



华中科技大学学报(自然科学版)

Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition)

ISSN 1671-4512,CN 42-1658/N

## 《华中科技大学学报(自然科学版)》网络首发论文

题目：月面着陆器结构及可持续利用研究综述与展望  
作者：何逸，李雄彬，高玉月，鲁亚楠  
DOI：10.13245/j.hust.240252  
收稿日期：2023-04-18  
网络首发日期：2024-04-07  
引用格式：何逸，李雄彬，高玉月，鲁亚楠. 月面着陆器结构及可持续利用研究综述与展望[J/OL]. 华中科技大学学报(自然科学版).  
<https://doi.org/10.13245/j.hust.240252>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.13245/j.hust.240252

# 月面着陆器结构及可持续利用研究综述与展望

何逸<sup>1,2</sup> 李雄彬<sup>1,3</sup> 高玉月<sup>1,3</sup> 鲁亚楠<sup>1,3</sup>

- (1. 华中科技大学国家数字建造技术创新中心, 湖北 武汉 430074;
2. 华中科技大学建筑与城市规划学院, 湖北 武汉 430074;
3. 华中科技大学土木与水利工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 概述了月面着陆器主要功能和系统组成及其可持续利用的国内外研究现状, 指出了月面着陆器结构在未来探月任务中存在巨大的可持续利用潜力, 之后重点介绍了月面着陆器主要组成部分——着陆器下降级, 分析和归纳了下降级的结构形式及特点, 并分述了下降级的设计要求、基体结构及其着陆缓冲机构。随后总结归纳了月面着陆器结构的可持续利用方案, 包括着陆器结构的可移动性、可组合性、可扩展性和可回收性等, 并分别介绍了不同方案的思路、利用方式及特点, 最后对全文进行了总结, 展望了月面着陆器的发展方向, 为未来月面着陆器的结构和性能设计提供借鉴和参考。

**关键词** 月面着陆器系统; 着陆器下降级结构; 着陆器设计; 着陆器可持续利用; 月面设施

中图分类号 V11 文献标志码 A

## Review and prospect of research on structure and sustainable utilization of lunar lander

HE Yi<sup>1,2</sup> LI Xiongbin<sup>1,3</sup> GAO Yuyue<sup>1,3</sup> LU Yanan<sup>1,3</sup>

- (1. National Center of Technology Innovation for Digital Construction, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. School of Architecture and Urban Planning, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract** It outlines the main functions and system components of the lunar lander and the current research status of its sustainable use at home and abroad, and points out that there is a huge potential for sustainable use of the lunar lander structure in future lunar exploration missions. Then the main components of the lunar lander, the downgrading of the lander, were mainly introduced. The structural forms and characteristics of downgrading were analyzed and summarized, and the design requirements, matrix structure, and landing buffer mechanism of downgrading were described. Subsequently, sustainable utilization plans for lunar lander structures were summarized, including mobility, composability, scalability, and recyclability. The ideas, utilization methods, and characteristics of different plans were introduced. Finally, the entire article was summarized, and the development direction of lunar landers was discussed, providing reference and guidance for the structural and performance design of future lunar landers.

**Key words** lunar lander system; lander descent stage structure; lander design; sustainable use of landers; lunar surface facilities

收稿日期 2023-04-18.

第一作者 何逸(1987-), 男, 副教授, E-mail: yihe@hust.edu.cn

基金项目 中国月球基地建造战略研究(2023-XZ-90)、面向原位打印的月面建筑结构—材料—功能一体化设计与优化研究(2021YFF0500300)、地外建造与可持续发展战略研究(2023-JB-09-10)、面向月面原位建造的关键结构材料及应用基础研究(2023YFB3711300)

月球作为地球唯一的天然卫星,也是离地球最近的天体,对其进行探索和资源开发利用具有重要的战略意义。自 20 世纪 50 年代末开始,美国和苏联就开展了以月球探测为中心的太空竞赛<sup>[1]</sup>。在苏联发射世界第一个月球探测器“月球 1 号”以来,世界各国已向月球发射 70 多个月球探测器和登月载人飞船。进入 21 世纪,随着航天事业和宇宙探索的不断发展,世界各国纷纷制定新的地外行星的研究方案和深空探索发展战略。在月球探测任务中,包括软硬着陆、自动采样返回、载人登月等多种形式的月球探测活动,月面着陆器在这些任务中发挥了至关重要的作用。

目前,国内外对月面着陆器的研究主要集中在月面着陆器动态飞行过程中和着陆过程的稳定性分析和模拟,特别是动态着陆过程的模拟上,并对月面着陆器着陆性能进行评估<sup>[2-8]</sup>。此外,也有部分学者和机构对月面着陆器的着陆飞行轨迹和自主识别图像进行了研究<sup>[9-11]</sup>。然而,随着科学技术的不断发展,对着陆器的要求不再局限于运输及定点勘测功能,传统的着陆器已经不能满足人类越来越多的未来月面探测任务的需求<sup>[12-16]</sup>。这是因为传统的着陆器在降落到月球后虽然会执行相应的定点探测任务,但是在完成相应的任务后或服役期满后就会成为“月球垃圾”,无法可持续利用和扩展新的任务。因此,世界各地的学者和机构提出了多种有关着陆器的可持续利用方案设计。

为此,本文综述了月面着陆器主要功能、系统组成及其可持续利用的国内外研究现状。重点介绍了月面着陆器主要组成部分——着陆器下降级,分析和归纳了下降级的结构形式及特点,分述了下降级的设计要求、基体结构及着陆缓冲机构;然后总结归纳了月面着陆器结构的可持续利用方案,包括着陆器结构的可移动性、可组合性、可扩展性和可回收性等;最后展望了着陆器未来发展方向,为月面探测着陆器结构设计提供借鉴和参考。

## 1 月面着陆器功能与系统组成

### 1.1 月面着陆器的功能

在目前的探月任务中,不同的任务需求所要求的月面着陆器的主要功能也相应不同,月面着陆器的功能主要如下<sup>[12-18]</sup>。

a. 月面探测:利用着陆器作为运载平台,搭载各种传感器、观测设备等科学仪器和设备对指定着陆点区域形貌探测和地质背景进行勘察,同时还可利用漫游车对一定范围内的月面环境进行巡视勘测、拍摄等,并将探测的数据传输回地球。

b. 自动取样返回:月面着陆器在预选区域着陆后,按照计划开展月面自动采样工作,并将所采集到的月球样品自动传递和封装在上升器中,上升器在月面起飞并与绕月轨道的轨道器和返回器组合体对接,由返回器将月球样品带回地球。

c. 载人登月:采用重型火箭运载宇宙飞船进入环月轨道,之后利用月面着陆器(登月舱)将人类宇航员安全地送上月球,使人类能够在月面上开展一系列的科学研究任务,在完成相应的任务后,宇航员搭载月面着陆器上升返回月球轨道与宇宙飞船对接,最后返回地球。

