

NASA 月球到火星战略架构的解析*

夏一峰 高玉月 周 诚

(华中科技大学国家数字建造技术创新中心 武汉 430074)

(华中科技大学土木与水利工程学院 武汉 430074)

摘 要 基于月球、火星探测任务具有总体规模庞大、任务开展周期长、任务执行难度高等特点. 美国国家航空航天局下属多个机构联合发布了美国“月球到火星战略架构”定义文件, 以此指导其月球探测与火星探测任务的开展. 根据美国国家航空航天局建立的“月球到火星战略架构”, 即 M2M 战略目标体系, 对其战略架构系统实施阶段典型任务以及架构评估准则进行了分析. 针对 M2M 战略架构定义文件中战略目标的定义与分类、任务实施阶段的系统功能需求以及战略架构评估准则进行了深入分析, 进而归纳论述了基于解析“月球到火星战略架构”获得的发展思考, 研究成果可为中国未来空间探测任务的顶层战略路径规划与月球及火星探测总体计划的制定提供参考.

关键词 月球探测, 火星探测, 战略规划, 月球建造, 地外建造

中图分类号 V57

Analysis and Implications of NASA's Moon to Mars Strategic Architecture

XIA Yifeng GAO Yuyue ZHOU Cheng

(National Center of Technology Innovation for Digital Construction, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract Lunar and Martian exploration ventures embody a magnitude of grand scale, elongated operational timelines, elevated execution complexities, and the engagement of multifaceted mission phases alongside a diverse array of objectives. These inherent characteristics underscore the imperative need for a comprehensive strategic roadmap to navigate these ambitious undertakings. In response, an alliance of institutions under the auspices of the National Aeronautics and Space Administration (NASA) has published the Moon to Mars Architecture Definition Document, thereby furnishing a guiding compass for both lunar and Martian exploration missions. This study commences with an overview of NASA's meticulously crafted M2M architecture, delving into the intricacies of its strategic goal hierarchy. It proceeds to meticulously untangle the system implementation phases, accompanied by a critical examination of

* 中国工程院战略研究与咨询项目 (2023-JB-09-10, 2023-XZ-90), 国家重点研发计划项目 (2021YFF0500300, 2023YFB3711300) 和中国载人航天工程空间应用系统项目共同资助

2024-01-08 收到原稿, 2024-04-28 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

the archetype missions embedded within these phases. The investigation also encompasses a thorough discourse on the criteria utilized for the appraisal of this strategic infrastructure, elucidating the metrics and principles that underpin its evaluation. Through meticulous dissection of the M2M Architecture Definition Document, this research illuminates the nuanced definitions and classifications of strategic objectives, unraveling the systemic functionality requisites across various mission execution stages. Moreover, it conducts a rigorous gap analysis, pinpointing disparities against the backdrop of the strategic architecture's evaluative benchmarks. Culminating from this exhaustive analysis, the paper advances a forward-thinking perspective, distilled from a meticulous parsing of the "Moon to Mars Architecture". This perspective aims to illuminate prospective avenues, offering a strategic compass for strategic trajectory planning of our nation's impending space exploration endeavors, and formulating a holistic blueprint for lunar and Martian exploration programs. It aspires to contribute a set of insightful and actionable recommendations, thereby enriching the strategic discourse and enhancing the practical utility of future mission planning in the realm of celestial exploration.

Key words Lunar exploration, Mars exploration, Strategic planning, Lunar construction, Extraterrestrial construction

0 引言

自 20 世纪 50 年代起, 苏联和美国展开了近 40 年的月球和空间探测角逐, 进行了多次探月任务^[1,2]. 月球、火星探测任务具有总体规模庞大、任务开展周期长、任务执行难度高、涉及多个任务阶段与多类目标的特点, 亟需总体战略规划指导任务的开展. 美国由于不同政府任期阶段内对空间政策的顶层设计反复变化, 导致了空间探测方向的不连续性, 最终导致了载人探月工程在 20 世纪 80 年代后逐渐沉寂. 从大力推进载人登月任务, 到重点转向近地轨道空间活动和国际合作, 这种政策上的波动影响了美国国家航空航天局 (NASA) 的长期规划和项目执行的稳定性, 加之经济和政治环境的压力, 共同导致了最终终止载人登月任务的决定. 进入 21 世纪以来, 欧洲及美国、印度、日本等相继公布了深空探测路径部署与战略规划蓝图^[3-6], 美国发布的 Artemis 计划致力于 2024 年重返月球, 以显示美国在空间探测领域的地位; 欧洲空间局 (ESA) 提出的月球村计划等旨在建立国际化的月球探测平台, 以实现科学研究、技术验证等多重目标; 印度成功实施的月船 2 号任务, 标志着印度已具备在月球南极进行科学探测和技术验证的能力. 深空探测战略路径规划作为指导探测任务开展的顶层设计, 已成为新一轮深空探测的重点之一.

21 世纪以来, 美国的政府主体及国内科研机构等已提出多个月球/火星探测计划或方案. NASA 于

2013 年发布了“月球探测路径图 V1.3, 2013”^[7], 明确了美国月球探测的战略目标与优先任务事项, 并进行了长达 4 年的持续性迭代优化, 于 2016 年整理形成了“月球探测路径图 V1.3, 2016”^[8]. 围绕着人类重返月球的战略目标, NASA 公布了 Artemis 计划^[3], 该计划包含建设月球轨道空间站、Artemis 大本营建造、空间火箭发射系统测试等任务. 此前由于资金短缺与政府更迭, NASA 曾数次推迟 Artemis 计划的子任务, 如月球着陆器的开发等. 2024 年 1 月 9 日, NASA 宣布将 Artemis 2 号任务从 2024 年推迟至不早于 2025 年 9 月, 以解决包括隔热材料烧蚀、维生系统故障在内的多个相关技术问题^[9]. 2023 年 4 月, NASA 下属的勘探系统开发任务理事会、空间行动任务理事会与空间技术理事会等 5 所机构联合发布了“月球到火星战略架构” (Moon to Mars Architecture) 定义文件及执行摘要^[10,11].

其他各国也相继公布了深空探测计划与战略指导文件, 清晰规划了地月空间探测的总体目标与阶段性任务. ESA 于 2015 年发布的“空间探测战略”^[5]明确了月球科学探测的愿景与指导原则. 2022 年, ESA 发布了“新地球 2030+ 战略路径图”^[6]文件, 该文件阐述了 ESA 在 20 世纪 30 年代深空探测的战略蓝图, 并指出 ESA 将于 2030 年实现人类重返月球的目标. 俄罗斯凭借在深空探测领域的雄厚积累, 将通过未来的 Luna26-28 任务开展对月球南极的深度探测. 同时, 日本宇宙航空研究开发机构 (Japan

Aerospace Exploration Agency, JAXA) 和印度空间研究组织 (Indian Space Research Organisation, ISRO) 也在积极参与国际空间合作, 成为 “Artemis 协定”^[12] 签署国。

中国在探月工程前三期圆满收官后, 将以探月工程四期为前驱, 联合多国建设国际月球科研站^[13]。前三期探月工程包括嫦娥一号至嫦娥五号的系列任务, 成功实现了绕月探测、软着陆探测、月球车巡视探测以及月球样本返回等重要目标。嫦娥五号任务标志着中国成为继美国和苏联之后, 世界上第三个能够实现月球样本返回的国家。基于这些成就, 中国探月工程四期于 2021 年 12 月获批实施, 由嫦娥四号、嫦娥六号、嫦娥七号和嫦娥八号 4 次任务组成。其中嫦娥四号已于 2018 年 12 月发射, 实现了世界首次月球背面软着陆巡视探测; 嫦娥六号已于 2024 年 6 月发射, 实现了世界首次月球背面采样返回; 嫦娥七号和嫦娥八号将构建月球科研站基本型, 开展月球环境探测等任务。国际月球科研站由月面段、月轨段和地面段构成, 由能源动力系统、指挥信息系统和月面运输系统等基础设施组成, 具备能源供应、中枢控制、通信导航、地月往返、月面科研等功能, 可长期持续开展科学探测、资源开发、技术验证等多学科多目标大规模科学和技术活动。此外, 科研站还将为未来可能的月球探测开发任务提供支持, 以及为火星和更远的深空探测提供经验和技術基础。

