融合多代价约束与自适应平滑的深海结核采矿车路径规划方法①

彭帷杰[1]，王臣[2]，苏泷德[1]，陆薪树[1]
（1.广西大学 机械工程学院，广西 南宁 530004；2.中国船舶科学研究中心 深海载人装备全国重点实验室，江苏 无锡 214082）

摘　要：基于采矿车越坡动力学分析，建立了考虑海底稀软底质特性的驱动力、综合阻力及沉陷模型，确定了可通行坡度阈值。融合多代价约束优化搜索效率与路径质量，并采用冗余节点删除法与贝塞尔曲线拟合法对路径进行平滑后处理，提出了一种改进 A* 路径规划算法。仿真结果表明，相较于传统 A* 算法，本文提出的改进算法规划路径的总长度平均缩短约 3%，行驶时间与能量消耗代价平均降低 60%以上，路径总转向角减少 70%以上，生成了综合代价更低、转向更平缓的全局路径，有效提升了深海采矿车作业的安全性与效率。

关键词：深海采矿车；路径规划；A*算法；动力学分析；路径平滑；金属结核
中图分类号：TD857　　**文献标志码**：A　　doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.03.004
文章编号：0253-6099(2026)03-0040-06

A Path Planning Method Integrating Multi-Cost Constraints and Adaptive Smoothing for Deep-Sea Polymetallic Nodule Mining Vehicle

PENG Weijie[1], WANG Chen[2], SU Longde[1], LU Xinshu[1]
(1.*School of Mechanical Engineering*, *Guangxi University*, *Nanning* 530004, *Guangxi*, *China*; 2.*State Key Laboratory of Deepsea Manned Vehicle*, *China Ship Scientific Research Center*, *Wuxi* 214082, *Jiangsu*, *China*)

Abstract: Based on the slope-climbing dynamic analysis of mining vehicles, models for traction, total resistance and sinkage were established with the characteristics of soft deep-sea sediment taken into consideration, and a passable slope threshold was also determined. An improved A* path planning algorithm is proposed, which integrates multi-cost constraints to optimize the search efficiency and path quality, and employs a redundant node removal method and Bézier curve fitting for the post-processing smoothing of the path. Simulation results show that, compared with the traditional A* algorithm, the proposed improved algorithm makes the total length of the path planned shortened by about 3% on average, reduces the travel time and energy consumption costs by over 60% on average, and decreases the total steering angle of the path by over 70% on average. It generates a global path with a lower comprehensive cost and smoother steering, effectively improving the safety and efficiency of deep-sea mining vehicle operations.

Key words: deep-sea mining vehicle; path planning; A* algorithm; dynamic analysis; path smoothing; polymetallic nodule

深海海底富含多金属结核、富钴锰结壳及多金属硫化物等战略性矿产资源，其中多金属结核广泛分布于水深 4 000~6 000 m 的海底沉积物表层[1-2]。深海海底含矿区域地形整体平缓，但局部存在沟槽与突起，且底质承载能力低，在实际开采过程中，深海采矿车需要在低承载力表面和障碍条件下行驶，同时还要面对不同坡度带来的通过性约束[3-4]。

深海采矿车如何在复杂海底环境中实现安全高效的路径规划与导航控制已有诸多研究[5-12]。这些研究多数仅从二维平面环境出发，不涉及三维地形环境信息，适应性和实用性不足；多采用固定权重或单一代价模型，难以根据实时地形的复杂度自适应权衡路径长

① **收稿日期**：2026-04-02
基金项目：国家自然科学基金(2024NSFC52475097)；广西杰出青年科学基金(2023GXNSFFA026013)
作者简介：彭帷杰(2000—)，男，湖南娄底人，硕士研究生，主要研究方向为工程机械开发技术与控制。E-mail:gxupwj@163.com

度、行驶时间与能量消耗等多重约束;路径平滑过程缺乏与车辆运动学约束的耦合,导致路径可执行性不足。为此,本文提出了一种融合多代价约束与自适应平滑的改进 A* 路径规划算法,构建融合路径长度、行驶时间与能量消耗的自适应权重代价函数,并在路径搜索后采用冗余节点删除与贝塞尔曲线拟合的两阶段平滑策略,为采矿车在复杂海底起伏地形下规划出一条综合代价更低、平滑且符合车辆运动学约束的全局路径。

1　深海采矿车动力学分析与代价地图构建

针对履带式深海采矿车在海底稀软底质的运动,如在多金属结核与富钴结壳矿区环境下的运动,构建其爬坡运动动力学模型,对地形的通行成本进行度量,设立适用于路径规划算法的栅格代价地图。通过建立精确的车辆-地形相互作用模型,将海底复杂的地形特征与车辆的物理性能约束转化为路径规划算法可直接处理与优化的定量代价信息,从而为后续的自主导航与决策提供可靠依据。

