

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202602012

基于自适应 A* 算法的月球南极路径规划

赵锬婷¹, 徐 波¹, 郭洁榕¹, 罗海波^{2, 3}, 李 欣^{1*}

(1. 中山大学 航空航天学院, 深圳 518000;

2. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;

3. 海南空天信息研究院 海南省地球观测重点实验室, 文昌 571300)

摘 要: 为解决在月球南极水冰探测中地形、时变光照及温度时空特性限制等动态环境带来的路径规划挑战, 提出一种基于自适应 A* 算法的月球南极路径规划方法。首先, 通过改进传统 A* 算法, 基于嫦娥二号 DEM 数据计算南极区域坡度与 2025 年全年光照参数, 结合 2009-2019 年 Diviner 数据, 预测 2025 年南极各点温度, 构建融合时间与环境参数的四维代价函数。然后, 根据地形崎岖、温度极端、月球车电力不足等风险, 自适应调整搜索半径, 同时调整代价评估机制, 将永久光照区作为路径规划优先区域以保障能源供给。最终, 在沙克尔顿撞击坑边缘规划出坡度平缓、光照强度为 1 且温度可控的 85 850 m 探测路径。此外, 还首次实现了基于 Diviner 数据驱动的逐点温度场预测与验证。实验结果表明: 与 Dijkstra 算法、概率路线图算法、快速探索随机树算法相比, 所提算法路径计算耗时最高可减少 48.15%, 路径长度最大可缩短 27.65%, 规划风险率降低至 0.01%。总体来看, 安全性与高效性都有显著提升, 突破了传统 A* 算法仅能在静态环境中进行路径规划的局限, 可针对性解决各类环境风险问题, 为月球极地可持续探测提供可靠技术支撑。

关键词: 水冰探测; 路径规划; A* 算法; 嫦娥二号 DEM; Diviner 数据

中图分类号: V19

文献标志码: A

开放科学标识码(OSID):

文章编号: 2097-2741(2026)02-0129-12



听语音
与作者互动
聊科研

月球极地水冰的原位利用是探测任务的核心目标之一, 中国已将月面水探测列为关键技术^[1]。其中, 路径规划是月球车探测的关键环节, 其结果直接影响到探测效率和安全性。为保障能源供应, 可通过在永久光照区采用太阳同步漫游策略, 保证月球车持续利用太阳能, 实现长期大范围探测^[2]。但极区永久阴影区和陡坡的存在, 使得常规路径规划算法效率低下, 且光照随时间变化, 忽略时变特性会影响传统路径规划算法的鲁棒性。因此, 需要规划一条坡度平缓且满足光照强度为 1 的动态路径。此外, 永久阴影区的低温环境有利于水冰等挥发物的保存^[3], 但不利于探测器长时间

开展工作。开展月球南极探测路径规划研究, 需系统分析地形、温度与光照等多个条件^[4]。

针对月球水冰探测任务的路径规划, 现有算法主要包括 Dijkstra 算法^[5]、概率路线图 (probabilistic roadmap, PRM) 算法、快速探索随机树 (rapidly-exploring random tree, RRT) 算法^[6]、D* 算法、A* 算法^[7]等。其中, Dijkstra 算法的核心是求解从源点到最近顶点的最短路径, 虽能够保证路径最短, 但未充分考虑路径的实际适用性。PRM 算法通过随机节点生成函数在自由空间生成随机节点, 以构建路径网络图。然而, 其采样机制易忽略障碍物区域内点位, 导致覆盖率不足^[8]。

收稿日期: 2025-10-30

修回日期: 2025-12-10

录用日期: 2026-03-12

基金项目: 重大科技专项 (ZYZS12-QW04, ZYZS12-QW05)

第一作者: 赵锬婷 (2002—), 女, 硕士研究生, 主要从事深空探测研究。E-mail: zhaost3@mail2.sysu.edu.cn

***通信作者:** 李欣 (1988—), 男, 副教授, 主要从事复合材料结构力学与深空探测技术研究。E-mail: lixin275@mail.sysu.edu.cn

引用格式: 赵锬婷, 徐波, 郭洁榕, 等. 基于自适应 A* 算法的月球南极路径规划 [J]. 火箭军工程大学学报, 2026, 40 (2): 129-140.
ZHAO Siting, XU Bo, GUO Jierong, et al. Adaptive A* algorithm-based path planning for the lunar south pole [J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2026, 40 (2): 129-140.

RRT 算法作为单查询算法,可快速找到起点至终点的可行路径,但所得路径与最优路径偏差较大^[9]。D*算法属于动态规划算法,虽在游戏开发等领域应用成熟,但其内存消耗较高^[10],易造成资源浪费。A*算法作为一种高效且接近最优的图搜索方法,不仅应用于游戏行业^[11],还广泛应用于静态环境。研究表明其变体在多数现实导航任务中优于D*算法^[12],因此,也广泛应用于机器人路径规划、城市智能交通、图论和自动控制等行业。为提高抗延迟的鲁棒性,“玉兔”号采用A*算法在月面DEM中搜索最优路径^[13]。Zhang等^[14]也通过融合前后两台RGBD传感器的视觉里程计,借助A*算法实现了月球车在复杂地形下的高精度绝对定位与平稳路径规划,但是在不平整地形下姿态估计仍存在精度偏差。

在月球极地探测中,太阳同步路径需在每一步选择最佳着陆点,兼顾地形可穿越性与光照充足性。Heldmann等^[15]提出小于 10° 的坡度被漫游车视为可通行,着陆点应位于永久阴影区(permanently shadowed regions, PSRs)之外但与之毗邻。于晓强等^[16]利用改进的A*算法提升了月面大范围路径的搜索效率。Takemura等^[17]提出了一种行星探测车在崎岖地形下的路径规划方法,并对2种路径规划方法在真实地形数据下进行了仿真验证,但考虑的地形坡度因素均过于单一。王慧婷等^[18]结合A*算法构建了自主导航路径规划算法,但同样只针对弱通信和无光照的极端环境。Bai等^[19]则提出了同时引入坡度与光照作为约束条件的A*路径规划算法,但未考虑月日方位角、高度角等真实数据。Peng等^[20]全面考虑坡度、粗糙度、太阳光照和地球能见度的影响,采用动态加权改进A*算法,但环境参数仍是静态的平均光照和能见度数据。

温度条件对月球极地探测的影响同样关键。Liu等^[21]对北极Hermite-A陨石坑PSRs的昼夜与季节温度变化进行分析,得出温度低于110 K时水冰难以逃逸。低温PSRs区域缺乏光照,而常用电子设备的工作温度范围一般为 $-20\text{ }^\circ\text{C}\sim 55\text{ }^\circ\text{C}$ ^[22],导致太阳能供电系统的工作受限。张思勃等^[23]研究了de Gerlache和Scott M附近夏季夜晚局部温度,发现其分别超过 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $-20\text{ }^\circ\text{C}$,可作为潜在的选址区域。总之,温度不仅决定水冰的稳定性,还影响月球科学探测、任务安全及载人基地建设。目前,月表温度数据主要来自LRO搭载的Diviner月球辐射计^[24]自2009年以来对全球辐射亮温的遥

感观测。此外,冯绚等^[25]提供了低纬度登月点附近的温度数据,该原位测量仅依赖阿波罗15/17号在赤道附近的数据,高纬度地区仍缺乏原位温度实测数据^[26];Schörghofer等^[27]计算了月球北极区域的冷阱平均温度数据;Formisano等^[28]构建了月球南极PROSPECT着陆点的热物理模型,重点研究了极区含水冰区域升华率的计算方式。

