

中文引用格式: 张晓蕾. 基于单层建筑火灾的人员逃生疏散路径数值模拟[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(3): 178-185.

英文引用格式: ZHANG Xiaolei. Evacuation path numerical simulation for occupants in single-story building fires[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(3): 178-185.

基于单层建筑火灾的人员逃生疏散路径数值模拟*

张晓蕾^{1,2} 高级工程师

(1 中国安全生产科学研究院, 北京 100012;

2 中国矿业大学(北京) 应急管理与安全工程学院, 北京 100083)

中图分类号: X928.7; TU998.1 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.03.0548

资助项目: 中国安全生产科学研究院基本科研业务专项资金资助(2025JBKY21)。

【摘要】 为解决我国城市化进程不断加速、人员密集场所日益增多的背景下, 单层建筑火灾场景中人员疏散逃生高效性与安全性较低的问题, 针对传统火灾疏散路径规划在效率与合理性方面的不足, 构建基于A*算法的单层建筑火灾人员疏散模型; 引入栅格化建模, 并结合粒子群优化(PSO)算法, 综合考虑烟雾浓度、高温环境、有害气体扩散以及人员密度等多重复杂因素对疏散过程的影响; 基于建立的单层建筑火灾人员疏散模型, 运用多变量函数关系量化各因素对人员移动速度的影响系数, 从而实现对疏散过程的精准描述; 开展数值模拟试验中, 通过设置建筑内不同人数的工况, 对比分析改进前后A*算法的性能差异。研究结果表明: 相较于传统A*算法, 改进模型在疏散时间上缩短20.9%, 路径长度减少3.27%, 可有效避免疏散路径陷入局部最优解以及人员误入死胡同等问题。

【关键词】 人员疏散; 疏散路径; 粒子群优化(PSO)算法; 改进A*算法; 路径规划

Evacuation path numerical simulation for occupants in single-story building fires

ZHANG Xiaolei^{1,2}

(1 China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100012, China; 2 School of

Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and

Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: To address the low efficiency and safety of personnel evacuation in fire scenarios amid China's accelerating urbanisation and the increasing number of densely populated venues, a single-story building fire evacuation model based on the A* algorithm was developed. A grid-based model was introduced and combined with the PSO algorithm to comprehensively account for multiple complex factors influencing the evacuation process, including smoke concentration, high-temperature environments, hazardous gas dispersion, and personnel density. Based on the single-story building fire evacuation model, multivariate functional relationships were used to quantify the influence coefficients of various factors on personnel movement velocity, thereby achieving a precise description of the evacuation process. During numerical simulation experiments, the performance of the original and improved A* algorithms was compared across scenarios with varying occupant numbers within the building. The results indicate that compared to the traditional A* algorithm, the improved model reduces evacuation time by 20.9% and path length by 3.27%. It can effectively prevent evacuation paths from falling into local optima and avoid

occupants entering dead ends.

Keywords: evacuation of occupants; evacuation path; particle swarm optimisation(PSO) algorithm; improved A* algorithm; path planning

0 引 言

随着我国城市化进程加速,高层建筑、大型商业设施日益增多,城市救援能力是保障受困人员的紧急疏散逃生的关键环节^[1-2]。大型商场综合体等人员密集场所突发火灾时,人们会因为心理紧张、疏散通道环境陌生等因素,在紧急避险逃生过程中易发生踩踏、窒息等次生事故^[3]。面对紧张、从众等多重复杂心理因素的共同作用,科学编制应急预案^[4],考虑城市多灾点突发、多灾情耦合^[5],尤其是燃气泄漏等主要风险^[6],快速开展区域协同救援^[7],是实现受困人员安全撤离的基础。

