

“嫦娥七号”探测器任务综述

余后满¹, 饶 炜², 张益源², 邢卓异²

(1. 中国空间技术研究院, 北京 100094; 2. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘要: 近年来国际上月球探测区域主要集中在月球南极, “嫦娥七号”探测器任务, 将实现对月球南极“绕”“落”“巡”“飞跃”四位一体综合探测。介绍了月球南极不同于中低纬度地区的特殊环境, 分析了特殊环境条件对探测器设计带来的诸多挑战; 给出了探测器的总体方案设计, 包括系统组成和飞行流程, 以及探测器需突破以复杂地形高精度定点软着陆、月面飞跃、月面着陆采样行走、全局感知与任务规划、水冰与挥发分保真采样为代表的一系列先进技术。为任务顺利实施和后续航天事业奠定了坚实的技术基础。

关键词: 嫦娥七号; 探测器; 任务综述; 月球南极

中图分类号: V476.3

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2023)06-0567-10

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2023.20230119

引用格式: 余后满, 饶炜, 张益源, 等. “嫦娥七号”探测器任务综述[J]. 深空探测学报(中英文), 2023, 10(6): 567-576.

Reference format: YU H M, RAO W, ZHANG Y Y, et al. Mission analysis and spacecraft design of Chang'E-7[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2023, 10(6): 567-576.

引言

人类已成功实现对月球中低纬度地区着陆和采样返回探测。但对于月球极区, 尤其在科学和工程方面普遍认为探测意义重大的南极区域, 国际上仅实施了2次探测。2023年8月20日, 原定着陆于月球南极的俄罗斯“月球25号”(Luna 25)在变轨至着陆轨道时撞击月球导致任务失败, 随后印度“月船3号”(Chandrayaan-3)虽成功着陆于月球南极, 但截至目前探测器处于失联状态。因此目前国际上对于月球极区的探测基本处于空白阶段。近年来, 美国、俄罗斯、欧洲和印度等都提出了月球南极探测计划^[1-2], 尤其是美国2019年正式发布“阿尔忒弥斯”(Artemis)计划, 希望在2024年实施月球南极登陆, 并提出要主导国际月球探测新格局^[3]。

中国在月球探测方面, 经过探月工程前期的积累, 在空间技术、空间科学与应用、国际合作等方面取得了非凡成就, 积累了丰富的经验^[4]。对于月球南极探测, 能够对水冰挥发分来源与分布、月球深部物质与内部结构、月球形貌构造与撞击历史、近月表环境及其过程、月球金属矿产和稀有气体资源等重大科学问题实现突破^[5]。面向航天强国建设、世界航天发展前沿、国家重大战略需求, 作为中国“探月四期”重大工

程的标志性任务之一, “嫦娥七号”探测器预计2026年前后发射, 完成对月球南极的综合探测, 实现航天技术新跨越, 为后续月球科研站建设奠定基础^[5]。

1 探测器任务目标

“嫦娥七号”是“探月四期”工程的重要组成部分, 探测器将实现针对月球南极的“绕”“落”“巡”“飞跃”四位一体综合探测。

1.1 月球南极探测意义

中国在探月工程“绕”“落”“回”三步走战略全面完成后, 已掌握了月球探测器系统设计方法以及一系列关键技术, 构建了相对完整的月球探测体系及基础设施^[6-8]。在具备一定探测基础后, 未来中国月球探测将由探测型转变为科考型, 远期目标为搭建无人月球科研站, 适时开展载人月球探测活动^[9]。无论是未来的科研站建设还是载人月球探测活动, 充足的能源和资源保障都是核心约束因素, 特别是水资源和光照资源, 将是未来月球探索活动需要考虑的核心问题^[10-12]。

自20世纪60年代美国Watson^[13]提出月球永久阴影区存在水冰的假设后, 国际上陆续多次开展了对于月球水冰赋存的相关探测。从20世纪90年代到本世纪初, 探测任务方式覆盖了雷达、中子探测仪及光谱

仪等,探测历程如图1所示。不同方式的探测结果均表明月球极区有可能赋存水冰,特别是月球永久阴影区(Permanent Shadow Region, PSR)赋存概率可能更高,而南极与北极相比,其水冰赋存的区域可能也更加集中^[14-24]。但由于目前已有的均为遥感探测手段,各探测结果中水冰的赋存并非是唯一的可能,如石块、坡度等原因同样有可能导致探测数据异常的结果。

