

考虑灾害实时扩散的室内火灾疏散路径选择模型

刘毅, 沈斐敏[†]

(福州大学 土木工程学院, 福州 350108)

摘要: 针对室内火灾中疏散路径的决策问题, 基于改进蚁群算法提出考虑火灾实时扩散的最短路径选择模型. 建立六边形栅格地图, 使每次移动至相邻网格的时间均等, 进而实现火灾扩散与人群疏散同步进行; 借助火灾动力学软件(FDS)获得火灾扩散参数, 分析疏散过程中火灾扩散对疏散路径的实时影响; 对多种情景下的仿真算例进行求解, 结果表明, 所建立模型不但可解决“斜向穿墙”的问题, 还可避免出现疏散路径盲目绕远或误入危险区域的不合理现象, 并为智能应急疏散系统的研究提供有益参考.

关键词: 应急疏散; 最短路径; 蚁群算法; 实时影响; 火灾动力学软件

中图分类号: TP18 **文献标志码:** A

Route selection model in indoor evacuation under real effect of fire spread

LIU Yi, SHEN Fei-min[†]

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Aiming at decision-making for correct evacuation route and considering real-time effect of indoor fire spread, a shortest route selection model is proposed on the basis of improved ant colony algorithm. Hexagonal grid map is employed to make sure of a constant time spent moving to adjacent grids each time, so the spread of fire and evacuation can be accomplished at the same time. Parameters of fire spread are obtained by using the fire dynamics simulator(FDS). Then the real-time effect of fire spreading on the evacuation route in the process of evacuation is analyzed. Simulated calculations under different circumstances illustrate that the proposed model can solve the problem of “moving diagonally through the wall” and improve the accuracy and efficiency of evacuation, thus serving as guidance for the research on intelligent emergency evacuation system.

Keywords: emergency evacuation; shortest route; ant colony algorithm; real time effect; FDS

0 引言

在发生突发灾害的陌生环境中, 人往往由于恐慌而难以及时选择有效路径进行疏散^[1], 极易导致巨大的人员伤亡. 向被困人员提供科学合理的疏散路径可以有效减少火灾事故中的伤亡人数^[2-3]. 随着国内外火灾应急救援技术的研究发展, Dijkstra算法、Floyd算法、蚁群算法、A*算法等越来越多地应用于室内应急疏散路径的求解, 尤其蚁群算法作为元启发式算法具有适用性强、易于同其他算法结合等优点, 近年来被广泛应用^[4-6]. 不同于传统的旅行商问题(Travelling salesman problem, TSP), 火场紧急疏散时不仅要考虑路径的长度最短, 还必须根据火灾的发展变化不断对疏散路线进行动态调整, 避免在疏散过程

中误入危险区域^[7-8]. 现阶段算法研究多以改进算法本身为出发点^[9-12], 局限于一些参数配置的优化而忽略了真实环境下外部环境随时间的动态改变, 容易使计算结果与实际状况不符^[13-14]. 为了解决这一问题, 丁雨淋等^[15]提出了一种实时威胁态势感知的室内火灾疏散路径动态优化方法, 可以根据火灾威胁态势场信息不断调整算法的输入信息, 计算出当前时刻下的最优疏散路径, 实现对灾害动态扩散的模拟; 袁媛等^[16]基于灾害的扩散影响程度将各个路径上的疏散速度表示为时间的连续递减函数, 根据疏散速度随时间的不断改变使计算结果符合当前时刻下的实际环境; Morten等^[17]建立了地图中每一点的移动概率方程, 考虑了温度、热辐射和烟雾浓度这3个因素随时

收稿日期: 2017-06-18; 修回日期: 2017-09-12.

基金项目: 福建省教育厅科研基金项目(JAT160604); 福建省交通厅科研基金项目(201526).

责任编委: 刘德荣.

作者简介: 刘毅(1986—), 男, 博士生, 从事安全系统工程、地下空间应急管理的研究; 沈斐敏(1951—), 男, 教授, 博士生导师, 从事安全系统工程、系统决策、复杂系统等研究.

[†]通讯作者. E-mail: zjsfzdx@126.com

间变化对这一概率产生的影响,实现了不同时刻下最短路径的选择;Zhao等^[7]尝试构建了一个可以对空间数据进行记忆并带有时间维度的地图数据库,以此描述外部环境动态变化.算法根据地图信息不断更新当前时刻路径的联通状态,并计算出最合适的疏散路径.虽然一些专家学者已经对动态环境下的路径搜索行为进行了研究,使模拟计算结果比静态算法更客观准确,但仍然存在一些问题.比如,这些算法可以模拟出在某一时刻下的环境状态并计算出当前时刻下的最短路径,但却无法分析在从起点移动至终点的疏散过程中,外部环境是否发生变化,以及这些变化对疏散行为产生的实时影响,即忽略了疏散行为本身也是时间维度下的动态过程这一重要事实.