对此,学者们开展了诸多研究,陈长坤等^[8]基于元胞自动机,研究了考虑恐慌情绪和沿墙引导的行人疏散模型对提升疏散效率的影响;YANG Xiaoxia 等^[9]将情绪因素纳入社会力模型,并以北京南站为案例,模拟了紧急疏散情景,得出在不同疏散条件下的安全疏散时间;孙世梅等^[10]基于 2-4 模型,分析地铁站火灾疏散的影响因素,发现疏散教育与培训、设施维护与检查、疏散预案等因素是根源影响因素;王付宇等^[11]结合人的心理和建筑特点,采用改进的蚁群算法寻优,得出地铁站紧急疏散的最佳撤离路线;贾进章等^[12]提出结合遗传算法和蚁群算法的火灾疏散路径规划方法,通过遗传算法优化蚁群算法的初始信息素,能够快速找到疏散路径,减少搜索时间;褚冠全等^[13]采用 Grid Flow 模型,分析出口宽度对疏散效率的影响,发现在宽出口条件下,若疏散准备时间呈正态分布,则总体疏散时间同样表现出正态分布特性。在对现有行人疏散模型的研究中,社会力模型与元胞自动机模型得到了广泛关注^[14]。学者们从多个维度对模型进行了改进,重点探究了恐慌、从众、合作与竞争等心理因素,以及火灾烟雾、能见度等环境因素对疏散行为的影响。然而,现有研究在将上述多因素系统融入动态路径规划算法方面仍存在明显不足:多数模型侧重于行为模拟或局部环境响应,缺乏对火灾环境下全局路径实时优化能力的有效支持,尤其是在烟雾扩散、高温及有害气体等多因素耦合作用下的路径动态修正与避障机制尚未充分建立。

鉴于此,笔者提出一种融合粒子群优化

(Particle Swarm Optimization, PSO) 的改进 A* 算法^[15],结合单层建筑火灾环境中烟雾、高温、有害气体及人员密度等因素,采用改进 A* 算法,分析单层建筑火灾下的人员疏散情况,并通过数值模拟得出最佳的疏散路径,以期人员密集场所的因灾受困人员逃生疏散提供参考路径。

1 PSO 改进 A* 算法

1.1 改进 A* 算法

PSO 算法是一种基于群体智能的优化方法,将每个潜在解视为一个在解空间中飞行的粒子^[16-17]。每个粒子根据自身历史最优位置 P_b 和群体历史最优位置 G_b 动态调整其飞行速度与位置,通过迭代逐步逼近全局最优解。其位置与速度更新公式如下:

$$v_m^{t+1} = \omega \times v_m^t + c_1 \times \text{rand}(\) \times (P_m^t - x_m^t) + c_2 \times \text{rand}(\) \times (G_m^t - x_m^t) \tag{1}$$

$$x_m^{t+1} = x_m^t + v_m^{t+1} \tag{2}$$

式中: v_m^t 和 v_m^{t+1} 分别为粒子在迭代 t 次和 $t+1$ 次的速度; m 为粒子序号, $m=1,2,\cdots$; ω 为惯性权重; c_1 、 c_2 为学习因子(通常取值为 2); P 为路径,系列坐标点组成的序列; P_m^t 为粒子在迭代 t 次的自身历史最优位置; x_m^t 和 x_m^{t+1} 分别为粒子在迭代 t 次和 $t+1$ 次的位置; G_m^t 为粒子在迭代 t 次的群体历史最优位置; $\text{rand}(\)$ 为 $(0,1)$ 间的随机数。算法通过持续迭代更新,直至满足终止条件。

1.2 A* -POS 耦合优化算法

将 A* 算法的启发式搜索能力与 PSO 算法的全局优化能力相结合,提出一种耦合优化算法。

1) 目标函数融合。在 A* 算法代价函数 $f(n) = g(n) + h(n)$ 的基础上,引入路径平滑性等优化项,构建新的代价函数:

$$f(n) = \alpha g(n) + \beta h(n) + \gamma c(n) \tag{3}$$

式中: $g(n)$ 为实际代价; $h(n)$ 为启发式估计; $c(n)$ 为额外代价项; α 、 β 、 γ 为权重参数。

2) 启发式函数动态修正。传统 A* 算法的启发函数 $h(n)$ 多为静态距离估计。引入 PSO 的全局最优信息,实现启发式函数的动态调整:

$$h(n) = \lambda_1 h_s(n) + \lambda_2 h_d(n, p_g) \tag{4}$$

式中: $h_s(n)$ 为静态启发值; $h_d(n, p_g)$ 为结合群体

最优信息的动态启发值; λ_1, λ_2 为权重参数。

3) 粒子梯度信息嵌入策略。在 PSO 速度更新中引入代价函数的梯度信息,引导粒子朝代价下降方向移动,增强局部寻优能力:

$$v_m^{t+1} = wv_m^t + c_1r_1(p_p - x_m^t) + c_2r_2(p_g - x_m^t) - \eta \nabla F(x_m^t) \quad (5)$$

式中: r_1 为在 $[0,1]$ 区间内均匀分布的随机数; p_p 为个体最优值; p_g 为全局最优值; w 为惯性权重; η 为梯度学习率; ∇F 为代价函数梯度。

