

考虑火灾产物动态影响的救援路径规划模型

刘佳佳¹, 盛 春^{1,2}, 谢绍聪¹, 房志明^{1,2*}

¹上海理工大学管理学院, 上海

²上海理工大学智慧应急管理学院, 上海

收稿日期: 2025年4月28日; 录用日期: 2025年5月21日; 发布日期: 2025年5月29日

摘 要

为了提升火灾救援效率并保障救援人员的安全, 文章采用网格化方法对火场环境进行离散化处理, 以最小化救援时间以及救援人员健康损伤为多目标优化函数, 综合考虑火场内火灾动态演化过程以及建筑布局的约束条件, 构建了一种考虑火灾产物动态影响的救援路径规划模型。并基于所构建模型的特征, 提出了一种改进的Dijkstra算法, 将路径权值设计为随时间动态变化的救援时间和累积损伤值, 从而实现对该模型的有效求解。结果表明: 与传统基于最短距离的模型相比, 本模型所得的最优路径在救援时间和救援人员累积损伤两个指标上分别实现了57%和93%的显著改善, 可以用于支撑火灾救援路径规划。

关键词

火灾救援, 多目标, 救援路径规划, 改进的Dijkstra算法

A Model for Rescue Route Planning Considering the Dynamic Effects of Fire Products

Jiajia Liu¹, Chun Sheng^{1,2}, Shaocong Xie¹, Zhiming Fang^{1,2*}

¹Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²School of Intelligent Emergency Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 28th, 2025; accepted: May 21st, 2025; published: May 29th, 2025

Abstract

To improve the efficiency of fire rescue and protect the safety of rescue personnel, a rescue route

*通讯作者。

文章引用: 刘佳佳, 盛春, 谢绍聪, 房志明. 考虑火灾产物动态影响的救援路径规划模型[J]. 建模与仿真, 2025, 14(5): 935-945. DOI: 10.12677/mos.2025.145446

planning model considering the dynamic effects of fire products is constructed by discretizing the fire environment using the grid-based method, the minimization of rescue time and health damage of rescue personnel as the multi-objective optimization function, and considering the dynamic evolution process of fire in the fire scene as well as the constraints of building layout. Based on the characteristics of the constructed model, an improved Dijkstra algorithm is proposed, which designs the path weight as the rescue time and cumulative damage value that dynamically changes with time to achieve an effective solution for the model. The results show that, compared with the traditional model based on the shortest distance, the optimal route obtained by this model achieves a significant reduction of 57% and 93% in the rescue time and the cumulative damage of rescue personnel, respectively, which can be used to support the planning of fire rescue routes.

Keywords

Fire Rescue, Multi-Objective, Rescue Route Planning, Improved Dijkstra Algorithm

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 国家高度重视应急救援体系能力建设。火灾救援作为应急救援体系的重要组成部分, 对保障人民生命财产安全具有重要意义。根据中国国家消防救援局的统计结果, 2022 年全国火灾事故数量和死亡人数与 2021 年相比分别上升 7.8% 和 1.2%。在此背景下, 研究如何针对不同火灾场景制定科学合理的救援路径规划方案, 对提升救援效率和保障人员安全具有重要的理论意义和实践价值。

目前针对火灾救援路径规划的研究主要集中在两个方向: 一是室外火灾救援, 如森林、林草等[1]-[3]; 二是室内火灾救援, 如地下商场、车库等[4]-[6]。其中, 室内火灾救援路径规划的研究重点主要围绕路径求解算法的改进[7]以及 BIM (Building Information Modeling) 技术在路径规划中的应用展开。在提高救援效率方面, Lin 等人[8]以加快救援火场中的受害者为目标, 根据预估房间内存有受害者的概率, 设计了搜索序列决策方法, 能够给救援人员提供更准确的信息, 加快救援速度。咎新宇等人[9]提出一种基于改进蚁群算法的救援路径规划方法, 改进了信息素更新规则, 提高了机器人的火灾救援效率。考虑到火灾的动态演化特征, 基于火灾动态变化规划救援路径对降低救援风险具有重要意义。Chou 等人[10]结合现有设备和视觉、定位技术, 以及最优消防救援路径规划算法, 构建了消防部门动态救援和疏散程序框架, 通过实时更新消防员和被困人员的位置以在动态环境中进行最优路径规划。鉴于室内建筑环境的复杂性, 将火场的内部布局信息纳入路径规划过程有助于提高规划方案的实用性。索永峰等人[11]使用开源的 Web GIS 服务来定期更新室内地图。而 BIM 技术作为一种包含建筑物全方位信息的建模工具[12], 将 BIM 技术应用到火灾救援路径规划中, 也能够使路径规划方案更贴合实际场景。潘俊山[13]将 BIM 技术和元胞自动机模型相结合, 应用于消防员救援路径动态规划研究, 开发了建筑火灾救援路径动态规划系统, 为火场中的消防员提供实时最优救援路径规划和安全撤离指引。

