



月球基地建造的发展趋势、目标体系与政策路径

周诚^{1,2}, 高玉月^{1,2}, 覃文波^{1,2}, 丁烈云^{1,2*}

1. 华中科技大学土木与水利工程学院, 武汉 430074

2. 华中科技大学国家数字建造技术创新中心, 武汉 430074

* 联系人, E-mail: dly@hust.edu.cn

自1959年苏联发射第一颗月球探测卫星以来, 苏联月球计划和美国阿波罗计划已经成功完成了多项无人探月、载人登月任务。随着美苏太空争霸的结束, 探月活动保持了半个世纪的静默期。进入21世纪后, 全球范围内正在掀起新一轮的探月活动热潮。不同于20世纪以单次独立任务为主的月球探测, 新世纪的探月活动凸显出通过整体规划和分步实施, 在月面建立永久性基础设施的意图, 以及“认识与利用并重”的月球探测目标。美国于2017年启动的Artemis计划中正式宣告将在月球建立永久存在基地, 随后在2022年发布的Moon to Mars Architecture中进一步确立了对月球、火星乃至更远深空探索的长远蓝图, 包括人类重返月球、基础设施探索、月球可持续开发和人类登陆火星四个阶段。其中, 基础设施探索阶段设定了与月球基地建造相关的基础设施、交通驻留和运营维护等目标。欧洲航天局(European Space Agency, ESA)也曾在2015年提出了“月球村”的概念设想, 作为国际空间站退役后的永久性太空基地, 为月球原位资源利用和深空探索提供机会。当前, 建设月球基地作为人类进行深空探测活动的前哨站已成为世界主要航天国家竞相追逐的探月目标。

我国的探月工程自2007年启动以来, 已成功完成以“绕、落、回”为目标的前三期工程探月任务, 进入到一个新的发展阶段。目前, 中国探月工程四期正在稳步推进, 并为2030年前后在月球南极建设国际月球科研站做好准备工作。国际月球科研站将用于支持开展长期的月球和月基科学研究, 以及原位资源勘察利用。国际月球科研站计划标志着我国月球基地建造启动, 具有重要意义, 将极大程度提高我国对月球的开发和利用能力。从科学研究的角度, 月球基地可以提供空间科学等多学科交叉新机遇^[1,2], 推动航天重大任务的关键技术突破; 从社会发展的角度, 月球基地将拓展人类活动的边界, 构建地月经济圈, 具有巨大的经济产值潜力。



丁烈云 华中科技大学教授, 中国工程院院士, 国家数字建造技术创新中心首席科学家, 国家自然科学基金委员会管理科学部主任。长期从事数字建造与工程管理研究。

本文在阐述月球基地建造的国际发展趋势的基础上, 分析当前我国月球基地建造面临的挑战与机遇, 提出我国月球基地建造的目标体系和对策建议, 以期为推动我国月球基地建造发展提供参考。

1 月球基地建造的国际发展趋势

进入21世纪后, 美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)等纷纷提出地外空间中长期驻留设想, 月球基地建造逐渐成为新一轮深空探测的重点目标之一。根据主要航天国家相关文件调研结果, 月球基地建造国际前沿呈现四大关键发展态势, 即“无人探测与载人任务相结合”“科学研究与资源利用相结合”“阶段探索与常态任务相结合”“地月空间与更远深空相结合”, 其主要支撑文件见表1。

1.1 无人探测与载人任务相结合

无人探测是前期各国月球探测的主要任务类型, 已显著提升人类对月球认知水平, 正朝向高精度、系统化探测趋势

引用格式: 周诚, 高玉月, 覃文波, 等. 月球基地建造的发展趋势、目标体系与政策路径. 科学通报, 2025, 70: 3460–3469

Zhou C, Gao Y, Qin W, et al. The development trend, objectives, and policy path of lunar base construction (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 3460–3469, doi: [10.1360/TB-2024-1356](https://doi.org/10.1360/TB-2024-1356)

表 1 主要航天国家地外建造相关领域重要文件及公告

Table 1 Important documents related to extraterrestrial construction issued by major aerospace countries