1.1　全局坐标系建立与地形离散化处理

为实现数值计算与算法处理,首先需建立统一的数学描述框架,并对连续地形进行离散化表达。定义一个右手直角全局坐标系 O-XYZ,其中 X 轴与 Y 轴位于水平基准面内,Z 轴垂直向下为正,指向地心方向。以该坐标系作为描述车辆位姿与地形高程的参考基准。考虑到计算机处理的需要,将连续的海底作业区域离散化为一个由 M 行、N 列规则网格构成的栅格地图,记为 Map。地图中的每个基本单元 $C(i,j)$ 代表一块小的海底区域,其属性主要包括该单元中心点在全局坐标系中的平面坐标 (X,Y),以及基于预先获取的海底数字高程模型 $Z=f(X,Y)$ 计算得到的局部坡度值 α_{ij}。局部坡度是后续评估地形可通行性的关键几何参数。

1.2　爬坡动力学模型与通行时间成本度量

采矿车在海底斜坡上行驶时,其动力学状态是评估地形可通行性的根本依据。为量化通过不同坡度地形所需的时间与能量代价,需建立涵盖车辆驱动力、各类行驶阻力在内的综合动力学模型,并在此基础上定义关键的通行代价系数。

1.2.1　履带总驱动力计算

车辆的前进驱动力源于履带与海底沉积物之间的剪切作用。基于改进的土壤力学模型,同时考虑接地压力分布的实际情况,总驱动力 P_t 可通过理论计算值与修正项之和求得。

理论驱动力 P_b 的计算公式为:

$$P_b=2B(C_b+p_0\tan\varphi)\cdot\left\{\lambda L-\frac{(\omega-2\lambda)k_m}{2h}+\frac{k_m}{h}e^{\frac{-hL}{k_m}}\left[\frac{\omega}{2}e^{\frac{-hL}{k_m}}-(\omega-\lambda)\right]\right\} \tag{1}$$

式中:B 为履带宽度;C_b 为底质黏聚力;p_0 为平均接地压力;φ 为底质内摩擦角;λ 为剪切效率折减系数;ω 为位移关系参数;L 为履带接地长度;k_m 为底层剪切量;h 为履带滑移率。

平均接地压力 p_0 由车重与履带接地面积决定:

$$p_0=\frac{G}{2BL}\cos\alpha \tag{2}$$

式中:G 为采矿车的水下重力;α 为地形坡度。

由于实际接地压力并非均匀,需引入修正项 ΔP:

$$\Delta P=2B(m-p_0)\tan\varphi\times\left[\lambda L-\frac{(\omega-2L)k_m}{2h}+\frac{k_m}{h}e^{\frac{-iL}{k_m}}\left(\frac{\omega}{2}e^{\frac{-hL}{k_m}}-\omega+L\right)\right]+Bn\left\{\lambda L^2-\frac{2(\omega-\lambda)k_m}{h}\left[\left(1+\frac{k_m}{h}\right)e^{\frac{-hL}{k_m}}-\frac{k_m}{h}\right]-\frac{\omega k_m}{h}\left[\left(1+\frac{k_m}{2h}\right)e^{\frac{-2iL}{k_m}}-\frac{k_m}{2h}\right]\right\} \tag{3}$$

式中 m 和 n 均为描述压力分布的拟合常数。

因此,总驱动力 P_t 为:

$$P_t=P_b+\Delta P \tag{4}$$

1.2.2　综合行驶阻力分析

车辆在爬坡过程中需要克服土壤变形阻力、重力沿斜坡方向的分力以及水动力阻力等多重阻力。

首先,履带碾压海底软质沉积物会导致其发生挤压变形,由此产生的土壤变形阻力 F_s 可表示为:

$$F_s=\frac{1}{2(k_c+Bk_\varphi)}\left[\frac{G\cos\alpha}{2BL}\left(1+\frac{6e_0}{L}\right)\right]^2 \tag{5}$$

式中:k_c 为土壤内聚变形模量;k_φ 为土壤摩擦变形模量;e_0 为车体质心相对于履带接地中心的纵向偏心距。

车体自重沿斜坡方向的分力为坡度阻力 F_g:

$$F_g=G\sin\alpha \tag{6}$$

深海采矿车具有较大的迎流面积,且海水密度较高,深海采矿车在水中运动时受到的水动力效应不可忽略。水动力阻力 F_h 是稳态拖曳阻力与附加质量力的综合体现:

$$F_h=\frac{1}{2}C_d\rho_wA_m|v_m-v_w|\cdot(v_m-v_w)+C_m\rho_wV_m(v'_m-v'_w) \tag{7}$$

