

# 月球探测发展与关键技术展望

任筱强<sup>1</sup>, 吴伟仁<sup>1</sup>, 王洪雨<sup>1</sup>, 张哲<sup>1</sup>, 张龙喜<sup>1</sup>, 张兴华<sup>1</sup>, 李茂登<sup>1,2</sup>, 张朋硕<sup>1</sup>, 田涧<sup>1</sup>

(1. 深空探测实验室, 北京 100195; 2. 北京控制工程研究所, 北京 100094)

**摘要:** 在调研国内外主要航天国家月球探测任务规划的基础上, 分析了月球探测4大趋势。瞄准未来实现月球探测领域长期、可持续发展, 提出了在提高地月空间进出能力、实现月面能源全天时稳定供应、建立高速信息互联互通网络、增强智能装备作业能力、实现月球资源规模化开发利用等方面开展关键技术攻关的建议, 可为月球探测后续任务论证实施提供参考。

**关键词:** 月球探测; 资源开发; 信息互联互通网络; 智能装备

**中图分类号:** V41

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-9287(2025)02-0099-11

**DOI:** 10.15982/j.issn.2096-9287.2025.20250014

**引用格式:** 任筱强, 吴伟仁, 王洪雨, 等. 月球探测发展与关键技术展望[J]. 深空探测学报(中英文), 2025, 12(2): 99-109.

**Reference format:** REN X Q, WU W R, WANG H Y, et al. Prospects of the lunar exploration development and key technologies[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2025, 12(2): 99-109.

## 引言

月球作为距离地球最近的自然天体, 是继陆、海、空、天之后人类的新疆域。月球拥有独特的位置、物质、环境资源, 蕴藏着地球、太阳系起源和演化的奥秘, 具有广阔的探测前景, 是深空探测的首选目标, 也是人类走向更远深空的前哨站和试验场<sup>[1-2]</sup>。

20世纪50年代末, 前苏联成功发射了第一个月球探测器“月球1号”(Luna 1), 开启了人类月球探测的时代。美国奋起直追, 形成了美、苏两国围绕月球探测, 长达近20年的太空竞赛格局, 掀起了第一轮月球探测高潮。1976年前苏联发射“月球24号”(Luna 24)探测器之后, 月球探测进入了长达约20年的相对平静期。直到1994年, 美国“克莱门汀号”(Clementine)探测器, 首次发现月球南极可能存在水冰。随后, 美国1998年又发射了“月球勘探者号”(Lunar Prospector, LP)探测器, 发现在月球南北两极均存在水冰的证据<sup>[3-4]</sup>, 由此开启了延续至今的第二轮探月热潮。美国、俄罗斯、欧空局、日本、印度、中国等纷纷加入月球探测行列, 并取得了一系列技术突破和科学发现。在第二轮月球探测热潮中, 月球资源勘探、空间科学研究、空间技术突破等特征显著, 探测手段更加丰富<sup>[5]</sup>。

本文在调研世界主要航天国家月球探测任务规划的基础上, 提出了月球探测发展的4大趋势及所需突破的关键技术。

## 1 国外月球探测任务规划

进入21世纪之后, 美国、俄罗斯、日本、印度和欧洲航天局(European Space Agency, ESA)等主要航天国家和组织都制定了月球探测发展规划, 旨在探索利用月球独特资源优势, 开展长期可持续的月球探测活动。

### 1.1 美国

2020年, 美国国家航空航天局(National Aeronautics Space and Administration, NASA)发布了《可持续月球探索和开发计划》报告, 未来10年重点任务包括: 无人月表探测任务、“阿尔忒弥斯”计划(Artemis program)早期任务及2024年后的任务规划、更长期的月球计划和初期载人火星任务<sup>[6]</sup>。2022年11月, 美国白宫科技政策办公室(Office of Science and Technology Policy, OSTP)发布了《国家地月空间科技战略》, 首次提出地月空间早期发展的四个最高优先级科学和技术目标: 支持研究和开发, 以实现未来地月空间的长期发展; 扩大地月空间国际科技合

作;将美国的空态势感知能力拓展到了地月空间;通过可扩展和可互操作的方式实施地月空间通信和定位-导航-授时。2024年12月,OSTP又发布《国家地月科学技术行动计划》,明确了美国在未来5年内应采取的42项具体行动<sup>[7-9]</sup>。

“阿尔忒弥斯”计划分为4个阶段<sup>[10]</sup>:①重返月球,在月球和月轨重新构建人类存在所需的系统和能力;②基础探测,增强月球探测的系统和操作能力,支持完成复杂的月轨和月面任务,实施面向应用和火星的探测任务;③持续月球开发,支持月球局部/全月面资源开发利用,提供更多经济性的月球开发机会,保持人类在月轨和月面定期稳定存在;④载人登陆火星,在火星建立人类存在所需的系统和能力。

在上述4个阶段基础上,NASA规划了近中期和远期任务,主要任务概况见表1。

表1 阿尔忒弥斯计划主要任务

Table 1 Main missions of the Artemis program

任务名称	主要内容	最新规划/实施时间
阿尔忒弥斯1号	无人绕月试飞,测试太空发射系统和猎户座载人飞船的能力	2022年11月
阿尔忒弥斯2号	验证载人状态猎户座飞船的所有系统在深空环境中能否正常运行	2026年4月
阿尔忒弥斯3号	将宇航员送到月球南极并实施登月任务,2名宇航员在月球表面停留约一周,进行科学实验	2027年
阿尔忒弥斯4号	4名宇航员进驻“门户”月球轨道空间站,并适时开展月面着陆(也可能不登陆月球)	2028年9月
阿尔忒弥斯5号	4名宇航员进驻“门户”月球轨道空间站,2名宇航员再次登陆月球南极	2029年

近中期任务规划。NASA于2021年启动“商业月球有效载荷服务”(Commercial Lunar Payload Services, CLPS)计划<sup>[11]</sup>,发射无人月球探测器,进行科学研究和技术验证,为后续任务提供支撑。与此同时,NASA还将依次进行“阿尔忒弥斯1号”~“阿尔忒弥斯3号”任务,分别实现无人飞行测试、载人环月及载人登月目标。除此之外,NASA还计划在该阶段内启动“门户”(Gateway)空间站的建造工作,发射“动力和推进组件”(Power and Propulsion Element, PPE)及“居住和后勤舱”(Habitation and Logistics Outpost, HALO)。

远期任务规划。NASA计划建设月球基地,实现月面长期驻留,为未来深空探测任务奠定基础。通过实施“阿尔忒弥斯4号”(Artemis 4)等一系列任务实现:继续建设“门户”空间站,将其发展成为有人和无人任务的中转站,支持长期月球探测;在月球南极建立月球基地,开展科学探测和技术验证,实现原位资源利用,利用月球车探索偏远区域;通过多年在轨运