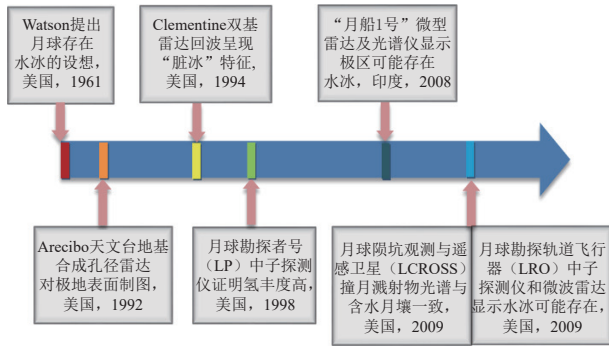


图1 月球水冰探测历程

Fig. 1 Exploration history of lunar water ice

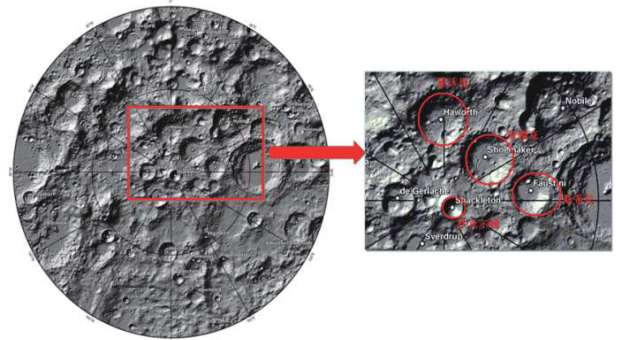
月球南极由于纬度极高,太阳高度角极低,其光照条件特殊,地形对于光照的影响极为明显。根据目前研究表明,月球南极除去存在PSR以外,同样存在光照率极高的地区,最高的年光照率可达80%以上。这种长光照地区可为未来月球探测活动提供充足的能源保障。

综上,月球南极地区有可能赋存水冰资源,同时个别地区存在长期光照,可为未来月球科研站建设或载人月球探测活动提供充足的资源基础,确保建立在复杂月面环境长周期月球探测能力,也是未来月球活动的焦点^[25]。对于月球南极开展先期探测,科学上能直接确认南极是否赋存水冰资源,对于了解水冰和挥发分在月球的迁移和赋存形态、水在太阳系的迁移过程、月球和地球的起源有着重大的意义^[26];在工程方面积累南极环境数据,为未来月球活动提供更多的设计依据,有力支撑未来月球科考探测活动。

1.2 月球南极综合探测

“嫦娥七号”探测器探测目标之一为水冰资源的直接证认。当前国际上对于月球水资源均为遥感探测,且探测结果仍旧存疑,无法确认月球存在水资源,为此“嫦娥七号”探测器将在月球南极实施原位水冰探测。鉴于当前的遥感探测结果表明,月球南极PSR赋存水冰的概率最高^[27-28],为提高探测成功率,将直接针对PSR开展原位探测。遥感探测结果表明,月球南极

PSR普遍为撞击坑,而月球南极区域($80^{\circ}\text{S}\sim 90^{\circ}\text{S}$)的撞击坑大部分直径在10 km以上,坑深度在3 km左右,坑缘高度在1 km左右^[29],撞击坑地形如图2所示。撞击坑尺寸大且深、坑缘高度高,且水冰原位探测需要深入至撞击坑内部的PSR,因此传统着陆就位探测、巡视就位探测由于不具备高速移动能力,无法爬上陡峭的地势,导致在坑内能源供给不足无法满足探测需求。而针对水冰资源原位探测的特殊需求,需要开展专门的飞跃探测手段,其与现有的巡视探测相比具有显著的优势,包括移动速度快、能够克服地形障碍等^[30]。



注:从上到下4个撞击坑分别为Haworth坑、Shoemaker坑、Faustini坑、Shackleton坑。

图2 月球勘探轨道飞行器获得的月球南极($80^{\circ}\text{S}\sim 90^{\circ}\text{S}$)撞击坑地形

虽然飞跃探测与传统巡视探测相比具有一定的灵活性优势,但其需要消耗大量的推进剂实现飞跃,在轨工作天数及使用寿命有限。因此为拓展月球南极探测的广度,应搭配以巡视探测、遥感探测等可持续探测手段,以实现月球南极的全面综合探测。

1.3 探测器工程突破与科学探测目标

通过实施“嫦娥七号”探测器任务,工程上突破月面高精度详查、高精度定点着陆、阴影坑飞跃探测、适应极区极端环境的智能机器人等关键技术,实现航天技术新跨越;通过研制并发射探测器,实现月球极区环境与资源详查,实现月球南极原位科学与资源探测。同时形成月球南极绕、落、巡、飞跃综合探测体系,为后续月球科研站建设奠定基础。

科学方面“嫦娥七号”探测器利用自身携带的科学载荷及搭载载荷,实现月壤水冰和挥发分的探测与研究、月球形貌、成分和构造的高精度探测与研究、月球内部结构、磁场和热特性的探测与研究。通过探测器4种不同类型的探测方式,实现月球南极月表环境的综合探测与研究。

2 探测器任务分析

2.1 探测器任务环境特点分析

“嫦娥七号”任务探测器的主要探测目标地区为月球南极。与月球中低纬度地区相比, 月球南极的主要特点: ①太阳高度角低; ②极区地形地貌更复杂; ③长期处于低温环境。上述环境特点给“嫦娥七号”探测器研制带来了诸多难点^[31]。此外, “嫦娥七号”的重要任务为勘探月球南极赋存的水冰, 月球南极的水冰分布特点同样对探测器方案设计提出了较高要求。

1) 光照条件

月球南极的太阳高度角极低, 极点的太阳高度角在 $\pm 1.54^\circ$ 之间变化, 并随着纬度的变化而略有变化。这种极低的太阳高度角导致了月球南极特殊的光照条件, 虽然部分地区存在极高的年光照率, 但低太阳高度角使得1 m的地形起伏造成长度约为几十米的阴影。光照条件受地形遮挡严重, 同样会导致南极地区存在大量的阴影地区。同时月球南极太阳高度角随时间变化剧烈, 以Shackleton阴影坑外月面为例, 在1年时间内太阳高度角随时间变化的曲线如图3所示^[32]。