4) 路径平滑优化。引入路径平滑性优化目标函数,提升路径的实际可行性:

$$\text{Smoothness}(P) = \sum_{i=1}^{N-2} \|P[m] - 2P + P[m+2]\|^2 \quad (6)$$

式中 N 为 P 包含的总点数。

总代价函数调整为:

$$F(P) = \sum_{i=1}^{N-1} \|P[m+1] - P[m]\| + \alpha \times \text{Smoothness}(P) \quad (7)$$

1.3 构建单层建筑火灾人员疏散数学模型

火灾的演变与人员疏散是密切相关且复杂的动态过程^[18]。单层建筑火灾中产生的高温、烟雾层和毒气对身处火场的人员造成强烈的生理与心理干扰,并影响其疏散行动的速度。为简化分析,以单层建筑为研究对象,并将可见度、有害气体体积分数和烟气温度视为影响火灾中人员移动速度的主要因素。引入可见度影响系数 $f_1(k)$ 、有毒气体体积分数影响系数 $g_2(\rho)$ 、温度影响系数 $w_3(T)$ 及人员密度影响系数 $z_4(\beta)$,将上述系数相乘得到人员移动速度的综合影响系数^[19],计算人员在疏散逃生时的当量速度系数,如下式:

$$v = v_0 \cdot f_1(k)g_2(\rho)w_3(T)z_4(\beta) \quad (8)$$

式中: v 为疏散人员步行速度, m/s; v_0 为人员的基准速度,一般取无火灾时人员步行速度^[20], m/s; k 为减光系数, m^{-1} ; ρ 为 CO 的体积分数, %; T 为温度, K; β 为人员密度, $\text{人}/\text{m}^2$ 。

1.3.1 火场可见度对人员速度影响

火灾烟雾的浓度对火场的能见度产生显著影响,从而直接决定建筑内人员的逃生速度。烟雾不仅吸收和散射光线,还降低视距,限制人员的视野,使人员在选择疏散通道和判断出口位置上产生偏差。无刺激性烟雾条件下减光系数对人员行动速度的数学模型如下:

$$f_1(k) = \begin{cases} 1 & k \leq 0.4 \\ 1.375 - 0.9375k & 0.4 < k \leq 1.2 \\ 0.25 & k > 1.2 \end{cases} \quad (9)$$

在刺激性烟气环境中,减光系数对人员行动速度的影响系数表示为:

$$f_1(k) = \begin{cases} 1 & k \leq 0.35 \\ 2.75 - 5k & 0.35 < k \leq 0.5 \\ 0.25 & k > 0.5 \end{cases} \quad (10)$$

1.3.2 有毒气体体积分数对人员疏散速度影响

火灾烟雾中最常见且危害较大的毒性物质为 CO,若 CO 的体积分数低于 0.08%,对人员的疏散速度几乎没有影响;当体积分数达到 0.25%时,人员会受到严重伤害,该体积分数也被视为人员失去行动能力的临界体积分数,人员的疏散速度将降为 0。拟合数据,得出 CO 对人员移动速度的影响系数:

$$g_2(\rho) = \begin{cases} 1 & \rho \leq 0.1 \\ 1 - (0.2125 + 1.788\rho)\rho & 0.1 < \rho \leq 0.25 \\ 0.25 & \rho > 0.25 \end{cases} \quad (11)$$

1.3.3 火场温度对人员疏散速度影响

当温度超过某一临界值时,过高的烟气温度将对人员造成实际伤害,从而影响其疏散速度。设定 3 个临界温度,当烟气温度 T 超过 T_1 时,人员的逃生速度会加快;若温度达到 T_2 时,温度的影响开始减缓人员的行动速度;当温度升高至 T_3 时,烟气的高温将直接对人员造成致命伤害,导致其完全失去逃生能力^[21]。

在正常环境温度 T_0 条件下,设人员的初始行走速度为 v_0 ,其行走的最大速度为 $v_{\max}$ 。人员自身所接触到的烟气温度和人员行动速度的关系如下:

$$w_3(T) = \begin{cases} 1 & T_0 < T \leq T_1 \\ (\nu_{\max} - 1.2) \left(\frac{T - T_1}{T_2 - T_1} \right)^2 & T_1 < T \leq T_2 \\ \frac{\nu_{\max}}{1.2} \left[1 - \left(\frac{T - T_{cr2}}{T_3 - T_2} \right)^2 \right] & T_2 < T \leq T_3 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $v_{\max}$ 为最大逃生速度,一般取 4 m/s; T_0 为正常环境温度, K; T_1 为人员产生不适感的临界温度,取为 303.15 K; T_2 为可能对人员造成身体伤害的临界温度,取为 333.15 K; T_3 为足以导致人员死亡的温度,取为 393.15 K。

