

载人月球科研试验站若干问题思考

彭祺擘¹, 王 平², 邢 雷¹

(1. 中国航天员科研训练中心, 北京 100094; 2. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘 要: 为实现月球探测的可持续发展, 在实施首次载人登月任务后, 将探索建造载人月球科研试验站, 实现人在月面长期生存和月球资源开发利用。针对此背景, 调研了国外载人月球探测两次热潮提出的发展规划与现状, 之后根据载人深空探测发展规律, 分析并思考提出以验证人类长期地外生存技术与难点问题、开展月球深度科学研究、资源的探测与开发利用等任务为建站目标; 在分析建站难点与发展趋势的基础上, 探讨了未来可能分步实施、循序渐进的发展规划与路径; 面向战略、科学、工程与经济4大要素, 并重点考虑载人航天安全性要求, 提出了建站选址的初步思路, 最后分析了初步思考的6项关键技术及难点问题与发展规划。

关键词: 载人登月; 载人月球科研试验站; 建站目标; 发展规划; 建站选址

中图分类号: V57 文献标识码: A 文章编号: 1000-1328(2023)09-1436-11

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2023.09.016

Considerations on Several Issues of China's Manned Lunar Scientific Research and Test Station

PENG Qibo¹, WANG Ping², XING Lei¹

(1. China Astronauts Research and Training Center, Beijing 100094, China; 2. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: China's lunar exploration efforts have been focused on achieving sustainable development. To this end, the country has planned to construct a manned lunar scientific research station after successfully landing on the moon, with the aim of ensuring long-term human survival on the lunar surface, as well as developing and utilizing lunar resources. To achieve this goal, extensive research has been conducted on the development plans and current situation of manned lunar exploration. Based on the development of human deep space exploration, the goal of verifying human long-term extraterrestrial survival technology and addressing difficult problems, while carrying out in-depth scientific research on the moon and exploring its resources are proposed. After analyzing the difficulties and development trends of the station's construction, possible step-by-step and gradual development plans and paths for the future are discussed. Considering the four major elements of strategy, science, engineering, and economics, and focusing on the safety requirements of manned spaceflight, a preliminary idea for the selection of the station location is proposed. Finally, six key technologies and difficult issues are analyzed, along with the development plan. Overall, China's commitment to lunar exploration reflects its dedication to advancing scientific knowledge and technological capabilities, while also contributing to the long-term sustainability of human presence in space.

Key words: Manned lunar exploration; Manned lunar scientific research and test station; Lunar station construction objectives; Development planning; Site selection of lunar station

0 引言

习近平总书记指出,探索浩瀚宇宙,发展航天事业,建设航天强国,是我们不懈追求的航天梦。随着中国空间站的全面建成,载人航天工程“三步走”发展战略已从构想成为现实,2023年全面进入空间站应用与发展新阶段^[1]。此外,探月工程也圆满完成了“绕、落、回”三步走战略目标,后续将继续开展面向更大区域和更长时间的无人月面探测活动^[2]。

为进一步推动航天强国建设,在前期两大工程任务的基础上,载人月球探测工程登月阶段任务已启动实施,计划在2030年前实现中国人首次登陆月球,目前已全面部署开展各项研制建设工作,包括研制新一代运载火箭(长征十号)、新一代载人飞船、月面着陆器、登月服等飞行产品,新建发射场相关测试发射设施设备^[3]。

为实现月球探测的可持续发展,实施首次载人登月任务后,还将探索建造载人月球科研试验站,实现人在月面长期生存和月球资源开发利用。本文瞄准未来载人月球探测发展趋势,针对在月球表面建站目标、规划、选址以及关键技术等相关问题开展思考与研究,探索未来月球科考与开发、月球可持续发展方向。

1 国外发展现状调研

世界载人月球探测共出现过两次热潮,第一次是从人类首次进入太空开始到“阿波罗”计划结束为止,这一阶段载人月球探测以政治为主要驱动力,美国和苏联为争夺世界霸权,瞄准月球展开了激烈的竞赛^[4]。由于政治因素的强力驱动,导致该阶段载人月球探测任务与国家整体发展契合度不高,难以稳定可持续发展。第二次是进入21世纪以来,随着近地空间载人航天能力日渐完备、技术日益成熟,走向深空成为各国载人航天任务的新目标,月球作为距离地球最近的自然天体,其应用价值和开发潜力逐步显现,各航天大国均将载人月球探测作为了人类向深空发展最近距离的实践。这一阶段各国更注重地月空间开发利用,以确保任务稳定持续发展。

1.1 20世纪第一次热潮

美国为扭转太空竞赛不利局面,宣布实施“阿波罗”计划,计划始于1961年5月,历时11年,先后

完成了2次载人近地轨道任务、2次载人环月轨道任务和6次载人登月任务,共将12名航天员成功送往月球,累计耗资240亿美元,是20世纪人类最宏伟的工程之一^[5]。

“阿波罗”计划每次任务3人乘组,其中2人着陆月球表面。采用从地面一次发射奔月、月面起飞在月球轨道对接后再返回地球的飞行方案,总任务时长不超过14天。运载火箭LTO运载能力约45 t,阿波罗飞船包含指令舱、服务舱和登月舱,指令舱、服务舱合重约30 t,登月舱分为下降级和上升级,质量约15 t。在月面中低纬度地区着陆,月表停留数小时至3天,任务完成后返回地球海上着陆场^[6]。

针对美国“阿波罗”计划,苏联提出了N1-L3载人登月计划,但由于N1火箭连续4次发射均告失败,计划被迫取消^[7]。

20世纪美国和苏联在激烈的太空竞赛中没有明确提出月球探测的可持续发展战略,但也伴随着航天技术的发展提出了一些在月球上建站的计划与设想,但碍于没有战略规划,在能源、信息等一系列技术领域存在短板,这些方案均只停留在纸面或者是基础研究阶段,如图1所示。

