

无人月球科考站构建与运行关键技术初探

杨建中^{1,2}, 吴琼¹, 于登云³, 姜生元⁴, 徐赵东⁵, 崔平远⁶

(1. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094; 2. 南京航空航天大学 航空学院, 南京 210016; 3. 中国航天科技集团有限公司, 北京 100048; 4. 哈尔滨工业大学 机电学院, 哈尔滨 150001; 5. 东南大学 土木工程学院, 南京 210096; 6. 北京理工大学 宇航学院, 北京 100081)

摘要: 无人月球科考站对月球资源的长期深度勘查与开发利用具有重要意义, 已成为当前航天大国抢占的空间科技战略制高点, 识别其构建与运行过程中的关键技术, 是无人月球科考站工程必须解决的首要问题。对此, 给出了一种无人月球科考站的组成方案, 指出了其构建与运行的基本过程及面临的主要问题, 针对上述问题提出了应当突破的关键技术, 包括主动软着陆系统设计、软着陆安全边界辨识、装备自适应移动步态规划、月面综合环境致损等效、装备服役寿命预测与控制等。进而对关键技术突破所涉及的基本研究内容进行了初步分析, 并给出了无人月球科考站分步构建与运行的工程实施建议, 为我国未来无人月球科考站的研究与工程实施提供参考。

关键词: 月球科考站; 主动软着陆; 安全边界; 自适应移动; 服役寿命控制

中图分类号: V11

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2020)02-0111-07

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20190509001

引用格式: 杨建中, 吴琼, 于登云, 等. 无人月球科考站构建与运行关键技术初探[J]. 深空探测学报, 2020, 7(2): 111-117.

Reference format: YANG J Z, WU Q, YU D Y, et al. Preliminary study on key technologies for construction and operation of robotics lunar scientific base[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(2): 111-117.

引言

近年来, 随着人工智能及遥测、遥控技术的发展^[1-2], 无人深空探测(简称无人探测)得到了迅速发展^[3-5]。与载人探测相比, 无人探测探测器系统组成简单、探测器质量与体积较小, 且飞行与探测过程不涉及人员安全, 因此具有对运载能力的要求低、可探测时间长、对目标星体与探测位置约束少、任务实施成本低、探测过程灵活等优点。从世界已经公布的月球及以远深空探测计划可以看出, 无人探测仍是近期深空探测发展的主流^[6-10]。在我国“绕、落、回”三步走的无人月球探测计划即将结束之际, 2019年初又公布了无人月球探测后续计划, 提出了构建无人月球科考站(以下简称科考站)的基本设想^[11]。构建科考站是深化月球资源勘查、探索月球资源利用、拓展深空探测能力的重要基础和关键途径, 是各航天大国抢占的空间科技战略制高点^[12-16], 对推动国家科技发展、提升国家科技实力、实现科学突破具有不可替代的重大作用。

科考站不同于月球基地, 二者的根本差别在于前

者的服务对象是月面工作的多种机器人及相应的装备, 后者的服务核心是实现登月的航天员。因此, 科考站的构建是以完成基本探测任务为中心, 不用考虑人员的生命保障及生活问题, 而月球基地的构建则必须以保障航天员的安全为中心, 在此基础上考虑如何完成相应的探测任务。月球基地构建的许多基本设想及方案^[17-21]并不适用于科考站。相对于在我国“绕、落、回”无人月球探测任务, 科考站任务将充分利用探月工程前三期突破的绕月测控技术、月面软着陆技术、月面巡视勘查技术和月夜生存技术等, 进一步重点开展月球资源的长期深度探测与原位利用, 同时开展月基长期科学研究, 从而推动空间科学发展, 为太空资源利用打下基础, 并为载人登月提供短期驻留环境和技术验证。如何针对科考站的构建目标, 确定其基本的组成方案及相应的构建与运行过程, 同时针对其构建与长期运行的基本需要, 识别相应的关键技术, 并及早突破, 是科考站构建与稳定运行必须解决的重要问题。