然而, 现有研究存在以下局限性: 在被困人员位置已知的情况下, 仅利用 BIM 技术模拟现实场景并构建路径网络图以规划救援路径, 难以满足精细的救援路径规划。目前室内火灾救援路径规划方法主要是将火源位置作为不可通行区域, 通过增加火源位置的边缘权重来构建不可通行区域, 并以寻找距离最短路径来实现救援时间最小化。这种方法在规划路径过程中较少考虑火灾产物的动态影响特征。

基于上述分析,本文以火灾救援为研究对象,采用网格化方法对火场环境进行划分,构建了考虑火灾产物动态影响的救援路径规划模型。该模型基于 FDS 火灾动态模拟器(Fire Dynamics Simulator)生成的火灾产物数据,运用改进的 Dijkstra 算法进行求解。通过将所提出的模型和求解方法应用于封闭房间火灾救援案例,验证了本研究提出的模型和方法的可行性与有效性。

2. 考虑火灾产物动态影响的救援路径规划模型

2.1. 问题描述

在火灾救援过程中,火场持续时间与救援效果呈现显著的负相关性。随着火灾持续时间的延长,火场中的氧气含量降低,有毒气体浓度升高,这将增加被困人员的伤亡风险。因此,从救援起点到达被困人员位置所需救援时间是评估救援方案有效性的关键指标之一,救援时间越短,被困人员的生存概率越高。同时,火场环境对救援人员的健康威胁主要表现为持续的高温暴露和有毒气体摄入所造成的累积性损伤。为确保救援人员的人身安全,在规划救援路径时需要将救援人员受到的累积损伤最小化作为重要考虑因素。

基于上述分析,本文旨在构建一个多目标优化模型,以实现救援时间最短化和救援人员累积损伤最小化的双重目标。同时,模型需要确保救援人员所受累积损伤不超过其身体承受极限值,从而在保障救援人员安全的前提下,制定最优救援路径方案。因此,本文所构建的模型假设:火场内部建筑布局已知且固定;每次救援行动仅考虑单一救援入口(即火场入口)作为救援起点。

2.2. 模型构建

2.2.1. 基于网络架构的火灾救援路径规划模型的构建

本文采用网格化方法对火场环境进行离散化处理,将火场空间划分为若干个 $1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 的矩形网格单元。在同一水平高度上,每个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的网格单元被定义为一个救援节点。通过将救援节点与节点间的路径进行网络化处理,构建完整路径网络系统,其中救援节点为网络顶点,连接相邻节点的路径为网络中的有向弧。本文在此路径网络架构的基础上构建火灾救援路径规划数学模型。

所构建的救援路径网络为: $G=(N,E,T,H)$ 。其中 N 为救援节点集, $N=\{n_i|i=1,2,3,\dots,a\}$ 。 E 为任意两节点间的路径集, $E=\{e_{ij}|i,j=1,2,3,\dots,a\text{ 且 }i\neq j\}$ 。仅当节点 j 为 i 的邻接节点时,存在一条从节点 i 指向 j 的有向路径 e_{ij} 。

在此网络中,救援路径规划为:在路径集 E 中选择符合优化目标的若干个有向路径,且使其能够构成一条从救援起点到被困人员位置节点的连通路程。基于 2.1 小节的分析,规划救援路径时,需要考虑救援人员经过路径所需的时间以及救援人员身体累积受到的损伤。本研究将路径权重设计为两个关键指标:救援时间和救援人员累积损伤值。具体定义如下:

T 为救援人员从节点 i 到其邻接节点 j 所需时间的集合, $T=\{t_{e_{ij}}|i,j=1,2,3,\dots,a\text{ 且 }i\neq j\}$ 。 $t_{e_{ij}}$ 为有向路径 e_{ij} 的救援时间权值; H 为从节点 i 到其邻接节点 j ,救援人员身体受持续高温暴露和过量 CO 摄入的健康损伤的集合, $H=\{h_{e_{ij}}|i,j=1,2,3,\dots,a\text{ 且 }i\neq j\}$ 。 $h_{e_{ij}}$ 为有向路径 e_{ij} 的累积损伤权值。