行及月面活动,获得执行长期载人深空活动的经验和信心,为开展载人火星任务奠定基础<sup>[12]</sup>。

## 1.2 俄罗斯

2019年2月,俄罗斯国家航天集团(Roscosmos)和俄罗斯科学院联合制定了《月球综合探测与开发计划草案》,提出在2040年前分阶段建立月球基地的发展规划<sup>[13-14]</sup>。由于Luna 25的意外失败,整个计划面临推迟风险。2023年10月,俄罗斯发布了无人月球探测计划修订版本,主要任务规划见表2。Luna 26将于2027年前后发射,主要是在环月轨道开展全月遥感探测,绘制月球表面矿物成分和月表水冰分布图,同时为后续任务提供通信中继服务。Luna 27预计不早于2028年发射,将两个相同的着陆器分别软着陆于月球南北两极区域,配备可钻深度达1 m的钻探装置,将对月壤、覆盖月球表面的岩石和尘埃开展研究。Luna 28将实现月球南极水冰采样并低温状态保存返回地球。Luna 29在月球轨道布设轨道站,Luna 30在月面部署能力更强的大型月球漫游车,Luna 31部署可重复使用着陆上升器,实现多次采集月球样品并运送到月球轨道。此后将实施载人登月计划,目标是2040年前,建造月球基地舱和载人月球车,并实现俄罗斯首次载人登月,2050年建成月球基地、配置钻探挖掘设备、试验开采和生产综合体以及天体物理观测站等<sup>[15-19]</sup>。

表2 俄罗斯月球探测计划主要任务

Table 2 Main missions of Russia's lunar exploration program

任务名称	主要内容	最新规划/实施时间
Luna 25	演练月球南极软着陆技术,研究月球南极月壤性质和组成,月球极地表面大气等离子体和尘埃	2023年8月
Luna 26	开展绕月探测,绘制月球表面矿物和月壤中水冰的分布图,同时为后续任务提供通信中继服务	2027年
Luna 27A/B	实现月球南北两极软着陆,探测水冰资源与极端环境适应性技术,为后续载人任务和月球科研站建设提供关键数据支撑	2028—2030年
Luna 28	月球南极样品低温状态保存返回。	未公布
Luna 29	月球轨道站	2031—2035年
Luna 30	月球漫游车	2031—2035年
Luna 31	多次采集月壤样品并运送到月球轨道	2031—2035年

## 1.3 欧洲航天局

2022年7月,欧洲航天局(European Space Agency, ESA)发布《“新世界”2030+战略规划图》,提出在月球探测方面,前期以参与阿尔忒弥斯计划为主,后续将以欧洲为主导,在2040年前实现在月面长期驻留。2025年4月,ESA又发布了《欧洲航天局发展战略

2040》, 提出在月球轨道和月球表面建设基础设施, 以支持无人/有人月球探测活动。在月面构建月面物资运输能力, 包括栖息地、新型月面移动设施、发电及电力分配设施、资源勘探及利用设施; 在地月空间构建通信和导航网络, 以支持在月面持续开展探测和开发活动; 参与“阿尔忒弥斯”计划, 并承担猎户座飞船及“门户”月球轨道站部分舱段研制任务; 研制“阿戈

尔英雄”月面着陆器 (Argonaut Lunar Lander), 初期运输科学载荷和物资至月面, 然后逐步提高投送能力, 运输更重的载荷, 为建设月面基础设施提供服务; 继续发挥欧洲的关键作用, 利用欧洲服务舱 (European Service Modules, ESMs) 在2030年前将执行“阿尔忒弥斯”任务的乘组送往月球并接回<sup>[20-21]</sup>, 如图1所示。

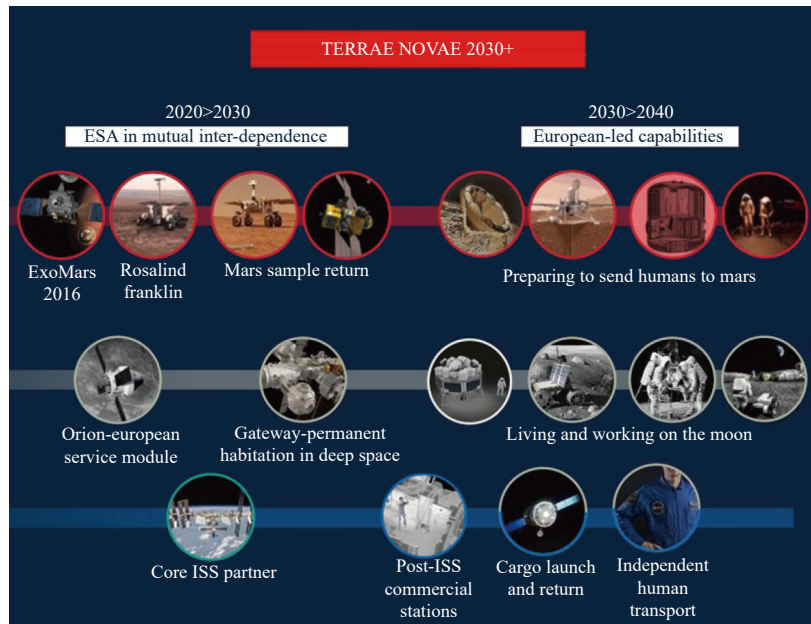


图1 “新世界”2030+战略规划图<sup>[20]</sup>

Fig. 1 Terra Nova 2030+ strategy roadmap<sup>[20]</sup>

ESA于2024年10月15日在国际宇航大会正式宣布启动“月光”(Moonlight)计划: 旨在为未来20年内欧洲的月球探测任务提供通信和导航服务。计划在2026年正式实施, 2028年开启初步服务, 2030年前全面投入运营, 将优先覆盖月球南极地区<sup>[22]</sup>。

同时, ESA计划在2030年代执行5次欧洲大型货运着陆器任务 (European Large Logistics Lander, EL3), 每次任务从发射到着陆历时分别为一周到一个月不等。该月球着陆器主要由3个部分组成: 负责飞往月球并着陆的月球下降组件、有效载荷及作为其它两个组件接口的货物平台, 可与“门户”轨道站对接。预计着陆器可把重达2 100 kg的货物, 包括航天员所需的食物和水等运送到月球, 并可在月球表面的任何地点实现精确着陆, 精度在100 m内<sup>[23-24]</sup>。

#### 1.4 日本

2019年3月, 日本航空航天学会 (Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, JSASS) 发布了《JSASS太空愿景2050》, 提出将在2050年建设月球

基地, 水、能源、推进剂等物资将主要依靠原位资源利用在月球生产, 并且指出要想实现2050愿景, 离不开国际合作<sup>[25]</sup>。

2020年, 日本宇宙航空研究开发机构 (Japan Aerospace eXploration Agency, JAXA) 在和平利用外空委员会科学技术分委会 (COPUOS STSC) 会议上阐述了日本月球探测路线图, 计划在2060年前, 历经环控生保/月面运输/着陆技术验证、高质量有人月球探测技术验证、基础设施建设、民营开发利用四个阶段, 建成月球基地<sup>[26]</sup>, 如图2所示。

日本由于尚不具备独立实施月球探测任务的能力, 其月球探测任务更多的是与传统盟友和友好国家进行合作。2020年日本与美国签署《阿尔忒弥斯协定》, 加入阿尔忒弥斯计划, 将承担增压月球车、通信导航星座、月球极地探索等方面的工作, 并拟借此实现载人登月。2021年日本与美国签署《关于“门户”空间站的谅解备忘录》, JAXA将为“门户”提供国际居住舱 (International Habitation module (I-Hab) 环境控

制和生命支持系统、电池、热控制和图像组件。目前 JAXA 正在开发 HTV-X 转移飞行器, 未来将其用于向“门户”月球轨道站运输物资。此外, 日本计划与印度

联合实施月球南极探测任务 (Lunar Polar Exploration, LuPEX), 并负责研制月球车, 将在月球南极区域开展巡视探测<sup>[27-30]</sup>。