Moon to Mars 战略架构 (M2M)^[11] 是美国深空探测任务的顶层规划, 在月球与火星探测战略规划与路径设计等方面具有重大借鉴意义。M2M 文件作为美国深空探测系统工程框架建立的标志性里程碑之一, 对美国月球与火星探测任务进行系统性归纳与战略路径部署, 建立了以战略目标体系为引领、分阶段的任务执行为方法、架构评估准则为指导的系统工程框架。M2M 战略架构文件^[10] 是由 NASA 各权威理事会调研整理形成的深空探测规划蓝图与战略指导, 具有前瞻性与系统性的特点。其本质目的是通过系统化的方法, 促进技术、资源和知识在月球与火星探测任务之间的共享与应用, 从而提高任务的效率和成功率。M2M 战略架构的优势在于其为未来的空间探测提供了一个统一的规划框架, 将 ESMD, SOMD 与 STMD 等多家机构所提出的方案与建议结合起来, 最终形成美国深空探测的顶层架构设计。

本文根据 NASA 建立的 “月球到火星战略架构”, 即 M2M 战略目标体系, 对其战略架构系统实施的阶段典型任务以及架构评估准则进行分析。根据 M2M 战略架构定义文件对战略目标的定义与分类、任务实施阶段的系统功能需求及战略架构评估准则的现有差距分析, 论述了基于解析 “月球到火星战略架构”^[10] 获得的发展依据, 以期为中国未来空间探测任务的顶层战略路径规划与月球及火星探测总体计划的制定提供参考。

1 NASA M2M 战略目标体系

为实现月球与火星探测任务的总体目标, M2M 架构定义文件 (ADD)^[10] 遵照目标牵引的总体原则, 确立了以战略目标为导向的 M2M 战略架构, 将总体目标拆解为科学任务目标、基础设施目标、运输居住目标与运营维护目标四类任务目标。这里基于对架构决策关键问题的分析, 重点整理分析月球探测架构的战略目标体系, 分析战略目标体系对后续任务开展的指导作用。

1.1 决策关键问题

M2M 架构定义文件对月球探测架构进行了关键问题分析, 建立了月球到火星架构的战略目标体系^[11]。文件通过回答为何探测这一问题, 明确了 M2M 架构的科学愿景、文化效益与国家态势等三项期望结果, 将其作为战略架构关键问题分析的首要步骤。引申出后续分析: 何时实现月球目标、何人参与任务过程、需要哪些基础能力、系统应该设施在何位置、如何实现登月及返回^[11]。基于对上述关键问题的回答与分析, NASA 构建了以科学任务目标为牵引、基础设施目标为支撑、运输居住目标为保障、运营维护目标为导向的 M2M 战略目标体系, 如图 1 所示。

1.2 科学任务目标

科学任务目标作为 M2M 战略目标体系的重大牵引, 包括基础科学任务目标、科学赋能与应用科学目标, 涵盖了月球/行星科学、太阳物理、生命科学、物理科学、科学赋能与应用科学^[11]。如表 1 所示^[11], 通过对月球、火星等地外天地的勘探与研究, 建立对行星天体内部结构、地质演变规律、太阳系起源及早期历史等科学问题的认知; 利用月球与火星表面独特的微重力环境为实验场所, 评估深空环境对生物系统及其健康状态的影响。如表 2 所示^[11], 科学赋能与应用

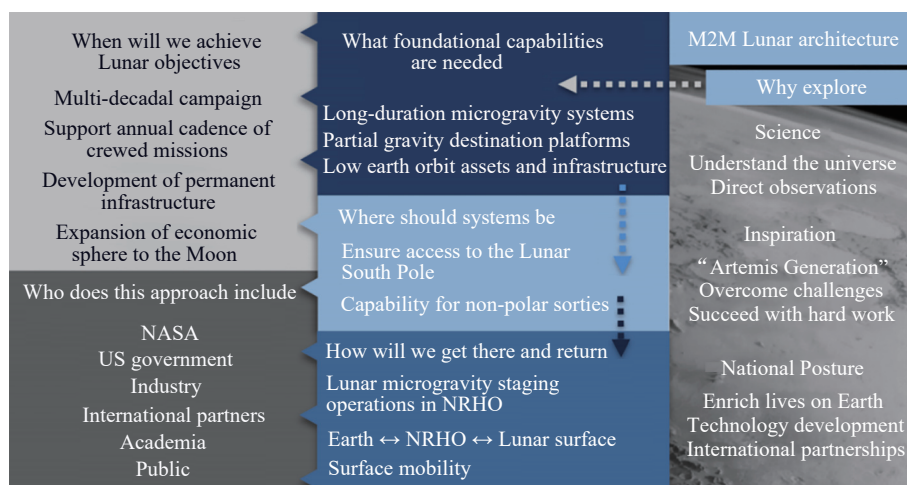


图 1 月球架构决策关键问题分析

Fig. 1 Analysis of key issues in lunar architecture decision making

表 1 基础科学任务目标定义

Table 1 Objective definition of basic sciences

目标类别	目标编号	任务目标
月球/行星	LPS-1	研究月球及其他行星揭示太阳系起源和早期历史
	LPS-2	研究月球内部结构、岩浆历史特征及其地质演变规律
	LPS-3	研究月球和火星挥发物, 揭示太阳系挥发物起源
	LPS-4	研究人类宜居环境所在位置与其演变规律
太阳物理	HS-1	研究空间天气, 加强对月球和火星表面观测
	HS-2	确定月球和火星岩石中记录的太阳和太阳系的历史
	HS-3	以月球、火星环境为实验室, 研究基本等离子体过程, 包括尘埃与等离子体的相互作用, 并确定其特征
	HS-4	进一步了解月球附近和火星周围的磁尾与原始太阳风动力学
生命科学	HBS-1	研究月球、火星和深空环境中的短期及长期暴露对人类、动物、植物, 包括人类生理系统、植物生物系统等的的影响
	HBS-2	评估和验证独立于地球的乘员健康和维持系统, 评估火星飞行任务的持续时间
	HBS-3	确定和评估系统与深空环境的相互作用
物理科学	PPS-1	从月球背面的无线电静默环境中对深空进行探测
	PPS-2	利用月球、火星和深空的独特环境, 推进对物理学的理解

科学任务目标指利用月球与火星独特的地理与物理环境开展科学研究, 以解决具有高优先级的科学问题, 并为后续深空探测与火星登陆任务提供系统设计方案与理论基础。

1.3 基础设施目标

基础设施目标是 M2 M 战略目标体系的重要支撑。在月球建造具有互操作性的基础设施系统, 将为美国及其国际合作伙伴提供长时间的月面驻留能力,

以实现月球的持续性开发利用^[11]。基础设施目标的核心是先进建造和自主建设能力, 以此为人类长期月面驻留提供技术支持。基础设施目标将为月球可持续探测利用提供原位资源利用的能力, 对月球丰富的水冰资源、氦-3 资源进行原位提纯及加工, 为月球经济圈的拓展提供物质基础。如表 3 所示^[11], 基础设施目标包括开发渐进式月球发电与配电系统, 为月球探测提供能源供给; 验证工业规模的原位资源利用能力;