本文对科考站构建与运行过程面临的问题进行分

析, 识别、探讨其中的关键技术, 为未来科考站的建设与长期稳定运行奠定基础。

1 科考站的基本功能与组成

科考站是在月面开展长期无人科学勘查及作业活动的重要设施。它一般包括多个协同工作的着陆器、机器人、功能舱组合体等探测任务执行装备, 通信与测控站、太阳能(核)电站、着陆/起飞试验场等探测任务支撑设施, 以及科学探测仪器设备等, 是既可以在月面自主运行, 又可以在地面人员的遥控下完成相应探测活动的智能体集群系统, 其基本组成如图1所示。

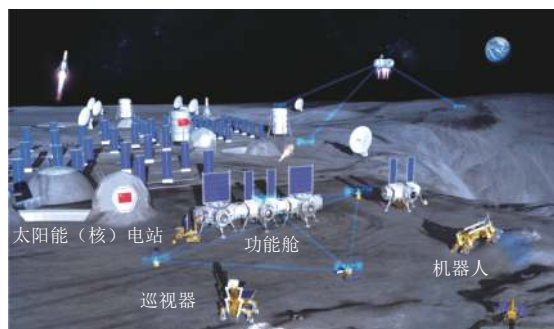


图1 科考站的基本组成

Fig. 1 Sketch of robotics lunar scientific base

着陆器将科考站运行所需的装备从地球轨道或月球轨道运送到月面, 实现相关装备在月面的稳定、安全着陆, 而后根据需要将装备转运到月面指定地点, 并与已有装备进行必要的对接、组装, 形成功能舱组合体。机器人是完成月面科学勘查活动的执行者, 它既可以独立着陆于月面, 也可以通过着陆器运送至月面。

机器人具有多种不同的形式, 根据任务配置不同的科学勘查仪器, 并根据到达的区域范围不同, 采用不同的运动方式, 如月面飞鸟机器人, 通过喷气推进及相应的软着陆, 像飞鸟一样具备飞行、软着陆、行走及再飞行等活动方式, 可以实现大范围快速飞行勘查与局部漫步式详细勘查的结合。功能舱组合体可为相应的机器人、仪器设备等提供电能及燃料的补给, 或通信、环境防护等功能支撑和保护, 同时, 还可以作为资源勘查或科学研究的平台。通信与测控站、太阳能(核)电站等探测任务支撑装备, 则为功能舱组合体以及机器人等提供通信、控制、能源补给等保障。

用于科学探测的仪器设备需根据科学目标来确定, 科学目标一般包括两个方面的内容, 即通过对月球热点区域的长期深度勘察, 进一步揭示月球自身相关特性, 同时在月面开展相应的探索实验。揭示月球自身相关特性的活动包括探索月球的地质构造及相应

的物质资源构成, 寻找人们所关心的物质(如水冰等), 并确定其在月面下的分布情况等研究工作。探索实验包括月基天文观测、物质合成及生命科学模拟实验研究等。相关的科学探测仪器设备包括天文望远镜、月震仪、月壤分析光谱仪、月面钻取装置、水冰分离与收集箱、植物温箱以及多种相机等。典型的仪器设备如图2所示。为完成特定科学实验, 可能需要从地面将一些特定样品带到月面, 这些仪器设备或特殊样品由机器人或功能舱携带, 以完成相应的科学探测及科学实验任务。

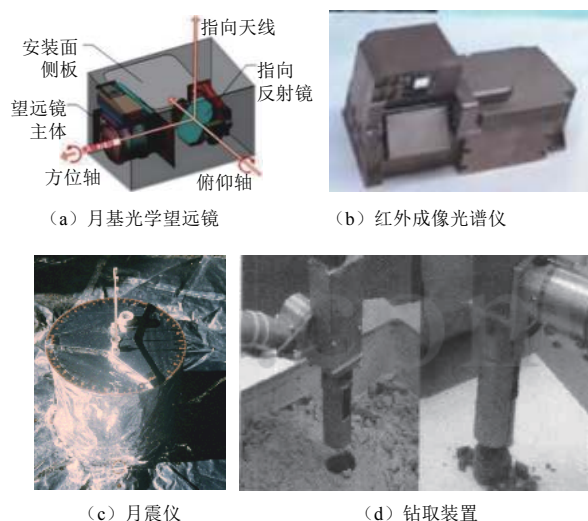


图2 科考站可用的典型科学仪器^[22-25]