### 1.2 月面着陆器的系统组成

月面着陆器一般可分为上升级和下降级,上升级是执行完成任务后离开月球的部分,而下降级是遗留在月球上的部分。在美国 Apollo 系列的月球载人任务中,着陆器(登月舱)上升级主要包括执行任务所需的推进系统、电子系统、生命支持系统、导航与制导系统、姿态控制系统和通信系统等<sup>[19]</sup>。着陆器上升级在宇航员完成月面活动后,用于搭载宇航员离开月球表面返回绕月轨道与指令舱会合。在自动取样返回任务中,如在嫦娥五号任务中,月面着陆器即为下降级结构,离开月面的为上升器。上升器主要由球冠形底板、十字隔板、顶板、八块外侧板组成<sup>[23]</sup>,用于将样品送入绕月轨道并与轨道器和返回器的组合体交会对接。

着陆器下降级主要由着陆发动机、着陆缓冲装置和仪器舱组成,主要包括结构和机构系统、着陆缓冲系统、推进系统、电源系统、有效载荷系统等。着陆器下降级的基本功能是能够保障着陆器在月面上进行着陆时的稳定和安全,同时也可作为科学仪器的搭载平台以及着陆器上升级的搭载和发射平台。

此外,在一些月面着陆巡视探测任务中,月面着陆器可分为着陆器下降级和移动式巡视月球车,如在我国嫦娥系列任务中,嫦娥三号和嫦娥四号的月面着陆器均由固定的着陆器下降级和移动式巡视月球车组成<sup>[21-22]</sup>。

可以看出,不管是在载人登月任务、自动取样返回任务还是月面着陆巡视探测任务中,月面着陆



器(登月舱)下降级作为月面着陆器的必要组成部分, 在各类探月任务中发挥着重要的作用。

## 2 下降级结构与主要形式

### 2.1 下降级结构设计要求

着陆器下降级结构是月球着陆器中支撑和传递载荷的部分, 为一些科学仪器和设备提供搭载平台, 为整个着陆器提供支撑和稳定性。着陆器下降级结构通常须要满足一定的结构设计要求, 以实现各种具体的功能<sup>[12-18]</sup>:

a. 结构轻量化。结构轻量化是航天器设计的重要内容之一, 特别是对于月球着陆器这样的深空探测器。由于运载火箭的约束, 且下降级结构质量占月面着陆器质量的很大比例, 因此月面着陆器下降级结构的质量受到严格的限制。

b. 合理的结构布局设计。月面着陆器下降级的结构设计要有足够的空间满足为科学仪器和设备提供安装空间, 同时为月面着陆器升级(上升器)和运载火箭提供机械连接和分离的接口。此外, 月面着陆器下降级的结构布局还必须要注重大型发动机、大型燃料箱等的安装, 以降低月面着陆器的重心, 保证月面着陆器在着陆后的稳定性。

c. 能够承受着陆冲击荷载。月面着陆器下降级在着陆前具有一定的动能, 在着陆过程中与月球表面接触时, 能量瞬间被吸收, 对月球着陆器下降级产生较大的着陆冲击荷载, 特别是在极端环境条件下要求下降级结构能够承受较大的冲击荷载。

根据月面着陆器下降级的结构设计, 着陆器下降级结构可分成基体结构和着陆缓冲机构<sup>[24]</sup>两部分, 如图 1 所示。基体结构指能承受和传递载荷, 为一些科学仪器和设备及其子系统设备提供安装、支撑平台的部件和组件的总称<sup>[17-18]</sup>。着陆缓冲机构一般为着陆腿(或其他形式的支撑、缓冲装置), 每个着陆腿由主着陆腿(主支柱)、辅助着陆腿(辅助支柱)、着陆垫以及锁定和释放机构组成。

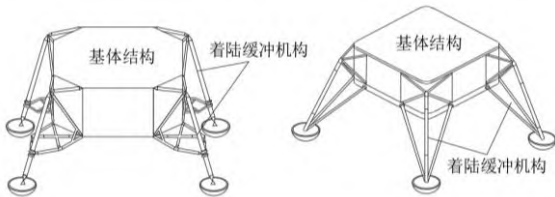


图 1 着陆器下降级结构

### 2.2 下降级的基体结构

截至目前, 在国际上出现过并成功登陆的月面着陆器下降级结构形式按照基体结构来分主要可分为桁架式着陆器下降级和板式着陆器下降级<sup>[18]</sup>两类。

#### a. 桁架式着陆器下降级

桁架式着陆器下降级结构为多个骨架连接形成的空间框架结构。如美国的月面着陆器勘测者号(Surveyor)的下降级结构(图 2)是由薄壁铝管组成的空间框架结构, 其基体结构外形由六个四面体组成, 其上下两个平面围绕制动火箭形成六边形。基体结构的各四面体与上下两个六边形均在顶点处进行连接<sup>[18,25]</sup>。

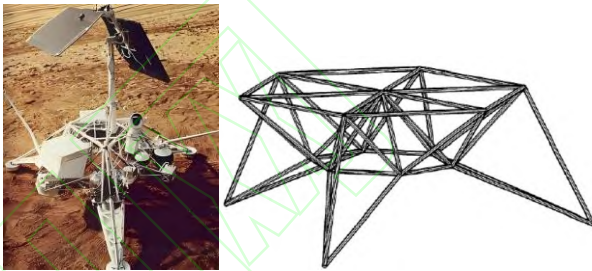
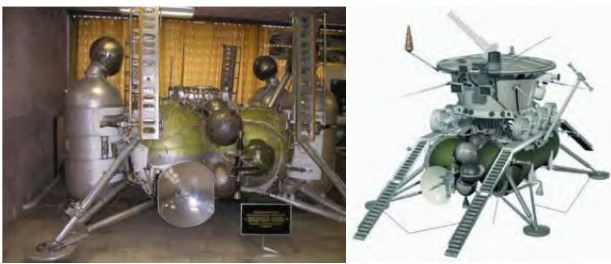