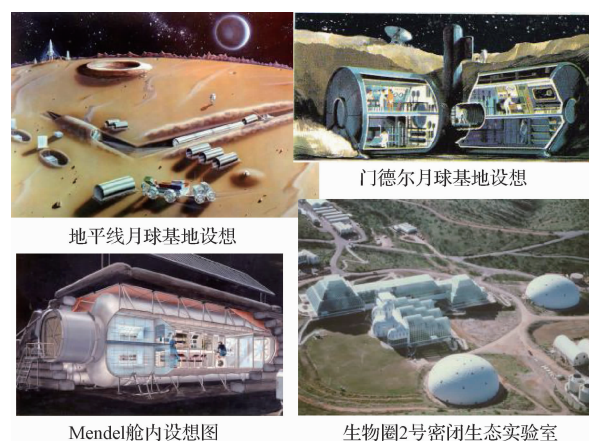


图1 早期月球建站设想

Fig. 1 Early lunar base plans

1.2 21世纪新一轮热潮

进入新世纪,随着新一轮科技革命和产业变革孕育兴起,全球科技创新呈现出新的发展态势和特征,新兴学科不断涌现、前沿领域不断延伸、技术不断突破创新。这一阶段,近地空间载人航天能力日渐完备、技术日益成熟,商业化运行模式初见成效,载人航天活动的经济效益不断拓展,世界主要国家

利用开发太空、服务国家安全发展的需求更为现实和迫切,人类探索未知、到达更远目标的渴望愈加强烈,美、俄等国都提出了载人月球探测的目标。

美国于2005年制定了“星座”计划,开展新的空间运输系统研制,可实现载人往返月球、支持国际空间站补给,并最终将人类送往火星。此后由于政府更迭导致计划屡次更改,但关键飞行器的研制从未中止。2017年,美国时任总统特朗普开启重返月球计划,提出“美国将领导人类重返月球开展长期探索和利用,随后将执行载人前往火星和其他目的地的任务”^[8]。2019年,美国宣布将以月球南极作为着陆区,在未来5年内将美国航天员送上月球,命名为“阿尔忒弥斯”计划,整体分两个阶段实施:第一阶段突出尽快登月的目标,计划2024年实现载人登月;第二阶段关注可持续性,计划2028年建立月球基地,支持月面长期活动,并为载人火星探测做准备^[9]。其中第二阶段分为两步实施:第一步,在月球建立前哨站,未来数十年内可多次到访,支持为期1~2个月的探索任务,如图2所示;3大主要部分包括基础居住舱(支持4名航天员)、非密封月球车、增压月球车;其他基础设施包括通信、电源、防辐射屏障、废弃物处理和存储等。第二步,进一步拓展大本营,开展持续月面驻留、活动与应用,以及火星任务试验。



图2 “阿尔忒弥斯”计划月球大本营

Fig. 2 Artemis base camp

2020年美国出台《阿尔忒弥斯协定》,作为其在月球探测方面开展国际合作的框架协议,并与英国、意大利、日本、加拿大、澳大利亚等国签署了该协定。2021年底,NASA宣布其载人登月的时间节点至少推迟到2025年之后^[10]。

俄罗斯一直将月球视为其航天领域发展的重点,提出在2030年前后实现载人登月的战略目标,

并持续推进相关月球探测器研制工作,未来计划建立月球基地,但受政治、经济等因素的影响,在具体执行上还存在不确定性。欧洲、日本、印度等目前均没有独立实施载人月球探测的能力,主要通过国际合作形式参与载人深空探索^[11]。

1.3 小结

新世纪以来,随着航天技术的不断发展,对月球探索的日趋深入,各国都将月球的可持续发展作为航天引领的主要方向,也是向更远深空迈进的阶段目标,如图3所示。在发展目标、发展规划、技术能力牵引等方面,主要航天强国持续推进布局,加速实施月球探测与系统研制活动,为未来月球开发利用、权益维护打下基础。

2 建站总体问题的思考

载人月球科研试验站是指,在完成首次载人登月任务之后,支持人在月面开展系统、连续的技术验证、科学研究、资源探测利用等科研与试验性质的月球永久设施。实现人在月面长期生存与驻留任务,是载人航天迈向深空的关键步骤。载人月球科研试验站的定位、发展以及方案的制定、关键技术方向的确定,都需要明确建站的目标、规划以及选址等总体问题,本节将针对这些问题开展思考与分析。

2.1 建站目标问题

齐奥尔科夫斯基曾提出:“地球是人类的摇篮,但人类不会永远生活在摇篮里,他们将不断地争取生存世界和空间,先将小心翼翼地飞出大气层,然后便是征服整个太阳系。”人类文明的发展进步本质上就是一部人类不断探索、发现和征服新的疆域的恢弘历程。从人类社会发展的角度看,人类社会生产力持续发展的前进性与地球资源、空间的有限性之间的矛盾,决定了人类走向空间、征服太阳系、殖民宇宙空间是必然趋势。

火星是太阳系中距离地球最近的行星之一,具有稀薄的大气,大小、气候环境等特性与地球最为接近,存在生命维持不可缺少的水资源。与太阳系其他行星相比,是人类在太阳系中建设地外文明的首选目的地^[12]。实现载人登陆火星,对于人类文明向行星际拓展意义重大,象征着人类真正迈出远征太阳系的步伐。月球具有独特的空间位置、空间环境和自然资源,是人类向深空进发、登陆火星的理

想“试验场”,也是人类拓展、开发利用地外空间的理想“前哨站”。



图3 国外月球建站发展情况

Fig. 3 Development of foreign lunar bases

基于以上考虑,在完成首次载人登月任务之后,建设载人月球科研试验站的主要目标应包括以下两方面:

1) 验证人类长期地外生存技术与难点问题

首先,火星任务周期将达到年级,在轨时间至少达百天级,月球有火星任务相似或更加严酷的自然环境,如表1所示。在重力方面,火星表面重力比月球更大,更接近于地球,地火间转移过程长期处于微重力状态,若采用人工重力系统,考虑到系统代价等因素,低重力更易于实现,因此在月球低重力情况下研究长期人体生理、心理等问题支持未来火星任务;月球极端的温度环境比火星更加恶劣,解决月球长期生存特别是月夜极端低温生存问题,突破能源供给、热管理等关键技术,将对火星任务起到关键作用;在空间辐射方面,月球远离地球磁场,可以开展长期辐射效应与防护技术验证;在月球复杂地外天体地形环境开展较大范围甚至全月面深度探测,并利用月球岩管、高地等特殊地形开展驻留任务,为未来全面探测火星、实现火星长期居住提供了技术支撑;月球土壤成分与火星有类似之处,利用原位资源开展设施建造、制氧、制水、生物培养等,可以为

未来前往火星开展技术验证打下基础;月尘防护与清除是人类在月球活动必须解决的难题,同样也为未来火星长期生存任务中火星尘埃的防治打下了基础。

其次,月球作为地球最近的天体,可获得及时的支持,但对地球环境影响较小。月球距离地球约有 3.8×10^5 km,正常往返周期在半个月以内,单程转移大约3~5天,通信延迟基本在秒级。尽管相较于近地任务已经是大幅的跨越,但相对于载人深空探测(如地火最小距离 5.58×10^7 km,往返需要年级,通信延迟约20 min)而言,还是非常接近地球的。如同大陆边上肉眼可见的海岛,是开展远海训练、出发补给的天然港湾。因此,在月球建立科研试验站、开展地外长期生存技术验证与科学研究,可以更容易获得来自地球的支持;在月球开展核能、辐射等危险性较大的试验项目,也可以降低对地球造成环境破坏的风险。

2) 开展月球深度科学研究、资源的探测与开发利用等任务

月球科学内涵包括关于月球的科学、基于月球的科学和居于月球的科学3个方面。类似于阿波罗

表 1 月球与火星任务相关情况对比^[13-15]

Table 1 Comparison of lunar and Mars missions^[13-15]

| 对比项目 | 火星 | 月球 |
|-------|--|--|
| 重力加速度 | 3/8 地球重力加速度 | 1/6 地球重力加速度 |
| 星表温度 | 火星表面的温度介于 -133 ~ 27 ℃ 之间, 平均温度为 -55 ℃ | 赤道地区太阳直射温度超过 120 ℃, 月夜最低温度达到 -180 ℃ 以下, 极区夏至连续光照温度范围 -145 ℃ 到 -93 ℃, 冬至极夜接近 -200 ℃ |
| 空间辐射 | 银河宇宙线、太阳宇宙线、太阳风; 地火转移任务周期为年级, 完全暴露, 受辐射影响较大; 火星表面受大气、土壤作用, 影响略小 | 银河宇宙线、太阳宇宙线、太阳风; 月表受土壤屏蔽作用, 相当于地火转移过程影响减半, 延长任务周期可达到辐射剂量 |
| 地形地貌 | 陨击坑和盆地、大的盾形火山、峡谷和干涸的河床、崩塌地貌、沙丘、极区沉积层等; 火星地貌比月球地貌都要复杂 | 月海和高地两大地貌, 月海约占月表面积的 17%, 高地一般高出月球水准面约 2 km 至 3 km, 面积约占月面面积的 83% |
| 物质资源 | 大气中约 95% 是 CO ₂ , 其他 5% 包括 N ₂ 、Ar、很少的 O ₂ 、H ₂ O、CO 和氯化物; H ₂ O 在高纬度地区以冰的形式存在, 在低纬度地区以冰或者近地表面岩层中含水矿物的形式存在; 土壤含有 Si、Fe、Mg、Ca、S、Al、Cl、Ti 等, 多以氧化物的形式存在 | 月球无大气; 永久阴影区可能有水冰资源的存在; 土壤含有 Si、Al、Ti、Cr、Fe、Mn、Mg、Ca、Na、K、P 等, 多以氧化物的形式存在; 氦-3 与钛铁矿丰度有关, 集中的地方往往出现在高 Ti 月海玄武岩地区 |
| 星尘 | 表面沉积了厚厚的火星尘埃, 大气中充满着尘埃; 具有磁性, 带有静电; 成分主要是硅酸盐 (>60%)、磁铁矿 (1%); 在风的作用下形成尘暴, 影响巨大 | 表面沉积了厚厚的月球尘埃; 带静电, 空间中会有静电悬浮现象; SiO ₂ 在月尘中占较大比例; 无风化作用, 保持原始不规则形态 |
| 风 | 初步测量在火星平原上, 晚上的风速约 2 m/s, 白天风速约 6 ~ 8 m/s; 在斜坡上或者沙尘暴期间的风速可高达 20 ~ 40 m/s | 无大气无风 |

计划的短期任务, 航天员活动范围小、上行载荷质量少, 主要以月壤采集与观察、月震测量等简单的关于月球的科学探测为主。载人月球科研试验站具备月球表面有人长期驻留能力, 具备月面更大范围移动探测能力, 科学家可以开展深度的原位科学研究, 获得更多多样化的研究数据, 有利于取得重大科学发现。以科研试验站为基地, 利用增压月球车, 对多种地质地貌大范围区域进行表面和钻取采样, 有针对性地采集样品, 并利用试验站高性能的分析仪器、设备开展样品原位筛选, 大幅提升返回样品的科学价值; 优选典型构造带, 进行沿线间隔浅表层地质钻探, 获取完整剖面资料, 为研究月球地质、推演月球起源与演化提供重要科学依据; 在月表大范围、大量部署埋入式、小型化的“重、电、磁、震、热”设备、月基观测设备, 开展精细化分布式探测, 进行大范围长期监测; 试验站可提供必要的实验条件和设备, 开展人体和生命、流体和燃烧等科学实验。

实现月球资源的探测、开发与利用, 是载人科研试验站的重要目标。尽管目前对于月球资源大范围开采支持地球人类生产生活尚难以形成明确结论, 但这也是建立在人类对于月球有限的认知基础上。此外, 支持人类长期地外生存, 本身也需要原位资源的开采与利用, 才能实现可持续发展。因此, 需要基