2 单层建筑火灾人员疏散路径数值模拟

2.1 前提假设及模型搭建

2.1.1 前提假设

- 1) 在构建场景时,为便于求解分析,以单层建筑模型为依据,建立栅格模型。
- 2) 为保证模拟结果的可靠性,在模拟疏散时,采用人员随机分布原则,即在火灾发生时,场景内人员所处位置均为随机分布。
- 3) 为降低模型求解难度,在进行疏散模拟时,设定场景内人数为 50、100、150、200。

2.1.2 栅格模型构建及移动规则

采用栅格法建立单层商场建筑模型^[22],将单层商场转化成二维栅格的形式,如图 1 所示。在该栅格模型中,单个栅格尺寸为 1 m×1 m,该栅格分辨率综合考虑人员移动精度与计算效率,1 m×1 m 栅格符合成年人平均步幅(0.7~1.2 m),可准确模拟人员在通道、房间内的移动行为。构建 50×50 网格以对应 50 m×50 m 的建筑区域,覆盖典型单层商场(如中型超市、社区商业中心)的常见规模,兼顾中小场景模拟需求。图 1 中,黑色区域代表商铺、室内建筑等不可通行障碍物,白色区域代表可通行自由移动空间。无火灾时,人员可向上下左右 4 个邻域栅格移动,每个方向移动概率均等;火灾发生后,人员优先向火源反方向栅格移动(概率为 60%),两侧方向次之(概率各为 20%),火源方向禁止移动。该

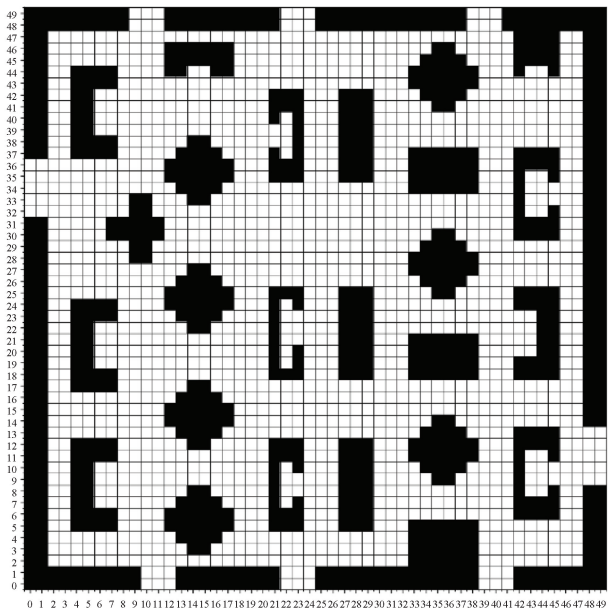


图 1 二维 50×50 栅格
Fig. 1 2D 50×50 grid

规则基于人群“趋避火源”的本能行为特征设定,通过动态调整移动概率矩阵实现疏散方向引导。当火灾发生后,人员朝着火源反方向疏散,此时人员疏散朝着火源方向移动概率最小,反方向移动概率最大,向两边移动概率相同,且均小于向火源反方向移动概率,如图 2 所示, i 为行号, j 为列号。

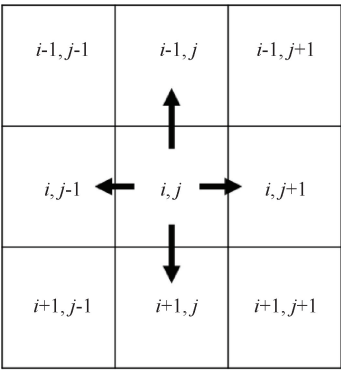


图 2 人员疏散移动变化趋势
Fig. 2 Evacuation movement trend of occupants

2.2 单层建筑火灾人员疏散数值模拟

模拟场景设定为人员聚集状态下突发火灾,人员在火灾、烟雾弥漫情况下疏散逃生。为便于分析,假设人员仅能向上下左右 4 个方向的栅格移动。考虑到火灾产生的烟雾、高温、有害气体及人员密度多重因素对疏散行为产生的复杂影响,建立单层建筑火灾疏散模型。