式中:C_d 为无量纲的水阻力系数;ρ_w 为海水密度;A_m 为车体正向迎水面积;v_m 为车辆速度;v_w 为海底水流

速度；V_m为车体排水体积；C_m 为附加质量系数；v'_m为车辆加速度；v'_w为水体流速加速度。

1.2.3 路径规划时间代价系数定义

基于牛顿第二定律，建立车辆沿斜坡方向的运动方程：

$$P_t - (F_s + F_g + F_h) = \frac{G}{g}a \tag{8}$$

式中：g 为重力加速度；a 为车体线加速度。

为将复杂的动力学性能转化为直观的通行代价，定义时间代价系数 ε，该系数表征了爬坡导致的额外时间消耗，其计算式为：

$$\varepsilon = \frac{t_\alpha}{t_0} \tag{9}$$

式中：t_α 表示车辆以特定初始速度驶过一段坡度为 α、水平投影长度为 l 的斜坡所需的时间，可通过数值积分求解式(8)获得；t_0 为车辆以相同速度在水平硬质路面行驶距离 l 所需的时间，即 $t_0 = 1/v_0$。

$\varepsilon = 1$ 时表示通过该地形与通过平地耗时相同；$\varepsilon > 1$ 时表示存在时间损失；$\varepsilon \to \infty$ 时则表示该地形不可通行。动力学分析所需参数如表 1 所示。

表 1 动力学分析所需参数

Table 1 Parameters required for dynamic analysis

参数	单位	数值	参数	单位	数值
G	kN	100	C_d	—	2
B	m	1.7	ρ_w	kg/m^3	1 037
L	m	6	A_m	m^2	10
C_b	kPa	3	v_w	m/s	0.15
φ	°	0.8	V_m	m^3	20
k_m	mm	36	C_m	—	0.4
h	%	15	k_c	kN/m^3	0.95
λ	—	0.67	k_φ	kN/m^2	1 528.43
ω	—	2.5	g	m/s^2	9.8

通过代入表 1 参数进行仿真，可获得 ε 与坡度 α 之间的定量关系 $\varepsilon = f(\alpha)$，该函数关系是后续构建代价地图的直接依据。

采矿车坡面行驶时间特性图如图 1 所示，坡度小于 5°时，ε 值近似为 1；坡度为 5°~10°时，ε 值随坡度增大而显著上升，此区域为需付出额外代价的可通行区域；坡度超过 10°时，ε 值急剧增大至不可接受范围。上述动力学模型通过时间代价系数 $\varepsilon(\alpha)$ 映射至栅格代价地图，并作为路径规划算法中时间代价项的核心输入，实现动力学约束向路径搜索过程的直接传递。

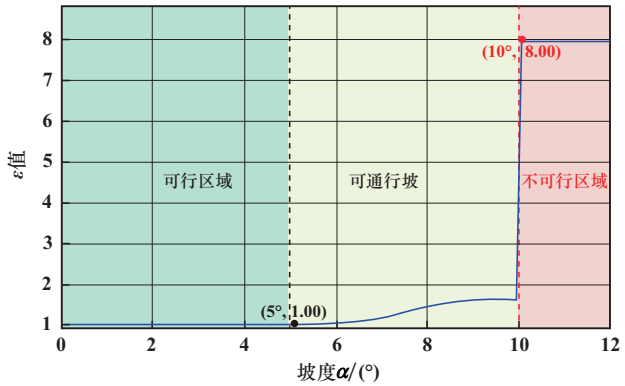


图 1 采矿车坡面行驶时间特性图

Fig. 1 Characteristics of slope-traveling time of mining vehicle

2 新型多约束改进 A* 路径规划算法

多约束改进 A* 路径规划算法的核心创新是将车辆的动力学约束与运动学约束深度嵌入至路径搜索与后处理平滑两个阶段，并引入自适应代价权重机制，从而在复杂的多目标优化空间中生成综合性能更优且切实可行的行驶路径。

2.1 启发式搜索函数设计

所提算法的总体框架旨在超越单一距离最优的传统搜索模式。其核心思想是在路径规划的全局搜索阶段，动态评估候选路径的行驶时间成本与能量消耗成本，实现多维度代价的同步优化；在获得初始路径后，通过一个两阶段的精细后处理流程，对路径进行几何简化与运动学合规性平滑，确保生成的轨迹不仅能被车辆跟踪，且符合其最小转弯半径等物理限制。

传统 A* 算法代价函数为 $f(n) = g(n) + h(n)$，其中 $g(n)$ 代表从起点到当前节点 n 的实际代价，$h(n)$ 代表从当前节点 n 到目标节点的估计代价。为满足深海采矿的特定约束，对其进行多维度扩展，设计新的代价函数如下：

$$f(n) = g_d(n) + \omega_t \cdot g_t(n) + \omega_e \cdot g_e(n) + h(n) \tag{10}$$

式中：$g_d(n)$ 表示从起点到节点 n 累计的实际几何路径长度，通过累加相邻节点间的欧氏距离获得；$g_t(n)$ 表示累计的时间代价，其值为路径上所有经过栅格的时间代价系数 $\varepsilon(\alpha_{ij})$ 之和，直接关联动力学模型预测的通行时间；$g_e(n)$ 表示累计的越坡能量损耗代价；ω_t 与 ω_e 分别为时间代价与能量代价的自适应权重系数，是本算法的关键创新之一。