表 2 科学赋能与应用科学定义
Table 2 Objective definition of enabling and applied science

目标类别	任务编号	任务目标
科学赋能	SE-1	为航天员提供深入的、有针对性的培训
	SE-2	从地球利用先进技术远程支持航天员的月表和深空活动
	SE-3	开发从月球永久阴影区和火星含挥发物地点获取冰冻挥发物的能力, 并将样品带回地球
	SE-4	从月球和火星表面的多个地点带回具有代表性的样本
	SE-5	利用机器人进行勘测, 优化航天员在月球和火星的任务规划
	SE-6	通过向月球和火星的多轨道与表面位置运送科学仪器
	SE-7	保护具有特殊意义的代表性地貌, 包括月球永久阴影区和无线电静默背面以及火星周期性斜坡线
应用科学	AS-1	监测月球和火星表面及轨道环境, 以此支持乘员安全
	AS-2	协调轨道平台和地面平台, 优化月球和火星科学活动的规划
	AS-3	确定可获取的月球和火星资源的特征, 并在后续任务中实现原位资源利用 (ISRU)
	AS-4	开展对以生物再生为基础的生命支持系统的应用科学调查
	AS-5	确定作为食物来源的作物种类, 包括其生产生长方法
	AS-6	进一步了解物理系统如何受到部分重力、微重力以及月球、火星和深空过境的环境影响

表 3 基础设施目标定义
Table 3 Objective definition of infrastructure

任务编号	任务目标
LI-1	开发渐进式月球发电和配电系统
LI-2	开发通信架构, 支持长期科学、探测和工业需求
LI-3	开发月球定位、导航和授时架构
LI-4	验证先进建造和自主建设能力
LI-5	验证精确着陆能力
LI-6	验证物资运输和流动能力
LI-7	验证工业规模的ISRU能力
LI-8	最大限度利用原地资源的建造和制造技术
LI-9	环境监测、态势感知和预警能力
MI-1	开发充足的火星能源供给能力, 以支持最初的火星探测
MI-2	发展火星表面、轨道与地球的通信, 以支持最初的火星探测
MI-3	开发火星定位、导航和授时架构
MI-4	验证在火星开展ISRU活动的的能力, 以支持最初的火星探测

开发通信架构, 提供高带宽的地月、月表通信能力等。
1.4 交通居住目标

交通居住目标为 M2M 战略目标体系提供了基本保障。NASA 搭建的空间火箭发射系统、地面勘探系统与猎户座飞船等系统为交通居住目标提供了月球、火星探测任务的轨道转移能力、货物运载能力以及从月球与火星安全返回地球的能力^[11]。如表 4 所示^[11],

交通居住目标包括从地球向月球及月球轨道运送物资的能力、乘员在深空中可以长期居住生活的系统与紧急情况下乘员健康的监测与维护能力。空间火箭发射系统作为实现交通居住目标的关键途径, 可以通过一次发射任务将猎户座飞船、4 名航天员与大量物资送往月球, 为 NASA 月球到火星的战略架构奠定基础^[11]。

1.5 运营维护目标

运营维护目标是 M2M 战略目标体系的最终导向. 通过在月球及月球轨道开展探测任务为火星登陆任务提供验证, 并逐步建立人类在地球以外的行星上开展工作与保障生活的系统及相应操作规范^[11]. 如表 5 所示^[11], 运营维护目标包括在地球表面、低地球轨道平台、半月平台及与月球表面进行系统的技术性验证; 基于过往任务的经验与启示, 优化地面支持团队、任务执行的乘员之间的交互能力等. 运营维护目标是基础设施目标和交通居住目标所实现功能的汇总与优化, 通过在地月空间建造基础设施以及优化交

通居住系统, 将人类的生存空间从封闭的地球系统扩展至开放的月球系统, 对于构建地月经济圈具有重大意义.

2 NASA M2M 架构系统实施阶段

M2M 战略架构在战略目标体系的牵引下, 将总体任务划分为人类探月返回、月面活动驻留、月球可持续开发及人类登陆火星等 4 个阶段^[11]. 这里以各阶段的典型任务为例, 重点分析 4 个阶段的任务需求与任务功能.

表 4 交通居住目标定义
Table 4 Objective definition of transportation and habitation

任务编号	任务目标
TH-1	开发乘员可在月球轨道和月球表面长时间进行常规操作的系统
TH-2	开发能够向月球表面运送各种要素的系统
TH-3	开发系统使乘员能够在月球表面和月球轨道上探测、操作及生活
TH-4	开发空间居住系统, 使乘员能够在深空长期居住
TH-5	开发在紧急情况下监测和维护乘员健康的系统
TH-6	开发地火运输系统, 将所需要素发射至火星表面
TH-7	开发系统使乘员能够在火星表面和火星轨道上探测、操作及生活
TH-8	开发在全任务阶段中可实时监测和维持航天员健康的系统
TH-9	开发具有交互能力的人类和机器人综合系统
TH-11	开发从月表到地球的运输系统

表 5 运营维护目标定义
Table 5 Objective definition of operations

任务编号	任务目标
OP-1	在地球表面、低地球轨道平台、半月平台和月球表面进行研究与技术验证
OP-2	优化地球上团队、轨道上乘员以及火星表面团队之间的交互能力
OP-3	确定可获取资源的特征, 在后续任务中使用资源
OP-4	建立指挥控制流程、通用接口和地面系统
OP-5	研发地面移动系统, 例如舱外活动 (EVA) 服、工具和车辆
OP-6	评估、了解长时间深空飞行任务对乘员健康和工作表现的影响
OP-7	验证系统和操作是否准备就绪
OP-8	寻找、维修、升级或利用以往任务遗留的仪器设备
OP-9	验证机器人系统的能力, 以最大限度地支持乘员在地面和轨道上的工作
OP-10	验证在月球或火星表面自主或从地球或轨道平台远程操作用于支持乘员的机器人系统的能力
OP-11	验证使用行星表面或空间资源生产的物资的能力
OP-12	建立程序和系统, 最大限度地减少对当地环境的干扰, 并提供资源, 允许材料的重新使用

2.1 人类探月返回任务实施阶段

2.1.1 任务实施阶段分析

M2 M 战略架构在其目标体系的引领下, 将以四大任务阶段进行架构系统任务的实施, 架构将依照任务阶段循序渐进的原则开展月球到火星的探测任务^[1]. 人类探月返回任务阶段是架构系统任务执行的第一阶段^[1], 如图 2 所示^[1]. 该阶段包括登陆月球, 并在月表及其轨道上建立任务所需的系统和基础设施. 典型任务包括 Gateway 空间站建造、HLS 系统测试和 Orion 猎户座飞船发射, 上述典型任务将满足将乘员及系统从地球发射至地月空间等任务需求, 提供地月空间居住场所等任务功能^[1]. 最终在该任务实施阶段建立人类在月球及月球轨道实现短期驻留所需系统要素, 并为后续任务实施阶段提供支撑.

2.1.2 典型任务分析

建造 Gateway 空间站作为人类探月返回任务阶段的重要任务之一, 将为人类重返月球提供关键保障^[14]. Gateway 空间站由 NASA 与诸多国际合作伙伴共同建造, 该空间站将成为首个绕月飞行的轨道空间站, 并为航天员提供深空居住场所, 以支持人类对月球的进一步探测.

Gateway 空间站将以模块化拼装的方式, 由居住和后勤前哨 (HALO) 与能源与推进系统 (PPE) 构成基本型, 于 NRHO 轨道进行组装^[14]. HALO 外径为 3.0 m, 由猎鹰重型火箭发射至 NRHO 轨道后与 PPE 进行模块拼装, 并逐步升级为完备的轨道空间站. PPE 模块包含 3 台 AEPS 推进器, 每台 AEPS 可提供 12 kW 的推进功率, 并产生 60 kW 的电力为

Gateway 空间站系统模块供电^[14], 如图 3 所示^[14]. Gateway 空间站将提供航天器与模块对接端口, 可通过模块化拼装的方式由基本型逐步升级为完备的轨道空间站, 各模块将为月球探测提供不同的功能支持, HALO 与 I-HAB 模块可为航天员提供深空居住场所, PPE 将为空间站提供电力以及高速通信、姿态控制和轨道转移能力. Gateway 空间站建造作为人类探月返回阶段的典型任务, 将为该阶段任务的执行提供基本保障.