于载人月球科研试验站, 开展深度的月球资源探测任务, 取得典型区域矿产资源、水和挥发组成分等详细的勘察数据, 为后续资源利用打下基础; 开展月壤原位建造技术, 月球重要矿产资源、水和氧气提取工艺流程, 月壤综合利用等试验验证与应用实践, 为月面长期驻留提供重要支撑。

2.2 发展规划问题

回顾中国载人航天“三步走”战略: 第一步, 发射载人飞船, 建成初步配套的试验性载人飞船工程, 开展空间应用实验; 第二步, 突破航天员出舱活动技术、空间飞行器交会对接技术, 发射空间实验室, 解决有一定规模的、短期有人照料的空间应用问题; 第三步, 建造空间站, 解决有较大规模的、长期有人照料的空间应用问题。中国载人航天工程走出了一条有中国特色的发展道路, 遵循事物发展的客观规律, 循序渐进、步步为营, 每一阶段目标明确, 为下一阶段验证技术逐步扩大空间科学与应用规模, 从量变到质变, 稳步推进中国航天事业, 为跻身世界航天强国做出贡献。

载人月球探测工程是载人航天工程之后又一重大工程, 工程极具挑战性, 技术跨度大、引领与带动作用强。因此, 分步实施、循序渐进是工程有序推进的必然选择。

目前,载人月球探测工程登月阶段任务已启动实施,目标是实现中国人首次登陆月球,突破掌握载人地月往返、月面短期驻留、人机联合探测等关键技术,完成“登、巡、采、研、回”等多重任务,推动载人航天技术由近地走向深空的跨越式发展。下一步建设载人月球科研试验站,将实现验证人类长期地外生存技术、深度研究开发利用月球的目标。作为一项更为复杂、更具挑战的系统工程,载人月球科研试验站需要突破一系列变革性关键技术,在月面驻留、月面探索、科学研究与资源利用等各方面,相较于登月阶段实现更大的飞跃,因此需要分阶段实施,逐步释放技术风险,逐渐提升系统能力。制定载人月球科研试验站发展规划应考虑以下几个主要方面,逐步推动工程实施。

1) 从天级的短期驻留到年级的长期驻留

首次载人登月重点解决“登”的问题,仅在月昼期间驻留几天,选择合适的窗口可避开月昼的高温,避开太阳质子事件,几天的驻留时间只需携带一次性消耗品。而载人月球科研试验站旨在验证人类长期地外生存技术,瞄准载人火星探测任务周期,驻留时长将达到年级,则必须解决以下几大难题:

首先需要解决的是极端热环境热控问题。月昼最高温度高于 120°C ,月夜最低温度低于 -180°C 。月昼期间需要在外界高温情况下将大量的热排散出去,月夜期间需要最大限度地做好保温措施,尽量减少向外漏热,降低补热需求。之后需要解决的是能源问题,月昼期间由于有太阳照射,传统的光伏技术可以支持月昼供电,在白天能源充足的情况下,结合热控系统高效的热排散能力,可以保证航天员在 $19\sim 28^{\circ}\text{C}$ 内正常的生活与工作,从而实现月昼驻留能力;月夜期间没有太阳能支持,传统的能源系统在有限的规模下可支持航天器的月夜生存,无法支持航天员的正常生活,突破核能源、再生燃料电池等新型能源技术,在月夜保持大功率的能源供给,可实现月夜驻留能力,进而使航天员在月球实现一个完整月球日的生存,为多个月球日的长期生存打下基础。

要想在月面长期生存还必须解决辐射防护问题。与近地空间站任务不同,月球科研试验站已经超出了地球磁场的保护范围,面临严重的银河宇宙线和太阳质子事件等高能粒子辐射。从图4中可以看出,完全屏蔽 GeV 能量的质子,所需要铝的厚度将达 1.5 m ,传统的铝屏蔽方法在重量代价方面是不可接受的。可以预见的方法是利用月球原位资源

建造的屏蔽层实现辐射防护,这就需要先对可能的资源开展充分的研究,包括月壤、岩石、溶洞等,研究辐射屏蔽特性与效果,在此基础上开展月面原位资源增材制造或掘进等技术攻关与验证,最后在月面实施辐射屏蔽层的建设。

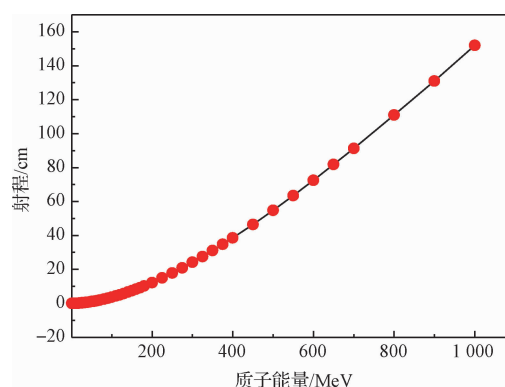


图4 高能质子在铝中的射程

Fig. 4 Range of the high-energy protons in the aluminum

消耗品的补给是影响长期地外生存系统规模的关键因素。近地空间站轨道高度低,运输所需的速度增量小,补给代价相对较低,每运送 1 kg 货物,地面发射时需要约 50 kg ;月球科研试验站距离地球相对较远,运输所需的速度增量,补给代价极高,每向月面运送 1 kg 货物,地面发射时需要约 270 kg ;载人火星探测任务将在此基础上进一步成倍增加。因此月球长期生存任务乃至载人深空探测任务,应遵循低补给甚至无补给的原则,尽可能提升消耗品的自闭环水平,最大限度地减少地面补给需求。从图5中可以看出,未来突破生物再生式生命保障技术,可实现最大限度的物质闭环,随着任务周期的延长,系统规模不会增加,此外利用月壤等原位资源进行生物培养将进一步减少系统代价。目前近地空间站采用微重力下的物化再生技术^[16],后续在月面使用需要解决低重力下工质循环、月夜防冻等问题,进一步突破生物再生技术还需要解决月面生物原位月壤培养、生物再生闭环等问题,需要在月球开展原位生物再生技术验证,在验证实现闭环的前提下再实施工程应用。