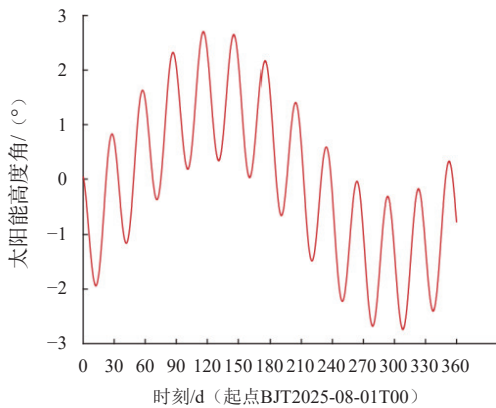


图3 Shackleton撞击坑外月面的太阳高度角随时间变化曲线(以2025年08月01日起始, 时长1年)

Fig. 3 Time varying curve of solar altitude angle on lunar surface outside the Shackleton impact crater (starting from August 1st, 2025, with a duration of 1 year)

从图3可以看出, 月球南极的光照条件基本以年为周期变化, 全年太阳高度角在 $-3^\circ \sim +3^\circ$ 波动, 如果附近存在陡坡或石块, 会导致周边地区出现大面积阴影。此外月球南极区域的太阳方位角会以恒星月为周期在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 变化^[33], 这种特殊的光照条件使得同一地点在每个月不同时段的光照条件会发生巨大变化, 同理不同时刻月球南极存在光照的地区也不尽相同。

2) 地形地貌条件

月球南极的地形相对于中低纬度地区更为复杂, 分布着众多高山和撞击坑, 整体起伏更大, 如图4所

示。南极地区的高程差约15 km, 极点附近的平均坡度约为 9.9° , 均远大于中低纬度典型着陆区的高程及平均坡度。这种复杂的地形条件不但给探测器着陆、移动等带来了更大的挑战, 也由于太阳高度角极低, 会导致恶劣的光照条件。

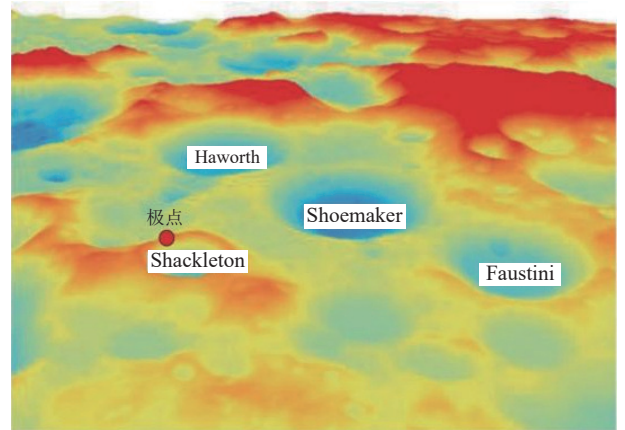


图4 月球南极地形示意图

Fig. 4 Schematic map of lunar south pole terrain

3) 温度条件

由于月球南极太阳高度角低、地形起伏大, 整体处于低温环境, 且PSR内存在深低温恶劣环境。南极地区年平均温度在100~160 K, 最低为70 K, 而Shackleton和CraterS等撞击坑内的温度均低于110 K, 最低可至40 K, 如图5所示。这种低温条件是中国月球探测器从未遇到过的挑战。

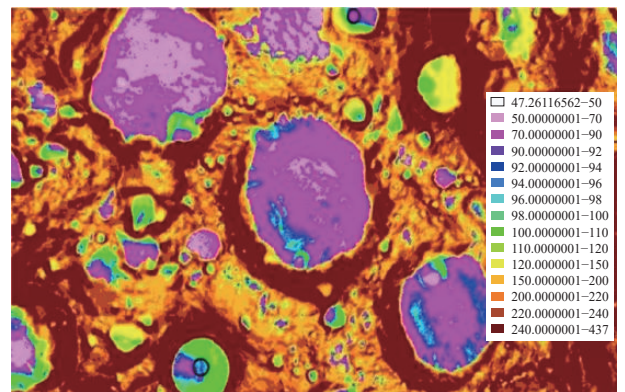


图5 月球南极最高温度分布

Fig. 5 Distribution of highest temperature on the south pole of the Moon

除了低温条件外, 月球南极在光照区同样存在有290 K左右的高温条件, 也就是说对于月球南极探测器, 其需要适应的温度范围相较于以往要更宽。

4) 水冰分布

水冰原位探测是“嫦娥七号”探测器的一项重要使

变化, 同一时刻存在光照的地区不同, 且太阳高度角也在不断变化。因此, 为确保能在月面持续工作, 应当尽可能设计“追光移动”, 不停地向光照区域移动并开展探测活动, 即定时定点移动, 一旦陷入到阴影中便只能进行休眠等待下一次的光照唤醒。

为确保定时定点移动策略的正确性, 首先需对月球表面的光照、地形条件完成精确成像, 得到准确的月面光照条件周期性变化数据, 其次需利用遥感探测实现对月面探测器的高精度成像进行准确定位。在遥感探测得到可行的光照条件、月面探测器位置等输入条件后, 开展月面探测器的定时定点移动路径规划和休眠唤醒设置, 进而确保月面探测器的能源安全。

