

# 基于水流传播模型的矿井突水与逃生问题研究

## 摘要

本文针对矿井突水情况下，解决水流扩散及人员逃生的问题，建立了多层次的水流传播与**逃生路径优化**模型，综合考虑矿井复杂地形、网络结构及水流动力学特征，逐步求解突水情况下的水流漫延模型和工人的最佳逃生路径，并接着在多突水源条件下进行模型拓展与改进。

**针对问题一**，本文基于矿井巷道网络数据基础上，分别建立了水平与立体三维水流传播的模型。通过**向量投影**与**广度优先搜索（BFS）**定位突水点位置，结合流体力学原理和拓扑分析，计算水流在矿井中的传播路径、到达时刻及死胡同的充满时间。结果表明，模型能够准确反映水流在不同矿井条件下的扩散特征。

**针对问题二**，本文在**水流扩散模型**的基础上，构建了动态逃生路径优化模型。通过水位变化与人员行进速度的线性插值计算，结合**Dijkstra**算法实现多目标最优路径搜索，实现矿工在不同位置下的**最优逃生路线**。结果显示，该方法能为工人提供合理可行的逃生方案，具有良好的实用性。

**针对问题三**，本文扩展至双突水点情形，建立了多源水流传播模型。基于**曼宁公式**和坡度修正的速度计算，模拟水流在**分叉与聚合**情况下的**动态传播过程**。结果表明，双突水点条件下水流扩散速度显著加快，节点水流到达时间呈现双峰分布，能够更真实反映矿井复杂条件下的水流动态特征。

**针对问题四**，本文进一步研究了双突水点下的**动态逃生路径规划**问题。通过在水流分布实时变化的约束下，结合**Dijkstra**算法实现逃生路径的快速调整，得出矿工在不同位置的最优逃生方案。结果显示，该方法能够动态响应水流扩散，保证矿工逃生路径的有效性和安全性。

**综上所述**，本文提出的**矿井水流传播与逃生路径优化**模型，既能准确预测水流的动态扩散规律，又能为矿工提供个性化的最优逃生方案。模型在理论与工程应用中均具有较强的实用价值，同时也存在部分理想化假设，后续可通过引入更多实际工况数据进行改进与推广。

本参赛队主要使用 AI 完成 Python 代码编写和修改语法错误，支撑材料中的 PDF 文件“AI 工具使用详情”中以使用 AI 编写输入将附件中所给数据以巷道网络图的形式输出的程序为例展示了使用目的和环节、关键交互记录、采纳和人工修改情况，其他的代码编写与之类似。

**关键词：** 矿井突水，水流传播模型，Dijkstra 算法，逃生路径优化，曼宁公式

## 一、问题重述

### 1.1 问题背景

矿井突水是一种常见且危险事故。它会在短时间内让巷道被淹，给工人生命和财产安全带来严重威胁。而矿井的巷道一般多依据矿脉而建，整体布局是不规则的，结构复杂。水流在其扩散时，受巷道的分布、结构、高度等多个因素的影响。因为情况复杂，很难在矿井突水后立即判断水流的扩散过程。如果能够预测水流的传播规律，并且为工人提供逃生方案，就可以有效的减少人员伤亡和经济损失。

### 1.2 问题要求

问题一：在矿井某一突水点发生突水的情况下，需要建立水流在三维巷道网络中传播的数学模型，预测各巷道端点的水流到达时间以及巷道的充满时间，预测水流的扩散过程。

问题二：在突水发生 1 分钟后，安全部门立即向所有矿工发布逃生通知，需要结合问题一的水流传播结果，考虑工人在不同水深和不同方向下的行进速度差异，确定各矿工从当前位置到出口的最优逃生路线和所需时间。

问题三：当矿井出现两个突水点时，且第二个突水点在第一个突水点发生后延迟若干分钟才开始突水，需要建立多源突水的传播模型，分析水流在巷道网络中的动态扩散和积水变化情况。

问题四：在双突水点的情境下，当第二个突水点发生 1 分钟后，安全部门会立即对逃生方案进行调整。此时需基于最新的水流扩散预测结果，重新规划各矿工的最佳逃生路线，并给出相应的调整结果。

## 二、模型假设

- 1、假设所有巷道截面都是 4 米×3 米的规则矩形。
- 2、假设矿井巷道的空间坐标数据完全准确。
- 3、假设突水流量恒定为 $30\text{m}^3/\text{min}$ ,初始水位保持 $0.1\text{m}$ 。
- 4、假设水流严格按照"水往低处流"的重力原理进行扩散，忽略压力驱动、惯性效应等因素。
- 5、假设死胡同只能流入且密封性良好，水流在其中逐渐蓄水，符合储水的条件。

### 三、符号说明

表1 本文的符号说明

符号	说明	单位
$v_n$	端点 ( $n \in N^*$ )	
$d_{ij}$	端点 $v_i$ 与 $v_j$ 之间的空间距离	米
$D_{max}$	搜索深度	层
$K$	候选节点数	个
$R$	搜索半径	米
$Q$	单个突水源的流量 (取 $30m^3/min$ )	立方米/分钟
$h_0$	初始水位稳定高度 (取 $0.1m$ )	米
$b$	巷道宽度	米
$h$	巷道高度	米
$v_0$	平均流速	米/分钟
$v_1$	初始流速	米/分钟
$\eta$	分流系数	
$n$	分支数量	个
$\phi$	压力损失系数	
$k$	速度衰减系数 (取 0.1)	
$d$	巷道长度	米
$N$	节点总数	
$\bar{d}$	平均连接度	个
$d_i$	每个节点的连接度	
$L$	死胡同长度	米
$n_0$	曼宁粗糙系数	
$R_1$	水力半径	米
$S$	水力坡度	
$h$	水深	米
$P$	湿周	
$t_0$	突水开始时间	秒
$t_0$	水流到达巷道的的时间	秒

## 四、模型建立与求解

### 4.1 问题一模型的建立与求解

#### 4.1.1 问题一的分析

根据题目：需要我们基于给定的附件 1 和附件 2 的两个矿井巷道网络的矿井的单突水问题来建立准确的模型，来描述突水水流在巷道网络的扩散过程。但是水流特征在复杂的巷道网络中很难准确预测描述，需要考虑矿井的高度差异对水流的影响。观察附件 1 和 2，附件 1 中所有端点的高度都是统一的 10 米。所以水流是在水平面内流动；反之附件 2 有很明显的高度变化。因此，在解问题一时选择渐进式建模的思路，

先针对附件 1 和附件 2 的矿井场景，基于不规则点集空间的坐标，将模型扩展到三维空间可视化的网络结构；

对于附件 1 通过向量投影和广度优先搜索(BFS)计算突水点到巷道的最短距离。紧接着基于流体力学原理建立水流传播模型，计算端点水流到达的时刻。后使用**拓扑图分析**来识别网络中的死胡同结构，进而准确分析出巷道水流充满的时间。

对于附件 2，仍然使用上方法计算突水点到巷道的最短距离。我们在原有模型基础上引入重力因素和高程因素，建立三维的水流传播模型。

#### 4.1.2 网络构建与数据预处理

问题 1 中附件 1 和 2 给出了端点坐标  $(X, Y, Z)$  以及巷道编号相对应的端点。我们依据附件 1 和 2 的原始数据，将矿井巷道从离散的坐标点集扩展到能够直观理解的三维空间的网络结构，为后续的计算提供一个空间基础。使用 Python 代码实现上述过程（完整代码放于支撑材料“问题一代码”中“第一题巷道网络图.py”）如下图所示：

