



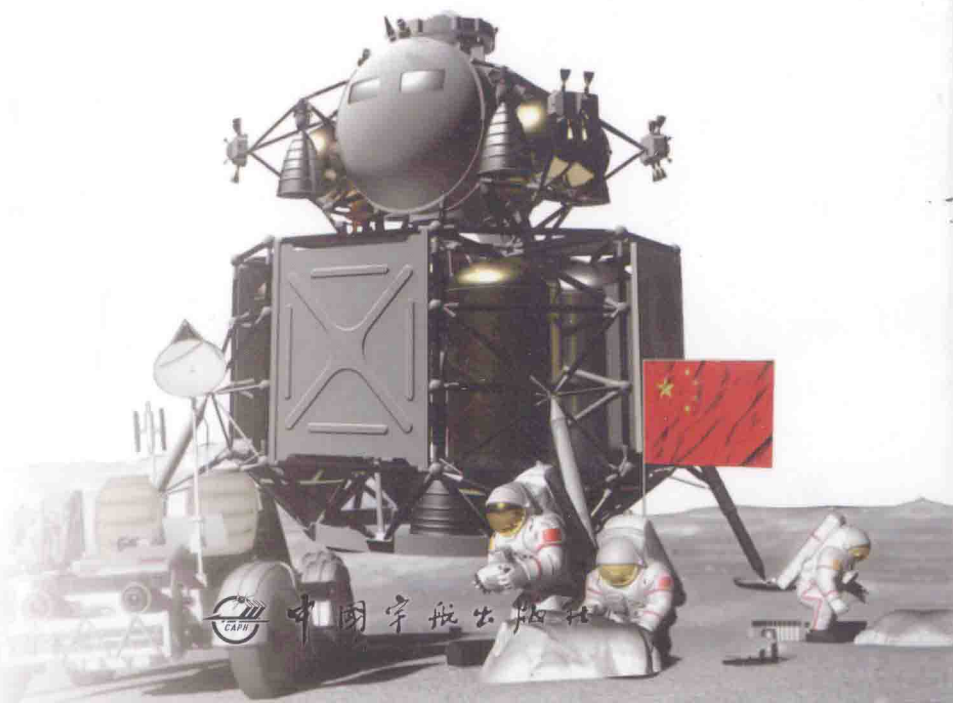
载人航天出版工程

总主编：周建平

总策划：邓宁丰

载人月球基地工程

果琳丽 王 平 朱思涌 左 光 等 编著



中国宇航出版社



载人航天出版工程

总主编：周建平

总策划：邓宁丰

载人月球基地工程

果琳丽 王 平 朱恩涌 左 光 等 编著

 中国宇航出版社

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

载人月球基地工程/果琳丽等编著. --北
京:中国宇航出版社,2013.12

国家出版基金项目

ISBN 978-7-5159-0592-1

I. ①载… II. ①果… III. ①载人航天—月球探索—
基地工程 IV. ①V1

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第298439号

责任编辑 刘亚静 杨洁 封面设计 姜旭

出版
发行 **中国宇航出版社**

社址 北京市阜成路8号 邮编 100830
(010)68768548

网址 www.caphbook.com

经销 新华书店

发行部 (010)68371900 (010)88530478(传真)
(010)68768541 (010)68767294(传真)