基于上述构建的网络结构,本文以最小化救援时间和救援人员受到的累积损伤为优化目标,构建了如下火灾救援路径规划数学模型:

$$\min Z = (1-\beta) \frac{\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} (k_{e_{ij}} t_{e_{ij}})}{t_0} + \beta \frac{\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} (k_{e_{ij}} h_{e_{ij}})}{h_0} \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} (k_{e_{ij}} h_{e_{ij}}) \leq \omega \\ k_{e_{ij}} + k_{e_{ji}} = 1 \\ \sum_{j \in N} k_{e_{ij}} \leq 1 \\ \sum_{j \in N} k_{e_{ji}} \leq 1 \\ \sum_{i \in N} k_{e_{ig}} = 1 \\ i \in N, j \in N, k_{e_{ij}} = 0 \text{ 或 } 1 \end{array} \right. \quad (2)$$

β 为救援人员的累积损伤在目标函数中的占比权重, 取值范围为[0, 1]。 t_0 和 h_0 分别是距离最短的路径所需的救援时间和救援人员受到的累积损伤。 $k_{e_{ij}}$ 表示是否选择路径 e_{ij} , 若选择路径 e_{ij} , 则 $k_{e_{ij}} = 1$ 。 ω 为救援人员身体能承受伤害的阈值, $\omega = 0.2$, 当救援人员身体受到的损伤大于等于 0.2 时, 救援人员处于重伤状态[14]; n_g 为被困人员所处节点。

2.2.2. 路径权值的动态求解方法

在火灾救援模型中, 路径权值的设定对模型结果具有重要影响。本文在已知被困人员位置的前提下, 综合考虑消光系数对救援人员行进速度的影响、持续高温暴露和一氧化碳摄入对救援人员健康的威胁等因素, 构建了动态路径权值计算方法。

本文采用 FDS 获取火场内火灾产物的动态演化数据, 包含消光系数 C 、温度 T 和 CO 浓度。为精细化处理火灾动态特征, 设定时间步长 $\Delta t = 1 \text{ s}$, 每隔 Δt 更新一次火灾数据。消光系数 C 与救援人员行进速度 v 之间存在显著的非线性关系: 随着 C 的增大, 其对 v 的抑制作用增强; 当 C 超过特定阈值后, v 将降至最小值并保持稳定。基于实验数据, 二者的函数关系可表述为[14]:

$$v = \begin{cases} 2.66 - 2.31e^{\left(-\frac{1}{C} + 2\right)}, & C \leq 0.5 \text{ m}^{-1} \\ 0.35, & C > 0.5 \text{ m}^{-1} \end{cases} \quad (3)$$

通过速度 v 和时间 Δt , 可计算救援人员的前进距离, 从而确定救援人员的实时空间位置。

针对高温暴露风险, 温度与人员最大承受时间 t_{HEAT} 的关系式如下[15]:

$$t_{HEAT} = 5 \times 10^7 \text{ Temp}^{-3.4} \quad (4)$$

对于 CO 的暴露风险, CO 浓度与人员最大承受时间 t_{CO} 的关系式如公式(5), 其中 $W_{CO} = 27000 \text{ ppm} \cdot \text{min}$ [14]:

$$W_{CO} = C_{CO} \cdot t_{CO} \quad (5)$$

假定救援人员初始健康状态完好, 即损伤值为 0, 则其在救援过程中受到的累积健康损伤可表示为:

$$H_{CO, HEAT} = \sum_m \left(\frac{\Delta t}{t_{HEAT, m}} + \frac{\Delta t}{t_{CO, m}} \right) = \sum_m \left(\frac{1}{t_{HEAT, m}} + \frac{C_{CO, m}}{W_{CO}} \right) \cdot \Delta t \quad (6)$$

其中 m 为更新数据次数。在最后一个 Δt 内会出现两种情况: ① 救援人员恰好在 Δt 结束时到达邻接节点 n_j ; ② 救援人员在最后一个 Δt 结束前提前到达邻接节点 n_j 。对第一种情况, 从节点 n_i 到达邻接节点 n_j 对应路径的救援时间权值 $t_{e_{ij}}$ 和累积损伤权值 $h_{e_{ij}}$ 可由公式(7)和公式(8)表示:

$$t_{e_{ij}} = m \cdot \Delta t \quad (7)$$

$$h_{e_{ij}} = \sum_m \left(\frac{1}{5 \times 10^7 Temp_m^{-3.4}} + \frac{C_{CO,m}}{W_{CO}} \right) \Delta t \quad (8)$$

