

文章编号: 1671-251X(2024)10-0147-06

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2024020050

# 基于 Dijkstra-ACO 混合算法的煤矿井下 应急逃生路径动态规划

卢国菊<sup>1</sup>, 史文芳<sup>2</sup>

(1. 山西能源学院 安全工程系, 山西 晋中 030600;

2. 太原科技大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 煤矿井下应急逃生路径规划需要根据煤矿井下环境的变化及时调整, 但传统方法依赖静态网络和固定权重而无法实现逃生路径规划适应井下环境动态变化。针对上述问题, 提出了一种基于 Dijkstra-ACO(蚁群优化)混合算法的煤矿井下应急逃生路径动态规划方法。基于巷道坡度和水位对逃生的影响分析, 建立了煤矿井下应急逃生最优路径动态规划模型, 实现逃生路径随巷道坡度、水位等环境变化而实时调整, 从而提高逃生效率和安全性。采用 Dijkstra-ACO 混合算法求解煤矿井下应急逃生最优路径动态规划模型, 即利用 Dijkstra 算法快速确定初始路径, 引入 ACO 算法寻找距离最短且安全性最高的逃生路径, 实现规划路径能够适应环境变化。搭建了模拟某煤矿多种巷道类型及其坡度、水位等参数的仿真环境, 开展了应急逃生路径动态规划实验。结果表明, 在 50 m×100 m, 100 m×200 m, 150 m×250 m 3 种不同尺寸的测试区域中, 基于 Dijkstra-ACO 混合算法规划的路径长度比基于 A\*算法和基于改进蚁群算法规划的路径长度缩短了 19% 以上, 同时避障率提高了 5% 以上。

**关键词:** 煤矿井下应急逃生; 路径动态规划; Dijkstra-ACO 混合算法; 蚁群优化算法

中图分类号: TD67

文献标志码: A

Dynamic route planning for emergency escape in coal mines using a Dijkstra-ACO hybrid algorithm

LU Guoju<sup>1</sup>, SHI Wenfang<sup>2</sup>

(1. Security Engineering Department, Shanxi Institute of Energy, Jinzhong 030600, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** Emergency escape route planning in coal mines must adapt promptly to the changing underground environment. Traditional methods, relying on static networks with fixed weights, lack the flexibility needed for real-time adjustments in response to dynamic underground conditions. To address this limitation, a dynamic route planning approach for coal mine emergency escape was proposed using a Dijkstra-ACO (ant colony optimization) hybrid algorithm. By analyzing the impacts of tunnel slope and water level on escape routes, an optimal route dynamic planning model for emergency escape in coal mines was developed. This model allowed for real-time adjustment of escape routes based on environmental changes in tunnel slope and water level, thereby improving escape efficiency and safety. The Dijkstra-ACO hybrid algorithm was employed to obtain the optimal route model, where the Dijkstra algorithm was used for rapid identification of an initial route, while the ACO algorithm refined the result to find the shortest and safest escape route, ensuring adaptability to environmental changes. A simulated coal mine environment was constructed, modeling various tunnel types and parameters, including slope, water level, to test the dynamic route planning approach. Results showed that in three test areas of varying sizes,

收稿日期: 2024-02-28; 修回日期: 2024-10-11; 责任编辑: 盛男。

基金项目: 山西省高等学校教学改革创新项目(J20221280)。

作者简介: 卢国菊(1988—), 女, 山西运城人, 讲师, 硕士, 研究方向为矿山安全, E-mail: lgj621461@yeah.net。通信作者: 史文芳(1986—), 女, 山西吕梁人, 讲师, 博士, 研究方向为矿井瓦斯防治, E-mail: 674618662@qq.com。

引用格式: 卢国菊, 史文芳. 基于 Dijkstra-ACO 混合算法的煤矿井下应急逃生路径动态规划[J]. 工矿自动化, 2024, 50(10): 147-151, 178.