零售店 读者服务部 北京宇航文苑
(010)68371105 (010)62529336

承印 北京画中画印刷有限公司

版次 2013年12月第1版 2013年12月第1次印刷

规格 880×1230 开本 1/32

印张 21.625 彩插 8面 字数 602千字

书号 ISBN 978-7-5159-0592-1

定价 108.00元

本书如有印装质量问题,可与发行部联系调换

《载人航天出版工程》总序

中国载人航天工程自1992年立项以来，已经走过了20多年的发展历程。经过载人航天工程全体研制人员的锐意创新、刻苦攻关、顽强拼搏，共发射了10艘神舟飞船和1个目标飞行器，完成了从无人飞行到载人飞行、从一人一天到多人多天、从舱内实验到出舱活动、从自动交会对接到人控交会对接、从单船飞行到组合体飞行等一系列技术跨越，拥有了可靠的载人天地往返运输的能力，实现了中华民族的千年飞天梦想，使中国成为世界上第三个独立掌握载人航天技术的国家。我国载人航天工程作为高科技领域最具代表性的科技实践活动之一，承载了中国人民期盼国家富强、民族复兴的伟大梦想，彰显了中华民族探索未知世界、发现科学真理的不懈追求，体现了不畏艰辛、大力协同的精神风貌。航天梦是中国梦的重要组成部分，载人航天事业的成就，充分展示了伟大的中国道路、中国精神、中国力量，坚定了全国各族人民实现中华民族伟大复兴中国梦的决心和信心。

载人航天工程是十分复杂的大系统工程，既有赖于国家的整体科学技术发展水平，也起到了影响、促进和推动着科学技术进步的重要作用。载人航天技术的发展，涉及系统工程管理，自动控制技术，计算机技术，动力技术，材料和结构技术，环控生保技术，通信、遥感及测控技术，以及天文学、物理学、化学、生命科学、力学、地球科学和空间科学等诸多科学技术领域。在我国综合国力不断增强的今天，载人航天工程对促进中国科学技术的发展起到了积极的推动作用，是中国建设创新型国家的标志性工程之一。

我国航天事业已经进入了承前启后、继往开来、加速发展的关键时期。我国载人航天工程已经完成了三步走战略的第一步和第二

步第一阶段的研制和飞行任务，突破了载人天地往返、空间出舱和空间交会对接技术，建立了比较完善的载人航天研发技术体系，形成了完整配套的研制、生产、试验能力。现在，我们正在进行空间站工程的研制工作。2020年前后，我国将建造由20吨级舱段为基本模块构成的空间站，这将使我国载人航天工程进入一个新的发展阶段。建造具有中国特色和时代特征的中国空间站，和平开发和利用太空，为人类文明发展和进步做出新的贡献，是我们航天人肩负的责任和历史使命。要实现这一宏伟目标，无论是在科学技术方面，还是在工程组织方面，都对我们提出了新的挑战。

以图书为代表的文献资料既是载人航天工程的经验总结，也是后续任务研发的重要支撑。为了顺利实施这项国家重大科技工程，实现我国载人航天三步走的战略目标，我们必须充分总结实践成果，并充分借鉴国际同行的经验，形成具有系统性、前瞻性和实用性的，具有中国特色的理论与实践相结合的载人航天工程知识文献体系。

《载人航天出版工程》的编辑和出版就是要致力于建设这样的知识文献体系。书目的选择是在广泛听取参与我国载人航天工程的各专业领域的专家意见和建议的基础上确定的，其中专著内容涉及我国载人航天科研生产的最新技术成果，译著源于世界著名的出版机构，力图反映载人航天工程相关技术领域的当前水平和发展方向。

《载人航天出版工程》凝结了国内外载人航天专家学者的智慧和成果，具有较强的工程实用性和技术前瞻性，既可作为从事载人航天工程科研、生产、试验工作的参考用书，亦可供相关专业领域人员学习借鉴。期望这套丛书有助于载人航天工程的顺利实施，有利于中国航天事业的进一步发展，有益于航天科技领域的人才培养，为促进航天科技发展、建设创新型国家做出贡献。



2013年10月

序 一

2011年到2013年，中国载人航天工程相继完成了天宫一号与神舟八号无人飞船和神舟九号、十号载人飞船交会对接飞行任务，全面验证了空间飞行器自动和人工控制交会对接技术，航天员二度访问和驻留天宫一号，开展了空间科学实验和太空授课活动，标志着我国拥有了可靠的载人天地往返运输系统，并建成了我国首座“长期在轨独立运行、短期载人”的试验性空间实验室。目前，我国已全面启动空间站研发工作，以空间站/新一代运载火箭为代表的空间站工程将为中国载人航天的发展注入强大的动力……随着中国载人航天工程不断取得新的突破，中国在世界航天领域的影响力和地位不断上升。为准确把握世界航天的发展趋势，推动我国载人航天技术的持续、创新发展和进步，我们组织开展了载人航天发展战略研究工作。

