基于融合 RRT 算法和人工势场法的深海采矿车路径规划研究①

崔乔宇，彭赛锋，郑皓，王蕊
（长沙矿冶研究院有限责任公司 深海矿产资源开发利用技术国家重点实验室，湖南 长沙 410012）

摘　要：针对深海采矿车全局路径规划问题，提出融合快速扩展随机树（RRT）与人工势场法（APF）的改进算法。基于采矿车运动学模型，通过目标偏向策略优化 RRT 采样机制，引入自适应斥力系数改进势场函数，提升避障性能与目标可达性；并在两种不同工况下进行仿真验证。结果表明，工况 1（复杂环境）中，RRT*-APF 改进算法较 RRT* 算法搜索时间缩短 73.1%、扩展节点数减少 50.7%，路径长度从1 542.35 m缩短至 1 486.16 m，更适用于复杂环境；工况 2（简单环境）中，RRT-APF 改进算法较传统 RRT 算法搜索时间缩短 67.4%、扩展节点数减少 52.6%，路径长度从 973.58 m 缩短至 910.27 m，更适用于简单环境。

关键词：深海采矿；采矿车；路径规划；快速扩展随机树；人工势场法；斥力系数；避障
中图分类号：TD857　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.01.002
文章编号：0253-6099（2026）01-0007-10

Path Planning for Deep-Sea Collector Vehicles Based on Integration of RRT Algorithm and Artificial Potential Field Algorithm

CUI Qiaoyu, PENG Saifeng, ZHENG Hao, WANG Rui
(*State Key Laboratory of Exploitation and Utilization of Deep-Sea Mineral Resources, Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co., Ltd., Changsha* 410012, *Hunan, China*)

Abstract: An improved algorithm combining Rapidly-Exploring Random Trees (RRT) and Artificial Potential Field (APF) was proposed for obtaining an overall path planning for deep-sea collector vehicles. Based on the kinematic model of the collector vehicle, the RRT sampling mechanism was optimized by a target-biased strategy, and an adaptive repulsive coefficient was introduced to improve the potential field function, thereby enhancing obstacle avoidance and target reachability.Verification was carried out by simulation under two different working conditions. The results show that in Condition 1 (complex environment), the RRT*-APF algorithm has its searching time shortened by 73.1%, the number of expanded nodes reduced by 50.7%, and the path length shortened from 1 542.35 m to 1 486.16 m compared to the RRT* algorithm, being more suitable for complex environments. In Condition 2 (simple environment), the RRT-APF algorithm has its searching time shortened by 67.4%, the number of expanded nodes reduced by 52.6%, and the path length shortened from 973.58 m to 910.27 m compared to the traditional RRT algorithm, being more suitable for simple environments.

Key words: deep-sea mining; collector vehicle; path planning; Rapidly-Exploring Random Trees (RRT); Artificial Potential Field (APF); repulsive coefficient; obstacle avoidance

深海采矿车是深海矿产资源开采技术系统的核心执行装备，承担海底矿产的探测、采集与转运等关键作业，是实现深海矿产资源规模化开采的核心载体。海底作业环境极端复杂，存在地形崎岖、地质条件多变、海底沉积物松软等突出问题，给采矿车的稳定行驶、精准避障与连续作业带来严峻工程挑战；在实际矿物开采过程中，采矿车还常常面临狭窄通道、障碍物密集区域、设备分布密集作业区等复杂场景，或需满足快速转

① **收稿日期**：2025-10-21
基金项目：国家重点研发计划（2022YFC2806905）；山东省重点研发计划（2021CXGC010707）；湖南省科技创新计划（2022RC3003）
作者简介：崔乔宇（2000—），男，湖北安陆人，硕士研究生，主要研究方向为深海采矿车路径规划。E-mail：1297332259@qq.com

场的作业需求,这就要求其能够在极短时间内高效、安全地抵达目标区域并完成自主作业。在此背景下,路径规划作为采矿车作业管控的核心技术环节,直接决定深海采矿的作业效率、设备运行安全与能耗控制水平,是破解海底复杂环境及各类作业场景难点的关键抓手。因此,研究适用于深海采矿车的优化路径规划算法,对推动深海矿产资源规模化、安全化开采具有重要意义,已成为国内外深海采矿领域的研究焦点[1-5]。

全局最优路径规划作为深海采矿车路径规划的关键技术,依据环境建模数据为采矿车提供全局最优路径,确保其能够高效、安全地完成作业[6]。常见的深海采矿车全局路径规划算法[7-8]包括 A* 算法和快速扩展随机树(RRT)算法等,其中 RRT 算法因其适用于高维空间路径探索,符合深海环境的复杂特性而得到广泛研究[9]。然而,RRT 算法在复杂环境中存在搜索路径质量较差和计算效率较低的问题,需要进一步优化[10]。近年来,国内外学者通过不同方法对 RRT 算法搜索策略进行了改进,提高了采矿车路径规划的效率。如通过构建启发式函数[11],提升了采矿车路径的平滑性,通过优化采样策略改进 RRT* 算法[12],加快了路径收敛速度。此外还有学者提出了融合不同算法对 RRT 算法进行改进的思路,例如融合人工势场法(APF)与动态参数的采矿车路径规划算法[13],以及构建多目标优化数学模型的采矿车路径规划算法[14]等,这些改进算法显著提升了深海采矿车路径的避障性能。

本文针对深海采矿车的全局路径规划问题,结合采矿车运动学模型,提出了一种融合 RRT 算法与人工势场法的改进算法。该算法优化路径生成过程,引入目标偏置策略,减少无效探索,提高路径质量,增强采矿车的行驶平稳性和作业效率。

1 采矿车运动学模型

深海矿产资源开采技术系统如图 1 所示。

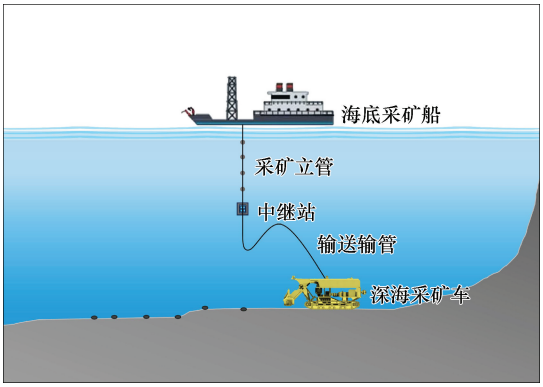


图 1 深海矿产资源开采技术系统

Fig. 1 Deep-sea mineral resource exploitation system

以采矿车的质心(COM)为原点建立采矿车的坐标系,CENTER 表示采矿车的几何对称中心,ICR 表示采矿车运动的旋转中心,采矿车运动学模型如图 2 所示。采矿车前进方向为 X 轴正向,垂直于左侧为 Y 轴正向。质心位于车辆的几何纵向对称线上。