Fig. 2 Several science instruments for robotics lunar scientific bases^[22-25]

2 科考站构建与运行过程面临的问题

2.1 科考站的构建与运行过程

科考站的基本构建过程如图3所示。包括科考站选址、地月之间装备运输、装备在月面的定点投送、装备在月面运送及对接组装、有效载荷投放等活动。科考站的选址是指根据既定的科学探测目标, 结合可能的着陆能力, 在最利于实现科学突破的区域选择、确定科考站的构建位置。而后根据科学目标确定所需的装备, 并配备相应的科学仪器, 将装备从地面运送到月球轨道, 进一步将其从月球轨道定点投送到月面着陆点。

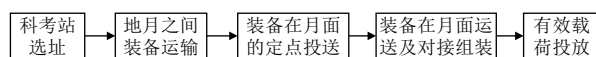


图3 月球科考站构建的基本过程

Fig. 3 Construction process of the robotics lunar scientific base

所谓定点投送是指在月面上的实际着陆点不能明显偏离预期着陆点, 否则, 不同装备之间的组装及协

同工作将难以开展。装备在月面投送完成后, 则根据需要进行相应的装备运送及对接组装, 使多个装备形成有机的整体, 完成装备之间的能源补给、勘察样品交换或转移以及信息交换与处理等任务。在装备运送过程中, 可以根据需要将相应的有效载荷(如月震仪等)投放在期望的位置点, 以便于科学勘查工作的开展。

科考站的基本运行过程如图4所示。包括科学勘查、装备的休眠-唤醒-自检-维护、装备迁移、装备再组合及再勘查等活动。科学勘查是指根据预定的任务目标开展相应的探测活动, 如月球资源钻探、天文观测、射线测量、月面形貌拍照、月震监测、月尘特性研究等。

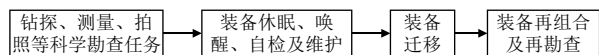


图4 科考站的运行过程

Fig. 4 Operation process of the robotics lunar scientific base

为提高勘查的效率和效果, 该活动将由位于同一区域内多个探测点的多个装备同时开展。根据月面昼夜的变换规律及相应的温度、光照条件, 装备进入相应的休眠、唤醒及工作等不同模式。基于工作前的自检情况, 确定、记录装备的自身状态, 并根据需要进行相应的能源补给等维护活动, 以便持续开展勘查。当在某个区域内的勘查目标完成后, 相应的装备根据新勘查目标进行整体迁移, 进入新的区域开始下一段勘查活动。同时, 根据迁移后自检结果、损伤情况及具体科学目标的变化, 功能舱等装备之间可以进行必要的对接组合, 以保证勘查活动的针对性和持续推进。

科考站的构建与运行将是同步进行的, 这里为了便于陈述而把二者分开介绍。另外, 在构建与运行过程中, 地面工作人员可以根据任务进展或装备运行情况, 在任一环节进行干预, 以确保勘查活动的持续、稳定运行。人为干预未在构建及运行过程中体现。

2.2 科考站构建与运行面临的基本问题

科考站构建的首要问题就是如何将科考所需装备安全送达月面, 即勘查装备在月面的安全着陆问题。科考站的构建将根据可能的着陆能力, 以最利于实现科学探测突破(如最易于发现水冰或矿产资源富集区等)为目标, 因此, 科考站的选址要求与我国月球探测“绕、落、回”重大工程实施过程中在月面寻找“平原地区”作为着陆点的要求不同, 科考站的构建区域可能具有月面形貌更复杂、月壤承载力特性更离散等特

