



上海市空间智能控制技术重点实验室
Shanghai Key Laboratory of Aerospace Intelligent Control Technology

●侯建文 阳光满 超 贺亮 等编著
刘付成 主审

深空探测

— 月球探测

Deepspace Exploration
— Lunar Exploration



国防工业出版社
National Defense Industry Press

本书获得国家国际科技合作专项(2012DFR80540)资助

• 侯建文 阳光 满超 贺亮 等编著
刘付成 主审

深空探测

— 月球探测

Deepspace Exploration

— Luna

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书首先对月球进行了介绍,包括月球的地形地貌、成分资源以及与月球相关的天文现象,阐述了月球探测的科学以及工程目标;然后对各国进行的月球探测活动进行了详细地介绍,主要包括探测器概述、科学目的、飞行器设计、总体方案设计;最后根据未来月球探测“三步走计划”介绍了未来月球探测规划以及相关关键技术,主要包括载人登月的关键技术、月球前哨站的建立、月面探测机器人以及月球基地的建立。

本书可以作为航天爱好者的参考用书,也可以作为航天器总体及有关专业的科技人员和高校师生进行航天任务分析时的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

深空探测:月球探测/侯建文等编著. —北京:
国防工业出版社, 2016. 8
ISBN 978-7-118-10069-3

I. ①深… II. ①侯… III. ①月球探索-普及读物
IV. ①V1-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 152462 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 710×1000 1/16 印张 26 $\frac{3}{4}$ 字数 530 千字
2016 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 108.00 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

前言

PREFACE



月球探测经历了天文观测和空间探测两个阶段。1959年以前为天文观测阶段,那时人类只能用望远镜和肉眼观察月球。在那个阶段,观测的空间分辨率大于10km。1959年以后为空间探测阶段,其进展可划分为以下三个时期。

第一时期:第1次探月高峰自1959—1976年,冷战时期,美国和苏联展开了以月球探测为中心的空间竞赛,掀起了第1次月球探测高峰。自1958—1976年,进行了与月球探测相关的发射探测活动121次,其中成功45次。1969年7月,美国“阿波罗”11号飞船实现了人类首次登月,此后“阿波罗”12、14、15、16、17和苏联的“月球”16、20和24相继进行了载人和不载人登月取样,共获得了382kg的月球样品和难以计数的科学数据,促进了一系列航天科学技术的新发展,带动了一系列新技术的创新与推广应用,大大提高了人类对月球、地球和太阳系的认识,月球探测取得了划时代的成就。

第二阶段自1976—1994年,是月球探测的宁静期,此阶段未进行过任何成功的月球探测活动。其原因是:随着冷战形势的缓和,空间霸权的争夺有所缓解;需要总结探测活动耗资大、效率低、探测水平不高的经验与教训,提出新的探测思路 and 战略;需要将月球探测技术向各领域转化、推广和应用;需要加速研制新的空间往返运输系统和高效探测的装备;需要较长时间进行探测资料的消化、分析与综合,将月球科学研究提高到更高理性认识的阶段。

第三阶段,自1994年开始,月球探测重新成为空间探测的热点。“克莱门汀”和“月球勘探者”探测器的成功发射,拉开了重返月球的序幕。其目的是:
①空间应用与空间科学发展需求不断加大;②载人航天和空间往返运输系统

等主要空间技术日益成熟,建立月球基地等工程已成为可能;③满足空间军事活动发展的需要;④月球将能作为人类进行深空探测的前哨站和转运站;⑤月球潜在的矿产资源和能源的开发利用前景,可为人类社会可持续发展提供资源储备,这一因素是重返月球最主要的源动力。