为引导采矿车平缓行驶，规避频繁的上下坡，定义代价 $g_e(n)$ 与路径高程变化绝对值相关，选取坡度相关形式作为代价 $g_e(n)$ 表达式，即：

$$g_e(n) = \sum (G \cdot l_{ij} \cdot \sin\alpha_{ij}) \tag{11}$$

式中:l_{ij}为路径段长度;α_{ij}为对应坡度。

传统的固定权重方法难以适应地形复杂度的变化。为实现权重自适应调整,定义时间权重函数为:

$$\omega_t(n)=\beta\cdot\left(\frac{1}{N}\right)\sum\alpha_{\mathrm{k}} \tag{12}$$

式中:β 为权重参数,通过离线仿真进行标定;α_{k}为从当前节点至目标节点连线方向上采样得到的坡度值;N 为采样点数。

对应地,定义能量权重为:

$$\omega_e(n)=1-\omega_t(n) \tag{13}$$

该设计使得算法在地形复杂时,自动赋予时间成本更高的权重,优先选择通行效率更高的路径;在地形平坦时,则侧重缩短几何距离与降低能耗,从而实现搜索策略的自适应调整。

2.2　两阶段路径后处理

由 A* 算法直接生成的路径通常是由栅格中心点连接而成的折线,存在冗余节点且不满足车辆连续转向的运动学约束。为此,提出一个两阶段的路径平滑策略。

第一阶段是基于几何与障碍物检测删除冗余节点。设原始路径为节点序列 $P=\{p_1,p_2,\dots,p_k\}$。从起点 p_1开始,依次检查当前节点 p_i到后续非相邻节点$p_j(j>i+1)$的连线 $L(p_i,p_j)$。若该线段不穿越任何障碍物,且其长度小于车辆在最小转弯半径限制下所能允许的最大直行段长度,则认为从 p_i可直接安全行驶至 p_j,从而删除 p_i与 p_j之间的所有中间节点。此步骤在保持路径无碰撞的前提下,大幅缩短路径长度,并得到一个由关键转向点构成的简化序列 $Q=\{q_1,q_2,\dots,q_{\mathrm{m}}\}$。

第二阶段是针对最小转弯半径约束的平滑拟合。对简化后的关键点序列 Q,在每个由 q_{s-1},q_s,q_{s+1}连续 3 点形成的拐角处,采用 3 次样条曲线或圆弧-直线组合的方式进行局部轨迹拟合。此过程的核心约束是确保拟合曲线的曲率半径不小于车辆的最小转弯半径 $R_{\min}$。通过迭代调整样条曲线的控制点或圆弧半径,可在满足曲率约束的前提下,生成 1 条在连接点处切线连续的光滑路径。该阶段确保了最终输出轨迹不仅几何平滑,而且严格符合车辆的机动能力,可直接用于跟踪控制。

2.3　参数自适应优化

算法中涉及权重参数,如 $R_{\min}$的余量系数与 β 等。为解决依赖经验设定固定参数的问题,提出一种基于离线仿真的参数自适应优化策略。在典型的模拟地形环境中,让算法在相关参数的合理区间内进行大量搜索,记录每条生成路径的多项性能指标,主要包括路径总长度 L_{road}、预估行驶总时间 T_{travel}、总能量代价 E 以及路径平滑度 S。根据这些数据,构建以(L_{road},T_{travel},E,S)为目标的多目标优化帕累托前沿。分析该前沿,可以得到一个非劣解集,直观展现不同参数设置下各性能指标间的权衡关系。工程师可以根据具体的任务需求,例如时间优先、能耗优先或平衡模式,从帕累托最优解集中选取相应的参数配置准则,从而使算法在不同应用场景下均能表现出最优的综合性能。新型路径规划算法框架如图 2 所示。