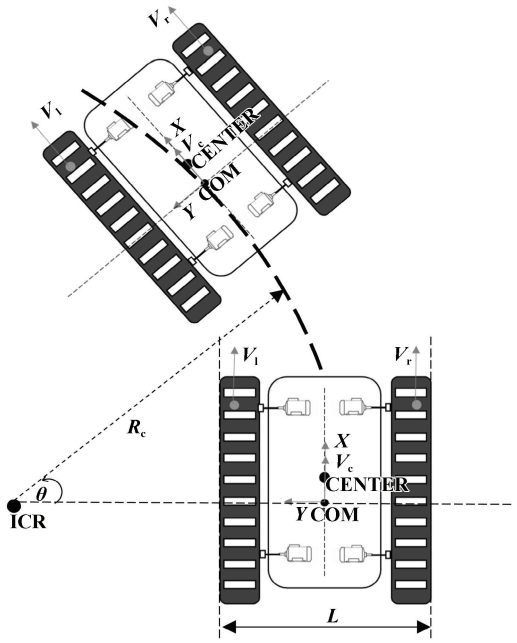


图 2 采矿车运动学模型

Fig. 2 Kinematic model of collector vehicle

根据数学计算[15],可以得到:

$$R_c = \frac{(V_l + V_r)}{2(V_r - V_l)}L \tag{1}$$

式中:R_c 为采矿车的旋转半径;L 为采矿车的履带宽与车轨距的和;V_l 为左履带线速度;V_r 为右履带线速度。

履带车转向运动学模型可以类比于两轮差速车模型,由左右履带的速度差和正反转来实现转向功能。采矿车的转向运动学方程可表示为:

$$\begin{cases} \theta(t) = \dfrac{2\int_0^t (V_r - V_l)\,\mathrm{d}t}{L} = \dfrac{2(V_l - V_r)}{L}t \\ x(t) = \dfrac{\int_0^t (V_l + V_r)\cos\theta \mathrm{d}t}{2} = R_c \sin\theta(t) \\ y(t) = \dfrac{\int_0^t (V_l + V_r)\sin\theta \mathrm{d}t}{2} = R_c[1 - \cos\theta(t)] \end{cases} \tag{2}$$

式中:θ 为采矿车沿 ICR 转向时的转向角;t 为采矿车的运动时间。

系统的控制输入由 V_l 和 V_r 决定,定义角速度 ω 为:

$$\omega = \frac{2(V_l + V_r)}{L} \tag{3}$$

则采矿车的运动方程可用非线性状态方程表示:

$$\begin{cases} \dot{x} = V_c\cos\theta \\ \dot{y} = V_c\sin\theta \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \tag{4}$$

转换为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_c \\ \omega \end{bmatrix} \tag{5}$$

将式(3)代入式(5)得到:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dfrac{V_l + V_r}{2} \\ \dfrac{2(V_l - V_r)}{L} \end{bmatrix} \tag{6}$$

最终状态空间方程为:

$$\dot{\boldsymbol{X}} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{\cos\theta}{2} & \dfrac{\cos\theta}{2} \\ \dfrac{\sin\theta}{2} & \dfrac{\sin\theta}{2} \\ \dfrac{2}{L} & -\dfrac{2}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_l \\ V_r \end{bmatrix} \tag{7}$$

在局部工作点如直线行走时(θ=0)线性化状态空间方程可以得到:

$$\dot{\boldsymbol{X}} = \boldsymbol{A}X + \boldsymbol{B}U \tag{8}$$

其中:

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -V_c\sin\theta \\ 0 & 1 & V_c\cos\theta \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{2}\cos\theta & \dfrac{1}{2}\cos\theta \\ \dfrac{1}{2}\sin\theta & \dfrac{1}{2}\sin\theta \\ -\dfrac{1}{L} & -\dfrac{1}{L} \end{bmatrix} \tag{10}$$

2　算法改进策略

2.1　RRT 算法与 RRT* 算法简介

RRT 算法在路径规划时,将起点作为随机树扩展的根节点,通过在采矿车运动空间随机生成节点并扩展树的方式实现路径规划。RRT 算法扩展节点如图 3 所示。

RRT 算法从起点开始,在采样空间通过随机采样生成节点 X_{rand},在搜索树中找到距离 X_{rand} 最近的节点 X_{near},计算 X_{rand} 与 X_{near} 的距离,并沿着这两点的连接线方向扩展生成新节点 X_{new}。如果新节点 X_{new} 不与障碍物相交,则将新节点 X_{new} 加入搜索树中,否则丢弃该节点。持续进行该过程,如果 X_{new} 到达目标区域或满足预设的终止条件,则结束采样并生成相对应的路径;否则,重复以上步骤,直至找到可行路径或达到最大迭代次数。RRT 算法流程如图 4 所示。

