0254-6124/2025/45(1)-0001-14 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

编者按 习近平总书记强调,“浩瀚的空天还有许多未知的奥秘有待探索,必须推动空间科学、空间技术、空间应用全面发展”.党的二十大报告明确“加快建设航天强国”,到2035年我国将“实现高水平科技自立自强,进入创新型国家前列”.为此,由中国科学院牵头,集我国空间天文、日球层物理、月球与行星科学、空间地球科学、微重力物理与空间生命科学领域的相关优势力量,围绕极端宇宙、时空涟漪、日地全景、宜居行星、太空格物等科学主题,开展了10个学科专业的发展战略研究.为让各界了解相关学科发展战略研究的成果,积极参与思考学科发展前沿和提出具有重大科学意义的空间科学任务,《空间科学学报》联合中国科学院国家空间科学中心论证中心,策划了《至2035年空间科学学科发展战略研究》专题,本期推出专题第6篇——裴照宇等:基于月球科研站的科研活动战略分析及其作业平台总体方案研究.

PEI Zhaoyu, WANG Qiong, XU Lin, ZHANG Chenxuan, ZHANG Feng, ZHANG Xianguo, WANG Huijuan, JIA Yingzhuo, LIU Yang, XUE Changbin, ZHANG Jinhai, ZHANG Tianxin, PENG Jing, WANG Chi, ZOU Yongliao. Strategic Analysis of Scientific Activities and Study on the Overall Plan of Scientific Operation Platforms Based on the Lunar Research Station (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, **45**(1): 1–14. CSTR:32142.14.cjss.2024–0188. DOI:10.11728/cjss2025.01.2024–0188

基于月球科研站的科研活动战略分析及其作业平台总体方案研究*

裴照宇[1] 王 琼[1] 徐 琳[2] 张晨轩[2]
张 锋[2] 张贤国[2] 王汇娟[3] 贾瑛卓[2]
刘 洋[2] 薛长斌[2] 张金海[4] 张天馨[1]
彭 兢[5] 王 赤[2] 邹永廖[2]

1(国家航天局探月与航天工程中心 北京 100048)

2(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

3(中国科学院国家天文台 北京 100101)

4(中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

5(北京空间飞行器总体设计部 北京 100094)

摘 要 月球是地球的唯一天然卫星,因其独特的空间位置、空间环境和物质资源,一直是国际深空科学探测活动的主要目标天体和推动航天高新技术发展的理想试验场所.构建月球科研站(基地)将是未来月球探测活动的主要趋势,可为开展月球地质演化、宇宙早期历史与不同层级天体形成和演化、日地月系统耦合机制、物理与生物学效应、材料特性等多学科交叉的前沿科学研究提供独特的机遇.同时,探测活动也将由单一任务向多任务联合探测方式发展,其科研作业形态也必将向多任务多目标智能化联合作业转变.本文在梳理月球探测活动发展态势和中国倡导的国际月球科研站大科学工程科学目标需求分析基础上,开展了基于月球科研站的科研作业平台概念

* 中国科学院重点部署项目(KGFZD-145-2023-15),基础科研项目(JCKY2021130B016)和国家自然科学基金重大项目(62495034)共同资助

2024-12-17收到原稿,2025-01-08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/)

性研究, 提出月球科研站科研作业平台的总体架构, 初步设计了 6 类科研作业平台的总体方案.

关键词 月球探测, 国际月球科研站, 科研作业平台, 总体方案

中图分类号 P184

Strategic Analysis of Scientific Activities and Study on the Overall Plan of Scientific Operation Platforms Based on the Lunar Research Station

PEI Zhaoyu[1] WANG Qiong[1] XU Lin[2] ZHANG Chenxuan[2]
ZHANG Feng[2] ZHANG Xianguo[2] WANG Huijuan[3] JIA Yingzhuo[2]
LIU Yang[2] XUE Changbin[2] ZHANG Jinhai[4] ZHANG Tianxin[1]
PENG Jing[5] WANG Chi[2] ZOU Yongliao[2]

1(*Lunar Exploration and Space Engineering Center, China National Space Administration, Beijing* 100048)

2(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

3(*National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101)

4(*Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029)

5(*Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing* 100094)

Abstract The Moon, the Earth's only natural satellite, has always been the main target of international deep space exploration and an ideal test ground to promote the development of advancing aerospace technologies because of its unique space position, space environment, and material resources. The establishment of the lunar research station will be a primary objective of future lunar exploration, providing an unique observational opportunity for multidisciplinary frontier scientific research. These include studies of lunar geological evolution, the early history of the universe, celestial body formation across scales, coupling mechanisms of the Sun-Earth-Moon system, physical and biological effects, as well as unique properties of materials. This development marks a paradigm shift from single-mission exploration to integrated multi-mission frameworks, driving scientific activities towards intelligent, multi-task, and multi-objective systems. This paper reviews the development trends in lunar exploration and analyzes the scientific objectives and application requirements for the International Lunar Research Station (ILRS) proposed by China. It outlines a conceptual framework for scientific operation platforms designed for lunar research, presenting an architecture composed of six specialized platforms: comprehensive geological research, multi-physical field measurement networks, astronomical survey systems, Sun-Earth-Moon coupling observation networks, fundamental science experiment modules, and lunar resource utilization platforms. These platforms are tailored to address diverse research requirements, ranging from detailed lunar surface surveys and geophysical measurements to large-scale astrophysical observations and advanced biophysical and material science experiments. To ensure effective operation, an intelligent management hub is proposed, serving as the command center for data processing, operational coordination, and real-time task optimization. This hub supports autonomous mission planning, integrated data analysis, and dynamic resource allocation, ensuring efficient collaboration between different platforms. By integrating these systems, the ILRS aims to provide a foundation for sustainable, long-term lunar exploration and multidisciplinary scientific breakthroughs. This study highlights the strategic

significance of establishing the ILRS, which seeks to foster global collaboration, drive innovations in deep space exploration, and serve as an open, inclusive, and sustainable platform for addressing major scientific and technological challenges. The conceptual framework proposed herein aligns with the vision of advancing humanity's understanding of the Moon and beyond, supporting the long-term development of lunar science and exploration.

Key words Lunar exploration, International Lunar Research Station (ILRS), Research operation platforms, Overall plan

0 引言

20 世纪 50 年代末至 70 年代中, 苏联、美国两个航天大国掀起了空间竞赛背景下的第一次探月活动高潮, 获得了大量的科学探测数据和约 382 kg 的月球样品. 在随后的近 20 年里, 虽未进行探月活动, 但利用科学数据和月球样品开展的综合研究, 极大丰富了人类对月球的科学认知, 构建了系列月球形成与演化科学理论. 进入 90 年代后, 美国、欧洲、日本、印度、俄罗斯和中国等国家与地区实施了系列探月活动, 国际上掀起了新一轮探月高潮. 随着探测与研究工作的不断深入, 对于月球的认识取得了新的进展, 旧的理论体系在补充－完善－否定－证认的循环认识中不断得到新的升华. 近年来, 随着美国主导的阿尔忒弥斯计划和中国倡导的国际月球科研站计划的推出与实施, 国际月球探测活动进入以月球南极为重点区域全面推进认识月球、利用月球为目标的新发展时期.

月球特殊的空间环境, 让其成为重要的科学研究平台. 月球科研站的建设为日地月空间大尺度、多圈层的精细观测与综合研究提供了前所未有的机遇. 依托月球独特的观测条件, 可实现空间天气事件的全链条、跨尺度探测, 揭示太阳爆发的起源、传播过程及其与地月系统的耦合机制. 这种联合观测可为太阳活动预测和空间天气预警提供关键支撑, 深化对地月系统演化规律的认知, 为月球资源开发与深空探测奠定科学基础; 月基巡天观测兼具地基和天基优势, 具备电磁谱全波段透明、全天时长时间基线大可见天区连续观测、高精度稳定平台、免地冕紫外干扰、免来自地球的射电干扰 (月球背面)、规模化成长型建设等优势, 将获取地基和天基难以实现的特殊波段观测数据, 在国际上首次实现动态更新的紫外星表, 有望在构建动态宇宙、研究宇宙不同层级天体形成与演化及行星宜居性上获得突破.