对第二种情况, 实际救援时间应为累积时间减去最后一个 Δt 剩余时间, 剩余时间为 t_f 。路径 e_{ij} 的救援时间权值 $t_{e_{ij}}$ 和累积损伤权值 $h_{e_{ij}}$ 可由公式(9)和公式(10)表示。

$$t_{e_{ij}} = m \cdot \Delta t - t_f \quad (9)$$

$$h_{e_{ij}} = \sum_{m=1} \left(\frac{1}{5 \times 10^7 Temp_{m-1}^{-3.4}} + \frac{C_{CO,m-1}}{W_{CO}} \right) \Delta t + \left(\frac{1}{5 \times 10^7 Temp_m^{-3.4}} + \frac{C_{CO,m}}{W_{CO}} \right) (\Delta t - t_f) \quad (10)$$

3. 考虑火灾产物动态影响的路径求解算法

本文针对所构建模型的特征, 提出了一种改进的 Dijkstra 算法作为求解方法。Dijkstra 算法由荷兰计算机科学家 Edsger Dijkstra 于 1959 年提出[16], 它主要用于解决从一个起始节点到图中所有其他节点的最短路径问题[17], Dijkstra 算法能够有效地计算全局最优路径且不会陷入局部最优而搜索出次优路径[18]。传统的 Dijkstra 算法中路径的权值是既定不变的。

鉴于本文使用 FDS 模拟获取的火灾产物数据具有时变特征, 本文基于 Dijkstra 算法, 将相邻两个节点间路径的权值改进为随时间动态演化的变量, 从而更准确地反应火场环境的动态特征。