2.2 月面活动驻留任务实施阶段

2.2.1 任务实施阶段分析

月面活动驻留任务阶段在人类探月返回阶段所建立的系统与基础设施上, 进行了系统的拓展与优化, 以增强其任务执行能力、增长任务持续时间以及探测月表其他区域的能力^[1]. 该阶段将进行火星登陆任务所需系统、技术和操作流程的评估及优化, 使实现火星登陆的目标成为可能. 如图 4 所示^[1], 该阶段典型任务包括月表基地建造等. 该阶段需要建立月球渐进式发电与配电系统, 以满足月球能源供给的任务需求; 进行工业规模的资源利用及火星模拟等任务, 验证人类的中长期月球探测与后续火星登陆的所需的任务功能. 该阶段将通过部署长期基础设施, 拓展人类对月球极区以外地区的探测, 为火星登陆系统进行测试, 建立人类长时间月面活动驻留所需基本能力^[1].

2.2.2 典型任务分析

基础设施目标是 M2M 战略目标体系的重要支撑, 是月面活动驻留任务阶段的主要目标之一. 基础设施目标包括月球庇护所建造、月球渐进式发电与配

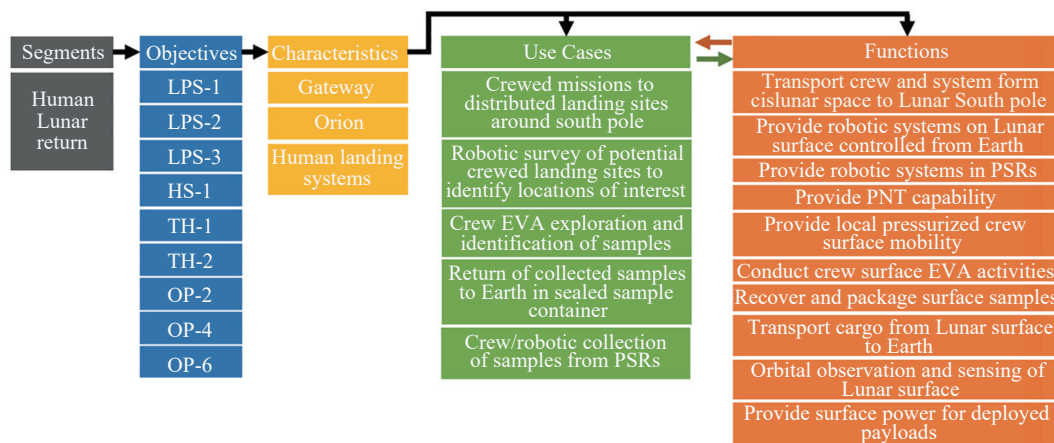


图 2 人类探月返回任务阶段目标与所需任务分析

Fig. 2 Analysis of human lunar return phase objectives and required tasks

电系统建造等. 由于该阶段对于人类中长期月面生存能力的需求, 建造月球庇护所是实现人类月面活动驻留的关键任务之一. 月球庇护所将为航天员提供微陨石冲击、极端温度变化等月表恶劣环境下的生存空间, 从而实现人类在月球表面的中长期活动与驻留.

NASA 于 2021 年提出了月球庇护所的建筑构型^[1], 对其任务需求进行整理总结, 提出由自动建设系统与运营维护系统分阶段建成最终的月球庇护所设想. 如图 5(a)(b) 所示^[15], 月球庇护所将由居住舱与防护外壳构成, 居住舱与防护外壳之间由金属板材进行支撑. 如图 5(c)(d) 所示^[15], 在约 1.83 m 的月壤防护外壳下, 夜晚居住舱室内最高温度可达 -137°C ; 月午居住舱室内最高温度可达 9°C . 该庇护所可以为

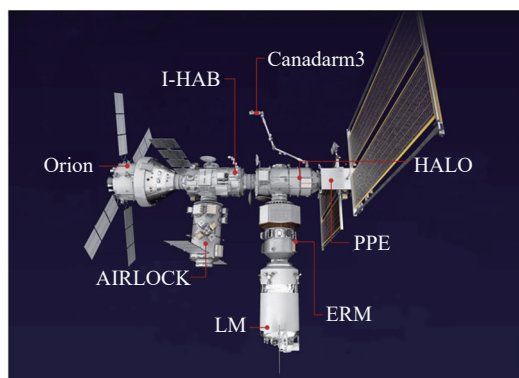


图 3 Gateway 空间站

Fig. 3 Gateway space station

航天员提供大温差环境下的居住场所与微陨石冲击下的防护能力^[15]. 月球庇护所建造涉及选址勘察、规划设计、工程建造以及运维扩展等多项工程任务, 考虑到月球表面极端环境的影响, 如何设计轻质高强的建筑结构、如何利用月壤原位资源生产服役性能优良的建筑材料, 都是亟待解决的关键科学问题.

2.3 月球可持续开发任务实施阶段

2.3.1 任务实施阶段分析

月球可持续开发任务阶段是建立在前两项任务阶段基础上的, 是演化形成的月球开发利用的最终阶段. 该阶段的目标是巩固月面活动驻留任务实施阶段所建立的基础, 并实现人类对月球的持续性开发利用^[11]. 如图 6 所示^[11], 该阶段典型任务包括拓展月球基础设施、构建月球居住能力、构建地月运输能力、原位资源利用等, 为月面长期驻留提供月表探测能力、月面移动能力、月球建造能力等任务功能, 从而满足任务持续能力拓展等任务需求. 基于上述任务需求与任务功能, 该阶段将在月表建造永久性月球基地; 拓展月球原位资源利用规模, 实现工业化的月球资源利用. 进而实现人类在月球的长期驻留, 对月球资源进行开发利用, 实现对地球的反哺, 并构建稳定的地月经济圈.