2) 从千米级巡视探测到大范围全面探索

登月阶段在月面实施短期任务,受月面上行重量限制,探索与移动工具能力以及相应的探测范围与深度有限。航天员步行探测范围一般在千米级,在月球车的支持下可达到 10 km 级,探索区域一般为平坦地区。载人月球科研试验站期间,需要验证

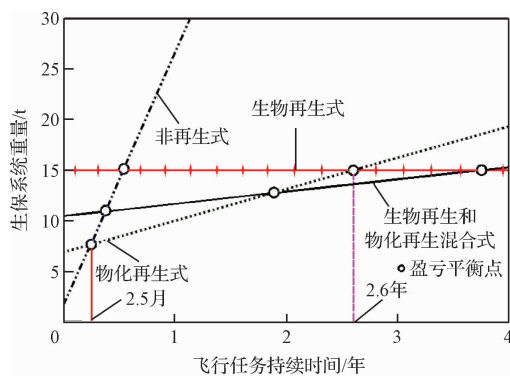


图5 载人航天生命保障系统的盈亏平衡图

Fig. 5 Break-even point of the manned spaceflight life support system

火星表面探测技术,并且开展月球全面深度的探索。

人的参与可以有效提升探索、原位筛选等任务的效率,但受生保系统的规模与代价的制约,探索范围受到较大影响。首次载人登月任务,受上行能力的限制,只能携带“敞篷式”月球车,航天员穿着登月服开展巡视探测,登月服支持正常与应急出舱时间结合月球车移动速度,就决定了探索范围最大为10 km量级。科研试验站阶段,面向跨域、跨地质年代的大范围探测与样品采集,以及部署科学与技术试验设备等任务,需要几十上百千米甚至更大的活动半径。一方面,需要探测设施配置密封舱,具备能力更强的生保系统与更大规模的消耗品物资,保障在整个月昼期间的大范围探索任务。另一方面,需要在承载密封舱及相应物资的情况下,保证较高的移动速度,可在相对平坦的区域快速行驶以提高探索效率,保证较强的越野能力,可在崎岖月面安全可靠地行驶穿越^[17]。

除了在月面探索范围的扩大,在科研试验站期间探索目标的多样性也将得到进一步提升。对月溪、高地、溶洞、环形山等复杂地形地貌的深入探索等任务,危险程度相对较高,初期适宜由运输设备携带、投放使用机器人等,突破自主、智能或人机协同等技术,开展探索任务,未来再利用工程机械实施开发与建设。

此外,人在科研试验站内居住或者无人值守期间,不论是载人移动设备还是机器人等,可根据需要开展无人月面探测,进一步提高探测效能。特别是大型的载人移动设备凭借其较强的通过能力,自主任务期间可将探索范围大幅提升至百千米量级以上,在科研试验站的支持下获得更大的收益。自主

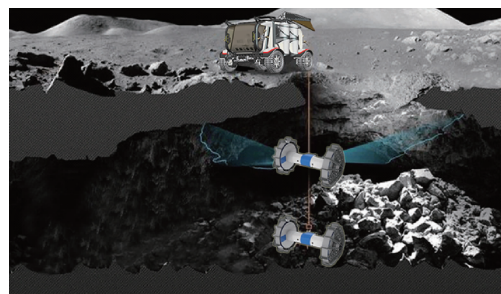


图6 大型载人设备支持机器人探索岩管设想

Fig. 6 Large manned equipment to support the robot to explorer lava tubes

开展探索任务需要无人自动驾驶、人工智能等技术,这些技术在地面车辆、机器人等领域发展迅速,未来可根据月球特殊环境开展适应性攻关。

3) 从样品采集到原位研究与开发利用

在短期的月面驻留任务中,对月球的研究形态主要体现在月壤与岩石等样品的采集,对外观或者利用多光谱等设备进行观察和观测,进行初步的筛选与研究。载人月球科研试验站期间,在站内外开展面向月球的深入研究,利用原位资源支持长期生存,探索利用月球资源支持人类发展,都是要实施的主要任务。

人的主观性、智能性、灵活机动与快速决策等特点,是任何机器无法比拟的。在科研试验站实地科考中,经过培训的航天员可以根据智慧和知识分层次、分类别地细致筛选样品并加以研究,凭借洞察力和敏锐性观测到瞬间即逝的现象并快速记录。航天员准确便捷部署各种复杂的科学载荷设备,并利用这些设备开展深入的物理、化学等分析与试验,从而提高了科学认知的深入性,如图7所示。科学研究深度与复杂度受设备规模的限制,随着到月面上行能力的逐步提高,科研试验站规模的逐步扩大,有人参与的原位科学研究与实验将逐步深入。

原位资源的利用开发包括生保消耗品与推进剂的制取(如氧气和水、氢等元素)、原位制造(如建筑、结构制造、太阳能板等原材料)、可能的月球特色资源的开采与利用(如氦-3)等,这些技术发展首先是离不开对月球资源的深入认知,在边探索、边掌握的过程中,对已知的物质资源开展开发利用的小规模技术验证,对具有工程可实施性的原位资源利用技术开展实践与应用,逐步提高科研试验站闭环能力,为解决地球资源问题探索可行道路^[18]。

综上所述,瞄准载人月球科研试验站建设目标,

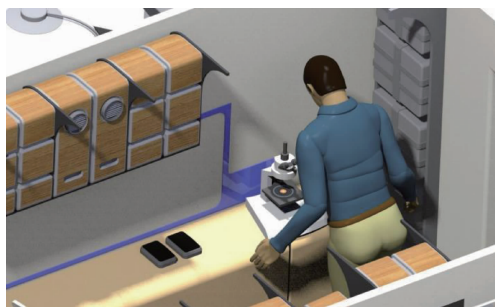


图7 在站内开展原位研究与利用技术验证

Fig. 7 In-situ research and utilization technology verification in the station

分析各项需要解决的难点问题与关键技术,根据先易后难、前一阶段为后一阶段开展技术验证的基本原则,参考载人航天工程发展脉络。思考载人月球科研试验站发展规律与途径:

第一步,可以首先建立在月球上的“空间实验室”,在首次载人登月任务的基础上,进一步拓展能力,支持更长时间的月昼驻留,验证过月夜、月面生命保障等关键技术,开展百千米级以上的更大范围月面探测,为月球科研试验站选址提供抵近测量数据,开展月球原位研究与资源利用、月面建造、生物培养等技术验证任务,为建站打下基础。

第二步,部署不依赖太阳的能源系统,以月球实验室作为基本模块,扩展构建载人月球科研试验站基本型,解决过月夜难题,实现月面月级的中期驻留,并进一步深入开展月球科学研究与原位建造、生物再生等技术验证,无人期间自主运行开展连续科学实验与技术验证任务,通过无人系统自主或遥操作开展月面持续探测。

第三步,突破原位建造辐射屏蔽、生物再生生保等关键技术,全面建成载人月球科研试验站,实现年级月面长期驻留,实现月球深度研究与探索,利用原位资源不断提高物资闭合度,达到建站目标,为未来更加深入地开发月球打下基础。

2.3 建站选址问题

建站选址是一个复杂的选取过程,有许多因素需要考虑,因此需要从宏观上确定选址的基本思路,初步考虑提出4点基本要素,如图8所示,包括战略、科学、工程与经济^[19]。

1) 战略是国家意志的具体体现,是实施此项工程的国家意志的具体体现,决定并明确主要发展方向。载人月球科研试验站任务首要为未来载人火星探测任务开展技术验证,为实现载人航天的长远目

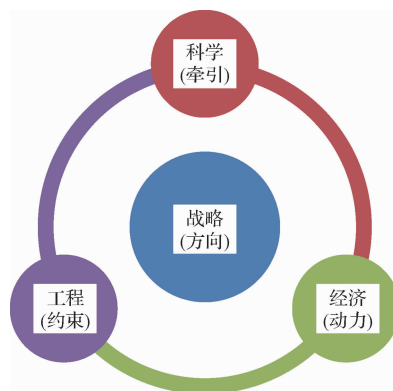


图8 建站选址主要考虑的4点要素

Fig. 8 The four elements considered for site selection

标,建站选址需要充分考虑与火星环境或者技术验证相对最为贴近的区域。此外,为实现月球探测的可持续发展,建站选址也应考虑未来长远发展规划。例如中国在南极建站,基本遵循逐渐深入的发展方向,在前期建站充分验证并掌握关键技术之后,根据需求抢占战略位置,为南极权益打下基础。

2) 科学作为建站的基本任务,牵引科研试验站选址的主要目标。选址应具有突出的科学价值,涉及解释月球形成过程、理解月球内动力演化机制、揭示月球外动力演化历史、确定月球水和挥发分的分布与来源、深入理解月表特殊环境等多个领域,总之尽可能保障科学价值最大化的原则。

3) 经济是发展的动力,充分考虑资源利用,支撑科研试验站建设与资源开发。为了实现载人深空探测任务的持续发展,必须充分利用地外天体自身的资源进行生产利用,尽量形成自给自足的资源利用能力,这是实现月球以及后续火星等长期探测任务的关键要素。月球上可能存在支持补充地球能源的矿产资源,如能发现并解决开发与利用技术,则月球对于人类而言,就是一个额外的资源宝库。前文已提到月球矿物的大致分布,月海地区矿产资源较为丰富,南极永久阴影区可能存在可利用的水资源,这些都需要在探索与发现过程中逐步确定。

4) 工程是建站的主要约束,决定了选址是否符合安全性、系统能力等各项要求,要选择具备适宜的地形地貌、温度、光照、辐射等环境,满足着陆安全性、测控通信、航天员月面活动与巡视、能源供应、应急返回等工程条件。前文已对月海、南极等主要地区的环境特点进行描述,此处不再赘述。在工程条件方面:着陆安全性主要受地形影响,定点着陆减少地形崎岖带来的影响;月球正面永远面向地球,测控

条件较好,背面与极区均需要中继通信支持;航天员月面活动与巡视主要受地形影响较大,地形相对平坦有利于扩大探测范围、提高人员安全性,复杂地形需要研制高越障能力载人设备,或者采用人机联合探测方式;能源供给方面,极区个别地形存在长期光照甚至有永久光照区,但范围有限,其他区域需要解决月夜生存问题;低纬度地区建站,应急返回所需能力较小,并保证月面每圈应急起飞机会,在其他地区建站,应采用 90° 倾角环月轨道,需要在环月轨道等待或者花费较大速度增量,才能实现应急返回,如图9所示,可部署月球轨道空间站支持环月等待或补加推进剂,提高系统安全性。

载人月球科研试验站的选址问题是顶层要确定的关键问题之一。相较于首次载人登月任务,科研试验站阶段航天员在月面停留时间更长,需要完成的任务、开展的科学研究与技术验证项目更加复杂,同时安全性要求也更为突出,因此需要建立科学严谨的地址筛选方法,明确基本思路,分析各方面影响因素,再结合人类对月球不断探索的最新成果,确定建站选址。

2.4 主要关键技术

根据前文思考的建站目标、规划、选址等问题,

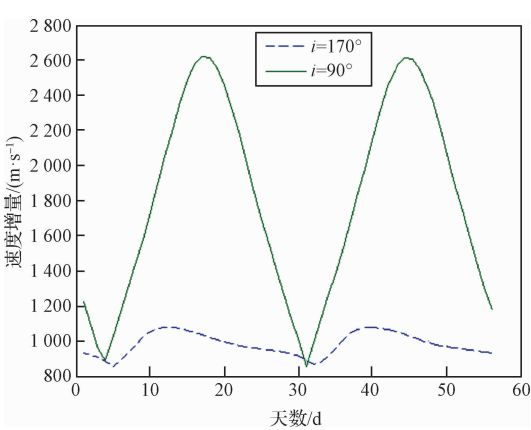


图9 不同日期、不同倾角月地转移加速速度增量
Fig.9 Velocity increments at different dates and different orbit inclination during Moon-Earth transferring