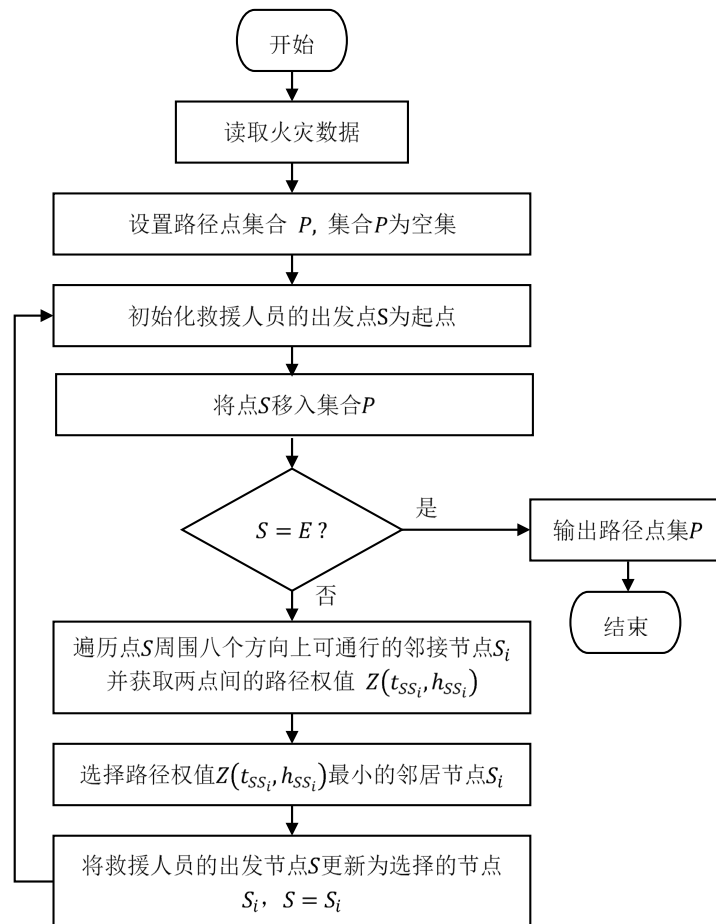


Figure 1. Algorithm solution flowchart

图 1. 算法求解流程图

已知任意相邻节点 A 和 B ，基于 2.2 节提出的目标函数和权值计算方法，其路径权值的计算过程可系统化为以下步骤：

① 计算当前节点 A 与其邻接节点 B 的欧氏距离 D_{AB} ；

② 基于时间步长 Δt ，计算从节点 A 到达 B 所需的救援时间 t_{AB} 和累积损伤值 h_{AB} 。具体计算流程如下：

a: 初始化救援人员前进距离 $S = 0$ ， $m = 0$ ， $t_{AB} = 0$ ， $h_{AB} = 0$ ；

b: 基于当前时间和救援人员所处位置，获取实时的消光系数 C 、温度 T 和 CO 浓度，根据公式(3)求得当前速度 v ；

c: 更新 $S = S + v * \Delta t$ ， $m = m + 1$ 。

若 $S = D_{AB}$ ，则 $t_{AB} = t_{AB} + \Delta t$ ，可由公式(8)计算得到 h_{AB} ，转入步骤③；

若 $S < D_{AB}$ ，则 $t_{AB} = t_{AB} + \Delta t$ ，可由公式(8)计算得到 h_{AB} ，返回步骤 c；

若 $S > D_{AB}$ ，则 $t_f = \frac{S - D_{AB}}{v}$ ， $t_{AB} = t_{AB} + \Delta t - t_f$ ，可由公式(10)计算得到 h_{AB} ，转入步骤③。

③ 基于目标函数公式(1)，计算综合考虑救援时间和累积损伤值的函数值 $Z(t_{AB}, h_{AB})$ ，即为从节点 A 到其邻接节点 B 连通路经的路径权值。输出从节点 A 到 B 的路径权值 $Z(t_{AB}, h_{AB})$ 。

图 1 为本文改进的算法求解流程图，算法求解具体可以简述为以下 4 个步骤：

Step 1: 初始化，确定当前救援人员出发节点 S ，初始化节点 S 为救援起点。将当前节点 S 纳入到最终路径点集 P 中。

Step 2: 寻找当前节点周围八个方向上的邻接节点并获取相应路径权值。若邻接节点可通行，计算得到从当前节点到该邻接节点的路径权值；若不可通行，则该路径权值为无穷大。

Step 3: 在当前节点的邻接节点中寻找路径权值最小节点，将路径权值最小节点更新为当前的救援出发节点 S 。返回 Step 1，循环 Step 1、2、3，直至找到权值最小节点为目标终点 E ，转入 Step 4。

Step 4: 输出路径点集 P ，计算结束。

4. 实例应用与求解结果分析

4.1. 火场环境构建

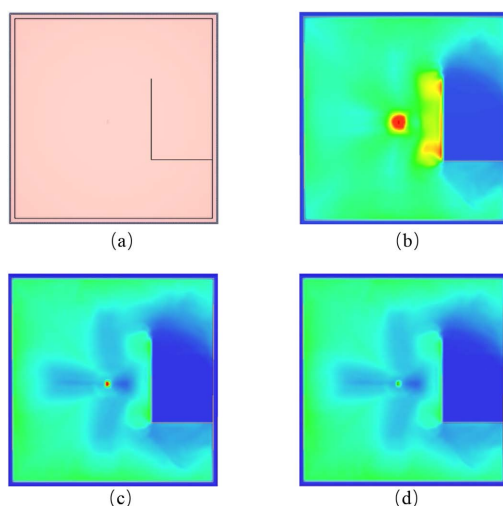


Figure 2. Schematic of fire environment and distribution of combustion products

图 2. 火场环境示意图和燃烧物分布图

为验证本研究所提出模型及相应求解方法的有效性，本文假设：待救援的被困人员数量为一人且位置已知；在救援过程中被困人员保持静止状态直至救援人员到达其所在位置。本节选取一个典型房间场景进行实验验证。

实验采用 FDS 构建火灾环境，如图 2(a)所示。实验场景的空间尺寸为 120 m×120 m×3 m，采用 1.0 m×1.0 m×0.5 m 的网格单元进行离散化处理。表 1 列举了 FDS 火灾模拟的基本参数设置。图 2(b)~(d) 分别为使用 FDS 仿真得到的火灾发生 300 s 时，温度、CO 浓度和消光系数的分布云图。从图 2(b)可以观察到，温度场在中间区域的火源位置呈现出显著的高温区域，且由于墙体的阻隔效应，热量向右侧区域的扩散受到抑制。这种温度分布特征对救援路径的选择具有重要影响。

Table 1. Basic parameter settings for FDS fire simulation

表 1. 火灾模拟基本参数设置

基本参数	数值
起始温度(℃)	20
火灾热释放速率(MW)	16
模拟时间(s)	600

4.2. 结果分析

4.2.1. 与传统最短路径规划模型的对比分析

为评估本研究提出方法，首先将其与传统基于最短距离的救援路径规划方法进行对比。传统方法仅考虑空间距离因素，采用 Dijkstra 算法以节点间欧氏距离作为路径权值进行求解。

实验选取救援起点坐标(1, 1)和被困人员坐标(110, 60)为例，设置救援准备时间为 80 s。基于 FDS 模拟数据，计算得到传统方法对应的救援时间 t_0 和累积损伤值 h_0 。同时，采用本文提出的方法，在不同 β 值下求解最优救援路径 P_β ，以及路径 P_β 所需的救援时间 T_β 和累积损伤值 H_β 。