综上所述,现有路径规划算法在应对月球极区动态环境时存在效率与适应性不足的问题。此外,当前有关月球南极探测路径规划方面的研究存在明显局限。一方面,大多数方法将坡度、光照等关键环境参数视为静态条件,忽略了月球因昼夜周期产生的环境动态变化及地形微尺度效应;另一方面,温度作为关键影响因素,长期以来未被纳入路径规划模型,导致算法缺乏基于遥感数据的像素级和时序化温度预测能力。

针对上述问题,提出一种基于自适应A*算法的月球南极路径规划方法。首先,通过引入坡度数据与高精度光照、温度预测模型,充分耦合多维度、时变的自然约束,突破现有研究对环境因素的静态化、单一化处理局限;随后,改进A*算法结构,引入新的启发式函数与自适应搜索机制,递进式搜索最优路径,提升路径规划效率;最后,基于Diviner多通道红外遥感数据,实现探测路径上逐像元温度在指定时间点的预测,为后续水冰探测任务的温控提供参考,降低极端温度带来的风险。

1 数据准备与环境建模

1.1 数据准备

路径计算的光照数据来源于嫦娥二号CE2TMap2015,具体如表1所示。该数据使用的地图投影即常用的极射赤面投影。鉴于月球曲率及显著的地形起伏,为保障分析边界区域的精度,所准备的数据范围需大于目标分析区域。

探测路径需满足地形平坦、无障碍物等基本要求。因此,需要系统计算坡度参数,实现光照与坡度的逐点匹配。基于数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据,采用中心差分法计算坡度。具体流程如下:首先,限定分析区域(region of interest, ROI),选取指定纬度范围内即 $88.5^\circ\text{S}\sim 90^\circ\text{S}$ 的像素点;然后,构建一矩阵变量记录ROI内各像素点的球心投影的 x 、 y 坐标及经纬度和高度等基本信息;最后,对每个像素点提取其 3×3 的邻域窗口,沿DEM数据的 x 轴和 y 轴方

向, 对相邻像素点的高程差进行精确计算。其中, H_n 为窗口内的高程值, 其对应关系如图 1 所示。

表 1 嫦娥二号 DEM 与 Diviner 数据
Table 1 DEM data from Chang'e-2 mission and Diviner data

数据类型	来源	分辨率	覆盖范围	坐标系
DEM 数据	中国嫦娥二号立体相机 CCD	50 m	全月 188 个分幅	J2 000.0 月球天球坐标系
Diviner 数据	搭载在月球勘测轨道飞行器 (LRO) 上的 Diviner 月球辐射计实验	0.5°, 0.25 h	2009—2019 年	J2 000.0 月球天球坐标系

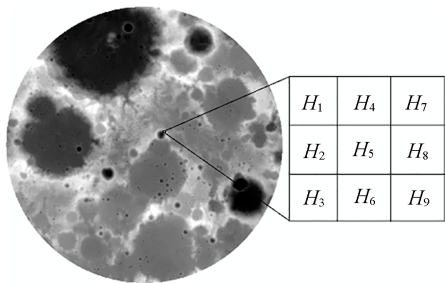


图 1 DEM 数据及其高程对应关系
Fig. 1 DEM data and the elevation correspondence relationship

高程差 $f(x)$ 和 $f(y)$ 计算表达式分别为

$$f(x) = \frac{(H_7 + 2H_8 + H_9) - (H_1 + 2H_2 + H_3)}{8p} \quad (1)$$
$$f(y) = \frac{(H_3 + 2H_6 + H_9) - (H_1 + 2H_4 + H_7)}{8p} \quad (2)$$

式中: $(H_7 + 2H_8 + H_9)$ 、 $(H_1 + 2H_2 + H_3)$ 、 $(H_3 + 2H_6 + H_9)$ 、 $(H_1 + 2H_4 + H_7)$ 分别表示目标点下方、上方、右侧、左侧 3 个像素的加权高程值; p 为 DEM 数据的分辨率。

地形坡度 θ 计算表达式为

$$\theta = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \quad (3)$$

式中: f_x 和 f_y 分别为 x 轴和 y 轴方向的斜率, 即由中心差分法得到的高程梯度。该梯度值反映地形的坡度变化量 θ , 经反正切变换 $\arctan \theta$ 后获得各像素点坡度值。此方法通过量化相邻像素高程差异, 实现了地形微变特征的高精度表征。所有坡度值均以度 ($^\circ$) 为单位存储于矩阵, 并输出为文本文件以供后续分析。

月球极地温度对探测任务具有多维度显著影响, 涵盖探测器设备性能、水冰资源探测及地形演变等。为此, 基于表 1 所示 Diviner 数据构建温

度时序模型, 为后续月球车探测区域符合热安全阈值提供参考数据, 并与前述环境参数实现逐点匹配。基于 2009—2019 年南极夏季 (12~1 月) 与冬季 (5~9 月) 温度数据, 两季平均温度空间分布特征如图 2 所示。

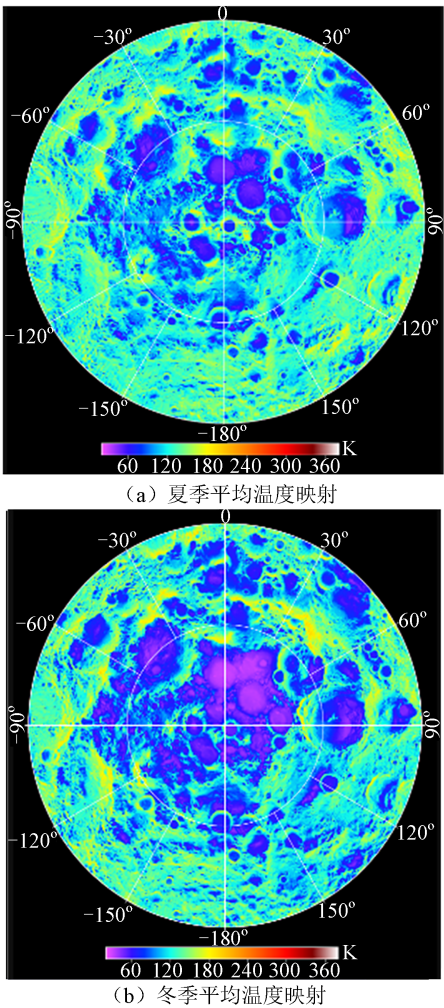


图 2 南极 2009~2019 年冬季与夏季平均温度空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of average winter and summer temperatures in the south pole in 2009~2019

1.2 环境建模

基于上述嫦娥二号 DEM 数据, 构建光照计算模型。以 2025 年 1 月 1 日 0 时 (UTC) 为起点, 以 1 h 为步长计算全年光照分布。选择 2025 年以覆盖 2025—2027 年月球南极探测关键窗口期, 且与历史数据周期相位匹配。鉴于朔望月周期约为 29.53 个地球日 (即 708.72 h), 为覆盖月球车单日连续作业时长, 确保覆盖完整光照周期并提供工程冗余, 选取 720 h 作为观测窗口。构建光照模型, 对于每个像素点, 计算太阳光相对于该位置的高度角和可见度。首先, 通过行星和卫星轨道、坐标系等信息, 得到当前时刻太阳的位置和图像帧中

心的点的位置,由此计算出当前时刻太阳在月固坐标系中的位置。然后,根据太阳的位置计算太阳方位角,以便通过获取邻近2组方位角进行插值估算太阳高度角。最后,进行最大地形高度角遍历计算,比较两者大小。若太阳高度角大于最大地形高度角,则认为该点有光照,反之则无光照。