月球正在成为人类发展的下一个战略空间, 主要航天强国和新兴航天国家都加大了探月活动的力度. 2019 年 3 月美国阿尔忒弥斯计划正式出台, 欧洲、日本、加拿大等国家与地区积极参与了该计划的国际合作, 印度也是该计划签约国之一, 特别是月船三号成功着陆月球南部高纬度区域后, 已明显加速了探月活动的进程. 俄罗斯已将月球探测作为其深空探测活动的战略目标, 正在实施系列探月任务. 此外, 阿联酋、沙特、埃及、以色列、土耳其、南非、韩国、泰国、巴西等国家也先后制定了月球探测的发展计划.

2004 年中国正式启动探月工程. 过去 20 年里, 成功实施了嫦娥一号至嫦娥六号的系列任务, 技术上实现了重大突破, 科学上取得了一系列重大进展. 早在 2015 年中国就提出了共建国际月球科研站的发展远景, 倡导各国共同参与, 在月球上构建具备开展月球科学探测、资源利用、月基观测、基础科学实验、技术验证等多学科多目标科研活动的长期自主运行、短期有人参与的综合性科学实验设施, 制定提出了工程、科学、应用目标和总体发展路线[1]. 目前的初步规划是以 2035 年作为大致节点, 分阶段实施国际月球科研站的建设. 但随着论证的不断深入, 整体规划可能会有所调整.

总之, 月球探测活动将由单一任务向多任务联合探测方式发展, 构建月球科研站, 系统实施科学研究、技术试验和资源利用正成为未来探月活动的发展趋势, 其科研作业形态也必将向多任务多目标智能化联合作业转变. 本文立足于国际月球科研站的战略需求和发展规划, 围绕总体科学目标, 研究提出国际月球科研站科研作业平台的总体架构, 初步设计了综合地质、多物理场测量网、巡天观测、日地月多圈层观测、基础科学实验、资源开发利用等科研作业平台及其智能运行管理中枢的总体方案.

1 科研作业平台的任务需求分析

1.1 科学目标需求

尽管人类已经开展了 130 多次探月活动, 大大丰富了人类对月球的认知, 但仍然存在诸多关键科学问题有待进一步探测与研究, 特别是对月球内部结构及其性质、月球资源的分布及其赋存机制等的认识还极为有限, 限制了对月球在整个 46 亿年的演化进程中重大地质事件时空分布及其发生机制等基础科学问题的了解, 进而大大影响对月球形成与演化等重大科学命题的认识. 不同于以往单一探测任务, 月球科研站具备大尺度、长时间、多点持续且实时同步的集观测、探测、科学实验、资源就位利用于一体的各类科研作业条件, 不但对解决上述重大科学问题提供前所未有的机遇和挑战, 而且可利用月球独特的空间位置与环境等资源, 为实施月基天文、日–地–月空间物理、月表环境下基础科学等观测与科学实验提供最佳观测与实验场所. 经过多年的深入论证, 未来的国际月球科研站主要科学与应用目标包括如下 5 大领域.

(1) 月球地质. 开展站区地质特征详查和月球多物理场测量和定点分析, 实施采样返回及其实验室精细研究, 揭示月球内部结构及其物质组成特征、重大地质事件的时空分布特征及其形成机制、水和挥发分在月球演化过程中的约束机制、月球形成与演化等重大科学问题, 实现月球演化理论等研究的重大突破.

(2) 巡天探秘. 开展多谱段、宽谱段特别是超长波、紫外谱段的巡天观测, 揭示宇宙黑暗时代和黎明的演化史并构建宇宙演化的完整图像, 探寻近邻宇宙高能暂现源、超新星爆发的“第一缕光”、新的系外宜居类地行星, 研究宇宙不同层级天体的形成与演化.

(3) 日地联系. 开展日–地–月多时空尺度的全因果链观测, 揭示太阳磁场、高层大气、高能辐射在日–地–月空间的物理规律及其动力学过程, 以及太阳风与月球、地球的相互作用机理, 探索地球能量平衡新理论体系, 刻画地–月系统重大空间天气事件发生机理, 并构建其预报的理论模型, 服务于人类空间活动.

(4) 科学实验. 开展微生物–植物进化、植物生长发育对月面环境的感知与应答等实验, 揭示月壤作为植物栽培基质的生物可利用性、安全性并服务于科研站航天员活动; 开展磁单极子和轴子等新粒子探寻和研究, 为基础物理前沿科学理论提供重要实证; 基于月球平台开展特殊材料科学研究, 为相关领域的技术应用提供新的认识和方法.

(5) 资源利用. 开展就位的水和稀有气体提取、制氢制氧、月壤材料制备与制造等技术试验, 深化对月壤中资源在月面原位环境条件下的沉积、挥发、迁移和衍化机理的认识, 验证资源勘查、开采、冶炼和制造等关键技术及工艺, 支撑未来规模化的资源开发利用.

1.2 科研作业任务需求

基于国际月球科研站的科学探测任务, 将以各类科研作业平台的形式实施. 科研作业平台是指用于开展各类科学研究、技术试验、资源利用等专业性活动并具有系统化、集成化、智能化、可维护、可拓展、可升级等特点的设施设备. 根据月球科研站总体科学与目标需求, 主要包括如下的科研作业任务.

(1) 综合地质科研作业任务. 通过科研站多次任务, 构建覆盖目标区域的探测网络, 依托点对点的线剖面探测和区域性三维空间剖面探测, 获取月球相关区域的形貌构造、浅表层结构、物质组成、月壤物性等信息, 并甄选样品返回地球, 建立代表性地质单元的综合地质模型, 揭示月球在空间上的不均一性及其演化历史, 解答月球演化历史等一系列重大月球科学问题.

(2) 月球多物理场探测科研作业任务. 月球单一物理场探测对月球内部精细结构研究存在明显的不确定性[2–4], 开展基于“重、磁、电、震、热”等多物理场的综合探测, 获得月壳精细结构、月幔物质组成、月核相态等关键信息, 剖析月球内部圈层结构和重大地质事件的形成和演化机制.

(3) 巡天观测科研作业任务. 开展月基全天时、全频段、多模式的天文观测, 获取在地面和地球轨道难以实现的极紫外至红外超宽谱段巡天和个体目标源高精度观测数据、超长波高精度全天频谱和图像数据、月基甚长基线干涉 (VLBI) 超高空间分辨率成像、MeV 伽马射线探测和分赫兹引力波探测数据, 为天文学相关重大前沿科学问题提供全面、精准的数据支撑[5–12].

(4) 日地月多圈层观测科研作业任务. 利用月球的独特空间位置、平台稳定性及无磁无大气优势, 开展太阳爆发活动及其行星际传播特性、地月系统圈层结构及其对太阳活动响应的探测, 获取日面环境、月

表及近月空间粒子、射线及电磁场环境动态参数, 记录地月系统重大天气事件物理特性, 为揭示日地月空间物理现象成因机制和环境变化提供观测数据支持[13–15].

(5) 基础科学试验科研作业任务. 利用月球低重力、高真空、微磁场以及极大温差等极端环境特点, 开展月面环境下的基础物理学、生命学、材料科学等基础科学实验, 获取月面非平衡态体系物理力学特性与演化规律、生态系统各生物部件及其相互作用对月面特殊环境条件的响应数据、磁单极子能量沉积和电磁感应数据、材料合成和材料性能变化数据, 为月球环境下的物理学及力学效应、生物学效应、材料特性研究和技术突破提供支持.