初步梳理出制约载人月球科研试验站建设与实施的6个方向关键技术,包括月面极端热环境生存技术、月面大范围移动技术、月面高效能源技术、月面原位资源利用技术、月面受控生态生保技术、人机联合探测技术,如表2所示。当然,随着材料、结构、通信、电子等领域的发展,并结合月球特殊环境适应性,还有很多技术有助于科研试验站的建设,此处就不再赘述了。

表2 关键技术与发展规划
Table 2 Key technologies and development planning

| 关键技术项目 | 难点 | 验证与应用规划 | | |
|-------------|---|--|--------------------------|---------------------------|
| | | 第一步 | 第二步 | 第三步 |
| 月面极端热环境生存技术 | 需要解决月昼期间的高温热排散问题,长期工作下的长寿命和高可靠问题,移动过程中倾斜、颠簸问题,月尘、辐射等带来的辐射效率降低问题;月夜期间解决高性能的整器、关键部位的隔热问题,主动补热的配置优化设计问题,以及辐射器防冻、低温密封与工质回收等问题 ^[20] | 利用月面实验室完成有人月昼驻留、无人月夜生存技术验证,突破关键技术 | 在能源等系统支持下实现有人月夜驻留 | 技术应用 |
| 月面大范围移动技术 | 需要解决长距离行驶下的可靠性与安全性以及寿命问题,在不维护情况下实现长期可靠移动;需要解决大承载情况下的高越障、平顺行驶问题;在无导航星座支持、月面环境信息精度有限情况,实现月面环境感知与导航定位,保证载人、无人情况下有效行驶 ^[21] | 利用月面实验室完成有人与无人月面大范围移动技术验证,突破关键技术 | 进一步扩大探测范围技术应用 | 特殊地形探测技术应用 |
| 月面高效能源技术 | 开展月面能源体系研究;需要解决在月面的长寿命、高性能运行问题,高可靠、高安全系统设计问题;针对核能源系统,需要解决小型化、辐射屏蔽问题;解决多系统间环热电一体化综合保障、高压供电、模块化集群供电等问题 ^[22] | 利用月面实验室开展辐射屏蔽、环热电一体化、燃料电池、大规模电池管理等技术验证 | 配置核能源等系统,支持有人月夜驻留,突破关键技术 | 集群组网、更大规模技术应用 |
| 月面原位资源利用技术 | 开展原位资源利用的体系研究;面向月面建造任务,需要解决结构与材料成型技术、复杂建造系统技术以及地面试验验证技术;面向消耗品制备,开展制氧、制水、水冰提取等技术探索 | 利用月面实验室开展月面建造、消耗品制备等原理实验 | 完成月面原位资源利用工程样机验证试验 | 突破关键技术,建造月面舱段,实现消耗品高闭合度应用 |

续表 2

| 关键技术项目 | 难点 | 验证与应用规划 | | |
|------------|---|---------------------------------|--|-------------------------------------|
| | | 第一步 | 第二步 | 第三步 |
| 月面受控生态生保技术 | 解决高可靠废水回收及生物转化、月壤改良与生态化利用、植物高效培养、微藻培养等问题,研究地面受控生态生保模拟技术,实现能量、物质闭环验证 ^[23] | 利用月面实验室开展生物培养、月壤种植、低重力下环控系统试验验证 | 建立月面受控生态生保验证系统,氧气、水闭合度 90% 以上,食物闭合度 30% 以上 | 突破关键技术,生物再生技术全面应用,氧气、水、食物闭合度 90% 以上 |
| 人机联合探测技术 | 研究人机协同需求、安全性、信息共享等技术,以及人与多机器人之间协同操作技术,解决月面月尘、高低温、复杂地形条件下的移动、操作问题,研究多技能灵巧操作末端快换技术、高精度混合控制技术等 ^[24] | 利用月面实验室机械臂系统验证人机协同、多机协同、环境适应性问题 | 人-机系统月面应用,支持运维、保障、探测等任务 | 多机器人系统协同工作、智能人机交互与运维等应用 |

3 结束语

建设载人月球科研试验站,是载人月球探测可持续发展的必然选择,也是人类开发利用月球的重要环节与支点。本文首先调研了国外发展规划与现状,之后根据载人深空探测发展规律,分析并思考了载人月球科研试验站的建站目标;在分析了建站难点的基础上,探讨了未来可能的发展规划与路径;面向战略、科学、工程与经济 4 大要素,并重点考虑载人航天安全性要求,提出了建站选址的初步思路,最后分析了目前主要的关键技术难点问题与发展规划。

经过初步分析与思考,可见载人月球科研试验站系统复杂,关键技术充满挑战,任务实施任重道远,需要循序渐进、分步有序推动。本文对建站涉及的主要问题进行了初步思考,后续应进一步加强顶层论证,完善关键技术体系,并针对难点、短线开展预先研究,为未来任务实施打下基础。

参 考 文 献

[1] 中国载人航天工程网. 我国载人航天工程开启空间站应用与发展新篇章[EB/OL]. (2023-03-12)[2023-05-27]. http://www.cmse.gov.cn/xwzx/202303/t20230312_53076.html.

[2] 葛平,张天馨,康晓晰,等. 2022 年深空探测进展与展望[J]. 中国航天, 2023(2): 9-18.

GE Ping, ZHANG Tianxin, KANG Xiaoxi, et al. Progress of global deep space exploration in 2022 and future prospects[J]. Aerospace China, 2023(2): 9-18.

[3] 彭祺擘,张海联. 基于模型的载人航天工程需求分析方法[J/OL]. 系统工程与电子技术, (2023-02-07)[2023-05-30]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20230207.0931.001.html>.

PENG Qibo, ZHANG Hailian. Model-based requirements analysis method for manned space engineering[J/OL]. Systems Engineering and Electronics, (2023-02-07)[2023-05-30]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20230207.0931.001.html>.

0931.001.html.