2.3.2 典型任务分析

月球可持续开发任务阶段是月球开发利用的最终阶段, 该阶段的月球系统将为人类提供地外天体长

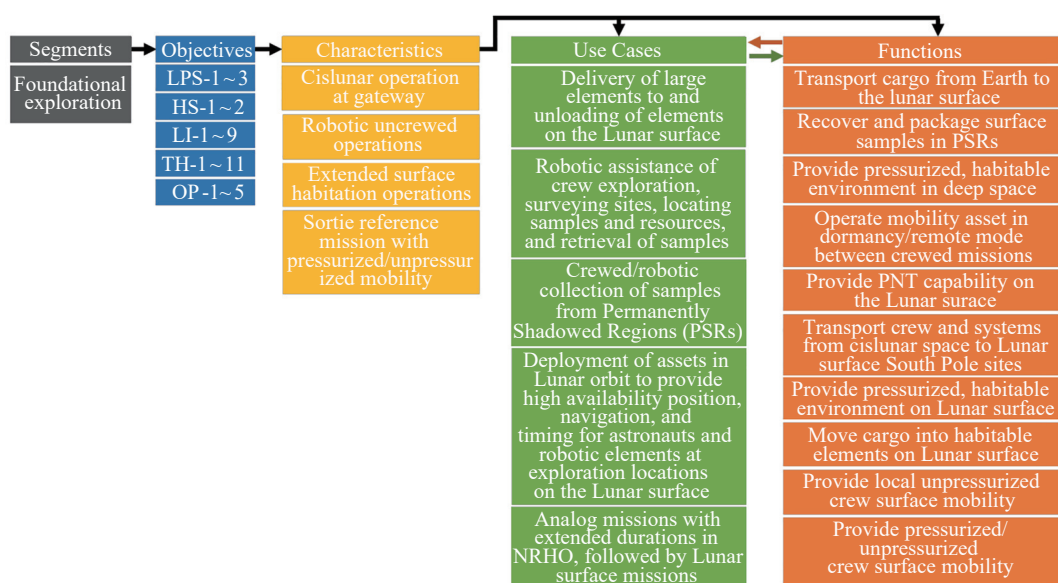


图 4 月面活动驻留任务阶段目标与所需任务分析

Fig. 4 Analysis of foundational exploration phase objectives and required tasks

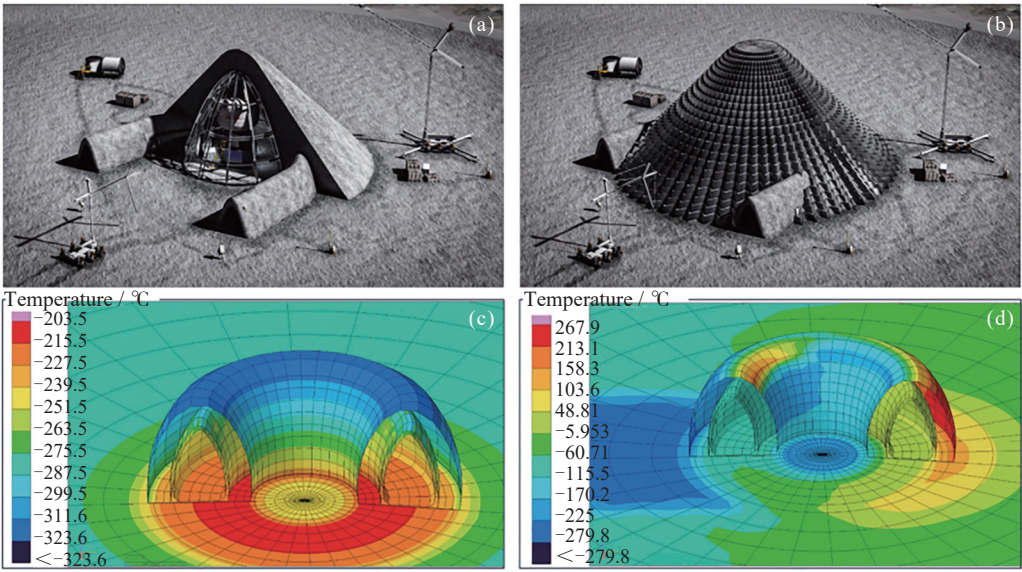


图 5 月球庇护所. (a) 概念, (b) 支撑结构, (c) 夜晚结构热分析, (d) 月午结构热分析
Fig. 5 Lunar safe haven. (a) Concept, (b) support structure, (c) night structural thermal analysis, (d) mid-day structural thermal analysis

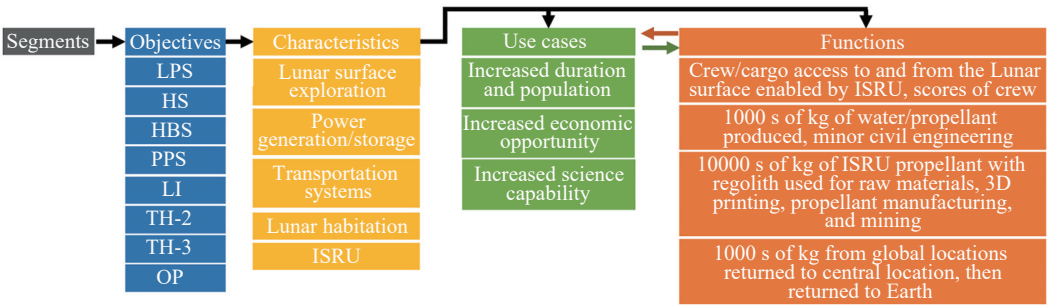


图 6 月球可持续发展任务阶段目标与所需任务分析
Fig. 6 Analysis of sustained lunar evolution phase objectives and required tasks

期生存能力和月球资源开发利用能力^[11]. 为响应 NASA 的任务需求, 麻省理工学院 (Massachusetts Institute of Technology, MIT) 提出了通过电解熔融月壤 (Molten Regolith Electrolysis, MRE) 生产钢合金, 并生成氧气的月表原位资源利用工艺^[16]. 如图 7(a)(b) 所示, 电解熔融装备上部组件利用声波发生器去除电池阳极上的氧气气泡, 并确保在月球低重力条件下进行反应, 延长电极的使用寿命, 该装备将在下部电解槽中生成钢水, 以进行冷却成型, 通过在真空和快速冷却条件下制造的月球钢, 研究在月球上原位生成钢合金的冶金和力学性能. MIT 在地表模拟月球的真空环境中进行了验证实验, 通过对两种含铁量不同的模拟月壤进行电解熔融处理, 在 10^{-3} Pa 和 $1200\sim 1500^{\circ}\text{C}$ 下加热模拟月壤至熔融态, 并使用氮化

硼作为容器, 在不同的冷却速率下得到了样品^[16]. 如图 7(c) 所示, 对产物进行了材料性能表征, 在缓慢冷却和快速冷却条件下, SST-1 和 SST-2 模拟材料产物的维氏硬度范围分别为 823.7 ± 18.9 , 938.3 ± 10.9 , 593.1 ± 5.6 , 568.3 ± 4.5 , 屈服强度范围分别为 317.3 ± 7.3 , 361.5 ± 4.2 , 228.5 ± 2.1 , 219 ± 1.7 ; 在显微图像中, 快速冷却得到的样品具有较小的晶状区域, 因此具有较大的脆性和硬的次级相区域^[16]. 电解熔融工艺可以为月球建造提供高强度建筑材料, 并生成氧气副产物, 实现了对于月壤资源的高效利用. 依赖于地球的任务供给将耗费大量时间与物资成本, 易获取、易加工的原位材料是保证月球探测可持续发展的关键. 月球的可持续开发与利用所需要的工艺技术及其装备, 已经成为各国空间科学技术研究的重点.

