

文章编号: 1004-4051(2025)04-0126-11

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20241044

# 基于图结构的深部矿井突水逃生路径规划系统设计 与实现

陈玉华<sup>1,2</sup>, 孙帮涛<sup>3</sup>, 徐明飞<sup>1</sup>, 李东立<sup>3</sup>, 胡钰乾<sup>1</sup>,  
徐超<sup>1</sup>, 崔云昊<sup>1</sup>, 袁世冲<sup>4</sup>

(1. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏徐州 221116; 2. 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏徐州 221008; 3. 彝良驰宏矿业有限公司, 云南昭通 657600;  
4. 河北地质大学城市地质与工程学院, 河北石家庄 050031)

**摘要:** 深部矿井高承压水引发的突水灾害具有突发性强、致灾路径复杂等特点, 现有基于二维平面静态拓扑的逃生模型存在水流动态响应滞后、空间属性耦合不足等突出问题。为提升深部高承压水引发的突水灾害防治的时效性, 本文研究通过简化井下巷道, 形成图结构模型, 利用图算法快速实现逃生方案的自动生成, 以提升矿工在突水灾害环境中的生存概率。利用巷道中线点云三维坐标数据, 依托矿井巷道空间拓扑关系, 建立巷道空间形态图  $G=(V, E)$ , 以描述井下巷道三维结构。为应对巷道实际计算需要, 三维巷道结构中增加了工程属性数据, 包括容积、截面等。为考虑水流因素对逃生过程的影响, 增加了巷道图中边的权值, 形成了新的图结构  $G=(V, E, W)$ , 该网络具有动态计算权重的能力, 可以量化不同时空环境中的逃生速度。为利用新图结构, 计算人员逃生能力, 改进了 Dijkstra 算法的时间维度处理流程, 提出基于时变加权网络的路径规划方法, 解决了传统 Dijkstra 算法无法处理时变权重的问题。为实现巷道网络三维可视化与动态路径规划功能, 本文构建了动态逃生路径规划系统, 系统利用 VTK 渲染引擎开发了多层架构系统, 通过赋值网络权重, 快速生成最优逃生路线。结合云南彝良毛坪铅锌矿实际工程数据, 利用该软件系统, 验证了突水淹没过程及在巷道网络中的逃生路线的有效性。本文研究利用图理论快速生成了突水情景下的逃生路径, 为矿山相关人员提供科学的安全保障工具, 提升了我国深部矿业安全生产水平。

**关键词:** 矿井突水; 图结构; 逃生路径; 三维模拟; 软件开发

**中图分类号:** TD745 **文献标识码:** A

## Design and implementation of an escape route planning system for deep mine water inrush based on graph structure

CHEN Yuhua<sup>1,2</sup>, SUN Bangtao<sup>3</sup>, XU Mingfei<sup>1</sup>, LI Dongli<sup>3</sup>, HU Yujian<sup>1</sup>,  
XU Chao<sup>1</sup>, CUI Yunhao<sup>1</sup>, YUAN Shichong<sup>4</sup>

(1. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;  
2. Key Laboratory of Coalbed Methane Resource & Reservoir Formation Process, Ministry of Education, China

收稿日期: 2024-06-01 责任编辑: 聂虹

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(编号: 42172272)

第一作者简介: 陈玉华(1978—), 男, 汉族, 安徽淮北人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事数字地球科学方面研究, E-mail: chen\_yuhua@cumt.edu.cn。

通讯作者简介: 徐明飞(1998—), 男, 汉族, 江苏徐州人, 硕士研究生, 主要从事地质保障系统、工程信息化研究, E-mail: ts22010156p31@cumt.edu.cn。

引用格式: 陈玉华, 孙帮涛, 徐明飞, 等. 基于图结构的深部矿井突水逃生路径规划系统设计及实现[J]. 中国矿业, 2025, 34(4): 126-136.

CHEN Yuhua, SUN Bangtao, XU Mingfei, et al. Design and implementation of an escape route planning system for deep mine water inrush based on graph structure[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(4): 126-136.

University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;

3. Yiliang Chihong Mining Co., Ltd., Zhaotong 657600, China;

4. School of Urban Geology and Engineering, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China)

**Abstract:** To overcome the limitations of conventional 2D static topological models characterized by delayed hydrodynamic response and insufficient spatial attribute coupling, this paper simplifies underground mine tunnels to construct a graph structure model. Utilizing graph algorithms, it achieves rapid automatic generation of escape routes to improve miners' survival probability during water inrush events. The research processes tunnel centerline point cloud data with 3D coordinate reconstruction and spatial topological relationships to establish a tunnel spatial graph  $G=(V, E)$  representing the three-dimensional mine structure. Practical computational requirements are addressed by incorporating engineering attributes such as volume and cross-sectional dimensions into the 3D tunnel model. Considering hydrodynamic impacts on escape processes, time-dependent edge weights are introduced to form an enhanced graph structure  $G=(V, E, W)$ , enabling dynamic weight calculation to quantify escape velocities under spatiotemporal variations. To evaluate personnel evacuation capacity, it enhances time-dependent processing in Dijkstra algorithm and propose a time-varying weighted network path planning method, overcoming traditional Dijkstra's limitation in handling dynamic weights. A dynamic escape route planning system with 3D visualization is developed using VTK rendering engine, constructing a multilayer architecture system with visualization components for rapid optimal path generation through network weight assignment. Practical validation using engineering data from Maoping Lead-Zinc Mine in Yiliang, Yunnan Province demonstrates the validity of flooding simulation and escape route effectiveness in tunnel networks. This research provides a scientific safety assurance tool for mining operations through graph theory-based rapid escape path generation. The outcomes significantly enhance production safety in China's deep mining industry.

**Keywords:** mine water inrush; graph structure; escape route; 3D simulation; software development

## 0 引言

我国是一个矿业大国,但矿业传统的粗放型发展模式使得矿业生产活动正面临较高的安全问题压力<sup>[1]</sup>。矿井事故中,尤其是可能发生的矿井突水事件对于井下工作者来说就是伤亡隐患。随着经济社会发展,地球浅部资源逐渐枯竭,未来深部开发将成为常态<sup>[2]</sup>,因对地下岩层采掘活动的发展,地下含水层的动态平衡遭到破坏,采矿活动中常遭遇突发的突水现象导致人员伤亡和财产损失。越发复杂的水文地质环境中蕴藏着较大的水害风险,特别是高承压水在强开采扰动下极易诱发底板突水灾害<sup>[3]</sup>。矿井突水是目前我国矿业生产中面临的重点安全问题,尽管国家通过产能调控和不达标矿井整治显著降低了矿井水害事故率,但全国范围内仍每年都存在因矿井水害而导致的伤亡事故<sup>[4-5]</sup>,暴露出矿业安全生产在水害防治方面的持续挑战<sup>[6]</sup>。

响应智慧矿山战略中对应急灾害的安全处置要求,在复杂水文地质条件下,针对矿井突水水灾扩散模拟条件和突水灾害时空变化特征,在巷道网络中快速标记出一条最优逃生路径的操作,对人员顺利逃生具有重要意义。为减少灾害损失,提高被困矿工的生存机会,需要找到并利用良好的逃生路线,逃