LU Guoju, SHI Wenfang. Dynamic route planning for emergency escape in coal mines using a Dijkstra-ACO hybrid algorithm[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(10): 147-151, 178.



扫码移动阅读

i.e., 50 m×100 m, 100 m×200 m, and 150 m×250 m, the routes generated by the Dijkstra-ACO hybrid algorithm were over 19% shorter compared to those from the A\* algorithm and modified ACO algorithm, with an obstacle avoidance improvement of over 5%.

**Key words:** coal mine emergency escape; dynamic route planning; Dijkstra-ACO hybrid algorithm; ant colony optimization

## 0 引言

煤矿井下可能发生瓦斯爆炸、煤尘爆炸、水害、顶板事故、通道堵塞、有毒有害气体扩散等灾害<sup>[1]</sup>。传统的逃生路径规划多基于静态的矿井布局,无法有效应对事故发生后巷道变形、巷道底鼓、巷道坡度变化、水位变化、障碍物变化等动态变化<sup>[2]</sup>。因此,快速确定适应环境变化的逃生路径对于提高矿工在紧急情况下的逃生效率和生存概率至关重要。

在路径动态规划研究方面,黄昕等<sup>[3]</sup>组建了火灾场景关键指标的时程数据库,将人体耐受性指标限值作为判定依据,进行可逃生区域识别和火灾场景动态重构,采用 A\* 算法识别逃生路径,完成疏散路径动态规划,但该方法给出的逃生路径比较复杂,不利于煤矿井下工作人员的应急逃生。曹祥红等<sup>[4]</sup>利用 A\* 算法提升初始信息素浓度,通过改进启发函数和路径平滑处理实现路径规划,但规划的路径较长,不利于井下人员在有限时间内及时到达安全区域。于丹等<sup>[5]</sup>以路径最短为原则,构建了煤矿井下避灾路径规划模型,采用 Dijkstra 算法求解,确定最优路径规划方案,但 Dijkstra 算法依赖预先定义的静态网络和固定权重,无法适应井下环境的动态变化。朱军等<sup>[6]</sup>通过导航网格动态生成算法实现了室内火灾逃生路径动态规划,但对环境中障碍物的避障能力不佳,不利于煤矿井下工作人员的应急逃生。

为提升在煤矿井下复杂多变环境下的路径规划效果,本文提出一种基于 Dijkstra-ACO(Ant Colony Optimization, 蚁群优化)混合算法的煤矿井下应急逃生路径动态规划方法。根据煤矿井下巷道内实体关系,考虑巷道坡度和水位对逃生行动的影响,建立煤矿井下应急逃生最优路径动态规划模型。采用 Dijkstra-ACO 混合算法求解最优路径动态规划模型,即先利用 Dijkstra 算法的高效性迅速确定 1 条初始逃生路径,再通过 ACO 算法对初始路径进行优化,从而确保矿工在紧急情况下能够迅速找到安全、可靠的逃生路径。

## 1 煤矿井下应急逃生路径动态规划

### 1.1 煤矿井下应急逃生最优路径动态规划模型

煤矿井下应急逃生路径动态规划主要涉及巷道、人员、设施等实体,将巷道中的每一段(即连接

各个节点的线段)抽象为一个网络边,网络边权重反映逃生的难易程度,2 条或多条巷道的交叉口实体抽象为网络节点。在路径规划过程中,算法优先选择权重小的网络边来确保逃生路径更安全、快捷。

网络边权重与应急逃生影响因素有关,如巷道内水位高度、巷道的长度和坡度等。巷道坡度直接关系到逃生者的行进速度和体力消耗,坡度较陡的巷道可能导致逃生速度减慢,增加体力负担,尤其是在紧急情况下,逃生者可能因体力不支而无法迅速撤离<sup>[7-9]</sup>。巷道内水位的高低直接影响到逃生路径的通行状况,高水位可能导致部分巷道被淹没,甚至完全阻断逃生通道,增加逃生难度和风险<sup>[10-12]</sup>。因此,重点考虑巷道坡度和巷道内水位对逃生的影响,并对其分配动态综合权重。

