# 月球南极就位探测的定时定点任务设计

彭 松[1]，孙静波[1,2]，张天翼[1]，饶 炜[1]，方 越[1]，张益源[1]，陈诗雨[1]

（1. 北京空间飞行器总体设计部，北京 100094；2. 同济大学 测绘与地理信息学院，上海 200092）

**摘 要**：针对月球南极复杂地形和剧烈时变光照条件下，就位探测任务难以同时满足安全着陆、连续光照环境与导航遥感成像需求的问题，提出一种面向月球南极就位探测的定时定点任务设计方法，该方法基于高分辨率数字高程模型（Digital Elevation Model，DEM）和星历数据进行了地形坡度提取与动态光照建模，并结合探测器各项工程约束，对月面着陆、月面移动探测、下降前的环月遥感3个阶段开展定时定点任务设计。以月球南极一个潜在着陆区为例，获得了满足连续光照约束的着陆区与着陆时刻、满足追光需求的移动路径以及与着陆时刻相匹配的遥感成像时段。结果表明，所提方法能够为月球南极就位探测任务提供可实施的全流程任务规划支撑，也可为中国后续月球南极探测的任务设计提供参考。

**关键词**：月球南极；定时定点；就位探测；路径规划

**中图分类号**：P184.5 **文献标识码**：A **文章编号**：2096-9287(2026)04-0346-09

**DOI**:10.3724/j.issn.2096-9287.2026.20260023

**引用格式**：彭松，孙静波，张天翼，等. 月球南极就位探测的定时定点任务设计[J]. 深空探测学报（中英文），2026，13（4）：346-354.

**Reference format:** Peng S，Sun J B，Zhang T Y，et al. Mission design for in-situ exploration of lunar south pole with spatiotemporal constraints[J]. Journal of Deep Space Exploration，2026，13（4）：346-354.

## 引 言

中国在完成探月“绕”“落”“回”三步走之后，月球探测目标逐渐从发展月球探测能力转向月球科学深化研究与原位资源综合开发利用[1]。多源遥感探测结果表明，月球南极永久阴影区内可能存在丰富的水冰资源，是各国探月任务的重点区域[2-5]。因此，对南极区域开展就位探测是开展水冰证认，回答水冰赋存含量与赋存状态等重大科学问题的关键环节。以往月球就位探测任务多集中于中低纬度地区，这些区域的光照呈现相对规律的昼夜周期，可为探测器提供持续长时间且相对稳定的工作窗口。然而，月球南极地形环境复杂，太阳高度角低且光照情况变化剧烈，形成连续数10天的无光照区域甚至永久阴影区[5-6]，给探测器安全着陆与月面长期工作带来了严峻的挑战。因此，针对月球南极水冰探测，需结合不同任务阶段的工程约束，着重考虑动态光照时空耦合效应，实现就位探测的定时定点任务设计。

月球就位探测是一个系统性工程，包含着陆选址、移动路径规划以及在轨定位等多个阶段，开展任务设计必须综合考虑安全着陆、长期月面移动、科学探测等多重需求。现有研究主要集中于单一阶段的任务规划，例如，面向着陆区选址，Feng等[7]综合地形、光照、通信、水冰距离等工程与科学指标，在月球南极区域遴选了22组潜在着陆区，但其研究仅聚焦于着陆阶段的选址优化，未考虑后续月面移动探测的光照连续性需求。面向月面移动探测，现有研究的规划区域较多聚焦于中低纬地区，对月球南极的剧烈光照变化如何约束移动路径规划的研究仍相对较少。考虑到就位探测器的绝对定位需求，光照条件不仅影响移动路径规划，还影响轨道器成像时段的设计，因此需要进行综合考量。中国未来也将开展多器协同的月球南极原位探测任务（如“嫦娥七号”任务）[8]，但当前对就位探测中全流程的任务设计仍缺乏深入研究和报道，难以满足月球南极复杂环境下的总体设计需求。

围绕月球就位探测的着陆选址与移动规划，现有研究常将地形、光照等因素视为孤立的静态指标，基于数字高程模型（Digital Elevation Model，DEM）和平均光照对月表环境进行建模。例如，刘丹等[9]利用DEM开展月球南极地形坡度分析，并通过叠加年平均光照率图层得到符合约束的8个潜在着陆区。然而，当前研究仅考虑一段时间内的平均光照，未纳入着陆后光照持续时间约束，无法满足探测器的月面工作需求。面向探测器移动设计，传统A*算法、快速扩展随机树（Rapidly-Exploring Random Tree，RRT）算法、深度强化学习等路径规划方法在月球探测任务中得到

