DOI：10.3724/zrht.1674-5825.2026013

月球南极高价值探测目标选取与就位探测引导方法综述

张济韬[1, 2]， 刘传凯[1, 2*]， 王晓雪[1, 2]， 张作宇[1, 2]， 张 楚[1, 2]， 朱常明[1]， 何锡明[1]
（1. 北京航天飞行控制中心，北京 100094；2. 航天飞行动力学技术重点实验室，北京 100094）

摘 要：月球南极因蕴藏水冰等战略资源及独特的深部地质构造，已成为当前深空探测与月球科研站建设的焦点区域。面向中国嫦娥七号、八号等后续极区探测任务对目标精准选取与就位引导的迫切需求，系统综述了月球南极高价值探测目标的引导方法体系。首先，剖析了极区极端环境对视觉感知系统的约束机制；然后，凝练了以水冰、深部物质等为代表的高价值目标分类特征，并提出了融合“可达性—安全性—科学性”的多维度量化筛选准则；最后，构建了涵盖极端环境感知适配、多源信息融合的目标识别定位，以及车–臂联合规划与引导的全链路技术体系，并展望了“天地协同”的智能演进范式。

关键词：月球南极；高价值目标；就位探测；车臂联合规划
中图分类号：V476.3 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-5825(2026)02-0281-11

Lunar South Pole High-value Target Selection and in Situ Exploration Guidance Method

ZHANG Jitao[1,2], LIU Chuankai[1,2*], WANG Xiaoxue[1,2], ZHANG Zuoyu[1,2], ZHANG Chu[1,2], ZHU Changming[1], HE Ximing[1]
(1. Beijing Aerospace Control Center Beijing, Beijing 100094, China;
2. Key Laboratory of Science and Technology on Aerospace Flight Dynamics, Beijing 100094, China)

Abstract: The lunar south pole has become a focal region of current deep space exploration and lunar research station construction due to its strategic resources, such as water ice and unique geological structures. To meet the urgent demands of China’s upcoming polar exploration missions (e.g. Chang’e-7 and Chang’e-8) for precise target selection and in situ guidance, this paper systematically reviews the guidance methodology system for high-value exploration targets at the lunar south pole. First, the constraints imposed by the extreme polar environment on visual perception systems are analyzed. Then, the classification characteristics of high-value targets represented by water ice and deep-seated materials are refined, and a multidimensional quantitative screening criterion integrating Accessibility-Safety-Scientific Value is proposed. Finally, a comprehensive technical system is constructed, which includes adaptation to extreme environmental perception, target recognition and positioning based on multisource information fusion, and rover-manipulator coordinated planning and guidance. The intelligent evolution paradigm of space-ground collaboration is also prospected.

Key words: lunar south pole; high-value target; in situ exploration; rover-manipulator coordinated planning

收稿日期：2026-02-10； 修回日期：2026-04-09
基金项目：航天飞行动力学技术重点实验室基金项目（KJW6142210240103）
第一作者：张济韬，男，学士，助理研究员，研究方向为空间遥操作技术。E-mail：zhangjt2020@126.com
* 通讯作者：刘传凯，男，博士，高级工程师，研究方向为空间遥操作技术。E-mail：ckliu2005@126.com
引用格式：张济韬，刘传凯，王晓雪，等. 月球南极高价值探测目标选取与就位探测引导方法综述[J]. 载人航天，2026，32（2）：281-291. Zhang J T，Liu C K，Wang X X，et al. Lunar south pole high-value target selection and in situ exploration guidance method[J]. Manned Spaceflight，2026，32（2）：281-291.

1 引言

月球探测已迈入以极区定向探索与资源勘采为核心的战略新阶段。以美国阿尔忒弥斯计划为代表的国际任务将月球南极的长期驻留与资源利用列为首要目标[1]。中国探月工程四期亦锚定月球南极，规划中的嫦娥七号、八号任务将构成国际月球科研站的基本型，旨在完成水冰勘查、就位探测与资源利用等关键技术验证[2]。月球南极不仅蕴藏着水冰等战略资源，其独特的南极–艾特肯盆地更是揭示月球深部结构与早期演化历史的关键窗口[3]。因此，建立一套能够在此极端环境下精准选取高价值目标并实现安全就位引导的技术方法体系，已成为衔接轨道普查与月面作业、决定探测任务成败的关键。

当前，月球南极探测面临地形崎岖、光照复杂、低温极端的严峻挑战，现有技术方法均存在局限性，尚未形成从发现到触达的完整闭环[4,5]。在大范围普查层面，环月轨道遥感（如月球勘测轨道飞行器，Lunar Reconnaissance Orbiter，LRO）空间分辨率有限，难以识别小型危险地形，且数据存在时延，无法满足就位探测的实时引导需求[6]。在近距离精细感知层面，单目视觉缺乏深度信息，在非结构化地形中可靠性不足；双目视觉虽能直接获取三维信息，但在极区低照度、高对比度及弱纹理环境下的特征匹配鲁棒性仍有待提升[7,8]。在目标价值判定层面，现有研究多聚焦于单一维度（如光谱反演水冰），缺乏将科学性、可达性与安全性相统一的多准则量化筛选体系。

面向月球科研站选址等应用，已有研究引入层次分析法（Analytic Hierarchy Process，AHP）、优劣解距离法（Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution，TOPSIS）等多属性决策方法进行量化评估[9-11]，这为构建月球探测目标选取的量化筛选准则提供了重要的方法论参考。但如何将其深度融入感知—规划—引导的全链路技术流程，实现从静态选址到动态就位作业的跨越，仍是亟待突破的难点。

鉴于此，本文旨在系统构建月球南极高价值探测目标选取与就位引导的方法体系，重点论述目标分类、多维度量化筛选准则，以及融合多源感知与多准则决策的跨尺度引导技术路径，以期为相关工程实践提供理论支撑。

2 月球南极极端环境约束与高价值探测目标分析

月球南极是当前国际深空探测的焦点区域，其独特的极端环境与潜在的丰富资源构成了深空探测的重大挑战与机遇[5,12]。本章系统分析月球南极面临的极端环境约束，并梳理该区域内最具科学与工程价值的高价值探测目标。

2.1 月球南极极端环境约束

月球南极的极端环境是制约月面探测任务实施的核心瓶颈，其低温、复杂光照、崎岖地形与通信遮蔽等特征相互耦合，对探测设备尤其是视觉传感器提出了严苛的技术适配要求。

温度方面，月球南极光照区表面温度维持在约 100~160 K， 而永久阴影区内部温度可低至 40 K 以下，属于典型的超低温环境[6]。此类极端低温工况会引发电子元件性能衰减、机械结构材料脆化，并因光学镜头材料热膨胀系数不匹配引发热形变与相机内参漂移等问题，造成成像畸变与离焦，直接削弱立体视觉系统的三维重建精度。