4) 天地联合探测任务难

通过任务分析可知, 由于月球南极光照条件随时间、地点变化剧烈, 需要有高精度定点着陆、陆标成像、定时定点移动等设计要求。为支撑月面探测器的探测任务, 需要同步设计月球遥感探测器的飞行任务, 在月面探测器的不同任务阶段配合开展遥感探测, 为月面探测提供及时、可靠的任务输入。这种天地联合探测对于整体任务流程设计提出了极高的要求。

5) 月面飞跃行走任务难

月球南极水冰更大概率分布在各个永久阴影坑的PSR内。由于永久阴影坑地形复杂尺寸大, 需要探测器飞跃至永久阴影坑内开展探测。而为获取更多的水冰原位探测数据, 探测器在飞跃至PSR前, 应当在月表光照区开展多次飞跃移动探测。

综上, 对于水冰探测, 需要探测器在月面进行多次起飞、着陆、行走等行为。而传统深空探测器着陆使用的一次性缓冲方案, 无法实现重复着陆, 更无法实现月面移动。因此, 需要设计全新的机构系统支撑探测器在月面的重复着陆与行走。同时由于探测器在月面需要进行多次起飞着陆, 其发动机在上述过程中生成的羽流会对探测器底部设备造成局部高温, 需对受限空间的羽流场开展分析, 从而避免设备因为羽流力、热效应发生损坏。

6) 阴影坑采样任务难

据估算南极阴影坑内PSR水冰赋存深度约在1 m左右, 需要探测器具备深层采样能力, 同时由于PSR内无光照, 探测器工作时没有能源输入, 这对于深层采样效率提出了极高的要求。

与之相反的, 由于PSR内含水冰的月壤温度低, 且水冰在月球环境条件下相变温度点低, 采样过程中采样机具与月壤的摩擦从而产生局部高温, 可能导致

月壤内水冰的快速流失, 导致采集到的含水月壤样品失真。

综上, 由于探测器在PSR内工作时的能源约束, 以及采样时水冰月壤样品的保真要求, 如何实现高效率、低热扰动的高可靠采样方案成为了“嫦娥七号”任务一大难点。

7) 温度环境适应性要求高

月球南极温度极低, 特别是PSR内存在100 K以下的深低温环境, 探测器需要在PSR内实现着陆、移动、采样, 舱外机构等部件更是面临与深低温月壤直接接触的工况, 这需要探测器有极强的低温耐受能力。

而除了深低温环境外, 光照时月球同样存在290 K左右的高温条件, 特别是在飞跃探测时, 发动机羽流产生的热效应更是对产品的热适应能力提出了挑战。

综上, 极区环境探测, 舱外产品同时面临着接触深低温月壤、发动机羽流热效应的恶劣温度环境, 这对于探测器产品的材料选型和环境耐受设计提出了极高的要求。

8) 南极环境对探测器设计影响小结

月球南极存在特殊的环境条件, 这些环境条件也对探测器的设计带来了诸多挑战, 其对应的影响总结如图8所示。

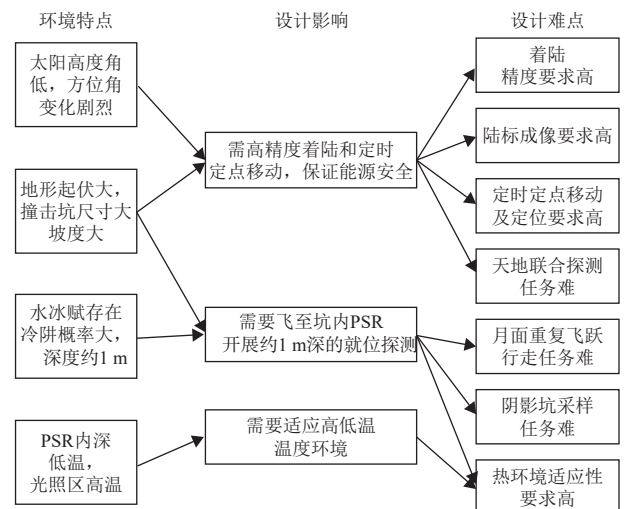


图8 月球南极环境特点导致的设计难点

Fig. 8 Design difficulties caused by characteristics of the lunar antarctic environment

3 探测器总体方案

3.1 探测器系统组成

为实现水冰的原位探测, “嫦娥七号”探测器应当具备飞跃至阴影坑内采样探测的能力, 同时为拓展南

极探测的广度，探测器应当具备长寿命巡视探测的能力，综上，“嫦娥七号”探测器设计了飞跃器、巡视器以实现月面综合探测。为实现月面着陆，设计着陆器实现南极高精度定点软着陆，同时实现南极月面原位勘查。而为支撑月面探测器的高精度软着陆、定时定点移动及月面定位，研制轨道器实现对月球特别是南极地区的高精度遥感探测，与月面探测器协同实现天地联合探测。

综上，“嫦娥七号”探测器由轨道器、着陆器、巡视器、飞跃器四器组成。各器均搭载有科学载荷实现科学探测，具备测控数传、信息管理、能源管理、热管理、导航与控制等功能，其组成如图9所示。