文件/公告名称	发布国家/地区	发布机构	发布时间/最近更新时间(年/月/日)
《中国载人航天工程简介》	中国	中国载人航天办公室	/
《国家空间科学中长期发展规划 (2024-2050年)》	中国	中国科学院; 国家航天局; 中国载人 航天工程办公室	2024/10/15
《中国航天科技活动蓝皮书(2023年)》	中国	中国航天科技集团	2024/2/26
《关于开展探月工程四期嫦娥八号任 务科学载荷与作业机器人研制意向征 集的通知》	中国	国家航天局	2024/2/7
《2021中国的航天白皮书》	中国	中华人民共和国国务院新闻办公室	2022/1/28
《国际月球科研站合作伙伴指南》	中国	国家航天局	2021/6/16
<i>Chandrayaan-3 Details</i>	印度	Indian Space Research Organization, Department of Space	2023/7/14
<i>Lunar Cruiser</i>	日本	TOYOTA	2024
《宇宙基本计划》	日本	宇宙开发战略本部	2023/6/13
<i>JAXA's Lunar Exploration Activities</i>	日本	Japan Aerospace Exploration Agency	2020/2/13
《第四期太空探索基本计划》	韩国	韩国公共研究政策部	2023/2/6
<i>Moonlight</i>	欧洲	ESA	2023/10/9
<i>Terrae Novae 2030+ Strategy Roadmap</i>	欧洲	ESA	2022/6/1
<i>Moon Village: Conceptual Design of A Lunar Habitat</i>	欧洲	ESA	2020/11/20
<i>ESA Engineers Assess Moon Village Habitat</i>	欧洲	ESA	2020/11/17
<i>ESA Space Resource Strategy</i>	欧洲	ESA	2019/5/23
<i>ESA Strategy for Science at the Moon</i>	欧洲	ESA	2019/5/23
<i>Exomars Rover</i>	欧洲	ESA	2018/11/29
<i>Artemis</i>	美国	NASA	2024/12/17
<i>Moon to Mars Architecture</i>	美国	NASA	2024/12/16
<i>Starship</i>	美国	SpaceX	2024/12/16
<i>The Mars Future Plan</i>	美国	NASA	2024/12/11
<i>Mars Sample Return</i>	美国	NASA	2024/12/7
<i>Orion Spacecraft</i>	美国	NASA	2024/12/4
<i>Europa Clipper</i>	美国	NASA	2024/11/25
<i>Human Landing System</i>	美国	NASA	2024/11/24
<i>International Space Station</i>	美国	NASA	2024/11/21
<i>New Frontiers</i>	美国	NASA	2024/11/15
<i>Gateway</i>	美国	NASA	2024/10/29
<i>Trends in Russian Space Development</i>	美国	Institute for Defense Analyses	2024/10/24
<i>Space Agenda 2025</i>	美国	Center for Space Policy and Strategy at The Aerospace Corporation	2024/10/24
<i>Space Launch System</i>	美国	NASA	2024/10/7
<i>About NIAC</i>	美国	NASA	2024/9/3
<i>NASA Commercial Aviation Services Standard</i>	美国	NASA	2024/6/28
<i>Dear Moon</i>	美国	SpaceX	2024/6/1
<i>NASA's Space Sustainability Strategy</i>	美国	NASA	2024/5/28
<i>10-year Lunar Architecture Capability Study</i>	美国	DARPA	2024/5/15
<i>Commercial Lunar Payload Wervices</i>	美国	NASA	2024/2/22

(续表1)

文件/公告名称	发布国家/地区	发布机构	发布时间/最近更新时间(年/月/日)
<i>Origins, Worlds, and Life: A Decadal Strategy for Planetary Science and Astrobiology 2023-2032</i>	美国	The National Academies Press	2024/1/29
<i>Spaceflight Human-System Standard Volume 1, Crew Health</i>	美国	NASA	2023/9/15
<i>Spaceflight Human-System Standard Volume 2: Human Factors, Habitability, and Environmental Health</i>	美国	NASA	2023/9/15
<i>NASA's Artemis Base Camp on the Moon Will Need Light, Water, Elevation</i>	美国	NASA	2023/8/9
<i>Space Policy Directive-1, Reinvigorating America's Human Space Exploration Program</i>	美国	U.S. Department of State	2023/6/26
<i>National Space Exploration Campaign Report</i>	美国	NASA	2023/4/6
<i>Moon to Mars Objectives</i>	美国	NASA	2022/12
<i>National Cislunar Science & Technology Strategy</i>	美国	The White House	2022/11
<i>NASA Advanced Space Suit XEMU Development Report</i>	美国	NASA	2021/10/28
<i>National Space Policy of the United States of America</i>	美国	The White House	2020/10/31
<i>Luna-Resurs Lander (Luna-27)</i>	俄罗斯	Russian Space Web	2023/8/7
《俄罗斯联邦2030年及以后空间活动领域国家政策》	俄罗斯	ROSCOSMOS	2022/9/5
<i>UAE to Mars 2117</i>	阿联酋	UAEpedia	2024/12/1

发展. 1959年起, 苏联发射月球1至3号, 分别完成了月球探测的首次飞掠、首次撞击、首次月背拍摄. 美国亦通过先驱者、徘徊者等探测器获得人类第一批月球特写镜头. 苏联进而实现人类历史上首次月表软着陆及实施后续月球车和无人采样返回任务. 21世纪以来, 全球探月热潮再次兴起, 多国布局开展高精度探月任务: ESA的SMART-1任务实现月面硬着陆、日本月女神探测器实现环月观测^[3]、印度月船3号任务实现月面软着陆. 我国探月工程更是实现了人类首次月背软着陆、首次月背采样等超级工程, 系统性建立科学数据集, 包括世界首幅7米分辨率的月球全影像图^[4]、1:250万月球全月地质图^[5]等. 随着人类月球认知水平实现跨越式发展, 未来预计更多国家加入探月队伍. 韩国计划于2032年发射月球着陆器以探索月球表面并验证技术; 俄罗斯计划于2027年发射Luna-27以延续苏联任务; ESA近日正式启动“月光”月球通信和导航服务计划, 旨在为未来20年各航天机构和私营公司计划的月球任务提供服务.