在光照条件层面，极区太阳高度角常年低于 10°。低角度入射光线易在月壤或岩块表面形成长距离投射阴影与强烈镜面反光，而永久阴影区则完全无自然光照，形成强光反光区—弱光过渡区—无光阴影区的复杂光照梯度[13]。这一特征对视觉传感器的动态曝光范围与高光抑制能力提出极高要求，易导致局部过曝或欠曝，引发特征点丢失与立体匹配失效[14]。

地形与通信约束同样显著。月球南极，尤其是南极—艾特肯盆地周边，是月球表面撞击坑最密集、地形最崎岖的区域之一，大型撞击坑侧壁坡度可达 30°以上[15]。这种复杂地形不仅会造成视觉传感器被视野遮挡，导致三维点云重建存在盲区，还会形成通信遮蔽区，可能中断地面指令传输。在通信中断场景下，探测器需具备高度的自主导航与决策能力，这对视觉系统的智能性与鲁棒性提出了进一步要求[16,17]。

2.2 高价值探测目标分析

基于月球极区探测的核心科学诉求与战略资源开发导向，高价值探测目标可划分为物质资源

类、深部地质类及特殊环境类三大类型。其中，物质资源类目标，特别是与水冰相关的环境，是当前探测任务的首要焦点。

2.2.1　永久阴影区与冷阱

永久阴影区（Permanently Shadowed Region，PSR）和冷阱是 2 个紧密关联的概念，共同描述了水冰等挥发分最可能富集的环境[12,18]。永久阴影区主要指地形遮挡导致常年无直接太阳光照的区域；而冷阱则强调其热力学属性，即温度低至足以长期（数十亿年）捕获并保存水、二氧化碳等挥发分的“热力学陷阱”[18]。例如，月球南极的舒梅克环形山坑底温度低于 100 K，是典型的冷阱环境[19]。

两者在空间上高度耦合。月球南极的永久阴影区主要集中在南纬 86°以上的大型撞击坑内，如沙克尔顿坑、卡比乌斯坑，这些区域因太阳高度角极低且受坑壁遮挡，常年无光照。研究表明，这些冷阱不仅能长期留存水冰，还可保存二氧化碳等挥发分物质，为研究太阳系早期物质交换提供了独特窗口[20-22]。在形貌上，这些区域多呈半封闭的碗状凹陷，撞击坑直径可达数公里至数十公里，坑壁坡度常达 30°~40°。该坡度范围普遍超出月面巡视器最大爬坡阈值，直接构成 3.1.1 节地形运动可达性评估中的核心约束项，需在路径规划阶段严格校验路径坡度是否满足巡视器几何与力学通过性要求。同时，坑底地形复杂，遍布次级撞击坑、裂隙和不规则岩块，为就位探测的路径规划与设备适配提出了严苛挑战。

2.2.2　水冰

水冰是月球南极探测的终极目标之一，其科学和工程价值巨大。在科学上，水冰的赋存直接关联月球干湿论之争、岩浆洋演化等重大科学命题。在工程应用上，水冰是未来月球科研站实现生命支持（水、氧气）和火箭燃料（氢、氧）原位制备的核心战略资源，能大幅减少从地球运送资源的成本和时间。

探测表明，水冰可能以多种形式存在，有与月壤颗粒混合的表层吸附冰以及分布于月表之下一定深度的埋藏冰。研究指出，月球两极地下 1~3 m 处的水冰可能比地表附近显著增多。尽管遥感数据（如月球勘测轨道飞行器、月船 1 号的数据）提供了水冰存在的间接证据，但就位探测对于确认其形态、丰度和分布至关重要。例如，计划于 2026 年发射的嫦娥七号任务，其飞跃器将携带水分子分析仪深入永久阴影区进行现场勘查[23-25]。

2.2.3　其他高价值特殊环境目标

除水冰富集区外，月球南极还存在 3 类具有重要科学与工程价值的特殊环境。永昼峰指地势高耸、可获近连续日照的山峰或高地，其年光照时间占比可达 70%~80%[26]，是建设月面太阳能电站、为未来月球基地提供持续能源的理想选址[27]。南极—艾特肯盆地是月球最古老、最深的撞击构造，直径约 2500 km，深度达 8~13 km[28]，其露出的深部物质是研究月球内部结构及早期演化历史的关键窗口，近期嫦娥六号任务已在该区域获取了揭示月幔物质特征的深部样品[29]。极区特殊等离子体环境是由月球缺乏全球磁场所致，太阳风及地球磁尾粒子可直接作用于月表，形成复杂的尘埃等离子体鞘层[30]。该环境对探测器表面充电、通信干扰及宇航员安全构成挑战，但也为研究太阳风—月表相互作用等空间物理过程提供了独特机遇[31]。就位探测这些环境，对保障任务安全、优化设备设计及深化月球科学认知均具有重要意义。

3　月球南极高价值探测目标的多维度筛选准则

第 2 章系统剖析了月球南极极端环境约束特征，并厘清了永久阴影区与冷阱、水冰资源、永昼峰、南极—艾特肯盆地深部物质等各类高价值探测目标的空间分布、赋存形态及科学工程价值。上述高价值目标呈现科学价值与工程风险高度耦合的典型特征：水冰富集的永久阴影区地形陡峭、光照缺失、通信易受遮蔽，永昼峰与深部物质出露点多分布于崎岖撞击坑周边，极端环境与目标赋存形态直接制约探测任务的可达性、安全性与探测效能。目标的固有特性是筛选准则构建的核心驱动因素，单一维度评估无法破解极区高价值目标伴生高工程风险的核心矛盾。为此，本文立足目标特性与极端环境双重约束，提出一种可达性—安全性—科学性三维度耦合筛选框架，如图 1 所示。该框架旨在从工程可行性与科学价值最大化双重角度，构建一个从目标初选到就位点优选的决策支持体系。其核心逻辑在于，可达性确保探测器能够抵达目标区域，这

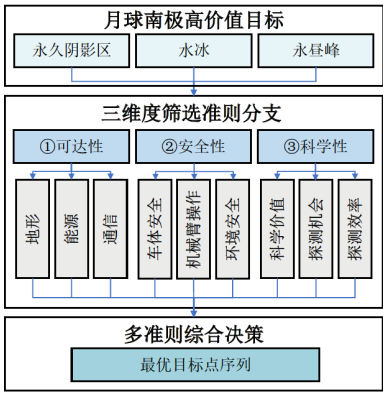

图 1 月球南极高价值目标“可达性—安全性—科学性”三维筛选框架

Fig. 1 Three-dimensional screening framework of “Accessibility–Safety–Scientific Value” for high-value targets at the lunar south pole