运用传统 A* 算法对同一场景的人员疏散进行数值模拟,并与改进 A* 算法得出的结果相比较。设置 4 种模拟工况,即建筑内发生火灾时人数分别为 50、100、150 和 200 进行模拟,在突发火灾时,分别采用改进 A* 算法、传统 A* 算法规划场景内的所有人员的逃生路径,得到模拟可视化结果,如图 3—图 10 所示。

2.3 人员疏散模拟结果分析

由图 3—图 10 可以看出,改进 A* 算法在进行路径规划时,能够避免人员在逃生疏散过程中进入死胡同导致人员逃生失败的情况。因此,改进 A* 算法能够在进行路径规划时,辨识全局可能形成死胡同的区域,当人员进入该区域时,快速修改逃生疏散路径,避开死胡同区域,如图 11 所示。

疏散过程中,人员移动距离以及人员成功疏散总时间时步见表 1。由表 1 可以看出,随着建筑物中人员数量的增加,所需的疏散时步不断增长。与传统 A* 算法相比,改进 A* 算法下人员疏散平均所需时步降低 20.9%,较大幅度降低了人员疏散所需时间。

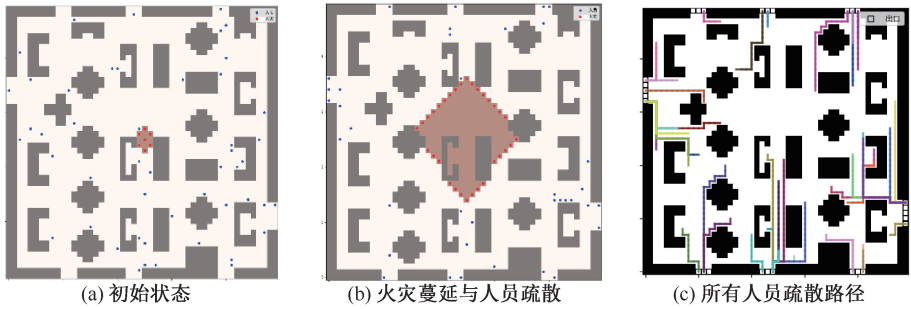


图3 改进A*算法下50人时人员疏散位置变化及疏散路径
Fig.3 Changes in evacuation locations and evacuation paths for 50 occupants
under the improved A* algorithm

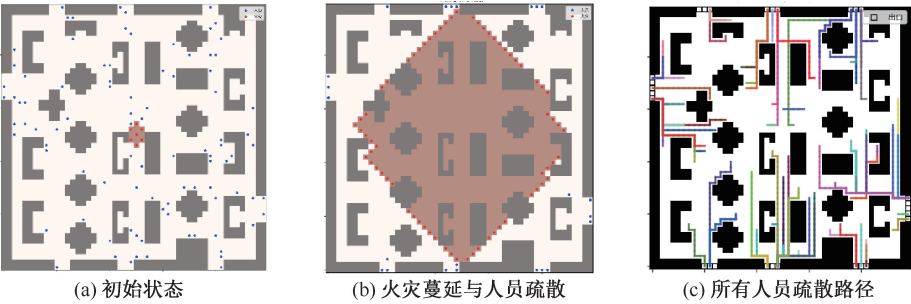


图4 改进A*算法下100人时人员疏散位置变化及疏散路径
Fig.4 Changes in evacuation locations and evacuation paths for 100 occupants
under the improved A* algorithm

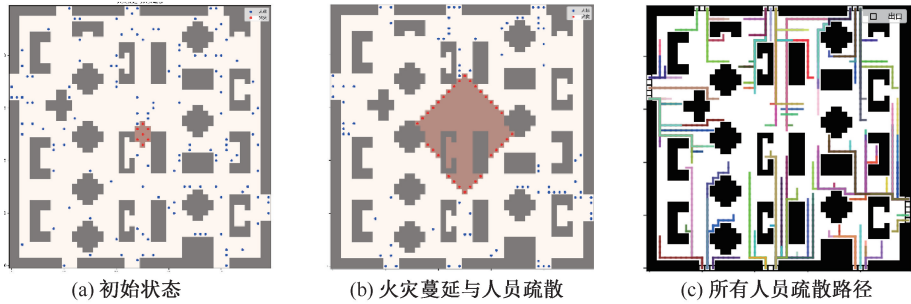


图5 改进A*算法下150人时人员疏散位置变化及疏散路径
Fig.5 Changes in evacuation locations and evacuation paths for 150 occupants
under the improved A* algorithm