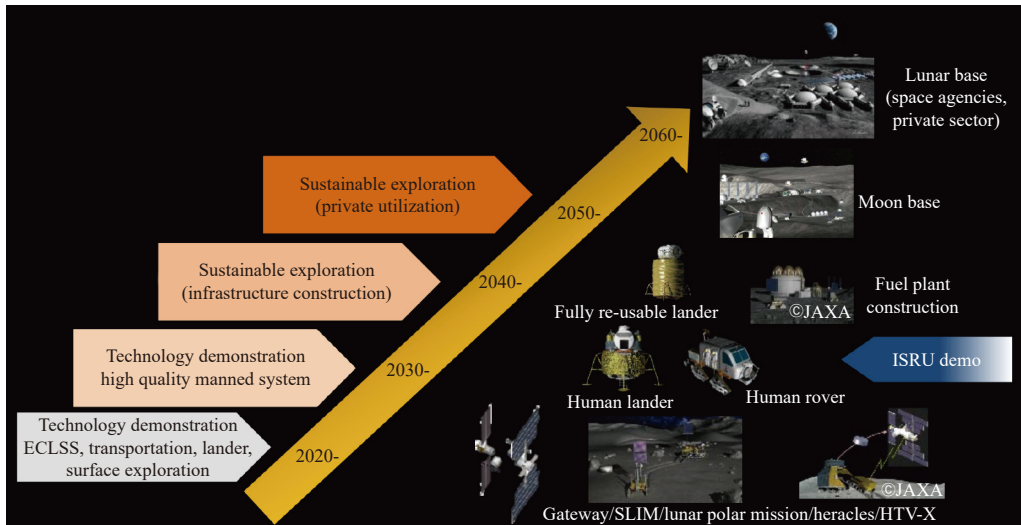


图 2 JAXA 月球探测路线图 (长期)<sup>[26]</sup>

Fig. 2 JAXA'S Lunar exploration roadmap (long-term)<sup>[26]</sup>

在2023年日本地球科学联盟会议上, JAXA介绍了月球探索增强与演示 (Lunar Exploration Augmentation and Demonstration, LEAD) 任务, 将执行几项有望取得全球顶级成果的科学任务以及为未来可持续月球探测进行的技术演示验证任务。LEAD任务预计每两到三年发射一次, 其首次飞行预计不会早于2028年。LEAD任务主要由两部分组成, 即有效任务载荷系统和由H3运载火箭及小型着陆器组成的运输系统, 未来有望实现商业化运营<sup>[31]</sup>。

### 1.5 印度

2024年12月, 印度空间研究组织 (Indian Space Research Organization, ISRO) 发布了《印度航天愿景2047》, 并在2025年全球航天探索大会 (The Global Space Exploration Conference 2025) 上宣布, 其目标是2035年前建立巴拉蒂亚安塔里克什空间站 (Bharatiya Antariksh Station, BAS), 2040年前实现印度人登陆月球, 2047年前后建立月球基地。为此, 印度政府批准了四个重要项目: 2027年前将联合商业航天机构发射“月船4号” (Chandrayaan 4), 着陆于“月船3号” (Chandrayaan 3) 的附近, 验证月球着陆与返回技术并实现采样返回; 2028年前完成加甘杨 (Gaganyaan) 载人飞船后续任务并建造BAS第1个模块, 实施金星轨道飞行器任务 (Venus Orbiter Mission, VOM), 以研究金星表面和地下、大气过程以及太阳对金星大气的

影响; 2032年前, 开发下一代卫星发射火箭 (Next Generation of satellite Launch Vehicle, NGLV), 该火箭为可重复使用的低成本运载火箭。此外印度还将与日本联合实施“月船5号” (Chandrayaan 5) 任务, 也被称为月球南极探测任务, 印度提供着陆器, 该任务将在“月船4号”之后进行, 主要任务是在月球南极寻找水资源<sup>[32-33]</sup>。

## 2 中国未来月球探测任务展望

中国探月工程2004年批复立项, 拉开了月球探测的帷幕。20多年来遵循由易到难的思路, 稳扎稳打、分步实施、步步为营, “嫦娥一号”~“嫦娥六号”顺利实施, 取得了丰硕成果。获得了7 m分辨率全月影像图, 通过一次任务实现绕月、日地L2点和“图塔蒂斯” (Toutatis) 小行星探测, 实现了人类首次月球背面软着陆, 获得了月球正面样品和人类首份月球背面样品, 发现月球存在第6种新矿物“嫦娥石”<sup>[34-35]</sup>。

2016年, 中国提出了建设国际月球科研站的设想, 并向多个国家和科研机构发出了共同建设的倡议, 统筹国内已实施和规划的任务建设国际月球科研站 (International Lunar Research Station, ILRS)。未来中国月球探测任务展望如图3所示, 将优先建立月面通信、能源等基础保障设施, 然后持续拓展, 科学研究、新技术试验、资源开发利用能力。