月球及以远的载人空间探索活动是当前国际航天领域正在积极推进的一个重要研究方向，火星是人类可预见、最富有吸引力的载人探索目的地，可以通过“月球优先”方案和“小行星优先”方案来分步实施对火星的探索。其中，“月球优先”方案是将月球作为近地轨道以远载人探索的首个目的地，通过实施载人登月及月球基地工程，掌握人类在行星表面自给自足生活和工作的技术，验证未来载人登陆火星的必需能力。月球基地工程将进一步带动载人航天技术的发展和进步，是一个重要的战略方向，应当予以认真研究和积极关注。

《载人月球基地工程》一书的作者们长期专职从事载人深空探测技术研究，他们收集、整理了大量国外载人月球基地工程的资料，

分析并提出了建设载人月球基地工程所需关注的重大问题、关键技术及解决途径，对系统地谋划我国载人航天长远发展战略具有积极的作用和价值。相信本书的出版能够引发国内相关科技工作者对我国载人航天事业后续发展方向的更加深入的思考，为我国载人航天活动持续发展和进步提出积极的建议并贡献自己的智慧。



2013年9月9日

序 二

人类发展的永恒动力来自于对未知世界的不断探索，而探索的最终目的是加深人们对自身环境的认识和对资源的开发与利用。认识是无止境的，而地球资源终究是有限的，人类在自身不断发展、取得一个又一个伟大成就的同时，也在消耗着地球有限的资源，各种资源都存在枯竭的危险，因此能源问题成为当今国际上的热点问题，也是各国纷争的焦点。随着科技的进步，人类早已把目光投向了浩瀚的宇宙，特别是对月球这一“陌生又熟悉”近邻的兴趣愈加浓厚，不仅将其视为探索宇宙的起点与训练场，更希望能在这里开枝散叶，获得延续人类发展的宝贵资源。

尽管当前人类对月球的认识还很有限，月球资源是否可以利用还有争论，但所谓“先到者先受益、先开发先利用”，未来月球一旦成为战略重点和资源争夺的热点，我国将如何维护国家的利益？如何保障资源的安全？有人道：“一年建陆军，十年建空军，百年建海军。”我们的航母已晚了约百年，那试问，多久才可以建成满足月球开发利用的基础设施呢？中国在近代的落后已直接影响了海军的发展，造成了如今海洋权益维护的被动局面。那么在新时期面向“太空地理探索”的浪潮，就不能再次落后于人。因此，尽早开展载人登月活动，建立有人/无人月球基地，研究用于探索、开发月球的相关技术是十分必要的。

《载人月球基地工程》一书的作者们是一群富有激情与梦想的年轻的航天人，他们参与了中国的载人航天工程，是挺起未来中国航天脊梁的坚实力量。本书各章内容体现了他们对国际航天先进技术动向的掌握，也体现了他们对航天工程实践的经验总结和技术提升。

相信本书既可以为从事月球探测和深空探测的工程技术人员提供参考，也可以作为高等院校相关专业的教材或参考书，为我国持续深入开展月球探测与资源开发利用研究提供有益的借鉴。作者年轻，研究对象具有探索性，本书肯定存在不妥之处，我愿意与他们共同进步、共同提高！

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Chinese characters '叶培建'.