生路线计算中还应当注意时空环境的变化,以便更新适合的路线<sup>[7]</sup>。此外,展示突水进入井下采掘空间的漫延规律,刻画和分析矿井淹没过程,有利于为矿井水害的应急救援与处置决策提供有效科学的指导<sup>[8-10]</sup>。由于突水量无法精确反演分析,导致充水通道参数无法准确推导,使得充水通道演变分析与突水量预测缺乏基础<sup>[11]</sup>。因此,考虑将水淹没模拟着力于水流的运动路径扩散规律上,达到帮助涉险人员规避水流的目的。运用图结构可以较好地表达空间内的网络关系<sup>[12]</sup>。矿业工程领域图结构常用于拓扑分析复杂天然气管网<sup>[13]</sup>、通风系统分析计算<sup>[14]</sup>、矿井水扩散模拟<sup>[15]</sup>、巷道空间分析<sup>[16]</sup>等方面的研究。目前国内对于矿井灾害人员疏散及模拟领域的研究较多,朱承敏等<sup>[17]</sup>基于利用水害监测数据分析及处理系统,为应急决策提供科学决策依据;冯子阳<sup>[18]</sup>利用三维渲染引擎,在三维地质模型建立的基础上针对矿井突水灾害情境进行逃生路线规划;李翠平等<sup>[9]</sup>针对地下矿突水提出一种动态三维仿真模拟架构,实现对地下矿井突水过程的模拟工作;JALALI等<sup>[19]</sup>通过数学方法建立一种确定地下矿井网络从给定点到备选点最短逃生时间的计算逻辑。

随着技术的革新与进步,针对矿山突发事件进

行应急体系建设迎来数字化机遇,充分利用计算机模拟<sup>[9]</sup>和智能辅助决策<sup>[10]</sup>等现代信息及技术,提升矿井水害应急平台支撑能力,为矿山应急救援提供科学支撑。因此,本文旨在基于图结构利用计算机软件编程技术,开发一款桌面应用程序,实现矿井突水灾害情境下的水流扩散模拟和在灾情动态变化时空条件下规划最优逃生路径。旨在降低水害发生时的逃生难度和伤亡风险,期望为矿井安全管理和灾

害应急响应提供科学的决策支持,进而有效提升矿井灾害应对能力与人员安全保障。

## 1 系统总体设计

### 1.1 功能框架设计

该软件中主要包括系统管理及基于图结构理论运行的巷道拓扑建模、突水淹没模拟、最优路径标记、动态三维模拟等 5 个模块,软件功能框架如图 1 所示。

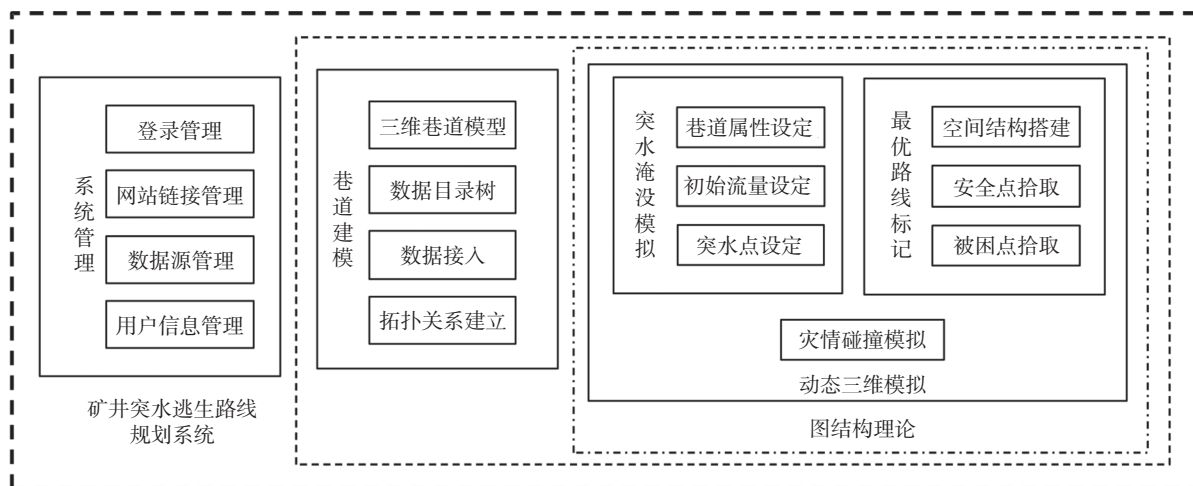


图 1 软件功能框架

Fig. 1 Functional framework of software

1)系统管理模块。负责用户信息的管理、对登录账号信息的验证、相关信息链接搭建和对系统基础数据源管理。

2)巷道拓扑建模模块。负责操作数据文件树、即时接入外部临时数据和建立包含工程属性信息的巷道网络图结构。巷道图网络依托于系统基础数据源和外部接入数据建立,通过拓扑图的形式直观展示节点中的工程信息,在二维状态或三维状态下展现巷道网络的空间联系。同时,拓扑关系的建立也是建立巷道三维模型的基础,除三维模型可视展示中的旋转、全景、漫游等功能外,该模型保留了可供鼠标交互拾取的节点、坐标标签标记及场景属性编辑等功能。

3)突水淹没模拟模块。负责以建立的模型为容器实现突水淹没模拟功能,针对影响水流状态的因素设置巷道属性、初始流量、突水点位置保障突水模拟的准确性。

4)最优路径标记模块。负责在巷道空间搭建完备的前提下选取安全点和人员被困点,计算最优逃生路径并将结果显示在巷道三维模型上,达到灾害情境下指导涉险人员安全脱险的目的。

5)动态三维模拟模块。负责在突水淹没情景和

逃生路径规划出现碰撞的情况下,重新计算当前最优逃生路径并生成新的标记模型,以保证系统在突发灾情下的实用性和逃生路径的有效性。

### 1.2 系统开发逻辑

本系统采用 C/S 体系结构通过 Python 语言进行开发,实现一个高效且用户友好的桌面应用程序。为确保软件架构的清晰和系统维护的便利性,在系统开发中遵循三层架构模式,包括表现层、业务逻辑层和数据访问层,如图 2 所示。在用户交互界面开发中,选用 PyQt5 框架完成用户界面设计,因其跨平台的特性、丰富的组件和良好的事件处理机制,提升了开发效率和用户交互体验。在三维图形渲染方面,利用 VTK 作为底层渲染引擎,能实现复杂三维场景的处理和展示。此外,系统数据管理采用数据库技术,保证用户信息的安全存储和高效访问。

本系统的核心在于基于图结构理论,通过现实巷道工程的地理坐标数据创建出一种快速构建巷道网络结构的方法,建立的网络图中将节点作为信息仓库、利用节点之间的关系表达现实的巷道连接状态,依托包含巷道工程信息网络图的完整拓扑关系完成巷道的三维空间建模。这种基于网络图结构的三维模型,除为路径搜寻算法提供基本条件外,还可以