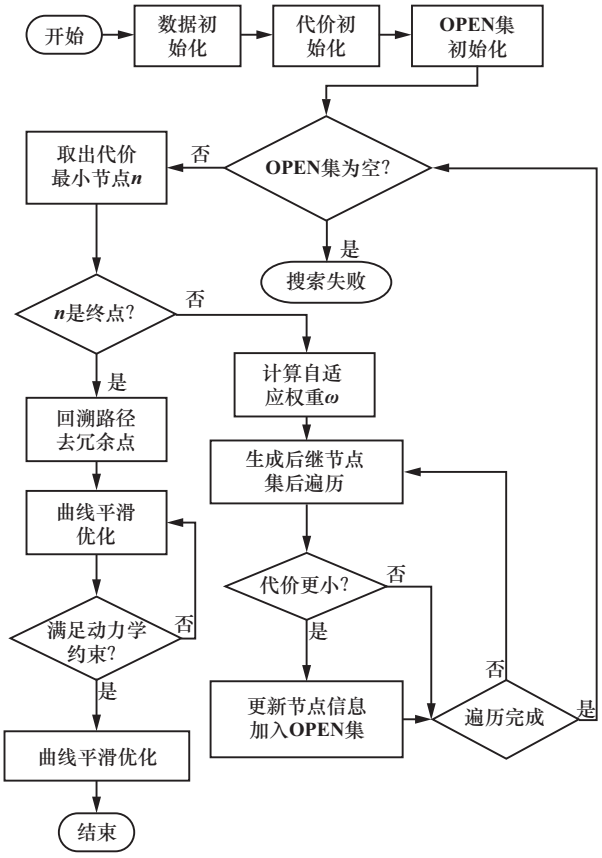


图 2　新型路径规划算法框架

Fig. 2　Framework diagram of path planning algorithm

3　仿真实验与结果分析

为验证所提出算法的有效性,在模拟深海矿区地形环境中进行仿真实验。首先,基于建立的动力学模型与代价量化方法,采用基于随机场叠加的地形生成方法,通过二维高斯随机场生成基础起伏地形。

$$z(x,y)=z_0+\sum A_i\cdot\exp\left[-\frac{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2}{\sigma_i^{\,2}}\right] \tag{14}$$

式中:A_i为随机幅值;σ_i为控制地形起伏尺度。随后叠加局部坡度扰动以模拟沟槽与突起结构,并通过梯度

计算得到坡度分布 $\alpha(x,y)$。最终生成 100×100 栅格地图,并划分为平地区、缓坡区(0°~5°)及陡坡障碍区(>10°),如图 3 所示。依据时间代价系数 ε 与坡度 α 的函数关系,进一步生成对应的地形坡度分布图(见图 4)及时间代价系数分布图(见图 5),作为路径规划算法的输入。

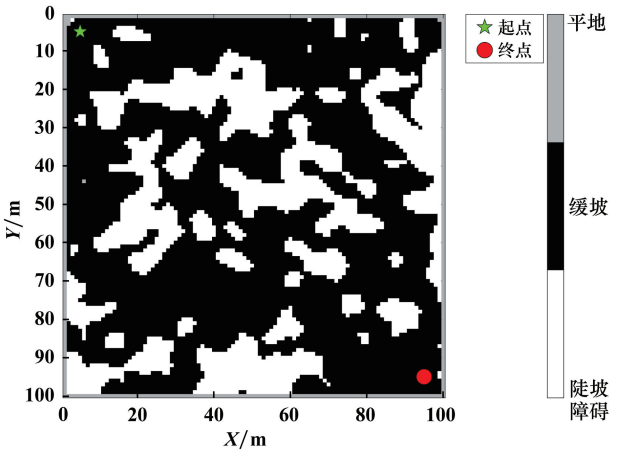


图 3 模拟海底矿区地形隔栅地图

Fig. 3 Grid map of simulated seabed mining area terrain

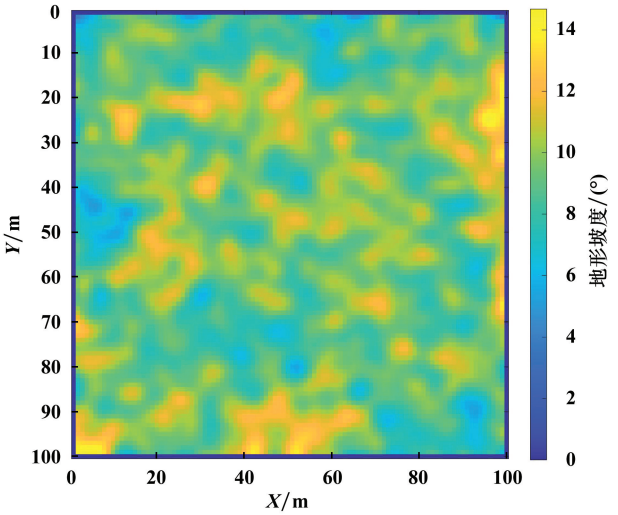


图 4 地形坡度分布图

Fig. 4 Distribution map of terrain slope

实验选取传统 A* 算法(算法 1)、固定权重(a = 0.005)的改进 A* 算法(算法 2)以及本文提出的新型多约束改进 A* 算法(算法 3)进行对比,算法 3 采用自适应权重机制,并应用两阶段路径后处理策略。自适应权重函数中的参数 β 通过离线仿真进行标定,在 $\beta \in [0.001, 0.02]$ 范围内进行网格搜索,综合考虑多指标平衡,最终选取相应的 β 作为本文仿真参数。3 种算法在同一地图上,从固定起点到终点进行路径规划。路径平滑过程如图 6 所示。