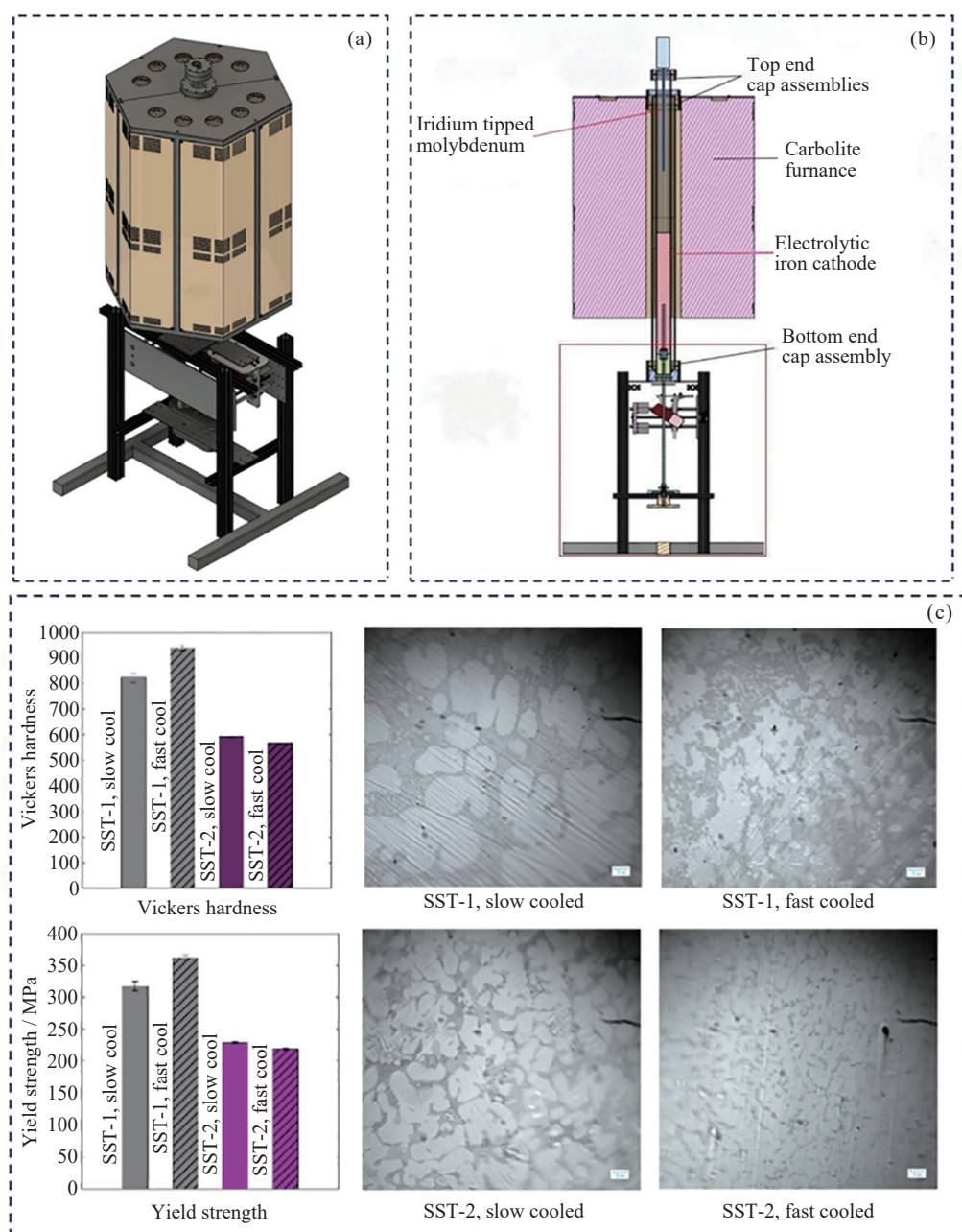


图 7 电解熔融月壤制备钢合金方案. (a) 装备概念, (b) 装备结构, (c) 产物在不同冷却时间下的材料性能表征

Fig. 7 Molten Regolith Electrolysis (MRE). (a) Concept, (b) equipment structure, (c) characterization of material behavior at different cooling speed

2.4 人类登陆火星任务实施阶段

2.4.1 任务实施阶段分析

人类登陆火星任务阶段是 M2M 战略架构的最终阶段, NASA 将在该阶段实现人类登陆火星的宏伟目标^[1]. M2M 战略架构的前三项任务阶段为火星登陆所需的系统能力提供了数据与技术性验证^[1]. 人类登陆火星任务阶段的系统架构设计还未完成, M2M 战

略架构将基于目标体系对该任务阶段架构进行持续性迭代优化. 如图 8^[1]所示, 该任务阶段已明确部分典型任务, 包括建立火星表面系统、构建地火运输系统等, 为登陆火星提供了深空探测能力、深空居住能力及地面保障能力等任务功能, 从而实现火星表面探测等任务需求, 依照循序渐进的方式逐步实现 M2M 战略架构的终极目标.

2.4.2 典型任务分析

M2M 战略架构为人类登陆火星制定了具体的任务执行原则及目标, 但该阶段的任务制定及系统架构设计尚未完成. 人类登陆火星任务的首要问题为如何到达火星并实现安全返回, 火星运输系统的关键技术包括推进技术与科学载荷选择. NASA 针对这一问题提出了核电力推进 (Nuclear Electric Propulsion, NEP) 系统等设计方案^[17]. 如图 9(a) 所示^[17], 核电力推进 (NEP) 系统由反应堆、屏蔽层、中央控制棒和能源管理分配系统等构成, 该系统利用铀-235 的核裂变

产生热能, 并通过 Brayton 系统进行能源转换. NEP 在火星运输的应用中的关键技术问题是如何屏蔽中子和伽马辐射, 以避免对航天员健康造成不良影响. 在 NEP 系统中, 采用低原子序数的材料, 例如氢、铍、锂和硼, 对中子进行屏蔽, 而采用高原子序数的材料, 如钨或贫铀, 对伽马辐射进行屏蔽. 如图 9(b)(c)^[17] 所示, 通过对 4 种不同防辐射装置进行比选, 采用总质量为 2800 kg 的 LiH/W 复合物十字形结构的防辐射装置进行验证. 在该装置的屏蔽保护下, Brayton 系统和 PMAD 系统运行 2 年后的总吸

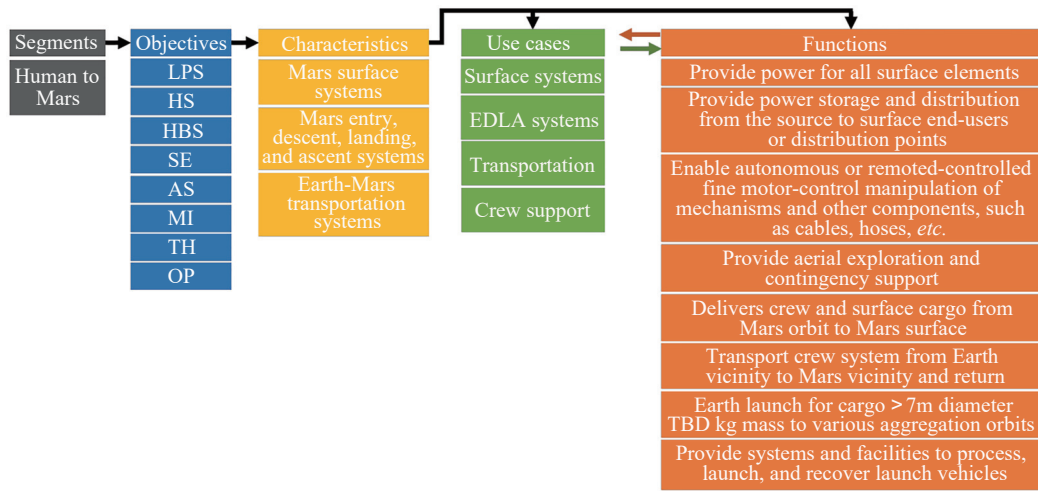


图 8 人类登陆火星任务阶段目标与所需任务分析

Fig. 8 Analysis of sustained human to Mars phase objectives and required tasks

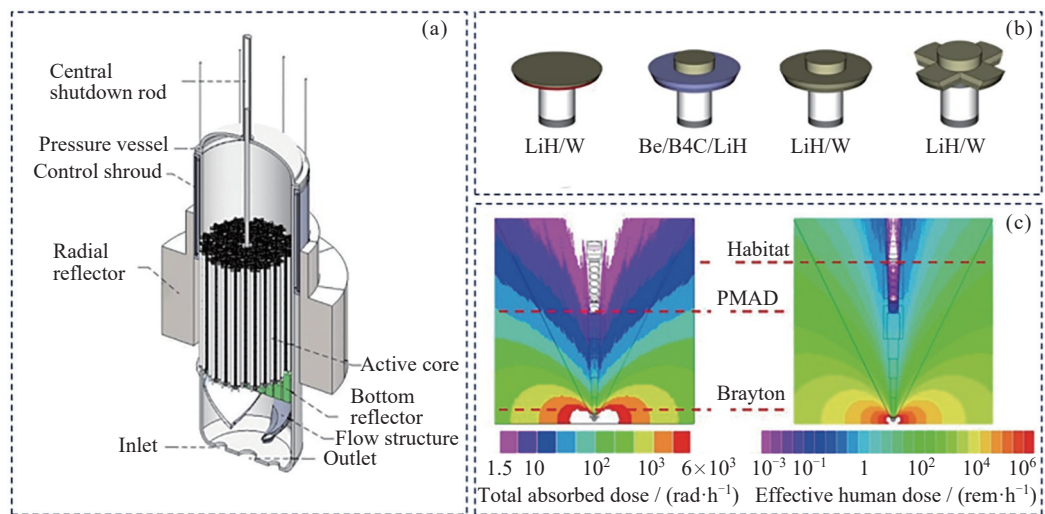


图 9 核电力推进系统 (NEP). (a) 系统结构, (b) 防辐射装置选型, (c) LiH/W 复合物十字形结构防辐射装置屏蔽辐射通量

Fig. 9 Nuclear Electric Propulsion (NEP). (a) System structure, (b) radiation protection device selection, (c) radiation shielding flux of LiH/W complex cruciform structure radiation protection device

收剂量分别为 100 Mrad 和 25 krad, 人体有效吸收剂量为 3 mrem·h⁻¹. 结果表明, LiH/W 复合物十字形结构可有效保护航天员在地火运输过程中免受中子和伽马辐射的影响, 以满足该任务阶段对火星运输系统的功能需求. 为人类登陆火星任务的成功实施, NASA 将对各系统进行设计优化与任务风险评估, 确定最适合火星登陆的系统设计方案.