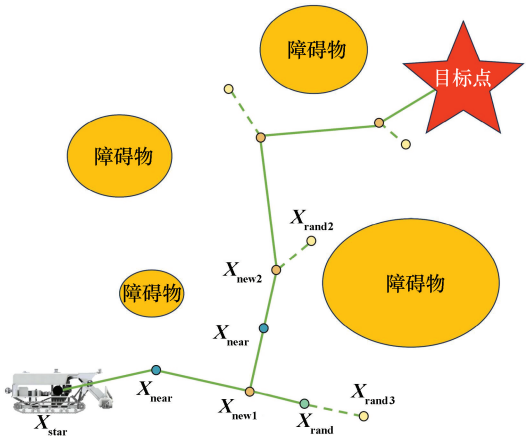


图 3　RRT 算法扩展节点示意

Fig. 3　Schematic diagram of extended nodes of RRT algorithm

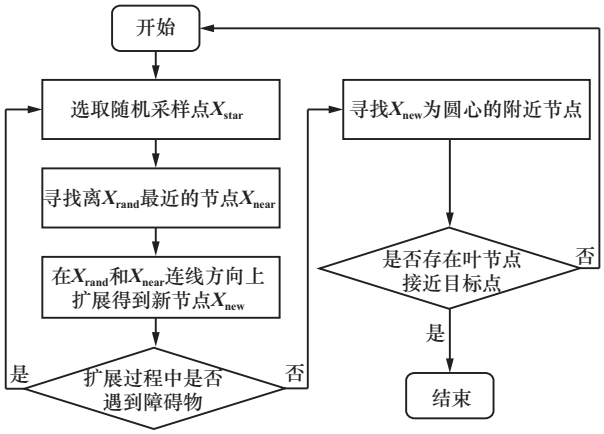


图 4　RRT 算法流程

Fig. 4　Flowchart of RRT algorithm

RRT* 算法在 RRT 算法的基础上进行了 2 项改进,即重新选择父节点和节点重连接。RRT* 算法节点扩展如图 5所示。

重新选择父节点,要求新节点 X_{new} 考虑预设半径 r 范围内的邻近节点,计算起点与该节点的距离,然后选择距离最小的节点作为新节点的父节点。新创建的节点被选为父节点后,测量该节点与圈内其他节点之间的距离,若测量距离小于节点的初始距离,节点就会与新生成的节点重新连接。RRT* 算法流程如图 6 所示。

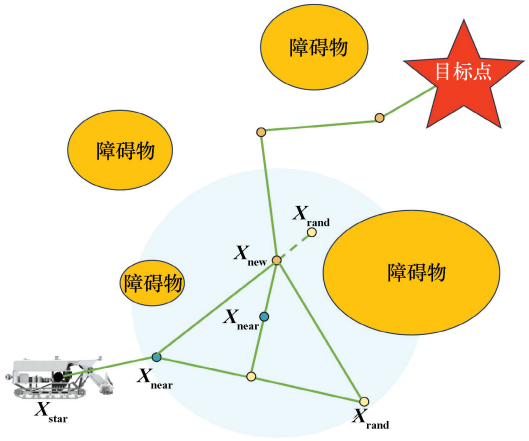


图 5 RRT* 算法节点扩展示意

Fig. 5 Schematic diagram of extended nodes of RRT* algorithm

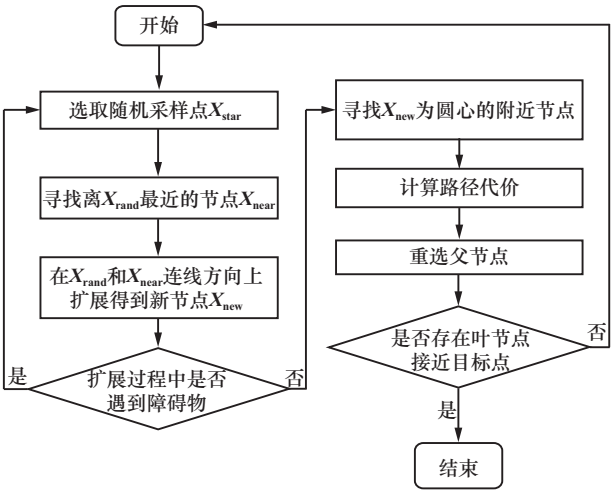


图 6 RRT* 算法流程

Fig. 6 Flowchart of RRT* algorithm

相比 RRT 算法，RRT* 算法能够快速找到初始路径，随着采样点的增加达到最优路径，但是 RRT* 算法随机采样的策略和 RRT 算法一样，会导致算法计算时间长等问题。因此，引入人工势场法解决此问题。

2.2 改进的人工势场法

人工势场法的基本思想[15]是在采矿车的运动空间构建一个虚拟的势场，目标点被视为虚拟的“引力源”，产生吸引采矿车向其靠近的虚拟力场；障碍物则被视为“斥力源”，产生推动采矿车远离的虚拟排斥力场。这种分布构建了一个势场环境，模拟采矿车在该势场中受到“力”作用，从而在路径搜索中自主避障并向目标前进。目标点产生的引力场 U_{att} 与采矿车和目标点之间的距离成正比，其计算公式为：

$$U_{att} = \frac{1}{2}k_{att} \cdot d^2 \tag{11}$$

式中：d 为目标点与当前点之间的距离；k_{att} 为基础引力系数，表示在单位距离情况下目标点对采矿车路径搜索所施加的吸引力。障碍物产生的斥力场 U_{rep} 与采矿车和障碍物之间的距离相互作用，共同引导目标朝着终点采样，两者的关系为：

$$U_{rep} = \begin{cases} \frac{1}{2}k_{rep} \cdot \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{d_0}\right)^2 & d_{obs} < d_0 \\ 0 & d_{obs} \geq d_0 \end{cases} \tag{12}$$

式中：d_{obs} 是障碍物与采矿车位置间的欧氏距离；d_0 为斥力势场的有效距离；k_{rep} 为斥力系数，表示人工势场中障碍物对采矿车的排斥力。

传统人工势场法存在两个局限，一是目标点不可达，即当采矿车接近目标区域时，目标点的吸引力可能过于微弱，而障碍物的排斥力过强，最终使采矿车无法进入目标区域；二是局部过度优化，当采矿车到达某一特定位置后，所受合力为零，无法继续向目标点前进。

为解决传统人工势场法在采矿车路径规划中目标点不可达的问题，对人工势场法进行改进，对新的采样点 X 添加排斥力 $T(X)$ 和引力 $G(X)$ 改变采矿车在该点处受到的合力，在此基础上，在原有的斥力函数中引入自适应斥力系数 k_r，调节障碍物的排斥力，使得采矿车在接近目标点时受到的斥力逐渐减小，同时使得目标点的合势场全局最小，让采矿车能够成功抵达目标点。合力可以表示为：

$$F(X) = R(X) + T(X) + G(X) \tag{13}$$

式中：$F(X)$ 为采矿车路径搜索中的随机树在搜索过程中确定新节点的合力函数；$R(X)$ 为采矿车新的位置点的随机生长函数；$T(X)$ 为障碍物斥力函数；$G(X)$ 为目标引力函数。各函数计算公式[16]为：

$$T(X) = \begin{cases} 0 & d_{obs} > d_s \\ \rho k_r \left(\frac{1}{d_{obs}} - \frac{1}{d_s}\right) \frac{1}{d_{obs}^2} \frac{1}{\| X_{near} - X_{obs} \|} & d_{obs} \leq d_s \end{cases} \tag{14}$$

$$G(X) = k_{att} \times \frac{1}{\| X_{goal} - X_{near} \|} \vec{v}(X) \tag{15}$$

$$Rd(X) = k_r \times \frac{1}{\| X_{goal} - X_{near} \|} \vec{w}(X) \tag{16}$$

式中：ρ 为步长；d_s 为障碍物影响的作用范围，表示障碍物对路径影响的安全阈值距离；$\vec{v}(X)$ 为指向当前节点的单位向量；$\vec{w}(X)$ 为指向目标的单位向量；$\| X_{goal} - X_{near} \|$ 为采矿车位置节点 X_{near} 和目标节点 X_{goal} 的欧氏距离的绝对值。