本书共分12章,由侯建文统稿。第1章由侯建文、阳光、满超编写,介绍了月球的地形、地貌和成分资源以及起源等,月球探测的科学目标和工程目标以及对月球探测过去的概述和未来的构想。第2~7章由满超、贺亮、曹涛、冯建军、周杰编写,详细介绍了各国的月球探测器。其中,第2章介绍了美国月球探测器,第3章介绍了苏联月球探测器,第4章介绍了欧洲月球探测器,第5章介绍了日本月球探测器,第6章介绍了印度月球探测器,第7章介绍了中国月球探测器。第8~12章由满超、阳光、王卫华、朱东方、郭彦余编写,介绍了月球探测的规划。其中,第8章介绍了月球探测未来路线图,第9章介绍了月球前哨站,第10章介绍了机器人探月,第11章介绍了未来载人登月的关键技术,第12章介绍了月球基地。结束语由侯建文编写。最后还列有各国月球探测器发射情况附表。

希望本书能够为我国月球探测任务提供有力的借鉴和佐证,促进探测任务的圆满完成;并且能够对中国未来的深空探测发展战略的制定、月球探测技术的发展发挥有力的支撑作用。

限于编者的水平,书中难免有不妥之处,恳请专家和读者批评指正。

编著者

2016年2月

目录

Contents

第1章	概述	1
1.1	月球探测的入门	1
1.1.1	月球概况	2
1.1.2	月球的地形	3
1.1.3	月球成分及资源	8
1.1.4	月球运动	9
1.1.5	月球的起源	12
1.1.6	月食	15
1.1.7	月球磁场	17
1.1.8	月球的神话传说	18
1.2	月球探测的科学目标	22
1.3	月球探测的工程目标	23
1.4	月球探测的过去概述	25
1.4.1	第一轮探月热潮	25
1.4.2	第二轮探月热潮	26
1.4.3	苏联探月历史及重大成就	27
1.4.4	美国探月历史及重大成就	27
1.5	月球探测的未来构想	28
1.5.1	月球探测工程概念	28
1.5.2	实施月球探测工程初期的基础任务构想	28

1.5.3	实施月球探测工程的第一阶段任务构想	30
1.5.4	实施月球探测工程的第二阶段任务构想	32
1.5.5	实施月球探测工程的第三阶段任务构想	38
1.5.6	月球大开发阶段构想	39
第2章 美国的月球探测器		40
2.1	“先驱者”系列	40
2.2	“徘徊者”系列	41
2.3	“月球轨道器”系列	46
2.4	“探索者”系列	48
2.5	美国“阿波罗”计划	59
2.5.1	概述	64
2.5.2	辅助计划	65
2.5.3	“阿波罗”计划飞行流程	65
2.5.4	月球轨道飞行方案	68
2.5.5	“阿波罗”登月飞行器系统组成	70
2.5.6	GNC 系统	74
2.5.7	“阿波罗”自主导航方法	79
2.5.8	“阿波罗”交会对接	85
2.5.9	着陆选址与避障控制技术	86
2.5.10	稳定着陆控制技术	89
2.5.11	月球表面起飞定位与对准技术	90
2.5.12	羽流导流与防护技术	93
2.5.13	仿真实验系统	94
2.6	克莱门汀	95
2.6.1	概述	95
2.6.2	任务需求	95
2.6.3	飞行器设计	96
2.6.4	任务设计	97
2.7	月球勘探者	101
2.7.1	概述	101
2.7.2	任务需求	102

2.7.3	飞行器设计	102
2.7.4	任务设计	102
2.8	星座计划	110
2.8.1	概述	110
2.8.2	任务设计	111
2.8.3	“猎户座”(Orion)飞船	124
2.8.4	“牵牛星”(Altair)登月飞行器	128
2.9	月球坑观测和遥感卫星	132
2.9.1	概述	132
2.9.2	任务需求	132
2.9.3	飞行器设计	132
2.9.4	任务设计	134
2.10	月球勘探轨道飞行器	137
2.10.1	概述	137
2.10.2	任务需求	137
2.10.3	飞行器设计	138
2.10.4	任务设计	141
2.11	重力回溯和内部构造实验室	147
2.11.1	概述	147
2.11.2	任务需求	148
2.11.3	飞行器设计	151
2.11.4	任务设计	152
2.12	月球大气和粉尘环境探测任务(LADEE, 2013)	159
2.12.1	概述	159
2.12.2	任务需求	160
2.12.3	任务设计	160
2.12.4	飞行器设计	165
2.12.5	任务系统结构	167
2.12.6	运载火箭	168