收稿日期：2025-12-31 修回日期：2026-07-30

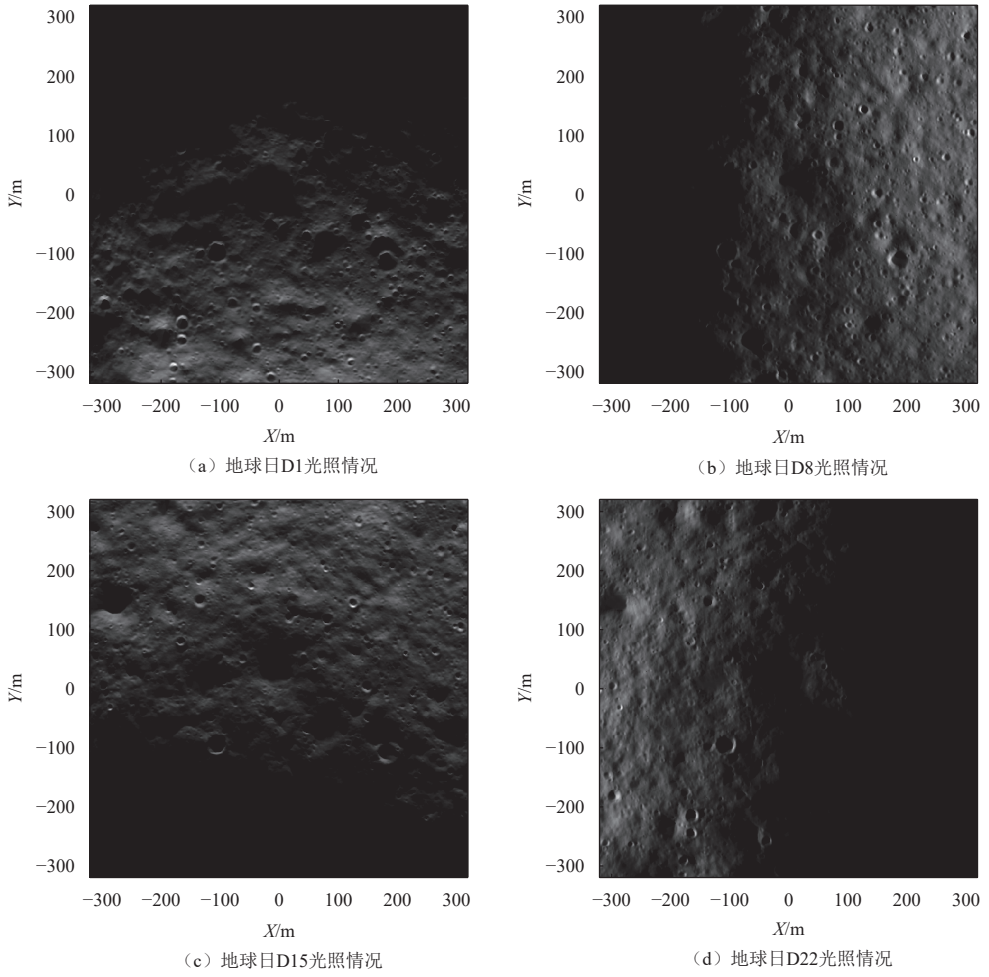
基金项目：国家自然科学基金（42530111）

了广泛应用[10-12]，但这些方法主要基于静态环境假设，难以适应月球南极光照的复杂时空变化。因此，考虑到月球南极部分区域存在阴影与光照的交替变化，通过引入动态光照约束使探测器的持续工作成为可能[13-14]。NASA提出一种动态光照约束的月球南极路径计算方法，通过构建路径光照矩阵（Path Illumination Matrix，PIM）验证了南极多站点间全程/近全程光照巡视路径的可行性[15]，为探测器的移动规划提供了解决方案。然而当前动态光照路径规划，未对阴影距离、光照持续裕度等关键指标做出约束，在就位探测任务设计中仍存在局限性。由此可见，面向南极复杂的地形和光照环境，亟需开展多时空约束下的就位探测任务设计，通过规划移动路线使探测器不断向光照区域移动，保证其尽可能在特定的时间窗口内到达特定的光照区域开展作业[16]，从而实现动态光照下就位探测任务的安全顺利实施[15,17]。

综上所述，已有就位探测任务设计研究存在以下不足：一是多聚焦于着陆选址、移动规划等单一阶段研究，缺乏覆盖就位探测各阶段的任务设计研究；二是时空约束不足以满足南极就位探测需求，如缺乏光照持续时间、遥感成像窗口等约束指标。本文综合考虑月球南极的地形和光照特点，首先通过光照仿真结果分析月球南极环境特点与影响因素。在此基础上，顾及不同时间的光照变化情况，以月球南极的一个潜在着陆区为例，对探测实施过程中下降前的环月遥感、月面着陆以及月面移动探测3个阶段进行定时定点任务设计；最后给出就位探测的定时定点任务设计结果。

## 1　月球南极光照特点及影响分析

在月球中低纬度区域，通常有连续14个地球日的白昼和连续14个地球日的黑夜。但在月球极区，撞击坑作为最显著且广泛分布的地质结构，深刻影响了南极任务安全与光照环境特点。太阳高度角低，叠加起伏地形的影响，地形遮挡产生大量阴影，光照条件随时间会发生剧烈的变化[18]，这是和以往月球探测任务最显著的区别。图1给出了南纬89°附近某区域每隔7个




（a）地球日D1光照情况　（b）地球日D8光照情况

（c）地球日D15光照情况　（d）地球日D22光照情况

图 1　不同地球日的光照情况

Fig. 1　Illumination conditions on different earth days

地球日的光照变化情况，可以看出区域内各时间均被大范围阴影覆盖。月球南极太阳高度角和方位角变化情况如表1所示，最大太阳高度角不超过2.5°，太阳方位角每隔7个地球日变化约90°，受二者共同影响，区域内光照区的空间分布发生明显变化。上述光照环境的复杂性和时变性，对探测器的安全着陆、能源保障以及后续持续追光移动提出了前所未有的挑战。

**表 1　月球南极太阳高度角和方位角变化情况**

**Table 1　Variations in solar altitude and azimuth angles at lunar south pole**

| 地球日 | 太阳高度角/（°） | 太阳方位角/（°） |
|---|---|---|
| D1 | 2.21 | 55.81 |
| D8 | 2.48 | 321.08 |
| D15 | 0.81 | 233.09 |
| D22 | 0.48 | 145.15 |