(6) 资源开发利用作业任务. 开展月球原位资源探测与利用, 获取能源分布、矿产特性及材料制造条件等关键数据, 通过能源获取、物质转化、制造建造等资源利用技术试验, 推动月球资源的规模化开发与利用, 支持月球科研站的可持续发展, 探索地月系统经济圈乃至产业链[16,17] 的应用前景.

2 科研作业平台总体方案

围绕月球地质、巡天揭秘、日地联系、科学实验、资源利用等总体科学与应用目标和上述各类科研作业任务需求分析, 结合科研作业时空分布、要素关联、任务实施等特性和约束, 研究并提出国际月球科研站科研作业的“6 平台 1 中枢”的总体架构 (见图 1).

2.1 综合地质科研作业平台

综合地质科研作业平台执行获取探测区地形地貌、物质成分、样品初选等的就位探测与分析的科研任务, 主要包括地形地貌探测、地质构造探测、物质成分探测、样品采集与甄选等 4 大模块.

地形地貌探测、地质构造探测、物质成分探测三大模块依托巡视器、飞跃器、作业机器人、着陆器等各器上的光学相机、穿透雷达和成分探测仪, 获取多站点区域集地形地貌、表面物质成分与资源、地质构造等于一体的精细探测数据, 实现对各站区地质特征及其演化历史的认识, 获取的各站区资源分布等成果支撑资源开发利用科研作业任务的实施. 同样, 依托上述各器, 样品采集子模块根据物质成分探测模块的探测数据, 采集感兴趣样品并输运到位于本平台主站点的样品甄选子模块进行进一步甄选和存储, 以备将来返回地球, 开展实验室的分析研究.

综合地质科研作业平台工作场景如图 2 所示. 平台可实现对月球地质组分、形貌构造、次表层结构的精密探测与综合性原位数据分析, 以辅助实验场地、采样点选择和巡视器路径规划.

2.2 多物理场测量网科研作业平台

月球多物理场测量网科研作业平台主要执行月球重力场、电磁场、月震、热流值等物理参数探测, 开展多物理场的月球内部圈层结构和热状态模型研究

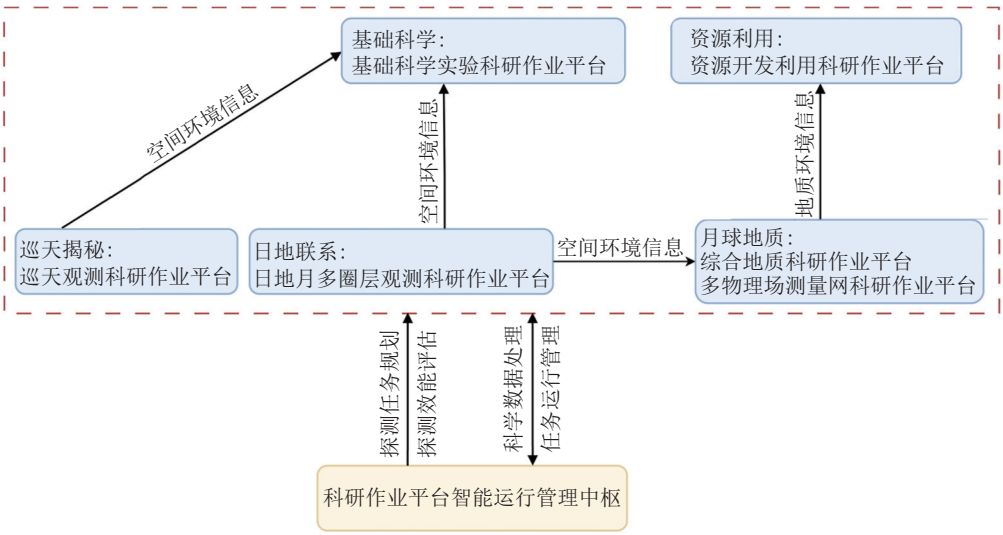


图 1 国际月球科研站科研作业平台组成

Fig. 1 Composition of the scientific operations platform of the ILRS

等任务, 主要由重力测量、电磁场测量、月震测量和热流测量等 4 个模块组成.

重力测量模块基于月球原位时变重力探测技术手段, 获取月球固体潮和月球自由振荡等动力学信号, 反演月球内部圈层结构和物性状态; 电磁场探测模块通过同台址电磁场联合探测, 实现二者之间的相互约束, 从多个维度提升反演结果的可靠性; 月震测量模块通过部署不少于 3 个节点[18,19], 在空间构型上实现月震台网孔径最优化, 以获取高精度月震观测数据, 为远场月震精确定位提供月面参考基准. 热流测量模块通过设置多级探测触点, 数目不少于 5 个, 探测深度不低于 3 m[20], 实现月球内部热流随深度变化规律的精细刻画, 揭示月球当前内部热状态, 为研究月球内部热结构和热演化历史提供第一手资料.

多物理场测量网科研作业平台 (见图 3) 采用统分结合的方式进行台网布设和长期联合观测. 其中, 重力探测所需平台资源较多[21], 将与主站实施一体化设计; 热流探测需要钻探装备支持, 需与各站密切结合[20]; 磁场和电场探测易受电磁干扰, 应适当远离主站设置探测节点[22]; 磁强计和测月雷达可搭载在作业机器人上, 并在作业机器人行进过程中实施地下浅层结构探测, 探测数据将通过作业机器人择机传输至主

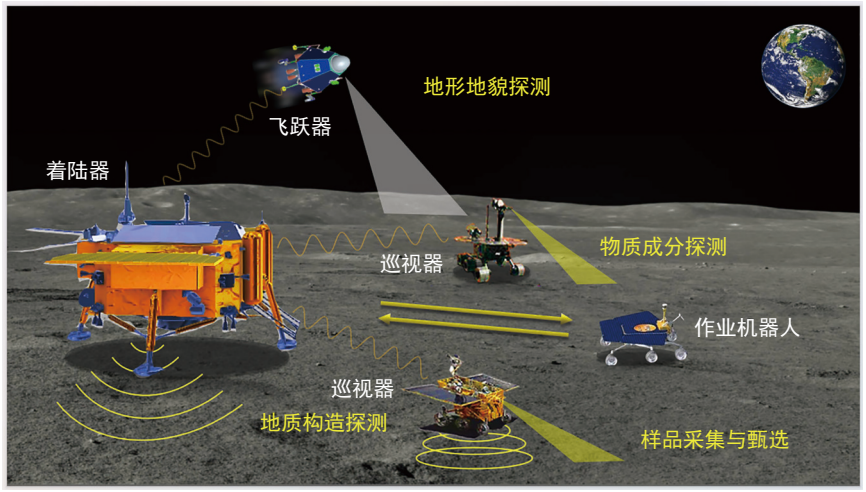


图 2 综合地质科研作业平台部分工作场景

Fig. 2 Partial schematic diagram of the comprehensive geological scientific operation platform

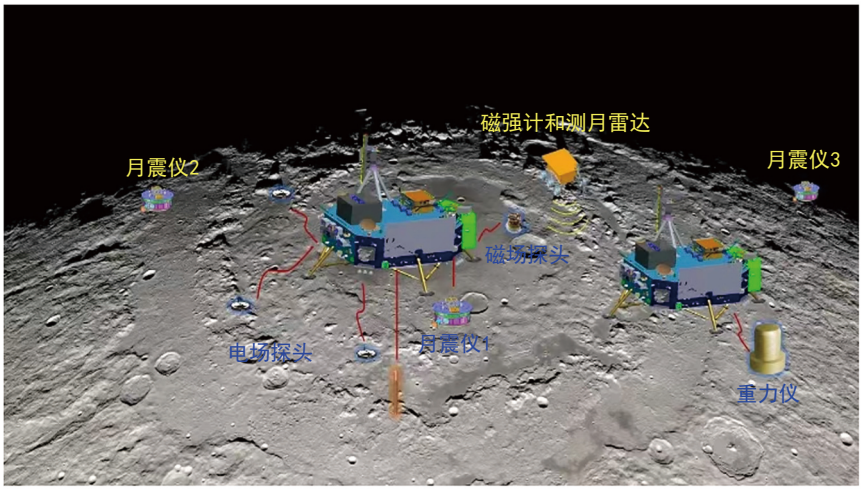


图 3 多物理场测量网科研作业平台局部工作场景

Fig. 3 Partial schematic diagram of the multi-physical field measurement networks scientific operation platform

站; 轨道雷达则通过环月轨道开展全月球次表层结构探测; 月震观测将以主站为依托, 开展分布式节点探测, 形成区域月震观测网. 各节点具备独立供电、存储、通信和月夜生存等能力[1], 其布设和初始化均由作业机器人完成, 并由主站提供统一的时间信标.