征。目前已经成熟的被动软着陆技术所采用的着陆缓冲机构, 大多在着陆前实现锁定, 多套着陆缓冲机构的姿态不能根据月面的起伏情况做适应性调整, 着陆过程中缓冲力的大小也不能随冲击载荷的变化做适应性的主动变化, 因此难以满足科考站构建过程中装备的安全着陆要求, 必须突破主动软着陆方法, 使多套着陆缓冲机构通过位姿的协同调整, 主动适应月面形貌特征, 实现多套着陆缓冲机构的同步触月, 并根据着陆过程中月壤的冲击力学特性主动调整缓冲力性能, 在有效控制着陆过程冲击响应的同时, 确保装备姿态的稳定性。另外, 结合并联行走机构的运动原理^[26], 通过着陆缓冲机构的多功能融合创新设计, 将其由单一缓冲功能的机构拓展为集着陆缓冲、运输行走及姿态调整于一身的多功能机构, 为系统解决装备的安全着陆、科考站构建过程中装备的平稳运输与组装过程中的装备对接调姿等诸多问题奠定基础。

其次是装备之间的协同、自主作业问题。组成科考站的功能舱等装备的重量或体积大、数量多, 这些装备的移动及组装过程对多机协同作业的要求高。否则, 将难以实现不同位置装备在同一目标地点的聚集, 以及多装备组装过程中的对接调姿。另外, 同一着陆器上也将带有更多的探测、作业载荷, 为使这些有效载荷发挥各自的效能, 也需要它们协同工作。再者, 科考站上实施探测的多台机器人之间也需协同工作, 以实现高效率和高效益的探测。即科考站在复杂月面环境下构建和运行的过程中, 存在装备类别和数量多、约束复杂等问题, 要求装备在探测作业、移动及组装对接过程中具有良好的协同性、较高的自主性、操作的精准性和可靠性, 因此, 必须开展装备移动中的步态规划、定位与态势感知及多机智能协同作业等方面的研究, 实现装备在月面的平稳移动、区域及定点聚集和多装备的自主、精准作业。

最后是装备长期服役过程中月面环境因素的综合影响与防控问题。为在月面实施长期、深度的探测, 其构建与运行是一个长期的、循序渐进的过程^[27]。从科考站开始构建到其寿命结束的累计时间应在10年以上。在科考站装备长期服役过程中, 月面的大温变、高真空、带电月尘、复杂月貌等环境因素及其耦合作用将对装备性能产生严重影响。采用传统的单一环境因素对材料及装备性能影响的研究方法, 将难以揭示科考站中有关装备长期服役的失效机理。同时, 现有的技术基础难以在地面通过硬件系统全面模拟月面的复杂环境条件, 也难以对勘查装备开展多环境因素下的长寿命验证工作。因此, 必须开展月面综合环境因

素致损机理研究以及地面等效加速模拟技术研究,在此基础上构建装备在月面环境下的服役寿命预测方法,为准确评估及确保科考站的服役效能提供量化支撑。

3 科考站构建及长期运行关键技术

3.1 装备定点主动软着陆技术

与传统的月面一次性软着陆的无人、短期探测模式不同,科考站构建过程中所需的多种装备要经过月面多次软着陆活动才能实现相应的投送目标,并且科考站的相关装备要经历长期的探测历程。由于装备在月面运输速度的缓慢性、困难性^[28-29],为顺利实现装备的运输和多装备间的组装,着陆区范围将限制在百米量级的较小区域。同时,为更好地实现科学突破,着陆点通常会选择月面地貌更复杂、月壤承载力特性更离散的区域。因此,装备的软着陆技术必须适应着陆点的恶劣环境条件。着陆区内的非结构化地貌环境、非确知月壤力学特性等对装备在月面的定点软着陆安全带来了巨大挑战,亟需突破主动软着陆技术,保证装备的可靠、安全着陆。针对该技术需开展的主要研究内容如下:

1) 主动软着陆系统设计

为了满足科考站构建过程中多种装备在月面的定点安全投送需求,要突破传统被动软着陆技术的制约,开展主动软着陆系统设计,即以当前“嫦娥3号”“嫦娥4号”着陆缓冲机构的基本构型^[30]为基础,结合少自由度并联机构和动力学控制理论^[31],从着陆前的地貌特征预判、着陆缓冲机构的几何参数控制、着陆过程冲击特性实时感知、缓冲器缓冲参数主动调整等多个方面入手,探索主动软着陆系统设计方法,通过多个着陆缓冲机构同步触月、变阻尼力稳定缓冲实现装备的平稳、安全着陆,为科考站软着陆系统设计提供指导。

2) 着陆缓冲机构功能扩展

针对装备从着陆点到科考站构建目的地之间的转运要求,为降低转运系统的复杂性及转运风险,消除着陆后的重载装备从着陆器到运输车的吊装活动,避免增设单独的吊装设备,需将着陆缓冲机构的功能再扩展,即将其单一的缓冲功能扩展为转运行走、对接调姿等多个功能。这样勘查装备依靠着陆缓冲机构着陆后,可以利用该机构进一步实现转运和对接调姿。基于上述着陆缓冲机构的主动软着陆特性,结合其不同工作阶段的功能要求,通过对不同自由度的约束与释放,实现着陆缓冲机构由单一缓冲功能向运输行走

与组装调姿等多功能的扩展,实现装备在月面的安全着陆、平稳运送及组装调姿的无缝衔接,从而大大降低设备转运与对接系统组成的复杂性,提高系统的可靠性。

3) 主动软着陆安全边界辨识

为确保装备在月面主动软着陆的成功,要针对多种着陆条件约束,如着陆器着陆瞬时的质量特性、着陆姿态、着陆速度、月壤力学特性、月面形貌、着陆缓冲机构的主动适应能力等,以多体冲击动力学理论为基础,构建主动软着陆系统动力学模型,揭示多约束条件对安全着陆的影响机理,进一步建立软着陆过程安全边界评估模型,给出着陆对象在多约束条件内的安全着陆边界,为主动软着陆安全性判断与保证提供支撑。

3.2 装备智能协同作业技术

装备在月面着陆后离散分布于预定着陆点。为实施科考站的构建及稳定运行,需完成装备的月面移动、区域聚集与精准装配作业。在复杂月面环境下,科考站的构建与运行存在多目标、多状态、多任务等特点,致使装备平稳移动以及多装备间的协同作业面临巨大挑战。因此,必须基于深度学习,开展装备移动过程中的步态规划、装备精确定位及智能操作等方面的研究。针对该技术需开展的主要研究内容如下:

1) 装备自适应移动步态规划

针对复杂地貌及松软月壤条件下,装备与行走机构共体移动过程中的安全性和平稳性问题,分析行走机构移动过程中滑移、沉陷等因素对行走步态的影响,建立装备、行走机构足部以及月壤之间相互作用力模型。研究月面重力、月表形貌、月壤力学参数等关键因素对行走机构通过性能、越障性能的影响,结合地面不同试验场地的试验结果、月表观测数据等,采用人工智能相关技术,突破非结构化月表环境下装备自适应共体移动步态规划技术。

2) 多装备协同智能态势感知与导航

针对月面多装备协同作业中环境复杂、月表信息获取手段少、导航信息有限等问题,研究多源信息融合机制,充分利用多来源、多状态的信息资源,提出多维态势感知方法,实现月表环境下多装备协同智能态势感知与导航定位,进而实现协同作业过程中装备位置与姿态的确定,为科考站构建与运行提供有效支撑。

3) 多重约束下任务的精准操作

针对科考站构建过程的多约束、多任务特点,以及多装备协同作业要求,基于深度学习理论,在多智能体协同定位、智能态势感知的基础上,建立实时信

息交互机制与智能控制策略,突破月表不确定条件下多任务智能精准操作关键技术,保证多重约束下、多装备、多任务的精准操作。

3.3 装备长期服役寿命预测技术

在月面长期服役过程中,装备受高真空、大温变、带电月尘等极端环境因素的综合影响,其性能衰减将呈现出与地面服役时不同的规律。因此,需要揭示月面环境多因素协同作用机制以及装备服役失效机理,进一步对装备在月面的工作寿命进行预测。针对该技术需开展的主要研究内容如下:

1) 月面综合环境致损等效

在目前已有的月面单一环境因素效应研究的基础上,基于累积损伤和耦合效应原理,探索月面综合环境致损等效方法,构建致损等效模型,同时研究月面环境影响的地面等效模拟与加速验证方法,并结合已有的“嫦娥3号”“嫦娥4号”相关探测设备的实测寿命数据对等效模型的可信度进行验证,实现月面复杂环境的致损预判和模拟。

2) 长期服役中装备性能退化过程

与在地面长期服役的装备相比,由于月面多种环境因素的耦合影响,在月面长期服役的装备性能的退化过程更为复杂。基于上述月面综合环境致损等效模型,结合不同装备的材料、结构及功能特点,建立科考站装备性能的退化模型。依据月面环境的地面等效模拟方法,进一步开展装备服役性能的地面试验验证,为装备设计过程中的材料选用、结构形式确定、表面处理与润滑以及温控方案实施等奠定基础。

3) 装备服役寿命预测与控制

表征装备在月面工作状态的绩效数据具有多来源、多类别、小样本等特点,这给服役寿命的准确预测带来极大的挑战。基于数据融合理论和装备服役退化模型,提出装备服役寿命综合预测方法,突破小样本条件下的装备寿命预测难题。进一步针对装备高可靠、长期服役需求,探索装备服役寿命控制方法,实现装备长期服役寿命的预测与有效控制。

4 结 论

月球科考站是一个全新的航天重大工程,是继空间站后人类在地球以外构建的第二类科学研究重大设施,它的构建与运行是一个复杂的系统问题,难度大,待突破的关键技术多。在这一航天重大工程实施过程中,我们要努力向世界航天领域贡献更多的中国方案,展示更多的中国智慧。因此,需要在我国探月工程“绕、落、回”三步走工程实施的基础上,以机械

工程与自动控制为核心,联合材料工程、土木工程、力学、人工智能等多个学科与行业的学者及工程技术人员,通过集智攻关的方式解决相关技术难题。另外,为了稳步推进科考站的构建与运行过程,应该参考其它航天重大工程的实施方式,结合我国的实际情况,确定阶段目标,分阶段实施推进。这样既便于继承已取得的技术成果,又便于在下一阶段中弥补已发现的薄弱技术环节,从而降低技术风险,高效率和高效益地实现目标。

致 谢

本研究得到了北京航空航天大学王春洁教授团队、傅惠民教授团队以及吉林大学韩志武教授团队的指导与帮助,北京空间飞行器总体设计部李林凌研究员、张晓东高级工程师以及赵志军高级工程师也对相应关键技术提出了补充意见,在此一并表示感谢!

参 考 文 献

- [1] 吴伟仁,董光亮,李海涛,等. 深空测控通信系统工程与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [2] 陈玉坤, 荣刚, 欧连军, 等. 深空遥操作大回路延时研究[J]. 宇航计测技术, 2017, 37(2): 62-67.
CHEN Y K, RONG G, OU L J, et al. Research on big-loop time delay in deep space teleoperation[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2017, 37(2): 62-67.
- [3] 叶培建, 黄江川, 孙泽洲, 等. 中国月球探测器发展历程和经验初探[J]. 中国科学: 技术科学, 2014, 44(6): 543-558.
YE P J, HUANG J C, SUN Z Z, et al. The process and experience in the development of Chinese lunar probe[J]. Scientia Sinica Technologica, 2014, 44(6): 543-558.
- [4] 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, 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.
- [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, 2014, 1(1): 5-17.
WU W R, YU D Y. Development of deep space exploration and its future key technologies[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2014, 1(1): 5-17.
- [6] 侯建文, 赵晨, 常立平, 等. 未来月球探测总体构想[J]. 载人航天, 2015, 21(5): 425-434.
HOU J W, ZHAO C, CHANG L P, et al. General conception of future lunar exploration[J]. Manned Spaceflight, 2015, 21(5): 425-434.
- [7] 韩鸿硕, 陈杰. 21世纪国外深空探测发展计划及进展[J]. 航天器工程, 2008, 17(3): 1-22.
HAN H S, CHEN J. 21st century foreign deep space exploration development plans and their progresses[J]. Spacecraft Engineering, 2008, 17(3): 1-22.
- [8] 韩鸿硕, 李静. 21世纪NASA深空探测的发展计划[J]. 中国航天, 2008(2): 41-44.