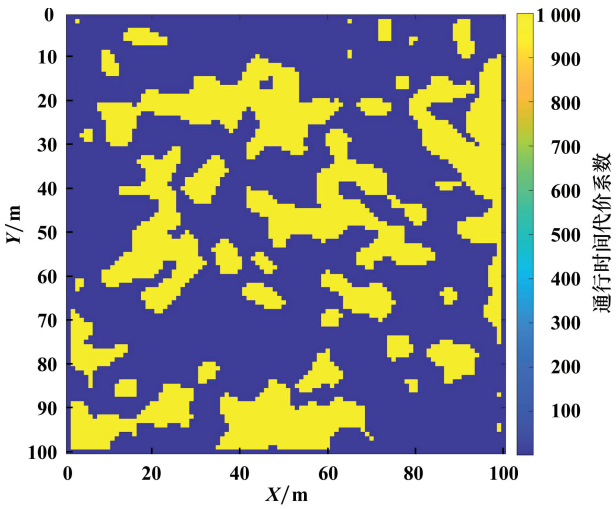


图 5 时间代价系数分布图

Fig. 5 Distribution map of time cost coefficient

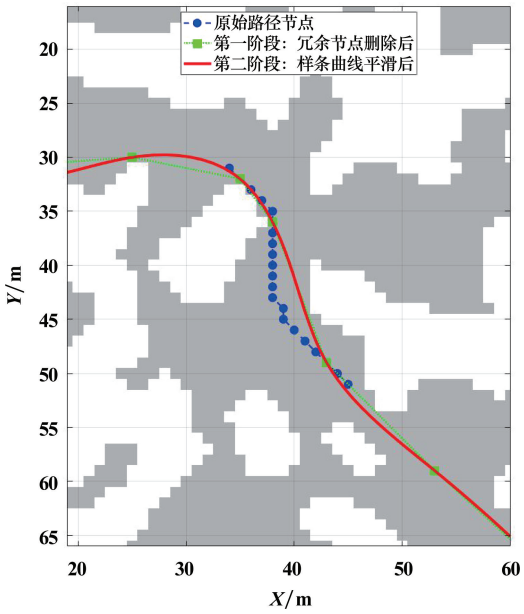


图 6 路径平滑过程

Fig. 6 Path smoothing process

图 6 中,第一阶段冗余节点删除后,路径节点数从原始的 120 个大幅减少至 13 个;第二阶段经过满足最小转弯半径约束的曲线平滑,最终生成了连续可导的平滑路径。

规划路径的对比如图 7 所示。算法 1 规划的路径转折较多,贴近障碍边缘;算法 2 的路径有所改善;算法 3 生成的路径最为平缓顺畅。

为定量评估 3 种算法的性能,按不同坡度比例再另外生成 2 种海底地形工况,总共 3 种不同复杂程度的海底地形工况进行对比分析,其中工况 1 为复杂工况,工况 2 为简单工况,工况 3 为中等工况。各算法关键指标对比结果如表 2 所示。

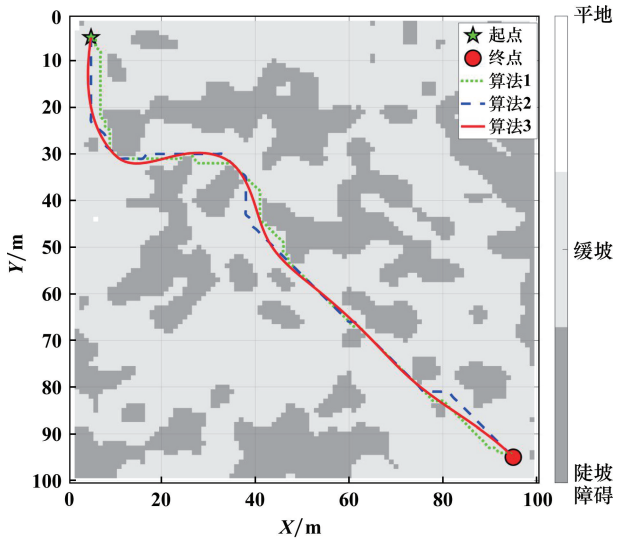


图 7　规划路径对比

Fig. 7　Comparison of planned paths

表 2　各算法关键指标对比结果

Table 2　Comparison results of key indicators among various algorithms

工况	算法	路径长度/m	行驶时间代价	能量消耗代价	总转向角/rad	规划时间/s	拓展节点数
1	算法 1	146.09	35 565	36 565	35.165	0.056	2 298
	算法 2	145.52	21 493	22 816	19.997	0.037	2 420
	算法 3	141.45	2 943.3	3 071.2	4.6	0.062	2 208
2	算法 1	131.96	17 822	19 306	17.416	0.032	1 137
	算法 2	131.77	17 783	19 244	16.56	0.024	1 489
	算法 3	129.18	2 013	2 178.6	2.46	0.034	1 663
3	算法 1	139.06	26 408	27 807	33.34	0.049	1 961
	算法 2	139.04	38 893	39 894	24.27	0.030	1 973
	算法 3	136.29	10 144	10 298	9.25	0.053	1 977