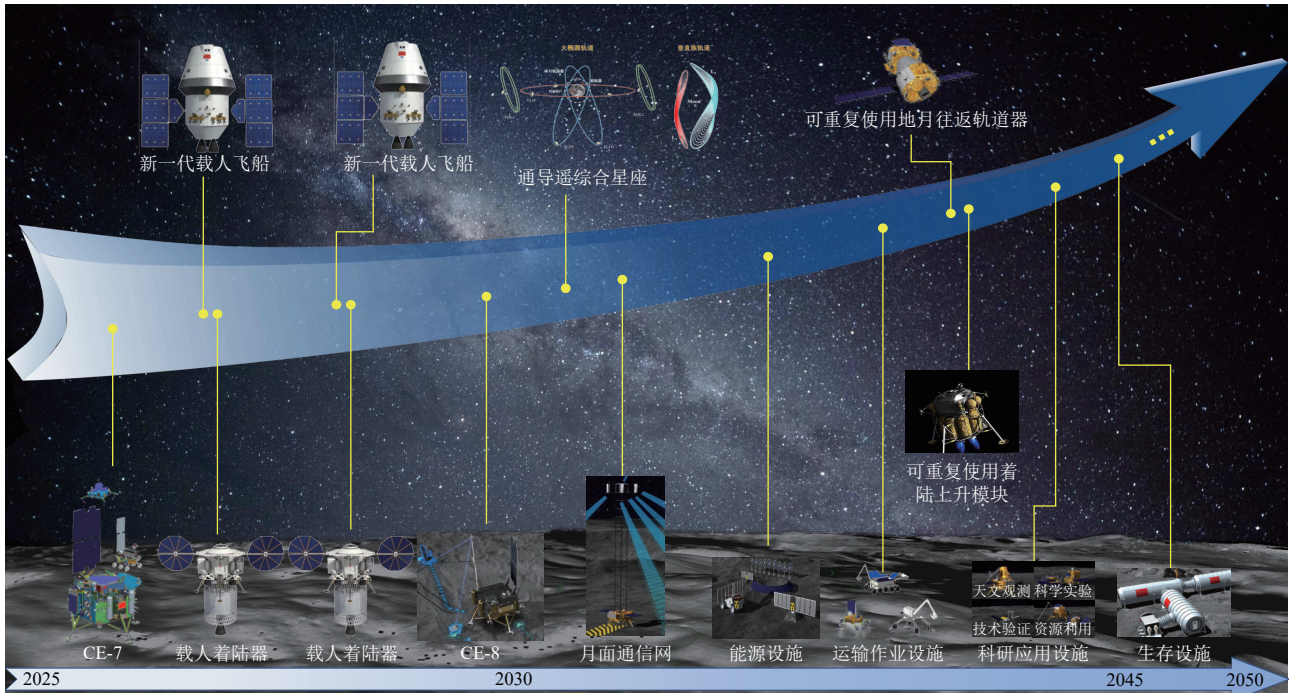


图 3 中国月球探测任务展望  
Fig. 3 Prospects of lunar exploration missions of China

2026年前后, 发射“嫦娥七号”(CE-7) 探测器, 在月球南极开展环境探测和资源详查, 寻找水冰存在的直接证据。2029年前后, 将实施以月球资源开发利用试验为主的“嫦娥八号”(CE-8) 任务, 开展月壤 3D 打印、原位样品分析等试验活动, 验证指挥通讯中枢技术、远程机器人探测和资源原位利用技术, 形成测月、巡天、观地和月面基础科学实验长期研究能力<sup>[36]</sup>。

中国将联合多国共同研制建设在月球表面与月球轨道长期自主运行、短期有人参与、可扩展、可维护的国际月球科研站, 其概念图如图 4 所示, 具备能源供应、中枢控制、通信导航、地月往返、月面科研和地面支持等保障能力, 可支持开展科学探测研究、资源开发利用、前沿技术验证等多学科、多目标、大规模科学和技术活动<sup>[36]</sup>。



图 4 国际月球科研站概念图  
Fig. 4 Scheme of ILRS

### 3 月球探测发展趋势

#### 3.1 由技术突破向重大科学发现和资源开发利用转变

新技术是人类破解科学难题的手段和工具。早期的月球探测活动, 以构建技术创新和演示验证平台, 开展月球探测所需共性关键技术演示验证, 寻求技术突破为主要目的。

在 20 世纪 50 年代开启的第一轮月球探测高潮中, 美、苏竞相以追求率先突破到达月球的新技术为目的, 向世人展示其以航天技术为代表的综合国力。进入第二轮月球探测热潮, 新加入月球探测行列的国家, 早期任务同样以突破新技术为主。例如, 欧洲首个月球探测器“智能 1 号”(Smart-1) 聚焦于验证新型太阳能电推进等技术, 中国的探月工程“绕”“落”“回”主要目标是突破绕月飞行、月面软着陆、采样返回等关键技术。

随着科学技术的不断发展, 各国月球探测任务不再仅仅是为掌握新的空间技术, 而是推动空间技术发展; 注重空间科学研究, 为科学研究提供更多有价值的数据和发现; 注重将空间科学及技术应用到实际场景, 为人类社会可持续发展提供更多解决方案。月球极区挥发份和水冰提取与利用、极区环境、智能机器人作业技术验证等成为当前月球探测的热点<sup>[37]</sup>。

在寻求重大科学发现方面, 各国科学家急切希望对月球地质开展多维度、全方位探测, 破解月球的起

源与演化之谜, 探寻太阳系起源和演化的答案; 充分利用地月之间特殊的位置关系, 开展月基天文观测, 以独特的视角研究系外行星的宜居性、对宇宙早期进行更精细的刻画。

月球蕴含着丰富的物质、环境和位置资源, 人类已经绘制了多个版本的全月地质图, 为后续月球资源详查、月球资源原位利用奠定了基础, 月球资源原位利用科学与技术成为月球探测活动的前沿和热点<sup>[38-39]</sup>。美国主导的“阿尔忒弥斯”计划、ESA的月球村以及中国提出的国际月球科研站均不约而同地瞄准月球南极, 并提出月球资源原位利用计划。

### 3.2 由短期访问式探测向长期驻留式探测转变

各国初期的月球探测以完成预先设定的技术验证任务和实现科学目标为主, 对目标天体或区域探测持续时间较短。随着技术的不断发展, 月球探测任务更注重可持续、可扩展, 能够灵活增加或替换探测设备以满足不断更新的探测任务需求; 注重对探测设备和基础设施的维护, 以确保设施设备长期稳定运行。

各国早期的月球探测活动, 以短期实现绕月、落月、采样返回为主。在新一轮探月热潮中, 美国“阿尔忒弥斯”计划提出在月球建立大本营, 其中所设计的概念图如图5所示, 保持在月面长期存在<sup>[40]</sup>; ESA的月球村旨在建立月面永久居住地; 中国发起的国际月球科研站目标是建立长期无人自主运行短期有人参与的综合科研设施。



图5 “阿尔忒弥斯”计划月球大本营概念图<sup>[40]</sup>

Fig. 5 Concept of the Artemis base camp<sup>[40]</sup>

### 3.3 由政府主导向政府牵引、商业探月力量深度参与转变

冷战时期, 美、苏掀起太空竞赛, 均由政府主导实施一系列月球探测活动。迄今为止中国实施的月球探测活动也都是在政府主导下进行的。此种模式下, 政府负责制定发展规划和实施方案、组织生产、实施发射、地面应用等全流程重要环节, 掌握了几乎全部的科研生产资源, 政府资金投入占比接近100%。随着国家层面的政策牵引, 商业航天公司快速成长, 越来

越多的商业航天公司参与到月球探测领域。

1984年美国颁布《商业空间发射法案》, 规定私营公司可以申请发射火箭, 政府给予一定的资金和技术支持。这是全球第一个鼓励商业航天发展的法律, 也是美国乃至世界商业航天发展的起点。2010年, 美国发布《美国国家航天政策》, 鼓励私营企业开发能够运送货物和人员到国际空间站的飞船和火箭, 并由政府购买服务。2020年, 美国发布新版《美国国家航天政策》, 提倡政府与私营企业合作, 大力发展地球低轨道商业航天运输能力, 并要求最大限度采办商业航天产品与服务。在政府政策牵引下, 美国商业航天迅速发展。“阿尔忒弥斯”计划吸纳了众多的商业航天公司参与其中, 各商业航天公司通过承担运载火箭、载人飞船、月球着陆器、科学载荷等研制任务积极参与新一轮月球探测活动<sup>[41]</sup>。NASA选定了14家商业航天公司参与CLPS计划, 采用商业航天公司研制的月球着陆器将NASA及其它参与方的有效载荷部署到月球, 参与CLPS计划的商业航天公司见表3。美国最近实施的4次月球探测任务中的着陆器“游隼”(Peregrine)、“奥德修斯”(Odysseus)、“雅典娜”(Athena)、“蓝色幽灵”(Blue Ghost), 均由商业航

表3 月球有效载荷服务承包商<sup>[42-43]</sup>

Table 3 Eligible vendors of CLPS<sup>[42-43]</sup>

公司名称	着陆器
宇宙机器人技术公司 (Astrobotic Technology)	游隼着陆器
深空系统公司 (Deep Space Systems)	巡游车
德雷珀实验室公司 (Draper Laboratory)	阿尔忒弥斯-7着陆器
萤火虫太空公司 (Firefly Aerospace)	萤火虫起源着陆器
直觉机器公司 (Intuitive Machines)	Nova-C着陆器
洛克希德·马丁太空公司 (Lockheed Martin Space)	McCandless着陆器
马斯腾太空系统公司 (Masten Space Systems)	XL-1着陆器
月球快线公司 (Moon Express)	MX-1、MX-2、MX-5、MX-9
超轨公司 (Obit Beyond)	Z01、Z02
蒂亚克纳米卫星系统公司 (Tyvak Nano Satellite Systems)	蒂亚克商业着陆器
蓝色起源公司 (Blue Origin)	MK1着陆器
太空探索公司 (SpaceX)	星舰
谷神星机器人公司 (Ceres Robotics)	CR商业着陆器
内华达山脉公司 (Sierra Nevada)	SNC着陆器