基于Diviner数据构建温度时序模型原理如下:

$$T(t) = \bar{T} + A \sin \frac{2\pi(t - t_m)}{12} \quad (4)$$

$$\bar{T} = \frac{T_{\text{sum}} + T_{\text{win}}}{2} \quad (5)$$

$$A = \frac{T_{\text{sum}} - T_{\text{win}}}{2} \quad (6)$$

式中: t 为月份数; $\bar{T}$ 为年平均温度; A 为振幅; t_m 为使得某个月达到温度峰值或谷值的相位; t_{sum} 、 t_{win} 分别表示原始的 Diviner 夏季、冬季温度数据。设定 $t_m = 7$ 对应南半球夏季温度峰值。采用冬夏两季的平均温度数据集,鉴于温度变化特征,通过正弦函数近似拟合 2025 年 1 月温度。

数据处理并验证之后,确定月球车路径规划的静态和动态2类环境参数,奠定后续时空建模基础。DEM、坡度和粗糙度等参数属于静态参数;光照和温度则归为动态约束。本节聚焦坡度、光照和温度3个核心参数,其南极空间分布特征分别如图3、4、5所示。

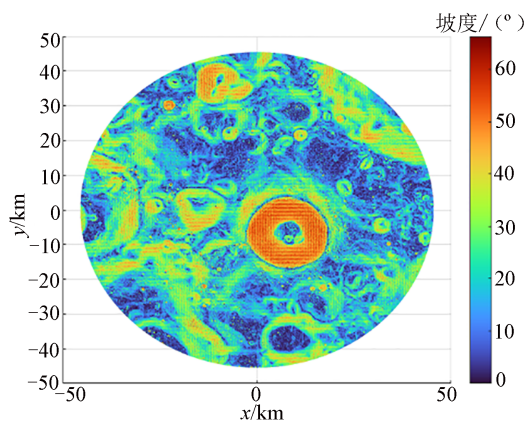


图3 月球南极坡度映射

Fig. 3 Mapping of the slope of the lunar south pole

基于传统力学中轮-土相互作用应力分布模型和“斜坡稳定性”理论,式(7)被用于计算月球车爬坡能力:

$$\alpha = \arctan(\mu \cdot g_m) \quad (7)$$

式中: μ 为轮-壤摩擦系数,月壤典型值为 0.3~0.6;月球重力加速度 $g_m \approx 1.62 \text{ m/s}^2$ 。计算得爬坡能力 α 范围为 $26^\circ \sim 44^\circ$ 。

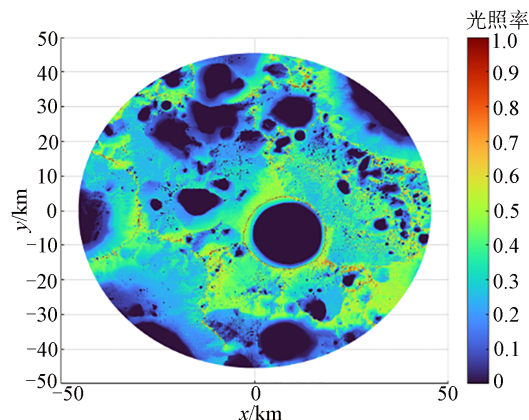


图4 月球2025年光照率映射^[29]

Fig. 4 Mapping of the illumination rate of the moon in 2025^[29]

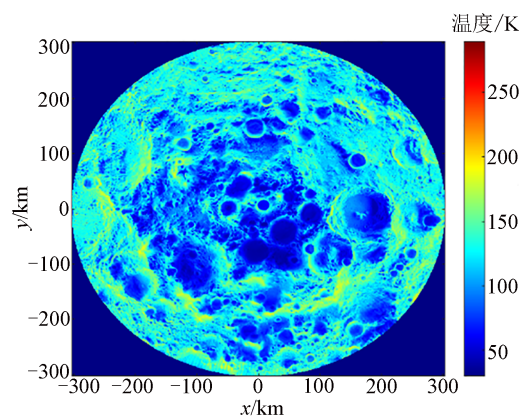


图5 月球2025年1月温度映射

Fig. 5 Temperature mapping chart of the moon in January 2025

月球两极地区的温度在 $-240^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ 之间变化,在此极端条件下,中国的“玉兔”巡视器在月面工作阶段能够保持 $-12.6^\circ\text{C} \sim 48.0^\circ\text{C}$ 的温度区间,处于电子设备正常工作范围 ($-20^\circ\text{C} \sim 55^\circ\text{C}$)。基于上述月球极区探测条件,将满足坡度小于 30° 、光照值为1、使得电子设备温度保持在 $-20^\circ\text{C} \sim 55^\circ\text{C}$ 范围内的节点设为安全通行节点。

基于环境参数分析,确定探测任务优先区域:在沙克尔顿撞击坑边缘 15 km 范围内,存在一处年光照覆盖率大于 90%,暗期短暂^[26],且具备平均坡度小于 30° 的低坡度地形,同时具备均温在 140 K 附近的热稳定特性,其光照覆盖率分布如图6所示,坡度分布如图7所示,温度分布如图8所示,符合着陆区与长期驻留基地选址标准。

该选址的科学依据在于:沙克尔顿撞击坑为永久阴影区,而其毗邻区域受太阳连续照射,被公认为潜在月球永久定居点。本研究旨在验证太阳同步光照路径的存在性,故路径规划集中于撞

击坑边缘区域实施。

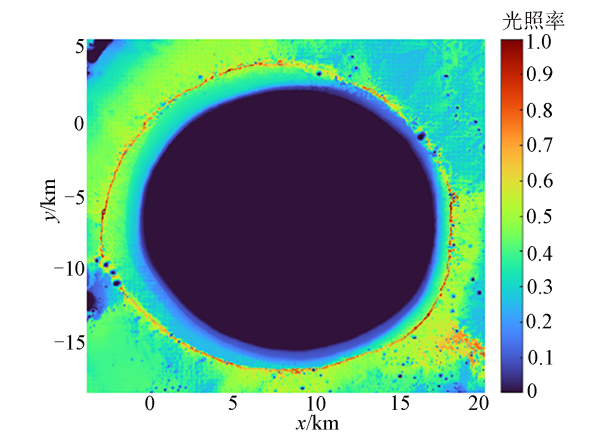


图 6 撞击坑边缘 15 km 内某处光照率
Fig. 6 Illumination rate map at a certain point within 15 km from the edge of the impact crater

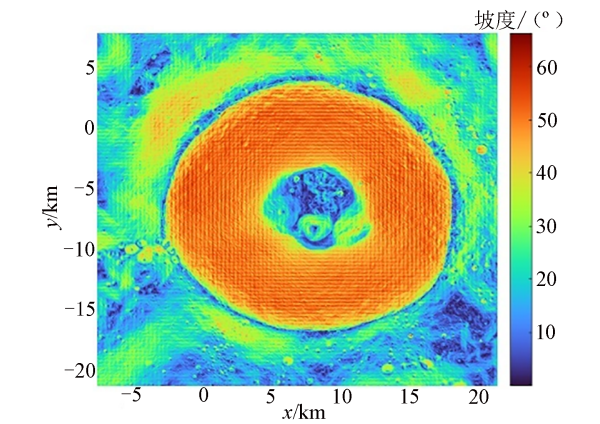


图 7 撞击坑边缘 15 km 内某处坡度
Fig. 7 Slope map at a certain point within 15 km from the edge of the impact crater

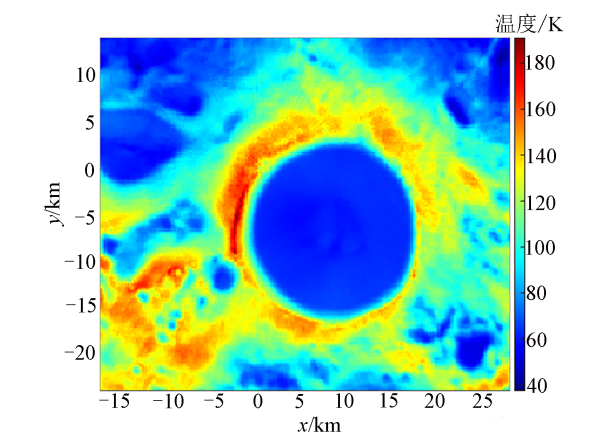


图 8 撞击坑边缘 15 km 内某处温度
Fig. 8 Temperature map at a certain point within 15 km from the edge of the impact crater