1) 巷道坡度。将巷道坡度转换为弧度制,利用反正弦函数将坡度转换为 0 到 1 之间的数值,并进行归一化处理,得到巷道坡度权重:

$$\omega_{s_{ij}} = \arcsin(c_i - c_j) \quad (1)$$

式中  $c_i$  和  $c_j$  分别为三维巷道网络拓扑中节点  $i$  和节点  $j$  对应的标高经归一化处理后的值。

2) 巷道内水位。巷道内水位权重为

$$\omega_h = \begin{cases} \frac{V}{WL} & \sigma = 0 \\ \sqrt{\frac{V \sin 2\sigma}{W}} & 0 < \sigma < 90^\circ, 0 \leq V \leq \frac{WH^2}{2 \tan \sigma} \\ H \cos \sigma + L \sin \sigma & 0 < \sigma < 90^\circ, \frac{WH^2}{2 \tan \sigma} < V < WHL \\ \frac{V}{WH} & \sigma = 90^\circ \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $V$  为巷道积水总量;  $\sigma$  为巷道坡度;  $W$  和  $H$  分别为巷道地面宽度和高度;  $L$  为水体在巷道内的纵向距离。

3) 网络边动态综合权重。网络边权重是在某一特定时刻或相对稳定的煤矿环境下根据巷道固有属性确定的,然而由于煤矿井下环境可能随时发生变化,所以需要对网络边权重进行动态调整。

网络边动态综合权重为

$$\omega_{ij} = A_s \omega_{s_{ij}} + A_h \omega_h \quad (3)$$

式中:  $A_s$  为巷道坡度的影响系数;  $A_h$  为巷道内水位的影响系数。

巷道坡度的影响系数表达式为

$$A_s = 1 + \alpha |\sin \sigma| \quad (4)$$

式中  $\alpha$  为巷道坡度的权重系数。

巷道内水位的影响系数表达式为

$$A_h = 1 + \beta \frac{\omega_h}{H} \quad (5)$$

式中  $\beta$  为巷道内水位的权重系数。

建立煤矿井下应急逃生最优路径动态规划模型,用于在给定起点和终点的情况下,找到一条动态综合权重和最小的逃生路径,即逃生难度最低。该模型目标函数为

$$\min \omega_{ij} = \min \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=2}^n (A_s \omega_{s_{ij}} + l_{ij} + A_h \omega_h) \quad (6)$$

式中:  $n$  为节点数量;  $l_{ij}$  为三维巷道网络拓扑中节点  $i$  到节点  $j$  之间网络边长度经归一化处理后的值。

## 1.2 Dijkstra-ACO 混合算法

Dijkstra 算法是一种典型的单源最短路径算法,用于在加权图中找到从单一源点到其他所有节点的最短路径<sup>[13-14]</sup>。然而, Dijkstra 算法主要基于局部信息(即当前节点到其邻接节点的距离)进行搜索,缺乏全局视野。ACO 算法是一种基于群体的启发式搜索算法,通过模拟蚂蚁在寻找食物过程中的信息素更新机制,能够在全局范围内搜索最优解<sup>[15]</sup>。因此,结合 Dijkstra 算法的局部搜索能力和 ACO 算法的全局搜索能力,求解煤矿井下应急逃生最优路径动态规划模型,具体流程如下:

1) 引入 Dijkstra 算法确定初始路径,并对全部参数进行初始化。

2) 引入 ACO 算法展开路径搜索,选择节点位置。

3) 当蚂蚁经过任意 1 条路径时,局部更新蚂蚁经过路径上的信息素。

$$\tau_{ij} = (1 - \rho) \tau_i + \sum_{a=1}^m \tau_{ij}^a \quad (7)$$

$$\tau_{ij}^a = \frac{Q}{l_a} S_a \quad (8)$$

式中:  $\tau_{ij}$  为蚂蚁经过节点  $i$  到节点  $j$  路径的信息素;  $\rho$  为信息素挥发率;  $\tau_i$  为蚂蚁在节点  $i$  的信息素;  $m$  为蚂蚁数量;  $\tau_{ij}^a$  为第  $a$  只蚂蚁经过节点  $i$  到节点  $j$  路径上的信息素;  $Q$  为信息素增强因子;  $l_a$  为第  $a$  只蚂蚁走过的路径长度;  $S_a$  为第  $a$  只蚂蚁走过的路径平滑度。

4) 假设蚂蚁已经到达终点,则进入步骤 5), 否则返回步骤 2)。

5) 对蚁群中蚂蚁搜索到的全部最优路径展开统计,将其按照取值大小排列,确定距离最短的路径,并以此为依据展开全局信息素更新<sup>[16-18]</sup>:

$$\Delta \tau_{ij}(t+1) = \frac{1}{l_{opt}} (1 - \rho) \tau_{ij}(t+1) \quad (9)$$

式中:  $\Delta \tau_{ij}(t+1)$  为  $t+1$  时刻信息素的变化量;  $l_{opt}$  为完成本次迭代后得到的最优路径长度。

6) 如果达到设定的迭代次数,则终止操作,同时输出模型的最优解<sup>[19-21]</sup>,即最优路径动态规划方案,否则返回步骤 2)。

## 2 实验分析

### 2.1 实验设置

选取某煤矿作为研究对象,设置蚂蚁数量为 10 只,信息素挥发率为 0.2,信息素增强因子为 1,启发式因子为 2,探索因子为 0.1。为模拟煤矿井下复杂多变的环境,设置煤矿巷道相关参数,见表 1。

表 1 煤矿巷道相关参数

巷道类型	巷道风速/(m·s <sup>-1</sup> )	巷道坡度/(°)	巷道水位/m
回风联络巷	15~20	60~90	0~0.5
进风巷	15~20	0	0~0.3
轨道大巷	0~5	90	0~0.5
胶带大巷	0~5	0~30	0~0.3
回风巷	10~15	0~90	0~0.5
采区联络巷	10~15	30~60	0~0.5

对于任意一条巷道,包含上下行 2 个方向。在上行方向,行走难度随坡度增加而增加;在下行方向,坡度低于 30°时,行走难度随坡度增加而下降,坡度不小于 30°时,行走难度随坡度增加而增加。

为便于分析,将煤矿巷道分布简化,如图 1 所示,其中包含 5 个动态障碍物,分别标注为①—⑤,可以模拟井下可能出现的突发情况,如设备故障、人员移动等。动态障碍物的位置和状态可以随时间变化,从而增加路径规划的难度和复杂性。

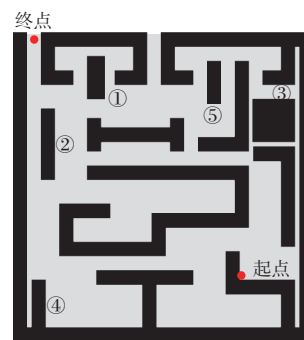


图 1 煤矿巷道分布

Fig. 1 Coal mine roadway distribution

### 2.2 评价指标

选取规划效果、路径长度及避障率作为评价指标。① 规划效果:从起点到安全出口的最佳路线,需

要综合考虑路径复杂度、转弯次数等因素。② 路径长度: 从起点到安全出口的规划逃生路径的长度。③ 避障率: 在规划的逃生路径上成功避开的障碍物数量与总障碍物数量的比值。