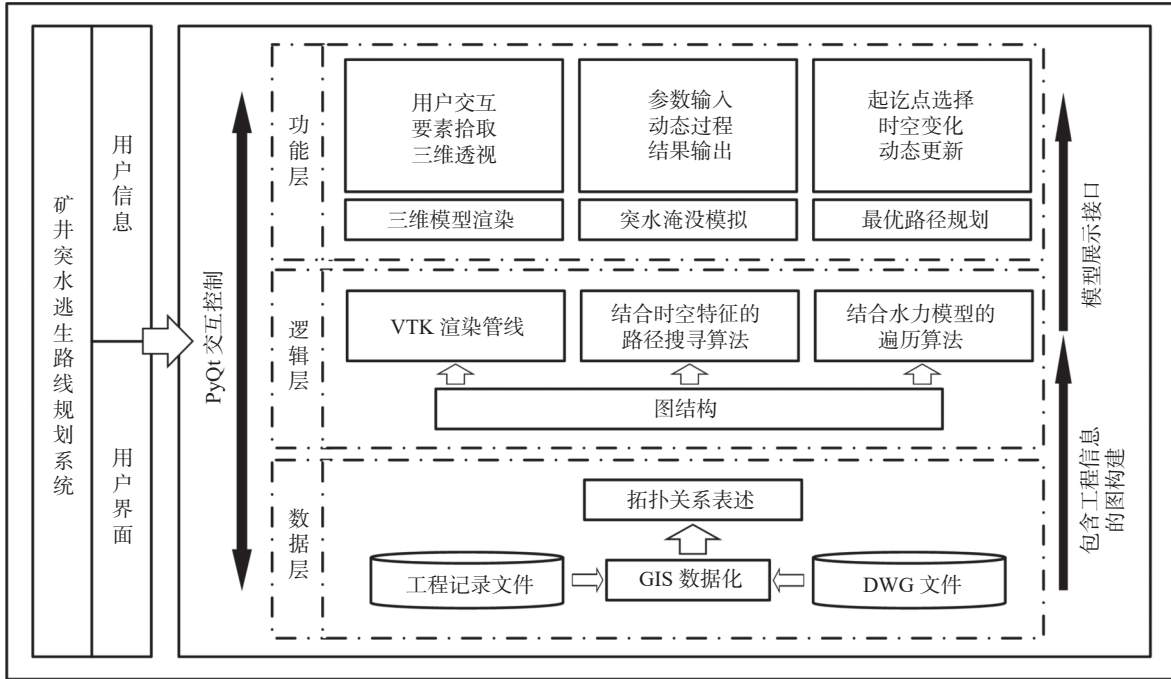


图 2 系统开发逻辑

Fig. 2 Development logic of software

依托维度转化的方式完成水流扩散模拟功能的实现。结合现场的空间信息在时间维度下考虑水流运动状态和规划逃生路径问题, 在三维巷道模型上实现矿井突水灾害中逃生路径动态规划的可视化标记效果。

## 2 巷道图结构模型的建立

图与树相似都是由节点和边构成, 节点对象具有名称和标识也可以携带信息, 边则用来表达两个节点之间存在的关系。图结构比树结构更具一般性, 在使用图完成对相关问题准确描述的前提下, 可以使用处理图的方法来解决较为复杂的问题。根据边是否具有方向性图分为有向图和无向图, 边的权值则代表两个节点之间联通的代价。采用有向图可以更准确地表达人在巷道网络中的运动状态, 如人在

固定两个节点之间上坡和下坡的差异、障碍等因素对两点之间联通代价的影响。通过邻接矩阵或者邻接表可以创建有向图例, 如图 3 所示。

巷道网络图的创建主要包括数据的生成、工程信息的图绘制、图的有效性验证, 如图 4 所示。

1) 数据生成方面。主要包括坐标数据提取和工程属性信息的填充。通过巷道工程平面布置图获取其工程坐标数据, 生成巷道网络节点的地理坐标信息。以节点范围为基准统计工程属性信息, 包括电力系统、排水系统和通风系统等方面的采矿工程设备信息; 包括躲避硐室、物资硐室等方面的应急救援设备信息; 包括摩擦系数、渗透率等巷道结构岩性信息。