2 A*算法改进

当前热门的路径规划算法涵盖经典优化方法

如 Dijkstra 算法、D*算法和 A*算法，采样算法如 RRT 和 PRM 算法，各算法的核心特性如表 2 所示。综合比较表明，A*算法在路径最优性与计算效率方面具有显著优势，故选择 A*算法进行全局最优路径求解。

2.1 A*算法

A*算法的实现主要依赖于启发式函数 $f(n)$ 、开放列表 (open list)、封闭列表 (closed list)。其中，启发式函数定义为从初始点到第 n 节点的实际代价和从第 n 节点到目标节点的估计代价之和。启发式函数及实际、估计代价计算公式为^[30]

$$f(n) = g(n) + h(n) \tag{8}$$

$$g(n) = \sqrt{(X_n - X_{n-1})^2 + (Y_n - Y_{n-1})^2} \tag{9}$$

$$h(n) = \sqrt{(X_f - X_n)^2 + (Y_f - Y_n)^2} \tag{10}$$

式中： $g(n)$ 为实际代价，由第 n 个点到起始点的实际距离决定； $h(n)$ 为估计代价，由第 n 个点到目标点的实际距离决定。

表 2 各算法特性对比					
Table 2 Comparison of the characteristics of various algorithms					
特性	Dijkstra	D*	RRT	PRM	A*
算法类型	广度优先搜索	启发式搜索	概率性算法	概率性算法	启发式搜索
路径最优性	严格全局最优	逐步优化	非最优	非最优	严格全局最优
计算效率	较低	高(动态)	预处理阶段慢	快但路径绕	高
复杂度	简单	高	中	中高	中
适用场景	静态、低维	动态	静态、高维、多次	动态、高维、单次	静态
内存	低	中	中低	高	低

传统 A*算法流程如图 9 所示，合适的启发式函数可以显著提高算法效率，需为不超过实际成本的保守估计。其取值影响算法效率与搜索范围：等于实际代价时精确找最优路径；大于实际代价时缩小搜索范围、加速收敛；小于实际代价时扩大搜索范围，可搜最优路径但会搜不必要路径。与此同时，调整其权值算法可倾向贪心或广度优先策略，可以在“速度”与“最优性”之间折中选择^[18]。通过设置上述参数对传统 A*算法改进，使其满足预期目标。

2.2 优化的自适应 A*算法

由于环境参数兼具静态与动态特性，为实现

月球极地复杂环境下的动态路径规划, 将障碍物和陡坡等静态地形特征与光照和温度等动态环境参数在时空维度上进行耦合。为此, 构建一个包含时间变量的四维时空地图 (x, y, t, C) , 其中, C 为环境约束向量。同时引入时空耦合权重因子, 定义综合考虑时间和环境因素的动态代价函数为

$$f(n) = g(n) + h(n) = g(n) + \alpha \cdot C_{\text{time}}(n) + \beta \cdot C_{\text{env}}(n) \quad (11)$$

式中: 基础代价 $g(n)$ 表示节点到起点的欧几里得距离, 单位换算为 m (考虑 DEM 分辨率 50 m / 像素); 启发式函数 $h(n)$ 表示节点到目标点的曼哈顿距离; $C_{\text{time}}(n)$ 为时间代价, 也可视为距离代价; α 为对应权重; $C_{\text{env}}(n)$ 为环境代价; β 为对应权重。

照良好、坡度平缓的月面上, 增大其权重以加快算法的收敛速度; 在环境复杂的区域, 减少其权重以保障路径更安全。通过设置启发式函数 $h(n)$ 的权重, 根据环境变化优化路径选择, 具体启发式函数为

$$h(i) = \omega_1 L(i) + \omega_2 S(i) + \omega_3 D(i) \quad (12)$$

$$f(i) = g(i) + h(i) \quad (13)$$

式中: $L(i)$ 为节点 i 的小时光照情况; $S(i)$ 为节点 i 的坡度值; $D(i)$ 为节点 i 到终点的距离评估, 是起点与终点之间的水平欧几里得距离; ω 为静态权重, 用于调整不同因素在路径成本中的影响程度, 各权重系数 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 需根据任务具体需求和环境条件进行调节。

对 2025 年全年的光照数据进行分析。优化的 A* 算法在初始化阶段加载环境数据并设定观测窗口为 720 h, 将坡度上限阈值设为 30° , 光强下限阈值设为 1。同时初始化各项权重: 光照惩罚权重为 0.4, 坡度惩罚权重为 0.4, 距离项权重为 -0.2。权重设置旨在赋予下一时刻光照条件和地形坡度较高的权重, 以凸显二者在路径规划中的重要性。此外, 将距离项权重设为负值, 以驱动路径向终点方向靠近。考虑以上光照、坡度、距离信息的路径规划如下。

首先, 基于坡度动态调整邻居节点的搜索范围。具体而言, 当节点坡度小于 5° 时, 允许在 200 m 范围内搜索水平及垂直方向的邻居节点; 坡度处于 $5^\circ \sim 20^\circ$ 区间时, 搜索半径收缩至 150 m; 坡度超过 20° 时, 仅允许 100 m 范围内的节点纳入候选集。该自适应机制本身已经减少了陡峭地形条件下的无效搜索, 而坡度惩罚则在搜索半径减小造成邻居节点数量少的基础上, 增加对超过阈值的陡坡的惩罚率。两者协同工作, 提升算法效率。同时, 启发式函数综合多维度因素, 引入至终点的直线距离作为距离因子, 负值表征离终点越近则代价越低; 坡度超出阈值时施加惩罚项, 光照不足时附加额外代价。此外, 对未来数小时的光照状态进行预判, 确保路径在可接受的光照条件下延伸。照明贴图中阴影区域的值更改为无穷大, 意味着没有入口区域。然后, 结合 2 张地图进行路径规划。这时, 找到光照贴图的无穷大值区域, 然后再将该区域中斜率贴图的值更改为无穷大。通过这种方式, 在规划路线时, 可以避开坡度超过 30° 和阴影区域部分。

综上, 针对 A* 算法在环境变化时需反复规划的局限性, 提出结合改进启发式与增量式机制的

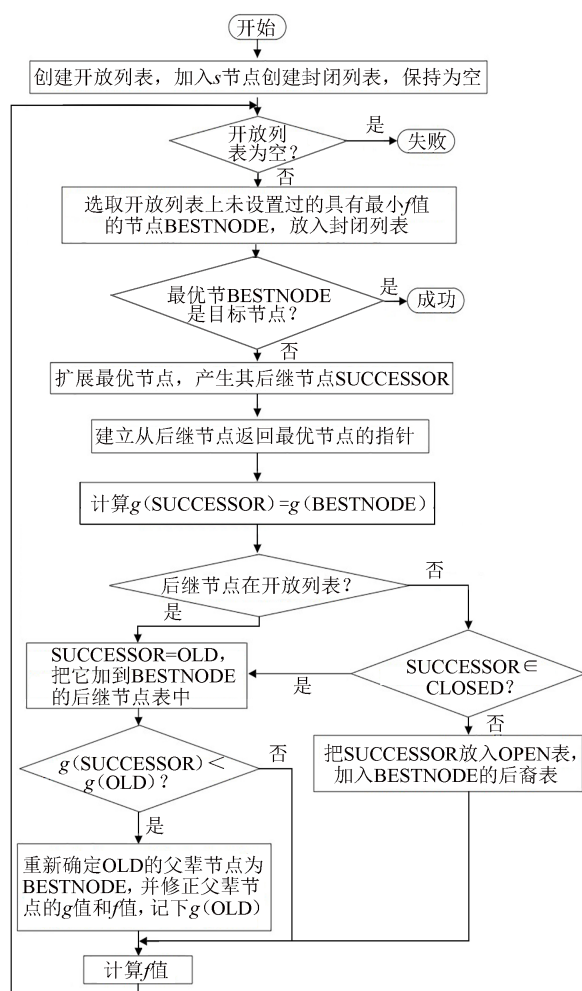


图 9 A* 算法流程

Fig. 9 Flowchart of A* algorithm

在构建时空地图的基础上, 提出了基于 A* 算法的优化方案, 通过引入对于时间维度及光照条件、地形坡度等环境因素的考量, 实现太阳同步路径规划。由于 $h(n)$ 难以同步于实际代价, 在光

