

考虑火灾产物影响下的人员疏散路径规划研究

刘纪坤¹, 袁雪颖¹, 王佳茹², 王翠霞¹

(1. 西安科技大学 安全科学与工程学院, 西安 710054;

2. 陕西路桥集团有限公司, 西安 710075)

摘要: 为解决现代建筑火灾应急疏散过程中人员难以快速、安全疏散的问题, 提高人员面对火灾的应急能力, 提出一种考虑火灾产物影响条件下的改进蚁群算法, 综合考虑可见度、CO 浓度和烟气温度 3 种火灾产物对人员疏散的影响, 对蚁群算法的启发信息、信息素更新方法进行改进; 通过 Dijkstra 算法规划初始疏散路径, 利用改进蚁群算法对初始疏散路径进行优化; 以西安某地铁站台实际地形为例, 通过 PyroSim 软件进行火灾模拟, 获取地铁站台火灾产物的实时数据, 采用 Matlab 软件分别进行改进蚁群算法和传统蚁群算法对比仿真实验、不同火灾时期下的改进蚁群算法仿真实验, 结果表明: 改进后的蚁群算法提高了疏散效率和收敛速度, 缩短了疏散时间和路径长度, 可实现火灾疏散路线的动态规划。

关键词: 地铁站; 疏散路径规划; 蚁群算法; Dijkstra 算法; 火灾产物

Research on Personnel Evacuation Path Planning under the Influence of Fire Products

LIU Jikun¹, YUAN Xueying¹, WANG Jiaru², WANG Cuixia¹

(1. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Shaanxi Road and Bridge Group Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: In order to solve the problem of the difficulty in quickly and safely evacuating personnel during the emergency evacuation of modern building fires, and to improve personnel's emergency response capabilities in the face of fires, an improved ant colony algorithm considering the effects of fire products is proposed. Comprehensively consider the effects of three fire products, namely visibility, CO concentration and smoke temperature, on personnel evacuation, and improve the heuristic information and pheromone updating methods of the ant colony algorithm. The initial evacuation path is planned by Dijkstra's algorithm, and it is optimized using the improved ant colony algorithm. By taking a subway station in Xi'an as an example, the fire simulation is carried out by PyroSim software, achieving the real-time data of the fire products of the metro platform. Matlab software is used to simulate comparative experiments between the improved ant colony algorithm and ant colony algorithm, and simulate the improved ant colony algorithm under different fire periods, respectively. The research results show that the improved ant colony algorithm improves the evacuation efficiency and convergence speed, shortens the evacuation time and path length, and realizes the dynamic planning of fire evacuation routes.

Keywords: subway station; evacuation path planning; ant colony algorithm; Dijkstra's algorithm; fire products

0 引言

随着我国城市化水平的不断提高, 大型复杂结构建筑的建设迅速推进, 为城市的发展和人们的生活提供了更多的机会和便利^[1]。然而, 这些建筑空间相对封闭、

结构复杂, 火灾事故一旦发生, 不仅会造成人员恐慌, 还会产生大量有毒有害烟气, 在疏散逃生过程中极易导致踩踏事故和其他意外危险的发生^[2]。因此, 在突发火灾情况下, 科学高效地规划疏散路径, 确保人员安全疏散尤为重要。

收稿日期: 2024-01-13; 修回日期: 2024-02-27。

基金项目: 国家自然科学基金(52204235)。

作者简介: 刘纪坤(1987-), 男, 博士, 副教授。

引用格式: 刘纪坤, 袁雪颖, 王佳茹, 等. 考虑火灾产物影响下的人员疏散路径规划研究[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(4): 155-161.

随着人工智能的发展,智能优化算法在路径规划问题中得到广泛使用,常用的智能优化算法有 Dijkstra 算法^[3]、A* 算法^[4]、遗传算法^[5]、蚁群算法^[6]、粒子群算法^[7]和神经网络法^[8]等。其中,蚁群算法因其具有强鲁棒性、全局最优以及易与其他算法结合等优点,被广泛应用于不同领域的路径规划中。蚁群算法于 1991 年由意大利学者 Colormi 首次提出,其正反馈机制可以引导蚁群向全局最优解靠近,但蚁群算法存在易陷入局部最优解、疏散效率低的问题,因此众多专家学者开展了改进蚁群算法的研究。文献 [9] 提出了一种遗传-蚁群算法,有效提升了火灾情景下疏散路径的生成质量,缩短了路径生成时间;文献 [10] 将量子并行计算的高效性和蚁群算法的寻优能力相结合,提出一种量子蚁群算法,针对大空间建筑进行了仿真实验;文献 [11] 提出一种基于深度神经网络代理模型的毒气泄漏事故疏散路径模型,该模型通过预测动态气体扩散,为疏散人员提供最安全的路线。文献 [12] 结合大气扩散模型、改进的蚁群算法和道路阻力模型,提出一种严重核事故下场外紧急疏散的多目标疏散路径优化方法,求解疏散时间和辐射剂量最小的疏散路径。文献 [13] 考虑不同人群分类下的人群混乱程度和疏散状态,在疏散熵修正蚁群疏散模型的基础上将人群分为平静人群、敏感人群和管理人群,对不同人群分类下的疏散路径进行研究。文献 [14] 将量子启发进化算法理论引入优化蚁群算法,提出了一种用于疏散路径优化的量子蚁群算法,该算法有强鲁棒性,在疏散过程中执行效率更高;文献 [15] 考虑疏散路径距离和毒性负荷值,结合毒性负荷值对蚁群算法信息素更新策略和启发函数进行改进;文献 [16] 针对机器人路径规划问题,引入影响因子改进启发函数,利用达尔文的进化论改进蚁群算法的信息素更新规则,提高了算法的迭代速度。