# 水平矿井巷道网络

突水点A1 | 高程变化: 0.0m

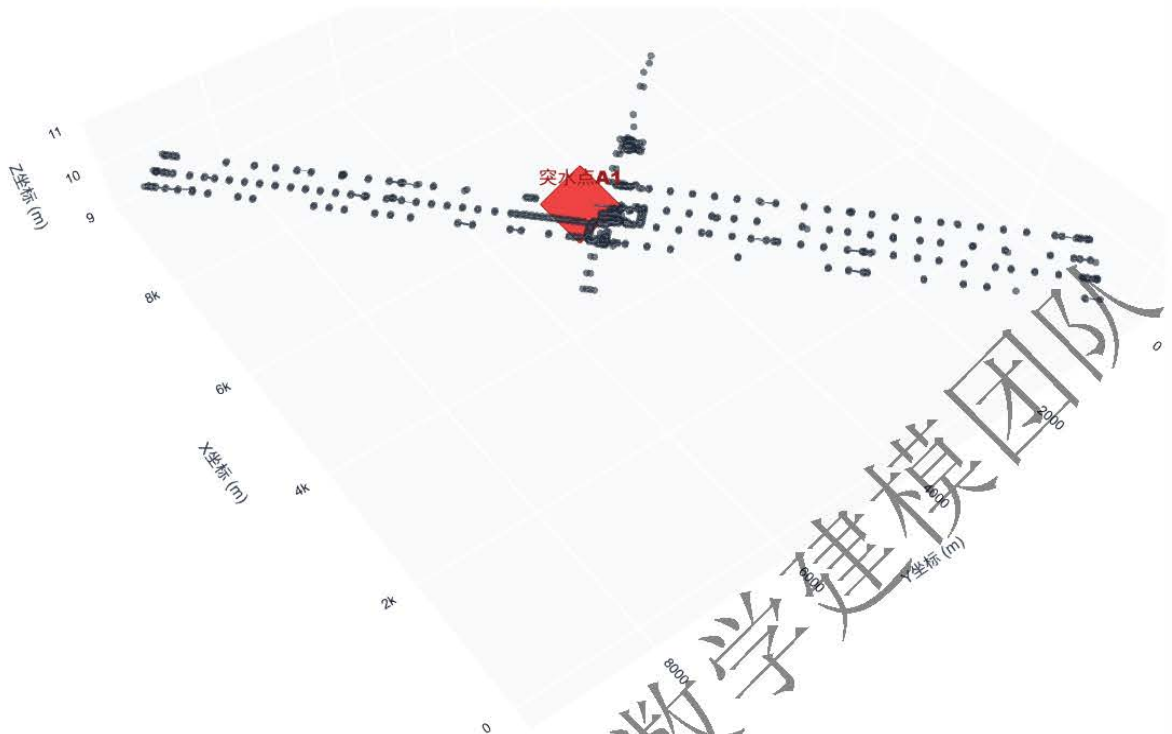


图1水平矿井巷道网络图（附件1）

## 立体矿井巷道网络

突水点A2 | 高程变化: 71.5m

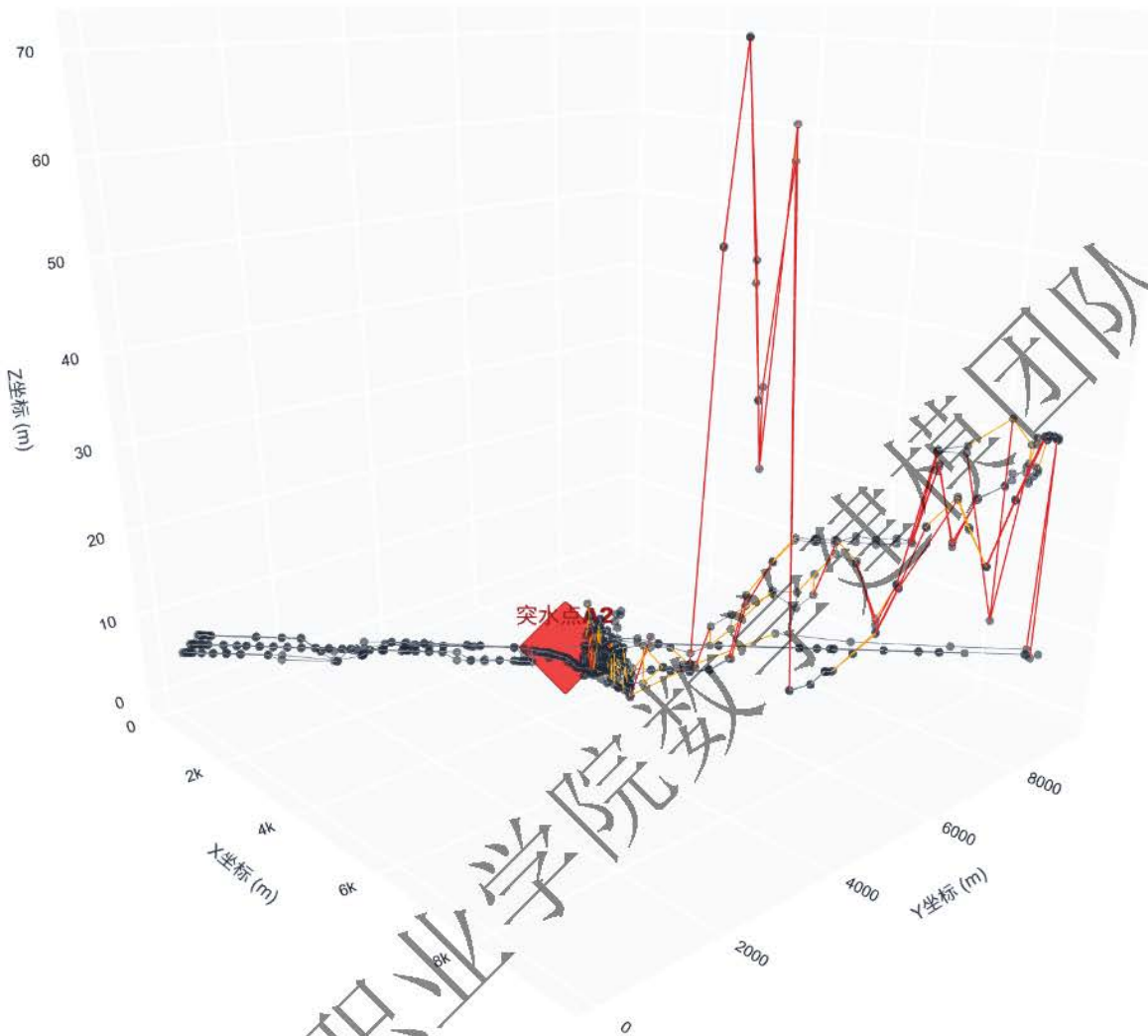


图2 立体矿井巷道网络图（附件 2）

三维网络图将复杂的数据坐标集转化成直观的网络，可以清楚地看到哪些点连在一起，哪些地方是主要通道，哪些地方比较分散。图 1 展示了水平矿井的特点，水流会在平面内流动。图 2 展示了立体矿井的特点，红线表示坡度较陡的地方（高程变化为 71.5m），水流会受高度差的影响，从高处往低处流。

通过这两个图，能够知晓矿井的实际布局。知道突水点的位置在哪里，巷道是怎么连接的，从而为接下来计算水流传播提供基础。

### 4.1.3 附件 1 向量投影与广度优先搜索（BFS）定位 A1 突水点位置

通过观察附件 1 突水点的位置坐标，发现突水点并不存在于网络图的任何端点上，为定位水流进入巷道网络的位置，可以将此转化成点到线段的最短距离求解问题。结合向量投影和 BFS 计算空间几何距离，设每个端点  $v_i$  对应空间坐标  $(x_i, y_i, z_i)$ ，两端点间的欧几里得距离计算公式为：

$$d_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2}$$

其中 $d_{ij}$ 表示节点 $v_i$ 与 $v_j$ 之间的空间距离;

为解决点到线段距离问题, 我们引入向量投影的几何模型, 我们假设突水点 $A_0$ 的坐标为 $(x_0, y_0, z_0)$ , 巷道由端点 $A(x_a, y_a, z_a)$ 和 $B(x_b, y_b, z_b)$ 构成。则巷道(线段)向量可以表示为:

$$\overrightarrow{AB} = (x_b - x_a, y_b - y_a, z_b - z_a)$$

突水点 $A_0$ 到端点 $A$ 的向量可以表示为:

$$\overrightarrow{AA_0} = (x_0 - x_a, y_0 - y_a, z_0 - z_a)$$

为了方便描述向量投影点在线段上的相对位置, 设定一个关于投影点到线段的位置比例的系数 $t$ :

$$t = \frac{\overrightarrow{AA_0} \cdot \overrightarrow{AB}}{|\overrightarrow{AB}|^2} = \frac{(x_0 - x_a)(x_b - x_a) + (y_0 - y_a)(y_b - y_a) + (z_0 - z_a)(z_b - z_a)}{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2 + (z_b - z_a)^2}$$

$t$ 表示投影点在线段上的相对位置:

当 $t = 0$ 时投影点位于端点 $A$ ; 当 $t = 1$ 时投影点位于端点 $B$ ; 当 $0 < t < 1$ 时投影点在线段地内部。

而当 $t < 0$ 时, 投影点会在线段外的延长线上, 那么此时, 真正的最短距离应该是点到线段端点 $A$ (起点)的距离;

同样, 当 $t > 1$ 时, 投影点会在线段另一端的延长线上, 此时最短距离是点到线段端点 $B$ (终点)的距离。

但是, 在此矿井突水问题中, 我们需要的是突水点到巷道段的最短距离, 而巷道长度是有限的, 为了避免计算的错误从而得到无限延伸直线的距离。需要对 $t$ 进行参数的约束( $0 \leq t \leq 1$ ), 来保证投影点始终在线段范围内。

**BFS 参数的确定:**

**搜索半径 $R$ ,** 基于经验法则, 通过分析类似的空间搜索问题中, 通常选择数据集空间范围的 10%-20%作为局部搜索半径,

**候选节点数 $K$ ,** 在图搜索算法中, 选择前 10-30 个最近节点作为起始点是常见做法。

**搜索深度 $D_{max}$ ,** 一般取 2 到 5 层, 目的是限制搜索深度避免陷入大规模的遍历中。

基于上述, 我们建立基于数据特征的自适应调整规则:

- (1) 当候选节点数量不足时, 自动扩大搜索半径。
- (2) 根据网络密度来动态调整候选的节点数量。
- (3) 当搜索队列达到空之后, 但深度还没有达到上限时, 增加搜索的深度。

通过上述, 基于数据特征的自适应调整, 算法都能稳定找到相似的最优解, 因此便可以证明参数选择具有合理性。根据上述实现 Python 过程(完整代码放于支撑材料“问题一代码”中“基于 BFS 算法的矿井突水点最近巷道分析.py”), 可得(前 8 个示例):

最近排名	15 条巷道	距离(米)	搜索深度	投影位置
1	P0358-P0357	198.041	0	近 P0358
2	P0351-P0349	198.069	0	近 P0351

3	P0351-P0352	198.069	0	近 P0351
4	P0351-P0350	198.069	0	近 P0351
5	P0351-P0346	198.069	0	近 P0351
6	P0352-P0346	200.787	0	近 P0352
7	P0352-P0349	200.787	0	近 P0352
8	P0352-P0350	200.787	0	近 P0352

表2

根据生成结果，P0358-P0357 巷道距离突水点最近（198.041m），表明水流将从 P0358 节点(5492.97, 5067.92, 10.0)进入巷道网络。

水流从 P0358 进入后，将沿着 P0358-P0357 巷道向 P0357 方向传播，同时向 P0358 连接的其他巷道分流。为分流模型提供几何基础。

#### 4.1.4 附件 1 水流传播模型的构建

根据题意，巷道为矩形断面，宽度  $b = 4m$ ，高度  $h = 3m$ ，初始的水流可以保持的稳定水深度为  $h_0 = 0.1m$ ，突水流量为  $Q = 30m^3/min$ 。水流先流经 P0358-P0357 巷道，并向 P0358 连接的其他巷道分流。因此，水流经巷道和节点的速度不一样，我们首先分析水初到巷道的速度：

水流刚开始进入巷道时，稳定水深度为  $h_0 = 0.1m$ ，巷道的宽度  $b = 4m$ ，水流过的水断面为  $h_0 \times b = 4 \times 0.1 = 0.4m^2$ ，因此水流到达节点前（流进巷道）的平均流速便为：

$$v_0 = \frac{Q}{h_0 \times b} = \frac{30}{0.4} = 75m/min = 1.25m/s$$

接下来考虑分流对速度的影响，水流在流经交叉点时，如果分支越多，则每个分支的动能就越小，流速就会降低。水流在分流时是一种非线性的衰减关系，我们可得到分流系数公式：

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{n}}$$

其中  $\eta$  表示分流系数； $n$  表示分支的数量。

根据能量守恒定律，分流的过程中会出现局部阻力的损失，通常分支越多，压力损失越大，这导致流速进一步降低，所以为了更精确的预测描述分流后水流的速度，引入压力损失系数公式：

$$\phi = 1 - (n - 1) \times k$$

其中  $\phi$  表示压力损失系数； $k$  表示速度衰减系数； $n$  表示分支数量。其中实际水流流速受到摩擦，局部阻力等复杂因素的影响，很难进行精确预测，我们通过查阅相关资料，通过经验数据，发现在煤矿巷道水流模拟中，分流时的能量损失系数通常设为 0.1 左右，以实现与分流系数结合，确保模型的准确性。