鉴于此,本文提出考虑火灾扩散行为实时影响的改进蚁群算法,用六边形栅格替代传统的四边形栅格,将蚂蚁向任意方向移动时间的不确定性变为可确定值,为统一时间坐标建立基础.以“每只蚂蚁的每一步”为单位,考虑火灾危险区域的扩散行为和被困人员的疏散行为在每一步时下同步进行.最后基于工程实例进行模拟仿真,通过与传统算法对比,验证改进算法的可行性和有效性.

1 模型描述

模型研究场景为室内某一位置突然发生火灾,火灾危险区域随时间从起火点向四周扩散,被困人员需要在躲避危险区域的情况下不断调整路线,并选择最近出口进行疏散.模型假设:1)被困人员以匀速进行疏散;2)起火点位置已知;3)危险区域以起火点为圆心匀速向四周扩散,其影响范围为圆形,疏散过程中必须予以回避;4)模型时间单位为1步时,即在格栅地图中移动至相邻网格的时间.

设 t_S 为在起点的时刻, t_E 为在终点的时刻, T 为疏散过程中所有时刻的集合,则有

$$T = \{t_S, t_{S+1}, t_{S+2}, \dots, t_{E-2}, t_{E-1}, t_E\}. \quad (1)$$

设 i 为格栅地图中网格序号, i_S 为起点网格序号, i_E 为终点网格序号, I 表示由起点至终点的疏散路径上所有网格的集合, L 为该路径长度,则有

$$I = \{i_S, i_{S+1}, \dots, i_{E-1}, i_E\}, \quad (2)$$

$$L = (|I| - 1) \cdot a. \quad (3)$$

其中: a 为相邻两网格中心点之间的距离, $|I|$ 为集合内元素的个数.释放蚂蚁波数为 m ,每波蚂蚁数量为 n , N 为所有蚂蚁疏散路径的集合,则有

$$N = \{I_{11}, I_{12}, \dots, I_{1n}, \dots, I_{mn}\}. \quad (4)$$

其中: I_{mn} 表示第 m 波,第 n 只蚂蚁疏散路径中所有

网格(蚂蚁走过的每一步)的集合,若 i 在该路径上,则 $i \in I_{mn}$.

设危险度函数 $H = h(i, t)$, i 为所在网格序号, t 为所对应的时刻,则有

$$H = h(i, t) = \begin{cases} 0, & i \text{ 网格为安全;} \\ 1, & i \text{ 网格为危险.} \end{cases} \quad (5)$$

设环境变化函数为 $G = g(t)$,表示在 t 时刻火灾危险区域的扩散状态,即在 t 时刻地图中所有网格危险度函数 H 的集合,则有

$$G = g(t) = \{H_1, H_2, \dots, H_i\}. \quad (6)$$

因此,考虑灾害实时扩散的室内火灾疏散路径选择模型为

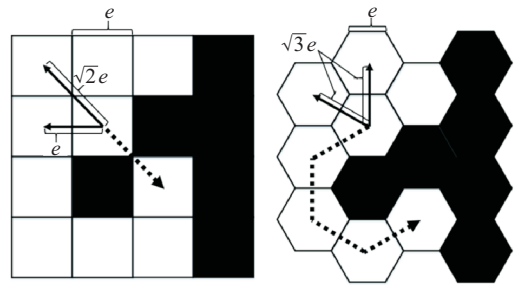
$$\min R = I_{jk}; \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} j \in \{1, 2, \dots, m\}, \\ k \in \{1, 2, \dots, n\}, I_{jk} \in N, \\ (|I_{jk}| - 1) \cdot a = L_{jk} = L_{\min} \leq L, \\ i \in I_{jk}, t \in T, H = h(i, t) = 0. \end{cases} \quad (8)$$

2 模型构建

2.1 栅格地图建立

在传统四边形栅格地图中,网格进行下一步移动时有8个方向可以选择,假设网格边长为 e ,当选择向极轴方向移动时,到达下一网格的距离为 e ,但是选择斜向移动时,到达下一网格的距离却为 $\sqrt{2}e$,如图1(a)所示.



(a) 传统四边形栅格地图 (b) 改进六边形栅格地图

图1 四边形栅格地图与六边形栅格地图对比

假设在整个疏散过程中行人的移动速度 v 不变,那么从起点疏散至终点的过程中,每一次移动至下一网格的时间就有可能是 e/v 或 $\sqrt{2}e/v$.整个疏散过程中每一步所消耗的时间便无法确定,也就无法考虑火灾扩散对疏散行为的实时影响.