2) 工程信息的图绘制方面。首先以地理坐标数

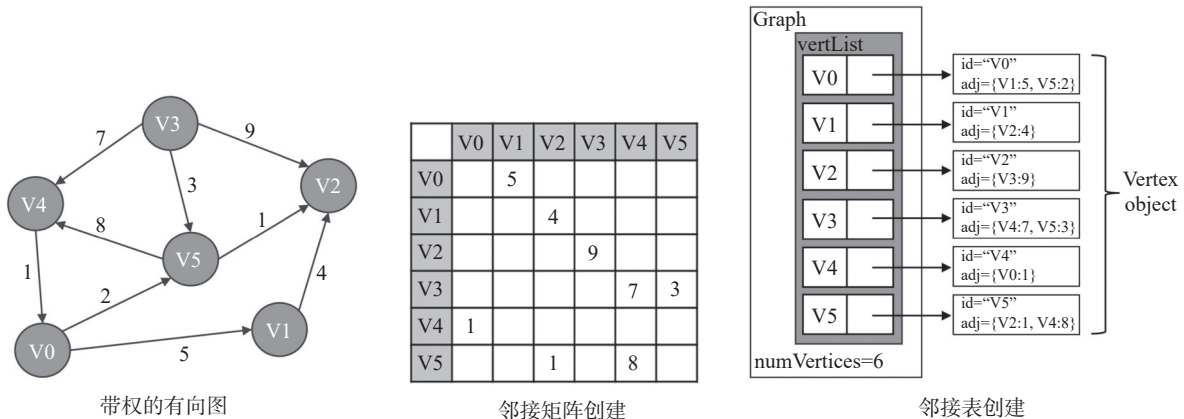


图 3 有向图创建

Fig. 3 Creation of directed graph

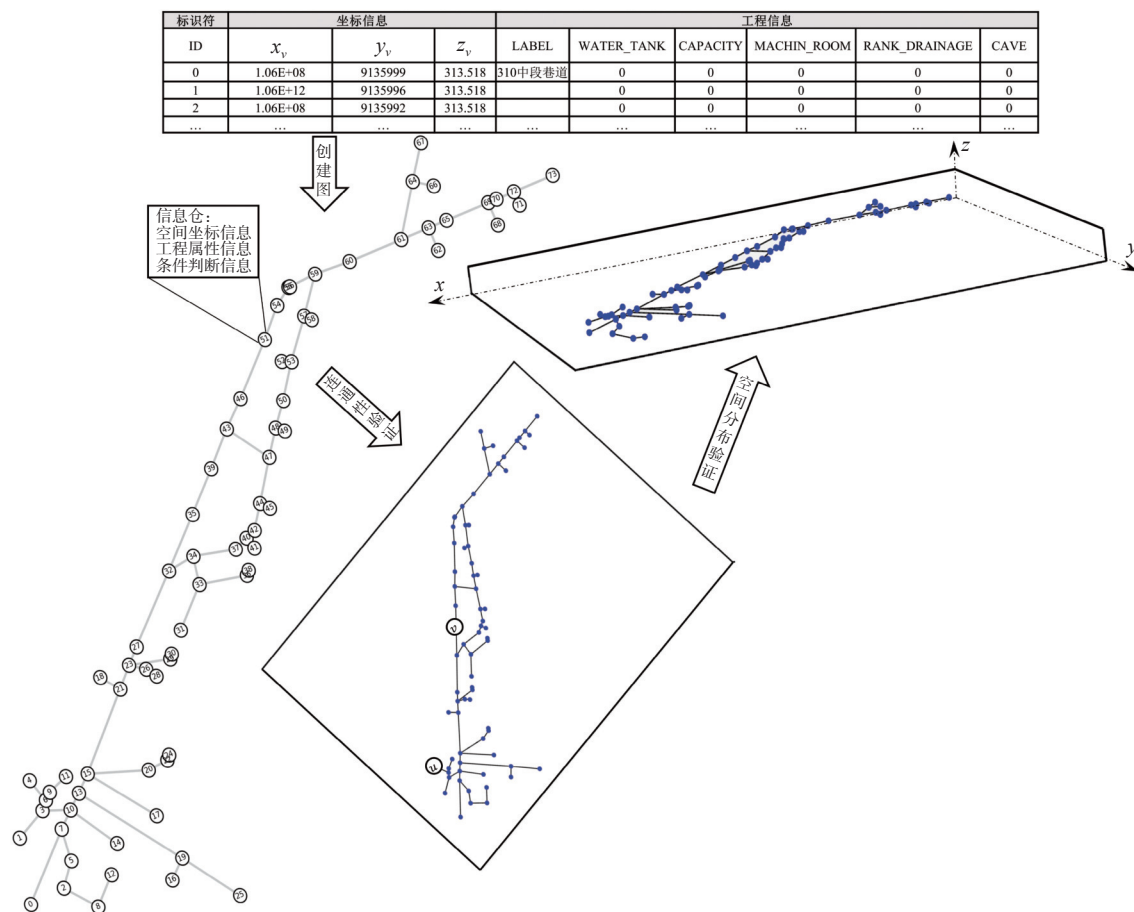


图4 巷道中段构建图结构网络

Fig. 4 Graph structured network construction in tunnel mid-section

据作为节点对象的三维方位确定依据,对巷道网络空间节点进行设定;将节点作为信息存储仓,其中主要存储节点对应范围内的工程属性信息。

3)图的有效性验证方面。主要包括连通性验证、空间分布验证。图的连通性是指如果图被认为是连通的,对于图中的任意两个节点 $u$ 、 $v$ ,存在一条路径从节点 $u$ 到节点 $v$ 。图的联通是后续一切功能实现的基础,若图不连通构建出的三维巷道可视化模型将无法实现突水淹没模拟和路径规划方面的功能。基于采矿巷道的空间特性,图需要对巷道的三维空间分布进行验证,主要是探究每个节点的空间坐标是否由三维数组构成。其判断标准在于给定一个图 $G=(V,E)$ ,其中, $V$ 为节点集合, $E$ 为边集合。对于每个节点 $p \in V$ ,其空间坐标可以表示为一个三维数组 $(x_v, y_v, z_v)$ ,其中, $x_v$ 、 $y_v$ 和 $z_v$ 分别为节点 $v$ 在 $x$ 轴、 $y$ 轴和 $z$ 轴上的坐标。

### 3 图结构下突水逃生路径规划的计算

#### 3.1 最优路径规划

##### 3.1.1 Dijkstra算法中权值计算的改进

在矿井突水灾情的应急管理和逃生路线规划系

统中,权值的确定方法体现了一种灵活且实用的途径来量化巷道的逃生能力。权值的计算中主要考虑巷道空间特性和水流运动特性两个影响因素。其中采矿工程巷道结构具有显著的空间变化特点,在逃生运动中,人所处巷道坡度 $k_{mn}$ 也发生变化,依据人所处的巷道位置的起点节点 $m$ 、终点节点 $n$ 的空间地理坐标 $(x,y,z)$ ,坡度的计算见式(1)。

$$k_{mn} = \frac{|z_m - z_n|}{\sqrt{(x_m - x_n)^2 + (y_m - y_n)^2}} \quad (1)$$

根据 DIAS 等<sup>[21]</sup> 研究结果,人在移动中的速度 $v$ 主要受人脚掌与地面的静摩擦力 $f$ 、移动中所受到的阻力 $\vec{D}$ 影响,具体关系见式(2)。

$$v_{mn} = v(f_{mn}) + v(\vec{D}_{mn}) \quad (2)$$

式中: $v_{mn}$ 为人在 $mn$ 段的移动速度; $f_{mn}$ 为 $mn$ 段移动中脚与地面的静摩擦力; $v(f_{mn})$ 为 $mn$ 段移动中脚面与地面间静摩擦力影响移动速度的关系; $\vec{D}_{mn}$ 为 $mn$ 段人所受到的阻力; $v(\vec{D}_{mn})$ 为 $mn$ 段中阻力对移动速度影响关系。

在式(2)中,人在移动中与地面静摩擦力 $f$ 、受到的阻力 $\vec{D}$ 与水流速度 $\vec{v}$ 和水流深度 $d$ 有关。阻力 $\vec{D}$

的方向总是与物体的速度方向相反。根据牛顿第二定律,人在移动时与地面静摩擦力的计算见式(3),受到的阻力计算见式(4)。

$$f_{mn} = \frac{(m_R - \rho \cdot V_R(d))g\mu}{1 + k_{mn}^2} \quad (3)$$

式中:  $m_R$ 为涉险人员的质量;  $\rho$ 为矿井水的密度;  $d$ 为水的淹没深度;  $V_R(d)$ 为与水淹没深度有关的人的涉水体积;  $g$ 为重力加速度,  $g \approx 9.80 \text{ m/s}^2$ ;  $\mu$ 为巷道地面的摩擦系数。

$$\vec{D}_{mn} = \frac{1}{2}C\rho A(d)\|(\vec{v}_{mn} - \vec{v}_s)\|(\vec{v}_{mn} - \vec{v}_s) \quad (4)$$

式中:  $C$ 为阻力系数;  $A(d)$ 为人浸入水中的截面积与水淹没深度相关;  $\vec{v}_s$ 为水流的矢量速度。

人的逃生能力主要与逃生路径长度及逃生速度有关,通过逃生时间来反映。逃生能力转化为权值时主要考虑上述因素的影响,基本权重的计算见式(5)。

$$w_{mn} = \frac{s_{mn}}{v_{mn}} \quad (5)$$

式中:  $w_{mn}$ 为  $mn$ 段对应的基本权重值;  $s_{mn}$ 为  $mn$ 段的路径距离。

除式(3)、式(4)中对移动速度的影响关系外,水深还会导致涉险人员逃生中逃生能力的损耗,所以在计算中增加调节系数是必要的工作,具体的权值赋值方法见式(6)。

$$W_{mn} = \begin{cases} \frac{s_{mn}}{v_{mn}}, & 0 \leq d < h_k \\ \frac{s_{mn}\xi}{v_{mn}\xi}, & h_k \leq d < h_x, \xi \in (0, 1) \\ \frac{s_{mn}}{v_{mn}\xi\tau}, & h_x \leq d < h_{\max}, \xi \in (0, 1), \tau \in (0, 1) \\ \infty, & d \geq \frac{m_R \cos \alpha}{A_R \rho} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $W_{mn}$ 为  $mn$ 段的权值;  $h_k$ 为涉险人员胯部的高度;  $\xi$ 为运动能力系数,  $\xi \in (0, 1)$ ;  $h_x$ 为涉险人员胸部的高度;  $\tau$ 为涉险人员的呼吸能力系数,  $\tau \in (0, 1)$ ;  $h_{\max}$ 为人保持移动能力的最大水淹高度,近似看作浮力抵消人对地面压力的水淹高度,经过推算为  $\frac{m_R \cos \alpha_{mn}}{A_R \rho}$ ,其中,  $\alpha_{mn}$ 为  $mn$ 段巷道的坡度,此时线路权值为  $\infty$ ,即不能通行。