自适应斥力系数 k_r 计算公式为：

$$k_r = k_{r0} \cdot \left(1 + \frac{d_s - d_{obs}}{d_s}\right) \tag{17}$$

式中 k_{r0}为基础斥力系数,表示默认情况下障碍物的影响力大小,一般默认为 1。

当采矿车靠近障碍物时,k_r增大,排斥力增大,可以确保采矿车快速远离障碍物,减少碰撞风险。当采矿车远离障碍物时,k_r逐渐恢复至默认值 k_{r0},可以防止障碍物对采矿车的排斥力过强,影响采矿车朝目标方向前进。通过归一化处理,k_r实现连续变化,避免了突变带来的轨迹不稳定问题。

在 RRT* 算法中引入改进的人工势场法,加快 RRT* 算法随机树的搜索速度,以目标点吸引力和周围障碍物排斥力的合力引导节点生长,使新节点具有目标导向性,并能有效提升算法的收敛速度,但是改进 RRT* 算法依然存在容易陷入局部最小值的问题。为了解决这一问题,提出了一种基于自适应人工势场的随机树生长方法,其具体步骤如下。

步骤 1:获得采矿车路径规划位置扩展节点 X_{new1}。

步骤 2:根据改进的自适应势场函数,计算扩展节点 X_{new1} 所受到的总合力 $F(X)$,包括目标点吸引力 $G(X)$ 和障碍物排斥力 $T(X)$,使用平行四边形法则计算合力 $F(X)$ 的方向。

步骤 3:若 $F(X)\neq 0$,说明当前节点未陷入局部最小值,直接进入步骤 4。若 $F(X)=0$,则说明当前节点受到的吸引力和排斥力相互抵消,以该节点为圆心、以 L 为半径,设置虚拟半圆,通过圆弧线绕行的方式扩展新的节点 X_{new2}逃离局部最小值,同时还能保证路径的平滑。

步骤 4:在 X_{new2}合力方向上扩展 X_{rand},使其朝着目标点前进,并确保路径的平滑性。若扩展过程中遇到新的障碍物,则重新计算合力方向,并调整 X_{new2}的生长路径,以避开障碍物。

步骤 5:对最终生成的路径进行仿真验证,分析路径的可行性、安全性以及优化效果,确保采矿车能够顺利避障并达到目标点。

改进后的节点扩展图如图 7 所示。

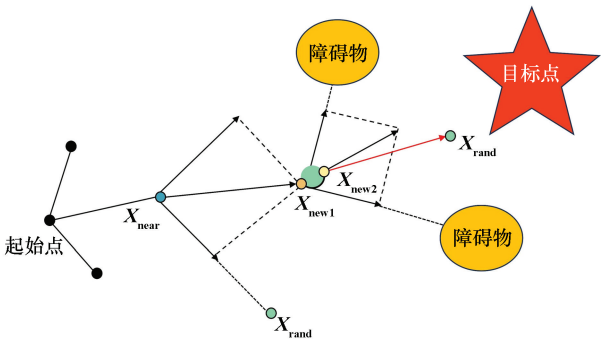


图 7　改进后节点扩展图

Fig. 7　Improved node extension graph

2.3　采矿车避障策略

在采矿车路径规划中,避障策略需考虑其自身尺寸与障碍物之间的位置关系,避免采矿车与障碍物碰撞。为确保安全避障,需要对障碍物边界进行膨胀处理,即沿法线方向扩展轮廓 R_f,实质是扩展障碍物边界,为采矿车预留足够安全空间,避免运动过程中发生碰撞,提高路径规划的可靠性。障碍物边界膨胀处理示意图如图 8 所示。

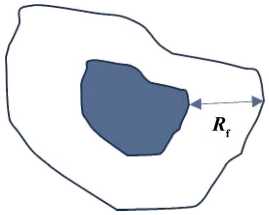


图 8　障碍物边界膨胀处理示意图

Fig. 8　Schematic diagram of obstacle boundary inflation

障碍物影响作用范围 d_s 计算公式为:

$$d_s = R_f = R + R_s \tag{18}$$

式中:R 为采矿车的宽度;R_s 为膨胀系数,是满足车辆转向、防撞和定位要求的最小宽度,根据前期实验,R_s 值设置为车长的 0.5 倍。结合人工势场法中的斥力场,如果 $d_{obs}<R_s$,即采样点与障碍物的距离过近,系统会重新采样一个新的点 X^*_{rand}来避开障碍物,达到避障目的。

2.4　目标偏向采样策略

传统 RRT 算法采用随机采样扩展搜索树,可能导致部分采样点远离目标区域,影响算法收敛速度并增加计算量。为优化搜索效率,在 RRT 算法中引入目标偏向策略,即在每次采样时,以概率 p 生成偏向目标点的采样点,其余仍随机分布,在加快收敛的同时保持算法的多样性。该算法的工作流程如下:

1)设置目标偏向概率阈值 p_t,用于确定是否向目标状态偏置;

2)生成目标偏向概率值 p_r,该值介于 0~1;

3)选择状态,如果 $p_r>p_t$,生成一个随机状态 X_{rand},以增加探索空间的多样性;如果 $p_r\leq p_t$,则将目标点 X_{goal}作为采样点,加速向目标收敛。