为了解决这个问题,本文提出运用六边形网格代替传统四边形网格建立栅格地图.假设六边形边长为 e ,则每次移动距离无论哪个方向均为 $\sqrt{3}e$,如图1(b)所示.假设速度不变,则在整个模拟过程中每一

步模拟所消耗的时间均为 $\sqrt{3}e/\nu$,这样就可以根据每一步的时长确定该时间内火灾的动态扩散范围和人员疏散距离,分析两者在同一时刻下的实时影响。

与四边形网格相比,六边形网格不但可以确保地图中每次移动的距离均等,在描述斜向分布的障碍物时,六边形栅格地图中也会避免出现与实际不符的“斜向穿墙”现象,如图1中虚线所示。

基于以上分析建立六边形栅格地图,以地图左下角为原点建立直角坐标系,横向为 X 轴,纵向为 Y 轴.设六边形内切圆圆心为该六边形坐标点,则坐标 (x_i, y_i) 和网格序号 i 可通过下式进行转换:

$$x_i = \begin{cases} \frac{3}{2}e(\text{mod}(i, N_i)), & \text{mod}(i, N_i) \neq 0; \\ i, & \text{mod}(i, N_i) = 0. \end{cases} \quad (9)$$

$$y_i = \begin{cases} \frac{3}{2}e(N_i - \text{ceil}(i/N_i))\frac{2\sqrt{3}}{3}, & \text{mod}(i, N_i) \neq 0; \\ \frac{3}{2}e(N_i - \text{ceil}(i/N_i))\frac{2\sqrt{3}}{3} + \frac{\sqrt{3}}{3}, & \text{mod}(i, N_i) = 0. \end{cases} \quad (10)$$

其中: e 为六边形边长, i 为该网格序号, N_i 为地图尺寸(每行网格的个数), ceil 表示向上取整运算, mod 表示求余数运算。

2.2 火灾扩散对疏散行为的实时影响

在模型中加入统一时间坐标,控制火灾扩散和疏散行为两者同步进行, t 为火灾扩散时间,火灾开始发生时刻记作 $t = 0$, t_c 为疏散滞后时间, t_e 为疏散行为进行时间,三者关系为 $t = t_c + t_e$ 。

2.2.1 火灾危险区域的动态扩散

在时间维度下考虑危险区域的动态变化,选取温度、CO浓度、O₂浓度、能见度为疏散路径选择的重要影响因素.当某一点发生火灾时认为该点为起火点 H ,记录其网格序号 i_H 及坐标 (x_H, y_H) ,此时 $t = 0$.周边环境开始受火灾影响,每一点的温度、CO浓度、O₂浓度、能见度均开始变化.当 $t = n$ 时,地图中某一点 (x_i, y_i) 的任意一项影响因素指标达到极限临界值,则认为危险区域在 $t = n$ 时刻扩散至该点,扩散速度为 ν_k .定义以该点至起火点距离 r 为半径,起火点为圆心的区域为危险区域,该区域中所有网格的危险度 $H_i = 1$,并用红色表示,认为在疏散过程中必须予以躲避.随着时间的进行,危险区域不断以速度 ν_k 向四周扩散,外部环境状态函数 $G = g(t)$ 也随之变化,并对动态疏散行为产生影响。

$$r = \nu_k \cdot t, \quad (11)$$

$$r = \sqrt{(x_i - x_H)^2 + (y_i - y_H)^2}. \quad (12)$$

本研究中,危险极限临界值并不一定是致死量,而是考虑超过临界值后可能对人体造成巨大危害.由于被困人员的年龄、性别、身体状态不同,对最高温度、能见度等影响因素的承受极限也不同,无法针对每一个个体进行区分,本文通过参考国内外相关文献资料^[18-22]确定现场CO浓度、O₂浓度、温度、能见度的平均临界值.各影响因素的临界值见表1。

表1 主要影响因素平均临界值

| 主要影响因素 | 选取临界值 | 参考文献 |
|-------------------|--------------------------------------|---------|
| 温度 | 120°C | [18-19] |
| CO浓度 | 2.3 g/m ³ (0.002 mol/mol) | [20] |
| O ₂ 浓度 | 6% (0.0064 mol/mol) | [21] |
| 能见度 | 10 m | [22] |

2.2.2 动态疏散行为

在时间维度下考虑疏散行为的动态变化,取 $t_e = 0$ 时刻疏散开始,此时 $t = t_c$,即栅格地图中外部环境状态 $G = g(t_c)$.算法根据 $G(t_c)$ 计算蚂蚁从起点 S 在回避所有危险障碍前提下可达到的下一位置 P_1 ,并移动蚂蚁至 P_1 ;在 $t_e = 1$ 时刻,外部环境状态 $G = g(t_c + 1)$,算法计算在外部环境状态 $G(t_c + 1)$ 下蚂蚁从 P_1 可达到的下一位置 P_2 ,并移动蚂蚁至 P_2 ,时刻 $t_e = 1$ 结束,进入 $t_e = 2$ 时刻;以此类推,蚂蚁在每一步运动时需根据火灾的动态扩散不断调整可移动位置,最终生成一条从起点 S 至终点 E 的路径 R .改进算法将每一时刻作为一个计算过程,控制火灾扩散行为和疏散行为的动态变化在这一时刻内同时进行,如图2所示,图中虚线表示预计最短路径。