### 3.1.2 改进 Dijkstra 算法的执行

在权值的确定方法中,通过对矿井突水灾情下巷道时空变化的综合考量,将权值作为逃生能力量化的表达方式。通过综合考虑巷道的时空变化,系统能够根据实时灾情动态调整图结构中的边权值,从而有效规划最优逃生路线。

在发生突水淹没导致某些通道不可通行的情况下,系统将这些通道的权值设为无穷大,这一机制有助于自动更新路线规划,绕开灾害区域,保证人员安

全。在计算机中首先需要初始化算法所需的数据结构和变量,创建一个代价表,用于记录每个节点到起始节点的最优通道。将起始节点的代价设为0,其他节点的代价设为无穷大。同时,创建一个已访问集合,用于记录已经确定最优路径的节点。进入迭代计算,从未确定最优路径的节点中选择一个具有最优通道的节点,将其添加到已访问集合中以选择最优通道节点。遍历该节点的邻接节点,计算从起始节点经过当前节点到达邻接节点的通道,并与邻接节点的最优通道进行比较。如果计算出的通道小于邻接节点的最优通道,则更新邻接节点的最优通道。如果更新了邻接节点的最优通道,将当前节点设置为邻接节点的前驱节点,表示路径中经过的前一个节点。当所有节点都被确定最优路径后,根据记录的前驱节点信息,可以从目标节点回溯到起始节点,得到最优路径。本系统中最优路径规划的流程如图5所示。

### 3.2 改进的 Dijkstra 算法在逃生路径规划中的应用

构建图结构权值计算方法时,通过创建一个囊括3.1.1中计算元素的数据库,计算逃生路径的通行能力。依赖于数据的实时调取和分析,更新这些权值以反映实际环境中的变化,实现路径计算的动态更新。确保路径计算在任何时刻都基于最新的数据,从而提高逃生策略的有效性。通过获取巷道地理坐标三维数据计算不同路径中的坡度  $k_{mn}$ 。水淹深度  $d$  可以通过水位计或者其他巷道内部监测水位变化的设备测量,通过测量液位高度来监测巷道中的水位变化。矿井水密度  $\rho$  可以来自实时数据或历史记录,在突水发生时采集水样测定或依据日常生产中记录的地下水采样数据作为水流密度的数据参照。

以云南彝良毛坪铅锌矿巷道工程数据为例,针对相同起点和终点的逃生路线规划任务,使用本文所提到的考虑时空要素的权值计算方法进行计算,结果如图6所示。在所构建的巷道网络图的基础框架中,节点之间的边被赋予了基于时空要素的权重,这些权重反映了逃生路径在特定时空条件下的可行性和效率。起点设为节点1,终点为节点171。在最初的计算中,基于静态条件下的权值赋值确定了一条从起点到终点的最优逃生路径,没有考虑可能随时间发生的环境变化。然而,在实际的突水灾情下,随着时间的推移,某些巷道可能因积水或其他因素而通行受阻。这些动态的时空环境变化对巷道的通行性有直接影响,需要重新计算权值来反映这些变化。通过本文所提出的时变赋值方法能够根据这些变化实时更新权值,以确定一条新的最优逃生路径,

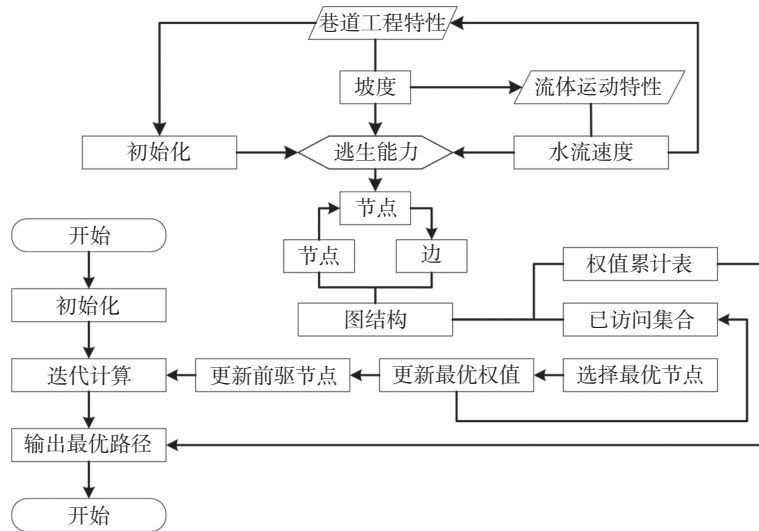


图 5 最优路径搜寻流程

Fig. 5 Search workflow of optimal path

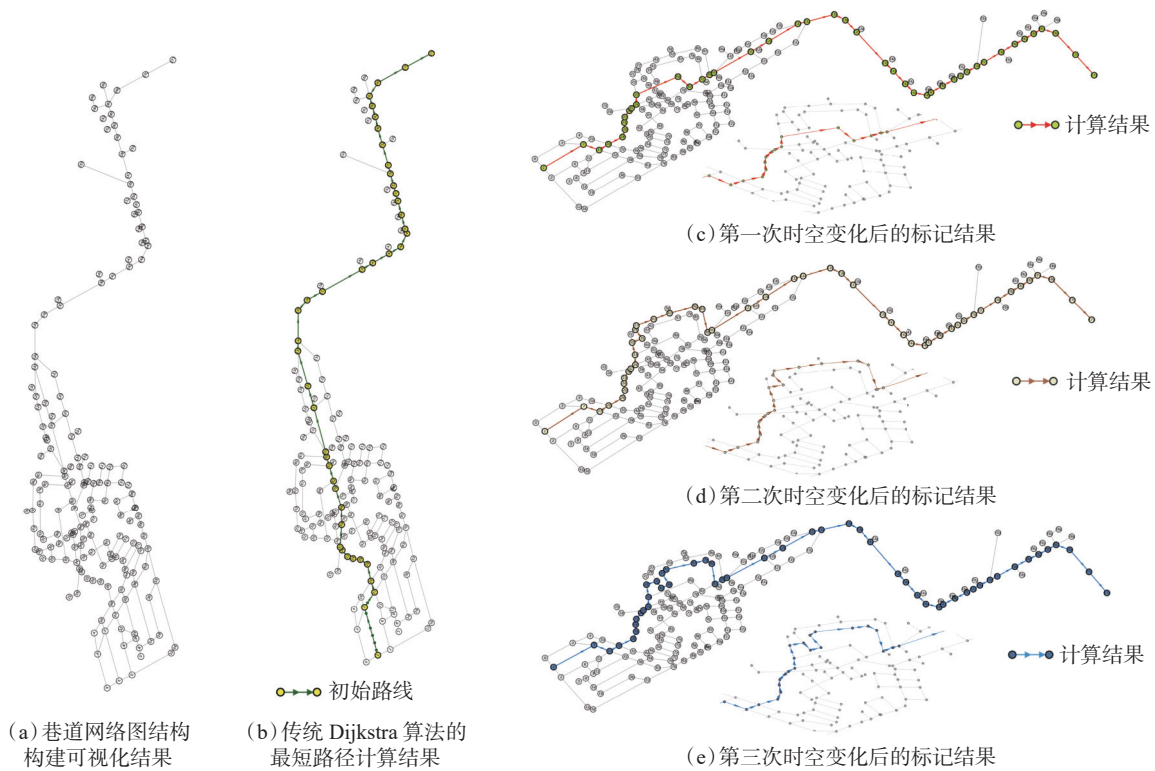


图 6 考虑时空因素变化的最优路径计算

Fig. 6 Optimal path calculation considering changes in spatiotemporal factors

随着时间的推移在初始路线随灾情的发展产生变化。

最优路径的变化结果如图 7 所示。图 7 中详细列出了每个节点之间的权值变化, 以及对应于不同时间点的最优路径选择。这种动态更新机制确保了在灾害发生时, 逃生路线规划能够考虑实时变化, 提供更安全高效的逃生指导。