算法, 其伪代码如算法 1 所示, 输入地理信息与环境数据文件路径及起止点, 输出包含坐标、坡度、光照及距离的完整路径, 整体流程如图 10 所示。

算法 1 动态路径规划

输入: 文件路径 basePath; 起止点

输出: 路径文件, 内容: Order, X, Y, Slope, Illumination, DistanceToPrevious, TotalDistance
数据加载:

1. 创建地理信息映射 locationsMap;
2. loadLocations (地点和斜率数据 .txt);
3. updateIlluminationConditions (光照数据 .txt)

路径搜索:

void Astar (起始点, 结束点, 地理信息映射, 起始时刻, 结束时刻):

- a. 当前层节点集合: currentLevel={起点坐标};
所有节点映射: allNodes={起点: 起点节点};
已访问集合: visited= $\emptyset$;
- b. for (当前小时=起始小时→结束小时-1):

nextLevel=[]; //初始化下一层节点

for 当前节点 in currentLevel:

i. 获取父节点坐标 (xParent, yParent)

ii. 获取邻居节点: 温度适宜、坡度安全、光照充足

iii. 记录邻居 (调试用)

iv. for (邻居 in 邻居列表):

if 邻居未访问:

$g = \text{父节点}g + \text{距离}(\text{父节点}, \text{邻居})$

$h = \text{启发式评分}(\text{邻居}, \text{终点})$

$f = g + h = g + 0.8 * \text{环境代价} - 0.2 * \text{时间代价}$

创建新节点 neighborNode

添加到 nextLevel 和 allNodes

标记邻居已访问

c. 更新最后有效节点=nextLevel 末尾节点 (若有)

d. if nextLevel 为空: 终止循环

e. currentLevel=nextLevel //移到下一层

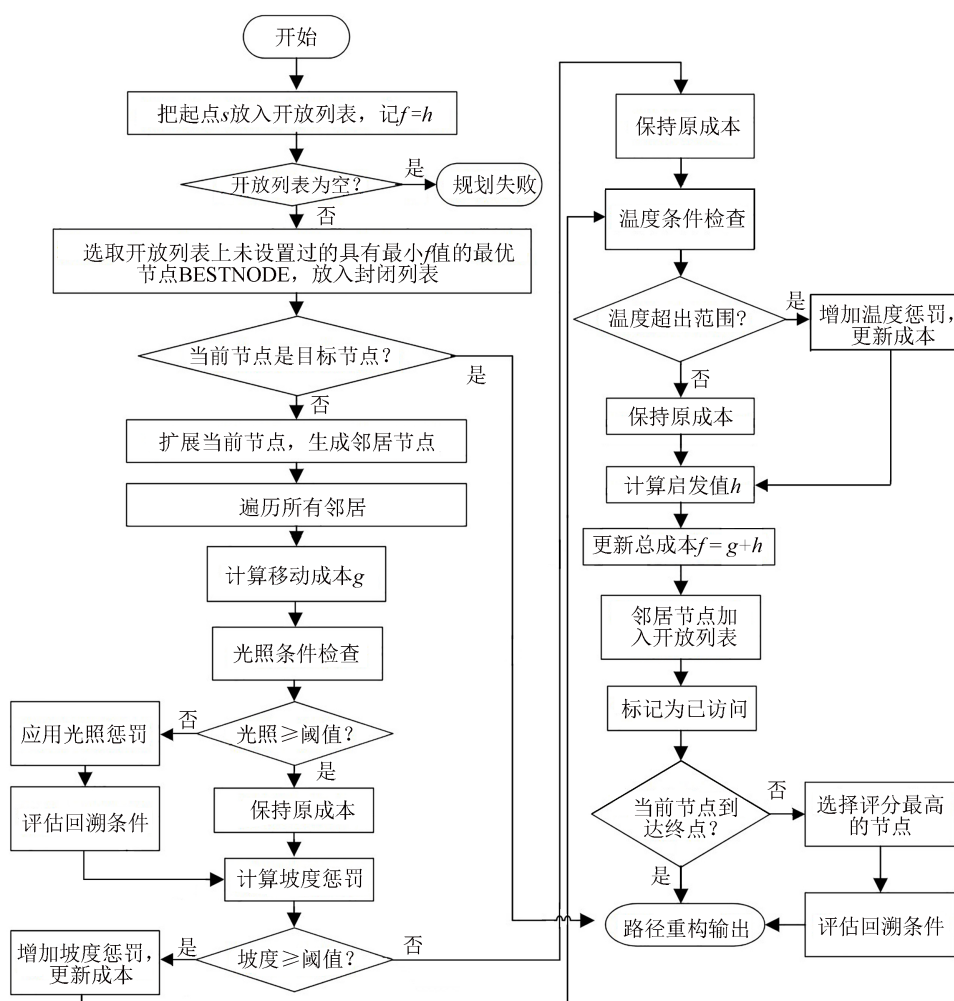


图 10 优化 A* 算法流程

Fig. 10 Flowchart of improved A* algorithm

3 仿真分析

输出完整路径文件后, 将路径数据分别按 180、360、540、720 特定时间点划分为 4 个区段, 并分别对上述时刻月球南极区域的光照强度分布进行可视化。光照强度以热力图形式表示, 其中, 黑色代表光照强度为 0, 白色代表光照强度为 1。在此背景上, 以蓝色线条与标记点突出显示所规划的最终路径。图 11 展示了探测车在月球极区一个完整月球日周期内, 依时间顺序划分得到的 4 段运行轨迹。

3.1 坡度与光照仿真分析

路径安全性是月球车行进的首要考量因素, 因此, 需统计路径中风险穿越节点的个数以评估路径安全性。风险节点定义为坡度超出 30° 阈值的节点。路径文件分析显示, 全程仅穿越两处风险节点, 坐标 (单位: m) 分别为 $(-2\ 404.2,$