### 2.3 结果分析

分别采用 Dijkstra-ACO 混合算法、A\*算法<sup>[3]</sup>和改进 ACO 算法<sup>[4]</sup>对煤矿井下应急逃生路径进行动态规划, 结果如图 2 所示。可看出利用 A\*算法和改进 ACO 算法规划出的煤矿井下应急逃生路径比较复杂, 转弯次数较多, 不利于煤矿井下工作人员的应急逃生, 而 Dijkstra-ACO 混合算法规划出的煤矿井下应急逃生路径简单且平滑。

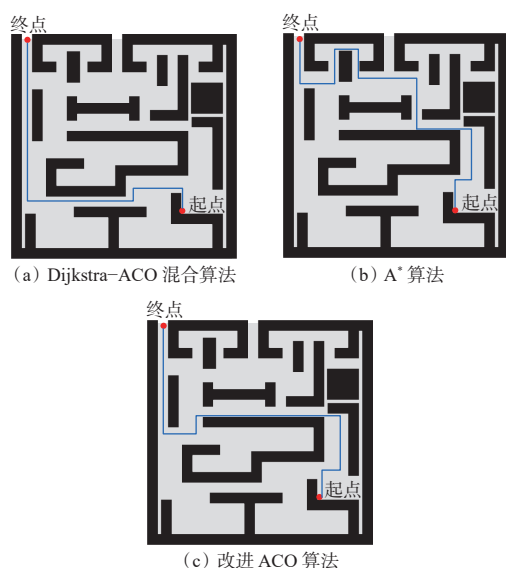


图 2 不同方法的煤矿井下应急逃生路径

Fig. 2 Emergency escape routes in coal mine of different methods

在 50 m×100 m, 100 m×200 m 和 150 m×250 m 3 种不同尺寸的目标区域内, 计算不同方法规划的逃生路径长度, 结果见表 2。可看出在不同尺寸的测试区域中, Dijkstra-ACO 混合算法在路径长度上优于 A\*算法和改进 ACO 算法。在 50 m×100 m 区域, Dijkstra-ACO 混合算法规划的路径长度为 125 m, 分别低于 A\*算法和改进 ACO 算法 29, 52 m; 在 100 m×200 m 区域, Dijkstra-ACO 混合算法规划的路径长度为 157 m, 分别低于 A\*算法和改进 ACO 算法 32, 53 m; 在 150 m×250 m 区域, Dijkstra-ACO 混合算法规划的路径长度为 176 m, 分别低于 A\*算法和改进 ACO 算法 29, 58 m。

不同方法的避障率结果如图 3 所示。可看出 Dijkstra-ACO 混合算法的避障率保持在 98% 左右, 高于 A\*算法和改进 ACO 算法。

### 3 结论

1) 将煤矿井下实体抽象为网络元素, 基于巷道

表 2 不同方法规划的路径长度

Table 2 Path lengths of different methods

测试区域尺寸/(m×m)	路径动态规划方法	路径长度/m
50×100	Dijkstra-ACO混合算法	125
	A*算法	154
	改进ACO算法	177
100×200	Dijkstra-ACO混合算法	157
	A*算法	189
	改进ACO算法	210
150×250	Dijkstra-ACO混合算法	176
	A*算法	205
	改进ACO算法	234

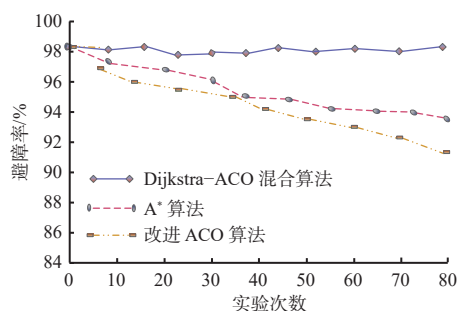


图 3 不同方法的避障率

Fig. 3 Obstacle avoidance rate of different methods

坡度和水位对逃生的影响分析, 以网络边动态综合权重之和最小为目标函数, 建立了煤矿井下应急逃生最优路径动态规划模型, 以求取适应环境变化、逃生难度最低的最优路径。