载人登月任务标志着太空探索的重大技术突破, 永久性地拓展了人类对宇宙的认知边界, 正朝长时间驻留、大范围探测方向推进. 20世纪美国先后已实现六次短时载人任务^[6], 最长月表停留时间约74小时, 利用载人月球车探索约26公里月面平坦地区. 近半世纪沉寂期后, 美国又一次提出Artemis

计划, 以载人重返月球为阶段性目标, 规划于2026年后将四名宇航员送往月球南极, 将月面驻留时间延长至约一周, 并通过漫游车实现远距离探索. 在此基础上进一步建立“月球大本营”, 建设能源开采、废物处理等大量基础设施, 以支持可持续驻留, 乃至人类永久性移民发展. 此外, 俄罗斯《联邦太空计划》也表示将定期载人飞往月球, 并建立永久基地与科学实验室; *ESA Strategy for Science at the Moon*规划于2030年前实现欧洲宇航员登月, 并促进可持续性月球探索. 我国载人登月任务也已完成前期关键技术攻关和深化论证, 全面进入初样研制阶段, 计划于2030年前后首次实现中国人登陆月球, 并通过高性能登月服、月面载运工具等关键技术的系统突破, 提升阴影区、崎岖地形等复杂月面环境下的载人长期驻留、远距离探测能力.

当前, 各国无人、载人探测规划逐步呈有机融合态势. 一方面, 前期大量无人探测任务持续积累遥感探测数据, 逐步扩展、提升月球综合认知程度, 可辅助载人探测任务开展关键性决策并布设重要基础设施. 无人探测工程可作为载人登月前置勘察任务. 美国Artemis第一阶段计划、欧洲*Terrae Novae 2030+ Strategy Roadmap*、俄罗斯航天国家集团公司的载人月球探测计划等, 均布局优先通过无人测试、勘探任务明确宇航员作业场景, 或利用机器人或装置开展侦查活动,

以排查作业风险,提升有人任务可靠性,保证宇航员生命安全。无人探测任务也可为载人探测提供关键基础设施。如ESA月光计划,其部署的五颗月球卫星将促进地球和月球之间40万公里范围内的高速、低延迟通信和数据传输,对人类长期驻留至关重要。日本《宇宙基本计划》规划月表可持续载人活动时,也首先规划开发无人施工技术,分阶段开展电力、通信和定位系统、燃料供应系统等方面的技术论证和维护工作。另一方面,单纯的无人探测任务受制于远程遥控操作技术瓶颈、空间环境不确定性等限制因素,灵活性受限,载人登月需求应运而生,以进一步支持更加复杂的科学实验与研究。人类可以现场进行判断、调整和实施复杂实验,也能在任务中更快速地响应突发情况^[7,8]。例如,宇航员可直接操作设备、修复故障、选择更合适的实验区域等。如Artemis计划中,宇航员预计需开展一系列测试任务,如开挖建造、月尘清扫、资源开发利用等,以支持进一步的探测任务。因此,无人、载人探测规划正淡化其边界,有望形成统一规划格局。

1.2 科学研究与资源利用相结合

月球是研究地月系、太阳系起源与演化的“最佳标本”^[9,10],已推动空间科学高效发展,利用月球环境开展月基科学研究^[11]已成为国际趋势。美国Moon to Mars Architecture文件中,将“科学研究”列为深空探测三大核心驱动支柱之一,并计划通过月基微重力生物实验、月基太空气象观测等研究实现科学价值^[12]。美国National Cislunar Science & Technology Strategy也着重指导美国政府推动地月空间科学探索活动,如支持科学研究与技术开发、扩大地月空间国际科学技术合作等。ESA Strategy for Science at the Moon文件也确立了一系列基于月球原位观测的优先科学任务,包括月球样品分析、月球水冰探测与表征、全月地理观测网络部署等。我国《国家空间科学中长期发展规划(2024~2050年)》中也明确规划月球科学研究相关的阶段性目标,如月球成因和演化,并将“月球深部物质探测”作为优先发展方向之一。在上述规划的引导下,月球科学研究的广度、深度正不断扩展。

在认识月球的基础上,各国相继提出月球原位资源利用规划,原位资源利用呈多样化趋势^[13],既包含月壤^[14]、氦3等物质资源,也包含环境资源、位置资源^[15]。物质资源方面,美国Artemis计划中的“大本营”旨在从月球本身寻找、提取资源,以维持人类的持续生存能力。美国创新先进概念项目也投资多项与原位物质资源利用高度相关的概念研究,如月球柔性悬浮铁路系统、超低能耗月球水提取技术等。美国国防部高级研究计划局启动“十年月球架构”项目,将月球可提供的各类资源作为商业化载体,规划未来月球综合基础设施的开发。ESA Space Resources Strategy文件也充分强调采矿、冶金、能源开发、原位制氧等月球资源开采工作的重要意义。环境资源则包括月面低重力、强辐射、大温差、高真空

等特殊环境,可用于新材料开发、生物育种等特定科学实验。此外,位置资源近年来成为各国关注热点之一。如地月拉格朗日点^[16],因具备引力平衡、相对稳定性等独特优势,已成为理想深空科研设施部署区域。我国“鹊桥”中继卫星即位于地月L2点附近,为月背着陆器提供通信支持。美国NASA's Space Sustainability Strategy文件也特别强调地月空间中拉格朗日点的重要性。