第3章 苏联的月球探测器 170

3.1	Luna 系列	170
-----	---------	-----

3.1.1	成员概述	170
3.1.2	着陆器(Luna 9、Luna 13)	176
3.1.3	软着陆平台(Luna 16、Luna 17、Luna 20、Luna 21、 Luna 24)	177
3.2	Zond 系列	179
3.2.1	成员概述	179
3.3	苏联 N1 - L3 计划(1964—1972)	181
3.3.1	概述	181
3.3.2	飞行器设计	181
3.3.3	任务设计	182
3.3.4	LK 和 LOK	184
第 4 章 欧洲的月球探测器		189
4.1	曙光女神计划(Aurora Programme)	190
4.2	智能 1 号(SMART - 1, 2003)	191
4.2.1	概述	191
4.2.2	任务需求	192
4.2.3	飞行器设计	193
4.2.4	任务设计	194
第 5 章 日本的月球探测器		197
5.1	飞天	197
5.1.1	概述	197
5.1.2	任务需求	198
5.1.3	任务设计	198
5.2	“月球” - A	198
5.3	月女神	199
5.3.1	概述	199
5.3.2	飞行器设计	199
5.3.3	任务设计	201

第 6 章 印度的月球探测器 221

6.1 “月船”1号(Chandrayaan - 1, 2008)	221
6.1.1 概述	221
6.1.2 任务需求	221
6.1.3 飞行器设计	222
6.1.4 任务设计	223

第 7 章 中国的月球探测器 225

7.1 “嫦娥”一号卫星(Change, 2007)	225
7.1.1 概述	225
7.1.2 飞行器设计	226
7.1.3 任务设计	229
7.2 “嫦娥”二号卫星	238
7.2.1 概述	238
7.2.2 任务需求	239
7.2.3 飞行器设计	239
7.2.4 任务设计	241
7.3 “嫦娥”三号卫星(Change - 3, 2014)	243
7.3.1 概述	243
7.3.2 任务需求	243
7.3.3 飞行器设计	244
7.3.4 任务设计	245

第 8 章 月球探测未来的路线图 249

8.1 月球探测的发展趋势	250
8.1.1 月球探测方式演变	250
8.1.2 各国载人登月态势	252
8.1.3 载人登月是下一阶段月球探测必然趋势	252
8.1.4 月球基地是未来月球探测的终极目的	253
8.1.5 月球探测需强调国际合作	254
8.2 美国	255

8.2.1	月球通信卫星方案	255
8.3	欧洲	258
8.3.1	德国月球轨道探测器	259
8.3.2	Moon LITE	259
8.4	日本	263
8.4.1	月女神-2	263
8.5	俄罗斯	267
8.6	印度	268
8.7	中国	270

第9章 月球前哨站 272

9.1	月球探测前哨站概述	272
9.1.1	建设必要性	272
9.1.2	建设目标	274
9.2	月球探测前哨站关键技术	276
9.2.1	月球探测前哨站工程总体设计技术	277
9.2.2	月球表面能源技术	278
9.2.3	推进技术的发展及其在月球探测的应用	314
9.2.4	通信技术	331
9.2.5	远程月球表面工作机器人技术	332
9.2.6	月球表面工作设备维护技术	333
9.2.7	硬着陆技术	334

第10章 机器人探月 335

10.1	概述	335
10.1.1	科学目标需求	335
10.1.2	工程目标需求	335
10.2	各国登月机器人	337
10.2.1	卡耐基-梅隆大学全天候月球表面机器人	338
10.2.2	NASA 的 Robonaut 机器人	338
10.2.3	卡耐基-梅隆大学可重构行星探测机器人	340
10.2.4	卡耐基-梅隆大学模块化腿式移动机器人	342