天公司研制,太空探索公司(Space X)的“猎鹰9号”(Falcon 9)运载火箭已经成功完成“奥德修斯”“雅典娜”发射任务,其正在研发的“星舰”将是“阿尔忒弥斯”计划载人着陆系统(Human Landing System, HLS)的重要组成部分。

近年来中国陆续出台相关政策,鼓励和引导民营企业从事特定航天科研生产活动。《国务院关于创新重点领域投融资机制鼓励社会投资的指导意见》(国发〔2014〕60号文)指出:鼓励民间资本参与国家民用空间基础设施建设。2015年,中国发布《国家民用空间基础设施中长期发展规划(2015—2025年)》,鼓励民营企业参与民用空间基础设施建设,标志着航天领域向民营企业开放<sup>[44]</sup>。2025年3月国家国防科工局发布《关于促进商业航天测控规范有序发展的通知》,明确商业航天测控是我国航天测控的重要组成部分,推动商业航天测控规范、有序、健康、高质量发展<sup>[45]</sup>。中国商业航天虽然起步晚,但是发展迅速,截至2024年5月,已有6型商业火箭成功完成轨道级发射,上百颗商业卫星完成了部署。虽然目前国内商业运载火箭和卫星仍聚焦于近地空间,但随着各商业航天公司能力的不断增强、技术不断成熟,将成为中国月球探测领域的重要支撑力量。

### 3.4 由单一国家独立实施向多个国家联合探测转变

月球探测门槛非常高,迄今为止也只有少数几个航天大国具备独立开展月球探测活动的能力。在第一轮月球探测高潮中,具备开展月球探测能力的只有美、苏两国,此阶段在冷战背景下,两国竞相追逐,相继独立实施了一系列月球探测任务。

随着新一轮月球探测热潮的到来,世界主要航天国家以及新兴航天国家将月球探测作为航天活动的重点之一。通过国际合作充分利用已有的资源,降低单一国家的投入,发挥各国的技术优势,促进探测成果共享。月球探测与近地空间探测相比,受国家安全、意识形态的影响相对较小,国家间达成合作的可能性更高。各国在月球探测领域开展国际合作的模式也由传统的载荷搭载转向任务协同。例如,NASA和ESA帮助印度完成了“月船3号”遥测遥控、状态监测,并在着陆过程中提供了关键支持<sup>[46]</sup>;NASA的月球勘测轨道器拍摄了“月船3号”着陆图像并确认着陆位置<sup>[47]</sup>，“月船3号”携带的激光角反射器配合NASA的月球勘测轨道器完成月球光学定位和测距试验<sup>[48]</sup>。印度和日本将发挥各自优势,共同实施月球南极探测任务。

世界主要航天国家的月球探测规划也正积极开展国际合作。美国“阿尔忒弥斯”计划已与50多个国家开

展合作,其中将联合加拿大、日本、ESA、阿联酋共同实施“门户”月球空间站任务<sup>[49]</sup>。中国发起的国际月球科研站大科学工程,提出“和平开发利用、共商共建共享、合作形式多样、共享科学成果、保护月球资源、成立合作组织”的倡议,已有10多个国家、60多家科研机构纷纷加入,将在项目各个阶段、任务各个层级,结合各国规划、能力和意愿,开展任务级协同、工程联合研制、科学应用研究、地面设施建设、国际规则制定和人才教育培训等多层级、多类型合作,未来还将继续拓展国际合作的深度和广度,进一步吸引更多国家、更多科研机构 and 更多科研人员共同参与国际月球科研站的研制建设,打造“五五五”工程,即力争实现50个国家、500家国际科研机构、5 000名以上海外科研人员共同参与,成为凝聚广泛共识、形成广泛影响的国际科技合作重大典范工程。

## 4 未来月球探测关键技术展望

未来瞄准实现月球探测长期可持续发展,需联合国际合作伙伴,吸引商业航天公司,在提高地月空间进出能力、实现月面能源全天时稳定供应、建立高速信息互联互通网络、增强智能装备作业能力、实现月球资源开发利用等方面开展关键技术攻关。

### 4.1 提高地月空间进出能力

面对未来大规模地月开发及月球探测任务需求,需发展航班化航天运输系统,提高地月空间进出能力。选择相对固定的飞行路线、时间窗口、运行空间及站点,有利于开展长期化、规模化、标准化和模块化运输任务,便于在地月空间开展物资运送。迄今为止,地月空间运输系统已取得长足发展,但是在大规模低成本、高效益、重复使用地月空间航天运输系统总体设计、在轨加注、推进剂长期在轨管理等方面亟需获得突破。

#### 4.1.1 重复使用航天运输系统总体设计技术

发展重复使用运输系统是降低发射成本、提升月球资源利用效率、可持续开展月球探测的关键路径,也是未来国际航天竞争的核心领域。亟需突破重复使用运输系统总体设计技术瓶颈,提出总体参数优化设计、轨道-气动-结构-动力等一体化系统级优化方法,实现高可靠、低成本、高频次发射能力。

#### 4.1.2 低温推进剂在轨加注技术

要实现未来地月空间航班化运输,需突破低温推进剂在轨加注技术,达到低损耗、高充罐率和稳定大流量加注及快速对接。目前低温推进剂在轨加注技术无法满足未来航天重大工程需求,亟需突破低温推进

剂在轨高效预冷与传输、在轨低温液体质量测量、低温推进剂在轨加注对接、高效气液分离等核心技术,需建立准确的理论模型,并研制低温推进剂在轨加注原理样机。

#### 4.1.3 低温推进剂长期在轨管理技术

低温推进剂是实现深空探测的核心能源,但其在轨长期贮存面临蒸发量损失、热泄漏等技术挑战。突破低温推进剂微重力环境下零蒸发量控制、高效热防护、流体稳定控制等关键技术,建立超低温流体长期贮存与动态补给技术体系,可大幅延长任务周期,支撑地月空间经济圈建设和月球、火星等深空探测任务,推动航班化运输成为现实。

### 4.2 实现月面能源全天时稳定供应

要开展长期可持续的月球探测活动,首先要实现月面能源全天时稳定供应。围绕产能、储能、输能、用能等方面开展研究,建立月面能源供应系统,为月面探测活动提供保障。

#### 4.2.1 垂直柔性太阳能电池阵布设技术

太阳能是基础的能源来源,空间太阳能发电技术成熟,在未来月球科研站建设初期仍是首选的获能方式,可通过增加太阳能电池阵面积,提高月面发电功率。在月球两极,太阳高度角极低,需开展低重力可展收大面积柔性太阳能电池阵技术、大型太阳能电池阵布设技术、太阳能电池阵自主对日定向技术等方面的研究。