根据欧几里得距离公式：

$$d = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2}$$

其中  $d$  表示巷道的长度，以此根据时间计算公式：

$$t = \frac{d}{v}$$

其中  $t$  表示传播时间； $d$  表示巷道长度，由欧几里得距离公式计算而来； $v$  表示流

速，由分流系数和压力损失系数公式计算而来。

基于质量守恒，水流量在从巷道进入分叉口时应该保持总流量不变，每个分支假设获得等比例的流量，所以，公式为：

$$Q_{\text{每个分支分配流量}} = \frac{Q_{\text{当前节点总流量}}}{n}$$

在矿井巷道系统中，通道并不是均匀的，有些通道是主要的运输干线，它连接多个支路，因为运输原因，通常设计得更宽敞、阻力更小，水流在此的速度更快；而在支路的巷道则相反。因此，我们需要定义每个节点的“重要性”。重要性高的节点更可能位于核心路径上，所以就能避免简单地假设所有巷道相同而导致的结果偏差过大。所有通过**拓扑聚类**方法分析平均连接度来划分主支巷道，是其结果更贴合实际。**平均连接度公式**表示为：

$$\bar{d} = \frac{\sum d_i}{N}$$

其中 $\bar{d}$ 表示平均连接度； $d_i$ 表示每个节点的连接度； $N$ 表示节点总数。将上述公式有机整合，形成完整的水流传播模型，使用 Python 代码实现上述过程，将结果放于“支撑材料”中“问题一代码”中“result1\_1 代码及可视化图表.py”

#### 4.1.5 附件 1 从全局网络分析到局部死胡同聚焦

在巷道单突水问题中，还存在死胡同巷道（即连接度是 1 的末端的支路），这会导致水流在此处积聚。因为这些巷道有水流到达后，就不再有分支，就会迅速充满，形成淹没区。而对于非死胡同（连接度大于 1 的主干道）水流会持续流动和分流，不会完全被充满。所以我们针对于死胡同，将其看做是充满对象，但不意味着非死胡同“不会被充满”，在此问题上，我们简化甚至忽略对于非死胡同充满时间的计算，聚焦于高风险区的死胡同，优先评估可能快速淹没的死胡同区域。

所以对于非死胡同假设其一直处于动态平衡的状态，只将其看作是传播路径，没有蓄水风险。死胡同可分为传播和蓄水两个阶段。首先，我们使用**节点度数**（与其相连的边的数量）来识别死胡同，因此构建无向图，死胡同只有一个连接点，在图中表现为度数为 1，只要识别出度数为 1 的节点，就可以确认它是死胡同，编写 Python 程序实现上述，生成图和数据如下：

矿井网络3D可视化图

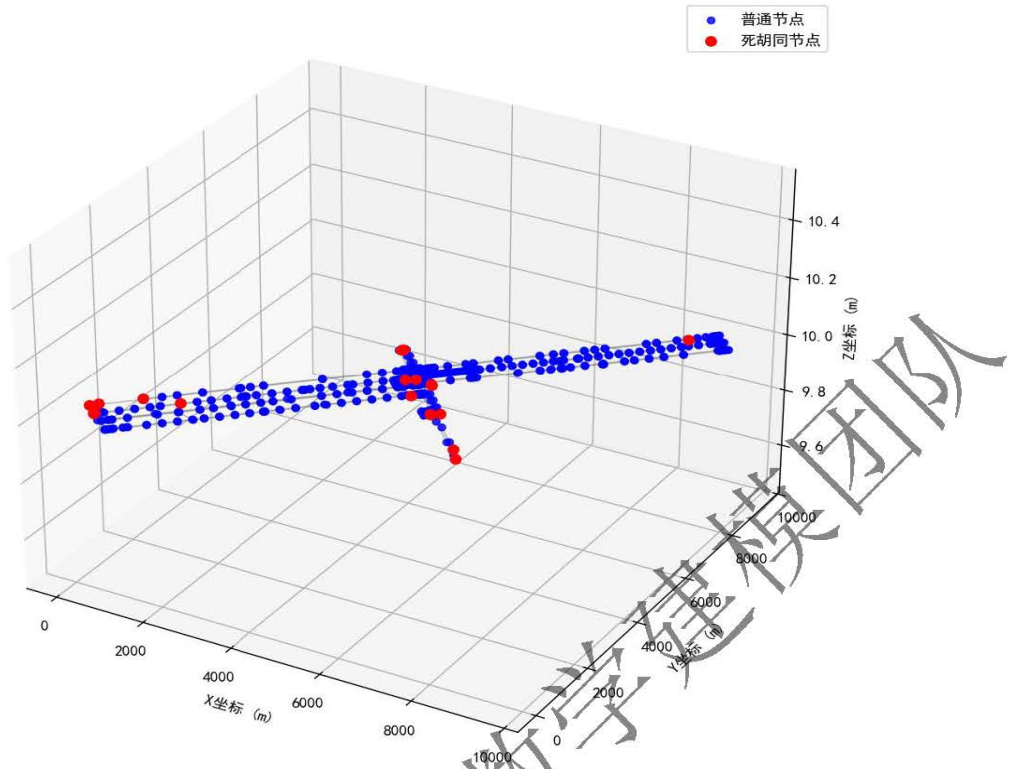


图3矿井网络 3D 可视化图

分析上图可以得出：红色标记的死胡同节点主要分布在矿井的外围边缘的位置，比较符合实际矿井的特点。根据代码识别死胡同数量，作出表格直观可以看出共有 20 个死胡同：

死胡同节点	
P0013	P0356
P0014	P0405
P0025	P0417
P0042	P0421
P0082	P0496
P0084	P0571
P0179	P0595
P0191	P0599
P0289	P0600
P0355	P0000

表3 死胡同节点

根据欧几里德距离公式计算巷道长度或突水到节点的距离。传播时间：

$$\Delta t = \frac{d}{v} \quad (v = 1.25m/s)$$

在死胡同第一个传播阶段，初始速度：

$$v_0 = \frac{Q}{h_0 \times b} = \frac{30}{0.4} = 75m/min = 1.25m/s$$

在死胡同第二个蓄水阶段，根据水流的体积守恒，因水流刚开始进入巷道时，稳定水

深度为 $h_0 = 0.1m$ , 计算总体积与剩余体积 (计算需要充满的部分):

$$V = b \times h \times L, V_1 = b \times h_0 \times L, V_r = V - V_1$$

死胡同充满所需时间便为第一阶段传播时间和第二阶段蓄水时间的和。

#### 4.1.6 附件 2 向量投影与广度优先搜索 (BFS) 定位 A2 突水点位置

针对附件 2 的突水点 A2(4143.12, 4376.28, 6.33), 采用与附件 1 相同的 BFS 算法和向量投影技术确定最近巷道。结果如下表 (示例前 8 个), 完整的代码放于“问题一支撑材料”中“附件 2 求突水点位置.py”

排名	节点 ID	坐标	距离(m)
1	P0358	(4096.18,4331.93,6.28)	64.58
2	P0357	(4077.22,4351.61,6.28)	70.37
3	P0531	(4331.09,4132.17,6.35)	308.09
4	P0107	(4381.70,4180.19,6.17)	308.82
5	P0069	(4280.09,4083.94,6.49)	322.84
6	P0102	(4431.93,4228.04,5.92)	324.63
7	P0351	(4384.08,4603.97,6.59)	331.52
8	P0352	(4363.29,4626.52,6.54)	333.31

表4

根据生成结果, P0358-P0357 巷道距离 A2 突水点最近 (64.58m), A1 与 A2 间的距离: 1327.76 米, A2 更接近 P0358 节点, 水流将从 P0358 节点(4096.18, 4331.93, 6.28) 进入巷道网络。

#### 4.1.7 建立矿井突水水流传播模型

观察图 2 立体矿井巷道网络图, 可知该矿井以平缓的坡度为主, 且突水点位于较为平缓的坡度, 说明该矿井网络中普遍存在向下或近水平的路径。根据能量守恒定律, 在没有外力作用下, 水只能从高势能位置流向低势能位置; 在该矿井条件下, 由于高程差较为显著, 水流的重力分量很明显, 如果水流要上行的话, 需要克服重力做功, 产生额外的能力输入, 综合考虑矿井的实际条件, 我们假设此矿井突水点水流过程中没有上行移动。

但为了避免过度理想化导致的测量误差过大, 我们综合考虑:

在实际工程测量中, 高程数据存在不可避免的误差, 例如:

**GPS 测量系统:** 在地下环境中精度约 $\pm 3 - 5cm$ , 我们设置 $5cm$ 的容差, 可以吸收一些技术造成的误差。由此提高测量的准确性。

基于三维欧几里得距离公式:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2}$$

水平投影距离:

$$d = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}$$

$$\text{坡度} = \frac{z_j - z_i}{d_{ij}}$$

高度差为:

$$\Delta h = z_j - z_i$$

设置的5cm的容差，可以根据高度差设置约束条件如下：

若 $\Delta h > 0.05m$ ，则流动被阻断；若 $\Delta h < 0.05m$ ，则流动被允许。

根据附件 2 巷道的坡度情况，推导水流上下坡不同速度，水流速度应该做调整：基于流体力学的重力效应，当水流在下坡时，

沿坡向下的重力分量为  $mg \times \sin(\text{坡度})$

当坡度小时  $\sin(\text{坡度}) = \tan(\text{坡度})$

重力加速度为  $g \times (\text{坡度})$

通过实验验证，我们可以发现，坡度 1%时流速增加约 3%，所以可推导出下坡加速公式为：

$$1 + 3 \times |\text{坡度}|$$

水流在上坡时，

克服重力需要的额外功为  $mgh$

功率的损失为  $mgv \times \text{坡度}$

通过实验验证，我们可以发现速度降低与坡度成正比的关系，可推导出上坡减速公式为：

$$\max(0.6, 1 - 5 \times \text{坡度})$$

水流在单段巷道内速度近似是恒定的，根据速度公式可得，单个巷道的传播时间：

$$t = \frac{d}{v}$$

总时间为各段巷道时间之和。根据上述，使用 Python 生成可视化图表（图 4）和结果（部分示例表 4），结果放于支撑材料“问题一”中“附件 2 水流到达端点时间和可视化.py”

端点编号	X坐标	Y坐标	Z坐标	是否可达	端点水流到达时刻(s)	端点水流到达时刻(min)	传播类型
P0422	3104.62	3431.7	6	是	1092.85	18.21	重力流动
P0423	3104.3	3391.52	6.02	是	1093.46	18.22	重力流动
P0424	2771.74	3113.76	6	是	1461.1	24.35	重力流动
P0425	3695.83	3990.46	6.21	是	442.07	7.37	重力流动
P0426	2791.85	3093.2	6	是	1439.06	23.98	重力流动
P0427	3714.6	3969.17	6.21	是	421.2	7.02	重力流动

P0428	2623. 94	2974. 37	5.99	是	1623.63	27.06	重力流 动
P0429	2623. 99	2934. 31	6	是	1623.96	27.07	重力流 动
P0430	4662. 35	4777. 92	4.23	否			重力阻 断

表5

分析部分预测结果（表 4）可知可达节点端点水流到达时刻和不可达节点，结果图显示共有 662 个总节点与 28 个可达节点，数据比较接近真实矿井条件下的水流传播特征。