[4] LONGOBARDO A. Sample return missions: The last frontier of solar system exploration[M]. Amsterdam: Elsevier, 2021.

[5] DREIER C. An improved cost analysis of the Apollo program[J]. Space Policy, 2022, 60: 101476.

[6] 陈金宝,聂宏,陈传志,等. 载人登月舱设计及若干关键技术研究[J]. 宇航学报, 2014, 35(2): 125-136.

CHEN Jinbao, NIE Hong, CHEN Chuanzhi, et al. Design and key techniques for lunar lander system of manned lunar landing[J]. Journal of Astronautics, 2014, 35(2): 125-136.

[7] LARDIER C. The soviet manned lunar program N1-L3[J]. Acta Astronautica, 2018, 142: 184-192.

[8] 张浩. 特朗普下令送人重返月球[J]. 中国航天, 2018(1): 59-61.

ZHANG Hao. Trump ordered people to return to the moon[J]. Aerospace China, 2018(1): 59-61.

[9] CAHILL S. Returning to the moon: NASA's Artemis missions[R]. Mountain View, USA: NASA Ames Research Center, 2022.

[10] 王志文. 《阿尔忒弥斯协定》的国际法解析[D]. 北京: 中央民族大学, 2022.

WANG Zhiwen. Analysis of Artemis agreement in international law[D]. Beijing: Central University for Nationalities, 2022.

[11] 廖小刚,王岩松. 2022 年国外载人航天发展初步分析[J]. 载人航天, 2023, 29(1): 134-142.

LIAO Xiaogang, WANG Yansong. Preliminary analysis of human spaceflight development abroad in 2022[J]. Manned Spaceflight, 2023, 29(1): 134-142.

[12] SALOTTI J M. Launcher size optimization for a crewed Mars mission[J]. Acta Astronautica, 2022, 191: 235-244.

[13] 张思勃,刘阳,王慎泉,等. 月表温度和地形对科研站选址的影响[J/OL]. 中国空间科学技术, (2023-02-24)[2023-05-30]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1859.V.20230224.0841.002.html>.

ZHANG Sibao, LIU Yang, WANG Shenquan, et al. Effects of lunar surface temperature and topography on outpost location selection[J/OL]. Chinese Space Science and Technology, (2023-02-24)[2023-05-30]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1859.V.20230224.0841.002.html>.

- [14] 王明远,王美,平劲松,等. 月球空间环境研究进展[J]. 深空探测学报(中英文), 2021, 8(5): 486–494.
WANG Mingyuan, WANG Mei, PING Jinsong, et al. A review of lunar space environment study[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8(5): 486–494.
- [15] 曲少杰,呼延奇,饶炜,等. 火星环境对着陆探测任务的影响及设计考虑[J]. 航天器环境工程, 2021, 38(3): 240–247.
QU Shaojie, HUYAN Qi, RAO Wei, et al. Effects of Mars environment on landing probe mission and related design considerations[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2021, 38(3): 240–247.
- [16] 刘向阳,高峰,邓一兵,等. 中国空间站再生生保系统的设计与实现[J]. 中国科学:技术科学, 2022, 52(9): 1375–1392.
LIU Xiangyang, GAO Feng, DENG Yibing, et al. Design and implementation of regenerative life support system in the China space station[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2022, 52(9): 1375–1392.
- [17] 郭继峰,于晓强,王平,等. 弱全局信息下月面超远距离保通行性移动规划[J]. 宇航学报, 2023, 44(2): 208–220.
GUO Jifeng, YU Xiaoqiang, WANG Ping, et al. Lunar ultra long distance path planning under weak global information with passability guarantee[J]. Journal of Astronautics, 2023, 44(2): 208–220.
- [18] 刘建忠,李雄耀,朱凯,等. 月球原位资源利用及关键科学与技术问题[J]. 中国科学基金, 2022, 36(6): 907–918.
LIU Jianzhong, LI Xiongyao, ZHU Kai, et al. Key science and technology issues of lunar in situ resource utilization[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2022, 36(6): 907–918.
- [19] 果琳丽,王平,朱恩涌. 载人月球基地工程[M]. 北京:中国宇航出版社, 2013: 56–80.
- [20] 于雯,李雄耀,王世杰. 月球探测中月面热环境影响的研究现状[J]. 地球科学进展, 2012, 27(12): 1337–1343.
- YU Wen, LI Xiongyao, WANG Shijie. Effect of thermal environment on lunar exploration: A review[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(12): 1337–1343.
- [21] 王平,于晓强,郭继峰. 月球大范围探测巡视器及GNC技术发展综述[J]. 宇航学报, 2022, 43(5): 548–562.
WANG Ping, YU Xiaoqiang, GUO Jifeng. A survey of lunar wide-range exploration rover and GNC technology[J]. Journal of Astronautics, 2022, 43(5): 548–562.
- [22] 刘奕宏,张明,杨伟,等. 月球科研站分布式能源系统方案设计[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(6): 579–588.
LIU Yihong, ZHANG Ming, YANG Yi, et al. Scheme design and key technology research of distributed energy system for lunar scientific research station[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(6): 579–588.
- [23] 许梓,余青霓,张良长,等. 4人180天受控生态生保系统集成试验概述[J]. 航天医学与医学工程, 2018, 31(2): 264–272.
XU Zi, YU Qingni, ZHANG Liangchang, et al. Overview of 4-person 180-day integrated experiment in controlled ecological life support system[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2018, 31(2): 264–272.
- [24] 于登云,潘博,马超. 星球探测机器人研究现状与发展展望[J]. 宇航学报, 2023, 44(4): 633–643.
YU Dengyun, PAN Bo, MA Chao. Research status and development prospect of planetary exploration robots[J]. Journal of Astronautics, 2023, 44(4): 633–643.

作者简介:

彭祺肇(1982-),男,博士,副研究员,主要从事载人月球探测总体任务分析与设计等方面的研究。

通信地址:北京市海淀区北清路26号院(100094)

电话:(010)66367163

E-mail: poochie003@163.com