- HAN H S, LI J. 21st century NASA deep space exploration development plans[J]. *Aerospace China*, 2008(2): 41-44.
- [9] 周生东, 王永生. 俄罗斯联邦2016—2025年航天计划基本内容[J]. *国际太空*, 2017(5): 14-18.
- ZHOU S D, WANG Y S. Basic contents of the Russian Federation's Space Program 2016—2025[J]. *Space International*, 2017(5): 14-18.
- [10] Exploration of the Moon[EB/OL]. (2019-05-05). <http://exploration.esa.int/moon/>.
- [11] 杜希萌. 我国探月工程四期和深空探测工程将全面拉开序幕[EB/OL]. (2019-01-15). http://china.cnr.cn/yaowen/20190115/20190115_524482310.shtml.
- [12] 林小春. 美国私企计划2020年在月球南极建永久无人基地, 还要采矿[EB/OL]. (2017-07-13). https://www.thepaper.cn/ewsDetail_forward_1731992.
- [13] 张义凌. 俄国家航天公司负责人: 或与中国共建月球科考站[EB/OL]. (2018-10-03). <http://news.sina.com.cn/c/2018-10-03/doc-ihkvrhps1769485.shtml>.
- [14] 甘晓. 中科院院士叶培建揭秘探月工程: 2020年后将在月球建立科考站[EB/OL]. (2018-10-23). <http://news.sciencenet.cn/sbhtmlnews/2018/10/340123.shtm?id=340123>.
- [15] 张舜禹. NASA公布最新登月计划: 2028年开建月球基地[EB/OL]. (2019-05-23). <http://tech.ifeng.com/c/7msKjyIdDo8>.
- [16] 赵挪亚. 俄罗斯与中国分享超重型运载火箭参数, 提议合建月球基地[EB/OL]. (2019-06-08). <http://tech.163.com/19/0608/15/EH5LPAU900097U81.html>.
- [17] 于登云, 葛之江, 王乃东, 等. 月球基地结构形式设想[J]. *宇航学报*, 2012, 33(12): 1840-1844.
- YU D Y, GE Z J, WANG N D, et al. Supposal for structure form of lunar base[J]. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(12): 1840-1844.
- [18] PETERS R. Lunar base architectural concepts: ESA Report No 93022E-ST0130[R]. Europe: ESA, 1993.
- [19] BENAROYA H. An overview of lunar base structure: past and future[C]//AIAA Space Architecture Symposium. Houston: AIAA, 2002.
- [20] 李志杰, 果琳丽, 梁鲁, 等. 有人月球基地构型及构建过程的设想[J]. *航天器工程*, 2015, 24(5): 23-30.
- LI Z J, GUO L L, LIANG L, et al. Configuration and construction process of manned lunar base[J]. *Spacecraft Engineering*, 2015, 24(5): 23-30.
- [21] 邓连印, 郭继峰, 崔乃刚. 月球基地工程研究进展及展望[J]. *导弹与航天运载技术*, 2009(2): 25-30.
- DENG L Y, GUO J F, CUI N G. Progress and prospects of engineering for lunar bases[J]. *Missile and Space Launch Technology*, 2009(2): 25-30.
- 严韦, 刘建军, 任鑫, 等. 嫦娥三号月基光学望远镜几何定位精度分析[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2018, 43(1): 133-137.
- YAN W, LIU J J, REN X, et al. Accuracy analysis of CE-3 moon-based ultraviolet telescope geometric positioning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(1): 133-137.
- [23] 观察者网. 嫦娥三号最新消息: “玉兔”开启X谱仪探头开始月面测[EB/OL]. (2013-12-22)[2019-05-19]. https://www.guancha.cn/Science/2013_12_22_194434.shtml.
- [24] Lunar and Planetary Institute. Lunar science and exploration: Apollo 15 mission[EB/OL]. (2019) [2019-05-19]. https://www.lpi.usra.edu/lunar/missions/apollo/apollo_15/experiments/ps/.
- [25] MAROV M Y, AVDUEVSKY V S, AKIM E L, et al. Phobos-Grunt: Russian sample return mission[J]. *Advances in Space Research*, 2004, 33(12): 2276-2280.
- [26] XU Y, GAO F, PAN Y, et al. Method for six-legged robot stepping on obstacles by indirect force estimation[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 29(4): 1-11.
- [27] 张焯, 胡智新. 无人月球基地总体初步设想[J]. *航天器工程*, 2010, 19(5): 95-98.
- ZHANG H, HU Z X. A tentative idea for robotics lunar base[J]. *Spacecraft Engineering*, 2010, 19(5): 95-98.
- [28] 吴伟仁, 王琼, 唐玉华, 等. “嫦娥4号”月球背面软着陆任务设计[J]. *深空探测学报*, 2017, 4(2): 111-117.
- WU W R, WANG Q, TANG Y H, et al. Design of Chang'e-4 lunar farside soft-landing mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(2): 111-117.
- [29] 倪伟. 玉兔二号最新动态: 已行走178米, 正超期服役[EB/OL]. (2019-04-18). <http://www.bjnews.com.cn/news/2019/04/18/569255.html>.
- [30] 杨建中, 曾福明, 满剑锋, 等. 嫦娥三号着陆器着陆缓冲系统设计与验证[J]. *中国科学: 技术科学*, 2014, 44(5): 440-449.
- YANG J Z, ZENG F M, MAN J F, et al. Design and verification of the landing impact attenuation system for Chang'E-3 lander[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2014, 44(5): 440-449.
- [31] 刘善增. 少自由度并联机器人机构动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- 作者简介:
杨建中(1969-), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向: 航天器机构及振动冲击防护。
 通讯地址: 北京5142信箱365分箱(100094)
 电话: (010)68745722
 E-mail: jzyang1234@sina.com