2013 年 3 月

前 言

世界载人航天发展史告诉我们：激情和梦想，光荣与奋斗，是人类保持前进的永恒动力……

2012年6月29日，随着神舟九号载人飞船返回舱平安降落及三名航天员安全出舱，中国载人航天工程首次载人交会对接任务取得圆满成功。中共中央、国务院、中央军委发来贺电：“天宫一号与神舟九号载人交会对接任务的圆满成功，实现了我国空间交会对接技术的又一重大突破，标志着我国载人航天工程第二步战略目标取得了具有决定性意义的重要进展。这是建设创新型国家取得的新成就，是中国人民在攀登世界科技高峰征程上铸就的新辉煌，是中华民族为人类探索利用外层空间作出的又一卓越贡献……”然而就在20年前，载人飞船、货运飞船、空间实验室、空间交会对接、空间站、载人登月这些世界载人航天史上的标志性事件，对我国的航天科技工作者们而言都还是那么的可望而不可即；而20年后的今天，这些目标都正在逐步被那些拥有激情和梦想的人们变成现实，中国的载人航天事业也从此开启了一扇崭新的大门！

2011年12月5日，美国国家航空航天局宣布，通过开普勒太空望远镜发现了太阳系外第一颗类似地球的、适合人类居住的行星开普勒-22b。该行星表面温度约 21°C ，可能存在液态水，体积是地球的2.4倍，以290天的周期环绕一颗恒星运行。虽然这颗行星距地球有600光年之远，乘坐载人飞船前往将需要2200万年，以目前的航天科技水平，暂时无法实现载人探索和移民的梦想。但是这个消息仍然激发了无数载人航天爱好者的激情和梦想，我们有理由相信：随着无人深空探测技术和载人航天技术的快速发展，正如齐奥尔卡

夫斯基所说：地球是人类的摇篮，但终有一天人类会离开这个摇篮，走向更遥远的深空……

月球是离地球最近的天体，载人登月是实现人类星际航行的第一步；建设月球基地，更是实现人类移民外星球梦想的基石。从 20 世纪 60 年代美国成功实施阿波罗登月计划至今，人类已经从月球成功获取了 382 kg 的月球样品和大量的科学数据，大大促进了人类对月球、地球和太阳系的认识。为了提高人类对月球的认识和利用，2004 年美国提出了重返月球计划，在今后一段时间内可实现的工程技术条件下，可将 4~6 名航天员重新送上月球表面，具备全月面到达能力，对月球进行全球性、综合性和整体性的探测，开发和利用月球资源、能源和特殊环境。重返月球计划的主旨是建设一个具有受控生态环境的月球基地，进行建筑、运输、采矿、材料加工和各项科学研究，为将来建设适于人类居住的月球村进行科研和技术准备，使月球最终成为一个庞大、稳固而功能齐全的“天然空间站”，成为人类共有的科学实验室，开展深空探测活动的试验基地和物质转运站，实现载人登陆火星和其他天体的前哨站。虽然奥巴马政府上台后终止了重返月球计划，并提出载人登陆小行星的战略目标，但是可用于重返月球的重型运载火箭、新一代载人飞船和登月舱等飞行器却仍在积极建造过程中，美国国内关于重返月球和建设月球基地的研究仍在持续进行中，同时围绕月球水冰资源探测的无人月球探测活动更加频繁。2012 年，美国国家航空航天局推出了月球基地游戏软件，鼓励各界人士开发和认识在月球上建设基地的活动；2013 年 1 月，欧洲空间局提出利用 3D 打印技术，在月球上利用月球土壤建设月球基地，目前著名建筑公司 Foster+Partners 已经加入了欧洲空间局的这一计划，利用模拟的月球土壤建造了 1.5 t 的建材模块，演示、验证利用月球土壤实施 3D 打印的可行性。各种迹象表明：建设载人月球基地是深度开发和利用月球资源的重要途径，依旧是未来载人深空探测领域的热点和焦点。