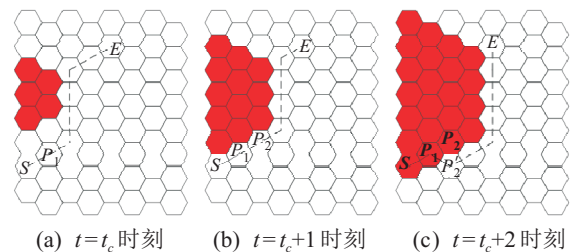


图2 火灾扩散对疏散行为的实时影响

2.3 算法步骤

本研究中蚁群算法的编程实现步骤如下。

Step 1: 导入地图矩阵,初始化环境信息,设定所有蚂蚁的疏散路径初始值为0,禁忌表为全1矩阵,设定起点与终点位置,邻接矩阵初始化。

Step 2: 释放第 m ($m = 1, 2, \dots$)波,第 n ($n = 1, 2, \dots$)只蚂蚁在起点,添加起点位置至禁忌表.设定路径选取规则,当下一点为障碍物时予以回避;当下一点被添加至禁忌表中时予以回避。

Step 3: 进入蚂蚁爬行过程循环,设定时间为 $t_e =$

$t_e + 1$, 设置起火点位置, 通过扩散速度与火灾扩散时间 $t = t_c + t_e$ 计算并确定火灾影响区域, 将在火灾危险区域内的点添加至禁忌表中. 根据下式计算下一步可移动位置:

$$p_{ij}(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha \eta_{ij}^\beta}{\sum_{u \in \text{allowed}_k} \tau_{iu}^\alpha \eta_{iu}^\beta}, & j \in \text{allowed}_k; \\ 0, & \text{Otherwise.} \end{cases} \quad (13)$$

Step 4: 移动至下一点, 将该点添加至禁忌表中, 并记录至路径中. 若该点不为终点或移动步时小于设定模拟步时, 则跳转至 Step 3 循环; 若到达终点或达到设定模拟步时, 则跳出循环进入 Step 5.

Step 5: 记录本只蚂蚁爬行路径, 信息素更新, 跳转至 Step 2 释放下一只蚂蚁.

Step 6: 当 n 只蚂蚁爬行结束后第一波蚂蚁释放结束, 进入下一波循环, 直至 m 波蚂蚁释放完毕, 输出计算结果.

3 仿真实验及结果分析

为了验证所构建模型的科学性, 本文以某大型地下综合体为工程背景进行仿真计算. 研究区域位于地下一层的商业街内, 面积为 $60.8 \text{ m} \times 61.4 \text{ m}$ 的封闭空间. 根据建筑设计图纸建立六边形栅格地图, 栅格地图尺寸为 40×40 , 其中网格边长为 1 m , 每个网格移动至下一网格所对应的实际移动距离为 1.73 m . 当区域内某一点发生火灾后, 受困人员需要移动至出口 E_1 、 E_2 进行疏散.

3.1 关键参数确定

3.1.1 行人疏散速度确定

本模型中受困人员的疏散速度是一个比较重要的参数, 它决定了模拟过程中某一时刻受困人员的移动位置. 国内外学者对这一问题已有较成熟的研究, 文献[23-26]认为, 行人紧急情况下的疏散速度为 $1.2 \text{ m/s} \sim 2.19 \text{ m/s}$, 本论文拟取中间值, 认为行人的疏散速度 $v_p = 1.7 \text{ m/s}$.

3.1.2 火灾危险区域扩散速度确定

火灾危险区域的扩散速度是另一个比较重要的模拟参数, 它决定了在某一时刻下该区域的实际影响面积. 为了准确描述真实状态下的火灾扩散行为, 本文尝试与火灾动力学模拟软件(Fire Dynamics Simulator, FDS)相结合获得这一参数.

根据模拟区域实际情况建立数值模型, 该区域以服装销售店面为主, 故假设主要可燃物为衣物. 参考天津消防研究所火灾实验结果^[27], 决定火灾按 t^2 快速火增长, 火灾增长系数为 0.04689 kW/s^2 , 火灾最

大热释放速率为 9 MW . 设定起火点 H , 在起火位置沿 X 轴 Y 轴方向 10 m 外 A 、 B 、 C 、 D 四点各设置 4 个气相监测设备, 分别对温度、 CO 浓度、 O_2 浓度、烟尘能见度这 4 个重要影响因素进行监测, 确定各影响因素最早达到极值的时间. 我国成人的平均身高约为 1.6 m , 故设置监测设备高度为 1.6 m . 对火灾蔓延过程进行仿真模拟, 观察各监测器数值的变化, 当任一监测值达到表 1 所示安全临界值时, 则认为火灾危险区域扩散至该点处, 记录时间.