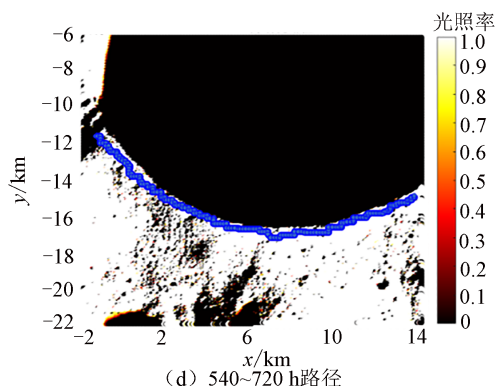
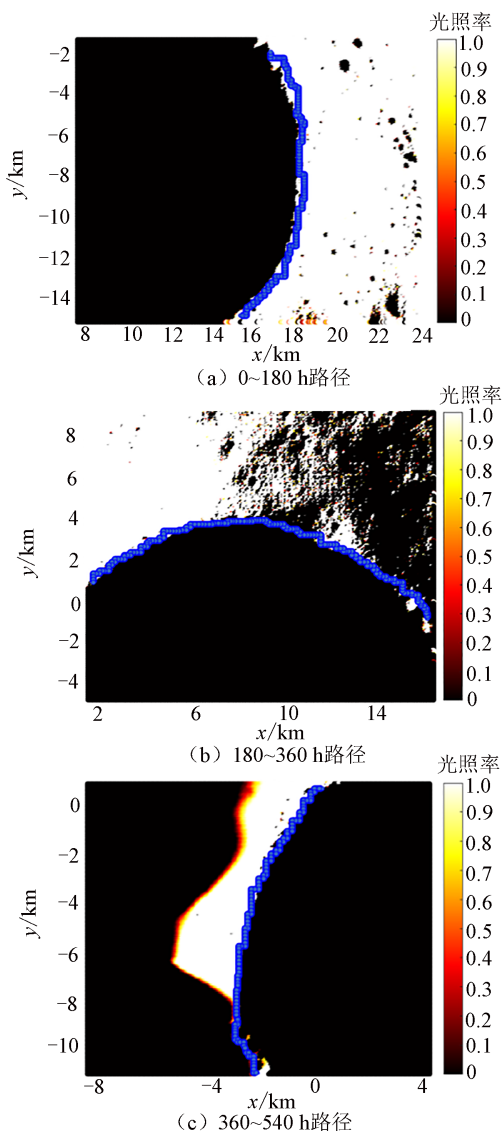


图 11 最优路径可视化

Fig. 11 Visualization of the optimal path

$-10\ 489.5)$ 和 $(-2\ 504.2, -10\ 339.5)$ 。此外, 仅有 3 个路径点的坡度接近阈值 (均为 29°), 说明路径安全性较高。针对不同坡度设置相应行进速度, 图 12 展示了月球车行进速度与坡度的关系。可以看出, 在坡度较小时, 路径点间距增大, 行进速度提高; 坡度较大时, 点间距减小, 速度相应降低。为提高计算效率, 将步长设为 15 单位, 并对最优闭合路径进行分段处理, 配置 4 个并行启动项目以加速计算, 发现第 1 与第 4 项目在运行中有暂停现象。调试分析表明, 该现象由地形崎岖及附近高地遮挡所致, 需等待月球自转带来光照条件变化方可继续探测。因此, 探测器需在规划路径相应位置暂停, 待光照充足后继续行进。时间冗余是评估月球车运行鲁棒性的重要指标, 其值为总任务时间减去静止等待时间。上述策略构成了路径规划方案的效率保障机制, 有助于减少无效等待时间。通过合理利用光照窗口期, 其余大部分区域均可灵活规划通行时间。具体而言, 目标区域从第 450 h 起进入阴影期, 下一次可通行时段始于计算周期开始后 545 h。

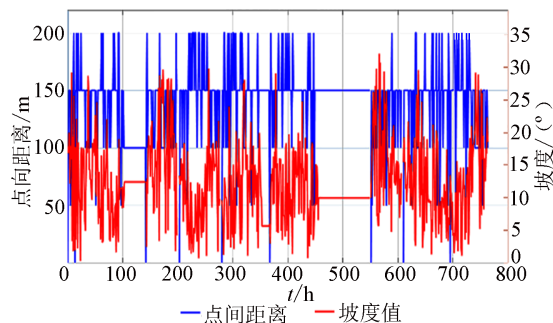


图 12 行进速度与坡度

Fig. 12 Travel speed and slope

为验证路径规划方案在能量维度的可行性, 将 2025 年 1 月各个儒略日时刻生成的光照热力图,

与 NASA 可视化工作室基于 LOLA 数据制作的月球南极区域的光照图进行了对比, 结果如图 13 所示。通过对比结果可以看出, NASA 图像中的明亮与阴影区域同热力图中高亮度与低亮度区域高

度吻合, 明亮区域对应热力图中的白色高值区, 阴影区域对应深色低值区。该一致性充分表明, 目标区域的光照条件可稳定保障月球车的能源持续供应。

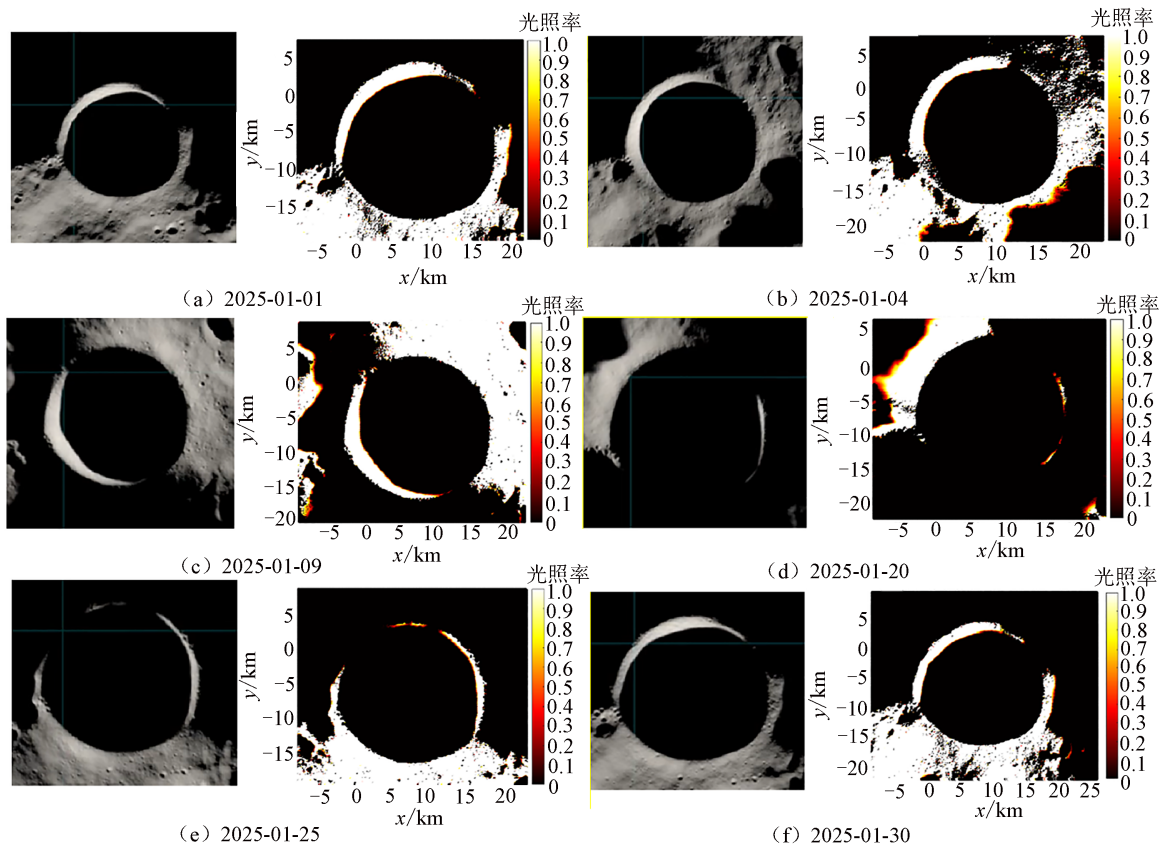


图 13 不同时刻的光照热力图 (左) 与可视化结果 (右)

Fig. 13 Illumination heatmaps (left) and visualization maps (right) at different times