探测器主要使用太阳翼发电，光照情况影响探测器的能源和探测器的热控。因此，连续的光照是至关重要的，月球南极在不同时刻、不同地点的光照变化较频繁，探测器要对此进行适应性设计，在指定时刻、指定地点选择合适的探测区域，以保证探测器有连续的光照条件。针对这一需求，月球南极少数平坦高地区域由于不受到周边地形的遮挡，且存在足够大的平坦区域，可供探测器开展长时间连续探测，其为就位探测任务的理想着陆和长期探测区域。

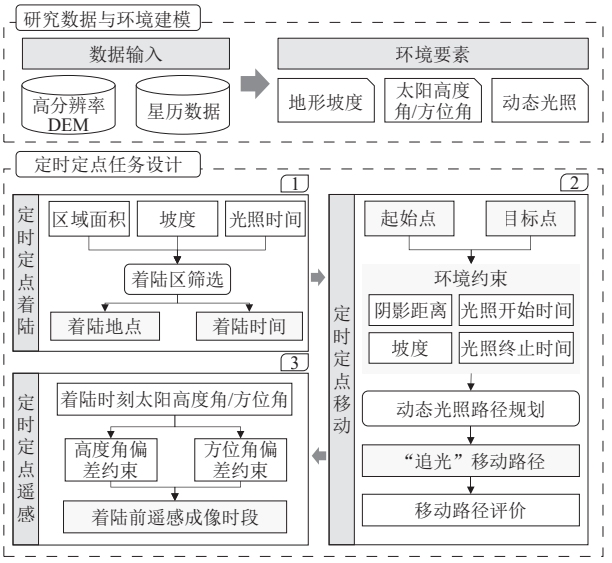
## 2　研究数据和方法

### 2.1　研究数据

本文坡度计算采用月球南极高分辨率DEM产品，数据融合了月球轨道飞行器激光测高仪（Lunar Orbiter Laser Altimeter，LOLA）激光测高数据与月球勘测轨道器相机（Lunar Reconnaissance Orbiter Camera，LROC）窄角相机数据，采用Shape from Shading方法得到[19]，分辨率约为1 m；光照计算采用该DEM与美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration）NASA喷气推进实验室（Jet Propulsion Laboratory，JPL）发布的月球星历数据。本文采用的星历数据来源JPL提供的高精度月球星历DE430[20]，可用于描述太阳、地球、月球等天体的空间位置关系，数据可在JPL官方网站获取（https：//ssd.jpl.nasa.gov/horizons/）。

### 2.2　研究方法

针对月球南极就位探测问题，综合考虑探测器的实际工程需求，构建了覆盖全流程的定时定点任务设计方案（见图2），主要包括3个部分：利用DEM数据提取地形坡度，并基于动态光照模型模拟着陆区持续光照情况，实现定时定点着陆设计；考虑地形和动态光照情况进行定时定点移动设计；为提前对就位探测区域进行感知，确认地形和光照情况，利用星历数据获取与着陆时刻具有相同光照情况的成像时段，实现定时定点遥感设计。




注：任务设计顺序: 着陆—移动—遥感；任务实施顺序: 遥感—着陆—移动

图 2　研究技术路线图

Fig. 2　Technical roadmap of study

#### 2.2.1　太阳位置计算方法

为实现动态光照建模与定时定点遥感设计，需根据星历数据计算着陆区太阳高度角和方位角。本文参考张等[21]的计算方法，首先调用DE430历表计算某历元下太阳和月球的太阳系质心空间位置坐标，再将计算得到的坐标信息统一至J2000.0月心天球坐标系，最后根据月面点与太阳位置的几何关系计算出光照模型中所需的太阳高度角和太阳入射方位角。此外，通过比较不同月份期间太阳高度角和方位角的变化关系来选取适宜的遥感成像时段。

#### 2.2.2　动态光照建模方法

为得到特定时间的月球南极光照分布情况，本文采用最大高度角法进行极区动态光照建模[18]。该方法结合DEM高程数据与星历数据，开展极区光照条件仿真。首先计算区域内各像素的地平线高程建立高程数据库，基于星历数据的月球方位模型计算太阳方位角、高度角和视半径，将地平线高程与太阳高度角对比判断着陆区是否受到光照。需要说明的是，在实际任务中考虑到探测器太阳翼安装高度$h_{\mathrm{array}}$，建立地平线高程数据库应当对目标点高程进行相应调整。

#### 2.2.3　着陆区筛选方法

着陆区筛选需同时满足着陆区大小、坡度与光照

持续时间约束。首先，着陆区应足够大，保证探测器能落入该区域，设区域半径阈值与探测器着陆误差$\Delta_{\text{land}}$；其次，着陆区内坡度条件应足够平缓（小于阈值$M_{\text{slope}}$），以保证探测器可通过避障安全着陆于月面；最后，着陆时刻，着陆区任一位置均有光，并且光照要持续到月面初始化结束（时间阈值$T_{\text{last}}$）。因此，着陆区筛选的关键约束可表示为

$$\begin{cases} D_{\text{land}} \geqslant 2\times\Delta_{\text{land}} \\ \alpha_{\text{slope}} < M_{\text{slope}} \\ T_{\text{illum}} \geqslant T_{\text{last}} \end{cases} \tag{1}$$

其中：$D_{\text{land}}$为着陆区边长；$\alpha_{\text{slope}}$为着陆区坡度，由DEM计算得到；$T_{\text{illum}}$为着陆区连续光照时长。