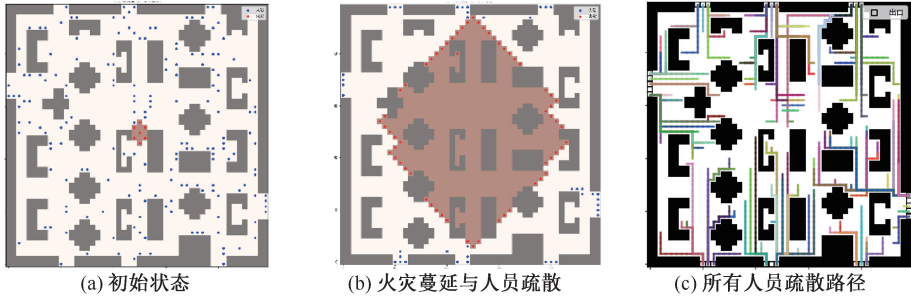


图6 改进A*算法下200人时人员疏散位置变化及疏散路径
Fig.6 Changes in evacuation locations and evacuation paths for 200 occupants
under the improved A* algorithm

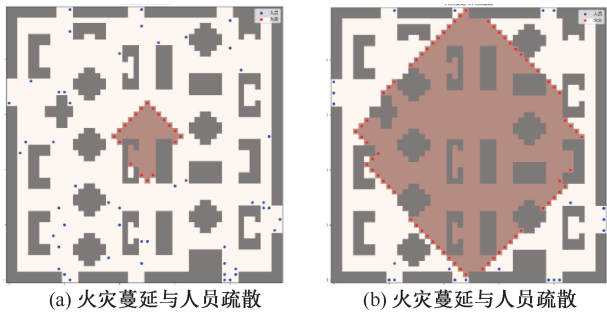


图 7 传统 A* 算法下 50 人时人员疏散位置变化

Fig. 7 Changes in evacuation locations for 50 occupants under the traditional A* algorithm

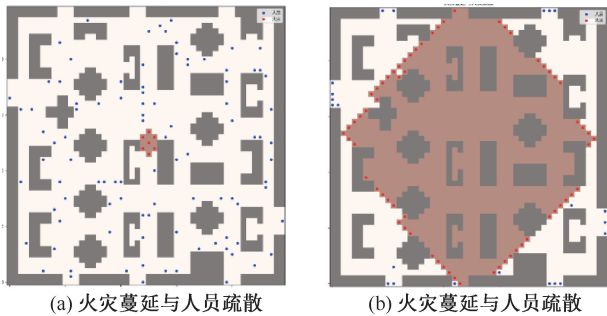


图 8 传统 A* 算法下 100 人时人员疏散位置变化

Fig. 8 Changes in evacuation locations for 100 occupants under the traditional A* algorithm

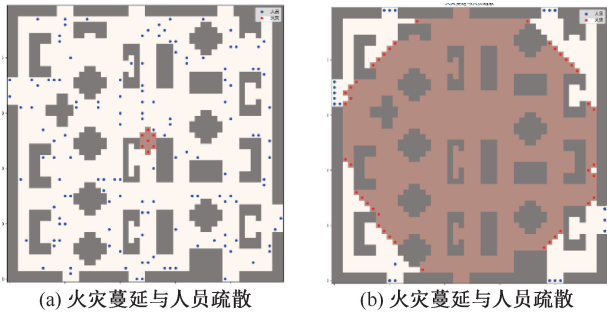


图 9 传统 A* 算法下 150 人时人员疏散位置变化

Fig. 9 Changes in evacuation locations for 150 occupants under the traditional A* algorithm

表 1 人员成功疏散总时间时步及移动距离

Table 1 Total time time steps and travel distance for successful evacuation of occupants

人数	全部疏散时步		平均移动距离/m	
	改进 A* 算法	A* 算法	改进 A* 算法	A* 算法
50	20	26	30.7	31.8
100	23	28	33.4	35.1
150	25	31	34.7	35.8
200	29	38	35.3	35.9