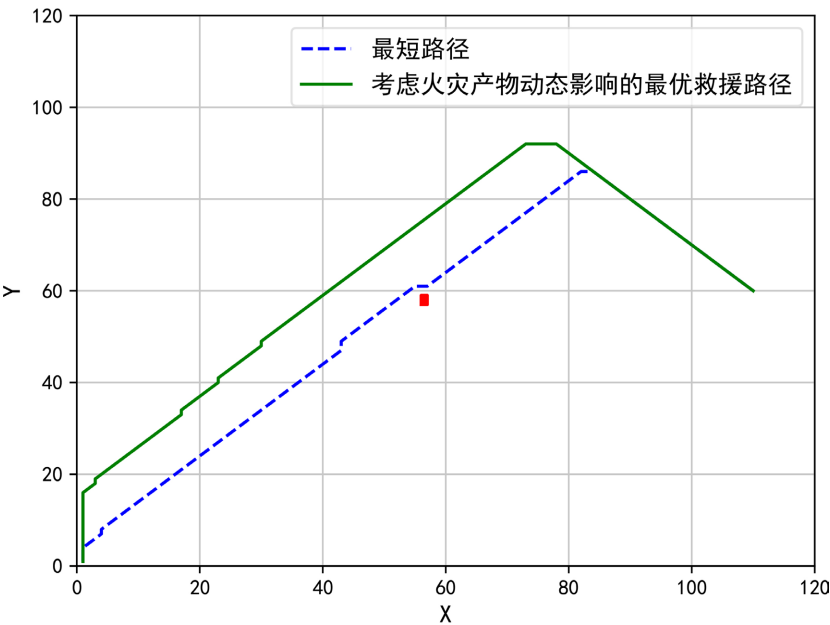


Figure 3. The shortest path and the optimal rescue path considering the dynamic impact of fire products
图 3. 最短路径与考虑火灾产物动态影响的最优救援路径

如图 3 所示，图中间实心标记为火源位置，横纵坐标 X 和 Y 分别为模拟火场(图 2(a)的房间场景)中的绝对横纵坐标，坐标上数字的单位均为“米”；实线路径为 β 取 0.2 时，本文方法求解的最优救援路径；虚线路径为使用传统方法计算得到的基于距离最短的路径。求解结果对比分析表明，最优救援路径的前半段向上方偏移，相较于传统方法，其轨迹有效规避了火源周边高温区域，从而显著降低了救援人员所受的热损伤风险。

Table 2. Comparison table of the rescue data
表 2. 救援数据对比表

路径	救援准备时间(s)	β	救援时间(s)	救援人员的健康损伤
最短路径	80	/	162.22	0.67
最优救援路径	80	0.2	69.05	0.05

表 2 的定量对比结果进一步验证了本文方法优于传统方法。相较于传统最短路径方案，本文提出的方法在救援时间和累积健康损伤两个指标上分别实现了 57%和 93%的改善。这一结果进一步证实了本研究所构建模型在提升救援效率和保障人员安全方面的实际应用价值。

4.2.2. 参数敏感性分析

为系统评估累积损伤权重系数 β 和火源位置对救援路径选择的影响，本文设置了 18 个实验场景。实验场景按火源位置分为三类：靠近救援起点(场景 1~6)、位于救援起点和被困人员中间位置(场景 7~12)、靠近被困人员(场景 13~18)。在每类场景中， β 值依次取 0、0.2、0.4、0.6、0.8 和 1。

分别求解上述 18 个场景的最优救援路径，对求解出的救援数据进行 z-score 标准化处理，结果如图 4 所示。图 4 中实线曲线为标准化后的救援时间曲线，点划曲线为标准化后的累积损伤值曲线，水平虚线为均值线。