2.3 巡天观测科研作业平台

巡天观测科研作业平台借助月面独特观测条件, 将开展月基全电磁谱段覆盖的天文多谱段同时且多模式可选、多信使协同观测, 具备对台址可见天区高频巡天、长期凝视、智能分析且动态融合等特点, 并根据实际的科学需求、科研站能力和动态发展, 最终成为综合性、规模化、成长型的天文观测平台, 主要包括以下 5 个观测模块.

(1) 月基紫外–光学–红外观测模块由月基紫外–光学–红外望远镜/阵实现, 既具备开展极紫外至红外超宽谱段覆盖、超高精度多谱段同时巡天与精细观测能力, 又具备超大视场高回访频率紫外巡天观测能力, 可根据科学需要逐步配置测光、光谱、成像、偏振、干涉等观测模式, 构建动态更新完备紫外星表, 聚焦星系演化、暂现源探测、宜居性与宜居系外行星探测等研究.

(2) 月基超长波观测模块由布置在月面或绕月轨道的月基超长波射电阵列实现, 具备开展超长波谱段高精度全天频谱测量、超长波全天图像观测、超高能宇宙线和超高能中微子在月球上产生的簇射脉冲探测能力, 首次打开超长波探测窗口, 实现对宇宙黑暗时代与黎明和低频射电源探测, 聚焦宇宙早期演化历史等研究.

(3) 月基甚长基线干涉 (VLBI) 观测模块由月基 VLBI 阵列与地面射电望远镜联合实现地–月极长基线, 比当前地基 VLBI 基线提高近 40 倍, 具备开展超高空间分辨本领射电天文观测能力, 聚焦活动星系核吸积流和喷流、黑洞视界面精细结构等研究.

(4) 月基 MeV 伽马射线观测模块由月基 MeV 伽马射线望远镜实现, 具备 MeV 谱段巡天和偏振观测能力, 聚焦高能宇宙线起源和加速机制、伽马射线暴爆发机制等研究.

(5) 月基分赫兹引力波观测模块由月基分赫兹引力波探测器/阵实现, 具备对引力波激发的月球分赫兹微振动开展高精度探测能力, 聚焦中等质量黑洞探测等研究.

巡天观测科研作业平台 (见图 4) 将开展全天时不间断观测, 其中月基紫外–光学–红外、月基 VLBI、月基 MeV 伽马射线、月基分赫兹引力波四个观测模块主要工作在月球科研站的主站, 部分模块可兼顾主站和分站, 各模块之间合理统筹布局, 尽量避免或减小模块间对彼此及其他科研作业平台对本平台各模块的观测视场遮挡和电磁干扰等. 通过米级或更大口径月基紫外–光学–红外望远镜阵、月基 VLBI 阵列、月基 MeV 伽马射线望远镜、月基分赫兹引力波探测器/阵, 开展覆盖极紫外至红外超宽谱段的高精度天文巡天和个体目标源精细观测、超高空间分辨率成

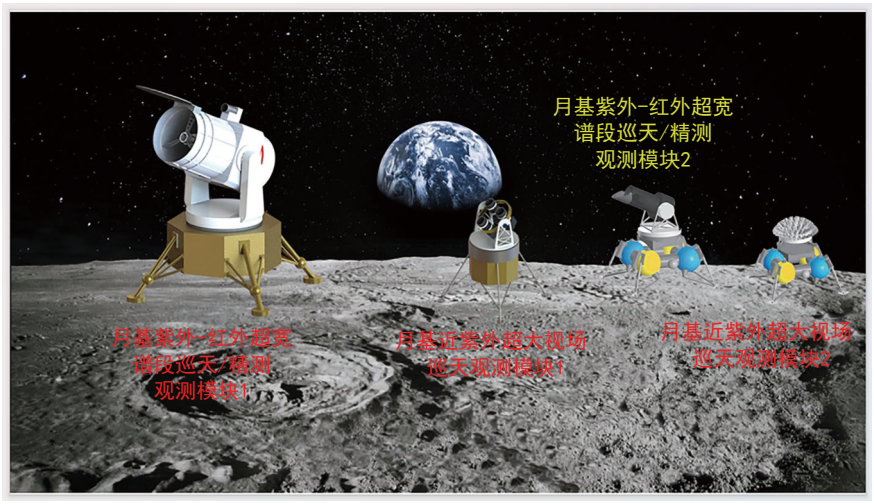


图 4 巡天观测科研作业平台局部工作场景

Fig. 4 Partial schematic diagram of the astronomical sky survey observation scientific operation platform

像、MeV 伽马射线观测、分赫兹引力波探测等, 能源和通信等由月球科研站主站和相应分站提供保障; 月基超长波观测模块主要工作在月球背面的分站, 借助月球背面独特的低频观测环境并严格控制站点自身设备低频干扰, 通过大型低频射电阵列开展超长波观测, 能源和通信等由月球科研站分站提供保障.

2.4 日地月多圈层观测科研作业平台

日地月多圈层观测科研作业平台利用月面平台和轨道位置优势, 通过遥感和原位结合手段, 开展太阳活动及行星际传播、地月系统多圈层分布演化、月表与近月空间多源粒子耦合的联动探测, 聚焦太阳活动先兆与传播机理、日地相互作用的多圈层分布演化、地球物质能量损失与向月传输、月球太空风化作用、近月空间圈层拓扑结构演变、月球物质逃逸与暂态电离层等研究, 探究日地月空间环境在不同圈层间的耦合联动关系与物理量变化, 为日地月系统认知和科研站空间灾害天气预报服务提供支撑[5,23,24].

该平台是由 3 个模块组成的, 分别为太阳探测模块、地球多圈层探测模块、近月空间多源粒子响应探测模块.

太阳探测模块通过部署月基遥感观测手段, 对日面和日冕开展高时空覆盖、宽谱段、高分辨率的可见、紫外、X 射线、低频射电的流量、光谱和成像监测, 也具备高时间分辨率、中等空间分辨率、高灵敏度的全日面矢量磁场测量能力, 实现对具有高能、高温、高速活动特点的太阳“三高”活动的全周期观测.

地球多圈层探测模块通过部署月基遥感观测手段, 获取日地相互作用边界到地球表面的地球空间多要素分布演化和成像信息, 实现对太阳活动下的磁层、电离层和地冕、大气和板块的地球“三圈层”响应过程监测.

近月空间多源粒子响应探测模块通过月面原位多点布局与地月轨道天地一体联合探测, 开展对月面与近月空间电磁场、带电粒子、月尘与中性成分的多方向、多时空位置连续高精度探测, 获取来自太阳、地球和月球自身的“三源”粒子环境要素数据, 实现对日地活动过程中的近月空间响应、月面辐射环境时空分布与演化、日地控制下的多个等离子体区域穿越的拓扑结构和特征改变监测.