本文采用3阶反距离平方权方法计算坡度[22]，具体公式为

$$\begin{cases} \alpha_{\text{slope}} = \arctan\sqrt{f_x^2+f_y^2} \\ f_x = \dfrac{z_{i+1,j+1}-z_{i+1,j-1}+2\left(z_{i,j+1}-z_{i,j-1}\right)+z_{i-1,j+1}-z_{i-1,j-1}}{8\times Res} \\ f_y = \dfrac{z_{i+1,j-1}-z_{i-1,j-1}+2\left(z_{i+1,j+1}-z_{i-1,j}\right)+z_{i+1,j+1}-z_{i-1,j+1}}{8\times Res} \end{cases} \tag{2}$$

其中：$z_{i,j}$为当前像素点高程值，$z_{i\pm1,j\pm1}$为周围像素点的高程值；$Res$为DEM数据的分辨率。

2.2.4　动态光照约束的路径规划方法

为保证月球南极探测器的能源需求，实现“追光”移动，需要将光照视为随时间$T$变化的环境要素，对于某一时刻$T_k$，通过叠加坡度图与光照图可以得到综合可通行性图$I_k$。基于上述时变可通行性图层规划行进路线，一方面要结合整器移动能力考虑地形可通过性，主要包括地形坡度、障碍高度等；另一方面要考虑路线的光照情况确保能源安全，每个路径点在到达时刻$T_k$要有光，且光照要持续一定时间，为在轨异常处置提供时间余量。

移动路径点的光照说明如图3所示，起点在位置A，到达时刻$T_1$；第一个动作从位置A移动至位置B，到达时刻$T_2$，标称设计和$T_1$间隔$\Delta T$，要求位置B至少有连续3$\Delta T$光照（$-\Delta T$～$+2\Delta T$）：要求$-\Delta T$有光照是考虑到若A向B提前移动仍然是在光照区，要求2$\Delta T$有光照是考虑到若发生故障，可以有时间用于排故而不必担心阴影造成的能源问题。

因此，该问题本质是寻找一系列导航点：$W=\{w_0,w_1,w_2,\cdots,w_n\}$，使其尽可能满足各项工程安全条件。在路径表达方面，不考虑起始点和终点，路径的中间导航点可编码为

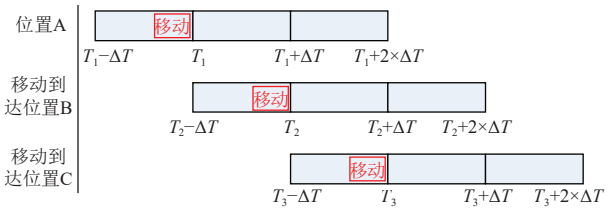



图 3　移动路径点光照说明

Fig. 3　Illumination at locations on moving path

$$X=(x_1,y_1,x_2,y_2,\cdots,x_{n-1},y_{n-1}) \tag{3}$$

采用粒子群优化算法[23]对中间导航点坐标进行迭代搜索，该优化问题的综合适应度函数可表示为

$$F(X)=J(X)+\sum\lambda_j p_j(X) \tag{4}$$

其中：$J(X)$为路径长度项；$p_j(X)$为各约束的适应度项，$\lambda_j$为权重。各约束项采用相同的归一化惩罚形式[24]，可表示为

$$p_j(X)=\sum_{k=1}^{n}[\max(0,g_{j,k}(X))]^2 \tag{5}$$

其中：$g_{j,k}(X)$为第$k$个导航点对第$j$类约束的惩罚项，包括导航点坡度、到阴影的距离、光照持续时间、相邻导航点的距离。需要说明的是，在计算各约束的适应度项时，必须随导航点动态更新其可通行图$I_k$。根据综合适应度结果更新粒子速度和位置，即

$$\begin{cases} V_i^{n+1}=\omega V_i^n+c_1r_1(P_i-X_i^n)+c_2r_2(P_g-X_i^n) \\ X_i^{n+1}=X_i^n+V_i^{n+1} \end{cases} \tag{6}$$

其中：$X_i^n$和$V_i^n$分别为第$n$次迭代时第$i$个粒子的位置和速度；$P_i$和$P_g$分别为粒子的个体最优解和全局最优解；$\omega$为惯性权重；$c_1$、$c_2$为学习因子；$r_1$、$r_2$为0~1之间的随机数。

定时定点路径规划方法的伪代码如表2所示，$M$、$N_{\text{iter}}$分别为粒子群规模和迭代次数，迭代结束后，取满足约束且适应度最小的路径作为定时定点移动设计结果。

**表 2　定时定点路径规划方法**

**Table 2　Time-scheduled and location-constrained path planning method**

| 定时定点路径规划算法 |
|---|
| **输入：**$M$，$N_{\text{iter}}$，$\omega$，$c_1$，$c_2$ |
| **输出：**最优移动路径 |
| 1 初始化粒子群； |
| 2 设置$P_i^1=X_i^1$，$P_g=\min(P_i^1)$ |
| 3 $n=1$ |
| 4 **while** $n\leqslant N_{\text{iter}}$ **do** |
| 5 **for** $i=1$ **to** $M$ **do** |

续表 2

定时定点路径规划算法

6 根据式（6）更新$X_i^{n+1}$和$V_i^{n+1}$；

7 获取$X_i^{n+1}$导航点坡度和时变光照；

8 根据式（4）计算$F(X_i^{n+1})$；

9 更新$P_i^{n+1}=\begin{cases}P_i^n, & F(P_i^n)<F(X_i^{n+1})\\ X_i^{n+1}, & F(P_i^n)\geqslant F(X_i^{n+1})\end{cases}$；