图 2 月球着陆器勘测者号结构<sup>[25]</sup>

苏联月面着陆器下降级设计原则是一体化结构设计, 其基体结构具有柱状的外形, 主要由燃料箱和发动机组成, 并通过桁架结构进行固定。如月球 16 号(Luna 16)和月球 21 号(Luna 21)(图 3), 两种着陆器下降级的基体结构作为承载结构, 搭载一系列的科学仪器和设备, 并有四条着陆腿连接在基体结构上作为支撑。这种着陆器下降级的配置是对称的, 并且重心较低。



(a) Luna 16

(b) Luna 21

图 3 苏联 Luna16 和 Luna 21 着陆器结构<sup>[17]</sup>

#### b. 板式着陆器下降级

板式着陆器下降级结构较多的是采用层合板和桁架结合的结构形式。如 Apollo11 的登月舱(着陆器)包括升级和下降级<sup>[18]</sup>, 其中下降级的基体结构近似正八棱柱状的结构, 内部由桁架和隔板组成十字箱形结构, 主制动火箭位于基体结构的中心, 四周为 4 个贮箱空间<sup>[18-20]</sup>, 如图 4 所示。

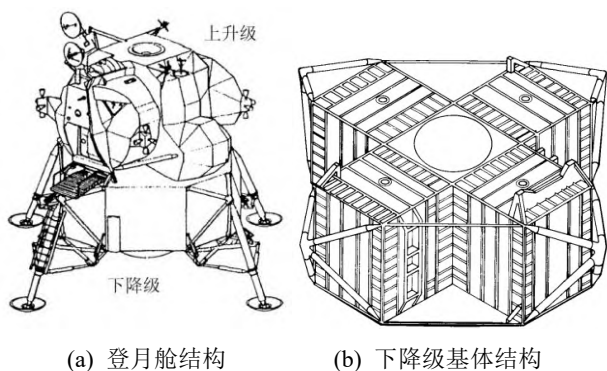


图4 Apollo11号登月舱结构<sup>[19]</sup>及其下降级基体结构<sup>[20]</sup>

我国的嫦娥系列着陆器下降级结构也是板式着陆器下降级结构<sup>[17,21-23]</sup>,如嫦娥5号的基体结构采用桁架结构与箱板结构相结合的方式,外形也为近似的八棱柱形结构。基体结构中的桁架结构作为主承力结构,箱板结构作为辅助结构,采用四贮箱并排安装的方式以形成较优的结构形式<sup>[23]</sup>,如图5所示。

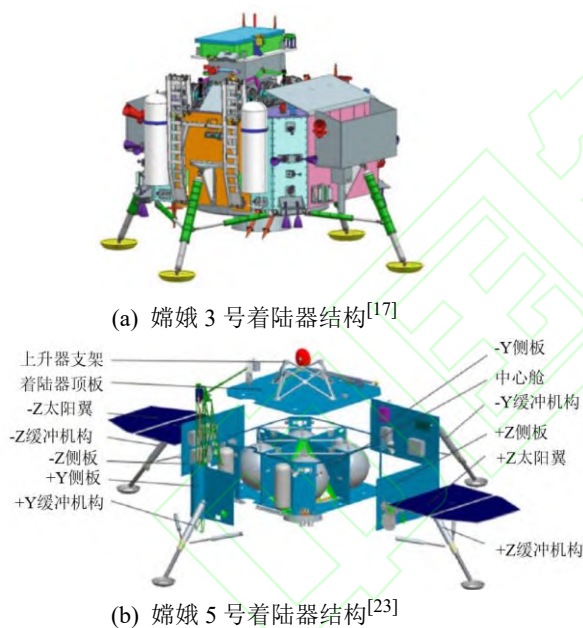


图5 嫦娥3号着陆器和嫦娥5号着陆器<sup>[17,23]</sup>

### 2.3 下降级的着陆缓冲机构

除按照基体结构形式来将着陆器下降级分类外,还可按照着陆器下降级的着陆腿数进行区分,大多数为三腿式着陆器下降级结构或四腿着陆器下降级结构<sup>[26-28]</sup>。如上述的美国月球着陆器勘测者号结构为三腿式着陆器下降级结构,阿波罗系列的着陆器、嫦娥系列的着陆器、苏联的月球16号和21号等均为四腿式着陆器下降级结构。

在人类历史上的登月任务中,着陆器下降级的着陆缓冲系统可分为气囊缓冲装置和着陆缓冲机构<sup>[26-28]</sup>。气囊缓冲装置可通过气囊中的气体压缩、释

放以及气囊材料的塑性变形来吸收着陆缓冲能量,如苏联月球9号采用的是气囊缓冲装置,本文对于气囊缓冲装置不作详细介绍。

现有的着陆器下降级着陆缓冲机构设计可分为倒三角和悬臂式两种着陆腿结构构型<sup>[26-28]</sup>,如图6所示。倒三角构型的组合形式是主、辅支柱的一端在靠近着陆垫的位置相连,主支柱另一端与伸出基体结构的桁架连接,辅助支柱另一端与基体结构直接相连。在倒三角构型的着陆缓冲机构中,主支柱和辅助支柱均为主要的缓冲装置,均承受轴向力和弯矩的作用<sup>[28]</sup>。悬臂式构型的组合形式是主支柱作为主要的缓冲支柱,主支柱一端单独与着陆垫相连,另一端与伸出基体结构的桁架连接。辅助支柱一端在主支柱外筒下端与主支柱连接,另一端直接与基体结构相连,从而形成“悬臂—斜撑”的结构形式。在悬臂式构型的着陆缓冲机构中,主支柱可承受轴向力和弯矩,而辅助支柱仅承受轴向力<sup>[28]</sup>。