日地月多圈层观测科研作业平台 (见图 5) 通过月基遥感实现太阳活动及其行星际传播“三高”特征、地球空间“三圈层”特征监测, 地月空间轨道原位实现日地作用及其地月空间响应与传输监测, 月面多点原位实现不同太阳风和地球风入射条件、月面地形和地质条件下日、地、月“三源”粒子耦合特征及其对日地活动响应特性监测.

2.5 基础科学实验科研作业平台

基础科学实验科研作业平台主要利用月球的高真空、低重力、无磁场及大温差等特殊的环境条件, 开展相关科学实验与研究. 本方案仅以生命科学、基础物理科学、材料科学的科学试验为例来设计科研作业平台的总体技术方案, 平台可根据后续任务需求进行拓展和完善. 其中生命科学模块为封闭模块, 以控制实验对象的温度、湿度、气压等条件; 基础物理科学实验模块为开放系统, 便于开展对新粒子的探测; 材料科学实验模块为半开放系统, 以控制材料制备过程中的反应条件, 以及在真实月表环境下检测验证材料性能. 基础科学实验科研作业平台主要布设在科研站主站区, 各模块相对独立工作.

(1) 生命科学实验模块. 主要开展月面生命科学和生态学实验, 研究小型生态系统的各生物物种及其相互作用模型对月面特殊环境条件的响应机制, 实验对象可包括植物、动物、微生物等. 实验数据可作为可保障航天员长期生存的生物再生生命保障系统未来在月面的构建和运行的理论基础, 并初探基础科学层面的月面生物学效应. 如图 6 所示, 该模块由 4 个子模块组成, 模块整体及各系统均具备高度气密、供植物生长的光照、温湿度调节、营养物质注入等生命

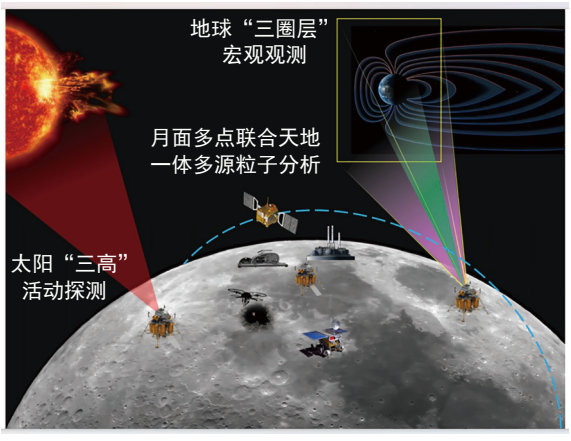


图 5 日地月多圈层观测科研作业平台工作场景与布设

Fig. 5 Sun-Earth-Moon multi-layer observation scientific operation platform

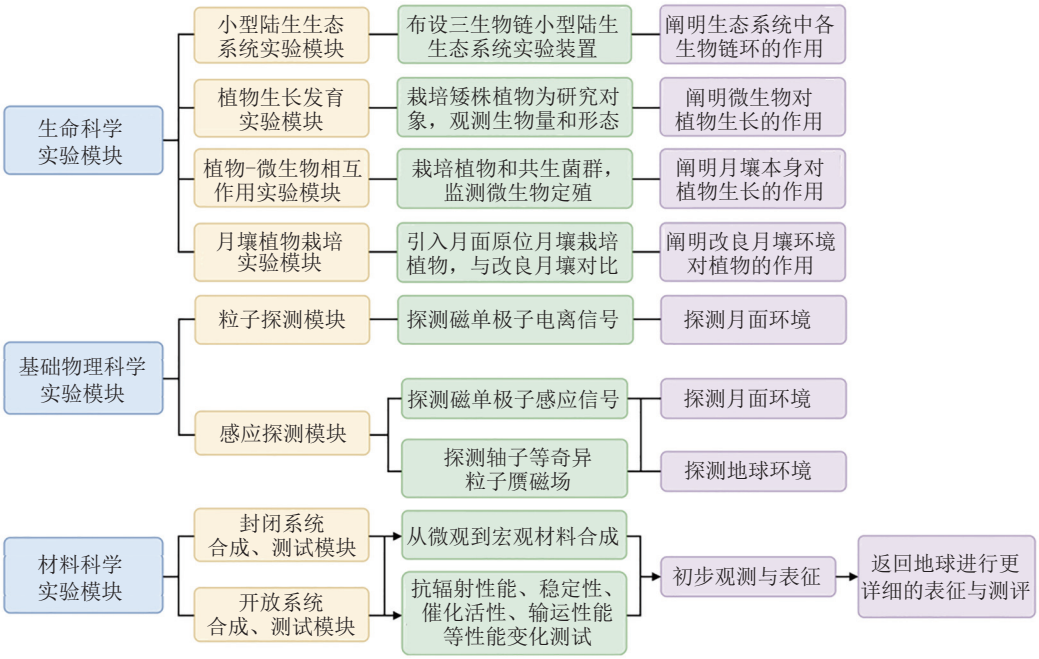


图 6　基础科学实验模块工作模式

Fig. 6　Operation model of the fundamental science experiment scientific operation platform

生态保障功能, 以及种子注水、光照启停等生物学实验启动/终止功能, 并可监测 O_2/CO_2/水分/营养物质等生物学实验记录功能.

(2) 基础物理科学实验模块. 基础物理科学实验模块主要利用新兴量子精密测量技术和传统粒子探测技术结合, 对于磁单极子的能量沉积和电磁感应信号进行同时探测. 基础物理科学实验模块的探测系统为模块化阵列如图 6 所示, 通过单个子模块分阶段搭建组成阵列, 对轴子暗物质进行搜寻, 并结合地球探测器形成网络对轴子暗物质大尺度结构进行研究.

(3) 材料科学实验模块. 材料科学实验模块是基于月球特殊环境平台开展多尺度材料的合成与加工研究, 同时模拟器件与设备的抗辐射性能, 为超导、太阳能电池、催化、新型抗辐射器件制备及未来月球资源循环利用提供新的启示和方法. 该模块分为封闭体系材料合成、测试模块和开放体系材料合成、测试模块, 如图 6 所示. 封闭体系是在只考虑重力 (或者重力与温度) 的条件下, 在封闭状态进行材料合成和材料性能变化监控. 开放体系是暴露在月球环境下, 进行材料合成和材料性能变化监控. 在两个体系中, 都可通过光学相机、便携式光谱仪等简易设备进行初步的观测与表征, 待实验模块返回地球后再进行更详细的表征和测评. 材料合成包括从微观到宏观材料的合成, 性能测试包括抗辐射性能、稳定性、催化活性、输运性能等.

2.6　资源开发利用科研作业平台

月球资源开发利用科研作业平台综合考虑月球科研站发展建设规模和月面原位资源获取利用需求, 旨在充分利用月球资源的独特特性, 开展月球原位资源探测与利用, 进而实现规模化的开发利用. 该平台融合了月球材料科学、能源系统和空间制造等多学科领域, 通过对月球物质资源开采与转化、月球能源资源获取与利用、月基制造与建造等手段, 为月球科研站的可持续发展和高收益运营提供关键支撑. 该平台具有可扩展、易维护等特点, 可满足月球科研和探测活动不断发展的需求.

根据“资源可分类, 利用需综合”的月面资源利用方针, 月球资源开发利用科研作业平台由 3 大模块组成, 分别为能源获取与利用模块、物质开采与转化模块、月基制造与建造模块[16].

能源资源获取与利用模块通过应用太阳能[25] 和月壤剖面的温差能等手段, 在高地区域布设电、热能转化提取及存储利用装置, 实现对太阳能的转化, 并利用月壤进行储能、温差发电和地热能利用等科研作

业活动.