是任务执行的前提；安全性保障探测器在复杂环境下稳定作业，是任务成功的保障；科学性则锚定探测行动的核心价值，是任务规划的目标。三者相互约束，共同构成一个可抵达、可作业、有价值的闭环决策模型[32]。

3.1 可达性维度

可达性维度关注探测器（巡视器）从当前位置机动至目标区域的全局路径可行性，其核心是评估地形、能源、通信等约束下的空间连通性。

3.1.1 地形运动可达性

地形运动可达性是可达性评估的基础，主要评估从起点到终点是否存在一条满足巡视器运动学与动力学约束的无碰撞路径。其评价涉及 2 类关键参数：

1）几何通过性参数。包括路径最大坡度$\theta_{\max}$、平均坡度、障碍物最大高度 H_{obstacle}、路径曲率等。需满足$\theta_{\max}$小于巡视器额定最大爬坡角度，H_{obstacle}小于巡视器底盘离地间隙。

2）力学通过性参数。重点评估月壤的承压特性，以防止沉陷[33]。可采用基于贝肯—里夫斯（Bekker-Reece）模型的简化评估，关键参数为月壤的黏聚力c和内摩擦角ϕ。路径的通过性代价C_{traffic}可建模为坡度、粗糙度等因素的函数[34,35]，见式（1）。

$$C_{\text{traffic}}(s) = w_1 \cdot f(\theta(s)) + w_2 \cdot g(Roughness(s)) \tag{1}$$

式中，s为路径弧长，w_1、w_2为权重，$f(\cdot)$和$g(\cdot)$为将坡度与地形粗糙度映射为代价的函数；$f(\theta(s))$为随路径变化的地形坡度代价函数，简写为$f(\theta))$，$g(Roughness(s))$为随路径变化的地形粗糙度代价函数，简写为$g(R)$，二者具体形式如下：

a）坡度代价函数$f(\theta)$。采用非线性递增函数表征坡度对通行代价的影响，坡度越接近巡视器最大爬坡阈值，代价增长越快，具体形式见式（2）。

$$f(\theta) = \begin{cases} 0, & \theta \leqslant \theta_{\text{safe}} \\ \dfrac{\theta - \theta_{\text{safe}}}{\theta_{\max} - \theta_{\text{safe}}}, & \theta_{\text{safe}} < \theta < \theta_{\max} \\ 1, & \theta \geqslant \theta_{\max} \end{cases} \tag{2}$$

式中，θ为路径局部地形坡度；θ_{safe}为安全坡度阈值；$\theta_{\max}$为巡视器最大允许爬坡角度。

b）粗糙度代价函数$g(R)$。采用归一化线性函数将地形粗糙度映射为通行代价，粗糙度越大，月面颠簸与沉陷风险越高，代价越大，具体形式见式（3）。

$$g(R) = \frac{R - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} \tag{3}$$

式中，R为路径局部地形粗糙度（由三维点云高程均方差表征）；$R_{\min}$、$R_{\max}$分别为探测区域地形粗糙度的最小值与最大值，完成归一化处理。

3.1.2 能源可达性

在极低太阳高度角的月球南极，能源约束尤为突出[36]。能源可达性要求目标区域在任务时间窗口内，其光照条件能满足巡视器能源平衡的要求。有效光照时长T_{sun}（指任务窗口内可用于太阳阵发电的累计光照时间）需满足以下能量平衡约束，具体形式见式（4）。

$$T_{\text{sun}} \geqslant \frac{E_{\text{total}} - E_{\text{battery}}}{\eta \cdot P_{\text{solar}}} \tag{4}$$

式中，E_{total}为任务周期总能耗，E_{battery}为蓄电池初始能量，η为发电—充电系统效率，P_{solar}为单位面积太阳电池阵功率。探测器必须优先选择位于永久光照区或日照时间足够长的路径与目标点。

3.1.3 通信可达性

确保巡视器在机动路径及目标点与轨道中继卫星或着陆器保持视距通信链路无遮挡。可通过数字高程模型进行通视性分析，确保通信中断时

长和频率在可接受范围内[37]。

3.2　安全性维度

安全性维度聚焦于探测器在特定点位的局部状态安全与操作安全，核心是评估静态与动态稳定性及环境耐受性。

3.2.1　车体静态与动态安全

车体安全首要防范倾覆与沉陷风险。静态安全可通过稳定裕度（Stability Margin）评估，如力—角稳定裕度[38,39]。对于坡道上的巡视器，其不发生倾覆的条件可简化为式（5）。

$$\arctan\left(\frac{2h}{B}\right) > \alpha \tag{5}$$

式中，h 为重心高度，B 为轮距，α为地形横坡角。动态安全则需考虑运动中的载荷转移及滑移风险[40]。

此外，驻车点月壤的承压强度σ_{bearing}需满足式（6）。

$$\sigma_{\text{bearing}} \geqslant \frac{W}{A} \cdot SF \tag{6}$$

式中，W为车重，A为车轮接地面积，SF为安全系数。

3.2.2　机械臂操作安全

机械臂操作需避免与车体或环境发生碰撞，且关节负载不超过极限。操作空间的碰撞检测可基于臂杆与障碍物的三维包络模型[40]。关节负载安全需满足式（7）。

$$\tau_{i,\text{actual}} \leqslant \tau_{i,\text{rated}} \cdot k_{\text{safe}},\quad \forall i \in \text{joints} \tag{7}$$

式中，$\tau_{i,\text{actual}}$为关节i的实际负载，$\tau_{i,\text{rated}}$为其额定负载，k_{safe}为安全系数。

3.2.3　极端环境耐受安全

设备需适应极低温、高辐射及月尘环境。对电子设备，其工作温度$T_{\text{operational}}$必须满足式（8）。

$$T_{\text{min,operational}} < T_{\text{operational}} < T_{\text{max,operational}} \tag{8}$$

式中，$T_{\text{min,operational}}$和$T_{\text{max,operational}}$由组件级测试确定[41，42]。

3.3　科学性维度

科学性维度是目标筛选的价值锚点，旨在量化评估探测点的潜在科学产出。其核心是将抽象的科学目标转化为可观测、可测量的属性指标[43]。

3.3.1　科学价值的量化表征

科学价值V_{science}通常是一个多属性效用函数。对于资源勘探（如水冰），其价值与目标区水冰的证据强度和丰度估计正相关，可表示为式（9）。

$$V_{\text{ice}} = \omega_{\text{spectral}} \cdot S_{1.5\mu\text{m}} + \omega_{\text{spatial}} \cdot C_{\text{continuous}} \tag{9}$$