10 更新$P_g^{n+1}$

11 **end for**

12 $n=n+1$；

13 **end while**

## 3 任务设计结果分析

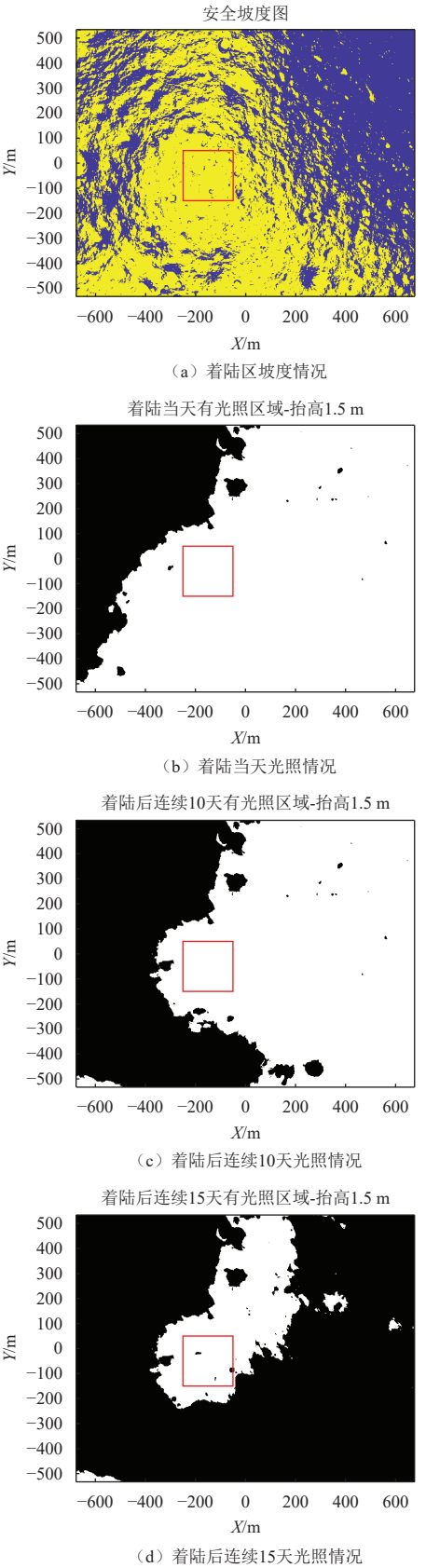
基于上述工程约束和任务设计方法，以未来探测月球南极的一个潜在着陆区为例开展数值验证。与“遥感成像–着陆–移动”的任务实施顺序不同，从任务设计角度来看，需要先进行定时定点着陆设计，确定着陆区和着陆时刻；然后进行定时定点移动设计，即在着陆区周边追光移动；最后进行定时定点遥感设计，即针对预先选择的目标探测区域和目标时段，设计合理的轨道和成像时刻，能够提前在相近光照条件下对指定区域进行感知。

### 3.1 定时定点着陆设计

探测器着陆首先要考虑地形安全，着陆区要存在平坦区域可供安全着陆。事先选择着陆区时，受限于已有地形数据的分辨率（约1 m），可以评估着陆区的坡度，但对于分米量级的石块、坑等障碍无法有效识别，该类障碍会影响腿足的落月安全，主要靠探测器在轨自主规避[25]。

着陆后开展月面初始化设置，主要包括移动探测器的释放分离、着陆器休眠唤醒等操作，该期间需要确保能源安全，探测器要一直处于光照区。极区光照条件变化剧烈，存在较长连续光照的区域较少，所以要进行挑选。

着陆区越小，坡度和光照约束越容易满足，但对探测器的着陆精度要求越高，需要迭代设计确定。以$\Delta_{\text{land}}$取100 m、$M_{\text{slope}}$取8°、$T_{\text{last}}$取10个地球日、$h_{\text{array}}$取1.5 m为例，选择的着陆区、着陆时刻如图4所示。着陆区90%以上面积的坡度小于8°，为探测器自主避障提供了良好的前提条件；着陆区附近存在大面积连续的平坦区域，使得后续的长距离定时定点移动成为可能。在着陆后的15天内，着陆区附近的光照范围逐渐缩小，但由于着陆区位于局部高地，区域内着陆时刻太阳翼高度处有光照，且光照持续10天以上，满足需求。