物质开采与转化模块通过布设月壤水冰探采装置、矿产资源开采利用装置, 实现对月球水冰和钛铁矿等典型矿产资源的开采和利用. 通过金属非金属制备装置, 以月壤为主要原料, 进行高温冶炼和物质提纯等制备工艺过程, 实现钛铁铝等金属材料和单晶硅、月壤纤维等非金属材料的制备. 其中, 月壤水冰探采装置、月面制氢制氧装置和推进器制备装置应布设在月球永久阴影区边缘区域.

月基建造与制造模块中, 月基制造是以月面制备的金属或非金属为主要原材料, 利用增材、减材和等材等制造手段, 通过特定月基制造装置将其转化为功能性零部件或特需装置的科研作业活动. 月基建造是以月壤或月岩为主要原料, 通过在月球科研站附近平坦区域布设相应设备, 采用 3D 打印、作业机器人摊铺和砌筑等多种施工途径, 在月球表面或者地下构建基础设施的建造活动.

资源开发利用科研作业平台各模块通过科研作业平台智能运行管理中枢进行自主智能控制和数据传输与信息共享管理, 在智能化作业机器人的协助下, 开展规模化资源开发利用科研作业活动. 资源开发利用科研作业平台的工作场景与布设如图 7 所示.

2.7 科研作业平台智能运行管理中枢

科研作业平台智能运行管理中枢, 是月球科研站科研作业平台的运行决策和数据处理中心, 通过对科研站科学作业平台和设备的智能运行管理, 实现探测任务规划、载荷状态监测、科学数据处理、探测效能评估的自主控制和执行.

该平台主要功能包括: 探测任务规划功能, 以科学目标为驱动, 制定科研作业平台探测计划、平台联动计划, 确定各平台有效载荷工作计划; 任务运行管理功能, 依据平台探测计划、平台联动计划、有效载荷工作计划, 与各科研作业平台进行有效载荷数据注入指令、遥测数据交换, 对平台及其有效载荷运行状态进行监测与控制; 科学数据处理功能, 以科研作业平台采集的科学数据为处理对象, 进行数据预处理、科学数据生产; 探测效能评估功能, 以科学数据为评估依据, 评估当前科学目标实现程度, 对现有平台探测计划、平台联动计划、载荷工作计划进行修正, 直至科学目标完全实现构成月面原位闭环.

科研作业平台智能运行管理中枢系统运行架构如图 8 所示, 与其功能相适应, 业务模块包括探测任务规划、任务运行管理、科学数据处理、探测效能评估等.

探测任务规划模块, 针对国际月球科研站一体化联合探测任务中, 科研作业平台多样、多平台高效协同、探测态势动态变化等特点, 运用多探测平台协同任务规划技术、面向动态需求的多优先级任务规划技术, 在科学目标、平台及有效载荷健康状态、当前探测效能、科研站相对日地位置、地面干预控制等多约束条件下, 以探测时长、能源消耗、试验设备应用频次、材料损耗等为优化目标, 采用任务规划算法实现

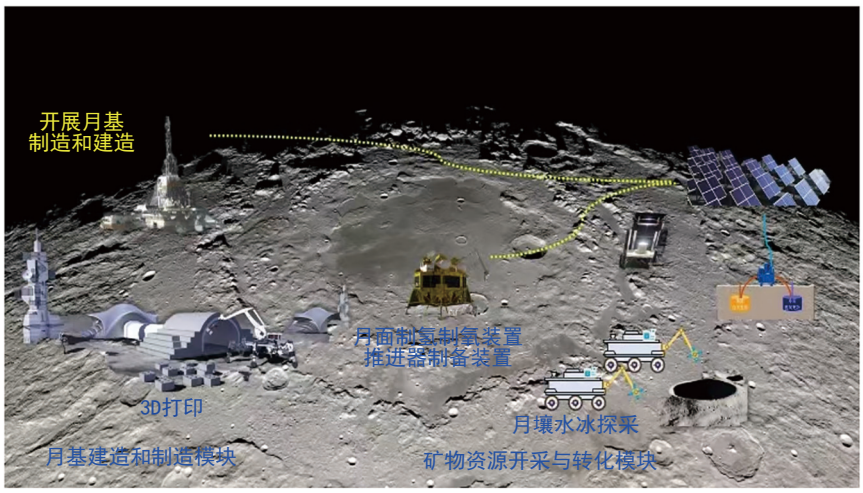


图 7 资源开发利用科研作业平台工作场景与布设

Fig. 7 Lunar resource utilization scientific operation platform

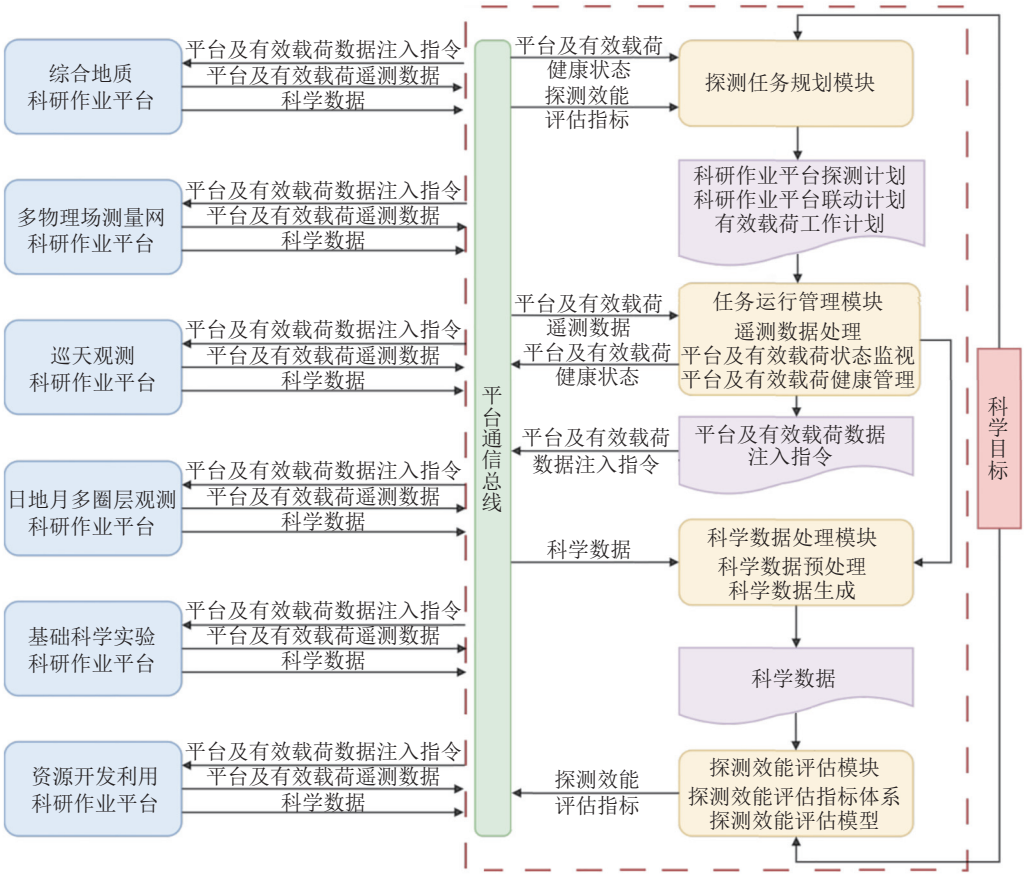


图 8　科研作业平台智能运行管理中枢系统运行架构

Fig. 8　Operational architecture of the intelligent management hub for scientific operation platforms

探测方案寻优, 最终达到平台联合探测、精确探测、敏捷探测的规划目标.