式中，$S_{1.5\mu\text{m}}$是 1.5 μm 波段水冰特征吸收深度（来自轨道光谱数据），$C_{\text{continuous}}$是疑似水冰分布的空间连续性指数，ω_{spectral}为权重。权重ω_{spectral}采用层次分析法（Analytic Hierarchy Process,AHP）确定，由月球科学、深空探测工程领域专家对各指标重要性进行两两比较打分，经一致性检验后得到基准权重；针对水冰勘查等专项探测任务，可结合轨道遥感实测数据，采用熵权法对基准权重进行客观修正，实现专家主观经验与任务客观数据相结合。

对于地质探测，价值V_{geology}可与目标点岩石的新鲜度、矿物多样性及关键科学问题关联度相关联。

3.3.2　探测机会唯一性

优先选择具有不可重复性或时效性的目标。例如，针对可能因探测活动而遭受污染的挥发性物质富集点，其首次就位探测的价值最高。可引入机会窗口因子O_{window}来调节科学价值。

3.3.3　探测效率优化

在满足科学目标的前提下，优先选择能够实现一测多得的点位。例如，一个同时露出多种岩性且位于地质接触带上的点位，其单位探测时间的科学回报率更高。

3.4　多准则量化评估与综合决策方法

为将上述三维度准则统一于一个决策框架内，需构建一个多目标综合评价模型。首先，对每个候选目标点i，分别计算其在各维度下的标准化评分$S_{i,\text{acc}}$、$S_{i,\text{saf}}$、$S_{i,\text{sci}}$，取值区间通常为[0,1]，值越高表示在该维度上越优。然后，通过加权求和或加权积模型计算综合得分Z_i，见式（10）或式（11）。

$$Z_i = \left(w_{acc}^{\alpha} \cdot S_{i,\text{acc}}^{\beta}\right) \cdot \left(w_{\text{saf}}^{\alpha} \cdot S_{i,\text{saf}}^{\beta}\right) \cdot \left(w_{\text{sci}}^{\alpha} \cdot S_{i,\text{sci}}^{\beta}\right) \tag{10}$$

$$Z_i = w_{\text{acc}} \cdot S_{i,\text{acc}} + w_{\text{saf}} \cdot S_{i,\text{saf}} + w_{\text{sci}} \cdot S_{i,\text{sci}} \tag{11}$$

式中，w_{acc}，w_{saf}，w_{sci}为反映任务偏好的权重，满足$w_{\text{acc}} + w_{\text{saf}} + w_{\text{sci}} = 1$。加权积模型对低分值更敏感，有助于筛选各维度均衡的方案；加权求和模型更直观。参数α、β用于调节权重和分值

的非线性影响。

最终，根据综合得分Z_i对所有候选点进行排序，并结合工程约束（如总任务时长）选取最优目标点序列。该量化模型为下一章基于双目视觉等感知数据的实时在线优选提供了理论基础和决策依据[32]。

4 基于双目相机的探测目标选取与就位引导方法

基于建立的多维度量化筛选准则，本章系统阐述月球南极就位探测引导的全链路技术体系。该体系以多源感知与融合为核心，旨在实现从目标发现到精确触达的闭环。尽管感知手段多样，双目立体视觉因其在提供高精度三维几何信息的同时，兼具系统相对轻量、功耗较低、能同步获取丰富的纹理与光谱信息等优势，成为当前及未来一段时间内月球车实现自主导航与精细操作的主流且关键的感知方案。因此，本章以双目视觉为主要技术载体，详述其环境适配优化、目标识别定位、协同规划引导等关键方法，并分析其局限性及与其他技术的互补关系。

4.1 面向极区极端环境的感知系统适配性优化

月球南极的极端环境对以双目视觉为代表的被动光学感知系统构成严峻挑战，需从硬件配置、采集策略到数据处理进行全链路优化。

4.1.1 硬件配置与采集策略优化

为应对低照度、高动态范围光照及极低温挑战，感知系统需进行多维度适配[44]。在硬件层面，需采用具有高动态范围（High Dynamic Range，HDR）和优异低照度信噪比（Signal-to-Noise Ratio，SNR）的成像传感器，并对镜头、光学窗口实施主动温控措施，以抑制由 40~100 K 极端温度变化导致的相机内参漂移和光学透镜形变[45]。在采集策略上，需开发自适应曝光与照明技术。在永久阴影区内，需集成并自主控制低功耗、抗辐射的主动照明光源，其波长可扩展至近红外波段，以辅助水冰光谱特征探测。曝光策略应根据场景亮度分区进行自适应调整。

4.1.2 鲁棒三维重建与数据增强

复杂光照和弱纹理环境易导致立体匹配失败。为提高三维点云的质量与完整性，需采用多层次算法增强。在预处理阶段，利用基于 Retinex 理论或深度学习的图像增强算法，改善阴影区与高光区的细节可见性，平衡全局对比度。在立体匹配阶段，融合传统半全局匹配（Semi-Global Matching，SGM）的效率和现代深度学习网络的强特征表征能力，例如，使用卷积神经网络（Convolutional Neural Network，CNN）提取对光照、阴影变化鲁棒的深度特征，再开展代价体构建与优化，能在弱纹理区域获取更稠密、更准确的视差图[46-49]。最终的三维点云精度δ_{point}是衡量适配性的关键指标，需通过地面标定与模拟月面环境实验进行验证，目标是在作业距离内（如 5 m）达到厘米级精度（$\delta_{\text{point}} \leqslant 2$ cm）。

4.2 基于多源信息融合的高价值目标识别与定位

单一视觉模态难以应对极区探测目标识别与精确定位的全部挑战，需与多源信息进行深度融合。

4.2.1 多特征融合的目标识别

高价值目标的准确识别需综合利用目标的几何、纹理与光谱属性。在方法框架上，首先利用 4.1 节生成的鲁棒三维点云，提取地形坡度、粗糙度、障碍物尺寸与分布等几何特征，用于初筛满足可达性与安全性基本约束的候选区域。随后，融合高分辨率影像的纹理特征与来自多光谱/高光谱相机的光谱特征。通过特征融合算法，实现对水冰富集区、特定岩性露头等科学目标的精准分类与勾勒，为科学性维度评估提供直接输入。

4.2.2 多层次融合的精确定位

目标的精确定位需统一全局与局部参考系，依据巡视器作业距离与操作需求，划分为全局定位与局部定位 2 个递进阶段，不同阶段采用差异化传感器融合策略，核心指标与应用场景如表 1 所示。

表 1 月球南极多层次定位方案对比

Table 1 Comparison of multistage positioning schemes for lunar south pole exploration