2) 将 Dijkstra 算法和 ACO 算法结合, 以求解煤矿井下应急逃生最优路径动态规划模型。利用 Dijkstra 算法快速确定初始路径, 利用 ACO 算法寻找距离最短且安全性最高的逃生路径, 兼顾了全局搜索和局部搜索。

3) 搭建模拟煤矿井下巷道、坡度、水位等实际情况的仿真环境, 开展了应急逃生路径动态规划实验。实验结果表明, 相较于基于 A\*算法和改进 ACO 算法的路径规划方法, 基于 Dijkstra-ACO 混合算法的煤矿井下应急逃生动态规划方法得到的路径长度缩短了 19% 以上, 且路径更加平滑、转弯更少, 同时避障率提高了 5% 以上。

### 参考文献(References):

- [1] 孙齐, 卞强, 童余德. 基于地磁匹配辅助导航的改进 A\*算法路径规划[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2023, 44(6): 696-703.  
SUN Qi, BIAN Qiang, TONG Yude. Path planning of improved A\* algorithm based on geomagnetic matching



- aided navigation[J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2023, 44(6): 696-703.
- [2] 王鹏, 朱希安, 王占刚, 等. 基于改进萤火虫算法的矿井水害避灾路径规划[J]. *中国矿业*, 2021, 30(6): 106-111.  
WANG Peng, ZHU Xi'an, WANG Zhangang, et al. Disaster avoidance path planning for mine floor based on improved firefly algorithm[J]. *China Mining Magazine*, 2021, 30(6): 106-111.
- [3] 黄昕, 靳健, 林作忠, 等. 基于 A\* 算法的深部地下空间火灾疏散路径动态规划[J]. *北京工业大学学报*, 2021, 47(7): 702-709.  
HUANG Xin, JIN Jian, LIN Zuozhong, et al. Dynamic evacuation path planning for fire disaster of deep underground space based on A\* algorithm[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2021, 47(7): 702-709.
- [4] 曹祥红, 杜薇, 魏晓鸽, 等. 一种用于火灾疏散路径动态规划的算法[J]. *消防科学与技术*, 2022, 41(9): 1237-1242.  
CAO Xianghong, DU Wei, WEI Xiaoge, et al. An algorithm for fire evacuation path dynamic planning[J]. *Fire Science and Technology*, 2022, 41(9): 1237-1242.
- [5] 于丹, 颜伟. 煤矿井下避灾路径规划研究综述[J]. *中国煤炭*, 2022, 48(2): 40-47.  
YU Dan, YAN Wei. Research overview on underground escape path planning in coal mine[J]. *China Coal*, 2022, 48(2): 40-47.
- [6] 朱军, 余平, 李维炼, 等. 基于导航网格的室内火灾逃生路径动态规划[J]. *西南交通大学学报*, 2020, 55(5): 1103-1110.  
ZHU Jun, SHE Ping, LI Weilian, et al. Dynamic planning method for indoor-fire escape path based on navigation grid[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2020, 55(5): 1103-1110.
- [7] 丁莹莹, 卜昌森, 连会青, 等. 基于仿真平台的矿井突水淹没路径和逃生路径规划[J]. *煤矿安全*, 2023, 54(5): 20-26.  
DING Yingying, BU Changsen, LIAN Huiqing, et al. Mine water inrush path and escape path planning based on simulation platform[J]. *Safety in Coal Mines*, 2023, 54(5): 20-26.
- [8] 符强, 宁永科, 纪元法, 等. 基于改进 RRT 与 DWA 融合算法的路径规划[J]. *计算机仿真*, 2023, 40(7): 429-435.  
FU Qiang, NING Yongke, JI Yuanfa, et al. Path planning based on improved RRT and DWA fusion algorithm[J]. *Computer Simulation*, 2023, 40(7): 429-435.