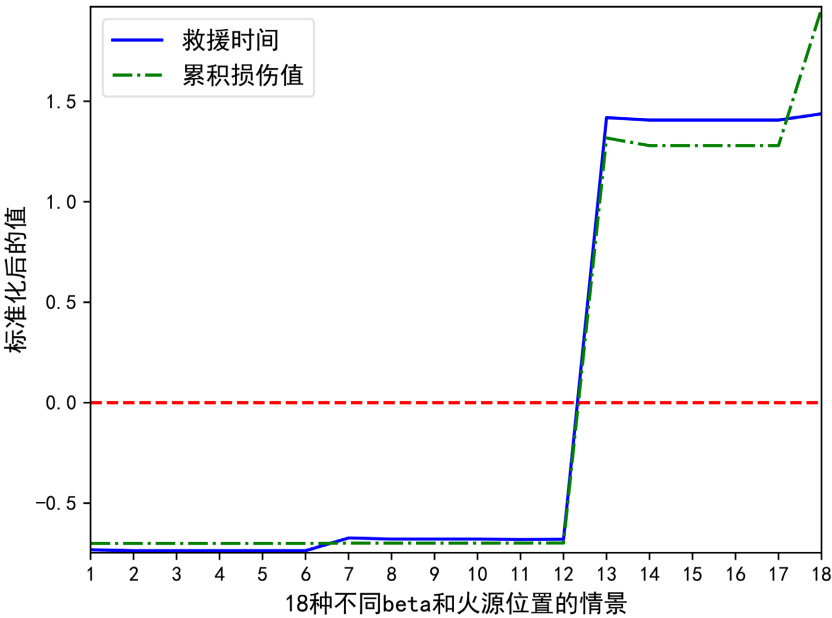


Figure 4. Sensitivity analysis results of rescue time and cumulative damage value to β value and fire source location
图 4. 救援时间和累积损伤值对 β 取值和火源位置的敏感性分析结果

由图 4 可知,对于救援时间,火源离被困人员越近,所需救援时间越长。随着火源位置逐渐靠近被困人员,标准化后的救援时间曲线逐步上升,救援时间对火源位置的敏感性较高,对 β 的敏感性较低。

对于累积损伤值,当火源离被困人员位置较远时,标准化后的累积损伤值曲线位于均值线下方且稳定,此时累积损伤值受 β 和火源位置的影响较小。当火源靠近被困人员时,标准化后的累积损伤值曲线高于均值线且离均值线较远,随着 β 的递增,标准化后的曲线呈先下降后保持平稳再递增的趋势,表现出对 β 值的高度敏感性。

4.2.3. 救援准备时间优化分析

救援准备时间作为一个关键变量,对救援行动的成功实施具有重要影响。较长的救援准备时间不仅会导致火势进一步发展增加场景不确定性,还会由于持续的高温积累加剧对救援人员的健康威胁。本文以救援人员受到的累积损伤值作为判断依据,以救援人员的重伤阈值为判断救援准备时间区间上限的约束条件。通过分析不同救援准备时间下最优救援路径对应的累积损伤值,确定最优救援准备时间区间。在 $\beta = 0.2$ 的条件下,不同救援准备时间对应的最优路径累积损伤值如图 5 和表 3 所示。

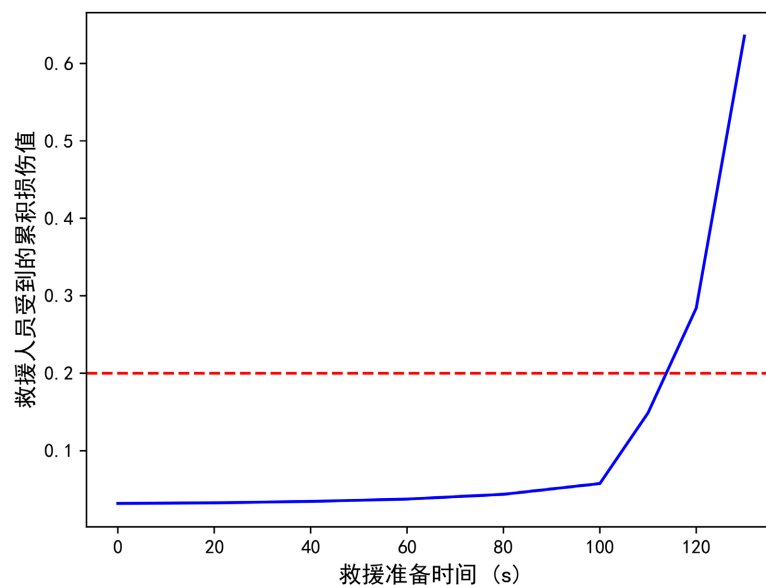


Figure 5. Cumulative damage value curves at different rescue preparation times

图 5. 不同救援准备时间对应的累积损伤值曲线

Table 3. Cumulative damage values at different rescue preparation times

表 3. 不同救援准备时间对应的累积损伤值

救援准备时间(s)	救援人员累积受到的损伤值
20	0.0328
40	0.0346
60	0.0376
80	0.0438
100	0.0577
110	0.1489
116	0.1891
117	0.2133
120	0.2842