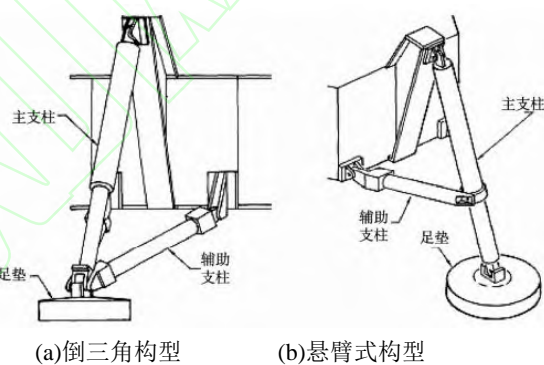


图6 着陆缓冲机构<sup>[26]</sup>

两种形式的着陆缓冲机构均在实际的登月任务中得到了应用,如美国的勘测者号月球着陆器、苏联的月球16号和月球21号等均采用倒三角构型。然而更多的着陆器采用悬臂式构型,如阿波罗系列着陆器、嫦娥系列着陆器等。

## 3 着陆器结构的可持续利用

迄今为止,已成功登陆月球的着陆器在完成相应的搭载、勘测、和取样等任务后,大多数着陆器最终会被“遗弃”在月球表面,成为“月球垃圾”。考虑到深空探测任务所需的巨大运输和建造成本,同时着陆器又作为进行深空探测任务所必需的重要运载工具之一,因此,根据未来更多的月面探测、载人登月以及月面建造等任务的需求,一些学者和机构提出了多种着陆器的可持续利用的设计方案。这些可持续利用的着陆器可用于支持后续的载人登月任务和月球基地建造等相关任务,同时减少了探



月任务和深空探测的建造和运输成本，对进行可持续的深空探测、实现可用资源的最大化利用具有重要的战略意义。通过各种研究表明，着陆器的可持续利用是未来深空探测任务的重要方向之一<sup>[29-32]</sup>。

### 3.1 着陆器结构的可移动性

在探月任务中，现有的着陆器由于在着陆后成为固定式着陆器，只能进行定点勘测或由月球车进行局部探测，不能很好地满足大范围、多次月面探测以及未来月球基地的选址和建设任务的需求。因此，这类任务要求着陆器能够实现多次月面起飞和着陆、大范围月面巡视移动等任务，从而提高着陆器的可持续性利用<sup>[33-38]</sup>。李杨等<sup>[34]</sup>提出了一种重复使用单级月面着陆与上升器方案设计，如图7所示，这种飞行器将着陆器下降级和上升级结合为一体，通过一体化的方式实现水平姿态的着陆器重复垂直着陆和垂直起飞，进行多点位的飞跃和着陆探测。

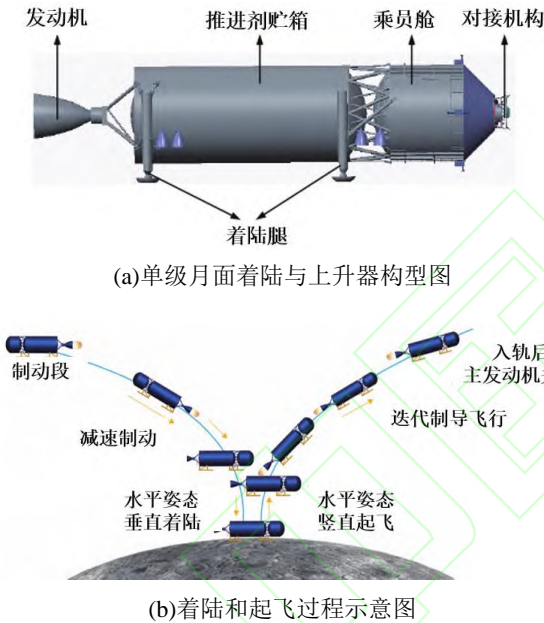


图7 重复使用单级月面着陆与上升器方案<sup>[34]</sup>

贾山等<sup>[35]</sup>提出了一种可重复使用的小型着陆器，如图8所示，每条着陆腿都包含了一组水平吸能组件和一组垂直吸能组件，采用摩擦制动装置吸收着陆冲击能量，可满足单次发射、多点探测的月表飞跃任务需求。

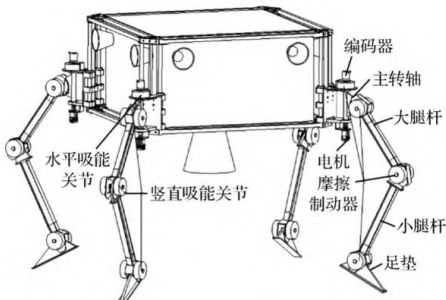


图8 可复用小型月表着陆器<sup>[35]</sup>

一些学者针对现有月面着陆器着陆缓冲机构的局限性，结合了仿生学原理开展了有关着陆器仿生腿式机构的设计和研究，以适应复杂的月面环境，实现各类的自适应运动<sup>[36]</sup>。如图9所示，王宸等<sup>[36]</sup>根据家猫在跳跃过程中出色的着陆缓冲能力和冲击衰减能力，以家猫的腿部肌肉的骨骼结构为原型，设计了一种基于磁变流缓冲器的仿猫着陆缓冲机构，解决了现有被动式蜂窝着陆器不可重复使用的问题，实现了月面重复跳跃和高效着陆。

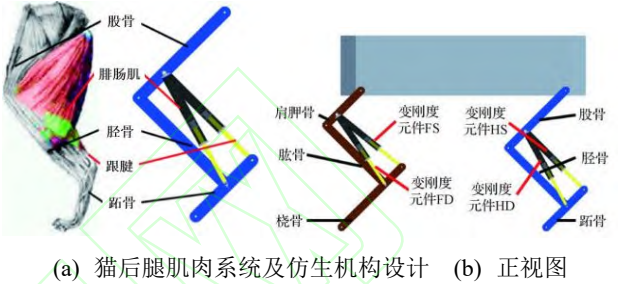


图9 仿猫着陆器结构<sup>[36]</sup>

李东瑾等<sup>[37]</sup>提出了一种月面居住舱可折叠轮式移动机构方案设想，如图10所示，该移动着陆器可以在月球实现折叠着陆、展开移动、锁定停放及折叠起飞返回4种工作模式。

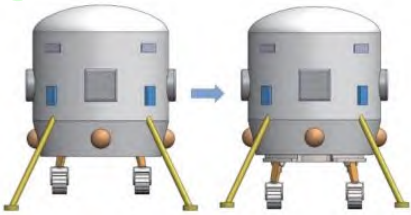


图10 月面居住舱可折叠轮式移动机构<sup>[37]</sup>

喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)<sup>[38]</sup>为了能够最大限度地重复利用送往月球的硬件，设计了一种可移动的着陆器“MobiLander”，如图11所示。到达月面后，“MobiLander”能够以每天数十公里的速度运送宇航员和货物，并具有良好的避障能力。在宇航员利用上升级返航后，“MobiLander”还可以由地球远程控制进行月侦察，并可作为下一次着陆的备用。