#### 4.2.2 空间堆技术

核能发电不受太阳光照条件制约,具备全天时稳定供电的能力,可很好地支持大型科研设施在月夜持续作业。为在月面建设实用性空间堆,需突破轻质、大功率、长寿命空间堆总体设计、高性能核燃料及结构材料、高效长寿命斯特林发电、大功率热排散、轻质高效核辐射屏蔽、空间堆安全防护等技术。

#### 4.2.3 长寿命可再生氢氧燃料电池技术

长寿命可再生氢氧燃料电池在月昼期间可利用太阳能电池阵提供的电能电解水制氢氧,在月夜期间可将月昼期间储存起来的氢气氧气通入燃料电池系统来提供能源供应。结合月球水冰资源开发利用获得的水,为氢氧燃料电池补水。为提高实用性,需开展氢氧燃料电池月面环境适应、被动水热管理、大容量储气等技术研究。

#### 4.2.4 月面高效无线能量传输技术

未来月面设施数量众多,若全部采用有线能量传输,线缆重量代价大、布设工作量大,且对众多移动设施的大范围移动带来影响。基于激光的高效无线能量传输技术是具有广阔应用前景的月面能量传输方

式,需在月面激光器高可靠、长寿命,提高无线能量传输效率等方面开展研究。

### 4.3 建立高速信息互联互通网络

当前在地月通信方面主要采取点对点的通信模式,导航方面绝大多数时段是依赖于地面测控导航,部分阶段依赖于探测器自身携带的敏感器实施自主导航。未来需构建覆盖地球-月轨-月面的高速信息网络,提供高效全面的数据通信与导航服务功能。涉及地月空间一体化网络体系架构、地月导航体制以及地月空间一体化算力架构等关键技术。

#### 4.3.1 地月空间一体化网络体系架构技术

尽管信息网络技术在近地空间已经日趋成熟,但由于地月空间通信延迟大、通信链路不稳定,很难直接移植到地月高速信息网络,传统的网络路由和传输机制在深空环境难以适用;网络协议体系复杂繁多,尚未完全实现融合。因此迫切需要突破地月空间一体化网络体系架构技术,提出适应深空延迟容忍的可靠传输网络协议,融合多种国际标准的协议架构,以支持跨域以及不同机构的信息设施互联互通,实现地月高速信息网络的有序统筹高效发展。

#### 4.3.2 地月导航体制技术

全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)为高速信息网络的导航服务功能设计提供了参考,但是由于地球GNSS信号延伸到近月空间存在信号弱、距离远、易干扰等问题,而且不同于地球GNSS系统,月球探测的导航服务设施难以同时大规模部署。针对这些问题,需要从服务体制、信号体制等进行攻关,以满足未来各类月球和地月空间用户的导航定位需求。

#### 4.3.3 地月空间一体化算力架构技术

地月高速信息网络的节点分布区域跨度大,不同节点的计算资源和计算能力也分布不均,为服务于高速数据通信、导航定位等功能,需突破地月一体化分布式算力协同架构技术,从而实现跨域通信、导航以及存储计算等资源的协同与智能调度,提高地月高速信息网络效能。

### 4.4 增强智能装备作业能力

未来月球探测将更多依赖无人智能装备完成设施布设、原位分析、维修维护、月基建造等活动。需加强人工智能、信息技术与月面装备深度融合,提高月面装备自主决策、协同作业能力,构建智能化无人作业体系。

#### 4.4.1 月面智能导航技术

提高月面装备移动能力、扩大探测范围对提高月

月球探测预期收益具有重要意义。针对月面极端温度波动、高能辐射、带电月尘悬浮干扰等问题,开展长期自主运行的月面智能导航关键技术研究,突破多源融合感知定位、自进化导航决策、跨域智能物流协同等关键技术,支撑未来月球科研站持续稳定运行。

#### 4.4.2 具身智能作业技术

随着人工智能、信息通信等技术飞速发展,月面具身智能机器人将逐渐成为月面探测活动的执行者,发挥无人装备优势,代替人类进入复杂、严酷的作业环境,显著延长作业时间。从提高具身智能机器人作业能力方面,需解决多模态感知信息生成与融合问题,确保机器人准确理解任务场景的视觉和触觉等信息;通过大模型和强化学习优化交互过程,降低虚拟与现实的迁移难度;利用深度强化学习和智能控制技术优化动作序列,提升任务执行的精准性和稳定性。

#### 4.4.3 多设施协同作业技术

未来月球探测基础设施建设和科研作业任务变得更加复杂多样,对月面装备的功能需求越来越多。需发挥月面各装备独特优势协同作业以提高效率和缩短任务完成时间。低重力、复杂地形和通信延迟等月球环境特性对多机协同作业提出了严峻的挑战。因此需与人工智能、大语言模型等技术相结合,开发先进的多机协同作业技术,开展月面多设施自动任务规划、多机协同动态通信自组网、月面多机协同环境联合认知、故障检测与应急响应等技术研究,实现设备间的高效协作。

### 4.5 实现月球资源开发利用

未来月球资源开发利用的首要目标是实现水冰、矿产、挥发份、月壤等资源的原位利用,需重点开展水冰提取与制水、月球矿产资源冶炼与制氧、月基建造与制造等关键技术研究。

#### 4.5.1 水冰提取与制水技术

遥感探测发现月球南北两极永久阴影区存在水冰。如何在阴影区开采水冰并最终获得水,对实现月球探测可持续发展具有重要意义。可通过加热富含水冰的月壤并冷凝、存储获得水,通过分解水制取氢、氧实现水冰的开发与利用。需开展含水冰月壤高效提取、密封与转运,低重力、高真空条件下水蒸气冷凝与收集,以及月面光电分解水,氢、氧月面存储等方面的研究。

#### 4.5.2 月球矿产资源冶炼与制氧技术

月球蕴含丰富的钛铁矿( $\text{FeTiO}_3$ )等矿产资源,绝大多数以氧化物的状态存在,可采用通过水冰资源开发获取的氢气作为还原剂,在高温状态下还原氧化

物,获取金属与水,再将水电解生成氧气和氢气,氢气可循环利用,氧气可以贮存,用于维持月面生命保障系统和推进剂补加,需针对整个过程进行技术攻关和设备研制。

#### 4.5.3 月基建造与制造技术

通过月基建造与制造,获得生存防护设施建造材料、易损结构件,可为实现月球长期持续开发提供重要支撑。月面的特殊环境决定了不能完全照搬地面的相关技术,需开展基于月壤的3D打印技术研究,为月球基地建设提供材料;开展基于月面矿物冶炼的金属3D打印、月基结构件制造技术研究,为月球基地维修维护提供保障。

## 5 结束语

月球探测肩负着揭秘宇宙未知,拓展人类生存空间的重要使命。当下正处于第二次月球探测的热潮,未来月球探测将瞄准月球科研站建设,更加注重重大科学发现、规模化资源开发利用;探测方式更注重可持续、体系化科研作业;资源投入方面更注重引导社会资本积极参与;国际合作方面更注重任务协同、联合实施。中国将立足探月工程奠定的坚实基础,联合国际伙伴,协同开展未来月球探测任务,拓展宇宙认知,服务人类文明。