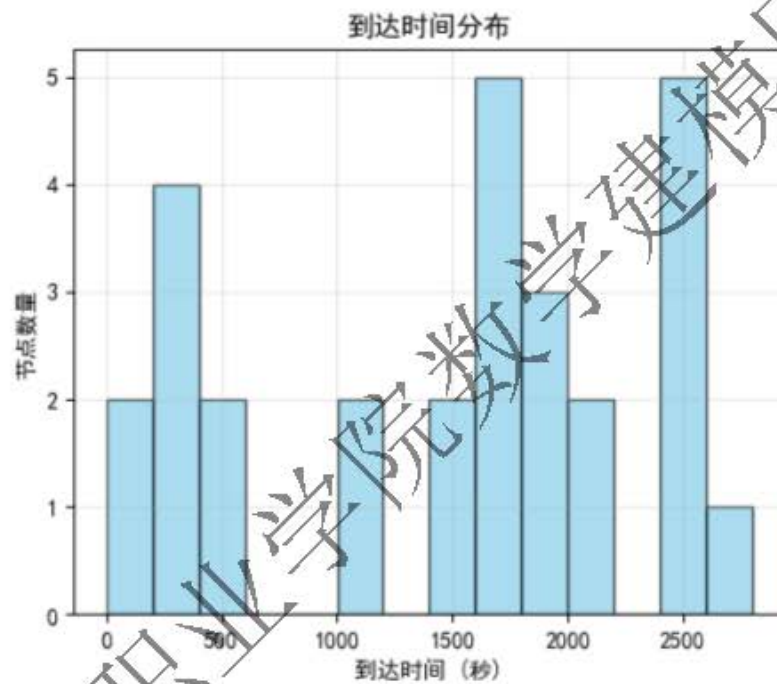


图4附件 2 端点到达时间分布

图 4 显示了明显的双峰特征，主要集中在 0-500 秒和 1500-2000 秒两个时间，约 8 个节点在 500 秒内到达，表明水流初期传播迅速。1500-2500 秒区间有持续的节点到达，显示传播的延续性。

我们使用**节点度数**（与其相连的边的数量）来识别死胡同，因此构建无向图，生成图如下：

矿井网络3D可视化图

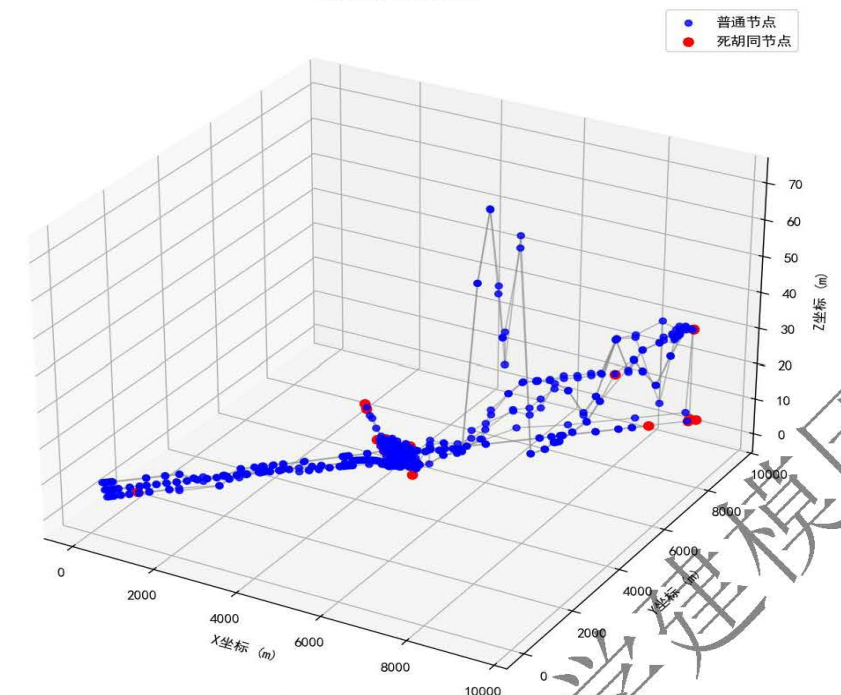


图5矿井网络 3D 可视化图

分析上图可以得出：红色标记的死胡同节点分布在网络的各个区域，还有许多死胡同位于网络的边缘或分支末端，死胡同也存在于不同的高度层次，比较符合实际矿井的特点。根据代码识别死胡同数量，作出死胡同节点如下表：

死胡同节点	
P0013	P0356
P0014	P0405
P0025	P0417
P0042	P0421
P0082	P0496
P0084	P0571
P0179	P0595
P0191	P0599
P0289	P0600
P0355	P0000

表6

#### 4.1.8 死胡同上行路径的分析

在上述矿井突水传播问题中，我们采用了“重力流动约束”的假设，即忽略水流向上流动（容差 5cm）。如果重力约束假设合理，那么网络中最难到达的节点（死胡同）应该存在显著的上行阻碍。

**基于三维欧几里得距离公式**，对上行路径进行判断：

高度差为：

$$\Delta h = z_j - z_i$$

如果 $\Delta h > 0.05m$ ，则可以认为其为上行路段。

计算单段上行路段高度，净高度差为  $z_j - z_i - 0.05$

我们只取净高度差为非负值的部分视作“有效上行”，基于深度优先搜索（DFS）来实现最优路径的选择。使用 Python 生成结果放于支撑材料“问题一代码”中“判断突水口与死胡同之间是否存在上行巷道.py”

结果如下表：

死胡同节点	死胡同高度(m)	可达性	原因
P0013	0.5	不可达	无连通路径
P0014	1.33	不可达	无连通路径
P0025	16.69	不可达	无连通路径
P0042	8.52	不可达	无连通路径
P0082	9.26	不可达	无连通路径
P0084	32.81	不可达	无连通路径
P0179	9.26	不可达	无连通路径
P0179	9.26	不可达	无连通路径
P0191	32.51	不可达	无连通路径
P0289	6.43	不可达	无连通路径
P0355	6.16	可能可达	轻微上行0.26m，但不考虑
P0356	5.67	可能可达	轻微上行0.26m，但不考虑

表7.

通过上述表我们可以发现，死胡同属于“不可达”甚至“很难到达”类别，需要大量上行才能到达，反向证明了重力约束在整个网络中的主导作用和正确性。

## 4.2 问题二模型的建立与求解

### 4.2.1 问题二的分析

该问题在单突水点条件下，为矿井中的工人设计最优逃生路径，我们基于问题一水流蔓延模型，建立矿井网络的图结构，在动态变化的水流环境中，考虑水流，地形等对人员移动速度的影响，结合 Dijkstra 算法从而找出最优逃生方案。

### 4.2.2 动态水深的计算和逃生路径模型的构建（附件1）

问题一的水流蔓延模型得到各端点的水流到达时间和各巷道的充满时间，这些信息记录了水流到达巷道网络中每个节点的具体时刻和每条巷道从开始进水到完全被水淹没所需的时间。这些结果直接为问题二提供了约束信息。

计算巷道水位深度需要水流到达时间和巷道充满时间：

当时间 $t$ 小于水流到达时间时，水位深度为0；

当时间 $t$ 位于水流到达时间和充满时间之间时，水位深度按线性规律增长；

当时间 $t$ 大于等于充满时间时，水位深度等于巷道高度  $H$

我们使用线性插值公式，将复杂的流体力学的水位变化问题简化为线性函数，可以计算巷道水深从初始状态（0.1 米）到完全充满状态（3.0 米）的任意时刻的精确的水的深度。计算公式为：

$$h(t) = h_0 + \frac{h - h_0}{t_{\text{充满时间}} - t_0} \times (t - t_0)$$

基于各节点的水流到达时间差异，可判断水流的方向：

若  $t_i > t_j$ ，水流从  $j$  流向  $i$ ；                      若  $t_i = t_j$ ，水流无明显的流向；

若  $t_i < t_j$ ，水流从  $i$  流向  $j$ ；

矿工行进速度取决于水位深度和行进方向。

当无水流时，矿工行进速度为  $4m/s$ ；

当顺水行进且有水流时，速度为  $2m/s$ ；

当逆水行进且水位深度不超过  $0.3$  米时，速度为  $1m/s$ ；

当逆水行进且水位深度超过  $0.3$  米时，不通行。

因为矿井巷道的出入口存在多个，采用多目标搜索策略。解决矿工位置到任意出入口的最短时间路径，基于上述，使用 Python 代码实现此过程。完整程序代码放于支撑材料“问题二代码”中“基于附件 1 巷道网络矿工逃生.py”，生成图和部分数据如下：

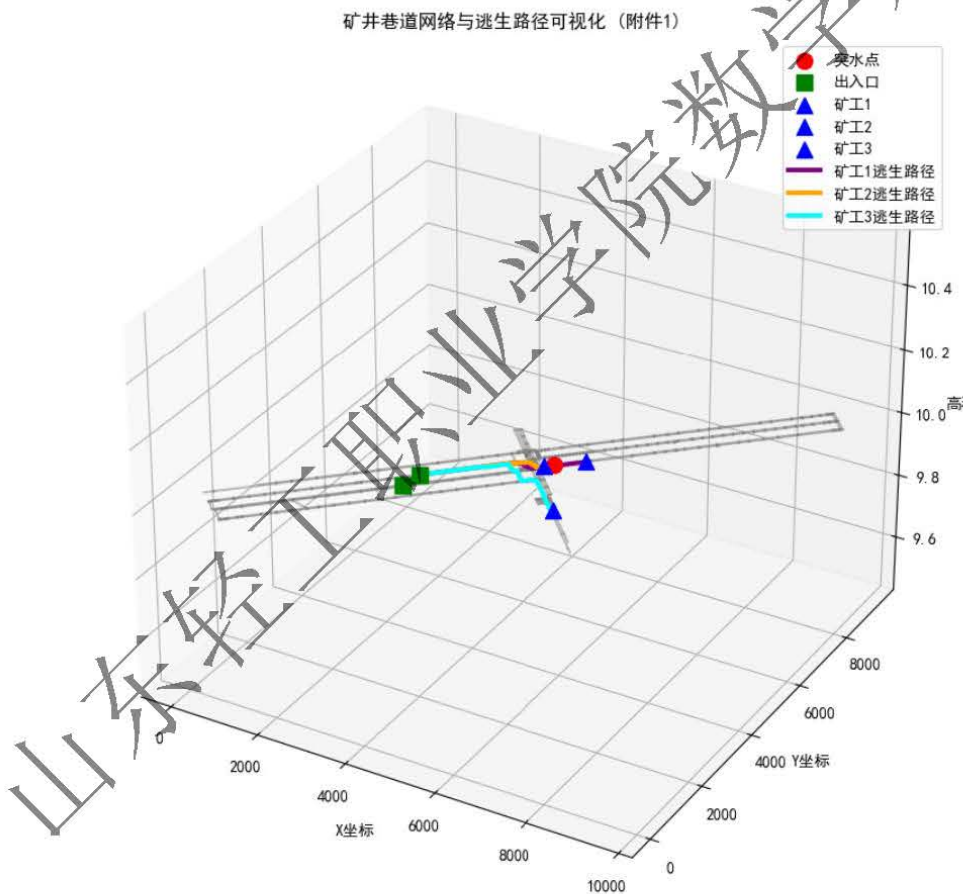


图6矿井巷道网络与逃生路径可视化图

上述图清晰地展示了在三维矿井环境中，在附件 1 的矿井结构下的工人的最优逃生路径规划的路线，图中显示三条不同颜色的逃生路径，分别对应三个矿工的最优路径选择。其中矿工 2 逃生路径从接近突水点的位置向西北出入口移动，路径相对较短