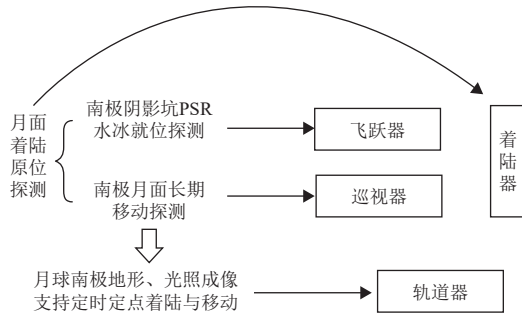


图9 “嫦娥七号”探测器功能与组成
Fig. 9 Function and composition of Chang'E-7 probe

3.2 探测器飞行流程设计

“嫦娥七号”探测器整体任务流程如图10所示。

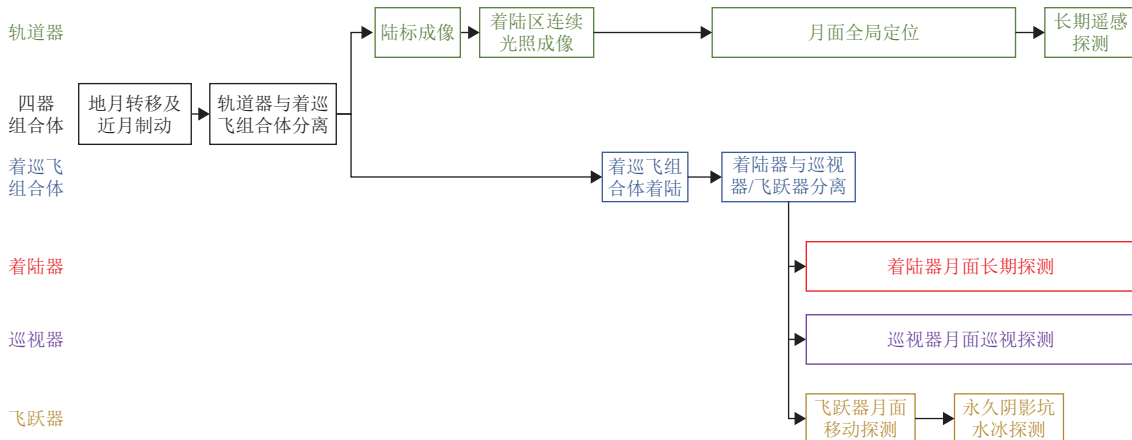


图10 “嫦娥七号”探测器飞行任务流程图
Fig. 10 Flight mission flowchart of Chang'E-7 probe

探测器入轨并器箭分离后，经由地月转移及近月制动到达环月轨道，之后轨道器与着巡飞组合体分离。

轨道器搭载了高分辨率的相机及其它遥感探测科学载荷，在与着巡飞组合体分离后，首先利用搭载的遥感相机成像，支撑着巡飞组合体在月面的探测工作，开展天地联合探测，具体包括：①陆标成像，拍摄着陆区图像，为后续着巡飞组合体高精度定点着陆提供保证；②针对着陆区开展连续成像，积累着陆区光照和地形数据，为后续巡视器、飞跃器在月面的定时定点移动探测积累数据；③在着巡飞组合体着陆月面后，对三器开展成像获取月面探测器的准确位置，结合着陆区光照、地形数据为月面休眠唤醒及定时定点移动路径规划设计提供输入。在支撑完着巡飞组合体完成月面着陆、移动后，轨道器利用自身搭载的各类遥感科学载荷开展长期探测，针对月球南极以及月球其它重点地区开展遥感探测。

着巡飞组合体分离，在环月轨道飞行一段时间后，

择机利用轨道器实拍的陆标图像进行高精度着陆，着陆月面后，着陆器与巡视器、飞跃器进行分离。

着陆器在分离后，在月面开展原位科学探测。在南极长阴影期来临前，结合轨道器积累的着陆区光照数据和自身定位实施休眠，待光照条件恢复后整器唤醒继续开展长期的科学探测。

巡视器分离后在月面开展长期的移动探测，利用轨道器积累的光照数据和定位，以及自身导航系统对周边地形感知和定位实施定时定点“追光移动”探测。巡视器可移动至月球南极感兴趣区域开展就位科学探测，特别是针对月球表面的小型冷阱，采样并探测月壤挥发分，实现极区月壤成分分析。在月球南极极昼期间，巡视器进行休眠，待光照条件恢复后唤醒继续开展长期移动探测。

飞跃器分离后首先飞跃至南极的光照区开展行走探测，同样利用轨道器积累的光照数据和定位及自身导航系统对周边地形感知和定位实施定时定点的“追光

移动”探测。之后,飞跃器飞跃至水冰赋存概率大的阴影坑PSR,在坑内移动并原位开展深层水冰钻取分析,实现月球水冰的就位探测。

4 探测器需突破的关键技术

“嫦娥七号”探测器将是中国首个针对月球南极开展探测的探测器,在科学探测成果上,“嫦娥七号”探测器对月球极区永久阴影区水分子及氢同位素的直接测量,不但能直接认证水冰的存在并揭示其来源,还可通过原位测量结果与月面永久阴影区遥感探测结果对比分析,获取月球阴影区水冰分布、含量,具有重要科学意义^[26]。而从工程方面考虑“嫦娥七号”探测器预计实现5个重大突破,即:

- 1) 月球南极85° S以上遥感、就位和巡视联合探测,提升深空探测智能应用水平;
- 2) 月球极区复杂地形下100 m级高精度软着陆;
- 3) 月球南极永久阴影坑就位探测;
- 4) 月球表面大范围飞跃探测及腿足移动机器人;
- 5) 国际最高分辨率极区光学遥感探测数据。

为实现上述目标,“嫦娥七号”探测器在充分继承深空探测器、遥感卫星等任务经验的基础上,结合自身特点,突破以复杂地形高精度定点软着陆、月面飞跃与着陆、月面腿足机器人、月面高可靠钻进采样、全局感知与任务规划、水冰与挥发分保真采样等为代表的一系列先进技术。

1) 复杂地形高精度定点软着陆技术

与传统深空系列探测器相比,着陆器新增了陆标图像导航的手段,基于轨道器在轨实拍的陆标图像,利用光学传感器和图像导航算法进行匹配从而提高了定位精度;此外在制导方面,突破了主减速段航程受控的自适应显式制导技术,提高了控制精度。通过上述技术的突破,将“嫦娥七号”着巡飞组合体的着陆精度提高至亚百米量级,能够满足月球南极复杂地形定点着陆的需求。

2) 月面飞跃与着陆技术

飞跃器将成为首个在地外天体飞跃的探测器,在月球表面实现多次飞跃与着陆。为此飞跃器突破了多边界耦合下月面起飞技术,通过优化起飞时姿控策略,解决飞跃器面临的羽流干扰作用显著、起飞通道与起飞平面倾斜等多重困难。同时设计微波+激光数据耦合策略,并突破整器动态数据与传感器图像数据深度耦合的高动态避障技术,能够适应不同的地形及光照条件,并开展全新的弹道轨迹参数优化,在不同飞跃距离下基于不同的弹道策略,在高速迭代的同时

能够显著减少推进剂的消耗。

为满足月面着陆的需求,飞跃器完成了新一代减速、着陆、缓冲设备的研制,全新研制了轻小型着陆微波与激光敏感器、中室压并联减速发动机,同时突破了主动式着陆缓冲技术,不同于传统的蜂窝式能耗方案,利用腿足机构的关节阻抗闭环控制进行反驱耗能,从而实现不同坡度下的可靠重复着陆。

3) 月面腿足机器人技术

飞跃器同时也将成为首个地外天体腿足机器人,复用腿式机构,既可通过主动反驱耗能实现可重复着陆缓冲,也可通过腿足规划与关节驱动实现整器移动。为满足腿式机器人行走的需求,突破了三维感知滤波容和算法、腿式里程算法等技术。同时设计了阻抗参数力控方案,自主适应月表地形起伏和异常形貌;设计了足端前馈力解算,补偿月面重力和腿足惯性力;最终通过腿足机构的“力-位”混合控制,基于整器姿态实现了不同坡度、速度的闭环移动控制。

4) 月面高可靠钻进采样技术

由于月球水冰赋存深度约1 m,PSR含水月壤样品具备深度深、密实度大、硬度高等特点,同时考虑到飞跃器自身重量有限,采样钻进下压力小,飞跃器突破了深槽螺旋钻采样钻进技术,能够在低支反力条件下,实现对含水月壤高速且稳定的钻进,同时在回旋钻进遭遇卡滞的情况下,设计有冲击钻进的方式持续钻进并提高拔钻可靠性,避免飞跃器因采样钻具卡滞导致整器无法移动的风险。

5) 复杂光照条件的长距离自主感知技术

巡视器、飞跃器要在月面完成定时定点的追光移动,考虑月面光照条件变化随时间、地形变化较大,巡视器及飞跃器在追光移动时需要能够适应地形起伏及其所造成的阴影与光照交替环境,更是需要适应小型冷阱及大型阴影坑的低照度条件,为此完成了基于主动光源的双目视觉模块和激光三维模块技术攻关,结合全局+局部的感知架构,能够实现不同范围、不同光照条件下环境自主感知与地形重建,确保巡视器、飞跃器能够在月面复杂光照条件下规划出正确的追光移动路径。

同时由于到冷阱探测及阴影坑探测时探测器没有能源输入,工作时间有限,巡视器、飞跃器在确保路径规划正确的同时,将以往探月型号的小时级地面路径规划缩减至器上分钟级自主规划,大幅提高月面移动探测效率。

6) 水冰与挥发份保真采样技术

“嫦娥七号”是中国首个地外天体采样后进行原位

分析并期望探测到水冰的任务,探测器需要对整个采样、转移和分析过程的水冰探测精度进行控制,避免因采样过程中样品温度的升高等因素导致含水月壤样品内部水冰的损失。

在采样过程中,飞跃器利用温度传感器监视样品温度,同时优化钻取采样、放样、密封等流程,在样品转移环节增加监视敏感器,严格控制采样动作产生的能量和动作时间,避免样品因采样机具能量过大产热过高导致极速升温,同时避免样品因采样送样时间过长导致解除样品托而升温,引起水冰升华损失。

7) 月球探测多节点器间通信技术

“嫦娥七号”探测器着陆于月球南极,南极对地面的测控条件极为恶劣,每月对日可见时间有限且俯仰角低、易受地形遮挡,“嫦娥七号”采用中继星实现月面探测着陆器、巡视器、飞跃器的对地通信。为避免在特殊情况下,月面探测器的中继链路故障从而导致整器运转失效,探测器设计了器间链路,通过轨道器完成对月面探测器的中继转发。