事实上,科学探测目标与原位资源利用目标互为牵引与支撑,呈并重发展趋势。原位资源的有效开发利用能够提升中长期驻留及探测能力,间接支持科学研究的长期性和可持续性。突破性的科学探测成果也可为原位资源利用任务设计提供理论依据,加快原位资源利用技术开发与迭代。例如,开展月基水冰科学探测,表征其丰度信息与存在形式,可辅助决策水冰资源开采方案,确保其高效、可持续利用。因此,科学探测目标与原位资源利用目标的有机融合与系统设计已在多国规划中有所体现。美国Moon to Mars Objectives文件中既强调多类科学目标,也强调基础设施、交通居住、运营维护目标,以扩展原位资源开发利用能力。国际月球科研站建设计划也考虑将原位资源利用试验作为科学主题之一,以推动月球水提取、氢氧制备、月壤材料制造和建造等领域发展。ESA Space Resources Strategy文件也指出,可通过空间资源领域发展为学术界创造新的科学机会。具体任务层面,我国探月四期嫦娥八号任务既计划搭载典型科学探测载荷,如月表低频电磁场探测仪,以获取科学数据;也计划搭载原位资源利用科学载荷,作为开展技术探索的重要攻关任务。综上,人类深空探索已处于“认识”转向“认识与利用并重”的重大转折阶段。各国探月策略已不仅局限于科学研究目标,统筹考虑科学探测与原位资源利用目标已成为未来月球基地布局的必然趋势。

1.3 阶段探索与常态任务相结合

当前,月球探索以阶段性任务为主,总体发展呈系统规划与逐步推进趋势,正转向复杂性、系统性更强的任务规划模式。早期的月球探测任务通常侧重于单一目标,比如着陆、巡视、采样等,以验证技术并获取基础科学数据。现阶段,月球的探索进入集科学、技术、资源利用与国际合作于一体的多维度阶段,将不再是零散、独立的任务,而是形成多阶段、跨任务、长期的布局。我国探月工程坚持“一张蓝图绘到底”原则,前三期分别以“绕、落、回”作为阶段性目标,即为典型阶段性探索案例。美国Artemis计划也采用阶段性任务划分,通过猎户座载人飞船、SLS重型运载火箭、门户地月空间站、xEMU航天服系统、载人月面着陆系统等核心要素,分别实现无人绕月、载人飞行、载人登月三个递进式任务。每一阶段任务不仅要解决特定的科学问题或技术难题,还需要为下一阶段任务的推进提供积累的经验与技术验证。

尽管世界各国尚未建立月球常态化探索能力,但针对近

地轨道空间的常态往返已形成实践经验,实现从短期、一次性任务向长期、稳定运营的模式转型。1992年,我国提出载人航天三步走计划,空间站逐步实现“能上天、能出舱、建立小型空间站”的阶段性任务。完成在轨建造后,便正式进入应用与发展阶段,开展常态化载人与货运任务。从初期的人员间断访问方式转换为由载人飞船实现的人员轮换模式,以支持进一步解决较大规模的、长期有人照料的空间应用问题。与我国类似,国际空间站发展历程也经历了多次技术迭代与改良,最终组装为规模庞大、功能复杂的综合性空间科研平台,能够支持多名宇航员同时驻留。针对月球探索任务,美国已提出常态化探测设想,计划在建立月球“大本营”后,每年派遣宇航员执行载人探测任务。具体通过“门户”空间站作为中转平台^[17],结合强大的SLS火箭与猎户座飞船,确保高效运输能力。同时,NASA正与商业伙伴SpaceX合作开发星舰,其可重复使用设计将大幅降低太空飞行成本,提升常态化探测任务可行性。

参考空间站建设及发展路径,可以预见月球基地建造也将最终呈现阶段探索与常态任务共存的发展趋势。统筹规划两类任务是确保月球基地建造与深空任务成功实施的关键。从中美探月规划可以看出,系统性阶段任务部署最终目标都指向月球基地等大型复杂工程,以提供中长期月球探测能力。例如我国探月工程四期提出的“勘、建、用”三大任务目标,通过系统规划,逐步解决技术难题,建设并运营月球基地。常态任务则基于系统性阶段探索的建设成果,推动月球基地向一个长期稳定的科学研究、资源利用和生命支持平台过渡,验证后续阶段探索中提出的技术方案的可行性,且能根据月球环境的变化和需求,不断调整和优化系统,保障基地的持续运转。以我国常态化运行的空间站平台为例,其搭载的模拟月壤砖服役实验板块将推动验证月球基地建造技术方案,以支持未来原位建造月球基地阶段任务实施。综上,阶段探索与常态任务的结合形成了一个动态发展的系统,为月球的长期探索和深空任务提供了全面支撑。

1.4 地月空间与更远深空相结合

地月空间探索已积累大量经验,总体发展趋势朝大规模商业化开发的方向迈进。随着技术的不断进步,特别是航天发射成本的逐步降低和私营企业的积极参与,从政府主导逐渐转向多元化的市场驱动模式^[18],吸引了众多私营企业和国际伙伴的积极参与,共同推动资源探测、太空旅游、科研服务等多个领域的创新与发展。NASA已通过“商业月球有效载荷服务”任务与多家商业公司签订了合同,以开发能够将小型有效载荷送往月球表面的着陆器。针对未来太空政策规划,美国 *Aerospace Industries Association 2025 Space Priorities* 文件将“商业航天”列为三大核心板块之一。日本宇宙航空研究开发机构与汽车制造商丰田合作,开发了一款名为“月球巡航舰”的月球车原型,计划用于未来月球任务。同时,

月球作为一个可供人类长期驻留的地方,也为太空旅游、太空工业等新兴市场提供了巨大的商业潜力。美国SpaceX公司宣布了多项商业合同,如绕月旅行任务等。这些趋势表明,未来地月空间将不仅仅是科研与探索的领域,更是一个以经济利益为驱动的大规模商业化开发的舞台。