且直接。

序号	工人位置			到达时刻(分钟)	巷道编号
	x (m)	y (m)	z (m)		
0	5194	4785.31	10	1	
1	5182.93	4774.75	10	1.13	H0389
2	5154.54	4747.39	10	1.29	H0385
3	5116.99	4711.19	10	1.51	H0387
4	5106.55	4701.13	10	1.57	H0369
5	5093.44	4688.5	10	1.65	H0368
6	5080.8	4676.64	10	1.72	H0371
7	5007.74	4752.95	10	2.16	H0918
8	4972.02	4718.97	10	2.36	H0850
9	4946.13	4746.21	10	2.52	H0848
10	4919.95	4773.77	10	2.68	H0356
11	4894.93	4764.03	10	2.79	H0484
12	4886.25	4773.87	10	2.84	H0894
13	4870.36	4789.27	10	2.94	H0893
14	4851.72	4772.58	10	3.04	H0174
15	4779.44	4704.26	10	3.46	H0170
16	4760.82	4723.36	10	3.57	H0856
17	4705.57	4671.12	10	3.88	H0857
18	4685.7	4652.19	10	4.00	H0160
19	4649.08	4617.3	10	4.21	H0901
20	4613.8	4583.68	10	4.41	H0899
21	4596.73	4601.36	10	4.51	H0155
22	4377.26	4393.44	10	5.77	H0135
23	4159.62	4186.49	10	7.03	H0134
24	3941.79	3980.9	10	8.27	H0138
25	3869.17	3911.99	10	8.69	H0652
26	3651.62	3704.66	10	9.94	H0649
27	3470.58	3532.61	10	10.98	H0646
28	3325.07	3395.97	10	11.81	H0454
29	3252.16	3326.62	10	12.23	H0452
最后	3252.16	3326.62	10	12.23	H0452

表8工人 2 逃生路径

通过观察生成表格数据，发现工人 2 在此地形条件下的逃生时间最少：11.23 分钟，其他工人虽相较于工人 2 逃生时间所用较多一点，但都实现了在复杂的巷道网络中找到相对高效可行的逃生方案。

#### 4.2.3 动态逃生路径模型的构建与改进（附件 2）

基于附件 2 的矿井网络数据，需要在上述水流漫延模型基础上建立矿工逃生路径优化模型。其呈现更加复杂的三维网络结构特征。复杂的地形特征使得水流扩散和矿

工的移动速度都受到了影响。矿工的逃生过程不仅需要考虑到水平距离的最短化，更要充分利用高度优势，选择能避开水流最佳路径的逃生方案。

三个矿工的初始位置：矿工 1 位于(4395.15, 4614.53, 6.59)，距离突水点较近，处于相似但低于突水点的高度，面临较高的威胁；矿工 2 位于(3398.34, 5965.56, 1.31)，处于矿井中的低点，虽然距离突水点较远，但可能存在水流汇聚的风险；矿工 3 位于(3879.44, 4125.47, 6.22)，在水平位置上相对安全，但仍需考虑水流扩散的时间点。这种复杂的初始态势要求模型能够同时处理多目标优化问题，为每个矿工制定个性化的最优逃生策略。

对于任意巷道段，当存在高程差时，水流速度采用曼宁公式计算：

$$v = \frac{1}{n_0} \times R_1^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}}$$

其中， $n_0$ 为曼宁粗糙系数（在曼宁公式中，粗糙系数直接影响流速计算的准确性，在表面相对光滑、规整度较好的混凝土衬砌隧道的曼宁系数通常在 0.012-0.016 之间；在表面粗糙度较高的岩石巷道，系数可达 0.025-0.035；基于此，为了在理论严谨性和工程实用性之间的平衡，我们取较高和较低粗糙系数的折中 $n_0 = 0.02$ ）； $R_1$ 为水力半径； $S$ 为水力坡度。

$$\text{水力半径: } R_1 = \frac{h \times b}{P} = \frac{h \times b}{b + 2h}$$

基于上述，我们使用 **Dijkstra 算法**（从源点开始，逐步扩展到整个图，每次都处理当前已知最短路径最小的节点。算法的每一步都是基于当前已知的最短路径，通过更新路径长度估计值来逐步确定每个节点的最短路径）。目的是找到从起点到终点的最短时间路径。从而根据位置和水流状况，选择最优的目标出入口，实现不同的逃生路径。使用 Python 实现上述过程，完整程序放于“支撑材料”“问题二代码”中“基于附件 2 巷道网络矿工逃生.py”，生成图和部分数据如下：

矿井巷道网络与逃生路径可视化 (附件2)

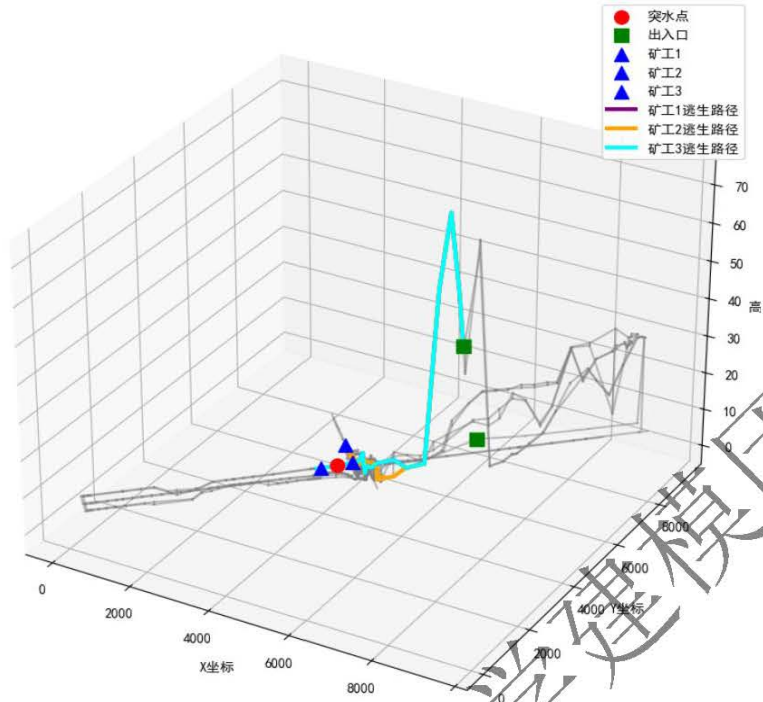


图7矿井巷道网络与逃生路径可视化图

从三维可视化图形可以观察到,附件2的巷道网络呈现出明显的立体分布特征,图中显示的三条不同颜色的逃生路径可以看出,算法实现了个性化的逃生路径。

序号	工人位置			到达时刻(分钟)	巷道编号
	x (m)	y (m)	z (m)		
0	3398.34	5965.56	1.31	1	
1	3623.17	5801.84	0.1	2.10	H0733
2	3638.57	5784.1	1.3	2.20	H0019
3	3657.59	5763.87	0.47	2.31	H0017
4	3672.34	5748.4	0.47	2.40	H0106
5	3697.45	5722.88	0.18	2.55	H0112
6	3715.43	5703.58	0.18	2.66	H0415
7	3720.98	5698.32	0.07	2.69	H0816
8	3735.44	5683.12	0.52	2.78	H0818
9	3742.26	5675.33	1.05	2.82	H0825
10	3760.79	5656.4	1.09	2.93	H0824
11	3783.2	5632.37	1.25	3.07	H0906
12	4241.4	5149.9	2.65	5.84	H0908
13	4281.74	5187.14	4.02	6.07	H0123
14	4317.58	5176.76	3.83	6.23	H0121
15	4346.05	5168.39	4.46	6.35	H0118
16	4355.02	5176.54	4.35	6.40	H0120
17	4390.14	5210.66	3.5	6.61	H0192
18	4478.76	5295.55	3.23	7.12	H0739

19	4505.64	5320.47	3.16	7.27	H0741
20	4751.19	5061.72	3.84	8.76	H0953
21	4768.47	5043.34	3.84	8.86	H0929
22	4782.02	5027.77	1.01	8.95	H0928
23	4822.52	5066.87	0.74	9.18	H0753
24	4832.18	5056.79	1.37	9.24	H0750
25	4859.39	5028.25	2.05	9.41	H0749
26	4887.67	5052.93	1.44	9.56	H0145
27	4935.54	5002.39	2.25	9.85	H0147
28	4976.58	4959.06	2.63	10.10	H0149
29	5017.25	4916.12	2.88	10.35	H0153
30	5047.13	4884.57	3.01	10.53	H0142
31	5194.31	5024.81	3.02	11.38	H0133
32	5411.2	5231.52	5.13	12.62	H0132
33	5429.52	5213.36	5.14	12.73	H0136
34	5647.36	5418.94	5.62	13.98	H0138
35	5719.98	5487.86	5.62	14.40	H0652
36	5937.53	5695.18	51.95	15.66	H0649
37	6118.56	5867.24	71.41	16.71	H0646
38	6264.08	6003.87	50.62	17.54	H0454
39	6336.99	6073.22	36.15	17.97	H0452
最后	6336.99	6073.22	36.15	17.97	H0452

**表9 工人2 逃生路径**

通过观察图表，可清晰得得出每个工人的逃生路径和逃生时间，此模型提供了每个人合理的逃生方案，具有良好的工程实用性和理论价值。

### 4.3 问题三模型的建立与求解

#### 4.3.1 问题三的分析

此问题建立双点突水情况下的水流漫延模型，在单点突水模型基础上综合考虑水流的分流机制、传播速度计算以及多源汇合的动态过程。水流到达任一端点后会形成 0.1 米的初始水深；

针对附件 1 水平情况，采用曼宁公式计算水流速度，在分叉端点处，水流向所有连通的巷道平均分配。综合考虑巷道粗糙度的影响。建立多源水流传播动力学模型。

针对附件 2 矿井的复杂几何空间，引入坡度修正的流速计算来改进模型；在分叉节点处，水流分配不再采用简单平均分配，而是基于高程差异进行加权计算。

#### 4.3.2 水流速度与网络拓扑结构模型构建

在矿井巷道环境中，巷道断面为矩形，水流漫延过程可以类似于明渠流动，因为曼宁公式能有效捕捉水流速度与巷道几何参数、粗糙度和坡度之间的关系，为模拟突水水流的动态传播提供依据。水流速度采用曼宁公式进行计算，该公式为：

$$v = \frac{1}{n_0} \times R_1^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}}$$