### 参考文献

- [1] 叶培建,于登云,孙泽洲,等.中国月球探测器的成就与展望[J].深空探测学报(中英文),2016,3(4):323-333.  
YE P J, YU D Y, SUN Z Z, et al. Achievements and prospect of Chinese lunar probes[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(4):323-333.
- [2] LIN Y T, YANG W, ZHANG H, et al. Return to the Moon: new perspectives on Lunar exploration[J]. Science Bulletin 2024, 69(13): 2136-2148.
- [3] 魏勇,林宏磊,何飞,等.深空探测科技制高点上的新焦点:月球水资源[J].中国科学院院刊,2024,39(5):899-906.  
WEI Y, LIN H L, HE F, et al. et al. New frontier in race far deep space exploration:Lunar water resources[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(5): 899-906.
- [4] NASA. Lunar prospector[EB/OL]. (2024-11-3)[2025-3-21]. <https://science.nasa.gov/mission/lunar-prospecter>.
- [5] 吴伟仁,于登云.深空探测发展与未来关键技术[J].深空探测学报(中英文),2014,1(1):5-17.  
WU W R, YU D Y. Features of deep space exploration and its future key technologies[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2014, 1(1): 5-17.
- [6] NASA. NASA's plan for sustained lunar exploration and development[EB/OL]. (2020-8)[2025-3-21]. [https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2020/08/a\\_sustained\\_lunar\\_presence\\_nspc\\_report4220](https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2020/08/a_sustained_lunar_presence_nspc_report4220)

- final.pdf.
- [7] NATIONAL SCIENCE & TECHNOLOGY COUNCIL. National cislunar science & technology strategy[EB/OL]. [2022-11][2025-3-21]. <https://cosmicspace.org/wp-content/uploads/2025/01/11-2022-NSTC-National-Cislunar-ST-Strategy.pdf>.
- [8] 杨帆,王海名. 白宫发布的首份国家地月空间科技战略[J]. 空间科学学报, 2023, 43(1): 1-5.  
YANG F, WANG H M. The first national cislunar science and technology strategy released by the White House[J]. Chinese Journal of Space Science, 2023, 43(1): 1-5.
- [9] NATIONAL SCIENCE AND TECHNOLOGY COUNCIL. National science and technology council[EB/OL]. (2024-12)[2025-3-21]. <https://bidenwhitehouse.archives.gov/wp-content/uploads/2024/12/Cislunar-Implementation-Plan-Final.pdf>.
- [10] NASA. Moon to Mars architecture[EB/OL]. (2024-11-25)[2025-3-21]. <https://science.nasa.gov/wp-content/uploads/2024/08/6-moon-to-mars-architecture.pdf>.
- [11] NASA. Commercial Lunar payload services[EB/OL]. (2025-1-10)[2025-3-21]. <https://www.nasa.gov/commercial-lunar-payload-services>.
- [12] MARSHALL S, DOUGLAS C, NICOLE H, et al. The Artemis Program: an overview of NASA's activities to return humans to the Moon[C]//Proceedings of 2020 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2020.
- [13] RSSI. Russian Moon exploration program[EB/OL]. (2014-09-25)[2025-3-21]. <http://www.iki.rssi.ru/eng/moon.pdf>.
- [14] RSSI. Russia announces plans to establish Moon colony by 2040[EB/OL]. (2018-11-29)[2025-3-21]. <https://www.themoscowtimes.com/2018/11/29/russia-announces-plans-to-establish-moon-colony-by-2040-a63557>.
- [15] The INSTITUTE OF SPACE RESEARCH OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES. "Learn from the experience". Russian scientists have announced their plans for a mission to the Moon and Venus[EB/OL]. (2023-10-18)[2025-3-21]. <https://ria.ru/20231018/luna-1903364255.html>.
- [16] RUSSIAN NEWS AGENCY. Luna-26 project proceeds according to schedule-first deputy premier[EB/OL]. (2024-9-4)[2025-3-21]. <https://tass.com/science/1837831>.
- [17] The INSTITUTE OF SPACE RESEARCH OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES. The Institute of space research of the Russian Academy of Sciences has proposed the concept of the Moon-27 project[EB/OL]. (2024-10-29)[2025-3-21]. <https://iki.cosmos.ru/news/koncepciya-proekta-luna-27-predstavlena-na-simpoziume-v-iki-ran>.
- [18] MITROFANOV I, ZELENYI L, TRETYAKOV V. Luna-28 mission for polar samples return, as the key element of the initial stage of Russian Lunar Program[C]//Proceedings of 22nd EGU General Assembly Conference. [S. l.]: EGU, 2020.
- [19] 范唯唯, 杨帆, 韩淋, 等. 俄罗斯未来月球探索与开发计划解析[J]. 科技导报, 2019, 37(16): 6-11.  
FAN W W, YANG F, HAN L, et al. Overview of Russia's future plan of lunar exploration[J]. Science and Technology Review, 2019, 37(16): 6-11.
- [20] ESA. Terrae Novae 2030+ strategy roadmap[EB/OL]. (2022-6)[2025-3-21]. <https://www.audentia-gestion.fr/actualite/pdf/1657026811182.pdf>.
- [21] ESA. ESA Strategy 2040[EB/OL]. [2025-4-7][2025--3-21]. [https://esamultimedia.esa.int/docs/corporate/ESA\\_Strategy\\_2040\\_InDepth.pdf](https://esamultimedia.esa.int/docs/corporate/ESA_Strategy_2040_InDepth.pdf).
- [22] ESA. ESA's Moonlight programme: pioneering the path for lunar exploration[EB/OL]. (2024-10-15)[2025-3-21]. [https://www.esa.int/Applications/Connectivity\\_and\\_Secure\\_Communications/ESA\\_s\\_Moonlight\\_programme\\_Pioneering\\_the\\_path\\_for\\_lunar\\_exploration](https://www.esa.int/Applications/Connectivity_and_Secure_Communications/ESA_s_Moonlight_programme_Pioneering_the_path_for_lunar_exploration).
- [23] LANDGRAF M, DUVET L, CROPP A, et al. Autonomous access to the Moon for Europe: the European large logistics lander[C]//Proceedings of 73rd International Astronautical Congress(IAC 2022). Paris, France: IAC, 2022.
- [24] ESA. European large logistics lander[EB/OL]. (2019-6-7)[2025-3-21]. [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Videos/2019/06/European\\_Large\\_logistics\\_Lander](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2019/06/European_Large_logistics_Lander).
- [25] THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES. JSASS Space Vision 2050[EB/OL]. (2019-3)[2025-3-21]. [https://www.jsass.or.jp/webe/wp-content/uploads/2019/05/JSASS\\_SpaceVision2050\\_20190313.pdf](https://www.jsass.or.jp/webe/wp-content/uploads/2019/05/JSASS_SpaceVision2050_20190313.pdf).
- [26] JAXA. JAXA's Lunar Exploration Activities[EB/OL]. (2020-2-11)[2025-3-21]. <https://www.unoosa.org/documents/pdf/copuos/stsc/2020/symp2-09E.pdf>.
- [27] PEKKANEN M S, AOKI S, TAKATORI Y. Japan in the new lunar space race[J]. Space Policy, 2024, 69: 1-13.
- [28] NASA. Government of Japan formalize gateway partnership for Artemis program-NASA[EB/OL]. (2021-1-13)[2025-3-21]. <https://www.nasa.gov/news-release/nasa-government-of-japan-formalize-gateway-partnership-for-artemis-program/>.
- [29] FOUST J. NASA and Japanese government sign the implementing arrangement concerning lunar surface exploration using the pressurized rover[EB/OL]. (2024-9-10)[2025-3-21]. <https://humans-in-space.jaxa.jp/en/news/detail/003924.html>.
- [30] KAWAGUCHI J. Japan's lunar exploration strategy and its role in international coordination[EB/OL]. (2017)[2025-3-21]. [https://sci.esa.int/documents/34200/36212/1567255844284-258\\_J\\_Kawaguchi\\_JAXA\\_Lunar\\_Exploration.pdf](https://sci.esa.int/documents/34200/36212/1567255844284-258_J_Kawaguchi_JAXA_Lunar_Exploration.pdf).
- [31] TANABE K, KOGA M, KARIYA K, et al. Plan outline of Lunar Exploration Augmentation and Demonstration (LEAD)[EB/OL]. (2023-5)[2025-3-21]. <https://confit.atlas.jp/guide/event/jpgu2023/subject/PPS06-07/detail>
- [32] ISRO. INDIA'S Space Vision 2047[EB/OL]. (2024)[2025-3-21]. [https://sansad.in/getFile/annex/266/AU2852\\_fgVksh.pdf?source=pqars](https://sansad.in/getFile/annex/266/AU2852_fgVksh.pdf?source=pqars).
- [33] ISRO. ISRO's Vision 2047[EB/OL]. (2024)[2025-3-21]. <https://www.ksgindia.com/blog/isros-vision-2047.html>.
- [34] WU Y H. China's deep space exploration[J]. Aerospace China, 2023, 24(1): 3-9.
- [35] 李春来, 刘建军, 左维, 等. 中国月球探测进展(2011-2020年)[J]. 空间科学学报, 2021, 41(1): 68-75.  
LI C L, LIU J J, ZUO W, et al. Progress of China's Lunar exploration(2011-2020)[J]. Chinese Journal of Space Science, 2021, 41(1): 68-75.
- [36] 付毅飞. 中国深空探测在规划这些大事[EB/OL]. (2023-4-26)[2025-3-1]. <http://finance.people.com.cn/n1/2023/0426/c1004-32673839.html>.
- [37] 刘继忠, 胡朝斌, 庞涪川, 等. 深空探测发展战略研究[J]. 中国科学, 2020, 50(9): 1126-1139.