（a）着陆区坡度情况

（b）着陆当天光照情况

（c）着陆后连续10天光照情况

（d）着陆后连续15天光照情况

注：方框为着陆区，黄色区域坡度不大于8°，蓝色区域坡度大于8°，白色区域为光照区，黑色区域为阴影区。

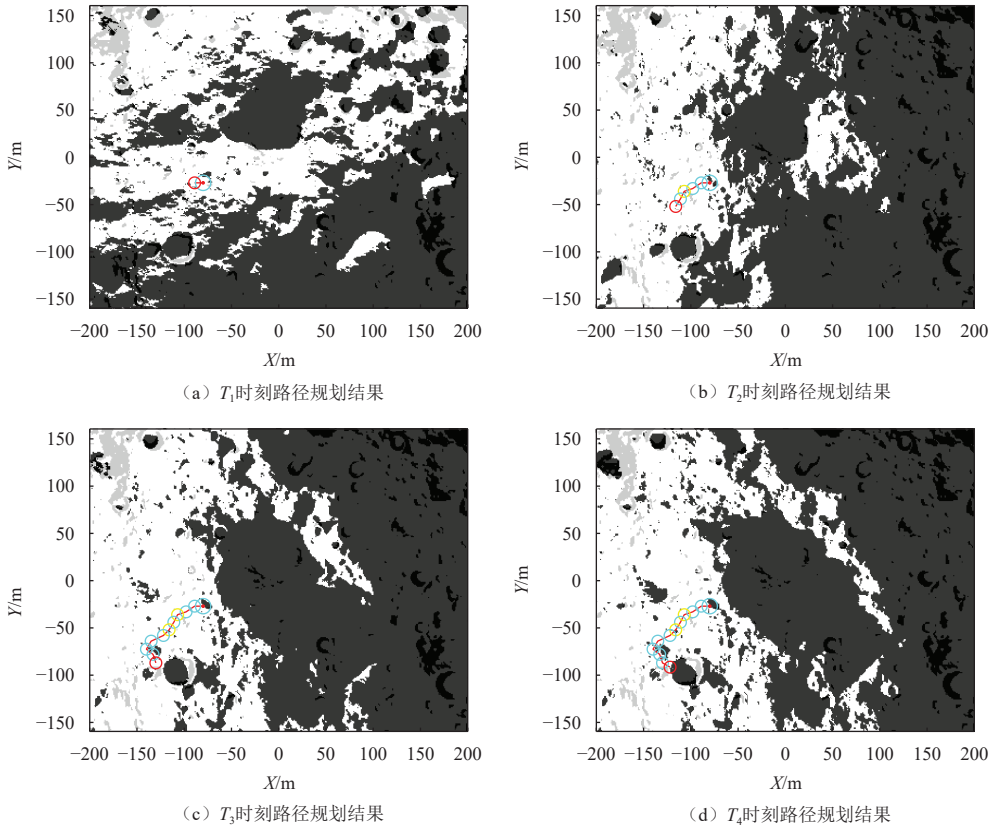
图 4 着陆区坡度与光照情况

Fig. 4 Slope and illumination conditions of landing region

### 3.2　定时定点移动设计

着陆器着陆后，释放移动探测器进行月面巡视探测。首先需确定移动目标，比如可能赋含水冰的冷阱（小型永久阴影区）。确定移动目标后，利用连续动态光照数据开展定时定点移动设计。另外，需要说明的是，所在路径点有光照，不是指理想位置点有光照，而要考虑探测器本体大小、移动偏差等因素，确定一定区域面积有光照，可通过给障碍区和阴影区添加一定宽度的缓冲区提高移动路线的安全性和可靠性。

以着陆区周边地形为例，基于动态光照约束的路径规划方法进行移动设计，设置导航点个数为12，粒子群规模为50，惯性权重逐步减小，两个学习因子均取2.0。坡度和阴影安全距离直接影响探测器的通行安全，因此赋予较高权重为0.4，其它约束设置等权，规划了定时定点的“追光”移动探测路线，仿真结果如图5所示，可以看出路线坡度满足要求，并避开了灰色的坡度超限区域。尽管在移动探测期间，尤其是$T_1$~$T_2$期间，区域内光照情况呈现显著的变化，但探测器的移动始终位于光照区，从而确保能源充足。通过对比$T_1$、$T_2$时刻的路径结果，可以看出$T_2$时刻的路径在$T_1$时刻有一部分处于阴影区内，说明该移动探测路线能够实现“追光”探测的需求，最终到达阴影坑边缘。此外，图5中以路径上的导航点为圆心绘制了安全停留区，停留区内总体上满足坡度和光照要求，表明该路线具有一定的额外安全宽度，为在轨器上自主避障、异常处置提供了设计余量。




（a）$T_1$时刻路径规划结果　（b）$T_2$时刻路径规划结果

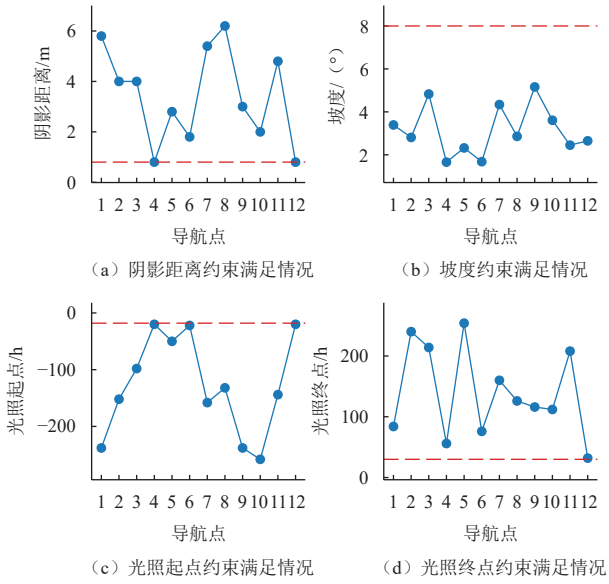
（c）$T_3$时刻路径规划结果　（d）$T_4$时刻路径规划结果

注：白色区域为光照区，黑色区域为阴影区，灰度区域为坡度超限区，曲线为移动路线，圆圈为安全停留区。

图 5　定时定点路径规划结果

Fig. 5　Path planning results with temporal and spatial constraints

进一步对定时定点移动设计的结果进行定量分析，统计了移动路径上各路径点的关键指标，包括到阴影的距离、地形坡度、光照已持续时间（光照起点，到达时刻为0 h）、光照将持续的时间（光照终点，到达时刻为0 h）。各路径点对关键指标约束的满足情况如图6所示，移动路径点到阴影的距离均大于0.8 m，各路径点坡度小于8°，满足行走安全约束，时间起点和时间终点分别满足–18 h和30 h的光照约束。综上所述，本文得到的定时定点移动设计结果符合就位探测任务对光照和坡度的要求。