写作本书有两个目的：第一个目的是从技术发展角度来看，实

施载人登月工程可以将无人月球探测技术和载人航天技术有机结合,而实施载人月球基地工程更可以将无人月球探测技术、载人登月技术、空间站技术完美结合。如果在载人登月工程顺利实现之后,以载人月球基地建设作为下一步的战略目标,能够确保和促进我国载人航天事业的可持续发展。第二个目的是从载人月球基地工程建设实施的角度来看,必须要解决好月球基地选址、月球基地科学研究与资源利用、月球基地结构及构建、月球基地能源、月球基地热控制、月球基地环境控制与生命保障、月球基地信息、月球基地空间防护、月面作业、月面着陆及起飞、地月空间运输、月球基地运营及后勤管理等一系列关键技术和核心问题,这些核心技术又必将带动我国的载人航天事业再上一个新的台阶。从载人登月工程到月球基地工程,技术跨越将更加巨大,必将是人类历史上又一辉煌的里程碑事件。

本书将是国内第一部系统整理、分析、研究载人月球基地工程方案及关键技术问题的专著,具有较强的前瞻性和创新性。但正如大多数载人航天项目一样,月球基地工程又必将是一项争议性较大的高科技工程。关于建设月球基地的社会经济综合效益,社会各界学者有各种见解,本书不纠缠于为什么要建设月球基地,而是从工程技术的视角出发,考虑如何建设月球基地,重点论述建设月球基地工程所需研究的关键技术和解决途径。在本书编写过程中我们力图避免大而全,而是突出重点问题,希望能与各方学者、专家共同分享、探讨。

本书由中国空间技术研究院载人航天总体部星际探测研究室的同志们共同编写完成,全书共分16章,各章节的主要作者如下:

第1章 月球基地的概念,由果琳丽负责编写;

第2章 国外月球基地发展概况,由王清哲、朱恩涌、果琳丽负责编写;

第3章 月球基地选址,由彭坤、果琳丽负责编写;

第4章 月球基地科学研究与资源利用,由彭坤负责编写;

- 第5章 月球基地结构与构建, 由朱恩涌、王清哲负责编写;
- 第6章 月球基地能源系统, 由郭斌、李志杰负责编写;
- 第7章 月球基地热控系统, 由左光、李志杰负责编写;
- 第8章 月球基地生命保障系统, 由侯砚泽、王平负责编写;
- 第9章 月球基地通信与导航系统, 由张大鹏、彭坤、田林等负责编写;
- 第10章 月球基地防护系统, 由王平负责编写;
- 第11章 月面作业系统, 由梁鲁、张志贤负责编写;
- 第12章 月面着陆与起飞系统, 由梁鲁负责编写;
- 第13章 地月空间运输系统, 由王平、果琳丽负责编写;
- 第14章 月球基地运营与后勤技术, 由王平、李晨光负责编写;
- 第15章 月球基地为中转站的载人深空探测任务设想, 由果琳丽、朱恩涌、彭坤等负责编写;
- 第16章 月球基地法律问题, 由陈冲负责编写。
- 附录A~C 由王平和饶建兵负责编写。

全书由果琳丽、王平和李志杰同志负责校对、审定。在统稿的过程中, 我们尽量保持各章节的独立性和完整性, 以便读者可以根据所需选择感兴趣的章节进行阅读, 而无须通读全书。作为国内第一部系统介绍月球基地工程的专著, 本书在撰写的过程中, 注重收集、整理了国内外一些新的观点和看法, 以便给读者更多的启发。本书在编写、修改及出版的全过程中, 得到了中国空间技术研究院李明、尚志、焦泽兵、龙江、李杰、张柏楠、杨宏、杨雷、潘平等领导的高度重视和大力支持, 在此一并致谢!

鉴于年轻的作者们技术水平和认识有限, 各种资料的收集、整理和综合分析尚不完善, 错误之处在所难免, 敬请各位同行专家批评指正!