通过这种方法,算法能够在一定程度上避免在搜索空间中迷失方向,尤其是在复杂的环境中,并保持一定的探索性,同时有助于更快收敛到目标节点。将目标偏向概率值 p_r设置为与障碍物距离相关的函数,假设障碍物对 p_r的影响因子为 α,则有:

$$p_r = \frac{1}{1+\alpha\cdot d_{obs}} \tag{19}$$

其中：

$$\alpha = \frac{A_{abs}}{A_{map}} \tag{20}$$

式中：A_{abs}是障碍物投射在二维平面的面积；A_{map}是采矿区域的二维平面面积。

改进后的算法流程如图 9 所示。

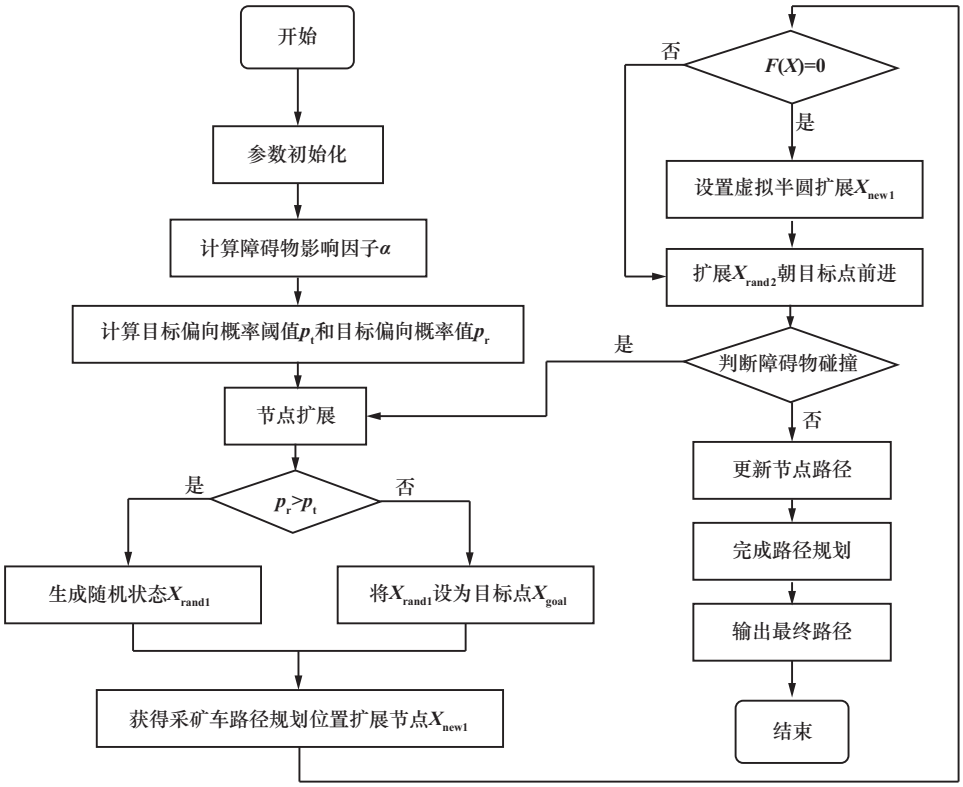


图 9 改进后算法流程

Fig. 9 Flowchart of improved algorithm

3 算法仿真与分析

仿真实验在 MATLAB R2022b 环境下进行，使用 MATLAB 路径规划工具函数、自定义函数脚本等模块。仿真平台搭建于一台配备 Intel Core i7-8700 处理器（主频 3.20 GHz）、32 GB 运行内存的 Windows 10 工作站上，确保了复杂环境下的仿真计算效率与稳定性。仿真环境包括地图构建模块、路径规划模块、车辆运动学模型模块。地图环境由用户自定义生成，障碍物设置通过矩阵布置实现。路径规划部分基于改进 RRT 算法，在 MATLAB 脚本中实现节点采样、树结构生成、路径生成与优化功能。

3.1 采矿区域地图与参数设置

采用栅格法将三维图形转化为二维图形，构建海底地图模型。采矿区域三维地形图如图 10 所示。设置了 5 个障碍物（黑色）与 3 个不可通行区域（灰色）。使用1 000 m×1 000 m 的二维平面模拟海底环境，采矿区域二维栅格化地形图如图 11 所示。

算法相关的参数设置如表 1 所示。算法中的目标

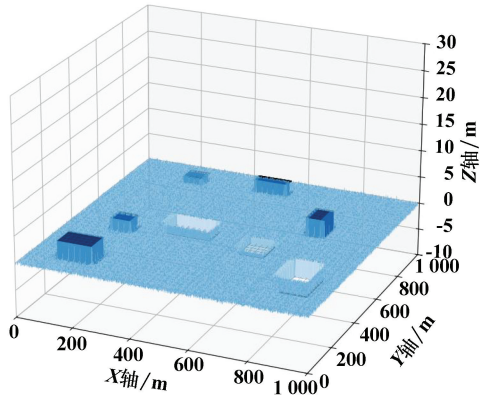


图 10 采矿区域三维地形图

Fig. 10 3D maps of mining area

偏向概率、自适应斥力系数等为可变参数，根据节点采样不同调整。

3.2 算法仿真与结果分析

针对传统 RRT 算法和 RRT* 算法与本文提出的改进算法在模拟矿区地形图中进行采矿车路径规划仿真对比，验证改进算法的有效性。设置了2组不同起

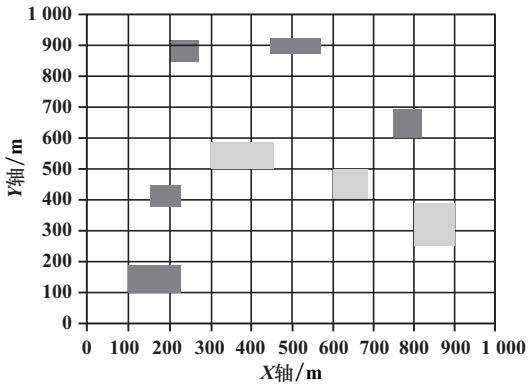


图 11　采矿区域二维栅格化地形图

Fig. 11　2D rasterized topographic map of mining area

表 1　参数设置

Table 1　Parameter settings

参数	含义	数值
d_s	安全阈值	15 m
ρ	扩展步长	2 m
k_{att}	基础引力系数	1
k_{r0}	基础斥力系数	1
p_r	目标偏向概率值	(0,1)
L	采矿车带宽与车轨距合	5

始点(·)与目标点(☆)模拟实际开采的工况,工况 1(障碍物密集、通道狭窄的复杂环境)起始节点为(0,0)、目标节点为(950,950);工况 2(障碍物少的简单环境)起始节点为(500,300)、目标节点为(50,950)。仿真实验结果如图 12~13 所示。

实线表示最终规划路径(有效路径),虚线表示路径搜索过程中生成但未纳入最终路径的冗余路径(即无效路径)。这些无效路径由于采样点偏离目标、与障碍物产生碰撞等原因而被舍弃。

由图 12~13 可知,改进算法在路径规划性能上实现全面优化:

1) 路径平滑度大幅提升,有效减少采矿车方向调整与速度变化,降低能耗和运动控制难度。

2) 路径最优性更好,冗余路径减少,规划路径长度显著降低。

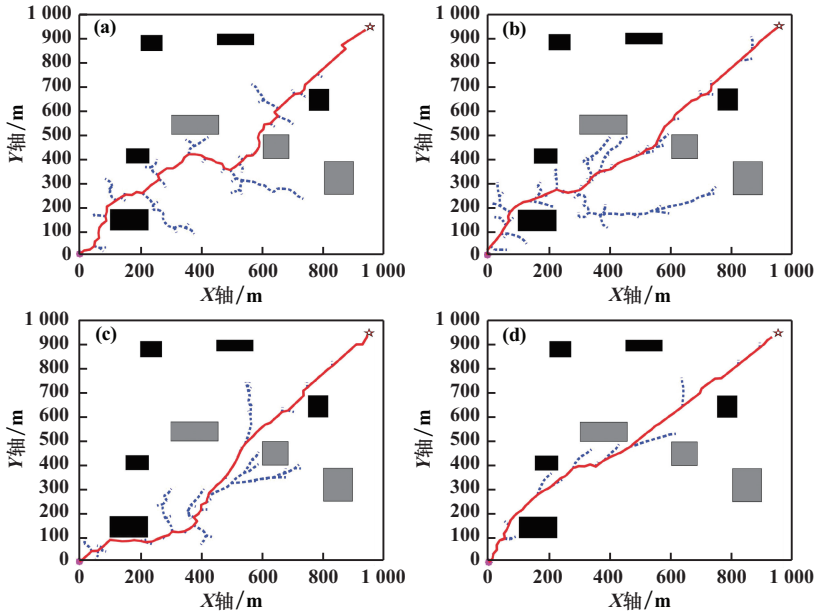
3) 搜索效率更高,通过目标节点直连判断、目标偏向策略增强导向性,减少无效采样与碰撞区域搜索,让采样点更具方向性。

在不同工况下改进算法表现优异:在障碍物密集、通道狭窄的工况 1 中,各方面性能均优于传统算法,适配复杂环境规划;在障碍物较少的工况 2 中,进一步提升搜索效率,强化路径规划有效性。核心原因是目标偏向策略与改进人工势场法能引导树向目标生长、路径避障且趋向目标,实现更快收敛,可有效适配复杂、开阔等不同工况的采矿车路径规划需求。

3.3　算法对比分析

在相同系数下,对改进算法和基本算法分别进行了 2 组工况下的 50 次模拟仿真,其平均路径长度、平均迭代次数、平均扩展节点数和搜索时间如图 14 和图 15所示。

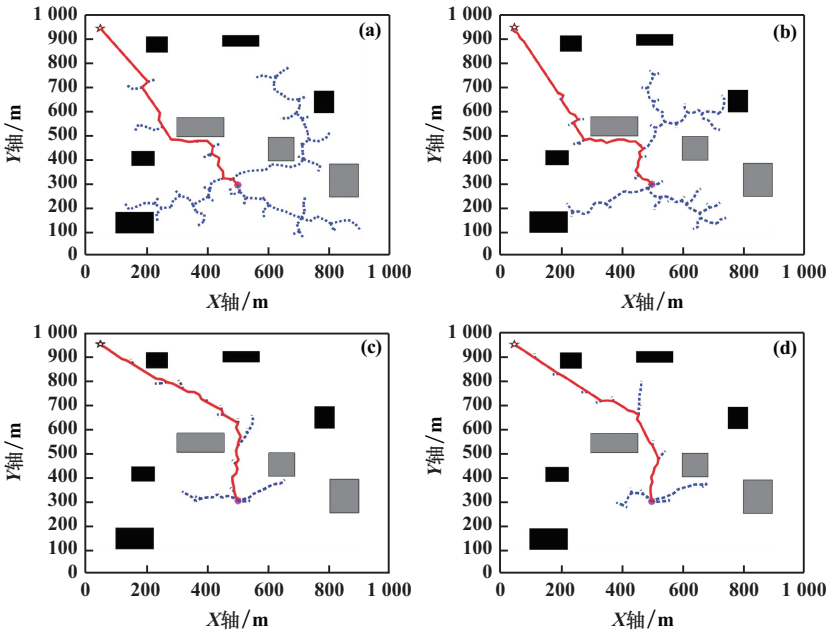
1) 路径优化:工况 1 中 RRT-APF 改进算法平均路径长度由改进前的 1 542.35 m 缩短至 1 507.74 m,工况2中由 973.58 m 缩短至 910.27 m。经过进一步



(a) RRT 算法; (b) RRT* 算法; (c) RRT-APF 改进算法; (d) RRT*-APF 改进算法

图 12　工况 1 算法仿真路径结果对比图

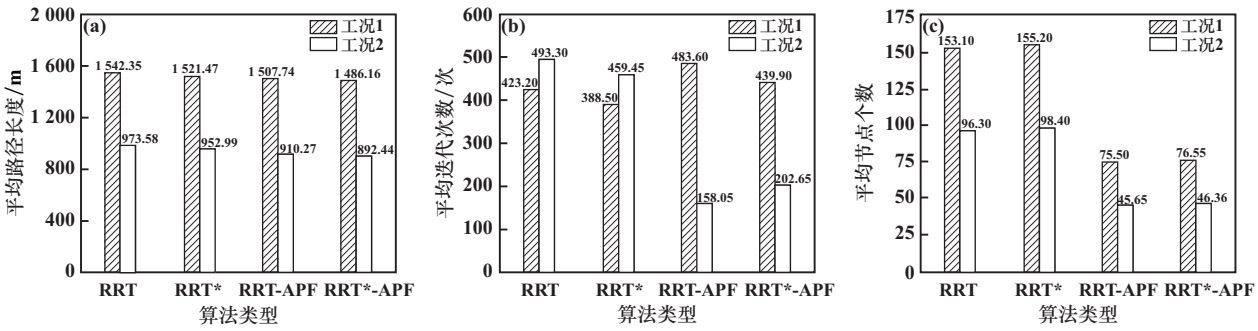
Fig. 12　Comparison of simulated path by different algorithms under Condition 1