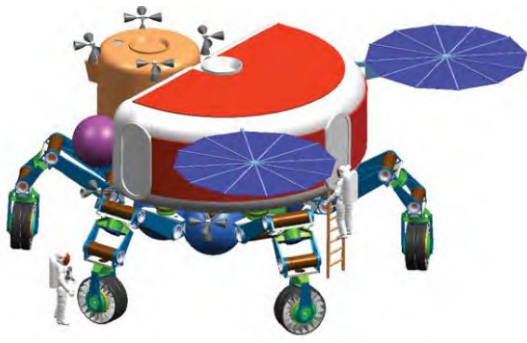


图 11 “MobiLander” 结构<sup>[38]</sup>

还有多种形式的可实现重复着陆、移动的着陆器设计方案,可满足在一定探月任务下的需求,其摒弃了着陆后固定式的传统着陆器的设计方案,实现了着陆器的可持续利用<sup>[38-42]</sup>。

### 3.2 着陆器结构的可组合性

建立月球基地一直是 21 世纪以来探月任务和深空探测任务的重要内容之一。目前月球基地的方案普遍采用的是地球运输部分材料,月球原位资源利用为主的建造方案。在建立月球基地的众多方案中,一些学者和机构设计了可组合的着陆器,并提出了利用可组合的着陆器建立移动式月球基地或者是固定式的月球基地方案。多种方案表明,着陆器的可组合性对于建立移动式月球基地或者是固定式的月球基地具有非常广阔的应用前景<sup>[38,43-44]</sup>。

如前一节所述,喷气推进实验室(JPL)<sup>[38]</sup>所提出的“MobiLanders”还可在搭建了一个“帐篷”结构防止太阳辐射和宇宙射线等危害后,连接在一起成为月球前哨站的一部分,如图 12 所示。

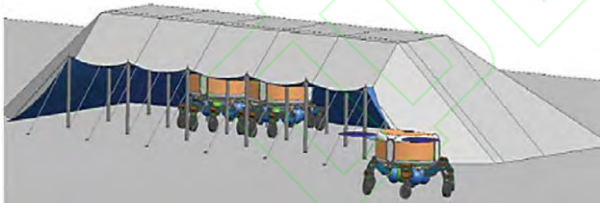


图 12 “MobiLanders” 连接形成月球前哨站<sup>[38]</sup>

喷气推进实验室(JPL)<sup>[43]</sup>还设计了一种可应用于行星表面和深空人类探测任务的模块化系统,如图 13 所示,其由着陆器下降级模块、核心节点模块(STAR 节点生命支持系统)、移动系统模块和加压漫游车模块等组成,通过使用相同的模块化接口系统使各个模块之间完成对接,从而形成整体式的水平模块化勘探系统,可作为未来深空探测任务中人类地外前哨站、临时补给站、地外栖息地等应用方案。

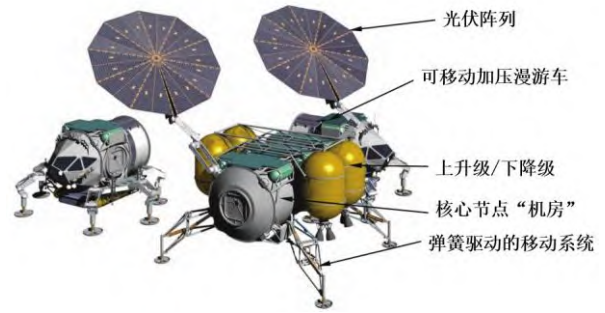


图 13 核心节点前哨站的配置<sup>[43]</sup>

梁鲁等<sup>[44]</sup>提出了一种轮腿式可移动载人月面着陆器方案设想,如图 14 所示,整个着陆器分为制动级、着陆移动级和上升级,其中着陆移动级采用六个轮腿作为着陆缓冲装置及承载上升级在月面上进行移动。轮腿式可移动载人月面着陆器可用于支持月球基地建设运营等任务,充分实现了着陆器的可持续利用。

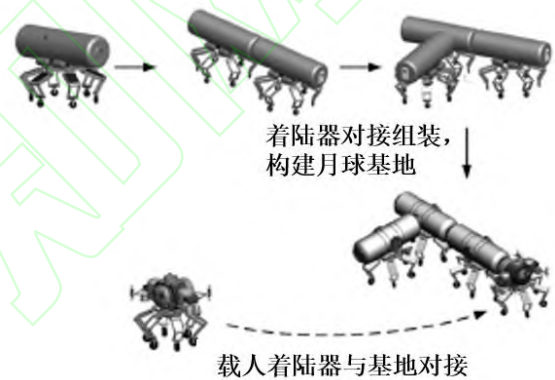


图 14 移动式月面着陆器构建月球基地<sup>[44]</sup>

### 3.3 着陆器结构的可扩展性

考虑到组成月球表面系统、建筑等组件及其他货物须要从月球着陆器卸载及卸载后在月面上处理这些组件和货物的作业方式,特别是须要从月球着陆器卸载重型的货物及在月球表面对重型货物进行装卸作业<sup>[45-48]</sup>, 兰利研究中心(Langley Research Center, LRC)<sup>[45-46]</sup>提出了一种月球表面机械操纵作业系统(LSMS),如图 15 所示。LSMS 以着陆器为系统平台,并在着陆器平台上设计机械臂或起重机,以便在着陆后能够对着陆器平台上的货物进行卸载,并可将重型货物装卸到可移动的机器人上,由可移动机器人运输到指定的地点。





图 15 LSMS 的月球卸载货物作业示意图<sup>[45]</sup>

LSMS 系统以着陆器为重型货物装卸作业的平台，结合机械臂或起重机使着陆器在着陆后能够进行可持续使用，补充了着陆器的又一功能。基于原始 LSMS 的设计目标和功能，兰利研究中心不断发展和更新原型的 LSMS，使其具有更多的功能<sup>[47]</sup>。在后期的研究中还开发了 LSMS-L35<sup>[48]</sup>，如图 16 所示。LSMS-L35 相比于之前的构型更小，使用更小的电机，消耗更少的能量，并能够与 LSMS 系列的其他部件共享相同的控制和操作架构。