定位阶段	传感器融合策略	典型应用场景
全局	双目视觉+惯性测量单元+星敏感器/视觉激光雷达里程计	月面长距离机动全局路径跟踪
局部	相机多视角观测+光束法平差	机械臂精细探测目标精准操作

全局定位主要服务于巡视器长距离月面机动[50]，通过视觉惯性里程计[51]或视觉激光雷达里程计[7]，融合双目图像、惯性测量单元乃至星敏

感器数据，实现全局坐标系下的高频率、高鲁棒位姿估计，解决弱纹理环境下单纯视觉里程计易漂移的问题[7]，其位姿估计误差ϵ_{pose}需严格控制。

当巡视器接近探测目标并进入作业范围时，系统切换到局部精定位模式。利用机械臂末端相机从多视角观测目标，结合光束法平差技术，对目标三维坐标、末端相机位姿及车体位姿进行联合优化，在机械臂操作坐标系下实现亚厘米级相对定位精度[52]。

最后，全局定位与局部定位结果通过坐标变换完成参考系，并实施闭环校正，保证全流程定位的连续性与准确性。

4.3　融合多准则的车臂协同任务规划与引导

此环节是将前序感知、识别结果与筛选准则转化为具体动作指令的核心，强调车体与机械臂的一体化协同。

4.3.1　基于综合代价函数的协同任务规划

规划器的输入是 4.2 节识别出的候选目标点集及其多维度属性。规划的核心是构建并最小化一个综合代价函数C_{total}，该函数是第三章各准则量化评分的工程实现，见式（12）。

$$C_{\text{total}}(P,A)=\lambda_{\text{a}}C_{\text{a}}(P)+\lambda_{\text{s}}C_{\text{s}}(P,A)+\lambda_{\text{c}}C_{\text{c}}(P,A) \tag{12}$$

式中，P 表示车体路径，A 表示机械臂动作序列。C_{a}、C_{s}、C_{s} 分别为可达性代价、安全性代价、科学性代价；λ_{a}、λ_{s}、λ_{c} 为可调权重系数，用于表征任务优先级。

规划过程通常分层进行：全局规划基于粗粒度地图，为车体规划一条最小化 C_{a} 的初始路径；局部规划在车体抵达作业区域后，基于精细点云，联合优化车体最终停泊位姿与机械臂采样轨迹，以最小化$C_{\text{s}}+C_{\text{c}}$。这涉及对高维连续状态空间的搜索，常采用基于随机采样的算法与优化算法相结合的策略。

4.3.2　闭环引导与执行监控

规划出的轨迹由车臂联合控制系统执行。此过程需闭环引导，利用 4.2 节的定位结果实时监控执行状态，并与规划预期进行比对。一旦偏差超过阈值（如车体位姿偏差$\epsilon_{\text{pose}}>0.1$ m或机械臂末端偏差$\epsilon_{\text{tip}}>1$ cm），或感知系统发现新的障碍（如松动的岩块），则触发重规划。同时，监控系统实时评估安全性指标（如关节扭矩、车体倾角），确保操作全程处于安全阈值内。

4.4　技术对比与局限性分析

4.4.1　多感知技术路径对比

虽然双目视觉是当前月球极区就位探测的核心感知方案，但激光雷达、结构光、多光谱/高光谱成像等技术仍具备各自独特的优势[7,8]。激光雷达可直接获取高精度三维点云，对光照条件不敏感，在永久阴影区等黑暗环境与绝对测距精度方面优势突出[53]，但其质量与功耗显著高于双目视觉传感器，且无法获取纹理特征信息[54]。结构光在 1 m 以内的近场作业可实现亚毫米级测量精度，适用于机械臂末端精细操作，但有效作用距离短，难以满足巡视器全局感知需求[7]。多光谱/高光谱成像为水冰、矿物等科学目标识别提供了关键依据，但其测量结果需与高分辨率三维几何模型融合，才能完成目标精确定位[24,40]。

立足月球南极探测的系统级工程约束，探测器搭载载荷受到严格的质量、功耗、可靠性与集成度限制。双目视觉传感器具备质量轻、功耗低、技术成熟度高、可同步获取纹理与三维几何信息的核心优势，能够适配极区探测的载荷资源限制与极端环境工况，是兼顾感知性能与工程可行性的最优主选方案；激光雷达、结构光等技术虽在特定场景性能突出，但受限于质量功耗、作用范围或应用场景，仅适合作为辅助感知手段。因此，未来高端探测平台将采用多传感器深度融合架构，即以双目视觉为主感知单元，在黑暗区探测、绝对尺度标定等关键环节辅以激光雷达，同时融合多/高光谱数据完成科学目标判别，实现感知能力与工程约束的最优平衡。

4.4.2　双目视觉引导体系的局限性

基于双目视觉的引导体系仍面临固有挑战。首先，其性能严重依赖环境光照和纹理，在绝对黑暗或均质化表面可能失效，如厚粉尘覆盖区；其次，复杂算法对计算的实时性构成压力，如深度学习立体匹配、光束法平差优化；最后，整个引导链条较长，从感知、识别、规划到控制，任何环节的误差都会逐级传递并累积，需通过系统级的标定、融合与闭环设计来抑制。

综上所述，本章构建的以多源感知（尤以双目视觉为例）与多准则决策为核心的引导方法体

系，为应对月球南极复杂环境的就位探测提供了可行的技术路径。未来的发展将更侧重于多传感器的智能融合、轻量化高可靠算法以及更高自主性的闭环任务执行[55]。

5 技术挑战与未来展望

月球南极就位探测引导技术虽已取得重要进展，但在面对极端环境与复杂任务需求时，其工程化应用仍面临系统性挑战。本章将剖析当前方法体系的核心瓶颈，并在此基础上提出以“天地协同智能演进”为范式的未来发展方向。

5.1 技术挑战

当前技术体系在实际应用中主要受限于极端环境的物理约束、多源信息的融合壁垒以及系统自主决策能力的不足。

首先，极端环境对感知系统的稳定性构成严峻考验。月球南极的温度剧变可导致光学相机内参发生非线性漂移，使标定于地面的几何模型在轨失效，三维重建精度显著下降。同时，极低太阳高度角引发的长阴影与高对比度光照，大幅削弱了立体视觉特征匹配的鲁棒性，导致点云稀疏甚至匹配失败。此外，月尘在静电作用下附着于镜头，长期作业将造成图像质量不可逆的衰减。这些因素共同作用，使得感知系统在最具科学价值的永久阴影区边缘等关键区域性能急剧退化。