其中， $n_0$ 为曼宁粗糙系数； $R_1$ 为水力半径； $S$ 为水力坡度。

$$\text{水力半径: } R_1 = \frac{h \times b}{P} = \frac{h \times b}{b + 2h}$$

巷道网络结构使用无向图来表示，巷道长度通过欧几里得距离计算：

$$d = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}$$

突水点到所有端点的三维欧几里得距离：

$$d_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2}$$

选择距离最小的端点作为初始参考点，然后在此端点的所有邻接巷道中寻找最佳匹配的值。对于连接端点  $i$  和  $j$  的巷道，计算突水点到巷道线段的垂直距离，并确定突水点在巷道上的相对位置系数  $t$ 。

突水点到巷道两端端点的水流传播时间为：

$$t_i = t_0 + \frac{t \times d}{v_0}; \quad t_j = t_0 + \frac{(1-t) \times d}{v_0}$$

### 4.3.3 多源水流传播的模型

在双点突水情况下，需要处理来自不同源点的水流在网络中的传播与汇合，对于端点  $i$ ，其水流到达时间由水流决定： $t_i = \min_{j \in N(i)} \left\{ t_j + \frac{d}{v} \right\}$

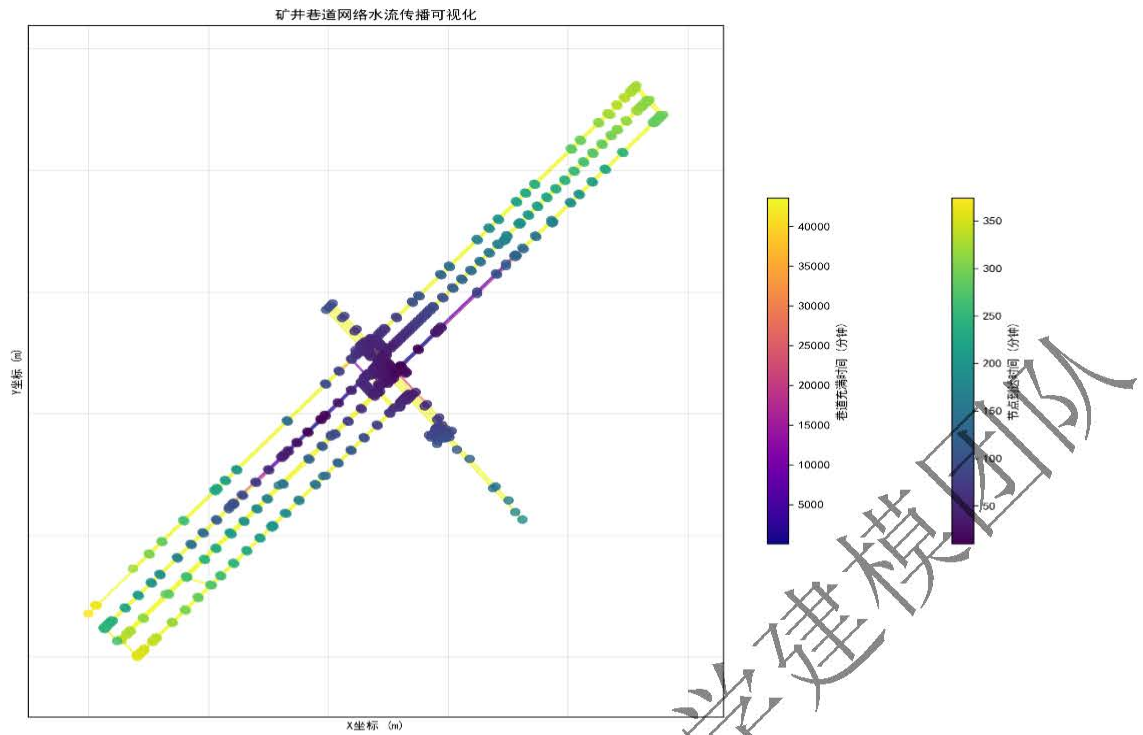
在分流的节点，水流按照平均分配进行分布。对于巷道的充满时间，包括水流传播到巷道的的时间和巷道蓄水的时间：

水流到达时间为  $\min\{t_i, t_j\}$

巷道蓄满水还需要的额外的水量： $d \times b \times (h - h_0)$ ；

那么巷道的充满时间： $\text{水流到达时间} + \frac{\text{巷道蓄满水还需要的额外的水量}}{Q}$

通过 Python 实现上述过程，生成结果图如下（图 8，图 9，图 10），生成表格，完整代码放于“支撑材料”“问题三代码”中“解决附件 1 的水流变化情况.py”



**图8矿井巷道网络水流传播可视化图**

该图展示了水流到达时间的空间分布规律，分布呈现明显的双峰结构，第一个峰值出现在 40-80 分钟区间，第二个较小的峰值出现在 200 分钟左右。这种空间分布反映两个突水点的独立影响的区域，说明双突水点在初期具有较快的扩散能力。

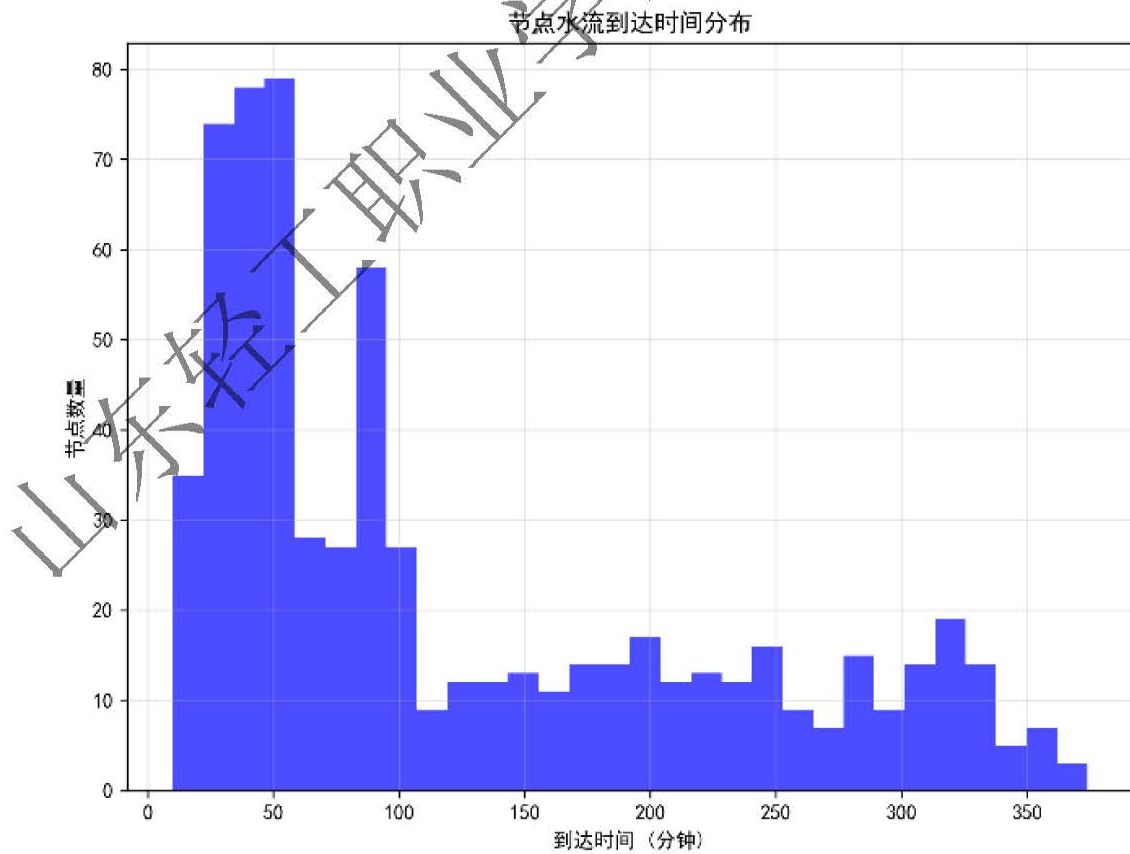


图9节点水流到达时间分布图

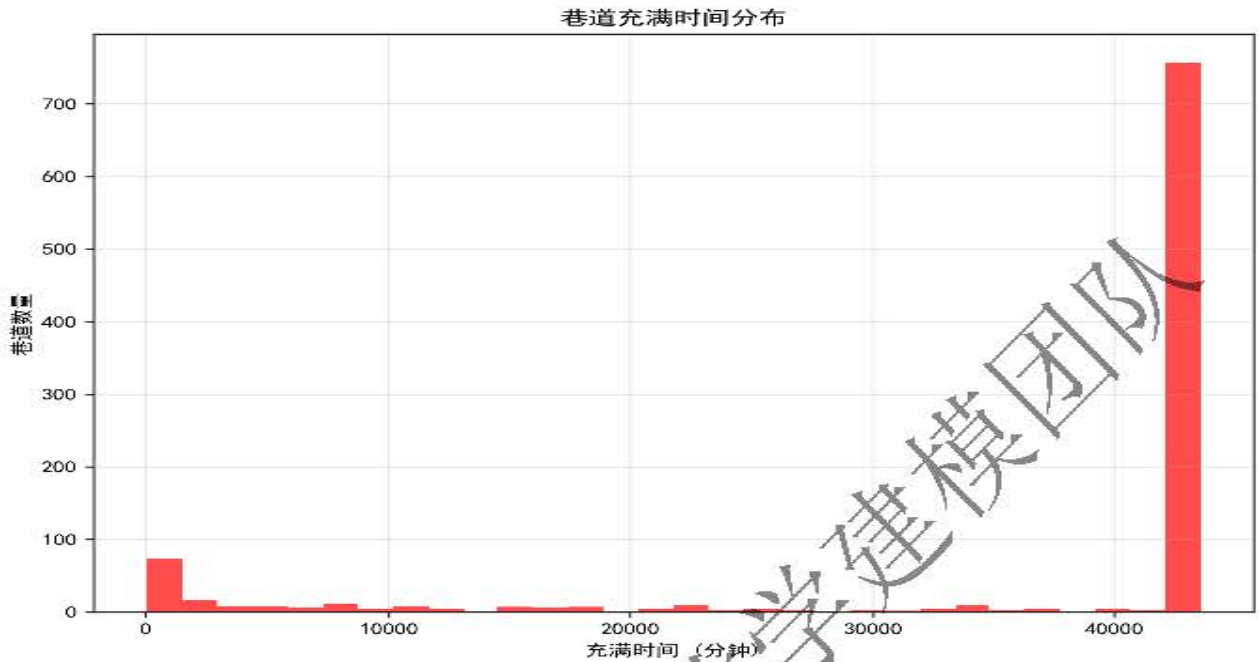


图10 巷道充满时间分布

左图展现了双突水点情况下节点水流到达时间的分布规律，呈现双峰结构。0-100分钟内覆盖了网络中大多数的节点，表明双突水点在起初具有很强的扩散特征。特别是在50-80分钟区间内节点密度最高，说明大部分节点在此时间内被水流覆盖。