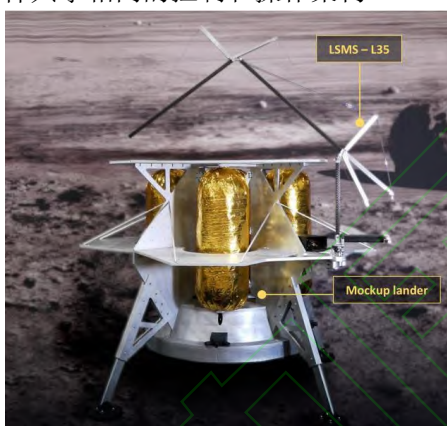


图 16 LSMS-L35 构型<sup>[48]</sup>

戈达德太空飞行中心 (Goddard Space Flight Center, GSFC)<sup>[38]</sup>考虑了如何让宇航员和货物在月球表面着陆等问题，提出了两种新型的着陆器，一种是在着陆器上配备了起重机，另一种是配置了“电梯(EVAtor)”系统的着陆器，如图 17 所示。戈达德团队提出的起重机式着陆器和“电梯(EVAtor)”系统的着陆器均可将宇航员和货物降落到月面上。尽管该团队两种方案都能满足 NASA 的要求，但发现在某些条件下，“电梯(EVAtor)”系统的着陆器效率更高，风险更小。



(a) “起重机”着陆器 (b) “电梯(EVAtor)”着陆器

图 17 GSFC 设计的具有装卸功能的着陆器<sup>[38]</sup>

### 3.4 着陆器结构的可回收性

由于着陆器的几何结构和子系统的布局，其被认为具有重要的零件回收和重复使用的潜力，可以减少必须从地球运输的质量<sup>[49-51]</sup>。因此，为增强着陆器及相应的系统在月球表面上能够被重复使用的能力，并将其作为建造月球前哨站的潜在备件和硬件的来源，各学者和机构均提出了相应的设计方案<sup>[38,52-53]</sup>。

为支持“太空探索愿景”计划，约翰逊航天中心(Johnson Space Center, JSC)<sup>[38]</sup>进一步探索和完善了月球栖息地的概念，提出了一种在着陆器在着陆后使用废弃的推进剂罐作为宇航员的可居住空间——“HabiTank”，如图 18 所示。“HabiTank”着陆器的创新之处在于能够将着陆器的两个大型推进剂罐作为月球前哨站的可居住空间，从而实现着陆器运输着陆和建造的双重用途。

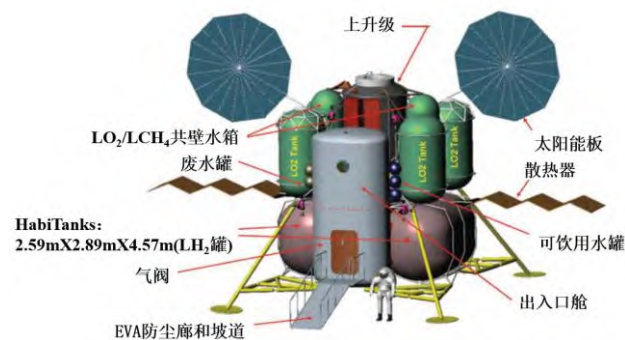


图 18 “HabiTank”结构<sup>[38]</sup>

此外，“HabiTanks”可以与加压移动模块连接在一起，形成一个更大的月球前哨站。加压移动模块、充气隧道以及出入口舱体等预先集成，并可以连接到“HabiTanks”系统。加压移动模块是居住系统集成和操作的地方，是连接“HabiTanks”的枢纽。为满足所需的功能和体积，使用四个着陆器和两个加压移动模块用于创建前哨站，以支持四名船员在 180 至 210 天的月面停留作业，如图 19 所示。



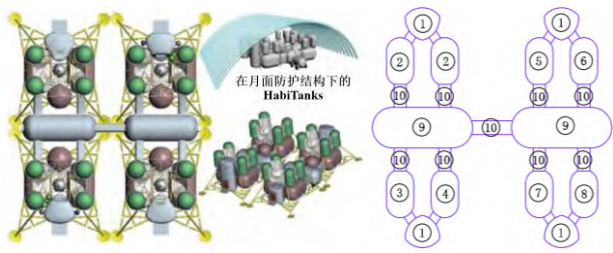


图 19 月球前哨站功能布局: 1-气闸, 2-宇航员宿舍, 3-厨房, 4-任务操作室, 5-生命科学舱, 6-医疗舱, 7-地理科学实验室, 8-EVA 设施, 9-加压移动模块, 10-互连隧道<sup>[38]</sup>

波音公司<sup>[53]</sup>提出了着陆器可回收和重复使用的思路, 并设计了四种着陆器构型: 参考空间桁架着陆器(Boeing Lunar Lander-Reference Space Truss, LLRT)、单 LH2 燃料箱着陆器(Boeing Lunar Lander-Single LH2 Tank, LLSH)、通用舱壁着陆器(Boeing Lunar Lander-Common Bulkhead, LLCB)、环形燃料箱着陆器(Boeing Lunar Lander-Toroidal Tank, LLTT), 如图 20 所示。



图 20 波音公司提出的着陆器结构<sup>[53]</sup>

波音公司针对这些着陆器设计方案, 均提出了着陆器回收和重复使用的方法, 如通过移除着陆器结构面板、膜结构和隔热层等, 将其固定在月面栖息地外表面、内墙板上, 或安装在月球车上, 可以增强对辐射、微流星体和极端温度的防护。着陆器的结构面板、梁、柱、支柱、连接等构件和配件可以成为建造月球基地的原材料和备件来源。此外, 从着陆器中回收的剩余的氧气和燃料推进剂也可以作为后续任务的燃料原料, 或通过设计特殊的推进剂罐使其能够成为栖息地或存储空间并重新使用。