实验结果表明,当救援准备时间在 100 s 以内时,累积损伤值随救援时间增长的变化率相对平缓。当救援准备时间超过 100 s 后,累积损伤值曲线出现陡增趋势,这与 100 s 时刻房间内可燃材料的完全燃烧释放大量热量有关。从图 5 和表 3 可以明显看出,救援准备时间越长,救援人员的危险性就越大。因此,为保证救援人员的安全,应将救援准备时间限制在 116 s 以内。本文得到的最优救援准备时间范围可作为实际救援行动的参考,以提高消防救援效率,最大限度地减少伤亡。

5. 结论

1) 与传统基于最短距离的救援路径规划方法相比,本文提出的最优救援路径在救援时间和救援人员累积健康损伤方面分别实现了 57%和 93%的改进。

2) 基于本文所提供的救援场景,进行健康损伤阈值分析,确定了不超过 116 s 的救援准备时间区间,该救援准备时间区间的求解方法可为实际救援行动提供决策依据。

3) 基于本文所提供场景求解得到的救援结果,本文所构建的模型能够有效权衡救援效率与安全性,提出的动态路径规划方法可为消防救援指挥决策提供理论依据,研究成果具备推广应用于其他类型的室内火灾救援场景的潜力。

基金项目

国家自然科学基金项目(72374141)——邮轮人群多目标流动与病毒传播耦合规律、模型与管控方法。

参考文献

- [1] 乔佳,史艳霞,王浩陈. 基于改进蚁群算法的森林火灾救援机器人三维路径规划[J]. 消防科学与技术, 2023, 42(7): 989-994.
- [2] Zhu, Y., Zhang, G., Chu, R., Xiao, H., Yang, Y. and Wu, X. (2024) Research on Escape Route Planning Analysis in Forest Fire Scenes Based on the Improved A* Algorithm. *Ecological Indicators*, **166**, Article 112355. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112355>
- [3] 王万富,王琢,刘佳鑫,等. 基于改进 A*和内螺旋算法的林草火灾救援路径规划[J]. 消防科学与技术, 2022, 41(8): 1138-1142.
- [4] 叶继红,潘俊山. 基于 BIM 和元胞自动机的建筑火灾救援路径动态规划研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(8): 1-8.
- [5] 李杨飞,江辉仙. 基于 BIM 的消防灭火动态路径规划研究[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2022, 38(1): 69-75+116.
- [6] 王羽翼. 基于 BIM 和改进 A*算法的高层建筑火灾救援路径的动态规划[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2022.
- [7] 宋英华,何子慧,郭晨. 基于火场预测和多出口决策的协同进化救援路径优化方法[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(6): 143-150.
- [8] Lin, Z. and Tsai, P. (2024) A Method to Accelerate the Rescue of Fire-Stricken Victims. *Expert Systems with Applications*, **238**, Article 122186. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122186>
- [9] 咎新宇,张铁峰,苑津莎. 基于改进蚁群算法的移动机器人火灾救援路径规划方法[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(17): 7243-7248.
- [10] Chou, J., Cheng, M., Hsieh, Y., Yang, I. and Hsu, H. (2019) Optimal Path Planning in Real Time for Dynamic Building Fire Rescue Operations Using Wireless Sensors and Visual Guidance. *Automation in Construction*, **99**, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.020>
- [11] 索永峰,刘天悦,池天河,等. 基于室内 GIS 和定位技术的消防一体化指挥系统[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(12): 67-74.
- [12] 杨振舰,庄亚楠,陈亚东. 基于 BIM 和改进 RRT 算法的建筑机器人路径规划[J]. 实验技术与管理, 2024, 41(2): 31-42.
- [13] 潘俊山. 基于 BIM 和元胞自动机的建筑火灾救援路径动态规划研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.

-
- [14] Zhiming, F., Wei, L., Xiaolian, L. and Weiguo, S. (2019) A Multi-Grid Evacuation Model Considering the Threat of Fire to Human Life and Its Application to Building Fire Risk Assessment. *Fire Technology*, 55, 2005-2026.
<https://doi.org/10.1007/s10694-019-00840-w>
- [15] 肖霞, 房志明. 基于耦合火灾影响疏散模拟的密闭舱室火灾风险评价[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2017, 39(5): 511-514.
- [16] 石光莲, 王瑞祥. 基于 AR 眼镜的图书馆书刊智慧导航系统构建研究[J]. 无线互联科技, 2024, 21(16): 32-39.
- [17] 曹光研. 不同运输模式下的铁路快运组织方案研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2024.
- [18] 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.