模拟结果如表 2 所示, 可以看出, CO 浓度最早达到了临界值 0.002 mol/mol , 用时 72.69 s . 则认为火灾危险区域经过 72.69 s 后扩散至距起火点 10 m 外位置, 根据式(11)计算可得扩散速度 $v_k = 0.137 \text{ m/s}$.

表 2 各关键影响因素达到极值的最早时间

| 影响因素 | 到达极值 | 最早到达时间/s | 扩散速度/(m/s) |
|-------------------|----------------|----------|------------|
| 能见度 | 10.004 8 m | 113.59 | 0.088 |
| CO 浓度 | 0.002 mol/mol | 72.69 | 0.137 |
| O ₂ 浓度 | >0.064 mol/mol | - | - |
| 温度 | 120 °C | 245.32 | 0.041 |

3.1.3 模拟步时的确定

将地图中任意一网格 i 移动至相邻网格 j 的时间设为 1 步时, 此时在真实状况下的移动距离 l_{ij} 为 1.73 m , 因此, 在本文所建立的计算模型中从某一点移动至下一点的时间为 $t_{ij} = l_{ij}/v_p = 1.73/1.7 \approx 1 \text{ s}$, 即模拟步时时长为 1 s . 模型以 1 步时为单位, 认为在每一步的模拟结束后, 对应的真实环境中受困人员移动了 1.7 m , 火灾危险区域以起火点为圆心, 向四周扩散了 0.137 m .

3.2 仿真模拟

假设疏散过程中花费时间为 t_{SE} , 有 $t_{SE} = t_E - t_S$, 其中 t_S 为从起点开始疏散的时刻, t_E 为到达终点完成疏散的时刻. 本研究拟通过设置 3 个不同情景, 对比分析传统动态蚁群算法和本文所提改进算法在火灾动态环境中的仿真结果.

情景 1 主要模拟传统动态蚁群算法的计算结果随时间的动态变化. 设定栅格地图中疏散起点位置 S 为 $i = 1092$, 疏散终点 E_1 为 $i = 39$, E_2 为 $i = 121$, 起火位置 H 为 $i = 696$. 受困人员的疏散速度为 1.7 m/s , 火灾危险区域的扩散速度为 0.137 m/s , 火灾扩散状态分别为 $G = g(t = 20 \text{ s})$, $G = g(t = 40 \text{ s})$, $G = g(t = 60 \text{ s})$.

情景 2 对比分析两种算法的仿真结果, 其中传统算法设定在疏散过程中火灾扩散状态恒定为 $G = g(t_E)$; 本模型考虑在时间段 t_{SE} 中, 火灾扩散行为和

行人疏散行为同时进行. 设定栅格地图中疏散起点位置 S 为 $i = 1092$, 疏散终点 E_1 为 $i = 39$, E_2 为 $i = 121$, 起火位置 H 为 $i = 696$. 受困人员的疏散速度为 1.7 m/s , 火灾危险区域的扩散速度为 0.137 m/s , 模型假设在火灾开始 15 s 后开始进行疏散, 此时 $t_e = 0, t_c = 15$.

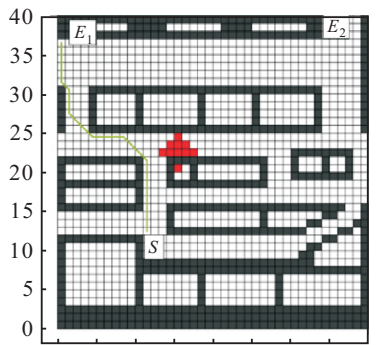
情景3 对比分析两种算法的仿真结果, 其中传统算法设定在疏散过程中火灾扩散状态恒定为 $G = g(t_S)$; 本模型考虑在时间段 t_{SE} 中, 火灾扩散行为和行人疏散行为同时进行. 模型假设在火灾开始 35 s 后开始进行疏散, 此时 $t_e = 0, t_c = 35$, 其他参数与情景2相同.

3.3 结果分析

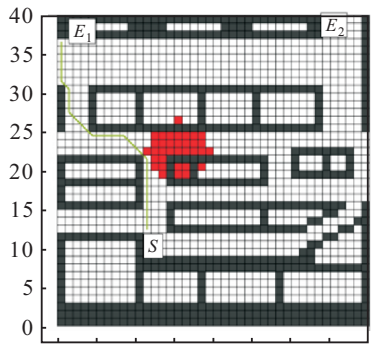
在情景1中, 如图3所示, 传统的动态蚁群算法考虑了火灾危险区域随时间的动态扩散, 可以根据某

一时刻火灾影响区域计算当前时刻下的最短疏散路径. 由图3(c)可见, 传统四边形栅格地图易出现与实际相悖的“斜向穿墙”现象.