- [9] 朱佳莹, 高茂庭. 融合粒子群与改进蚁群算法的 AUV 路径规划算法[J]. *计算机工程与应用*, 2021, 57(6): 267-273.  
ZHU Jiaying, GAO Maoting. AUV path planning based on particle swarm optimization and improved ant colony optimization[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2021, 57(6): 267-273.
- [10] 廖慧敏, 朱宇倩, 陈子鹏. 一种基于 Dijkstra 算法的火灾动态疏散指示系统[J]. *安全与环境学报*, 2021, 21(4): 1676-1683.  
LIAO Huimin, ZHU Yuqian, CHEN Zipeng. A fire disaster dynamic evacuation indicating system based on the Dijkstra algorithm[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, 21(4): 1676-1683.
- [11] 左松涛, 毛占利, 范传刚, 等. 基于地铁站场景的改进型 Dijkstra 算法疏散路径规划研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2023, 20(5): 1624-1635.  
ZUO Songtao, MAO Zhanli, FAN Chuangang, et al. Evacuation path planning based on improved Dijkstra algorithm in metro station scene[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2023, 20(5): 1624-1635.
- [12] 赵娜, 陈越峰. 联合势场与蚁群算法的机器人路径规划[J]. *火力与指挥控制*, 2021, 46(7): 39-44.  
ZHAO Na, CHEN Yuefeng. Robot path planning algorithm based on combination of improved potential field and ant colony algorithm[J]. *Fire Control & Command Control*, 2021, 46(7): 39-44.
- [13] 张飞凯, 黄永忠, 李连茂, 等. 基于 Dijkstra 算法的货运索道路径规划方法[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2022, 52(6): 176-182.  
ZHANG Feikai, HUANG Yongzhong, LI Lianmao, et al. Planning method of freight ropeway path based on Dijkstra algorithm[J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2022, 52(6): 176-182.
- [14] 李文倩, 周到洋, 郑媛媛. 基于 Dijkstra 算法的地震灾害应急避难路径分析[J]. *地震研究*, 2022, 45(4): 653-661.  
LI Wenqian, ZHOU Daoyang, ZHENG Yuanyuan. Analysis on emergency evacuation route of the earthquake disaster based on the Dijkstra algorithm[J]. *Journal of Seismological Research*, 2022, 45(4): 653-661.
- [15] 任腾, 罗天羽, 李姝萱, 等. 面向冷链物流配送路径优化的知识型蚁群算法[J]. *控制与决策*, 2022, 37(3): 545-554.  
REN Teng, LUO Tianyu, LI Shuxuan, et al. Knowledge based ant colony algorithm for cold chain logistics distribution path optimization[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(3): 545-554.
- [16] 张志伟, 马小平, 白亚腾, 等. 基于改进 OpenPlanner 算法的移动机器人局部路径规划[J]. *工矿自动化*, 2023, 49(12): 40-46.  
ZHANG Zhiwei, MA Xiaoping, BAI Yateng, et al. Local path planning for mobile robots based on improved OpenPlanner algorithm[J]. *Journal of Mine Automation*, 2023, 49(12): 40-46.

(下转第 178 页)