除月球外,更远深空探测事业已取得阶段性成果,多国提出深空探测计划^[19],其总体发展趋势指向地外生命探寻与行星宜居性探测。我国天问一号任务已通过一次发射实现火星“绕、落、巡”,开展地形地貌探测^[20];天问二号任务计划将实现近地小行星伴飞、取样和返回,用于研究小行星和太阳系早期行程及演化;天问三号任务则以火星移居环境演化为主线,以生命痕迹探寻为第一科学目标。此外,英国主导的Rosalind Franklin漫游者也计划于2028年发射到火星。阿联酋更是直接计划于2117年建立首个火星宜居基地^[21]。NASA同样规划了火星采样返回任务,预计通过2033年前的三次发射任务,收集火星上的约500克岩石、尘埃样本被送回地球^[22]。除火星外,美国针对更远深空探索任务专门设计了“新边疆”探测计划,以完成冥王星、木星等行星探测任务。此外,还规划了欧罗巴快船、天王星轨道器与探测器计划等,旨在探寻木卫二、天王星等星体的宜居性并寻找生命存在的迹象。

地月空间为深空探索提供高效的补给和中转基地,同时也是测试和验证新技术的理想场所,二者呈统筹发展态势。美国于2017年即颁布SPD-1,将月球定位为太空探索的“枢纽”。2018年,NASA公布的*National Space Exploration Campaign Report*进一步明确了美国未来深空探索的整体思路,即利用地月空间助力重返月球,并以月球为“跳板”探索火星。而更远深空任务则为地月空间开发提供了技术需求和应用场景,推动月球资源采集、利用及基地建造等方面的发展。地月空间的开发与深空任务的推进是相辅相成的,前者为后者提供基础设施和资源保障,而后者则促使地月空间开发逐步成为一个可持续、商业化运营的生态系统。通过结合这两个领域,不仅能降低探索深空的成本,还能对人类进入其他星球、实现星际生存铺平道路。

2 我国月球基地建造的挑战与机遇

2.1 月球基地建造挑战

探月进入“认识与利用并重”新时期,国际竞争日趋激烈。随着全球主要航天国家的月球探测计划相继推出,建设永久性月球基地并开发利用月球的探月目标显示出强烈的竞争态势。在此背景下,我国不仅面临月球基地建造的技术创新挑战,还需要在国际合作与竞争中寻求建立协调与合作机制。

我国月球基地建造的目标、规划与路线图尚不清晰。尽管我国探月工程成果显著,但月球开发与利用的长远目标和详细规划仍然模糊,缺乏清晰的探月目标和路线图作为月球基地建造的需求牵引,可能导致工程实施过程中资源分配不

均、技术研发方向不明确、系统工程管理难以协调等问题。

月球基地建造服役面临月面极端环境的巨大挑战。月球表面环境恶劣，包括强辐射、大温差、小重力、高真空等极端环境，对基地选址、材料、结构和工艺装备等关键技术提出严峻挑战，必须预先进行大量环境模拟试验和技术验证，以确保月球基地能够在真实月面环境中长期稳定运行。

2.2 月球基地建造机遇

国际月球科研站为月球基地建造提供重要验证场景。国际月球科研站将成为重要的实验场所，尤其是为月球基地建造和月球原位资源利用技术的可靠性和适用性提供验证条件。同时，国际月球科研站还是国际合作技术研发的平台，可以提高研发效率、分担研发成本、共享技术成果，增强国际影响力。

载人登月及其后续任务为月球基地建造提供新发展格局。载人登月任务的推进将产生月球表面长期驻留、月球原位资源开发等一系列后续任务，这不仅将催生更高层次的月球基地建造任务需求，为探索火星奠定坚实的技术基础，还会带动相关产业和技术发展，提供技术转移和应用机会。

智能建造和航天强国目标为月球基地建造提供重要保障。国家大力推进智能建造和航天强国目标，将在月球基地的支撑技术和建造目标方面产生协同效应。航天强国建设为月球基地建造提供政策支持，而智能建造目标可以为月球基地建造提供关键技术保障，通过月球基地建造目标加速智能建造技术的创新与迭代。

3 我国月球基地建造的目标

我国月球基地建造的目标体系包括科学目标和工程目标两个方面，如图1所示。科学目标侧重于知识探索和积累，为工程目标提供明确的方向和需求。工程目标则侧重于技术的实现和应用，通过建设必要的基础设施保障科学目标的实现。

3.1 科学目标

科学目标的设定需要既符合科学研究的最前沿需求，又能够在实际任务执行中得到有效探索^[23]。目前国际月球探测科学研究的三大前沿领域包括月球科学研究、月基科学研究和月球原位资源勘查利用。这些科学目标可以为月球基地的选址规划、勘察设计、建造运维和原位资源开发等工程任务供科学依据。

3.2 工程目标

为了提供长期驻留的生命保障，建立安全稳定运行的科研平台并开发利用月球资源，需要建设一个功能全面、高度集成、智能运维的月球基地基础设施群系统。近期的月球基地建造工程目标已纳入国际月球科研站的建设计划，包括地月运输设施、月面长期支持设施、月面运输与操作设施、月球科学设施和地面支持及应用设施。基于更长远的月球和深空探索目标，月球基地建造的工程目标体系设计由6大基础设施群组成，其目标定义、功能划分及建造对象如表2所示。