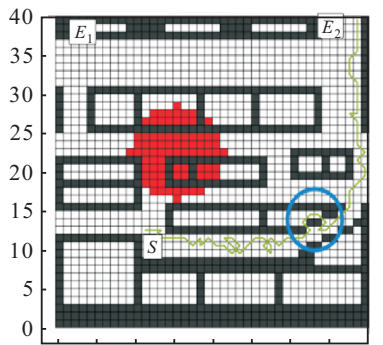
在情景2中, 如图4所示, 模拟结果表明传统算法避开了危险区域选择了较远的 E_2 出口进行疏散, 而本文的改进算法则“穿越”危险区域选择了较近的 E_1 出口, 使得计算结果较传统算法更短, 见表3. 这一现象看似不合理, 却恰恰体现了改进算法的优越性. 这是因为改进算法考虑了火灾扩散和疏散行为的同步进行, 即火灾危险区域是随着疏散行为的进行而逐渐扩大的. 当受困人员从起点 S 移动至 P 点(穿越危险区域点)时, 危险区域并未扩散至该点, 如图4(c)所示, 受困人员可以安全通过 P 点并选择出口 E_1 进行疏散, 而当受困人员经过 P 点后火灾危险区域随着疏散的进行继续扩散.



(a) $t = 20\text{ s}$ 时刻最短路径计算结果

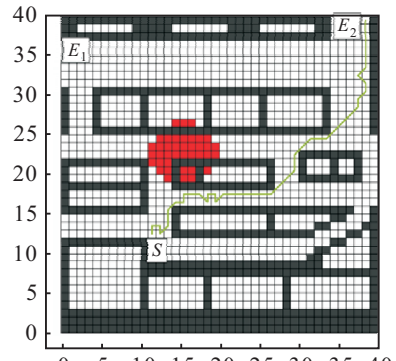


(b) $t = 40\text{ s}$ 时刻最短路径计算结果

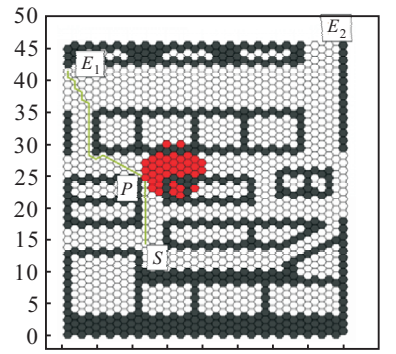


(c) $t = 60\text{ s}$ 时刻最短路径计算结果

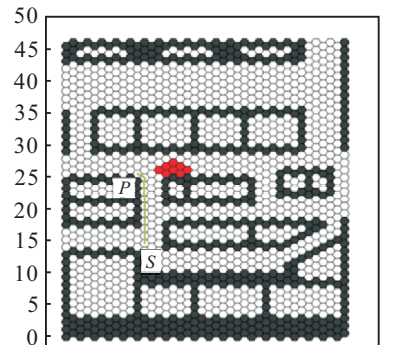
图3 传统动态蚁群算法模拟结果



(a) 传统算法模拟结果



(b) 本文改进算法模拟结果



(c) 受困人员疏散至 P 点时模拟结果

图4 情景2模拟结果对比

表3 情景2中疏散路径长度对比

| 使用算法 | 疏散路径长度 | 节约步时 |
|--------|--------|------|
| 传统蚁群算法 | 47 | - |
| 本文改进算法 | 30 | 36% |

通过对比可以看出,本文构建的模型考虑了疏散过程中火灾逐步扩散行为,可以在保证安全的前提下提供更科学合理的疏散路径,避免出现盲目绕远路的不合理结果,大大提高了疏散效率,减少受困人员在火场的滞留时间。

在情景3中,如图5所示,传统算法避开火灾危险区域,选择了较近的 E_1 出口进行疏散,而本文的改进算法则选择了较远的 E_2 出口,同时在图5(b)中的火灾危险区域较图5(a)有明显扩大.出现这一现象的原因是,传统算法没有考虑疏散过程中火灾的实时扩散,所以在疏散时仍然可以穿过 Q 点到达 E_1 出口.而