#### 4 基于图结构的系统功能实现与应用

系统在 Windows11 操作系统中的交互界面分为

数据资料、拓扑建模和三维建模 3 个模块, 其交互界面如图 8 所示。在数据资料模块链接资源管理器, 管理多格式文本数据; 拓扑建模可为后续模型的建立和模拟打下基础, 并展示工程信息在巷道网络中的分布情况; 三维建模模块进行三维动态模拟的多功能实现和展示。模块化设计不但易于系统后期的升级与维护, 而且能使系统的功能分区更加明确, 有助于提高系统的稳定性。通过这种设计的模块化架

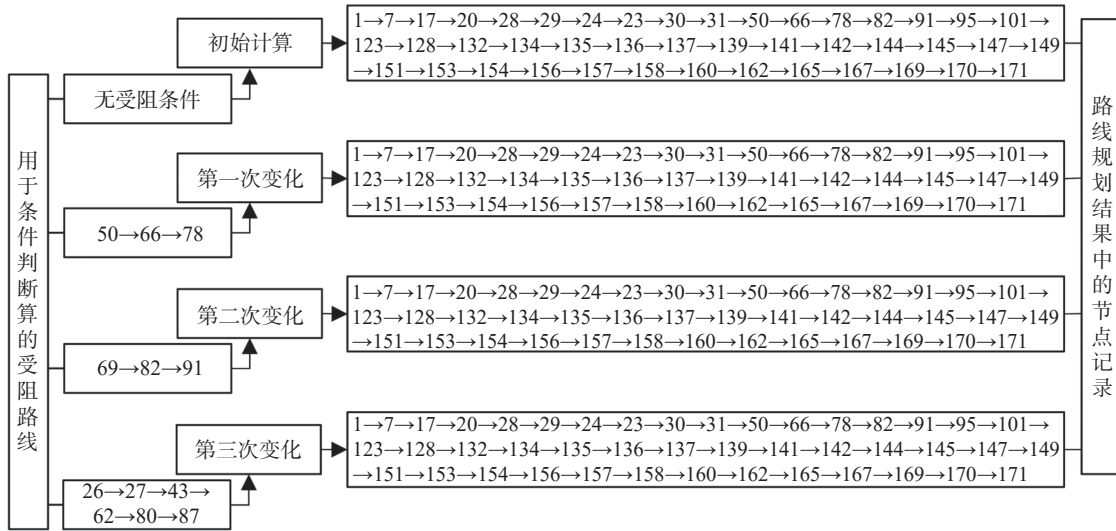
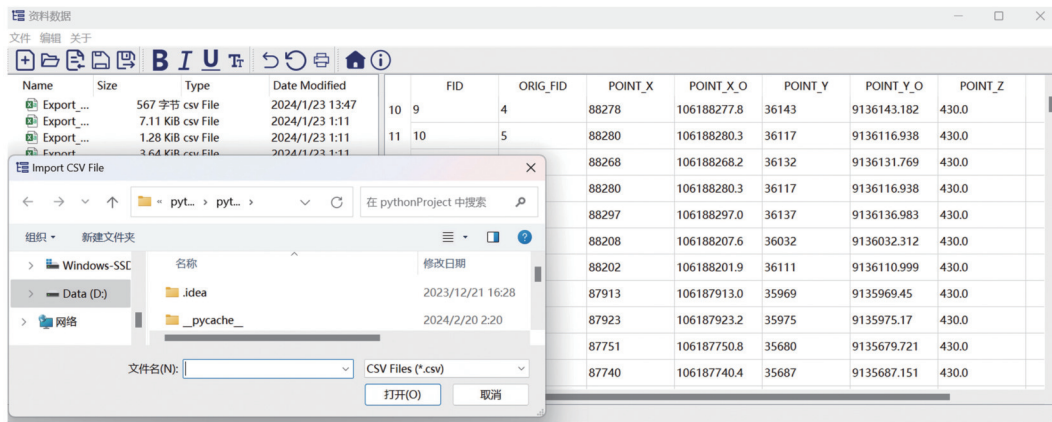
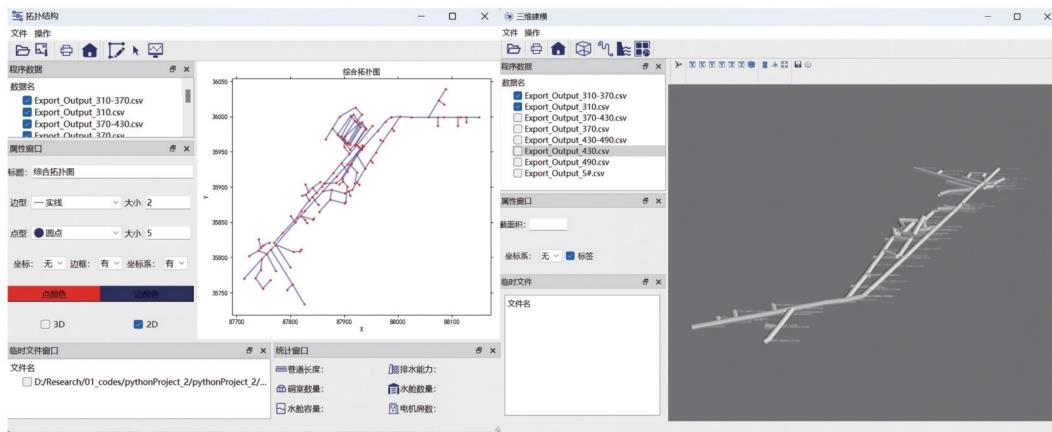


图 7 考虑时空因素的最优路径变化结果

Fig. 7 Optimal path variation results considering spatiotemporal factors



数据资料界面



拓补结构界面

三维建模界面

图 8 软件界面

Fig. 8 Interfaces of software

构,系统确保在满足复杂需求的同时,也保持良好的性能和用户友好性。

4.1 巷道可视化三维模型的建立

通过毛坪铅锌矿部分巷道平面布置图数据建立

的三维模型细节如图 9 所示。基于图结构对巷道网络进行三维可视化。使用 VTK(Visualization Toolkit)渲染管线的逻辑对构建的图结构进行建模操作。通过对 dwg 格式文件的特征提取、坐标转化,产出包含

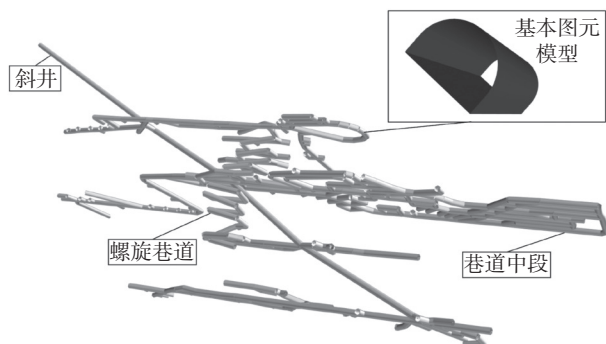


图 9 巷道三维模型建立

Fig. 9 Establishment of 3D model of roadway

工程信息巷道网络图, 进入 VTK 可视化管线将生成的巷道网络三维模型在计算机上展示。通过对高程坐标的精确标记可以清晰地描述巷道在垂直空间中的分布, 这不仅为巷道的空间模型建立提供必要的技术支持, 也增强了整体矿山巷道模型的空间准确性和真实感。在三维空间中显示的数据, 使得矿山巷道模型不再是平面的简化表示, 三维地理坐标数据为巷道的垂直延伸提供数据支持使其能够展现复杂地形和结构的立体构造, 作为计算结果的可视化载体。