右图充满时间分布极不均匀，小部分巷道在短时间内可以充满，一大部分的巷道充满时间达到40000分钟（约28天）。巷道完全充满需要积累足够多的水量将整个巷道空间填满，而在实际情况下，水流在网络中经过很多次分流，到达某一个巷道的流量可能只为初始流量的很小一部分。最终导致远端巷道的充满时间延长。

根据国内外矿井突水事故的统计数据：多数案例显示水流在突水后1-3小时内能够传播大部分主要巷道，与模型预测的80-200分钟基本符合。

历史案例中，巷道完全淹没往往需要数小时到数天时间，特别是对于大型矿井网络，完全淹没可能需要1-2周时间。说明该模型预测具有一定的合理性。

#### 4.3.4 基于动力学的三维水流传播模型

针对附件2具有显著高度变化的复杂地形，在上述双突水点模型基础上，引入坡度的流速计算来应对该矿井的复杂几何空间，以实现更准确的水流传播过程。

计算巷道坡度为  $\frac{z_j - z_i}{d_{ij}}$  ( $d_{ij}$ 为巷道的水平投影长度)

基于曼宁公式，引入实际地形坡度进行计算的改进：

$$v = \frac{1}{n_0} \times R_1^{\frac{2}{3}} \times S_{\text{坡度}}^{\frac{1}{2}}$$

其中  $S_{\text{坡度}}$  的计算应为： $S_{\text{坡度}} = \max(0.001, |S_{ij}|)$ ，通过设置一个最小坡度的阈值0.001，可以避免在水平巷道中出现坡度为0的情况，导致计算出现异常。

在实际的矿井这个环境中，水流流经分叉的时候会受到明显的重力控制，从而导致水流分配的差异。基于流体力学基本原理，水流是倾向沿着能量最小的路径传播，

针对两个相邻的端点，计算这两个端点的高度差，当高度差小于 0 时，此时为下行路段；当高度差大于 0 时，此时为上行路段；当高度差等于 0 时，此时为水平路段。由此我们建立分段权重函数，对于参数的选择：

根据伯努利原理方程，下行的水流会获得重力势能： $v^2 = v_0^2 + 2gh$ ；上行水流需克服重力做功，导致能量损失，根据能量守恒定律： $\Delta E = mgh$ ，根据上述，通过分析局部地形特征，让系统根据实际坡度大小自动选择合适的权重系数，是计算更加灵活。

通过 Python 实现上述过程，生成结果图如下（图 11，图 12），生成表格，完整代码放于“支撑材料”中“问题三代码”中“解决附件 2 的水流变化情况.py”

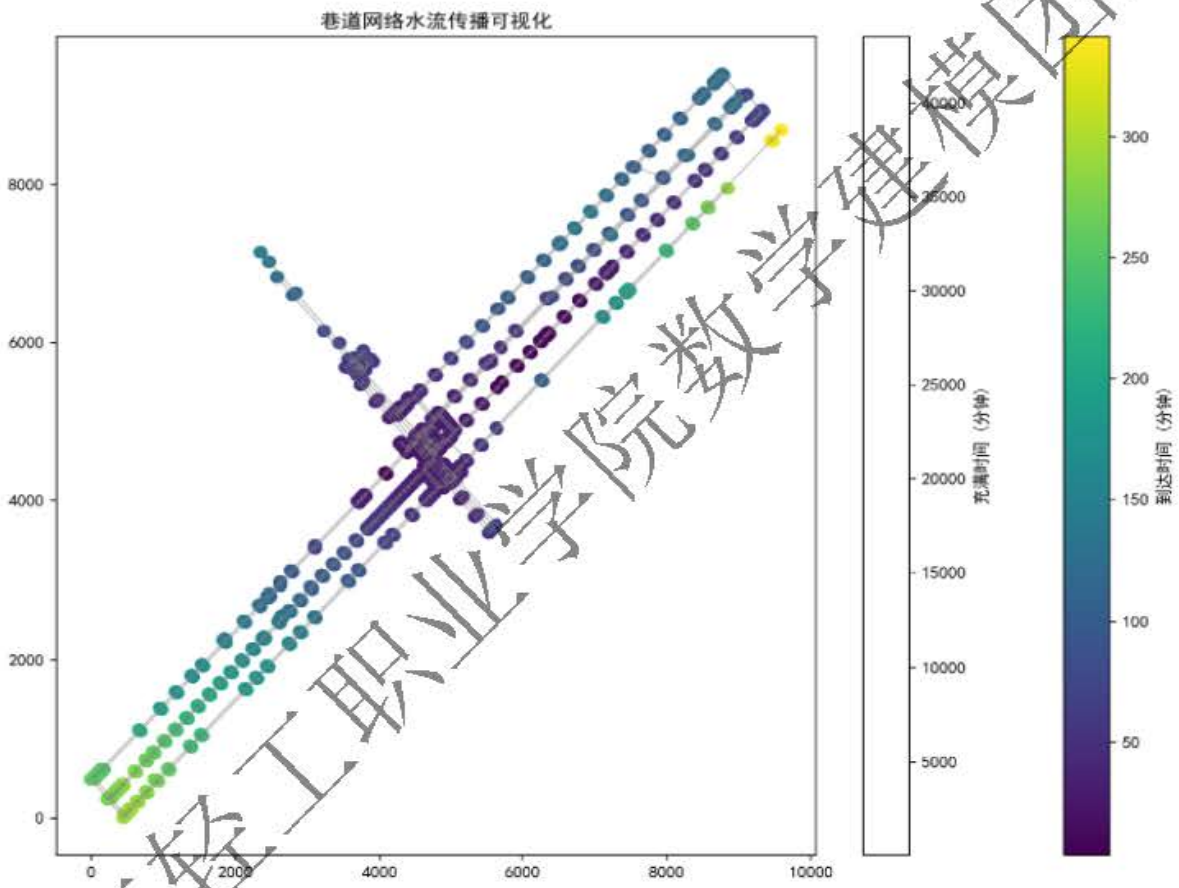


图11 巷道网络水流传播可视化图

分析该图，相较于附件 1（图 6 矿井巷道网络水流传播可视化图），此图展现更分散的时间分布，时间跨度更大，体现了地形的复杂性对水流传播的影响。

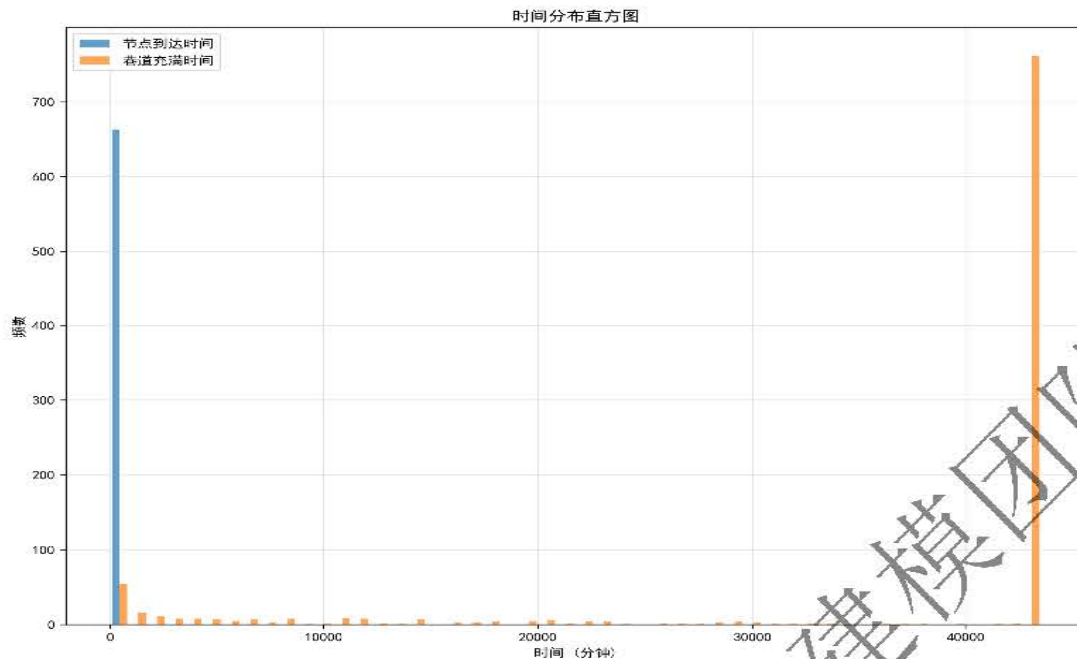


图12 时间分布直方图

从上图可以明显观察到，节点到达时间呈现单峰分布模式。集中在 0-200 分钟区间，水流在较短时间内到达大部分的节点，反映双突水点的快速扩散特征。巷道充满时间也显示出不均匀的分布特征，绝大多数巷道的充满时间集中在约 43000 分钟附件，少数巷道在较短的时间里充满，反应了水流量经过多次分流后的显著衰减效应。

#### 4.4 问题四模型的建立与求解

##### 4.4.1 问题四的分析

该题要求在双突水点且第二个突水点已经开始突水的条件下，重新调整各矿工的逃生路径方案。需要我们基于水流漫延状态的基础上，考虑第二个突水点对整个网络水流分布的影响。

当第二个突水点开始运作时，原有的水流分布模式将发生改变，这种复杂的动态变化要求我们做到实时响应的能力，实现根据最新的水流状态信息快速生成新的最优逃生路径。

##### 4.4.2 基于动态水深计算模型与 Dijkstra 算法的构建

基于问题三水流漫延模型结果，这些结果同样为问题四提供了约束信息。

因为有水流的存在，所以矿工的移动速度不再是固定的，其依赖于当前位置的水深、水流方向以及矿工相对于水流的移动方向。在没有积水的区域，矿工可以  $4m/s$  的速度移动；在有水流但水深不超过  $0.3$  米的区域，矿工顺流移动时速度为  $2m/s$ ，逆流移动时速度降至  $1m/s$ ；当水深超过  $0.3$  米时，矿工无法前进。