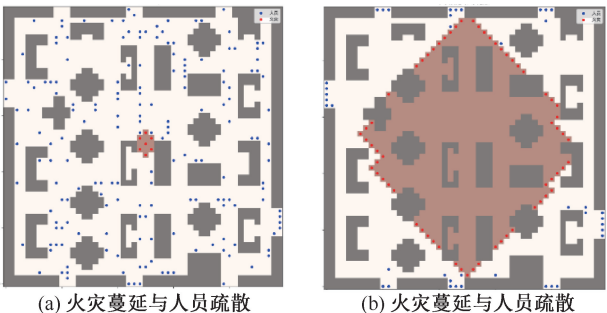


图 10 传统 A* 算法下 200 人时人员疏散位置变化

Fig. 10 Changes in evacuation locations for 200 occupants under the traditional A* algorithm

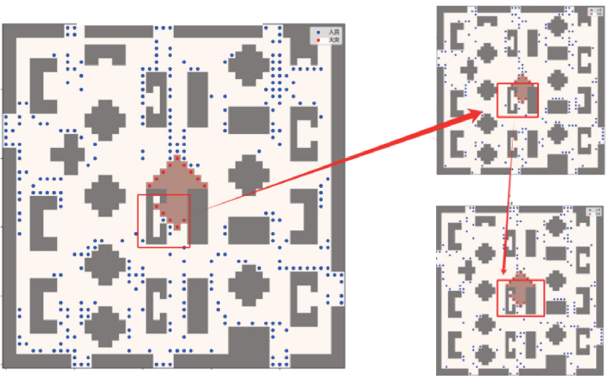


图 11 优化避免误入死胡同示意

Fig. 11 Schematic of optimization to avoid dead ends

3 结 论

1) 构建一种融合 PSO 与 A* 搜索算法的动态路径规划模型,该模型通过将单层建筑火灾环境中的烟雾浓度、温度变化、有害气体扩散及人员密度等多重动态因素量化为速度影响系数,并嵌入路径评价体系,能够实现疏散路径在复杂火场环境中的自适应调整与风险规避。

2) 所提出的 PSO 算法在多种人员规模场景下均表现出较好的疏散效率与鲁棒性,可有效克服传统方法易陷入局部最优与路径死锁的缺陷,为人员密集场所火灾应急疏散提供兼顾最短路径与最小风险的智能决策支持。

3) 未来研究可在以下方向深入拓展:①引入实时环境传感数据与人群状态识别技术,增强模型对动态火场与人员行为的响应能力;②拓展至多层、多出口建筑场景,研究立体空间内的协同疏散机制;③结合数字孪生与增强现实技术,推动智能疏散系统在实际应急指挥与培训中的应用。