10.2.5	加拿大 CSA 的 Artemis Junior 机器人	342
10.2.6	德国探月机器人	343
10.2.7	美国变形-滚动探测机器人	343
10.2.8	日本蠕动爬行机器人	346
10.2.9	日本月球机器人基地概念	347
10.3	月球表面机器人关键技术	348
10.3.1	机器人探测总体方案设计	348
10.3.2	人机交互技术	349
10.3.3	月球表面多终端协同控制技术	350
10.3.4	月球表面视觉导航技术	350
10.3.5	月球表面精确定位技术	350
10.3.6	多臂协调操作的规划与控制技术	350
10.3.7	多元多维传感器信息融合及处理技术	351

第 11 章 未来载人登月 352

11.1	载人登月人数分析	352
11.2	载人登月方案分析	352
11.2.1	载人登月飞行过程	352
11.2.2	载人登月模式	352
11.2.3	载人登月飞行模式	353
11.3	载人登月工程系统组成	355
11.3.1	载人登月飞行器系统	355
11.3.2	登月飞行器最小不可分割模块	356
11.4	载人登月系统仿真技术	356
11.5	载人登月飞行器设计技术	356
11.5.1	绕月飞船设计技术	357
11.5.2	登月舱设计技术	357
11.5.3	推进飞行器设计技术	358
11.6	月球轨道交会对接技术	358
11.7	接近第二宇宙速度的高速再入与热防护技术	359
11.7.1	返回舱气动布局设计	359
11.7.2	返回舱防热技术	360

11.7.3	月地转移和高速再入控制技术	360
11.8	登月飞行器组合体关键技术	360
11.8.1	多重变拓扑结构的复杂动力学技术	360
11.8.2	多重变拓扑结构变参数系统的轨控与姿控技术	361
11.8.3	高刚度锁紧和高可靠分离技术	361
11.8.4	复杂动力学与控制一体化仿真、优化设计与验证技术	361
11.9	月球表面活动技术	361
11.10	载人航天器轻小型化设计技术	362
11.11	高集成度综合电子一体化设计技术	362
第 12 章 月球基地		363
12.1	概述	363
12.1.1	月球基地任务目标	363
12.1.2	月球基地核心功能和组成	364
12.1.3	月球基地建设的外部环境	365
12.1.4	月球基地建筑体系结构	366
12.2	各国月球基地构想	368
12.2.1	日本月球基地计划	368
12.2.2	美国月球基地计划	369
12.2.3	中国开发月球基地的战略思想	371
12.3	月球基地关键技术	374
12.3.1	月球基地概念方案	374
12.3.2	月球基地实施步骤规划	376
结束语		377
附录		379
参考文献		412

10.2.5	加拿大 CSA 的 Artemis Junior 机器人	342
10.2.6	德国探月机器人	343
10.2.7	美国变形-滚动探测机器人	343
10.2.8	日本蠕动爬行机器人	346
10.2.9	日本月球机器人基地概念	347
10.3	月球表面机器人关键技术	348
10.3.1	机器人探测总体方案设计	348
10.3.2	人机交互技术	349
10.3.3	月球表面多终端协同控制技术	350
10.3.4	月球表面视觉导航技术	350
10.3.5	月球表面精确定位技术	350
10.3.6	多臂协调操作的规划与控制技术	350
10.3.7	多元多维传感器信息融合及处理技术	351
第 11 章 未来载人登月		352
11.1	载人登月人数分析	352
11.2	载人登月方案分析	352
11.2.1	载人登月飞行过程	352
11.2.2	载人登月模式	352
11.2.3	载人登月飞行模式	353
11.3	载人登月工程系统组成	355
11.3.1	载人登月飞行器系统	355
11.3.2	登月飞行器最小不可分割模块	356
11.4	载人登月系统仿真技术	356
11.5	载人登月飞行器设计技术	356
11.5.1	绕月飞船设计技术	357
11.5.2	登月舱设计技术	357
11.5.3	推进飞行器设计技术	358
11.6	月球轨道交会对接技术	358
11.7	接近第二宇宙速度的高速再入与热防护技术	359
11.7.1	返回舱气动布局设计	359
11.7.2	返回舱防热技术	360