矿井网络在任意时刻  $t$  的状态变化可以用三个阶段（无水时，水位上升时，水满时）的线性模型表示，水流到达巷道的时间：

$$t_0 = \min\{t_i, t_j\}$$

巷道充满时间：根据体积流量的守恒  $V = d \times b \times (h - h_0)$ ，则充满时间计

算为： $t_{\text{充满时间}} = t + \frac{V}{Q}$

计算初始状态（0.1 米）到完全充满状态（3.0 米）的任意时刻的精确的水的深度的公式为：

$$h(t) = h_0 + \frac{h - h_0}{t_{\text{充满时间}} - t_0} \times (t - t_0)$$

通过比较相邻端点水流的到达时间，

若  $t_i > t_j$ ，水流从  $j$  流向  $i$ ；                      若  $t_i = t_j$ ，水流无明显的流向；

若  $t_i < t_j$ ，水流从  $i$  流向  $j$ ；

基于上述，我们在此基础上使用 **Dijkstra 算法**

使用 Python 实现上述过程，3 名矿工逃生数据表（完整代码放于“支撑材料”中“问题四代码”中“关于附件 1 调整后的最佳逃生路径.py”），下图为可视化结果和示例工人 1 逃生路径：

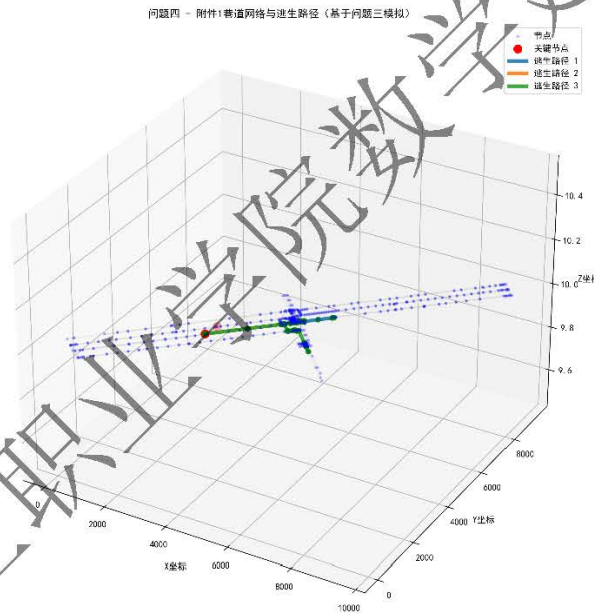


图13 巷道网络与逃生路径图

根据上图三维可视化可以清晰的观察到矿井巷道网络立体分布特征，不同颜色的逃生路径展示了各矿工的最佳逃生方案。

序号	工人位置			到达时刻 (分钟)	巷道编号
	x (m)	y (m)	z (m)		
0	5808.18	5367.75	10	1	
1	5801.85	5321.84	10	5.23	H0966
2	5511.93	5048.24	10	6.89	H0963
3	5225.86	4773.33	10	8.55	H0398
4	5204.47	4752.97	10	8.67	H0391
5	5175.57	4725.85	10	8.83	H0392
6	5136.12	4690.07	10	9.06	H0400

7	5126.38	4679.67	10	9.12	H0945
8	5113.4	4668.22	10	9.19	H0950
9	5099.93	4656.26	10	9.26	H0923
10	5076.01	4609.26	10	9.48	H0922
11	5067.22	4618.8	10	9.54	H0401
12	5030.53	4584.35	10	9.75	H0374
13	4972.79	4530.59	10	10.07	H0376
14	4932.76	4494.03	10	10.3	H0379
15	4807.12	4372.07	10	11.03	H0380
16	4766.62	4332.98	10	11.26	H0753
17	4739.26	4307.02	10	11.42	H0752
18	4045.65	3650.05	10	15.4	H0140
19	3173.1	2819.97	10	20.42	H0662
最后	3173.1	2819.97	10	20.42	序号

根据生成各工人逃生路径表数据，发现不同矿工得到了不同的逃生路径，矿工 2 实现了最优的逃生结果，仅需 15.93 分钟便可以到达安全出口，矿工 1 和矿工 3 逃生时间分别为：19.42 分钟与 21.34 分钟。表格可清晰显示各矿工每一时刻到达的位置，具有实际的价值。

#### 4.4.3 动态逃生路径模型的构建与改进（附件 2）

附件 1 平面网络不同，附件 2 呈现三维地形特征，高度变化明显，所以，形成更复杂的立体巷道网络，使得水流传播受到重力等因素的影响，对逃生路径规划也产生影响

基于附件 2 的复杂地形条件，建立三维巷道网络模型更直观地观察巷道几何特征。

由于地形起伏的变化，水流在分叉节点的分配不再采用简单的平均分流，而是基于高程关系进行重力导向分流。我们考虑坡度的流速计算，目的实现更准确的水流速度传播过程。

计算巷道坡度为  $\frac{z_j - z_i}{d_{ij}}$  ( $d_{ij}$  为巷道的水平投影长度)

当坡度绝对值小于一个十分小的阈值  $1 \times 10^{-5}$  时，仍然将其视作为水平巷道  
基于曼宁公式，当坡度显著时，考虑坡度对计算进行改进：

$$v = \frac{1}{n_0} \times R_1^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}}$$

其中， $n_0$  为曼宁粗糙系数（在采矿工程中，假设巷道表面为粗糙混凝土或轻度粗糙的岩石， $n_0 = 0.02$  是一个合理的折中值，介于光滑混凝土和粗糙岩石之间）； $R_1$  为水力半径； $S$  为水力坡度。

$$\text{水力半径: } R_1 = \frac{h \times b}{P} = \frac{h \times b}{b + 2h}$$

同理，建立动态逃生路径模型，基于上述进行优化使得计算更适合于复杂的矿井网络系统，使用 Python 实现上述，得到下图（图 14）和工人逃生路径表，完整代码放于“支撑材料”中“问题四代码”中“关于附件 2 调整后的最佳逃生路径.py”，下表示例工人 1 逃生路径表：

问题四 - 附件2巷道网络与逃生路径 (基于问题三模拟)

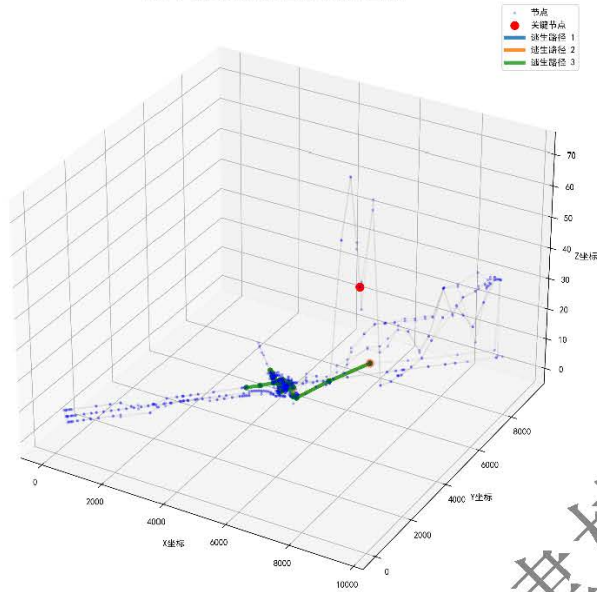


图14 巷道网络与逃生路径图

从三维可视化图形可以观察到，附件 2 的巷道网络呈现出明显的立体分布特征，高度变化明显，这种地形起伏不但对水流传播造成了影响，也对工人可能会造成从低处向高处的逃生路径的调整。一些工人需要克服重力做功向上跑至出口，这种移动增加了逃生的时间。

序号	工人位置			到达时刻 (分钟)	巷道编号
	x (m)	y (m)	z (m)		
0	4395.15	4614.53	6.59	1	
1	4406.22	4625.09	6.59	6.13	H0389
2	4434.6	4652.45	6.62	6.29	H0385
3	4472.16	4688.65	6.8	6.51	H0387
4	4482.59	4698.71	6.81	6.57	H0369
5	4495.7	4711.35	6.89	6.65	H0368
6	4508.35	4723.2	7.12	6.72	H0371
7	4495.27	4737.05	3.21	6.8	H0917
8	4531.11	4771.32	3.36	7	H0920
9	4567.75	4806.05	3.62	7.21	H0924
10	4624.81	4860.15	5.08	7.54	H0747
11	4636.08	4870.59	4.97	7.61	H0746
12	4664.13	4897.67	4.03	7.77	H0403
13	4656.38	4905.81	5.19	7.81	H0378
14	4782.02	5027.77	1.01	8.54	H0380
15	4822.52	5066.87	0.74	8.78	H0753
16	4849.89	5092.82	0.34	8.94	H0752
17	5543.5	5749.8	4.53	12.92	H0140
18	6416.05	6579.88	8.69	17.93	H0662

最后	6416.05	6579.88	8.69	17.93	序号
----	---------	---------	------	-------	----

通过观察生成表格数据，发现工人 2 在复杂地形条件下的逃生时间最少：16.93 分钟，相较于附件 1 所生成表格数据，所有工人的逃生时间均有所上升，说明地形的复杂造成了逃生成本的增加。同时也验证了该模型具有一定的合理性和准确性。

## 五、模型优缺点评价

### 5.1 模型的优点

- 1、模型采用连续性方程和曼宁公式描述水流扩散过程，物理意义明确，具有说服力与严谨性。
- 2、模型处理了平面网络和复杂三维网络两种不同的矿井结构，验证了算法的通用性和扩展性。
- 3、改进的时变 Dijkstra 算法能够在多项时间内解决大规模网络的最优逃生路径，算法设计合理且计算效率高。

### 5.2 模型的缺点

- 1、对于曼宁粗糙系数的取值虽有一定依据，但仍然缺乏数据支撑，存在主观性。
- 2、网络拓扑模型的输出结果依赖于巷道网络结构。

### 5.3 模型的改进

- 1、建立基于实际矿井数据的参数校验模型，减少主观性。
- 2、引入随机优化方法，在参数不确定性条件下求解鲁棒最优解。建立多场景的分析框架，综合考虑不同突水规模、不同初始条件下的情况。增加模型的自适应调整特性。

## 参考文献

- [1] 周越,朱希安,王占刚.Dijkstra 算法在矿井水灾动态避灾路径中的改进与应用[J].煤炭工程,2019.
- [2] 王家臣,王双喜,郭艳丽.矿井突水机理与防治[M].北京:冶金工业出版社.2016.
- [3] 李湖胜,孙健,陈学习.基于曼宁公式的矿井水流速计算模型及其应用[J].矿业研究与开发.2021.
- [4] 王德明,周福宝,刘晓明.矿井灾害应急救援理论与技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2015.
- [5] DeepSeek, DeepSeek-R1-0528, 深度求索 (DeepSeek) , 2025-09-05

山东轻工职业学院数学建模团队

## 附录

附录 1
支撑材料的文件列表
问题一代码 问题二代码 问题三代码 问题四代码 所有的 result AI 工具使用详情.pdf

附录 2
代码存放于支撑材料中“问题一代码”“问题二代码”“问题三代码”“问题四代码”

山东轻工职业学院数学建模团队