科学研究设施用于开展科学实验和观测活动，能够提供低重力、大温变、高真空和强辐射等多场耦合的复杂实验环境，同时具备优越的地外星系观测条件。此外，还便于开展原位采样任务，以分析月球地质构造、物理化学演化等科学问题。

能源设施是满足月球基地建设运行，持续科学探索和原位资源开发的电力供应基础设施。包括开发利用月表太阳能和核聚变等能源资源的发电设施，以及能量存储与分配网络，即在月表构建高效、稳定、安全的广域覆盖智能电网利用基础设施系统。

通讯导航设施是为月球探测器、机器人等装备以及未来可能的月球居民提供信息通信和精确定位导航服务的基础设施系统，由无线通信基站、月面定位基站、通信光缆线

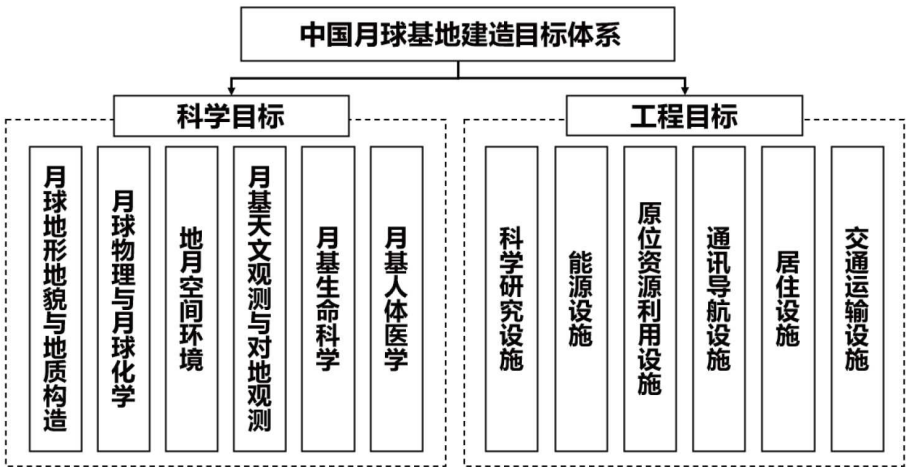


图 1 月球基地建造目标体系
Figure 1 Objective system for lunar base construction

表 2 六大基础设施群定义、功能划分及建造对象

Table 2 Definition, functional division, and construction objects of six major infrastructure clusters

工程目标	功能划分	建造对象示例
科学研究设施	实验测试中心	通用基础实验室
		生物实验室
		精密物理实验室
		放射性实验室
	观测中心	月震观测实验室
		月基天文观测台
		月基对地观测台
能源设施	发电中心	太阳能发电站
		核能发电站
		地热发电站
		变电站
	输配电系统	输电线路
		配电站
原位资源利用设施	资源开采中心	制氧车间
		水冰开采车间
		冶金车间
		工业制造厂房
	资源加工中心	废物回收处理厂房
通讯导航设施	通讯系统	无线通信基站
		通讯光缆线路
		地面信标阵列
		定位授时基站
	导航系统	导航数据中心
居住设施	月表居住系统	刚性居住舱
		柔性展开居住舱
		开放式防护掩体
		密闭式防护掩体
		熔岩管道改造与利用
		地下结构开挖建造
		模块化组装居住舱
		充气式居住舱
	月轨居住系统	旋转式居住舱
交通运输设施	发射着陆系统	着陆垫和发射台
		着陆架与电梯
		着陆场降尘挡墙
		道路路基与路面
		移动车驻停驿站
		资源输送管网系统
		轨道交通运输系统
	月面交通运输系统	

路以及通信导航卫星等组成，涵盖月表活动和地月活动两个层次的通讯导航服务。

居住设施是满足人类月面生活需求的生命保障设施，集成生命维持、资源循环利用、室内环境控制、健康监测与

心理支持等功能。其中，月面居住单元是人类在月球的主要工作和生活场所，可利用高水平原位资源利用技术建造，也可直接从地球发射组建，以承担短期驻留、物资转运与科研等功能。

交通运输设施是用于人员、设备和物资往返于月面、月面-月轨以及月球-地球之间的多层次交通运输系统。其中,发射-着陆系统是一个用于发射和降落不同类型航天器的月面太空港,月面交通运输系统是包括月球车、月球轨道列车等移动运载工具和月面道路、轨道、管道等设施共同构成的综合月面移动网络。

生产设施旨在建立月球原位资源开采加工、产品制造、到回收利用的全产业链工业体系,为月球长期居住、科研活动乃至未来月球经济的萌芽提供了物质基础与可持续发展动力。

4 我国月球基地建造的政策路径建议

4.1 加快地月空间发展顶层设计

制定符合我国国情的《国家地月空间发展目标》,为我国未来深空探索的布局提出顶层规划和设计。在总体规划方面,加强月球基地建设等未来航天重大任务间的统筹协调,包括载人航天任务中的月面设施与无人探测任务中的国际月球科研站,使月球基地建造任务形成一条共同服务于顶层目标的清晰主线。在技术路线方面,结合“预制-发射”建造技术路线与原位建造技术路线的技术准备水平、工程实施条件等因素,充分评估不同发展阶段下的技术契合度,提高月球基地的综合部署能力,提供月面科学活动必需的各种功能设施支持。