其次，多源异构数据的实时融合存在效率与精度壁垒。米级轨道遥感数据、厘米级就位视觉数据与光谱数据在尺度、精度和语义上存在巨大差异。进行跨尺度配准与信息融合时，计算复杂度高，且易引入配准误差。现有融合算法在应对海量、多模态数据时，难以满足任务规划的实时性要求，成为制约自主任务执行的瓶颈。

最后，系统的自主与协同决策能力尚未满足无人化探测的需求。现有方法多遵循感知—规划—执行的串行开环流程，在面对通信延迟或中断时，缺乏应对突发状况的在线重规划与自主决策能力。车体与机械臂的规划解耦，导致未能实现真正意义上的状态共享与动作协同优化，在复杂地形下的作业效率与安全性有待提升。

5.2 未来发展方向

为突破上述挑战，未来的技术发展必须从静态、预设的任务模式向动态、进化的智能自主系统范式转变。其核心是构建一个天地协同感知与学习闭环（图 2），探测器作为前端感知与执行单元在轨采集多模态数据；地面站作为后端大脑与训练中心利用海量数据进行深度模型训练与优化；更新后的智能模型上注至探测器，使其在后续任务中具备更强的环境理解、决策与执行能力。这一闭环驱动着整个系统性能的持续迭代与增强。

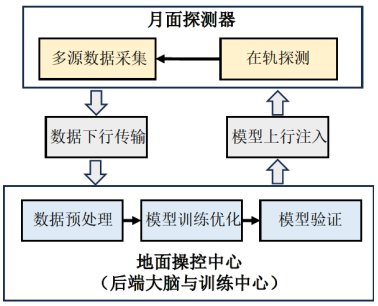

图 2 星地协同感知与学习闭环示意图

Fig. 2 Schematic of the space-ground collaborative perception and learning closed loop

在感知层面，发展方向是从多源融合迈向自适应环境认知。未来的感知系统将不再是数据的被动收集者，而是环境的主动理解者。这要求实现智能多传感器的深度融合，超越现有的数据级与特征级融合，向基于跨模态 Transformer 等架构的认知级融合演进。其目标是使系统能够理解如“阴影区的微弱光谱信号与特定地形隆起相关联”之类的高阶语义，从而实现对水冰富集区等科学目标的直接、鲁棒推断。同时，需积极推动前沿传感器的集成应用，例如，探索单光子激光雷达在永久阴影区的绝对测距能力，以及融合高光谱成像与偏振成像技术，以在月表缺乏纹理的区域直接获取物质的物理化学成分与微观结构信息。

在算法与计算层面，核心任务是从地面预装模型过渡到在轨持续进化。为支撑高实时性的自主决策，算法模型与星载硬件必须协同演进。一方面，需致力于轻量化模型与专用计算硬件的研发，设计面向太空辐射环境的神经处理单元，并部署经过深度压缩与硬件友好的轻量化模型，以实现在轨的实时语义分割、三维重建、同步定位与建图。另一方面，需在星地协同闭环中实现模型的持续学习与进化。探测器需具备增量学习能力，能够利用在轨新数据对模型进行安全微调，以快速适应未知地形。地面中心则利用更全面的

数据训练强大的教师模型，并通过知识蒸馏等技术，持续优化在轨的“学生模型”，驱动系统智能的动态升级。

在系统自主层面，最终目标是从程序驱动跃升为目标驱动的高级智能。这体现在任务层面的高级认知与决策能力上。首先，需构建分层自主智能架构，通常包含处理毫秒级紧急避障的反应层、基于世界模型进行秒级多步推理与规划的“慎思层”，以及管理车—臂—载荷等多智能体任务分配与协作的协同层。其次，需发展基于世界模型的元规划能力。通过构建并实时更新月面局部环境的数字孪生（世界模型），规划器不仅能生成路径，更能在此模型中进行推演，预测不同动作的长期后果。这使得在通信中断等极端工况下，系统能自主生成并评估替代方案，确保核心科学目标的达成。

总之，通过构建天地协同闭环框架，并系统性地推动感知、算法与系统自主 3 个层面的深度革新，未来的月球南极探测器将从根本上改变其角色——从一个高度依赖地面指令的复杂工具演进为具备环境认知、科学判断与自主决策能力的智能科考伙伴，最终实现高效率、高可靠性、高科学回报的无人化探索。

6　结论

本文系统分析了月球南极高价值探测目标选取与就位引导方法。面对该区域极端低温、复杂光照与崎岖地形等约束，本研究明确了以水冰资源、深部物质及特殊环境为代表的核心探测目标。通过建立“可达性—安全性—科学性”三位一体的量化筛选准则，构建了从工程可行到科学价值最大化的系统化评估框架。在此基础上，提出了以多源感知融合与多准则决策为核心的引导技术，详细阐述了从环境适配感知、目标识别定位到车臂规划的完整技术路径。

未来研究需在轨验证本文提出的准则与方法，并沿星地协同智能范式深化探索。重点发展认知级环境感知、在轨持续学习与分层自主决策等关键技术，最终推动探测器向具备完整“感知—认知—决策—行动”能力的智能科考伙伴演进，为月球资源的开发利用与前沿科学探索奠定基础。

参考文献（References）

[1] NASA. NASA’s Artemis IV: Building first Lunar Space Station [EB/OL].（2024-03-29） [2026-01-20].https://www.nasa.gov/general/nasas-artemis-iv-building-first-lunar-space-station/.

[2] 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，M0001，M0002.
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，M0001，M0002（in Chinese）.

[3] 吴伟仁，于登云，王赤，等. 月球极区探测的主要科学与技术问题研究[J]. 深空探测学报（中英文），2020，7（3）：223-231，240.
Wu W R，Yu D Y，Wang C，et al. Research on the main scientific and technological issues on lunar polar exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration，2020，7（3）：223-231，240（in Chinese）.

[4] 李茂登，张兴华，丁运来，等. 地外星表探测器着陆—巡视自主导航技术研究进展[J]. 深空探测学报（中英文），2025，12（2）：110-123.
Li M D，Zhang X H，Ding Y L，et al. Research progress on autonomous navigation technology for landing and roaming of extraterrestrial surface detectors[J]. Journal of Deep Space Exploration，2025，12（2）：110-123（in Chinese）.

[5] 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 J，Li X Y，et al. Researches on lunar poles: Advances and trends[J]. Progress in Geophysics，2007，22（4）：1070-1074（in Chinese）.

[6] Mahanti P，Thompson T J，Robinson M S，et al. View factor-based computation of secondary illumination within lunar permanently shadowed regions[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters，2022，19：8027004.

[7] 谢洪乐，陈卫东，范亚娴，等. 月面特征稀疏环境下的视觉惯性SLAM方法[J]. 航空学报，2021，42（1）：298-308.
Xie H （L /Y），Chen W D，Fan Y X，et al. Visual-inertial SLAM in featureless environments on lunar surface[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica，2021，42（1）：298-308（in Chinese）.