3.2 算法对比仿真分析

为验证选定算法的合理性并获得更直观的量化对比数据, 建立了一个包含障碍物与风险区域的栅格地图, 尺寸为 50×50 单位, 其中, 障碍物密度达 25%, 风险区域密度达 15%。在该地图上, 对 Dijkstra 算法、A* 算法、RRT 算法、PRM 算法分别执行 5 次独立运行, 记录每次运行的计算时间、路径长度、风险节点穿越次数及成功率等指标, 取平均值进行量化对比。各算法规划所得路径如图 14 所示, 图中绿色表示自由空间, 黑色表示障碍物, 黄色表示高风险区域。不同算法路径规划指标如表 3 所示。

分析表 3 可知, A* 算法相较于 Dijkstra 算法生成路径的耗时减少了 12.5%, 长度减少了 3.33%; 相较于 RRT 算法生成路径的耗时减少了 58.70%, 长度减少了 26.07%; 相较于 PRM 算法生成路径的耗时减少了 35.78%, 长度减少了 12.12%。上述结果表明, 在测试环境中, A* 算法在计算效率和路

径长度方面均优于对比算法, 适用于当前任务场景。

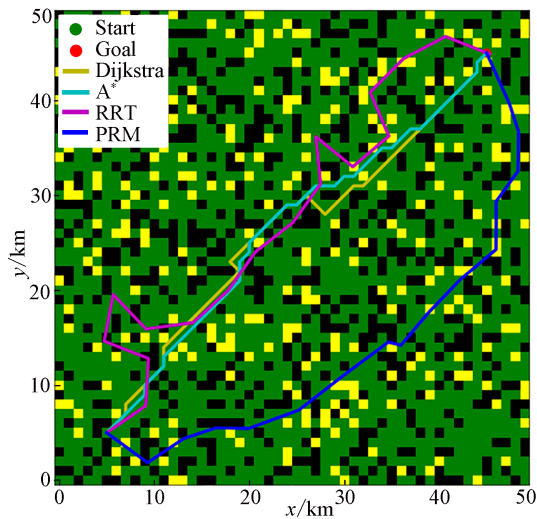


图 14 不同算法路径规划结果 (随机)

Fig. 14 Path planning results of different algorithms (random)

表 3 不同算法路径规划指标

Table 3 Path planning indicators of different algorithms

算法	时间/s	长度	转弯	风险点	节点数	成功率
Dijkstra	0.016 0	66.0	20.0	0.0	50.0	1.00
A*	0.014 0	63.8	23.0	0.0	52.0	1.00
RRT	0.033 9	86.3	16.4	2.2	18.6	1.00
PRM	0.021 8	72.6	17.8	3.8	19.8	0.80

通过累加探测器在各时间步长上的位移，可知其在月面总行进距离为 85 850.5 m，该距离亦可作为衡量路径规划效率的关键指标。为验证改进 A* 算法的适用性，对比了读取坡度、光照数据的传统 A* 算法，且给定起点 (18 396.5, -8 739.68) 和一系列航点 (18 496.5, -6 389.58)、(8 245.93, 4 010.65)、(-2 904.14, -6 839.41)、(7 746.1, -17 039.9)，进行邻域节点筛选与逐步搜索，部分路径仿真结果如图 15 所示，每个白色路径点通过蓝色路线连接。计算可得改进 A* 算法生成路径的长度减少了 14.8%，准确率提高至 99.9%，尽管时间略有增加，但传统 A* 算法第 360 h 时刻已经超过了截止时间，停止寻找邻居节点。改进 A* 算法所规划的路径基本位于永久光照区，准确率高，更符合月球车探测需求。

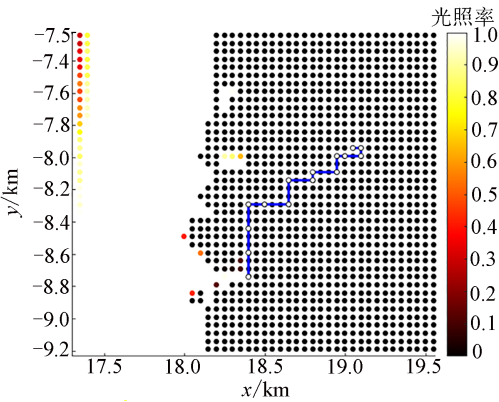


图 15 传统 A* 算法部分路径可视化

Fig. 15 Visualization of the traditional A* algorithm partial path

3.3 温度仿真分析

路径确定后，根据 1.2 节温度时序模型进一步计算了轨迹上各点的温度场分布。绘制路径上每一点的温度映射结果如图 16 所示，其中最高温度点为 (-2 554.10, -5 539.40)，达 190.97 K；最低温度点位于 (11 596.00, 2 760.70) 及 (11 596.00, 2 910.70)，均为 88.86 K。

鉴于电子设备对温度的高度敏感性，月球南极探测任务的路径规划与着陆点选择均需重点考

量热环境。超过电子设备工作温度可能导致计算单元、传感器及通信系统等关键设备性能衰减，甚至材料永久性退化。为保障任务可靠性，后续需考虑上述温度场情况，进一步规划路径，实现温度精细控制。

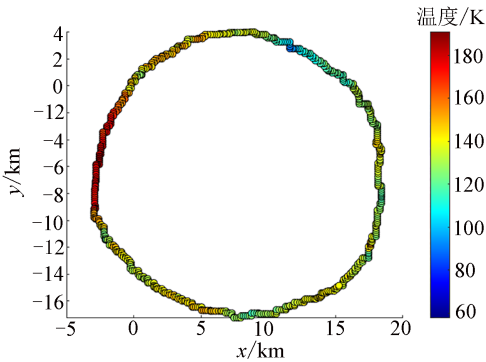


图 16 最优路径上各点温度场

Fig. 16 Temperature fields at different points on the optimal path

4 结论

针对月球南极地区复杂的时变光照、温度及地形坡度环境，构建了一种用于水冰探测等任务的动态探测路径规划方案。相较于其他路径规划算法，A* 算法在各项性能指标上均表现出明显优势。路径计算耗时最高可减少 58.70%，路径长度最大可缩短 26.07%。与传统 A* 算法相比，本方案所生成路径的长度减少 14.8%，规划准确率提升至 99.9%。该路径规划方案具备较强的工程应用潜力，可为月球车与着陆器任务中的着陆区选址、障碍规避、路径规划及温度场建模等环节提供技术支持。通过调整时间参数，该方案还能够适用于后续任务的最优路径计算，具备较强灵活性。

参考文献

[1] 张鹏, 刘光辉, 刘欣, 等. 月面原位水资源获取技术与发展趋势[J]. 空间科学学报, 2024, 44(2): 309-317.
Zhang Peng, Liu Guanghui, Liu Xin, et al. Research progress of lunar in-situ water production techniques[J]. Chinese Journal of Space Science, 2024, 44(2): 309-317.
[2] Hu Ruijun, Zhang Yulin, Li Fan. Planning and analysis of safety-optimal lunar sun-synchronous spatiotemporal routes[J]. Acta Astronautica, 2023, 204: 253-262.
[3] Paige D A, Siegler M A, Zhang J A, et al. Di-