任务运行管理模块, 通过运用科研作业平台遥测数据挖掘分析技术、有效载荷健康状态敏捷监测技术、科研作业平台有效载荷剩余寿命预测技术等, 在无人值守模式下, 一方面依据平台有效载荷工作计划, 自动生成控制有效载荷的注入指令, 控制有效载荷设备的开关机、工作参数调整、工作模式设置, 驱动各平台执行与探测计划一致的探测任务; 另一方面对科研作业平台的遥测数据进行处理, 决策当前平台及有效载荷设备的健康状态、运行趋势.

科学数据处理模块, 通过运用海量科学数据快速解译技术、科学数据处理柔性工作流技术、月面智能处理算法可重构技术等, 构建包括地质样品与天文数据原位分析、重磁电震热多物理场数据融合、天区机遇目标识别等算法在内的, 包括面向地质、多物理场、巡天观测、日地月多圈层观测、基础科学、资源开发等多学科的处理程序集合, 自主实现科学数据的预处理与科学数据的生产.

探测效能评估模块, 以当前生产的科学数据为输入, 运用综合效能评估要素与指标体系构建、指标赋权算法、多数据源融合评估算法和评估风险控制方法等, 构建科学目标实现程度相关的探测效能评估指标体系, 计算效能评估指标值、评估指标权重, 进而综合评估当前科学目标的实现程度, 据此驱动探测任务规划模块进行探测计划的适度修正或重新制定.

3　各科研作业平台与科研站平台间的工程约束

月球科研站各类科研作业平台与地月运输、月面布设、安装调试、运行维护等工程能力密切相关, 也与站址的光照、温度、视场、地形地貌等月面环境条件密切相关; 而且不同科研作业平台对科研站的需求

亦有不同. 因此, 在构建“6 个科研作业平台+1 个智能运行管理中枢”时, 应综合考虑选址、能源、通信、计算等多方面工程因素 (见图 9).

总体上, 多物理场测量网与基础科学实验作业平台间具备较好的相容性, 且所产生的等量时间下的数据量不大, 二者需提供月夜电力供应条件, 因此科研站对涉及这两类科研作业平台的约束总体上较弱; 综合地质和资源开发利用科研作业平台由于涉及机器人频繁行驶、样品研磨、资源开采、实时分析等活动, 受科研站选址、能源供给及算力等条件约束较强; 巡天观测和日地月多圈层观测科研作业平台将搭载众多光学或射电观测设备, 且数据量大, 因此受科研站选址、通信、能源、算力等条件约束很强. 此外, 科研作业平台智能运行管理中枢需与其他平台间进行大量数据交互并进行计算和控制, 因此应位于具有良好通信可视条件的月球科研站主中枢, 可考虑与科研站信息处理中枢、运行管理中枢复用; 所需长期功率较大, 附近应具有电源点或供电中心.

综合考虑科研站初步任务概念及其对科研作业平台约束, 提出“1 主站+X 分站”的分布式布局. 主站设在月球正面南纬 80°以上且光照、交通、对地通信、科研价值等综合条件较为优越的区域, 满足大部分科研作业需求. 而针对低频射电观测、资源利用等具有较高选址约束条件的科学探测任务需求, 可在合适地点设置专门用途的分站, 例如: 在月球背面建设低频射电观测阵列, 构成低频射电分站; 在月球南极区域水冰资源丰富的大型永久阴影坑区域, 建设规模化运行的水资源利用分站; 在月球正面月海经勘察探明的钛铁矿资源富集区域, 建设规模化运行的钛铁矿资源利用分站等.

科研站主站区初步布局可按功能划分为中枢区、地质和资源利用作业区、综合实验测量区、宁静观测区、辐射防护区等区域.

中枢区包括科研站主中枢和副中枢, 科研站中枢承担通信中枢、信息处理中枢、运行管理中枢等多重功能, 也包括科研作业平台智能运行管理中枢. 中枢区具有最佳的通信和能源支持, 将成为国内外探测器的集中着陆区和起飞区, 以及机器人/巡视器的主要移动通道.

地质与资源利用科研作业区应包含特殊地质现象、水冰、钛铁矿富集等区域, 综合地质科研作业平台可设置在与各感兴趣地质点均相距不远的交通便

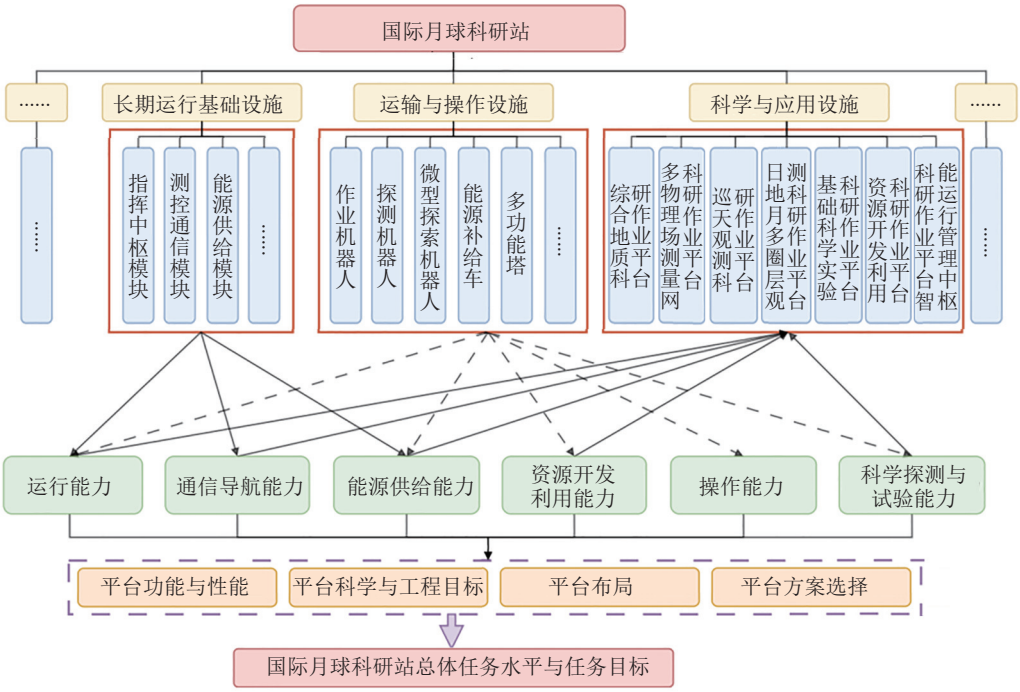


图 9 国际月球科研站与各科研作业平台间的约束关系

Fig. 9 Constraints between ILRS and scientific operation platforms

利处, 位于主站的资源开发利用科研作业平台主要开展相关技术和工艺验证, 为后续专门的规模化资源利用分站建设积累经验, 可根据资源类型, 设置在相应的富集区域附近.

辐射防护区是以核反应堆电源为中心、距离主中枢一定距离的科研作业禁区. 在该区域内, 只布置核堆及其屏蔽体、电力控制器和电缆等设备, 各科研作业平台均位于辐射防护区外.

综合实验测量区包含基础科学实验、多物理场测量网科研作业平台. 基础科学实验平台涉及实验材料更换, 可距离中枢区更近, 多物理场测量网平台在完成布设后不希望受到干扰, 可适当远离中枢区.

宁静观测区包含巡天观测、日地月多圈层观测科研作业平台. 该区域整体上远离地质和资源开发利用区域的扬尘环境, 而相对临近核堆, 以利于获得全天时电力供电.

4 结论

构建月球科研站是未来月球探测发展的必然趋势, 中国倡导的国际月球科研站旨在为全人类搭建一个开放、包容和可持续发展的深空探测国际合作平台. 不同于以往的任何单次任务, 月球科研站的科学探测将由单一任务向多任务联合探测方式发展, 科研作业形态也必将向多任务、多目标、智能化联合作业转变.