[8] 邸凯昌，王镓，邢琰，等. 深空探测车环境感知与导航定位技术进展与展望[J]. 测绘学报，2021，50（11）：1457-1468.
Di K C，Wang J，Xing Y，et al. Progresses and prospects of environment perception and navigation for deep space exploration rovers[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica，2021，50（11）：1457-1468（in Chinese）.

[9] Sánchez-Lozano J M，Peña-Asensio E，Bickel V T，et al. Prioritizing astronaut traverses on the Moon: A multi-criteria decision-making approach[J]. Acta Astronautica，2025，229：77-89.

[10] Chen X，Li S，Li J，et al. A comprehensive geological engineering site selection for lunar research station and base on a global scale[J]. Engineering Geology，2025，355：108225.

[11] Wang S，Li P，Wang X，et al. Where shall we live on the Moon? Multi-factor site selection and scenario-based planning for permanent lunar habitats[J]. Acta Astronautica，2026，238：804-824.

[12] 张杰，刘洋，薛长斌，等. 月球南极水冰科学问题与探测方法[J]. 空间科学与试验学报，2025，2（3）：1-10.
Zhang J，Liu Y，Xue C B，et al. Scientific questions and detection methods of water ice at the lunar south pole[J]. Journal of Space Science and Experiment，2025，2（3）：1-10（in Chinese）.

[13] 陈杨，魏广飞，张浩，等. 基于深度学习的月球南极连续光照区智能提取方法[J]. 深空探测学报（中英文），2025，12（6）：639-651.
Chen Y，Wei G F，Zhang H，et al. Intelligent identification of continuously illuminated regions at lunar south pole based on deep learning[J]. Journal of Deep Space Exploration，2025，12（6）：639-651（in Chinese）.

[14] 尤琼华，叶真，童小华，等. 基于可信度引导立体匹配的月球南极摄影测量地形重建方法[J]. 深空探测学报（中英文），2023，10（6）：586-597.
You Q H，Ye Z，Tong X H，et al. Terrain reconstruction for lunar south pole region based on confidence-guided stereo matching[J]. Journal of Deep Space Exploration，2023，10（6）：586-597（in Chinese）.

[15] Li M，Sun J，Yue X A，et al. Upper limit of ice content at the lunar south pole as revealed by the Earth-based SYISR–FAST bistatic radar system[J]. Science Bulletin，2025，70（10）：1691-1698.

[16] 张玉征，乔乐，陈剑，等. 月球南极阿蒙森（Amundsen）地区地质特征及演化历史研究[J]. 遥感学报，2025，29（2）：506-523.
Zhang Y Z，Qiao L，Chen J，et al. Geological characteristics and evolution history of the Amundsen Crater at the south polar region of the Moon[J]. National Remote Sensing Bulletin，2025，29（2）：506-523（in Chinese）.

[17] Zhao C，Gan H，Xie L，et al. Theoretical analysis of the electric potential and the electrostatic dust transport around the Shackleton crater in the Lunar south pole region[J]. Science China Earth Sciences，2023，66（10）：2278-2286.

[18] Li S，Robinson M S，Denevi B W，et al. Searching for surficial water ice in lunar permanently shaded regions（PSRs） with ShadowCam[J]. Science Advances，2026，12（12）：eaec8211.

[19] Schorghofer N. Current theories of lunar ice[EB/OL]. 2025：arXiv：2502.06056. https：//arxiv.org/abs/2502.06056.

[20] Wang T，Chen J，Liu C，et al. Identification of H_2O ice at lunar south polar region based on deep learning[J]. Icarus，2025，441：116682.

[21] Schorghofer N，Williams J P，Martinez-Camacho J，et al. Carbon dioxide cold traps on the moon[J]. Geophysical Research Letters，2021，48（20）：e2021GL095533.

[22] Magaña L O，Retherford K D，Byron B D，et al. LRO-LAMP lunar south pole cold traps：Assessment of H_2O and potential CO_2 and NH_3 reserves[J]. Journal of Geophysical Research：Planets，2023，128（8）：e2023JE007863.

[23] 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. Reseach prospects of lunar polar water ice resource in-situ utilization[J]. Journal of Deep Space Exploration，2020，7（3）：241-247（in Chinese）.

[24] 李想，王兴平，卢文振，等.月球极区水冰就位分析方案设计 [J]. 深空探测学报（中英文），2023，10（6）：618-630.
Li X，Wang X P，Lu W Z，et al. Design for in-situ water ice analysis in the lunar polar region[J]. Journal of Deep Space Exploration，2023，10（6）：618-630（in Chinese）.

[25] Li X，Cao N，Kan R，et al. Miniaturized tunable laser spectrometer for the simultaneous detection of water ice and hydrogen–oxygen isotopes for the Chang’e-7 lunar soil water molecule analyzer[J]. ACS Sensors，2025，10（6）：4679-4686.

[26] Mazarico E，Neumann G A，Smith D E，et al. Illumination conditions of the lunar polar regions using LOLA topography[J]. Icarus，2011，211（2）：1066-1081.

[27] Ross A K，Ruppert S，Gläser P，et al. Preliminary quantification of the available solar power near the lunar South Pole[J]. Acta Astronautica，2023，211：616-630.

[28] Borst A M，Bexkens F，Foing B H，et al. Geochemical analysis of units within the South Pole - Aitken basin[C]// European Planetary Science Congress 2008. Münster，Germany，2008：129.

[29] Su B，Chen Y，Chen H，et al. Crust-mantle architecture of the Moon’s South Pole-Aitken basin from Chang’e-6 samples[J]. Communications Earth & Environment，2026，7：28.

[30] 赵呈选，龙建飞，王鹞，等. 月球极区附近典型的月面等离子体环境及地形的遮挡效应分析[J]. 真空与低温，2023，29（6）：555-561.
Zhao C X，Long J F，Wang Y，et al. Analysis of typical plasma environment and terrain shielding effect near the lunar polar regions[J]. Vacuum and Cryogenics，2023，29（6）：555-561（in Chinese）.

[31] Halekas J S. The lunar photoelectron sheath and its implications for the lunar surface environment [J]. Geophysical Research Letters，2008，35 （15）：L15102.

[32] Peña-Asensio E，Neira-Acosta Á S，Sánchez-Lozano J M. Evaluating potential landing sites for the Artemis III mission using a multi-criteria decision making approach[J]. Acta Astronautica，2025，226：469-478.