3 NASA M2M 架构评估准则

NASA 建立了一系列 M2M 战略架构的评估准则, 以指导其探测架构的开展. 这些原则的设计初衷是作为 NASA 重返月球与登陆火星等任务执行的总体纲领. 以架构评估准则为指导, M2M 战略架构通过建立战略目标体系和划分任务阶段的方式进行了总体任务的解构, 以此确保 NASA 在执行后续任务时可以得到良好的结果^[7]. 在 M2M 战略架构的执行过程中, 将基于架构评估准则对战略目标体系和子任务进行持续性的迭代, 对“月球到火星战略架构”中存在的潜在差距进行评估和改进. 该文件通过分析架构评估准则的定义、现有架构评估以及存在的差距以全面了解 M2M 任务的局限性, 对该系统进行客观的分

析, 并提供优化参考^[11]. 表 6^[11] 给出了对 NASA 战略架构评估准则的整理与汇总.

架构评估准则强调美国将继续深化国际合作关系, 其对美国深空探测战略规划具有指导作用. 美国将在后续的探测任务中深化双边、多边合作关系, 持续性引导航天国家共同参与 M2M 架构的建立及其系统的开发工作. 在 M2M 架构中, ESA 将提供欧洲服务舱模组 (ESM), 为猎户座载人飞船的绕月轨道飞行提供支持; 日本宇宙航空研究开发机构 (JAXA) 和加拿大航天局 (CSA) 将深度参与 Gateway 空间站的开发中, 为其提供关键系统要素^[11].

高昂的发射成本与较低的资源利用效率是制约大规模载人航天任务发展的主要因素. 因此, NASA 强调重复利用原则在深空探测任务中的指导性作用. 基于该准则, NASA 将引导美国各行业部门在参与航天工程规划、设计、制造的过程中尽可能地设计可多次使用的系统或结构, 通过维护、回收等过程延长资产的使用寿命, 以降低航天器运营成本, 增强地外探测的可持续性.

此外, NASA 通过研究制定行业合作准则, 促进私营航天公司快速发展. 基于该准则, NASA 引导美国工业界深度参与商业载荷与系统开发. 2017 年

表 6 架构评估准则
Table 6 Architecture assessment tenets

准则	架构评估准则定义	架构评估	现有差距
RT-1	国际性合作: 实现共同目标	NASA 已建立诸多合作关系, 并广泛征求各方意见	NASA 将继续强化双边、多边合作关系
RT-2	行业合作: 与美国工业界合作实现共同目标	为航天资产的开发和生产提供工业基础与基础研究	美国油气行业对 M2M 的贡献目前还未得到充分体现
RT-3	机组人员返回: 使机组人员安全返回并尽可能减轻对人员健康的影响	机组人员的健康与安全返回是贯穿所有任务的重要原则之一	人体长期处于深空环境对健康的不利影响方面还存在较多知识空白
RT-4	乘员时间: 在计划的任务期间内, 最大限度地利用乘员时间进行科学和工程活动	最大限度地提高航天员可用于科学和工程活动的时间与效率	需要进行额外的评估, 以弥合各种差距, 为系统设计和操作规划提供信息
RT-5	可维护性和重复利用: 在可行的情况下设计可重复利用/可回收的系统, 以支持地外探测的可持续性并提升其与地球的独立性	必须对 M2 M 架构进行评估, 以了解系统可维护性、可重用性和可回收性的含义, 以支持长期运行并增加地球独立性	为了延长资产的使用寿命, 必须有专业知识的船员专门用于维护系统, 必须从利用和维护的角度评估系统生命周期限制
RT-6	负责任的使用: 按照国际义务和负责任的外空间行为原则, 以和平为目的开展探测和利用外层空间	架构的开发与任务的执行需遵守现有的法律、政策和指导, 包括但不限于已建立的行星保护政策与外空间法	在保护行星天体和深空探测方面存在重大政策空白, 需完善和更新行星保护政策
RT-7	互用性: 在系统、架构、组织之间交互并共享信息	开发标准化接口, 以最大限度地使其应用于未来任务	需开发正式的标准化策略来管理跨行业的协作
RT-8	近地轨道: 利用近地轨道基础设施支持 M2M 的探测活动	M2 M 架构依赖于目前正在近地轨道上进行的基础研究	低轨道基础设施的应用潜力还没有得到充分的开发
RT-9	商业和空间发展: 促进地球轨道以外经济领域的扩张	美国空间探测将为美国带来大量可持续发展的利益	需制定商业化的探测任务与开发计划

NASA 委托波音公司、洛克希德马丁公司、Orbital ATK 等 5 家公司参与 Gateway 空间站的能源与推进系统 (PPE) 的开发, 诺斯罗普·格鲁曼公司对居住和后勤前哨 (HALO) 进行设计与建造。目前, 美国油气行业还未深度参与 M2M 战略架构的商业载荷与系统开发。NASA 后续将通过任务委托与合同招标的方式, 鼓励私营航天公司参与美国深空探测任务关键科学问题攻关与应用技术创新。

4 结论与启示

4.1 结论

(1) NASA 建立了以 M2M 战略目标体系为引领的空间探测活动总体框架。M2M 战略架构是美国月球到火星探测计划的顶层架构设计, 具有合理性、科学性与前瞻性。其合理性首先体现在 M2M 架构具有高度的整体性和连贯性, 将月球到火星探测计划所涉及的所有任务统合在同一指导框架下, 并依照分任务阶段推进的方式开展探测, 这种逐步推进的策略是务实可行的; 其次, 通过将月球作为火星探测的测试场和跳板, 充分利用了月球相对接近地球、环境较为了了解等优势。M2M 战略架构的科学性体现在其对于科学目标和任务规划的明确性, 该架构以总体愿景为导向, 聚焦关键科学技术问题, 如水冰资源开发利用技术、月表环境的详细探测等; 此外, 该架构还明确提出了未来任务执行所需要的关键技术和系统, 如精确着陆技术、地月空间运输系统等。其前瞻性体现在该架构对于未来深空探测的长远规划和愿景, 通过设立从月球到火星的逐步探测的目标, M2M 架构不仅为近期的任务提供了指导, 也为未来几十年的空间探测活动设定了框架, 最终实现建立可持续空间探测生态系统的愿景, 包括建设月球基地、开发空间资源以及最终实现地外居住。这种从当前技术能力出发, 向人类空间活动未来发展的规划, 展现了极高的前瞻性。

(2) NASA 形成了包括任务阶段、任务需求、任务功能、关键要素在内的 M2M 系统工程架构。NASA 基于 M2M 战略架构的任务需求与任务功能, 在其目标体系的引领下, 将以四大任务阶段进行任务的开展实施。依照任务阶段循序渐进的原则开展月球到火星的探测任务。架构系统任务执行的第一阶段是人类探月返回任务阶段, 该阶段包括在登陆月球, 并在月表及其轨道上建立任务所需的系统和基础设施;