## 4 总结与展望

### 4.1 总结

本文通过介绍月面着陆器的功能和系统组成, 提出了现有着陆器下降级的设计要求, 重点总结和归纳了现有着陆器下降级结构形式及其分类, 介绍了组成着陆器下降级的基体结构和缓冲机构结构, 列举了着陆器结构及其可持续利用的方案和设计, 得到了结论如下。

a. 着陆器下降级结构按照其结构的空间布局可分为桁架式着陆器下降级和板式着陆器下降级; 按照支撑着陆器下降级的着陆腿个数又可分为三腿式着陆器下降级、四腿式着陆器下降级以及多腿式着陆器下降级;

b. 着陆器下降级结构可由基体结构和着陆缓冲机构结构组成。根据不同的任务需求, 须要选择合适的基体结构和着陆缓冲机构的着陆器下降级。不同结构形式的着陆器下降级在运输和着陆过程中的受力方式及承载结构有较大的区别。

c. 在着陆器的可持续利用设计和方案中, 根据着陆器再利用的功能可分为着陆器的可移动性、着陆器的可组合性、着陆器的可扩展性及着陆器的可回收性, 各种设计方案可满足不同的任务需求, 具有非常广阔的应用场景。

### 4.2 展望

当前科学技术如航空航天、机器人自动化控制和新型材料等领域得到了显著发展, 同时人类对深空探测的需求也在不断增长, 因此, 新一代着陆器设计要求应具备更强大的功能, 但也会面临更多的科学和技术挑战。

a. 着陆器下降级结构构件的轻量化。着陆器下降级作为探测器的主要组成部分之一, 其体积和质量占据了探测器总质量很大的一部分, 采用传统的结构材料, 势必会增加巨大的运输成本, 因此必须开展轻量化结构的研究, 采用国内外先进的材料, 在满足结构承载力、强度和刚度要求的基础上降低着陆器下降级结构的质量。

b. 着陆器的可持续利用和自主避障能力。在过去的着陆器登月任务中, 由于传统着陆器的结构和系统设计, 导致着陆器只能进行一次性的月面着陆, 成为固定的着陆器, 使得后续开展的科研活动范围有限, 所得到的科学回报较低, 因此须要对着陆器的多次着陆和起飞、移动式着陆器等新功能进行研

究。同时还须要增加对月球上月形月貌实现实时自主避障能力,保障着陆器在多次着陆或移动的过程中的安全。

c. 模块化着陆器的自主装配。为解决无法继承和利用已发射着陆器结构的问题以及根据后续探月任务建造月球基地的需求,未来的着陆器应可以便捷地组合成移动式月球基地,或在服役期满后可以装配成固定式月球基地,或着陆器的某些部件可成为建造月球基地所需的材料,这就须要研究模块化的着陆器及其相应的接口系统,使其能够精准地实现各模块之间的对接和装配。

## 参 考 文 献

- [1] 张弛. 冷战中的美苏载人登月竞赛[D]. 西安: 陕西师范大学, 2011.
- [2] KIM Y B, JEONG H-J, PARK S-M, et al. Prediction and Validation of Landing Stability of a Lunar Lander by a Classification Map Based on Touchdown Landing Dynamics' Simulation Considering Soft Ground[J]. *Aerospace*, 2021, 8(12): 380.
- [3] LIANG D, WANG G, ZHANG P. Landing Dynamic Analysis for Landing Leg of Lunar Lander Using Nonlinear Finite Element Method[J]. *Advances in Astronautics Science and Technology*, 2022, 5(3): 235-240.
- [4] JI S, LIANG S. DEM-FEM-MBD coupling analysis of landing process of lunar lander considering landing mode and buffering mechanism[J]. *Advances in Space Research*, 2021, 68(3): 1627-1643.
- [5] 张焄, 吴成康, 刘立辉, 等. 月球探测器着陆过程羽流热效应数值模拟研究[J]. *宇航学报*, 2022, 43(6): 820-829.
- [6] 王永滨, 王立武, 武士轻, 等. 基于离散元理论的月球着陆器月面着陆冲击碰撞特性研究[J]. *航天返回与遥感*, 2020, 41(05): 21-28.
- [7] RAHIMI A, EJTEHADI O, LEE K H, et al. Near-field plume-surface interaction and regolith erosion and dispersal during the lunar landing[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 75: 308-326.
- [8] Wang C, Nie H, Chen J, et al. The design and dynamic analysis of a lunar lander with semi-active control[J]. *Acta Astronautica*, 2019, 157: 145-156.
- [9] HU T, HE L, CAO T, et al. Autonomous Obstacle Detection and Avoidance of Lunar Landing Based on Active and Passive Sensors[C]// *Proc of 2021 International Symposium on Computer Science and Intelligent Controls (ISCSIC)*. Piscataway: IEEE, 2021: 391-395.
- [10] SILVESTRINI S, PICCININ M, ZANOTTI G, et al. Optical navigation for Lunar landing based on Convolutional Neural Network crater detector[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2022, 123: 107503.
- [11] 邓雁鹏, 穆荣军, 彭娜, 等. 月面着陆动力下降段最优轨迹序列凸优化方法[J]. *宇航学报*, 2022, 43(08): 1029-1039.
- [12] 朱汪. 欧洲航天局月球着陆器概述及启示[J]. *航天器工程*, 2016, 25(1): 124-130.
- [13] BROWN K K, CONNOLLY J F. An Altair Overview: Designing a Lunar Lander for 21st Century Human Space Exploration[C]// *Proc of Global Space Exploration Conference*. Reston: AIAA, 2012: 1-10.
- [14] CASSELL A M. Forward to the Moon: NASA's Strategic Plan for Human Exploration[R]. Monopoli: NASA Ames Research Center, 2019.
- [15] 张有山, 果琳丽, 王平, 等. 新一代载人月面着陆器发展趋势研究[J]. *载人航天*, 2014, 20(4): 353-358.
- [16] KINSMAN P D, JOYNER C R, KOKAN T S, et al. Lunar surface logistical capability: a study of spacecraft needed to support human habitation, scientific research, and commercial operations on the lunar surface[C]// *Proc of AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum*. Reston: AIAA, 2019: 4133.
- [17] YU D Y, SUN Z Z, ZHANG H. Technology of Lunar Soft Lander[M]. Berlin: Springer, 2021.
- [18] 张则梅. 月球着陆器结构设计技术及仿真分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [19] KELLY T. Manned lunar lander design-The Project Apollo Lunar Module (LM)[C]// *Proc of Space Programs and Technologies Conference*. Reston: AIAA, 1992: 1480.
- [20] WEISS S P. Apollo experience report: Lunar module structural subsystem[R]. Houston: Johnson Space Center, 1973.
- [21] 柴洪友, 邓宇华, 盛聪. 嫦娥三号着陆器结构分系统设计与实现[J]. *中国科学: 技术科学*, 2014, 44(04): 391-397.
- [22] 叶培建, 孙泽洲, 张焄, 等. 嫦娥四号探测器系统任务设计[J]. *中国科学: 技术科学*, 2019, 49(02): 124-137.
- [23] 董彦芝, 张高, 杨昌昊, 等. 嫦娥五号探测器结构分系统设计与实施[J]. *中国科学: 技术科学*, 2021, 51(08): 886-897.
- [24] 邓宗全, 王闯, 刘荣强, 等. 空间桁架式着陆器的动力学分析[J]. *振动与冲击*, 2007(10): 169-173.
- [25] 王闯, 邓宗全, 高海波, 等. 国内外月球着陆器研究状况[J]. *导弹与航天运载技术*, 2006, 4: 31-36.