此外,基于该月面通信链路,着陆器、巡视器在月面可以建立器间通信链路,能够互相完成信息传递以及科学探测数据的转发,为后续的月球科研站建设及多节点网络构建奠定了坚实的技术基础。

5 结束语

“嫦娥七号”探测器将是中国首颗登陆月球南极的探测器,可为中国后续月球科研站基本型建设和载人月球活动奠定坚实的基础。作为中国深空探测领域由探测型向科考型转变的关键型号,须“嫦娥七号”探测器突破以复杂地形高精度定点软着陆、月面飞跃、月面着陆采样行走等为代表的一系列先进技术,为任务的顺利实施奠定坚实的技术基础,实现航天技术新跨越,使中国具备全月面、长周期、复杂环境条件下月球的探测能力。同时,未来任务实施将使中国深空科学研究水平迈上一个新台阶,特别是取得以月球水冰赋存证据为代表的多项重大原创性科学发现,进一步深化对月球的科学认知,实现中国月球科学研究的新进展。

参 考 文 献

- [1] SPEYERER E J, ROBINSON M S. Persistently illuminated regions at the lunar poles: ideal sites for future exploration[J]. *Icarus*, 2013, 222(1): 122-136.
- [2] 焦维新. 月球南极探测的态势与科学目标[J]. *国际太空*, 2022(10): 4-11.
- [3] 王立武, 郭东文, 张章, 等. 美国宇航局Artemis月球探测计划简介[J].

航天返回与遥感, 2020, 41(5): 1-12.

- WANG L W, GUO D W, ZHANG Z, et al. Introduction to NASA's Artemis lunar exploration program[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2020, 41(5): 1-12.
- [4] 吴伟仁, 刘继忠, 唐玉华, 等. 中国探月工程[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2019, 6(5): 405-416.
- WU W R, LIU J Z, TANG Y H, et al. China lunar exploration program[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, 6(5): 405-416.
- [5] 冯华. 吴伟仁: 探月工程四期还将实施3次任务[J]. *国防科技工业*, 2022(3): 17.
- [6] 于登云, 吴学英, 吴伟仁. 中国探月工程技术发展综述[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2016, 3(4): 307-314.
- YU D Y, WU X Y, WU W R. Review of technology development for Chinese Lunar Exploration Program[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2016, 3(4): 307-314.
- [7] 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.
- WU W R, YU D Y. Development of deep space exploration and its future key technologies[J]. *Deep Space of Exploration*, 2014, 1(1): 5-17.
- [8] 吴伟仁. 月球与深空探测的关键技术[C]//中国深空探测第六届学术年会. 长沙: 中国深空探测第六届学术年会, 2008.
- [9] 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.
- PEI Z Y, LIU J Z, WANG Q, et al. Overview of lunar exploration and International lunar research station[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(24): 2577-2586.
- [10] 王超, 彭祺攀, 王慎泉, 等. 月面原位资源补给站概念方案设计[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2022, 9(6): 596-605.
- WANG C, PENG Q B, WANG S Q, et al. Conceptual design of lunar surface in-situ resource supply station[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2022, 9(6): 596-605.
- [11] 王超, 张晓静, 姚伟. 月球极区水冰资源原位开发利用研究进展[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2020, 7(3): 241-247.
- WANG C, ZHANG X J, YAO W. Research prospects of lunar polar water ice resource in-situ utilization[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(3): 241-247.
- [12] ANAND M, CRAWFORD L A, BALAT-PICHELIN M, et al. A brief review of chemical and mineralogical resources on the Moon and likely initial In Situ Resource Utilization(ISRU) applications[J]. *Planetary & Space Science*, 2012, 74(1): 42-48.
- [13] WATSON K, MURRAY B C, BROWN H. The behavior of volatiles on the lunar surface[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1961, 66(9): 3033-3045.
- [14] STACY N J S, CAMPBELL D B, FORD P G. Arecibo radar mapping of the lunar poles: a search for ice deposits[J]. *Science*, 1997, 276(5318): 1527-1530.
- [15] 郑永春, 王世杰, 刘春茹, 等. 月球水冰探测进展[J]. *地学前缘*, 2004, 11(2): 573-578.
- ZHENG Y C, WANG S J, LIU C R, et al. Review on exploration of water ice on the Moon[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(2): 573-578.
- [16] NOZETTE S, LICHTENBERG C L, SPUDIS P, et al. The Clementine bistatic radar experiment[J]. *Science*, 1996, 274(5292): 1495-1498.
- [17] SPUDIS P D, BUSSEY D B J, BUTLER B, et al. The Mini-SAR imaging radar on the Chandrayaan-1 mission to the Moon[C]//Proceedings