#### 4.2 突水淹没模拟

本文从水流运动规律<sup>[2]</sup>出发提出一种基于图结构的简易水淹没计算方法。首先通过构建巷道图结构作为容器, 其中节点存储位置信息和其他工程属性信息, 边表示巷道即水流路径, 且每个节点和边被赋予如高程、流量等属性。在此基础上收集地形和突水情况等关键信息, 以获取高程和水量的数据。在设定溢流模型的基础上, 为每个节点设定一个水位阈值, 当超过该阈值时水会流向相邻的低地。水流传播模拟基于从水源节点开始的迭代计算, 水量超过节点阈值时会分配给相连的低高程节点。通过此过程, 可以预测并判断各节点的淹没情况, 并在巷道模型中形成淹没区域的标记。

本部分的功能实现集成了物理模型和计算机图形学, 通过对矿井突水淹没机制的模拟和可视化展示, 为研究矿井突水对复杂网络影响提供一种直观且利于分析的方法。矿井突水模拟中定义物理模型属性仿真模拟突水扩散过程。以矿井巷道网络三维模型作为水流运动范围的边界, 考虑水流速率、管道截面积和容积, 以队列的形式逐节点处理, 判断并记录节点被淹没的顺序和时间, 生成描述网络淹没过程的 3D 动画, 直观展示矿井突水逐步覆盖巷道网络的过程。通过读取网络数据创建图形结构, 根据用户输入的源节点、输出容量和管道截面积, 执行淹没

模拟, 获取每个节点的淹没时间和顺序, 并将淹没顺序保存到文本文件中。动画展示矿井突水淹没过程, 可视化地反映矿井突水在网络中的扩散过程和每个节点被淹没的具体时刻。以云南毛坪铅锌矿 310 m 中段巷道为例进行淹没模拟实验, 淹没标记效果如图 10 所示, 各个节点的淹没时间见表 1。

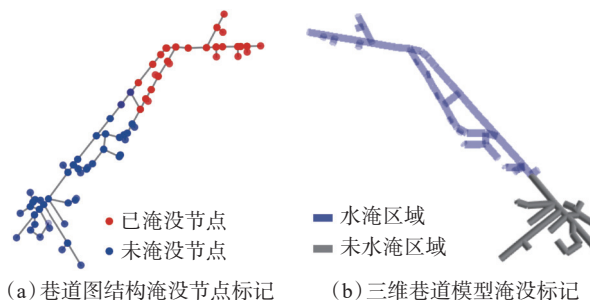


图 10 淹没标记效果

Fig. 10 Effect of flood marker

表 1 网络节点淹没时间

Table 1 Network node flood time

节点 ID	计算结果
0	淹没时间节点: 583.33 s
1	淹没时间节点: 300.00 s
2	淹没时间节点: 183.33 s
.....	.....
72	淹没时间节点: 8 246.81 s
73	淹没时间节点: 8 559.06 s
74	淹没时间节点: 7 378.15 s
75	淹没时间节点: 8 099.45 s

#### 4.3 路径规划

基于已有的图结构, 选取 Dijkstra 算法为路径规划提供逻辑支持。但与传统 Dijkstra 路径搜寻算法不同, 本系统中路线权值由欧几里得几何距离转化为节点之间的到达代价, 即人员移动的难易程度。整体而言, 人员在移动过程中上坡难度大于下坡难度、水中移动难度大于空气中移动难度、水流速度大时的涉水移动难度大于水流速度小时的移动难度。

根据实际工程信息生成的巷道模型中包含了巷道网络图的基础结构, 以图结构中改进的 Dijkstra 算法为引擎, 综合突水模拟的实时结果输出随灾情发展而变化的最优逃生路径, 如图 11 所示。考虑到实际操作中可能出现的极端情况, 即所有可能的逃生路径都因灾害而受阻, 系统引入一种应急措施, 即将无法通行通道的权值从无穷大调整为一个较大的有限值。这一措施虽然能够在理论上提供逃生路径, 但鉴于实际灾情的危险性, 仅建议在逃生演练或其他必要的情况下使用。更为安全和可行的解决方案

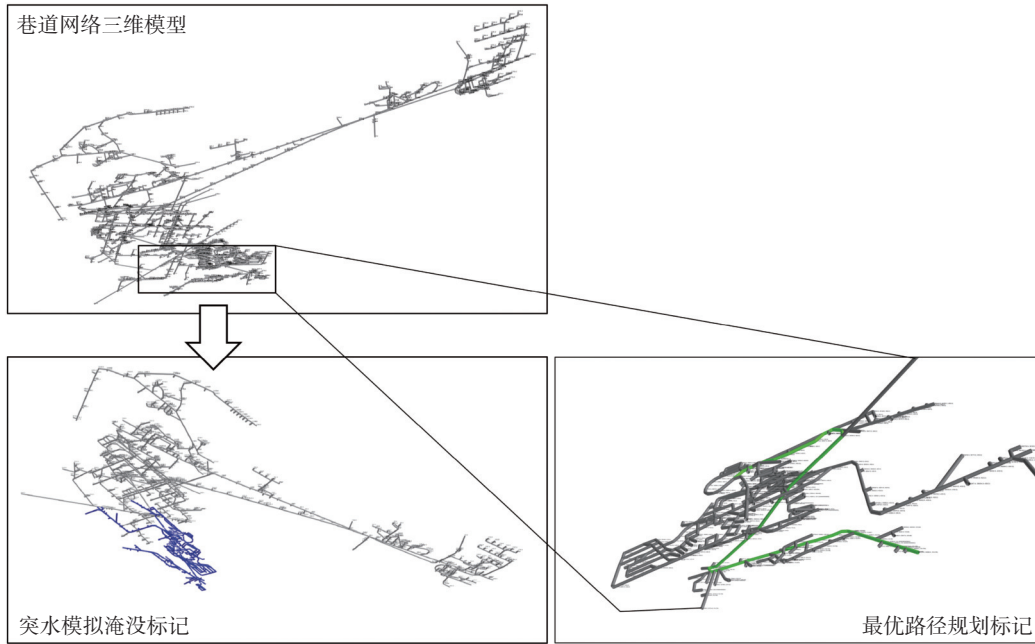


图11 三维模拟

Fig. 11 Three-dimensional simulation

是,结合排水系统对受影响通道进行水量控制和削减,以恢复其通行能力。

## 5 结论

本系统成功实现了矿井突水逃生路径规划系统的开发、测试与应用,不仅在技术层面展现出创新性和实用性,更为矿井安全管理提供了动态的路径规划支持。系统界面友好,操作流畅,通过图理论建模、三维可视化重构和动态路径规划方面的技术突破,有效满足安全管理人员在矿井突水紧急情况下进行路线规划的辅助决策需求。具体研究成果体现在以下三方面。