- LIU J Z, HU Z B, PANG F C, et al. Strategy of deep space exploration[J]. Science China, 2020, 50(9): 1126-1139.
- [38] 裴照宇, 王琼, 姜生元, 等. 面向月球科研站的原位资源利用活动展望[J]. 前瞻科技, 2024, 3(1): 9-21.
- PEI Z Y, WANG Q, JIANG S Y, et al. Development prospect of in-situ resource utilization activities in lunar research stations[J]. Science and Technology Foresight, 2024, 3(1): 9-21.
- [39] 吴伟仁, 张哲, 敖显泽, 等. 深空物质资源利用现状与展望[J]. 科技导报, 2023, 41(19): 6-15.
- WU W R, ZHANG Z, AO X Z, et al. Utilization of deep space matter resources : state of the art and prospects[J]. Science and Technology Review, 2023, 41(19): 6-15.
- [40] KESSLER D P, PRATER T, NICKENS T, et al. Artemis deep space habitation: enabling a sustained human presence on the Moon and beyond[C]//Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Montana, USA: IEEE, 2022.
- [41] THE WHITE HOUSE. National Space Policy of the United States of America[EB/OL]. (2020-12-9)[2025-3-21]. <https://trumpwhitehouse.archives.gov/wp-content/uploads/2020/12/National-Space-Policy.pdf>.
- [42] MANFRED D V E. 让人类重返月球阿尔忒弥斯登月计划[M]. 陈泽煜, 崔万照, 王瑞, 等译. 北京: 国防工业出版社, 2023.
- [43] NASA. New companies join growing ranks of nasa partners for artemis program[EB/OL]. (2019-11-19)[2025-3-1]. <https://www.nasa.gov/news-release/new-companies-join-growing-ranks-of-nasa-partners-for-artemis-program/>. 1126-1139.
- [44] 高国柱. 我国商业航天政策分析与未来展望[J]. 卫星应用, 2023(10): 54-60.
- [45] 国家国防科工局. 国家国防科工局关于促进商业航天测控规范有序发展的通知[EB/OL]. [2025-3-21]. <https://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758839/c10653040/content.html>.
- [46] FRANCIS P. How ISRO's Chandrayaan-3 got a tech boost from NASA and ESA[EB/OL]. (2023-8-27)[2025-3-21]. <https://tech.hindustan-times.com/tech/news/how-isros-chandrayaan-3-got-a-tec-boost-from-nasa-and-esa-71692792432787.html>.
- [47] NASA. NASA's LRO observes Chandrayaan-3 landing site[EB/OL]. (2023-11-5)[2025-3-21]. <https://www.nasa.gov/image-article/nasas-lro-observes-chandrayaan-3-landing-site/>.
- [48] SUN X, CREMONS R D, SMITH E D, et al. First laser range results from the lunar reconnaissance orbiter to the miniature laser retroreflector array on CHANDRAYAAN -3[EB/OL]. (2024)[2025-3-21]. <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2024/pdf/2259.pdf>.
- [49] 孙青, 朱晓宇. 深空探测国际合作发展动向观察[J]. 国际太空, 2023(10): 54-60.
- SUN Q, ZHU X Y. Observation on the development trends of international cooperation in deep space exploration[J]. Space International, 2023(10): 54-60.

作者简介:

任筱强(1978-), 女, 研究员, 主要研究方向: 月球探测总体技术。

通信地址: 北京市海淀区东冉北街9号(100195)

电话: (010)88432556

E-mail: [renxq@dsel.cc](mailto:renxq@dsel.cc)

吴伟仁(1953-), 男, 中国工程院院士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: 航天测控通信与深空探测工程总体技术。本文通信作者。

通信地址: 北京市海淀区东冉北街9号(100195)

## Prospects of the Lunar Exploration Development and Key Technologies

REN Xiaoqiang<sup>1</sup>, WU Weiren<sup>1</sup>, WANG Hongyu<sup>1</sup>, ZHANG zhe<sup>1</sup>, ZHANG Longxi<sup>1</sup>,  
ZHANG Xinghua<sup>1</sup>, LI Maodeng<sup>1,2</sup>, ZHANG Pengshuo<sup>1</sup>, TIAN Jian<sup>1</sup>

(1. Deep Space Exploration Lab, Beijing 100097, China;

2. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Based on the research of the lunar exploration mission plans of the world's major space-faring countries, four major trends of lunar exploration were summarized. With the aim of achieving long-term and sustainable development of lunar exploration in the future, suggestions were put forward for conducting key technology research and development in aspects such as enhancing the ability to reach the moon, achieving stable and all-day supply of energy at lunar surface, establishing a high-speed information network, enhancing the operational capabilities of intelligent equipment, and realizing large-scale exploitation and utilization of lunar resources. These suggestions can provide references for the subsequent planning of lunar exploration missions.

**Keywords:** lunar exploration; resource development; information interconnection; intelligent equipment

**Highlights:**

- The symbolic achievements of lunar exploration were summarized.
- The lunar exploration mission planning of the world's major spacefaring countries were investigated.
- Four major changing trends of lunar exploration was proposed.
- The key technological research directions required for future lunar exploration were initially were identified.
- Preliminary proposals have been put forward regarding the key technology directions required for future lunar exploration.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 宋利辉]