第二阶段是月面活动驻留阶段, 该阶段将进行系统的拓展与优化; 第三阶段为月球可持续开发阶段, 该阶段是月球开发利用的最终阶段; 第四阶段为人类登陆火星阶段, NASA 将在该阶段实现人类登陆火星的宏伟目标。M2M 战略架构将依照体系化的实施方案与分阶段执行的实施步骤, 以循序渐进的方式实现 M2M 战略架构的目标体系与人类重返月球、登陆火星的最终愿景。

(3) NASA 提出了涵盖国际合作交流、可重复利用与商业化开发等 9 条 M2M 指导性评估准则。M2M 战略架构评估准则是该架构探测任务开展的指导性纲领。通过对 9 条原则的梳理与分析, 可以得出 NASA 对于 M2M 战略架构的评估较为系统、全面。NASA 强调多边联合, 寻求国际伙伴、工业界及学术界的深度合作, ESA, CSA, JAXA 等各国航天机构深度参与了 M2M 战略架构的规划与执行。其次, NASA 强调可重复利用原则在深空探测中的指导性地位, 设计、制造可多次使用的系统或结构, 并通过维护、回收等过程延长资产的使用寿命, 以降低航天器运营成本, 增强地外探测的可持续性。此外, NASA 将开发月球视为扩张美国经济圈的重要途径, 美国将继续规划商业化的探测任务与开发计划, 为美国带来大量可持续发展的经济效益。NASA 将基于架构评估准则对战略目标体系和子任务进行持续性的迭代, 对 M2M 战略架构进行客观的分析, 并提供优化参考。

4.2 启示

(1) 应建立从月球到火星的载人/无人探测及开发战略目标体系。月球、火星探测任务具有总体规模庞大、任务开展周期长、任务执行难度高的特点, 应建立月球与火星的载人/无人探测及开发战略目标体系, 以指导载人航天等重大工程。建立开发战略目标体系应以系统目标为任务牵引, 在后续任务的执行过程中逐步实现所规划的系统工程目标; 以科学发展为总体导向, 将国际月球科研站建设、载人探月工程等战略规划作为关键科学问题求解与关键技术验证的重要验证途径; 以地外建造为深空探测目标架构的技术支撑, 在月球表面建立可实现人类长期驻留的月球基地, 为地月空间的可持续性开发利用提供支撑。

(2) 应论证从月球到火星的分阶段实施技术路线与方案。为了进一步推进从月球到火星的载人/无人探测及开发战略目标体系的建立, 需要规划详细的路线部署。依照任务阶段循序渐进的原则, 逐层拆解目

标, 将总体目标具象化, 最终整理形成分阶段实施技术路线与方案. 对技术路径中存在的重点难点科学技术进行凝练总结, 针对重要科学技术问题组织攻关研究. 在不同的任务阶段, 目标以及功能需求都会发生变化, 应对不同任务阶段的需求进行梳理分析, 明确未来中国月球及火星探测任务的技术路线. 在分阶段执行的任务中, 依照拟定的阶段执行方案逐步推进, 从而实现各阶段目标, 带动空间技术、空间应用等领域的创新性突破.

(3) 应分析从月球到火星的关键科学技术挑战与差距. 月球与火星的载人/无人探测过程需要航空航天、材料科学、土木工程、地外建造等多学科参与, 分析其关键科学技术挑战并评估技术差距. 通过评估载人/无人探测工程开展中的重难点, 形成总结, 以此作为从月球到火星战略目标体系的重要参考. 与此同时, 鼓励高校、科研机构、私营航天公司共同参与基础科学研究与重点技术攻坚, 引领多行业承接重点工程攻关项目, 实现空间技术、空间应用等领域的技术突破, 缩小技术差距. 并基于科学技术的突破革新对战略目标体系进行持续性的迭代, 形成具有时效性与远见性的月球与火星的载人/无人探测及开发战略目标体系.

参考文献

- [1] JIM L, JEFFREY K. Apollo 13[M], Boston: Houghton Mifflin Harcourt, 2006
- [2] BRIAN H. Soviet and Russian lunar exploration[M], Springer Science & Business Media, 2006
- [3] NASA, Artemis[EB/OL]. <https://www.nasa.gov/feature/artemis/>
- [4] ISRO, Chandrayaan-2[EB/OL]. https://www.isro.gov.in/Chandrayaan_2.html?__cf_chl_tk=sYXZ4I2Zu2EYEWwfbDzs45PdPLss_a_GbmqliaxcWI-1712744162-0.0.1.1-1642
- [5] ESA, ESA STRATEGY FOR SCIENCE AT THE MOON [EB/OL]. <https://exploration.esa.int/s/WmMyaoW>
- [6] ESA, Terra Nova 2030+ Strategy Roadmap [EB/OL]. https://esamultimedia.esa.int/docs/HRE/Terra_Novae_2030+strategy_roadmap.pdf
- [7] PAUL A, BRAD B, DAVE B, *et al.* The Lunar Exploration Roadmap: Exploring the Moon in the 21st Century: Themes, Goals, Objectives, Investigations, and Priorities, 2013[EB/OL]. <https://www.lpi.usra.edu/leag/LER-Version-1-3-2013.pdf>
- [8] PAUL A, BRAD B, DAVE B, *et al.* The Lunar Exploration Roadmap: Exploring the Moon in the 21st Century: Themes, Goals, Objectives, Investigations, and Priorities, 2016[EB/OL]. https://www.lpi.usra.edu/leag/roadmap/USLER_version_1_point_3.pdf
- [9] JEFF F. NASA delays Artemis 2 and 3 missions[R]. 2024
- [10] NASA, NASA'S Moon To Mars Architecture A Summary Of The 2022 Architecture Concept Review Process And Results[EB/OL]. <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/10/acr22-publication-083123.pdf>
- [11] NASA, Moon-to-Mars Architecture Definition Document [EB/OL]. [https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20230002706/downloads/M2MADD_ESDMD-001\(TP-20230002706\).pdf](https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20230002706/downloads/M2MADD_ESDMD-001(TP-20230002706).pdf)
- [12] NASA, Artemis Accord[EB/OL]. <https://www.nasa.gov/artemis-accords/>
- [13] 中国国家航天局. 国际月球科研站合作伙伴指南 [EB/OL]. <https://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758838/c6812147/content.html>
- [14] NASA, Gateway Space Station[EB/OL]. <https://www.nasa.gov/reference/gateway-about/>
- [15] MELANIE G, BOB M. Overview of lunar safe haven seedling study for NASA/APL excavation & Construction TIM STMD Game Changing Development Program, 2021.
- [16] PALAK P, JOSE S, ZACHARY A, *et al.* Artemis steelworks: Advancing reactor technologies for electrolytic manufacturing of in-situ steel[EB/OL]. <https://bigidea.nianet.org/wp-content/uploads/MIT-Technical-Paper.pdf>
- [17] LEE M, STEVE O, DAVID J, *et al.* Nuclear power concepts and development strategies for high-power electric propulsion missions to mars[EB/OL]. https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210016968/downloads/TM-20210016968_final.pdf

作者简介



夏一峰 男, 硕士研究生, 研究方向为月球基地建造, 先进材料的开发与性能优化, 月壤新材料成型与型性调控等.
E-mail: carlohurst@163.com



高玉月 女, 博士研究生, 研究方向为月球基地建造, 结构智能设计与优化, 月面结构参数化建模与设计等.
E-mail: gyy5112@163.com



周 诚 男, 教授, 博士生导师, 国家级青年人才计划入选者, 华中卓越学者. 研究方向为地外建造与工程管理, 主持国家重点研发计划课题及国家自然科学基金重大项目课题.
E-mail: charleschou@163.com