- [26] 黄伟. “阿波罗”登月舱的软着陆支架[J]. 航天返回与遥感, 2013, 34(4): 17-24.
- [27] 韩鸿硕, 王一然, 蒋宇平, 等. 国外深空探测器着陆缓冲系统的特点和应用[J]. 航天器工程, 2012, 21(06): 7-24.
- [28] 聂宏, 王宸, 陈金宝, 等. 航天器着陆缓冲机构技术研究进展[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(05): 751-770.
- [29] DUMONT E. Suitability of reusability for a Lunar re-supply system[C]// Proc of the 67th International Astronautical Congress. New York: Curran Associates, Inc, 2016: 8114-8127.
- [30] DUGGAN M, SIMON X, MOSEMAN T. Lander and cislunar gateway architecture concepts for lunar exploration[C]// Proc of 2019 IEEE Aerospace Conference. Piscataway: IEEE, 2019: 1-9.
- [31] Beauregard L, Urbano A, Lizy-Destrez S, et al. Multidisciplinary design and architecture optimization of a reusable lunar lander[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2021, 58(4): 1186-1199.
- [32] BART R F, HOFFMAN J. Reusability Analysis for Lunar Landers[C]// Proc of 2021 IEEE Aerospace Conference. Piscataway: IEEE, 2021: 1-10.
- [33] BIRCKENSTAEDT B, HOPKINS J, KUTTER B, et al. Lunar lander configurations incorporating accessibility, mobility, and centaur cryogenic propulsion experience[C]// Proc of Space 2006. Reston: AIAA, 2006: 7284.
- [34] 李扬, 张烽, 汪小卫, 等. 重复使用单级月面着陆与上升器方案设计与制导[J]. 深空探测学报, 2022, 9(5): 512-520.
- [35] 贾山, 赵建华, 胡汝洁, 等. 可复用小型月表着陆器设计优化及仿真分析[J]. 宇航学报, 2022, 43(03): 356-365.
- [36] 王宸, 陈金宝, 董自瑞, 等. 仿猫月球着陆缓冲机构设计与缓冲特性研究[J]. 宇航学报, 2022, 43(10): 1302-1310.
- [37] 李东瑾, 齐臣坤, 陈萌, 等. 月面居住舱可折叠轮式移动机构方案设想[J]. 载人航天, 2019, 25(05): 688-692.
- [38] CONNOLLY J F. After LM: NASA Lunar Lander Concepts Beyond Apollo[R]. Houston: Johnson Space Center, 2019.
- [39] 贾山, 周向华, 陈金宝, 等. 可移动月球着陆器系统设计与实验验证[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(1): 29-41.
- [40] LIN R F, GUO W Z, LI M. Novel design of legged mobile landers with decoupled landing and walking functions containing a rhombus joint[J]. ASME Journal of Mechanisms and Robotics, 2018, 10(6): 1-14.
- [41] LIN R, GUO W, CHEN X, et al. Type synthesis of legged mobile landers with one passive limb using the singularity property[J]. Robotica, 2018, 36(12): 1836-1856.
- [42] YIN K, GAO F, SUN Q, et al. Design and soft-landing control of a six-legged mobile repetitive lander for lunar exploration[C]// Proc of /2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway: IEEE, 2021: 670-676.
- [43] HOWE A S. A modular habitation system for human planetary and space exploration[R]. Bellevue: Jet Propulsion Laboratory, 2015.
- [44] 梁鲁, 张志贤, 果琳丽, 等. 可移动式月球着陆器在载人月球探测活动中的任务分析[J]. 载人航天, 2015, 21(05): 472-478.
- [45] JEFFERIES S, DOGGETT W, CHRONE J, et al. Lunar Lander Offloading Operations Using a Heavy-Lift Lunar Surface Manipulator System[C]// Proc of AIAA Space 2010 Conference & Exposition. Red Hook: Curran Associates, Inc., 2010: 2066-2081.
- [46] HOWARD R L. A Joinable Undercarriage to Maximize Payload (JUMP) Lunar Lander for Cargo Delivery to the Lunar Surface[C]// Proc of AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum. Reston: AIAA, 2019: 4141.
- [47] JONES T C. A Protoflight Lightweight Surface Manipulation System to Enable High Load, Long-Reach Lunar Surface Operations[C]// Proc of ASCEND 2021. Reston: AIAA, 2021: 4167.
- [48] WONG I M. LSMS-L35, Miniature Crane for Payload Off-loading and Manipulation: Development, and Application[C]// Proc of ASCEND 2022. Reston: AIAA, 2022: 4237.
- [49] Cohen B A, Chavers D G, Ballard B W. NASA's robotic lunar lander development project[J]. Acta Astronautica, 2012, 79: 221-240.
- [50] COHEN M. From Apollo LM to Altair: Design, environments, infrastructure, missions, and operations[C]// Proc of AIAA SPACE 2009 Conference & Exposition. Reston: AIAA, 2009: 6404.
- [51] CHENG Z, WANG Z, ZHANG Y. Analysis and optimization of lunar exploration architecture based on reusable human spacecraft[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2019, 56(3): 910-918.
- [52] ROBERTSON B, RAMOS E M, DIAZ M J, et al. A conceptual design study for an unmanned, reusable cargo lunar lander[C]// Proc of International Astronautical Congress



---

(IAC) . Washington: International Astronautical Federation ,2019: 1-15.

[53] BENTON M , DONAHUE B , BIENHOFF D , et al. Configuration options to maximize lunar surface reuse of

Altair lander structure and systems[C]// Proc of AIAA SPACE 2009 Conference & Exposition. Reston: AIAA, 2006: 6405.