[33] Ding L，Zhou R，Yuan Y，et al. A 2-year locomotive exploration and scientific investigation of the lunar farside by the Yutu-2 rover[J]. Science Robotics，2022，7（62）：eabj6660.

[34] Jayalekshmi S，Gireesh Kumar P. Studies on the sinkages of rigid plain wheels and lugged wheels on TRI-1 lunar soil simulant[J]. Journal of Terramechanics，2019，82：35-42.

[35] 周兰凤，杨丽娜，方华，等. 复杂地貌下基于地形坡度的滑移预测路径规划研究与实现[J]. 计算机应用与软件，2019，36（12）：282-284，328.
Zhou L F，Yang L N，Fang H，et al. Research and implementation of slip prediction path planning based on terrain slope in complex terrain[J]. Computer Applications and Software，2019，36（12）：282-284，328（in Chinese）.

[36] Gan H，Zhao C，Wei G，et al. Numerical simulation of the lunar polar environment：Implications for rover exploration challenge[J]. Aerospace，2023，10（7）：598.

[37] 熊亮，张磊. 月球南极中继通信轨道仿真分析[J]. 深空探测学报（中英文），2020，7（3）：264-270.
Xiong L，Zhang L. The simulation analysis of lunar Antarctic relay communication orbit[J]. Journal of Deep Space Exploration，2020，7（3）：264-270（in Chinese）.

[38] Papadopoulos E，Rey D A. The force-angle measure of tipover

stability margin for mobile manipulators[J]. Vehicle System Dynamics，2000，33（1）：29-48.

[39] 张朋，邓宗全，胡明，等. 基于地面力学的变质心月球探测车移动性能[J]. 吉林大学学报（工学版），2009，39（6）：1573-1578.
Zhang P，Deng Z Q，Hu M，et al. Mobility performance analysis of lunar rover with center of mass varied based on the theory of terramechanics[J]. Journal of Jilin University （Engineering and Technology Edition），2009，39（6）：1573-1578（in Chinese）.

[40] 刘茜，高宇辉，刘传凯，等. 月面采样机械臂动态任务规划方法研究 [J]. 中国科学：技术科学，2021，51 （12）：1492-1506.
Liu Q，Gao Y H，Liu C K，et al. Dynamic mission planning method for the lunar sampling robotic arm [J]. Science China Technological Sciences，2021，51（12）：1492-1506（in Chinese）.

[41] 向艳超，陈建新，张冰强. 嫦娥三号 “玉兔” 巡视器热控制[J]. 宇航学报，2015，36（10）：1203-1209.
Xiang Y C，Chen J X，Zhang B Q. Thermal control for jade rabbit rover of Chang’E-3[J]. Journal of Astronautics，2015，36（10）：1203-1209（in Chinese）.

[42] Mazur J E，Crain W R，Looper M D，et al. New measurements of total ionizing dose in the lunar environment[J]. Space Weather，2011，9（7）：S07003.

[43] Heiken G H，Vaniman D T，French B M. Lunar sourcebook：a user’s guide to the moon[M]. Cambridge：Cambridge University Press，1991：756.

[44] Dai A，Vila G C，Gao G. Visual SLAM with DEM anchoring for lunar surface navigation[EB/OL]. （2026）[2026]. https://arxiv.org/abs/2603.17229.

[45] Weide P D. Thermal vacuum testing of a modified COTS camera for lunar environments[C]//2024 Test，Facilities，and Aerospace Laboratories Workshop （TFAWS）. Cleveland，OH：NASA Glenn Research Center，2024：1-12.

[46] 童小华，黄荣，曹佳瑞，等. 月球与近地行星三维形貌重建的智能方法综述：研究进展与未来挑战[J]. 测绘学报，2025，54（11）：1917-1933.
Tong X H，Huang R，Cao J R，et al. Intelligent methods for 3D terrain reconstruction of the Moon and near-Earth planets：A review of current advances and future perspectives[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica，2025，54（11）：1917-1933（in Chinese）.

[47] Seki A，Pollefeys M. SGM-Nets：Semi-Global Matching with Neural Networks[C]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition （CVPR）. Honolulu，HI：IEEE，2017：6640-6649.

[48] 季顺平，罗冲，刘瑾. 基于深度学习的立体影像密集匹配方法综述[J]. 武汉大学学报（信息科学版），2021，46（2）：193-202.
Ji S P，Luo C，Liu J. A review of dense stereo image matching methods based on deep learning[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University，2021，46（2）：193-202（in Chinese）.

[49] 孟偲，李依真，李俊博，等. 基于三维渲染的月面立体匹配自监督学习方法[J/OL]. 航空学报，2026，47(3):633278.
Meng C，Li Y Z，Li J B，et al. Self-supervised learning method for lunar surface stereo matching based on 3D rendering [J/OL]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica，2026，47(3):633278（in Chinese）.

[50] 许雄，岑文广，曹子龙，等. 面向载人探月的宽基线相机视觉定位方法研究与地面试验场验证[J]. 载人航天，2024，30（5）：652-658.
Xu X，Cen W G，Cao Z L，et al. Research and ground validation on visual localization methods with wide baseline stereo cameras for manned lunar exploration[J]. Manned Spaceflight，2024，30（5）：652-658（in Chinese）.

[51] 吴伟仁，王大轶，邢琰，等. 月球车巡视探测的双目视觉里程算法与实验研究[J]. 中国科学（信息科学），2011，41（12）：1415-1422.
Wu W R，Wang D Y，Xing Y，et al. Binocular visual odometry algorithm and experimentation research for the lunar rover[J]. Science in China （Information Sciences），2011，41（12）：1415-1422（in Chinese）.

[52] 刘传凯，王艺，张济韬，等. 月面采样任务中的多视角联合视觉定位方法[J]. 宇航学报，2025，46（4）：796-807.
Liu C K，Wang Y，Zhang J T，et al. Multi-view joint visual localization method for lunar sampling missions[J]. Journal of Astronautics，2025，46（4）：796-807（in Chinese）.

[53] Parkinson A E，Cloutis E A，Applin D M，et al. Detecting and characterizing the abundance and form of water-ice in permanently-shadowed regions of the Moon using a three-band lidar system[J]. Icarus，2023，400：115540.

[54] Shaukat A，Blacker P C，Spiteri C，et al. Towards camera-LIDAR fusion-based terrain modelling for planetary surfaces：Review and analysis[J]. Sensors，2016，16（11）：1952.

[55] 郭华东. 地球系统空间观测：从科学卫星到月基平台[J]. 遥感学报，2016，20（5）：716-723.
Guo H D. Earth system observation from space：From scientific satellite to Moon-based platform[J]. Journal of Remote Sensing，2016，20（5）：716-723（in Chinese）.

（责任编辑：孙京霞）