果琳丽

2013年2月于北京唐家岭航天城

目 录

第 1 章 月球基地的概念	1
1.1 月球基地的任务和类型	1
1.1.1 月球基地的任务	2
1.1.2 月球基地的类型	3
1.1.3 月球基地的发展阶段	4
1.2 月球基地工程的概念	6
1.2.1 月球基础设施	7
1.2.2 地面基础设施	10
1.2.3 地月空间运输系统	12
1.3 月球基地工程重点关注问题	12
1.3.1 空气和水的问题	13
1.3.2 食物和废物处理问题	14
1.3.3 低重力问题	14
1.3.4 月尘问题	15
1.3.5 热控问题	16
1.3.6 能源问题	16
1.3.7 辐射问题	17
1.3.8 法律问题	18
1.4 小结	18
参考文献	19
第 2 章 国外月球基地发展概况	20
2.1 月球探测活动的发展历程	20

2.2 国外月球探测活动的最新进展	23
2.2.1 美国	23
2.2.2 俄罗斯	28
2.2.3 日本	30
2.2.4 欧洲空间局	33
2.2.5 印度	35
2.3 国外月球基地典型方案	36
2.3.1 美国	36
2.3.2 俄罗斯	48
2.3.3 欧洲空间局	49
2.4 月球基地发展趋势	50
参考文献	53
第3章 月球基地选址	56
3.1 阿波罗登月工程选址方法	56
3.1.1 阿波罗登月工程选址流程	56
3.1.2 阿波罗登月工程选址结果	58
3.2 月球基地选址原则和方法	60
3.2.1 月球基地选址原则	60
3.2.2 月球基地选址方法研究	61
3.3 月球基地选址约束	65
3.3.1 月球地形地貌约束分析	66
3.3.2 月面可达性约束分析	69
3.3.3 月面热环境约束分析	72
3.3.4 月面辐射环境约束分析	74
3.3.5 月面光照条件约束分析	74
3.3.6 微流星体防护约束分析	75
3.3.7 通信条件约束分析	76
3.3.8 资源利用约束分析	77
3.4 月球基地候选地址	78

3.4.1 月球典型区域特性分析	78
3.4.2 月球基地候选区选择	80
3.5 小结	92
参考文献	95
第4章 月球基地科学研究与资源利用	97
4.1 阿波罗登月工程的科学成果	97
4.1.1 月球自身科学	98
4.1.2 月基观测实验	106
4.1.3 航天员医学研究	107
4.1.4 月球物质对生物特性影响研究	109
4.2 月球基地科学研究	110
4.2.1 月球自身科学研究	111
4.2.2 月基观测平台研究	118
4.2.3 月基科学平台研究	124
4.2.4 月球基地科学实验项目及设备质量规模	127
4.3 月球资源开发利用	128
4.3.1 月球资源利用评估	128
4.3.2 月球资源开采	133
4.3.3 月球资源提取	139
4.3.4 月球基地建筑材料——月球混凝土	149
4.4 小结	150
参考文献	153
第5章 月球基地结构与构建	156
5.1 月球基地构型设计	156
5.1.1 构型分类	156
5.1.2 主要考虑因素	162
5.1.3 构型评估标准与方法	165
5.2 月球基地结构	167

5.2.1 刚性舱结构	168
5.2.2 可展开式结构	170
5.2.3 建造式结构	172
5.2.4 结构类型选择分析	175
5.3 月球基地构建	176
5.3.1 基地构建主要工程机械	176
5.3.2 基地构建的主要作业	180
5.4 小结	198
参考文献	199
第6章 月球基地能源系统	203
6.1 概述	203
6.2 能源供应系统	206
6.2.1 太阳能供应系统	206
6.2.2 核能供应系统	213
6.2.3 其他能源供应方案	217
6.3 能源储存系统	219
6.3.1 传统蓄电池组储存系统	219
6.3.2 燃料电池	223
6.3.3 其他能源储存方案	232
6.4 能源管理与分配	233
6.5 月球基地能源组合方案	235
6.5.1 小型基地能源方案	236
6.5.2 中型基地能源方案	237
6.5.3 大型基地能源方案	237
6.5.4 小结	240
参考文献	243
第7章 月球基地热控系统	245
7.1 概述	245