3 种算法在不同工况下均能完成有效的全局路径搜索,其中算法 3 在 3 种工况下的路径长度分别为 141.45、129.18 和 136.29 m,均实现了最短路径,且行驶时间代价和能量消耗代价方面均显著低于算法 1 和算法 2,表现出明显优势。这主要得益于算法 3 在代价函数中引入地形坡度、行驶时间和能量消耗等约束,并通过自适应权重机制优化搜索过程,使路径能够有效避开陡坡障碍区。经两阶段路径平滑处理后,路径节点数量明显减少,轨迹更加连续平滑。算法 3 的总转向角显著小于算法 1 和算法 2,并能够满足采矿车最小转弯半径等运动学约束,提高了路径的可执行性。在计算效率方面,算法 3 的规划时间略高于算法 1 和算法 2,扩展节点数在部分工况下有所增加,这源于自适应权重机制在多重约束下为寻找更优路径而扩大了搜索范围,进行了更多节点搜索。综合 3 种工况的搜索计算来看,算法 3 能够在复杂海底地形环境中获得更加平滑且综合代价更低的规划路径。

4　结语

1) 构建的多代价函数与自适应权重机制能够有效提升路径规划质量。算法将基于动力学模型的时间代价与反映地形起伏的能量代价引入搜索过程,并根据地形复杂度动态调整权重,使路径在长度、行驶时间和能量消耗之间实现较为合理的权衡,从而降低车辆行驶时间与能耗。

2) 提出的两阶段路径后处理策略提高了路径的可行性。通过冗余节点删除简化路径结构,并在此基础上引入最小转弯半径约束进行曲线平滑,使生成路径更加连续、平滑,能够满足深海采矿车的运动学约束。

3) 综合性能对比结果表明,本文算法在保证路径长度合理的前提下,相较于算法 1 和算法 2,可显著降低预估行驶时间和能量消耗,同时生成平滑且可执行的路径,整体效率能够满足工程应用需求。

参考文献(References):

[1] 任显豪,刘莉红,魏定邦,等. 基于 GERIS 准则的深海多金属结核采集方式比较评估研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):26-32.
REN Xianhao, LIU Lihong, WEI Dingbang, et al. Comparative evaluation of deep-sea polymetallic nodule collection technologies based on GERIS criteria[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(6):26-32.

[2] 刘成军,李满红,郑皓,等. 国际海底矿区竞争格局与应对策略[J]. 矿冶工程, 2025,45(4):8-13.
LIU Chengjun, LI Manhong, ZHENG Hao, et al. Competitive landscape and coping strategies for international seabed exploration areas[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(4):8-13.

[3] LIU Z H, LIU K, CHEN X G, et al. Deep-sea rock mechanics and mining technology: State of the art and perspectives[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2023,33(9):1083-1115.

[4] 张明,郑皓,双志,等. 新型深海多金属结核非连续采矿作业系统研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):6-12.
ZHANG Ming, ZHENG Hao, SHUANG Zhi, et al. A new type of discontinuous mining system for deep-sea polymetallic nodules[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):6-12.

[5] 刘少军,刘畅,戴瑜. 深海采矿装备研发的现状与进展[J]. 机械工程学报, 2014,50(2):8-18.
LIU Shaojun, LIU Chang, DAI Yu. Status and progress on researches and developments of deep ocean mining equipments[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014,50(2):8-18.

[6] 戴瑜,刘少军. 深海采矿整体系统动力学建模及联动开采作业过程快速仿真分析[J]. 机械工程学报, 2012,48(9):79-88.
DAI Yu, LIU Shaojun. Establishment of the dynamic model of the total deep ocean mining system and fast simulation of its integrated operation process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012,48(9): 79-88.

(下转第 53 页)

[24] JONES D O B, KAISER S, SWEETMAN A K, et al. Biological responses to disturbance from simulated deep-sea polymetallic nodule mining[J]. PLoS One, 2017,12(2):e0171750.

[25] PAULIKAS D, KATONA S, ILVES E, et al. Life cycle climate change impacts of producing battery metals from land ores versus deep-sea polymetallic nodules[J]. Journal of Cleaner Production, 2020,275:123822.

[26] ALVARENGA R A F, PRéAT N, DUHAYON C, et al. Prospective life cycle assessment of metal commodities obtained from deep-sea polymetallic nodules[J]. Journal of Cleaner Production, 2022,330:129884.

[27] JAECKEL A, ARDRON J A, GJERDE K M. Sharing benefits of the common heritage of mankind: Is the deep seabed mining regime ready?[J]. Marine Policy, 2016,70:198-204.

[28] VAN NIJEN K, VAN PASSEL S, BROWN C G, et al. The development of a payment regime for deep sea mining activities in the Area through stakeholder participation[J]. The International Journal of Marine and Coastal Law, 2019,34(4):571-601.