注：蓝线为各导航点指标变化，红色虚线为各指标需要满足的约束。

图 6 路径规划结果与约束分析

Fig. 6 Quantitative analysis of path planning results and constraints

### 3.3 定时定点遥感设计

为保证定点着陆的高精度，使用图像导航方法，即事先准备底图，在动力下降过程中敏感器将实时获取月面图像和底图进行特征匹配，以此定位和导航[25]。尽管月球影像匹配算法对于光照变化具有一定的鲁棒性，然而在南极低太阳高度角条件下，地形阴影、坡面明暗关系和阴影边界仍然会显著改变图像灰度分布及局部纹理特征，从而影响特征点的提取和匹配可靠性[26]。因此，底图要尽量接近动力下降时刻的月面情况，需由轨道器提前进行遥感成像以获取底图。为控制底图成像范围，并使成像时刻的光照条件与动力下降时刻的偏差保持在限定范围内，需进行定时定点成像。

轨道器遥感成像时，考虑到着陆区在南极附近，所以设计轨道倾角约为90°，星下点的位置回归周期等于月球自转周期约为27.3天；星下点的光照回归周期约29天（此处指方位角的回归周期，相邻月份的太阳高度角差异很小，一般小于0.2°）。南极某区域$M_1$、$M_2$、$M_3$连续3个月的太阳高度角、方位角曲线如图7所示。若在$M_2$月份着陆，则在$M_1$月份有一次成像机会，即$M_1$月份曲线和$M_2$月份曲线的交点。

上述曲线的交点代表的是一个确定的交会时刻，即遥感成像时刻和着陆时刻的太阳高度角和方位角完全相同（从工程上不要求完全相同，比如要求太阳高度角偏差不大于$\alpha_h$、方位角偏差不大于$\alpha_f$，则交会时刻变为交互时段）。以$\alpha_h$取0.5°，$\alpha_f$取5°为例，若在$T_z$时刻着陆，则遥感成像时机设计为$T_z$时刻前约29～30天，具体见表3，才能保证成像时的光照条件满足要求。需要说明的是，此时星下点虽不完全重合，但通过相机视场设计与小角度侧摆设计予以覆盖（以南纬89°为例，成像时刻星下点和着陆时刻相差约14 km）。

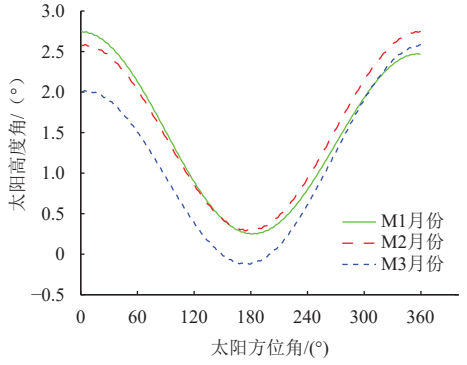



图 7 南极区域不同月份的太阳高度角、方位角曲线

Fig. 7 Relationship between solar elevation and azimuth in different months at lunar south pole

**表 3 着陆时刻和成像时段的对应关系**

**Table 3 Relationship between landing time and imaging period**

| 项目 | 时刻 | 太阳高度角/（°） | 太阳方位角/（°） |
|---|---|---|---|
| 着陆时刻 | $T_z$ | 1.28 | 100.84 |
| 成像时段 | $T_z$-30 d | 0.81 | 105.27 |
| | $T_z$-29 d | 1.01 | 96.12 |

## 4 结 论

本文在分析月球南极环境特点及其影响因素的基础上，通过对月球南极区域进行光照仿真建模与地形坡度分析，提出定时定点的设计方法：首先是定时定点着陆设计，准确及时到达月面；其次是定时定点移动设计，针对特定目标开展就位探测；最后是定时定点遥感设计，在确定着陆点和移动区域后提供高精度导航匹配底图。通过系列定时定点的设计，使之适应月球极区的复杂地形和恶劣光照环境，同时为在轨异常处置提供了设计余量，满足工程约束，可为未来的月球南极就位探测任务提供关键支撑。

## 参考文献

[1] 李春来，严韦，刘建军，等. 中国月球探测促进月球与行星科学创新发展[J]. 中国科学：地球科学，2023，53(11)：2437-2456.
Li C L，Yan W，Liu J J，et al. Innovative developments in lunar and planetary science promoted by China's lunar exploration[J]. Science China Earth Sciences，2023，53(11)：2437-2456.

[2] 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)：8907-8912.

[3] Anand M. Lunar water：a brief review[J]. Earth，Moon，and Planets，2010，107(1)：65-73.

[4] Luchsinger K M，Chanover N J. Seasons of ice：water ice migration and seasonal transient shadow at the lunar poles[J]. Journal of Geophysical Research：Planets，2022，127(10)：1-18.

[5] 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.

[6] 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.
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.

[7] Feng Y J，Li H T，Tong X H，et al. Optimized landing site selection at the lunar south pole：a convolutional neural network approach[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing，2024，17：10998-11015.

[8] Wang C，Jia Y Z，Xue C B，et al. Scientific objectives and payload configuration of the Chang’E-7 mission[J]. National Science Review，2024，11(2)：1-16.

[9] 刘丹，甘红，魏广飞，等. 基于光照和坡度约束的月球南极着陆选址分析[J]. 深空探测学报(中英文)，2023，10(5)：544-556.
Liu D，Gan H，Wei G F，et al. Lunar south polar landing area selection constrained by illumination conditions and slopes[J]. Journal of Deep Space Exploration，2023，10(5)：544-556.

[10] 于天一，费江涛，李立春，等. 月面巡视器路径规划方法研究[J]. 深空探测学报(中英文)，2019，6(4)：384-390.
Yu T Y，Fei J T，Li L C，et al. Study on path planning method of lunar rover[J]. Journal of Deep Space Exploration，2019，6(4)：384-390.