（a）RRT 算法；（b）RRT* 算法；（c）RRT-APF 改进算法；（d）RRT*-APF 改进算法

图 13 工况 2 算法仿真路径结果对比图

Fig. 13 Comparison of simulated path by different algorithms under Condition 2



（a）平均路径长度；（b）平均迭代次数；（c）平均节点个数

图 14 算法仿真结果对比图

Fig. 14 Comparison of simulation results of different algorithms

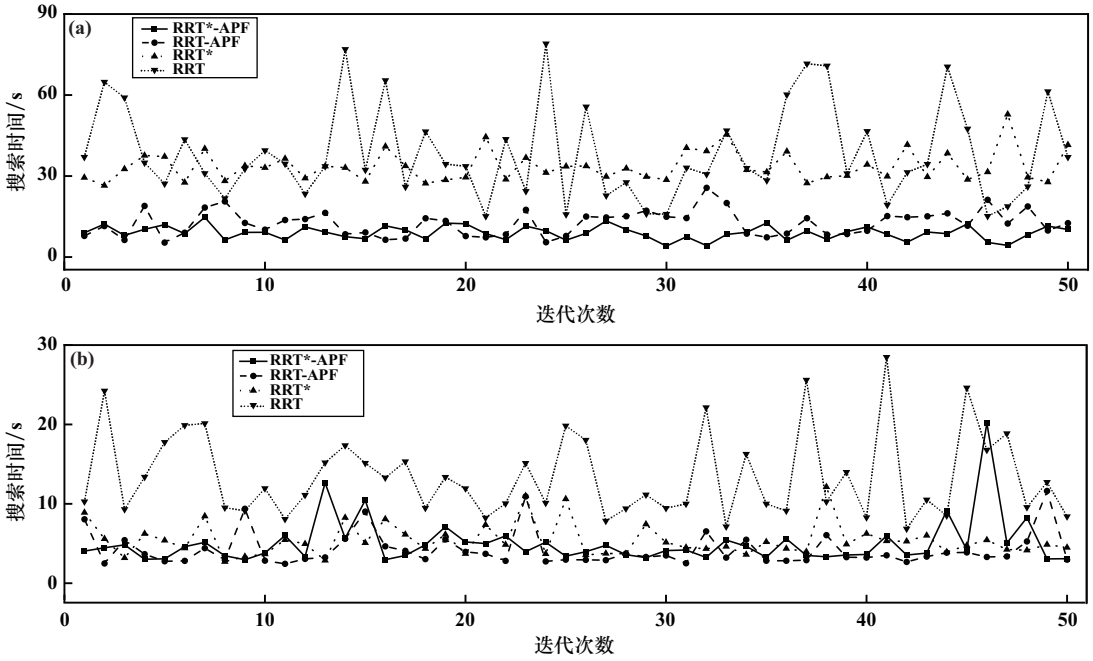
优化，RRT*-APF 改进算法的平均路径长度在工况 1、工况 2 中分别缩短至 1 486.16 m 和 892.44 m。整体来看，改进算法能够生成更短且更优的路径，提升了路径规划的合理性。

2）迭代次数优化：RRT-APF 和 RRT*-APF 改进算法在工况 1 中的平均迭代次数较改进前有所增加，而在工况 2 中的平均迭代次数分别减少了 68.0% 和 55.9%。这表明在特定环境下，改进算法能够更高效地收敛到目标点，提高搜索效率。迭代次数的增减是改进算法的自适应表现：工况 2 平均迭代次数大幅减少体现了目标偏向策略的效率提升；工况 1 平均迭代次数增加则是人工势场法在复杂环境下保障路径的质量。

3）节点数优化：从路径搜索的平均节点个数来看，在工况 1 和工况 2 中，RRT-APF 改进算法较改进前分别减少了 50.7% 和 52.6%，RRT*-APF 改进算法较改进前分别减少了 50.7% 和 52.9%。这说明改进算法在保证路径质量的同时，减少了无效节点的生成，使搜索过程更加精简高效。

4）搜索时间优化：改进算法搜索时间明显下降，在工况 2 中，RRT-APF 改进算法搜索时间减少了 67.4%；在工况 1 中，RRT*-APF 改进算法搜索时间减少了 73.1%。

RRT-APF 和 RRT*-APF 改进算法在路径优化、搜索效率和计算性能方面均优于传统算法，更契合深海采矿车的路径规划需求。



(a) 工况 1; (b) 工况 2

图 15　算法搜索时间对比图

Fig. 15　Comparison of searching time of different algorithms

在工况 1 下,RRT*-APF 改进算法生成更短、更平滑的路径,生成的路径质量较高,能够降低采矿车行驶转向调整频率和能耗。

在工况 2 下,RRT-APF 改进算法收敛更快,搜索效率显著提升,适用于计算资源受限、需要快速规划路径的场景。

总体而言,RRT*-APF 改进算法更适用于复杂环境,强调路径平滑与全局优化,而 RRT-APF 改进算法更适合高效搜索,满足实时性需求。

4　结论

1) 本文路径规划方法基于数学优化模型,核心解决深海采矿车作业中的路径规划问题,包括复杂地形避障、路径稳定性保障及减少设备磨损与功耗等关键问题。

2) 针对传统 RRT 算法随机性强、复杂环境适应性弱的缺陷,提出融合改进人工势场法与目标偏向策略的 RRT*-APF 和 RRT-APF 改进算法;仿真验证结果显示,RRT*-APF 改进算法更适用于复杂环境,在工况 1 中搜索时间和扩展节点数较传统 RRT* 算法分别减少 73.1%和 50.7%;RRT-APF 改进算法更适用于简单环境,在工况 2 中搜索时间和扩展节点数较传统 RRT 算法分别减少67.4%和 52.6%。改进算法可有效提升深海采矿车路径规划质量,为实际工程应用提供了更优解决方案。

3) 本文仅在二维平面环境中验证了算法有效性,存在两点不足:未考虑底质类型及土工力学参数对路径可行性的影响,未涉及三维地形特征。后续研究将引入地质与地形数据,构建真实三维环境模型,提升算法实际适应性与实用性。

参考文献(References):

[1] XIE Y C, LIU C Q, CHEN X G, et al. Research on path planning of autonomous manganese nodule mining vehicle based on lifting mining system[J]. Frontiers in Robotics and AI, 2023,10:1224115.

[2] 吴卓,郑皓,刘效松,等. 海底多金属硫化物采掘机构滚筒切削特性研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(6):1-5.
WU Zhuo, ZHENG Hao, LIU Xiaosong, et al. Cutting performance of drum cutter in mining mechanism for seabed polymetallic sulphide[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(6):1-5.