1)本文采用图理论来解决矿井巷道中复杂的突水情景。这种方法不仅实现突水事件的模拟,还包括应急条件下的路径规划,有效地融合了图结构的信息建立与属性分析,提高处理复杂情景的能力。

2)提出一种基于坐标数据构建巷道三维模型的方法,使得巷道网络的空间结构得以直观展现,为模拟分析和风险评估奠定坚实的基础。与传统建模技术相比,这一方法简化建模过程,提升了建模效率并保证模型的精确度。

3)研发人员安全导向的路径优化算法,重构应急逃生评估体系。突破传统物理距离最优范式,融合突水情境下,巷道网络的时空条件变化信息将逃生能力量化为权值标记,将传统路径搜索的物理距离转化为以人员安全性保障为考量指标。

通过对这一系统的深入研究与应用,期待在未

来能进一步提升矿井安全管理的效率和效果,为保障矿工安全做出更大的贡献。

## 参考文献(References):

- [1] 鞠建华,王婧,陈甲斌.新时代中国矿业高质量发展研究[J].中国矿业,2019,28(1):1-7.  
JU Jianhua, WANG Qiang, CHEN Jiabin. Study on the high quality development of China mining industry in the new era[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(1): 1-7.
- [2] 谢和平.“深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J].工程科学与技术,2017,49(2):1-16.  
XIE Heping. Research framework and anticipated results of deep rock mechanics and mining theory[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(2): 1-16.
- [3] 杨小聪,蒋合国.新质生产力引领深部金属矿山安全高效开采:以毛坪铅锌矿深部开采实践为例[J].中国矿业,2024,33(5):9-21.  
YANG Xiaocong, JIANG Heguo. New quality productive forces leads the safe and efficient mining of deep metal mines: taking deep mining practice of Maoping Lead-Zinc Mine as an example[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(5): 9-21.
- [4] 张培森,朱慧聪,李复兴,等.2008—2019年我国煤矿水害事故统计及演变趋势分析[J].煤矿安全,2021,52(8):194-200.  
ZHANG Peisen, ZHU Huicong, LI Fuxing, et al. Evolution trend and statistical analysis of coal mine water disaster accidents in China from 2008 to 2019[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(8): 194-200.
- [5] 景国勋,秦瑞琪.2011—2020年我国煤矿水害事故相关因素特征分析[J].安全与环境学报,2022,22(4):2297-2304.  
JING Guoxun, QIN Ruiqi. Analysis on the characteristics of correlative factors in coal mine water disasters from 2011 to 2020[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(4): 2297-2304.

- [ 6 ] 桂祥友, 郁钟铭. 矿井水灾害预测的安全评价研究[J]. *中国矿业*, 2006, 15(5): 35-37, 41.  
GUI Xiangyou, YU Zhongming. Research on safety evaluation of mine water disaster forecast[J]. *China Mining Magazine*, 2006, 15(5): 35-37, 41.
- [ 7 ] 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.
- [ 8 ] 武强, 张小燕, 赵颖旺, 等. 矿井巷道突(透)水蔓延模型研究及应用[J]. *煤炭工程*, 2018, 50(2): 1-5.  
WU Qiang, ZHANG Xiaoyan, ZHAO Yingwang, et al. Research and application of water bursting spread model in roadway[J]. *Coal Engineering*, 2018, 50(2): 1-5.
- [ 9 ] 李翠平, 李仲学, 郑瑶瑕, 等. 地下矿突水过程的三维动态仿真模型构建[J]. *工程科学学报*, 2013, 35(2): 140-147.  
LI Cuiping, LI Zhongxue, ZHENG Yaoxia, et al. Three-dimensional dynamic simulation modeling of water inrushes in underground mines[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2013, 35(2): 140-147.
- [ 10 ] 符辉, 毛善君, 骆云秀. 矿井突水蔓延线路生成算法及实现[J]. *煤炭科学技术*, 2013, 41(3): 104-106.  
FU Hui, MAO Shanjun, LUO Yunxiu. Algorithm and realization on spreading route formation of mine water inrush[J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(3): 104-106.
- [ 11 ] 赵颖旺, 武强, 王潇, 等. 基于人工智能的矿井水害灾情研判及预测研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2023, 52(1): 10-19.  
ZHAO Yingwang, WU Qiang, WANG Xiao, et al. The research on mine water disaster situation discrimination and prediction based on artificial intelligence[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2023, 52(1): 10-19.
- [ 12 ] 施群山, 周杨, 蓝朝楨, 等. 面向网络空间测绘的图论-时空对象表达模型[J]. *测绘科学*, 2023, 48(1): 258-268.  
SHI Qunshan, ZHOU Yang, LAN Zhaozhen, et al. A graph theory-spatiotemporal object representation model for cyberspace mapping[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2023, 48(1): 258-268.
- [ 13 ] YE H, LI Z P, LI G Y, et al. Topology analysis of natural gas pipeline networks based on complex network theory[J]. *Energies*, 2022, 15(11): 3864.
- [ 14 ] KRUGLOV Y V, LEVIN L Y, ZAITSEV A V. Calculation method for the unsteady air supply in mine ventilation networks[J]. *Journal of Mining Science*, 2011, 47(5): 651-659.
- [ 15 ] FU H, MAO S J, LUO Y X. Mine water irruption flooding spread route generation algorithm based on directed graph, 2013[C]//ICAM-MM. Applied Mechanics and Materials, Switzerland: Trans Tech Publications Ltd., 2013: 1894.
- [ 16 ] 朱超斌, 周跃进, 卞正富, 等. 废弃矿井抽水蓄能句法视角下拓扑模型构建及空间优化[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(6): 2279-2288.  
ZHU Chaobin, ZHOU Yuejin, BIAN Zhengfu, et al. Topological model construction and space optimization of abandoned mine pumped storage from the perspective of space syntax[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(6): 2279-2288.
- [ 17 ] 朱承敏, 高超, 容玲聪. 矿山水害的模拟与智能防治决策[J]. *中国矿业*, 2020, 29(12): 103-108.  
ZHU Chengmin, GAO Chao, RONG Lingcong. Simulation and intelligent control decision of mine water damage[J]. *China Mining Magazine*, 2020, 29(12): 103-108.
- [ 18 ] 冯子阳. 矿井突水模拟及逃生路径分析系统研究与应用: 以毛坪铅锌矿为例[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- [ 19 ] JALALI S E, NOROOZI M. Determination of the optimal escape routes of underground mine networks in emergency cases[J]. *Safety Science*, 2009, 47(8): 1077-1082.
- [ 20 ] 古鹏, 林开森, 李佳建. 高海拔排水巷断层突水突泥前兆信息演化规律数值模拟[J]. *有色金属(矿山部分)*, 2024, 76(4): 81-86.  
GU Peng, LIN Kaisen, LI Jiajian. Numerical simulation of the evolution law of precursor information of water and mud bursts on high-altitude drainage lane faults[J]. *Nonferrous Metals(Mining Section)*, 2024, 76(4): 81-86.
- [ 21 ] DIAS C, RAHMAN N A, ZAITER A. Evacuation under flooded conditions: experimental investigation of the influence of water depth on walking behaviors[J]. *International journal of disaster risk reduction*, 2021, 58: 102192.
- [ 22 ] LI C P, LI J J, LI Z X, et al. Establishment of spatiotemporal dynamic model for water inrush spreading processes in underground mining operations[J]. *Safety Science*, 2013, 55: 45-52.