4.2 推动原创技术与项目多层次布局

设立面向前瞻性技术的项目研发体系,支持月球基地建设等深空探索关键技术研发。支持组建跨学科创新团队,结合技术发展方向与具体应用需求,提出原创性、突破性的技术构想,促进系统性解决方案的提出。对于概念性的技术构

想,提供有限度的资助进行初步可行性研究;对于高潜力的创新技术概念,提供滚动项目支持,推动技术原型的研发与验证;对于已具备进入工程化阶段成熟度的技术,进一步加大资金投入,进行应用验证、系统集成。构建更加灵活的项目评估和管理体系,支持原创技术的熟化过程,推动月球基地建造技术从创新概念向实际航天任务转化。

4.3 培育未来太空产业市场生态体系

拓展基于月球基地基础设施的商业航天服务,大力培育太空经济性新兴产业,促进我国太空经济产业规模化发展。发挥我国未来产业市场规模的天然优势,以及国有企业在太空商业生态体系中的主力军作用,支持航天科技集团等大型国有企业在商业航天领域继续做大做强,牵头建设太空经济产业平台,整合供应链、应用场景、终端用户等产业资源,培育产业规模和建构创新生态。鼓励引导创新型科技企业聚焦新兴市场需求和技术应用,形成优势互补的上下游产业链,共同完善地月空间商业服务供给体系,推动太空经济产业集群发展。

4.4 扩大共商共建共享国际合作框架

推动构建国际月球开发伦理准则与法律框架,确保月球探索和利用活动遵循国际原则,防止太空资源掠夺式开发。通过法律界定活动范围、责任归属及争端解决机制,为各国及私营部的太空活动提供明确指导,促进合作多于竞争,保障月球的可持续发展与和平利用,建立公正合理的地月空间全球治理秩序。利用现有机制积极与世界各国开展平等互利、合作共赢的地月空间合作,通过技术合作、开放数据及合作平台等形式,促进更多发展中国家得以贡献其人才与智慧,同时共享太空探索利益,努力构建地月空间“人类命运共同体”。

致谢 感谢中国工程院咨询项目“中国月球基地建造战略研究”(2023-XZ-90)资助。

推荐阅读文献

- 1 Gibney E. How to build a Moon base. *Nature*, 2018, 562: 474–478
- 2 Afshinnekoo E, Scott R T, MacKay M J, et al. Fundamental biological features of spaceflight: advancing the field to enable deep-space exploration. *Cell*, 2020, 183: 1162–1184
- 3 Hashimoto T, Hoshino T, Tanaka S, et al. Japanese moon lander SELENE-2—Present status in 2009. *Acta Astronaut*, 2011, 68: 1386–1391
- 4 China National Space Administration. Publish of 7-meter resolution full moon image from Chang'E-2 (in Chinese). *Aerospace China*, 2012, (2): 10–11 [国家航天局. 嫦娥二号7米分辨率全月球影像图发布. *中国航天*, 2012, (2): 10–11]
- 5 Lu T, Zhu K, Chen S, et al. The 1:2,500,000-scale global tectonic map of the Moon. *Sci Bull*, 2022, 67: 1962–1966
- 6 Page T. Manned Space Exploration: case for Apollo. *Science*, 1970, 170: 1033–1034
- 7 Iqbal W, Head Iii J W, van der Bogert C H, et al. Slopes along Apollo EVAs: astronaut experience as input for future mission planning. *Acta Astronaut*, 2024, 223: 184–196
- 8 Hady G G, Abigail C D, Sebastian H, et al. ALCIDES: a novel lunar mission concept study for the demonstration of enabling technologies in deep-space exploration and human-robots interaction. *Acta Astronaut*, 2018, 151: 270–283

- 9 Flahaut J, van der Bogert C H, Crawford I A, et al. Scientific perspectives on lunar exploration in Europe. [npj Microgravity](#), 2023, 9: 50
- 10 Wu W, Wang C, Liu Y, et al. Frontier scientific questions in deep space exploration (in Chinese). [Chin Sci Bull](#), 2023, 68: 606–627 [吴伟仁, 王赤, 刘洋, 等. 深空探测之前沿科学问题探析. 科学通报, 2023, 68: 606–627]
- 11 Wang C, Lin Y T, Pei Z Y, et al. Key scientific questions related to the lunar research station (in Chinese). [Bull Nat Nat Sci Found China](#), 2022, 36: 830–840 [王赤, 林杨挺, 裴照宇, 等. 月球科研站的关键科学问题. 中国科学基金, 2022, 36: 830–840]
- 12 Wessen R R, Propster P, Cable M, et al. Developing compelling and science-focused mission concepts for NASA competed mission proposals. [Acta Astronaut](#), 2022, 191: 502–509
- 13 Pei Z Y, Wang Q. Strategic concept of resource utilization development route of the International Lunar Research Station (in Chinese). [J Astronaut](#), 2024, 45: 625–637 [裴照宇, 王琼. 国际月球科研站资源利用发展路线战略构想. 宇航学报, 2024, 45: 625–637]
- 14 Zhou C, Gao Y, Zhou Y, et al. Properties and characteristics of regolith-based materials for extraterrestrial construction. [Engineering](#), 2024, 37: 159–181
- 15 Mandt K E. The scientific importance of the lunar environment. [Science](#), 2024, 384: eado9563
- 16 Burns J O, Kring D A, Hopkins J B, et al. A lunar L2-Farside exploration and science mission concept with the Orion Multi-Purpose Crew Vehicle and a teleoperated lander/rover. [Adv Space Res](#), 2013, 52: 306–320
- 17 Kikuchi J, Nakamura R, Ueda S. Comparison of transfer trajectory to NRHO and operation plan for logistics resupply mission to gateway. [Acta Astronaut](#), 2024, 223: 577–584
- 18 Robinson D K R, Mazzucato M. The evolution of mission-oriented policies: exploring changing market creating policies in the US and European space sector. [Res Policy](#), 2019, 48: 936–948
- 19 Rathnasabapathy M, Slavin M, Wood D. Role of emerging nations in ensuring long-term space sustainability. [Acta Astronaut](#), 2024, 219: 8–16
- 20 Liu J, Ren X, Yan W, et al. A 76-m per pixel global color image dataset and map of Mars by Tianwen-1. [Sci Bull](#), 2024, 69: 2183–2186
- 21 Amiri H E S, Brain D, Sharaf O, et al. The emirates Mars mission. [Space Sci Rev](#), 2022, 218: 4
- 22 Sarli B, Bowman E, Cataldo G, et al. NASA's capture, containment, and return system: bringing Mars samples to Earth. [Acta Astronaut](#), 2024, 223: 270–303
- 23 Zhou J P, Wu J. Coordinated development of space science, space technology, and space application in China (in Chinese). [Strat Study CAE](#), 2023, 25: 59–66 [周建平, 吴季. 统筹空间科学、空间技术、空间应用协调发展的思考. 中国工程科学, 2023, 25: 59–66]