国际月球科研站将聚焦于月球内部圈层结构等与重要地质事件的时空分布及其成因机制相关的重大月球科学问题, 宇宙黑暗时代与黎明和宇宙不同层级天体的形成与演化等月基天文核心科学问题, 日地月系统多圈层物理规律及其成因机制, 月球环境下生命科学等基础科学实验, 以及逐步推进规模化月球资源开发利用等五大科学与应用目标领域, 开展各类科研探测活动.

基于国际月球科研站总体科学目标需求和科研作业任务需求分析, 本文提出了科研作业平台的基本概念——“科研作业平台是指用于开展专业性的各类科学研究、技术试验、资源利用等活动并具有系统化、集成化、智能化、可维护、可拓展、可升级等特点的设施设备”, 设计了“6 平台+1 中心”科研作业平台的总体架构及其技术方案, 可为国际月球科研站的方案论证和设计、各科研作业平台方案的进一步深化和扩展、相关学科方向的创新研究提供指导或参考.

致谢 参与国际月球科研站论证的各领域专家对本文给予了支持.

参考文献

[1] PEI Zhaoyu, LIU Jizhong, WANG Qian, *et al*. Overview of lunar exploration and international lunar research station[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, **65**(24): 2577-2586 (裴照宇, 刘继忠, 王倩, 等. 月球探测进展与国际月球科研站 [J]. 科学通报, 2020, **65**(24): 2577-2586)

[2] GARCIA R F, KHAN A, DRILLEAU M, *et al*. Lunar seismology: an update on interior structure models[J]. *Space Science Reviews*, 2019, **215**(8): 50

[3] BRIAUD A, FIENGA A, MELINI D, *et al*. Constraints on the lunar core viscosity from tidal deformation[J]. *Icarus*, 2023, **394**: 115426

[4] BRIAUD A, GANINO C, FIENGA A, *et al*. The lunar solid inner core and the mantle overturn[J]. *Nature*, 2023, **617**(7962): 743-746

[5] WANG Chi, LIN Yangting, PEI Zhaoyu, *et al*. Key scientific questions related to the lunar research station[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2022, **36**(6): 830-840 (王赤, 林杨挺, 裴照宇, 等. 月球科研站的关键科学问题 [J]. 中国科学基金, 2022, **36**(6): 830-840)

[6] BIANCHI L, SHIAO B, THILKER D. Revised catalog of *GALEX* ultraviolet sources. I. The all-sky survey: GUVcat_AIS[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2017, **230**(2): 24

[7] GEHRELS N, CHINCARINI G, GIOMMI P, *et al*. The *swift* gamma-ray burst mission[J]. *The Astrophysical Journal*, 2004, **611**(2): 1005-1020

[8] MASON K O, BREEVELD A, MUCH R, *et al*. The XMM-Newton optical/UV monitor telescope[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2001, **365**: L36-L44

[9] CAO Li, RUAN Ping, CAI Hongbo, *et al*. LUT: a lunar-based ultraviolet telescope[J]. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2011, **54**(3): 558-562

[10] SHUGAROV A S, WANG Huijuan, DONG Subo, *et al*. The concept of Lunar-based astrophysical telescope for international lunar research station[J]. *Vestnik NPO imeni S. A. Lavochkina*, 2022, **55**(1): 3-9

[11] WANG Huijuan, SACHKOV M E, DONG Subo, *et al*. Science of the lunar-based UV-Optical-IR telescope for ILRS[C]//*The Thirteenth Moscow Solar System Symposium (13M-S3)*. Moscow, Russia, 2022: 108

[12] CHEN Xuelei, GAO Feng, WU Fengquan, *et al*. Large-scale array for radio astronomy on the farside (LARAF)[J].

Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2024, **382**(2271): 20230094

[13] SHI Quanqi, ZHANG Jiang, YUE Chao, *et al*. Review of particle radiation environment of the Earth-Moon space and its impact on Lunar surficial material generation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, **66**(7): 2685-2702 (史全岐, 张江, 乐超, 等. 地月空间粒子辐射环境及其对月表物质的影响研究进展 [J]. 地球物理学报, 2023, **66**(7): 2685-2702)

[14] WU Weiren, YU Dengyun. Development of deep space exploration and its future key technologies[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2014, **1**(1): 5-17 (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)

[15] GUO Huadong, DING Yixing, LIU Guang. Research status and prospect of moon-based earth observation: a review[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2022, **9**(3): 250-260 (郭华东, 丁翼星, 刘广. 月基对地观测研究现状与展望 [J]. 深空探测学报 (中英文), 2022, **9**(3): 250-260)

[16] PEI Zhaoyu, WANG Qiong. Strategic concept of resource utilization development route of the international lunar research station[J]. *Journal of Astronautics*, 2024, **45**(4): 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 [J]. 宇航学报, 2024, **45**(4): 625-637)

[17] PEI Zhaoyu, WANG Qiong, JIANG Shengyuan, *et al*. Development prospect of *in-situ* resource utilization activities in lunar research stations[J]. *Science and Technology Foresinght*, 2024, **3**(1): 9-21 (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)

[18] NUNN C, GARCIA R F, NAKAMURA Y, *et al*. Lunar seismology: a data and instrumentation review[J]. *Space Science Reviews*, 2020, **216**(5): 89

[19] ZHANG Jinhai, LIN Yangting, YAO Zhenxing. Detection of lunar interior structures and the challenge on its key technology[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2022, **36**(6): 888-894 (张金海, 林杨挺, 姚振兴. 月球内部圈层结构探测及关键技术挑战 [J]. 中国科学基金, 2022, **36**(6): 888-894)

[20] LI Xiongyao. Study on lunar-surface thermal parameter models and a theoretic analysis of lunar soil thickness exploration using passive microwave remote sensing[D]. Beijing: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2006 (李雄耀. 月表热参数模型与月壤厚度的被动微波遥感理论分析 [D]. 北京: 中国科学院地球化学研究所, 2006)

[21] LI Fei, ZHENG Chong, HAO Weifeng, *et al*. Gravity field of the moon and gravity survey on the lunar surface[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2022, **36**(6): 851-858 (李斐, 郑翀, 郝卫峰, 等. 月球重力场的确定与月面重力测量 [J]. 中国科学基金, 2022, **36**(6): 851-858)

[22] DU Aimin, GE Yasong, WANG Huapei, *et al*. Ground magnetic survey on Mars from the Zhurong rover[J]. *Nature Astronomy*, 2023, **7**(9): 1037-1047

[23] WANG Chi, ZHANG Xianguo, XU Xinfeng, *et al*. The lunar and deep space environment exploration in China[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, **6**(2): 105-118 (王赤, 张贤国, 徐欣锋, 等. 中国月球及深空空间环境探测 [J]. 深空探测学报 (中英文), 2019, **6**(2): 105-118)

[24] SHI Quanqi, ZONG Qiugang, LE Chao, *et al*. Response of the lunar space environment to solar wind and earth wind[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2022, **36**(6): 871-879 (史全岐, 宗秋刚, 乐超, 等. 月球表面及空间环境对太阳风与地球风的响应 [J]. 中国科学基金, 2022, **36**(6): 871-879)

[25] PALOS M F, SERRA P, FERERES S, *et al*. Lunar ISRU energy storage and electricity generation[J]. *Acta Astronautica*, 2020, **170**: 412-420

作者简介



裴照宇（通信作者） (1966-), 研究员, 嫦娥八号任务总设计师, 曾任探月工程二期副总设计师、探月工程三期副总设计师, 长期从事月球与深空探测任务总体设计和工程管理.
E-mail: peizhaoyu@cnsa.gov.cn



邹永廖（通信作者） (1964-), 中国科学院国家空间科学中心研究员、博士生导师, 主要从事月球与深空探测发展战略、行星科学和国家深空探测工程的研究、研制等工作.
E-mail: zouyongliao@nssc.ac.cn