[29] SHEN H. A critical assessment of the International Seabed Authority's implementation of the common heritage of mankind principle from the perspective of benefit-sharing regime[J]. International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics, 2023,23(3):355-371.

[30] 阮建平,黄辉平. 美国推进海底矿产资源开发的政策动向、主要动因与影响[J]. 太平洋学报, 2025,33(12):61-74.
RUAN Jianping, HUANG Huiping. The U. S. policy in seabed mineral resources development: Trends, motivations and impacts[J]. Pacific Journal, 2025,33(12):61-74.

[31] RODINELIUSSEN R. Norway's quest for deep sea minerals and a green transition: A lucrative industry or empty promises to attract capital?[J]. Ethnos, 2026:1-15.

[32] ROBB S, LILY H, PECORARO A. Effective control and state sponsorship in deep seabed mining[J]. Marine Pollution Bulletin, 2024,209: 117119.

[33] ZHANG Q, CHEN X, LUAN L, et al. Technology and equipment of deep-sea mining: State of the art and perspectives[J]. Earth Energy Science, 2025,1(1):65-84.

[34] MUÑOZ-ROYO C, OUILLON R, EL MOUSADIK S, et al. An in situ study of abyssal turbidity-current sediment plumes generated by a deep seabed polymetallic nodule mining preprototype collector vehicle[J]. Science Advances, 2022,8(38):eabn1219.

[35] GAZIS I Z, DE STIGTER H, MOHRMANN J, et al. Monitoring benthic plumes, sediment redeposition and seafloor imprints caused by deep-sea polymetallic nodule mining[J]. Nature Communications, 2025,16:1229.

[36] SITLHOU L, CHAKRABORTY P. Comparing deep-sea polymetallic nodule mining technologies and evaluating their probable impacts on deep-sea pollution[J]. Marine Pollution Bulletin, 2024,206:116762.

[37] 黄博,王健,李友训,等. 深海矿产资源勘探开发产业创新发展短板与对策[J]. 中国矿业, 2021,30(10):32-37.
HUANG Bo, WANG Jian, LI Youxun, et al. Weakness and solutions of deep-sea mineral resources exploration and development[J]. China Mining Magazine, 2021,30(10):32-37.

[38] 杨震,刘丹. 中国国际海底区域开发的现状、特征与未来战略构想[J]. 东北亚论坛, 2019,28(3):114-126.
YANG Zhen, LIU Dan. Current situation, characteristics, and future strategic vision of China's international seabed area development[J]. Northeast Asia Forum, 2019,28(3):114-126.

[39] 王国荣,黄泽奇,周守为,等. 深海矿产资源开发装备现状及发展方向[J]. 中国工程科学, 2023,25(3):1-12.
WANG Guorong, HUANG Zeqi, ZHOU Shouwei, et al. Current status and development direction of deep-sea mineral resource exploitation equipment[J]. Strategic Study of CAE, 2023,25(3):1-12.

引用本文:周娜,毕致玮,袁健,等. 深海采矿国际规则演进与中国应对策略[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):46-53.
ZHOU Na, BI Zhiwei, YUAN Jian, et al. Evolution of international rules for deep-sea mining and China's countermeasures[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):46-53.

(上接第 45 页)

[7] 张正. 海底采矿车路径跟踪和点镇定行走控制研究[D]. 长沙:中南大学, 2013.
ZHANG Zheng. Study of path tracking and point stabilization driving control for seabed mining vehicle[D]. Changsha: Central South University, 2013.

[8] 张敏. 基于模糊神经网络的海底采矿车路径跟踪行走控制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
ZHANG Min. Research on path tracking and walking control of underwater mining vehicles based on fuzzy neural networks [D]. Changsha: Central South University, 2010.

[9] CHEN Y H, WU H Y, SUI Q R, et al. Optimal path planning based on A* algorithm for submarine mining vehicle[J]. MATEC Web of Conferences, 2020,309:04006.

[10] 杨长兵. 基于深海钴结壳采矿车的路径规划方法研究[J]. 现代电子技术, 2024,47(11):113-117.
YANG Changbing. Research on path planning method based on deep-sea cobalt crust mining vehicle[J]. Modern Electronics Technique, 2024,47(11):113-117.

[11] KAWABATA K, MA L, XUE J R, et al. A path generation method for automated vehicles based on Bezier curve[C]// 2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Wollongong, 2013:991-996.

[12] SONG R, LIU Y C, BUCKNALL R. Smoothed A* algorithm for practical unmanned surface vehicle path planning[J]. Applied Ocean Research, 2019,83:9-20.

引用本文:彭帷杰,王臣,苏泷德,等. 融合多代价约束与自适应平滑的深海结核采矿车路径规划方法[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):40-45.
PENG Weijie, WANG Chen, SU Longde, et al. A path planning method integrating multi-cost constraints and adaptive smoothing for deep-sea polymetallic nodule mining vehicle[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):40-45.