[11] Wang Y M，Yuan Q F，Guo Y N，et al. Path planning for lunar rover based on Bi-RRT algorithm[C]//Proceedings of the 2021 40th Chinese Control Conference(CCC). Shanghai，China：IEEE，2021.

[12] Hu T，Cao T，Zheng B，et al. Large-scale autonomous navigation and path planning of lunar rover via deep reinforcement learning[C]//Proceedings of 2021 China Automation Congress(CAC). Kunming，China：IEEE，2021.

[13] Miao Q L，Wei G F. A dynamic illumination-constrained spatio-temporal A* algorithm for path planning in lunar south pole exploration[J]. Remote Sensing，2026，18(2)：1-28.

[14] Lamarre O，Malhotra S，Kelly J. Safe mission-level path planning for exploration of lunar shadowed regions by a solar-powered rover[C]//Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Montana，USA：IEEE，2024.

[15] Mazarico E，Barker M K，Jagge A M，et al. Sunlit pathways between south pole sites of interest for lunar exploration[J]. Acta Astronautica，2023，204：49-57.

[16] Allan M，Wong U，Furlong P M，et al. Planetary rover simulation for lunar exploration missions[C]//Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Montana，USA：IEEE，2019.

[17] Litaker H L，Beaton K H，Bekdash O S，et al. South pole lunar lighting studies for driving exploration on the lunar surface[C]//Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Montana，USA：IEEE，2025.

[18] 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.

[19] Ye Z，Qian J，Xu Y S，et al. Adaptive weighted multi-image shape from shading for precise topographic reconstruction at the lunar south pole[J]. The Astronomical Journal，2025，170(1)：1-16.

[20] Folkner W M，Williams J G，Boggs D H，et al. The planetary and lunar ephemerides DE430 and DE431[J]. Interplanetary Network Progress Report，2014，196(1)：142-196.

[21] 张吉栋，孟治国，平劲松，等. 基于 LOLA 数据的 Aristarchus 高原光照特性初步研究[J]. 深空探测学报(中英文)，2017，4(2)：171-177.
Zhang J D，Meng Z G，Ping J S，et al. Preliminary Study of illumination characteristics of aristarchus plateau using LOLA data[J]. Journal of Deep Space Exploration，2017，4(2)：171-177.

[22] 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.

[23] 秦元庆，孙德宝，李宁，等. 基于粒子群算法的移动机器人路径规划[J]. 机器人，2004(3)：222-225.
Qin Y Q，Sun D B，Li N，et al. Path Planning of mobile robot based on particle swarm optimization algorithm[J]. Robot，2004(3)：222-225.

[24] Parsopoulos K E，Vrahatis M N. Particle swarm optimization method for constrained optimization problems[J]. Intelligent Technologies–Theory and Application：NewTrends in IntelligentTechnologies，2002，76(1)：214-220.

[25] 朱圣英，杨贺，黄翔宇，等. 地外天体着陆自主避障制导技术研究进展[J]. 宇航学报，2023，44(12)：1785-1796.
Zhu S Y，Yang H，Huang X Y，et al. Research progress of autonomous hazard avoidance guidance technologies on extraterrestrial body landing[J]. Journal of Astronautics，2023，44(12)：1785-1796.

[26] Wu B，Zeng H，Hu H. Illumination invariant feature point matching for high-resolution planetary remote sensing images[J]. Planetary and Space Science，2018，152：45-54.

作者简介：

**彭松**(1986－)，男，研究员，主要研究方向：航天器总体设计及遥操作技术等。**本文通信作者**。

通信地址：北京市海淀区友谊路104号(100094)

电话：(010)68745397

E-mail：pengsong20@163.com

# Mission Design for In-Situ Exploration of Lunar South Pole with Spatiotemporal Constraints

Peng Song[1]，Sun Jingbo[1,2]，Zhang Tianyi[1]，Rao Wei[1]，
Fang Yue[1]，Zhang Yiyuan[1]，Chen Shiyu[1]

（1. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering，Beijing 100094，China；
2. College of Surveying and Geo-Informatics，Tongji University，Shanghai 200092，China）

**Abstract**：Given the challenges faced by in-situ exploration missions at the lunar south pole，the complex terrain and rapidly changing illumination conditions make it difficult to ensure a safe landing，maintain a continuous lighting environment，and meet navigation and remote sensing imaging requirements. A method for spatiotemporally constrained mission design for in-situ exploration of the lunar south pole was proposed. Based on high-resolution Digital Elevation Model（DEM）and ephemeris data, terrain slope and dynamic illumination of the lunar south pole were modeled. Besides，various engineering constraints were taken into account during the pre-descent circumlunar remote sensing phase，the lunar surface landing phase and the lunar surface moving phase. Taking a potential landing area at the lunar south pole as an example，a landing site and landing time satisfying the continuous illumination constraint，a traverse path meeting the light-tracking requirement，and a remote sensing imaging window matching the landing time were obtained. The results demonstrate that the proposed method can provide implementable full-process mission planning support for in-situ exploration missions at the lunar south pole and can also serve as a reference for the mission design of China’s future lunar south pole exploration.

**Keywords**：lunar south pole；temporal and spatial constraints；in-situ exploration；path planning

**Highlights**：

- The environmental characteristics such as topography and illumination at the lunar south pole were analyzed.
- A full-process mission design methodology with spatiotemporal constraints for in-situ exploration was proposed.
- Multiple constraints were taken into account in the mission design including topography，illumination and communication.
- A case study was presented in a potential landing area at the lunar south pole.

[责任编辑：杨晓燕，英文审校：宋利辉]