参考文献

- [1] 陈含芳. 城市综合体火灾风险分析与应急疏散路径研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.
CHEN Hanfang. Fire risk analysis and emergency evacuation path of urban complex[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.
- [2] 张晓蕾, 赵开功, 李长明, 等. 城市应急队伍救援能力评估与应用研究[J]. 消防科学与技术, 2023, 42(12): 1 724-1 728.
ZHANG Xiaolei, ZHAO Kaigong, LI Changming, et al. Evaluation of urban emergency rescue team capability and application[J]. Fire Science and Technology, 2023, 42(12): 1 724-1 728.
- [3] 杜云, 刘小雨, 贾科进, 等. 改进蚁群算法的火灾环境疏散路径规划研究[J]. 计算机工程与应用, 2024, 60(8): 309-319.
DU Yun, LIU Xiaoyu, JIA Kejin, et al. Research on evacuation path planning in fire environment with improved ant colony algorithm [J]. Computer Engineering and Applications, 2024, 60(8): 309-319.
- [4] 张晓蕾, 高进东, 赵开功, 等. 煤矿事故智能应急预案生成方法研究[J]. 矿业安全与环保, 2024, 51(1): 78-85, 91.
ZHANG Xiaolei, GAO Jindong, ZHAO Kaigong, et al. Research on generation method of intelligent emergency preplan for coal mine accident [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2024, 51(1): 78-85, 91.
- [5] ZHANG Xiaolei, ZHAO Kaigong, LI Changming, et al. Structuring and recommendations for research on the construction of intelligent multi-industry and multihazard emergency planning systems [J]. Sustainability, 2024, 16(14): 5 882-5 882.
- [6] ZHANG Xiaolei, SONG Fangzhou, ZHAO Kaigong, et al. Study on dynamic law of leakage gas cloud diffusion in city gas filling station based on flame acceleration simulation[J]. Physics of Fluids, 2025, 37: DOI:10.1063/5.0275655.
- [7] 赵开功. 煤制油可燃气体泄漏风险分析方法与协同救援技术研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
ZHAO Kaigong. Study on the risk analysis method and cooperative rescue technology of coal-to-oil combustible gas leakage[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023.
- [8] 陈长坤, 孙华锴, 童蕴贺, 等. 基于元胞自动机的火源威胁下人员疏散模型[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(10): 47-52.
CHEN Changkun, SUN Huakai, TONG Yunhe, et al. Personnel evacuation model under fire source threat based on cellular automata [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(10): 47-52.
- [9] YANG Xiaoxia, DONG Hairong, WANG Qianling, et al. Guided crowd dynamics via modified social force model[J]. Physica A-Statistical Mechanics and Its Applications, 2014, 411: 63-73.
- [10] 孙世梅, 张家严. 基于 24Model-D-ISM 的地铁站火灾疏散影响因素研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(4): 153-159.
SUN Shimei, ZHANG Jinyan. Research on influencing factors of subway station fire evacuation based on 24Model-D-ISM [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(4): 153-159.
- [11] 王付宇, 王骏. 突发事件情景下地铁站人员应急疏散问题综述[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(10): 2 888-2 893.
WANG Fuyu, WANG Jun. Summary of emergency evacuation of subway station personnel in emergency situations [J]. Application Research of Computers, 2018, 35(10): 2 888-2 893.
- [12] 贾进章, 李雪娇. 基于遗传-蚁群算法的单层建筑火灾疏散路径规划研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(6): 122-126.
JIA Jinzhang, LI Xuejiao. Research on evacuation path planning in single-story building fire based on genetic-ant colony algorithm [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(6): 122-126.
- [13] 褚冠全, 孙金华, 王青松, 等. 疏散准备时间及出口宽度对人员疏散影响的模拟[J]. 科学通报, 2006(6): 738-744.
- [14] 宋英华, 涂文豪, 霍非舟, 等. 考虑环境熟悉度与引导的人员疏散元胞自动机模型研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(12): 56-60.
SONG Yinghua, TU Wenhao, HUO Feizhou, et al. Study on cellular automata model of pedestrian evacuation considering

environmental familiarity and guidance[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(12): 56-60.

[15] 闫建红, 柳长叶, 孙慧霞, 等. 改进 A* 融合 DWA 的移动机器人路径规划算法研究[J]. 运城学院学报, 2024, 42(6): 45-51.

YAN Jianhong, LIU Changye, SUN Huixia, et al. Research on mobile robot path planning algorithm based on improved A* fusion DWA [J]. Journal of Yuncheng University, 2024, 42(6): 45-51.

[16] ZHAGN Xiaolei, ZHAO Kaigong, GAO Shang, et al. Optimization of urban fire emergency resource allocation based on pre-allocated swarm algorithm[J]. Fire, 2025, 8(1): 27-27.

[17] 乔建刚, 孙洁, 宫帅港, 等. 基于改进 PSO 算法的施工园区交通组织优化研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(11): 139-145.

QIAO Jian'gang, SUN Jie, GONG Shuaigang, et al. Research on optimization of traffic organization in construction parks based on improved PSO algorithm [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2024, 20(11): 139-145.

[18] HELBING D, FARKAS I J, MOLNAR P, et al. Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations[C]. International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics, 2002: 21-58.

[19] 朱书敏. 基于火灾双区模型的建筑人员疏散复合模拟研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.

[20] 徐方, 魏东, 魏星. 公众聚集场所人群疏散基础数据的分析[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(4): 137-145.

XU Fang, WEI Dong, WEI Xing. Analysis on the original data of crowd evacuation in public gathering places [J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(4): 137-145.

[21] 徐青选, 徐光毅. 火灾环境中人员疏散时间模型与应用[J]. 消防技术与产品信息, 2014(4): 27-30.

[22] 赵江, 孟晨阳, 王晓博, 等. 特征点提取下的 AGV 栅格法建模与分析[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(8): 156-167.

ZHAO Jiang, MENG Chenyang, WANG Xiaobo, et al. Modeling and analysis of AGV grid method based on feature points extraction [J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(8): 156-167.

作者简介： 张晓蕾 （1984—）,女,山西大同人,博士研究生,高级工程师,主要研究方向为安全生产与应急救援理论与技术。E-mail:zhangxl@ chinasafety. ac. cn。