Preliminary Study on Key Technologies for Construction and Operation of Robotics Lunar Scientific Base

YANG Jianzhong^{1,2}, WU Qiong¹, YU Dengyun³, JIANG Shengyuan⁴, XU Zhaodong⁵, CUI Pingyuan⁶

(1. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;

2. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

3. China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100048, China;

4. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

5. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

6. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Robotics lunar scientific base is of great significance to the deep exploration and exploitation of lunar resources. It is one of the strategic targets of space science and technology for space powers, and the key technologies in the construction and operation are primary problems to be solved in the lunar base project. A basic sketch of robotics lunar scientific base is given, and main technical problems for construction and operation of the base are also pointed out. Key technologies should be broken through are then proposed, including active soft-landing design, soft-landing safety boundary identification, adaptive gait planning, comprehensive lunar environmental damage equivalent, service life prediction and control, etc. Finally, recommendations for the implementation of the base are proposed, providing reference for the research and construction of the future robotics lunar scientific base of China.

Keywords: robotics lunar scientific base; active soft-landing; soft-landing safety boundary; adaptive gait planning; service life control

Highlights:

- Robotics lunar scientific base is one of the the strategic targets of space science and technology for space powers, and key technologies in construction and operation are primary problems to be solved in the project of the base.
- A basic sketch of robotics lunar scientific base is given, taking the advantage of the achievements of the first three phases of China's Lunar Exploration Program, and providing short-term resident environment and technical verification for manned lunar landing.
- Main technical problems for the base construction and operation are pointed out, and key technologies should be broken through are also proposed.
- Recommendations for implementation of the robotics lunar scientific base are proposed, providing reference for the research and construction of the future robotics lunar scientific base of China.

[责任编辑：高莎，英文审校：朱恬]