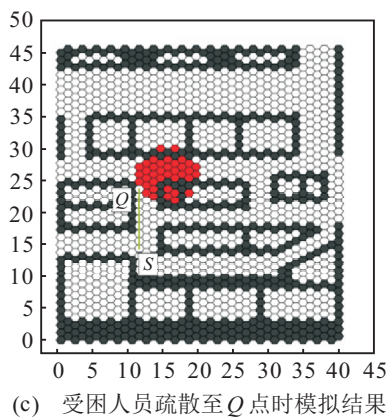
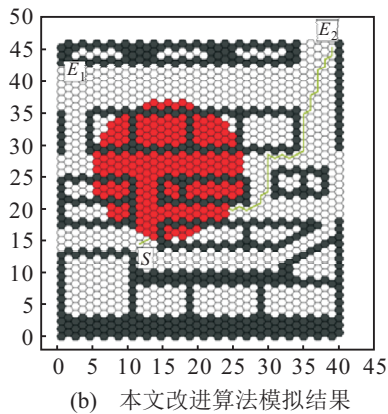
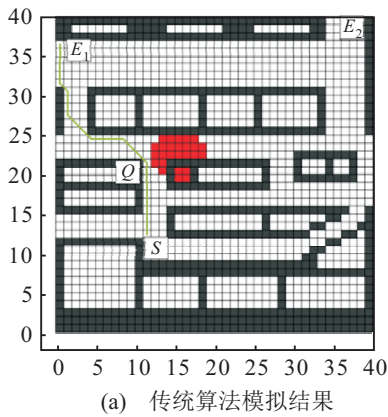


图5 情景3模拟结果对比

本文中的改进算法考虑了受困人员疏散过程中火灾危险区域的同步变化,若选择较近的 E_1 出口,则当疏散至 Q 点时危险区域已扩散至图5(c)所示区域,无法继续前进,所以为了保证疏散人员的安全,较远的 E_2 出口是更科学合理的选择.由于在疏散过程中火灾扩散行为始终同步进行,在受困人员到达终点后,火灾影响区域有明显的扩大.通过对比可以看出,本文构建的模型考虑了疏散过程中火灾的逐步扩散行为,可以根据单位时间内的火灾扩散状况对疏散路径进行实时动态调整,避免了由于忽略火灾动态扩散而将疏散人员引导至危险区域的伤亡事故发生,保证了模拟结果的准确性。

4 结论

在进行室内火灾环境中最短疏散路径计算时,如果忽略了疏散过程中的火灾扩散行为,则可能导致计算结果失真而难以实际应用.本文建立的疏散路径选择模型考虑了火灾扩散对疏散路径的实时影响,可以在保证安全的前提下提供更合理的疏散路径,避免盲目绕远路行为,减少了疏散人员在火场的滞留时间;也可以在疏散过程中根据火灾扩散状况而对疏散路径进行实时动态调整,避免由于忽略火灾实时影响而将疏散人员引导至危险区域的事故发生.通过工程实例的对比分析可知,模型中改进算法的计算结果较传统算法更接近客观事实,具有一定的实际应用价值,可以为智能疏散系统的设计开发提供有益参考。

参考文献(References)

- [1] Morten G W, Ole-Christoffer G, Jaziar R. Escape planning in realistic fire scenarios with Ant Colony Optimisation[J]. Applied Intelligence, 2015, 42(1): 24-35.
- [2] Zhao C M, Lo S M, Lu J A, et al. A simulation approach for ranking of fire safety attributes of existing buildings[J]. Fire Safety J, 2004, 39(7): 557-579.
- [3] Lo S M, Huang H C, Wang P, et al. A game theory based exit selection model for evacuation[J]. Fire Safety J, 2006, 41(5): 364-369.
- [4] Manfrin M, Birattari M, Stutzle T, et al. Parallel ant colony optimization for the traveling salesman problem[J]. Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence, 2006, 4150(2): 224-234.
- [5] 游晓明, 刘升, 吕金秋. 一种动态搜索策略的蚁群算法及其在机器人路径规划中的应用[J]. 控制与决策, 2017, 32(3): 552-556.
(You X M, Liu S, Lü J Q. Ant colony algorithm based on dynamic search strategy and its application on path planning of robot[J]. Control and Decision, 2017, 32(3): 552-556.)