- viner lunar radiometer observations of cold traps in the moon's south polar region[J]. *Science*, 2010, 330(6003): 479-482.
- [4] 张焜, 杜宇, 李飞, 等. 月球南极探测着陆工程选址建议[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2020, 7(3): 232-240.
- Zhang He, Du Yu, Li Fei, et al. Proposals for sites selection of soft landing on lunar south polar region[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(3): 232-240.
- [5] Dijkstra E W. A note on two problems in connexion with graphs[J]. *Numerische Mathematik*, 1959, 1(1): 269-271.
- [6] 鲜勇, 郭靖, 任乐亮, 等. 无人机航迹规划智能算法研究综述[J]. *火箭军工程大学学报*, 2025, 39(1): 106-121.
- Xian Yong, Guo Jing, Ren Leliang, et al. Review of intelligent algorithms for unmanned aerial vehicle trajectory planning[J]. *Journal of Rocket Force University of Engineering*, 2025, 39(1): 106-121.
- [7] Karur K, Sharma N, Dharmatti C, et al. A survey of path planning algorithms for mobile robots [J]. *Vehicles*, 2021, 33(3): 448-468.
- [8] Chen Xinglei, Liu Feng. YOLOv5-OLCAM-based target detection and RRT-PRM path planning for soccer robots under uncertain conditions[J]. *Informatica*, 2025, 49(30): 105-122.
- [9] Wu Zhenping, Meng Zhijun, Zhao Wenlong. Fast-RRT: a RRT-based optimal path finding method [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(24): 11777.
- [10] Suanpang P, Jamjuntr P. Optimizing autonomous UAV navigation with D* algorithm for sustainable development[J]. *Sustainability*, 2024, 16(17): 7867.
- [11] Cui Xiao, Shi Hao. A*-based pathfinding in modern computer games[J]. *International Journal of Computer Science and Network Security*, 2011, 11(1): 125-130.
- [12] Hernández C, Baier J A, Asín R. Making A* run faster than D*-Lite for path-planning in partially known terrain[C]//*Proceedings of the Twenty-Fourth International Conference on Automated Planning and Scheduling*. New York, USA: ACM, 2014: 504-508.
- [13] Hong Zhonghua, Tu Bin, Tong Xiaohua, et al. A fast large-scale path planning method on lunar DEM using distributed tile pyramid strategy[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2023, 16: 344-355.
- [14] Zhang Hongying, Mao Anyuan, Tian Zechuan, et al. Localization and autonomous exploration for lunar rover with only RGBD sensors[C]//*2023 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS)*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2023: 972-977.
- [15] Heldmann J L, Colaprete A, Elphic R C, et al. Site selection and traverse planning to support a lunar polar rover mission: a case study at Haworth Crater[J]. *Acta Astronautica*, 2016, 127: 308-320.
- [16] 于晓强, 郭继峰, 赵毓, 等. 月面巡视机器人快速安全路径规划[J]. *航空学报*, 2021, 42(1): 524153.
- Yu Xiaoqiang, Guo Jifeng, Zhao Yu, et al. Fast and safe path planning for lunar rovers[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(1): 524153.
- [17] Takemura R, Ishigami G. Traversability-based RRT* for planetary rover path planning in rough terrain with LIDAR point cloud data[J]. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2017, 29(5): 838-846.
- [18] 王慧婷, 余萌, 李昱叶, 等. 月面南极巡视器自主导航路径规划算法[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2023, 10(6): 598-607.
- Wang Huiting, Yu Meng, Li Yuye, et al. Autonomous navigation path planning algorithm for rovers in lunar south pole surface[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2023, 10(6): 598-607.
- [19] Bai J H, Oh Y J. Global path planning of lunar rover under static and dynamic constraints[J]. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2020, 21(4): 1105-1113.
- [20] Peng Siqi, Zeng Qingyao, Li Chu, et al. An improved A* algorithm for multi-environmental factor lunar rover path planning[C]//*2023 3rd International Conference on Electrical Engineering and Mechatronics Technology (ICEEMT)*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2023: 861-866.
- [21] Liu Niutao, Jin Yaqiu. Simulation and data analysis of the temperature distribution and variation in the permanent shaded region of the moon[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(4): 2962-2972.
- [22] Hayne P O, 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.
- [23] 张思勃, 刘阳, 王慎泉, 等. 月表温度和地形对科研站选址的影响[J]. *中国空间科学技术(中英文)*, 2024, 44(2): 125-135.
- Zhang Sibao, Liu Yang, Wang Shenquan, et al. Effects of lunar surface temperature and topography on outpost location selection[J]. *Chinese Space Sci-*

- ence and Technology, 2024, 44(2): 125-135.
- [24] Paige D A, Foote M C, Greenhagen B T, et al. The lunar reconnaissance orbiter diviner lunar radiometer experiment[J]. Space Science Reviews, 2010, 150(1): 125-160.
- [25] 冯绚, 郭强. 月球表面实时温度模型[J]. 遥感学报, 2017, 21(6): 928-938.
Feng Xuan, Guo Qiang. The lunar surface temperature real-time model[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2017, 21(6): 928-938.
- [26] Kumar C, Mishra S K, Kumar J, et al. Higher surface temperatures near south polar region of the moon measured by ChaSTE experiment on-board Chandrayaan-3[J]. Communications Earth & Environment, 2025, 6: 153.
- [27] Schörghofer N, Williams J P, Mazarico E. Lunar north polar cold traps based on diurnally and seasonally varying temperatures[J]. The Planetary Science Journal, 2024, 5(5): 126.
- [28] Formisano M, De Sanctis M C, Boazman S, et al. Thermal modeling of the lunar south pole: application to the PROSPECT landing site[J]. Planetary and Space Science, 2024, 251: 105969.
- [29] 郭洁榕, 彭祺攀, 王慎泉, 等. 基于嫦娥二号数据的月球极区光照计算[J]. 载人航天, 2023, 29(2): 200-209.
Guo Jierong, Peng Qibo, Wang Shenquan, et al. Illumination calculation of lunar polar region based on Chang'e-2 data[J]. Manned Spaceflight, 2023, 29(2): 200-209.
- [30] Zhang Huixia, Tao Yadong, Zhu Wenliang. Global path planning of unmanned surface vehicle based on improved A-star algorithm[J]. Sensors, 2023, 23(14): 6647.

Adaptive A* Algorithm-Based Path Planning for the Lunar South Pole

ZHAO Siting¹, XU Bo¹, GUO Jierong¹, LUO Haibo^{2,3}, LI Xin^{1*}

(1. School of Aeronautics and Astronautics, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518000, China;

2. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

3. Key Laboratory of Earth Observation of Hainan Province, Hainan Aerospace Information Research Institute, Wenchang 571300, China)

ABSTRACT: To address the path planning challenges in lunar south pole water ice exploration caused by dynamic environments such as constraints of terrain, time-varying illumination, and spatiotemporal characteristics of temperature, an adaptive A* algorithm-based path planning method was proposed. First, the slope and annual illumination parameters in 2025 in the south pole were calculated based on the digital elevation model data from Chang'e-2 mission through improving the traditional A* algorithm. The temperature at each point in 2025 was predicted by combining Diviner data from 2009 to 2019, and a four-dimensional cost function integrating time and environmental parameters was constructed. The search range was adaptively adjusted according to risks, such as rough terrain, extreme temperature, and insufficient power of the lunar rover. Meanwhile, the cost evaluation mechanism was modified, and the illuminated areas were permanently considered priority regions for path planning to ensure energy supply. Finally, an 85.85-kilometer detection path was planned at the edge of the Shackleton Crater, with the characteristics of gentle slope, illumination intensity of 1, and controllable temperature. In addition, point-by-point temperature field prediction and verification driven by Diviner data were realized for the first time. Experimental results indicate that compared with Dijkstra, probabilistic roadmap, and rapidly-exploring random tree algorithms, the proposed algorithm reduces the path computation time by up to 48.15%, shortens the path length by a maximum of 27.65%, and lowers the planning risk rate to 0.01%. It exhibits significant enhancement in safety and efficiency, overcomes the limitations of traditional A* algorithm, which can only perform path planning in static environments, and can address various environmental risks in a targeted manner, providing reliable technical support for sustainable lunar polar exploration.

KEYWORDS: water ice exploration; path planning; A* algorithm; Chang'e-2 DEM; Diviner data

(编辑: 于福兴)