1

概述

1.1 月球探测的入门

月球(图 1-1), 俗称月亮, 古称太阴, 是环绕地球运行的一颗卫星。它是地球唯一的一颗天然卫星, 也是离地球最近的天体(与地球之间的平均距离是 38.4 万 km)。1969 年尼尔·阿姆斯特朗和巴兹·奥尔德林成为人类最先登陆月球的先

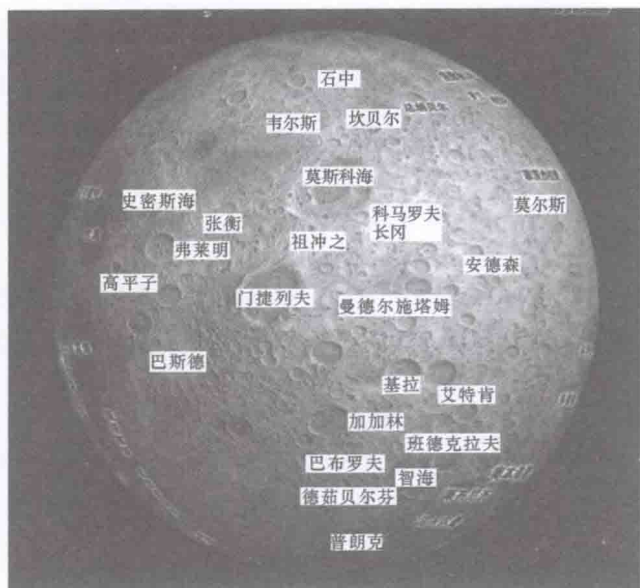


图 1-1 月球

驱者。1969年9月,美国“阿波罗”11号宇宙飞船返回地球,美国“阿波罗”登月计划至“阿波罗”17号结束。另有2009年发行的美国同名电影《月球》。

1.1.1 月球概况

月球是被人们研究得最彻底的天体。人类至今第二个亲身到过的天体就是月球。月球的年龄大约有46亿年。月球与地球一样有壳、幔、核等分层结构。最外层的月壳平均厚度约为60~65km。月亮下面到1000km深度是月幔,它占了月球的大部分体积。月幔下面是月核,月核的温度约为1000℃,很可能是熔融状态的。月球直径约3474.8km,大约是地球的3/11、太阳的1/400,月球到地球的距离相当于地球到太阳的距离的1/400,所以从地球上看去月亮和太阳一样大。月球的体积大概有地球的1/49,质量约 7.35×10^{22} kg,差不多相当于地球质量的1/81左右,月球表面的重力约是地球重力的1/6。月球的结构示意图如图1-2所示。

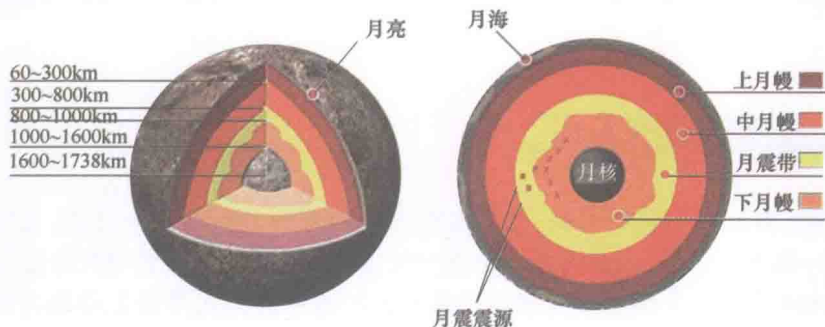


图1-2 月球结构示意图

月球永远都是一面朝向我们,这一面习惯上被我们称为“月球的正面”。另外一面,除了在月球表面边沿附近的区域因天秤动而中间可见以外,月球的背面绝大部分不能从地球看见。在没有探测器的年代,月球的背面一直是个未知的世界。月球背面的一大特色是几乎没有月海这种较暗的月球表面特征。而当人造探测器运行至月球背面时,它将无法与地球直接通信。