- of 40th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: [s. n.], 2009.
- [18] SPUDIS P D, BUSSEY D B J, BALOGA S M. Initial results for the north pole of the Moon from Mini-SAR, Chandrayaan-1 mission[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37: 1-6.
- [19] PIETERS C M, GOSWAMI J N, CLARK R N, et al. Character and spatial distribution of OH/H₂O on the surface of the Moon seen by M3 on Chandrayaan-1[J]. *Science*, 2009, 326(5952): 568-572.
- [20] THOMSON B J, BUSSEY D B J, NEISH C D, et al. An upper limit for ice in Shackleton crater as revealed by LRO Mini-RF orbital radar[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39: 1-4.
- [21] FELDMAN W C, MAURICE S, LAWRENCE D J, et al. Evidence for water ice near the lunar poles[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets (1991—2012)*, 2001, 106(E10): 23231-23251.
- [22] SCHULTZ P H, HERMALYN B, COLAPRETE A, et al. The LCROSS cratering experiment[J]. *Science*, 2010, 330(6003): 468-472.
- [23] LI S, LUCEY P G, MILLIKEN R E, et al. Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(36): 8907.
- [24] GLADSTONE G R, HURLEY D M, RETHERFORD K D, et al. LRO-LAMP observations of the LCROSS impact plume[J]. *Science*, 2010, 330: 472-476.
- [25] 程安云, 王世杰, 李雄耀, 等. 月球南北两极研究进展与发展趋势[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(4): 1070-1074.
CHENG A Y, WANG S A, LI X Y, et al. Researches on lunar poles: advances and trends[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(4): 1070-1074.
- [26] JIA Y, ZHANG Z, QIN L, et al. Research of lunar water-ice and exploration for China's future lunar water-ice exploration[J]. *Space: Science & Technology*, 2023, 3: 0026.
- [27] HAYNE O P, HENDRIX A, SEFTON-NASH E, et al. Evidence for exposed water ice in the Moon's south polar regions from Lunar Reconnaissance Orbiter ultraviolet albedo and temperature measurements[J]. *Icarus*, 2015, 255: 58-69.
- [28] 杜宇, 盛丽艳, 张焱, 等. 月球水冰赋存形态分析及原位探测展望[J]. *航天器环境工程*, 2019, 36(6): 607-614.
DU Y, SHENG Y L, ZHANG H, et al. Analysis of the occurrence mode of water ice on the moon and the prospect of in-situ lunar exploration[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2019, 36(6): 607-614.
- [29] LOSIAK A, WILHELMS D E, BYRNE C J, et al. A new lunar impact crater database[C]//Proceedings of 40th Annual Lunar and Planetary Science Conference. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2009.
- [30] DZABA A, MUCASEY E, ABRAHAM A, et al. State -feedback control of the Space Hawk Earth - based lunar hopper[C]//Proceedings of 2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems ICUAS). Atlanta: IEEE, 2013.
- [31] 张弘, 盛丽艳, 马继楠, 等. 月球极区着陆环境特性对比及探测建议[J]. *航天器环境工程*, 2019, 36(6): 615-621.
ZHANG H, SHENG Y L, MA J N, et al. Comparison of the landing environments in lunar poles and some suggestions for probing[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2019, 36(6): 615-621.
- [32] 饶炜, 方越, 彭松, 等. 月球南极探测着陆区选址方法[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2022, 9(6): 571-578.
RAO W, FANG Y, PENG S, et al. Landing site selection method of lunar south pole region[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2022, 9(6): 571-578.
- [33] DIEGO D R, BEN B, JOSHUA T, et al. Cahill characterization of potential landing sites for the European Space Agency's Lunar Lander project[J]. *Planetary and Space Science*, 2012, 74: 224-246.
- [34] 刘德赆, 王露斯, 孙启臣, 等. 月球极区冻土模拟月壤钻进试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(25): 256-261.
LIU D Y, WANG L S, SUN Q C, et al. Drilling experiment of simulated icy soil of lunar polar region[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(25): 256-261.
- [35] 刘君巍, 汪恩良, 田野, 等. 月壤水冰组构模拟及力学特性测试分析[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2022, 9(2): 134-140.
LIU J W, WANG E L, TIAN Y, et al. Fabric simulation and mechanical characteristics test and analysis of icy lunar regolith[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2022, 9(2): 134-140.

作者简介:

余后满(1967-), 男, 研究员, 主要研究方向: 航天器总体设计、系统工程与项目管理。

通信地址: 北京海淀区友谊路104号中国空间技术研究院(100094)

电话: (010)68115622

Mission Analysis and Spacecraft Design of Chang'E-7

YU Houman¹, RAO Wei², ZHANG Yiyuan², XING Zhuoyi²

(1. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;

2. Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: In recent years, international lunar exploration has mainly focused on the south pole of the Moon. Chang'E-7 (CE-7) mission, through the development of orbiter, lander, rover and hopper, will achieve a comprehensive exploration of the lunar south pole including surrounding, landing, moving, and leaping. The harsh lighting conditions, terrain conditions, and temperature conditions at the lunar south pole have brought many challenges to the design of the spacecraft. CE-7 spacecraft has broken through a series of barriers with advanced technologies including high-precision fixed-point soft landing on complex terrain, lunar surface leaping, lunar landing and walking, global perception and mission planning, and fidelity sampling of water ice and volatiles. It has laid a solid technical foundation for the smooth implementation of the mission and the subsequent aerospace cause in our country.

Keywords: CE-7; spacecraft; mission overview; lunar south pole

Highlights:

- The mission target of CE-7 spacecraft is introduced.
- The environmental analysis and its impact on CE-7 spacecraft design are introduced.
- The overall design of CE-7 spacecraft is introduced.
- The innovations and breakthroughs of CE-7 spacecraft design are introduced.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 宋利辉]