- [6] Gutjahr W. A graph-based ant system and its convergence[J]. *Futur Gener Computer System*, 2000, 16(8): 873-888.
- [7] Zhao H F, Winter S. A time-aware routing map for indoor evacuation[J]. *Sensors*, 2016, 16(1): 112.
- [8] Merkel S. Building evacuation with mobile devices[D]. Karlsruhe: Karlsruhe Institute of Technology, Institute of Applied Informatics and Formal Description Methods, 2014: 81.
- [9] 梅志斌, 董文辉, 潘刚, 等. 建筑物火灾中人员疏散路径优化自适应蚁群算法[J]. *沈阳建筑大学学报: 自然科学版*, 2008, 24(4): 671-674.
(Mei Z B, Dong W H, Pan G, et al. Adaptive ant colony algorithm based on evacuation wayfinding optimization model in building fire[J]. *J of Shenyang Jianzhu University: Natural Science*, 2008, 24(4): 671-674.)
- [10] 刘勇. 基于蚁群算法的应急救援最优路径研究[D]. 北京: 中国地质大学工程学院, 2010: 55.
(Liu Y. The research on the optimal path of emergency rescue based on ant colony algorithm[D]. Beijing: Faculty of Engineering, China University of Geosciences, 2010: 55.)
- [11] 宋洋, 徐桢, 王燕青. 基于蚂蚁算法的危险品运输路径优化研究[J]. *安全与环境工程*, 2014, 21(1): 148-152.
(Song Y, Xu Z, Wang Y Q. Route optimization for dangerous goods transportation based on ant colony algorithm[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2014, 21(1): 148-152.)
- [12] 段鹏飞, 熊盛武, 李辉. 面向大型场馆疏散的改进多蚁群算法研究[J]. *计算机应用研究*, 2013, 30(2): 357-363.
(Duan P F, Xiong S W, Li H. Improved multiple ant colony algorithm for emergency evacuation in large building[J]. *Application Research of Computers*, 2013, 30(2): 357-363.)
- [13] 杜鹏桢, 唐振民, 孙研. 一种面向对象的多角色蚁群算法及其TSP问题求解[J]. *控制与决策*, 2014, 29(10): 1729-1736.
(Du P Z, Tang Z M, Sun Y. An object-oriented multi-role ant colony optimization algorithm for solving TSP problem[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(10): 1729-1736.)
- [14] Wang J, Zhao H F, Winter S. Integrating sensing, routing and timing for indoor evacuation[J]. *Fire Safety J*, 2015, 78: 111-121.
- [15] 丁雨淋, 何小波, 朱庆, 等. 实时威胁态势感知的室内火灾疏散路径动态优化方法[J]. *测绘学报*, 2016, 45(12): 1464-1475.
(Ding Y L, He X B, Zhu Q, et al. A dynamic optimization method of indoor fire evacuation route based on realtime situation awareness[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(12): 1464-1475.)
- [16] 袁媛, 汪定伟. 灾害扩散实时影响下的应急疏散路径选择模型[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(6): 1563-1566.
(Yuan Y, Wang D W. Route selection model in emergency evacuation under real time effect of disaster extension[J]. *J of System Simulation*, 2008, 20(6): 1563-1566.)
- [17] Morten G, Ole-Christoffer G, Jaziar R. Escape planning in realistic fire scenarios with ant colony optimisation[J]. *Applied Intelligence*, 2015, 42(1): 24-35.
- [18] 李剑乾, 丁瑞金. 火灾中的热对人身和财产的危害[J]. *消防技术与产品信息*, 2008(2): 65-68.
(Li J Q, Ding R J. The damage for safety and property by heat[J]. *Fire Technique and Products Information*, 2008(2): 65-68.)
- [19] 童庆杰, 权高峰, 邵力. 火灾事故中人的心理及行为分析[J]. *合肥工业大学学报: 社会科学版*, 2004, 18(3): 159-162.
(Tong Q J, Quan G F, Sao L. Analysis of mentality and behavior of people involved in fire disasters[J]. *J of Hefei University of Technology: Social Science*, 2004, 18(3): 159-162.)
- [20] 邱榕, 范维澄. 火灾常见有害燃烧产物的生物毒理(I)一氧化碳、氰化氢[J]. *火灾科学*, 2001, 10(3): 154-158.
(Qiu R, Fan W C. Biological toxicology of harmful reactive products in fire(I) carbon monoxide, hydrocyanic acid[J]. *Fire Safety Science*, 2001, 10(3): 154-158.)
- [21] 王新民, 姚建, 彭欣. 火灾时期致命因素危害时间的研究[J]. *消防科学与技术*, 2005, 24(1): 28-30.
(Wang X M, Yao J, Peng X. The deadly factor of fire period endangers the research of time[J]. *Fire Science and Technology*, 2005, 24(1): 28-30.)
- [22] DiNenno P J, Drysdale D, Beyler C L, et al. The SFPE handbook of fire protection engineering[M]. 3rd ed. Massachusetts: Society of Fire Protection Engineers/National Fire Protection Association, 2002: 2339.
- [23] Miho S, Nobuyoshi K, Masato H. Experiments of evacuation speed in smoke-filled tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 53: 61-67.
- [24] Karl F, Daniel N, Hakan F. Evacuation of a metro train in an underground rail transportation system: Flow rate capacity of train exits, tunnel walking speeds and exit choice[J]. *Fire Technology*, 2016, 52(5): 1481-1518.
- [25] 杨立兵. 建筑火灾人员疏散行为及优化研究[D]. 长沙: 中南大学资源与安全工程学院, 2012, 63.
(Yang L B. Study on behavior and optimization of evacuee under building fire[D]. Changsha: School of Resources and Safety Engineering, Central South University, 2012: 63.)
- [26] Fang Z M. Modelling and experimental study of evacuation process considering effect of fire[D]. Hefei: School of Engineering Science, University of Science and Technology of China, 2012: 32.
- [27] Tianjin Fire Research Institute of MPS. The principles and approaches of analyze of fire growth[R]. Tianjin: Tianjin Fire Research Institute of MPS, 2004.