月球27.321666天绕地球运行一周,而每小时相对背景星空移动 0.5° ,即与月球表面的视直径相若。与其他卫星不同,月球的轨道平面较接近黄道面,而不是在地球的赤道面附近。

相对于背景星空,月球围绕地球运行(月球公转)一周所需时间称为一个恒星月;而新月与下一个新月(或两个相同月相之间)所需的时间称为一个朔望月。朔望月较恒星月长是因为在月球运行期间,地球本身也在绕日的轨道上前进了一段距离。

严格来说,地球与月球围绕共同质心运转,共同质心距地心4700km(即地球半径的3/4处)。由于共同质心在地球表面以下,地球围绕共同质心的运动好像是

在“晃动”一般。从地球南极上空观看,地球和月球均以顺时针方向自转;而且月球也是以顺时针绕地运行;甚至地球也是以顺时针绕日公转的,形成这种现象的原因是地球、月球相对于太阳来说拥有相同的角动量,即“从一开始就是以这个方向转动”。

月球本身并不发光,只反射太阳光。月球亮度随日、月间角距离和地、月间距离的改变而变化。平均亮度为太阳亮度的 $1/465000$,亮度变化幅度从 $1/630000$ 至 $1/375000$ 。满月时亮度平均为 -12.7 等。它给大地的照度平均为 0.22lx ,相当于 100W 电灯在距离 21m 处的照度。月球表面不是一个良好的反光体,它的平均反照率只有 7% ,其余 93% 均被月球吸收。月海的反照率更低,约为 6% 。月球表面高地和环形山的反照率为 17% ,看上去山地比月海明亮。月球的亮度随月球的背面地图变化,满月时的亮度比上下弦要大十多倍。

由于月球上没有大气,再加上月球表面物质的热容量和热导率又很低,因而月球表面昼夜的温差很大。白天,在阳光垂直照射的地方温度高达 $+127^{\circ}\text{C}$;夜晚,温度可降低到 -183°C 。这些数值,只表示月球表面的温度。用射电观测可以测定月球表面土壤中的温度,这种测量表明,月球表面土壤中较深处的温度很少变化,这正是由于月球表面物质热导率低造成的。

从月震波的传播了解到月球也有壳、幔、核等分层结构。最外层的月壳厚 $60\sim 65\text{km}$ 。月壳下面到 1000km 深度是月幔,占了月球大部分体积。月幔下面是月核。月核的温度约 1000°C ,很可能是熔融的,据推测大概是由 $\text{Fe}-\text{Ni}-\text{S}$ 和榴辉岩物质构成的。

1.1.2 月球的地形

月球表面有阴暗的部分和明亮的区域,亮区是高地,暗区是平原或盆地等低陷地带,分别被称为月陆和月海。早期的天文学家在观察月球时,以为发暗的地区都有海水覆盖,因此把它们称为“海”。著名的有云海、湿海、静海等。而明亮的部分是山脉,那里层峦叠嶂,山脉纵横,到处都是星罗棋布的环形山,即月坑,这是一种环形隆起的低洼形。月球上直径大于 1km 的环形山多达 33000 多个。位于南极附近的贝利环形山直径 295km ,可以把整个海南岛装进去。最深的山是牛顿环形山,深达 8788m 。除了环形山,月球表面上也有普通的山脉。高山和深谷叠现,别有一番风光。

月球背面的结构和正面差异较大。月海所占面积较少,而环形山则较多。地形凹凸不平,起伏悬殊最长和最短的月球半径都位于背面,有的地方比月球平均半径长 4km ,有的地方则短 5km (如范德格拉夫洼地)。背面未发现“质量瘤”。背面的月壳比正面厚,最厚处达 150km ,而正面月亮厚度只有 60km 左右。其地形地貌示意图如图 1-3 所示。