Summary for “月球基地建造的发展趋势、目标体系与政策路径”

The development trend, objectives, and policy path of lunar base construction

Cheng Zhou^{1,2}, Yuyue Gao^{1,2}, Wenbo Qin^{1,2} & Lieyun Ding^{1,2*}

¹ School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

² National Center of Technology Innovation for Digital Construction, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

* Corresponding author, E-mail: dly@hust.edu.cn

Since the turn of the 21st century, lunar exploration has seen a shift from singular missions to strategic plans aimed at establishing permanent lunar infrastructure. This new wave emphasizes comprehensive planning and phased implementation. Key initiatives include the U.S.'s Artemis program, which seeks to return humans to the Moon and prepare for deep-space exploration; the European Space Agency's "Moon Village" concept, envisioning an international hub for lunar activities; and China's International Lunar Research Station. These plans highlight the dual goals of understanding and utilizing the Moon. As a result, building a lunar base as a stepping stone for deep space exploration has become a priority for major spacefaring nations. The international development of lunar base construction showcases four key trends. Firstly, there is a growing integration of unmanned and manned missions. Unmanned probes have traditionally led lunar exploration with a focus on high-precision investigations. Meanwhile, manned missions are expanding human knowledge of the universe, moving toward extended stays and broader explorations. The distinction between unmanned and manned mission strategies is blurring, aiming for a unified approach. Secondly, scientific research is increasingly combined with resource utilization. The Moon provides an unparalleled specimen for studying the origins of the Earth-Moon system and the Solar System. Conducting research in this unique environment has become an international trend. Based on these findings, countries are developing plans for *in-situ* resource utilization (ISRU), which is diversifying. Scientific goals and ISRU objectives are mutually reinforcing, and evolving together. Thirdly, lunar exploration is transitioning from phase-specific missions to a combination of phased exploration and routine tasks. Following the systematic planning seen in space station development, lunar base construction is expected to feature both exploration phases and regular operations, reflecting more complex task planning. Lastly, exploration within the Earth-Moon space is being integrated with deeper space endeavors. Experience from Earth-Moon exploration is facilitating commercial exploitation, while deep-space efforts are focused on extraterrestrial life and planetary habitability. The Earth-Moon region serves as a testing ground for new technologies and a stepping stone for deep-space missions, promoting coordinated development. These trends indicate a future where multidisciplinary approaches and international cooperation will be crucial for advancing lunar presence and beyond. Based on the aforementioned analysis, this discussion reveals the opportunities and challenges faced by China in lunar base construction. Challenges encompass: (1) entering a new era of lunar exploration marked by intensifying international competition; (2) the strategic goals, planning, and roadmap for China's lunar base construction are not yet clear; (3) the extreme lunar surface environment poses significant challenges to *in-situ* construction and operation. Opportunities include: (1) the International Lunar Research Station provides a crucial testing ground for lunar base construction; (2) manned lunar missions and subsequent tasks offer new development frameworks for base building; (3) advances in intelligent construction and China's ambition to become a space power provide essential support for lunar projects. To address these factors, a strategic goal system for lunar base construction is outlined, covering both scientific and engineering objectives. Scientific goals focus on exploration and knowledge accumulation, guiding and defining the direction and requirements for engineering efforts. Engineering goals emphasize the realization and application of technology, ensuring necessary infrastructure supports scientific aims. Strategic recommendations are proposed from multiple angles, including top-level planning, innovation in technology, fostering the space industry, and establishing an international cooperation framework. These measures aim to inform scientific decision-making and ensure steady progress in China's lunar base construction endeavors.

lunar base, extraterrestrial construction, *in-situ* resource utilization (ISRU), development trend, policy path

doi: [10.1360/TB-2024-1356](https://doi.org/10.1360/TB-2024-1356)