- Technology, 2023, 43(6): 1079-1087.
- [12] 冯恒原, 李治刚, 朱芷涵, 等. 高瓦斯矿井综掘工作面粉尘运移规律及富集特征研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(10): 59-65.  
FENG Hengyuan, LI Zhigang, ZHU Zhihan, et al. Study on dust migration law and enrichment characteristics of fully-mechanized heading face in high gas mines[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(10): 59-65.
- [13] 周全超, 杨胜强, 蒋孝元, 等. 综掘工作面粉尘分布规律及通风除尘优化研究[J]. 工矿自动化, 2019, 45(11): 70-74, 92.  
ZHOU Quanchao, YANG Shengqiang, JIANG Xiaoyuan, et al. Research on dust distribution law and optimization of ventilation and dust reduction on fully mechanized heading face[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(11): 70-74, 92.
- [14] 宋淑郑, 屈亚龙, 荆斌. 基于 FLUENT 综采工作面风流-粉尘逸散规律探究[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(11): 79-83.  
SONG Shuzheng, QU Yalong, JING Bin. Study on the dispersion law of air flow and dust in fully-mechanized mining face based on FLUENT[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(11): 79-83.
- [15] NIE Wen, ZHANG Yilong, GUO Lidian, et al. Research on airborne air curtain dust control technology and air volume optimization[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 172: 113-123.
- [16] HAO Tianxuan, WANG Lei, WANG Zehua, et al. Research on dust migration and dust deposition rules of breathing zone in fully mechanized mining face[J]. *ACS Omega*, 2023, 8(42): 39143-39153.
- [17] ZHANG Wei, XUE Sheng, TU Qingyi, et al. Development and experimental study of a scaled model for dust dispersion in fully-mechanized mining face[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 429. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139576.
- [18] 张凯铭. 综掘工作面粉尘运移规律与风幕控尘除尘技术研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.  
ZHANG Kaiming. Research on dust migration law and air curtain dust control and dust removal technology in fully mechanized excavation face[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.
- [19] 程凯. 特长隧道通风参数优化及粉尘运移规律研究[J]. 铁道建筑技术, 2024(7): 144-148.  
CHENG Kai. Study on ventilation parameter optimization and dust migration rule of extra-long tunnel[J]. Railway Construction Technology, 2024(7): 144-148.
- [20] 于海里, 侯庆亮, 李敬国, 等. 风流扰动下煤炭装载冲击粉尘运移规律与抑尘技术研究[J]. 中国矿业, 2024, 33(2): 208-216.  
YU Haili, HOU Qingliang, LI Jingguo, et al. Study on the transport law of coal loading impact dust and dust suppression technology under airflow disturbance[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(2): 208-216.
- [21] ZHOU Gang, DUAN Jinjie, SUN Biao, et al. Numerical analysis on pollution law for dust and diesel exhaust particles in multi-ventilation parameter environment of mechanized excavation face[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, 157: 320-333.
- (上接第 151 页)
- [17] 江辉仙, 郝志兵. 洪涝演进中多目标应急避险路径算法优化及其应用[J]. 灾害学, 2022, 37(2): 64-70.  
JIANG Huixian, HAO Zhibing. Sample application and optimization of network path algorithms based on multi-objective programming in flood evolution[J]. *Journal of Catastrophology*, 2022, 37(2): 64-70.
- [18] 胡小兵, 袁莉燕, 李航, 等. 基于涟漪扩散算法的应急疏散路径优化方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(1): 253-261.  
HU Xiaobing, YUAN Liyan, LI Hang, et al. Optimization of emergency evacuation route based on ripple-spreading algorithm[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2024, 24(1): 253-261.
- [19] 康文文, 桂海霞. 基于改进鲸鱼算法的无人车应急物资配送路径优化[J]. 湖北民族大学学报(自然科学版), 2023, 41(2): 266-274.  
KANG Wenwen, GUI Haixia. Optimization of unmanned vehicle emergency supplies distribution based on improved whale algorithm[J]. Journal of Hubei Minzu University (Natural Science Edition), 2023, 41(2): 266-274.
- [20] 张明新, 王月春, 刘延锋, 等. 基于混合遗传算法的应急物资配送路径优化[J]. 物流技术, 2022, 41(12): 69-73.  
ZHANG Mingxin, WANG Yuechun, LIU Yanfeng, et al. Optimization of emergency supply distribution route based on hybrid genetic algorithm[J]. *Logistics Technology*, 2022, 41(12): 69-73.
- [21] 赵建有, 肖宇, 朱欣媛, 等. 考虑需求紧迫度的应急车辆路径优化方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(9): 27-34.  
ZHAO Jianyou, XIAO Yu, ZHU Xinyuan, et al. Route optimization method for emergency vehicles considering demand urgency[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(9): 27-34.