测器环境与环境试验	(506)
15.1	概述	(506)
15.2	月球探测器环境	(506)
15.2.1	地面环境	(507)
15.2.2	主动段环境	(507)
15.2.3	空间飞行环境	(509)
15.2.4	月面环境	(510)
15.2.5	返回环境	(510)
15.3	环境对月球探测器的影响	(510)
15.3.1	月球探测器对力学环境的结构响应	(510)
15.3.2	月球探测器的空间环境效应	(512)
15.4	月球探测器环境试验	(513)
15.4.1	环境试验目的	(514)

15.4.2	环境试验分类	(514)
15.4.3	环境试验的剪裁	(516)
15.4.4	再试验	(517)
15.5	力学环境试验	(518)
15.5.1	结构静载荷试验	(518)
15.5.2	正弦振动试验	(519)
15.5.3	随机振动试验	(519)
15.5.4	噪声试验	(520)
15.5.5	冲击试验	(521)
15.5.6	加速度试验	(523)
15.6	热环境试验	(523)
15.6.1	真空热平衡试验	(523)
15.6.2	热真空试验	(524)
15.6.3	常压热循环试验	(525)
15.7	空间环境试验	(526)
15.7.1	真空放电试验	(526)
15.7.2	真空冷焊试验	(526)
15.7.3	辐照试验	(527)
15.8	电磁兼容性试验	(527)
	参考文献	(528)