[3] 刘效松,彭赛锋,郑皓. 基于 Stanley 改进算法的深海集矿机自适应路径跟踪研究 [J/OL]. 哈尔滨工程大学学报, 1-9[2025-10-20]. https://link.cnki.net/urlid/23.1390.U.20251016.0936.004.
LIU Xiaosong, PENG Saifeng, ZHENG Hao. Research on adaptive path tracking for deep-sea mining collectors based on an improved Stanley algorithm[J]. Journal of Harbin Engineering University, 1-9[2025-10-20]. https://link.cnki.net/urlid/23.1390.U.20251016.0936.004.

[4] 彭赛锋. 海底沉积物原位土工力学测量装置测控系统设计与实现[J]. 矿冶工程, 2020,40(6):26-29.
PENG Saifeng. Design and implementation of measurement and control system of in-situ geomechanics measurement device for seabed

sediment[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020,40(6):26-29.

[5] 王伟,陈时平,张明,等. 深海采矿装备布放回收过程中脐带缆动力学响应特性研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(1):12-15.
WANG Wei, CHEN Shiping, ZHANG Ming, et al. Dynamic response characteristics of umbilical cable during launch and recovery of deep-sea mining equipment[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(1):12-15.

[6] LIU L X, WANG X, YANG X, et al. Path planning techniques for mobile robots: Review and prospect[J]. Expert Systems with Applications, 2023,227:120254.

[7] LAVALLE S M, KUFFNER J J. Rapidly-exploring random trees: Progress and prospects[M]. Boca Raton: A K Peters/CRC Press, 2001.

[8] KUFFNER J J, LAVALLE S M. RRT-connect:An efficient approach to single-query path planning[C]//Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings. San Francisco, 2002:995-1001.

[9] XING B W, WANG X, LIU Z C. The wide-area coverage path planning strategy for deep-sea mining vehicle cluster based on deep reinforcement learning[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024,12(2):316.

[10] 王硕,段蓉凯,廖与禾. 机器人路径规划中快速扩展随机树算法的改进研究[J]. 西安交通大学学报, 2022,56(7):1-8.
WANG Shuo, DUAN Rongkai, LIAO Yuhe. Research on improvement of rapidly exploring random tree algorithm in robot path planning[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022,56(7):1-8.

[11] 池志猛,李智刚,赵洋,等. 针对深海采矿车的遍历路径规划方法研究[J]. 矿业研究与开发, 2022,42(7):160-166.
CHI Zhimeng, LI Zhigang, ZHAO Yang, et al. Research on traversal path planning method for deep-sea mining vehicle[J]. Mining Research and Development, 2022,42(7):160-166.

[12] 郭玲玲,樊蓓蓓. 基于改进 RRT* 算法的深海采矿车局部路径规划算法[J]. 工业控制计算机, 2023,36(1):97-99.
GUO Lingling, FAN Beibei. Local path planning algorithm for deep-sea mining vehicle based on improved RRT* algorithm[J]. Industrial Control Computer, 2023,36(1):97-99.

[13] LIANG W X, LOU M, CHEN Z X, et al. An enhanced ant colony optimization algorithm for global path planning of deep-sea mining vehicles[J]. Ocean Engineering, 2024,301:117415.

[14] LU C Y, YANG J M, LEIRA B J, et al. Three-dimensional path planning of deep-sea mining vehicle based on improved particle swarm optimization[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023,11(9):1797.

[15] CUI C, WU S Y, CHEN X G. QuatAPF: Ssafety-aware and energy-efficient dynamic path planning and tracking control for deep-sea mining vehicles via a quatre-artificial potential field method[J]. Ocean Engineering, 2025,321:120236.

[16] 李金良,舒翰儒,刘德建,等. 基于改进 RRT 路径规划算法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(2):22-24.
LI Jinliang, SHU Hanru, LIU Dejian, et al. Path planning algorithm based on improved RRT[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2021(2):22-24.

引用本文:崔乔宇,彭赛锋,郑皓,等. 基于融合 RRT 算法和人工势场法的深海采矿车路径规划研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(1):7-16.
CUI Qiaoyu, PENG Saifeng, ZHENG Hao, et al. Path Planning for deep-sea collector vehicles based on integration of RRT algorithm and artificial potential field algorithm[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):7-16.

(上接第6页)

[8] KUMAR D, AMUDHA K, GOPAKUMAR K, et al. Air-lift pump systems for vertical solid particle transport: A comprehensive review and deep sea mining potential[J]. Ocean Engineering, 2024,297:116928.

[9] 王霞光. 不同固体颗粒介质下气力提升机理及性能研究[D]. 株洲:湖南工业大学, 2018.
WANG Xiaguang. Study on mechanism and performance based on different solids media for air-lifting[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2018.

[10] FUJIMOTO H, OGAWA S, TAKUDA H, et al. Operation performance of a small air-lift pump for conveying solid particles[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2003,125(1):17-25.

[11] ENANY P, SHEVCHENKO O, DREBENSTEDT C. Particle transport velocity in vertical transmission with an airlift pump[J]. Fluids, 2022,7(3):95.

[12] DU Y L, ZHU J Y, HAN X H, et al. Gas state equation and flow mechanism of gas-liquid two-phase flow in airlift pump system[J]. Physics of Fluids, 2024,36(5):055142.

[13] 刘磊. 深海采矿水力提升固液两相流动力学特性研究[D]. 上海:上海交通大学, 2019.
LIU Lei. Research on dynamic performance of solid-liquid two-phase flow in hydraulic transport in deep sea mining[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.

[14] 陈云,杜燕连,李萌,等. 旋转水力提升多金属结核运动特性数值模拟[J]. 矿冶工程, 2024,44(2):13-17
CHEN Yun, DU Yanlian, LI Meng, et al. Numerical simulation of characteristics of motion for polymetallic nodules in swirling flow during hydraulic lifting[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(2):13-17.

[15] 侯艳君,王庆辉,周甲伟,等. 基于 CFD-DEM 的气力输送变径管中颗粒流动特性分析[J]. 矿冶工程, 2023,43(6):6-10.
HOU Yanjun, WANG Qinghui, ZHOU Jiawei, et al. Flow characteristics analysis of particles in pneumatic conveying with tapered pipeline based on CFD-DEM[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(6):6-10.

引用本文:林海,杜燕连,符孟帝,等. 深海多金属结核在垂直管道气力提升系统中的运动特性模拟[J]. 矿冶工程, 2026,46(1):1-6.
LIN Hai, DU YanLian, FU Mengdi, et al. Research on motion characteristics of deep-sea polymetallic nodules in vertical pipeline of airlift system by numerical simulation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):1-6.