在实际疏散中,人员的疏散路径和用时容易受到烟气可见度、毒害性和温度等因素的影响,而现有的疏散路径规划研究中较少考虑火灾产物对疏散过程的影响。鉴于此,以地铁站台为研究对象,针对火灾事件下地铁站台的应急疏散问题进行研究。本文以突发火灾情况下客流疏散为背景,提出一种改进蚁群算法。首先,将火灾产物对人员疏散过程的影响量化,计算当量速度系数。其次,将当量速度系数、几何长度和当量长度相结合的方式改进启发信息。最后,采用局部更新和全局更新相结合的信息素更新方式进行算法改进。选用 Dijkstra 算法规划人员疏散的初始路径,利用改进蚁群算法优化初始路径,实现火灾疏散路线的动态规划,并运用 PyroSim 软件和 Matlab 软件进行模拟仿真,验证模型的可行性和有效性,以期大型复杂结构建筑的火灾疏散问题提供理论依据。

1 蚁群算法与 Dijkstra 算法

1.1 蚁群算法原理

蚁群算法模拟了自然界中蚂蚁的觅食行为。在觅食期间,蚂蚁会释放一种被称为信息素的化学物质,通过信息素的传递与累计,蚂蚁能够找到最短路径并有效地收集食物。信息素的浓度代表路径的优良程度,蚂蚁更倾向选择浓度高的路径。同时,信息素会随着时间的推移而挥发,以模拟信息的时效性。在这种正反馈机制下,蚁群会逐步向全局最优解靠近,探索出从洞穴到食物的最短路径^[17]。

通常食物周围环境是未知的,在觅食过程中,蚂蚁会按照信息素浓度的高低选择下一步行动方向。在蚁群算法中,设空间内共有 n 只蚂蚁,蚂蚁 m ($m=1, 2, 3, \dots, n$) 从节点 i 转移到节点 j 的概率用状态移动概率 P_{ij} 表示,计算方法如式 (1) 所示:

$$P_{ij}^m(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{j \in allowed} [\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(t)]^\beta} & \text{若 } j \in allowed \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $allowed$ 为蚂蚁下一步可移动节点的集合; $\eta_{ij}(t)$ 为启发信息, $\eta_{ij}(t) = 1/d_{ij}$, d_{ij} 为节点 i 到节点 j 的几何距离; $\tau_{ij}(t)$ 为 t 时刻节点 i 到节点 j 上的信息素; α 为累积的信息启发因子; β 为期望启发因子,两者分别表示启发函数与信息素的重要程度。

当蚁群完成从洞穴到食物的一次迭代时,觅食路径上留下的信息素会随着时间的推移而蒸发。为了避免残留信息素对启发信息造成影响,需要对路径上的信息素进行全局更新。信息素更新方法如式 (2) ~ (4) 所示:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \quad (2)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{m=1}^n \tau_{ij}^m(t) \quad (3)$$

$$\tau_{ij}^m(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_m} & \text{若第 } m \text{ 只蚂蚁在本次规划中经过}(i,j) \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (4)$$

式中, ρ 为信息挥发系数,取值为 $[0, 1]$; $\tau_{ij}^m(t)$ 为第 m 只蚂蚁在节点 i 到节点 j 上留下的信息素量; $\Delta\tau_{ij}(t)$ 为在迭代结束后节点 i 到节点 j 上信息素的增量; Q 为信息素强度; L_m 为第 m 只蚂蚁在一次迭代中所走的路径总长度。

1.2 Dijkstra 算法原理

Dijkstra 算法是一种用于求解单源点间最短路径的算法,由荷兰科学家 Dijkstra^[3] 于 1956 年首次提出。该算法具有易使用、复杂性低和可靠性高等优点,但计算效率低。Dijkstra 算法的基本思想是通过不断扩展当前

已找到的最短路径集合, 来逐步确定最短路径。文中采用该算法规划火灾发生后疏散人员的初始路径, 算法的具体步骤如下^[18-19]:

- 1) 初始化参数。确定起始顶点 s , 使集合 S 只包含起点 s , 集合 U 包含剩余顶点。
- 2) 选择集合 U 中距离起始顶点 s 最近的顶点, 作为下次的计算点, 将该顶点及起始顶点 s 到该顶点的最短距离存于集合 S 中, 并从集合 U 中删除。
- 3) 遍历当前顶点到集合 U 中的剩余顶点, 如果通过当前顶点到达起始顶点 s 的路径长度小于目前记录的最短距离, 则更新距离。
- 4) 重复 2) 和 3), 直到所有顶点都被访问过, 此时集合 S 包含所有顶点, 集合 U 为空集。

最终, 集合 S 中记录的值就是起始顶点 s 到各个顶点的最短距离。

2 改进蚁群算法

在火灾疏散路径规划问题中, 传统蚁群算法虽然可以解决路径优化问题, 但仍然存在一些局限, 例如容易陷入局部最优解、收敛速度慢和疏散效率低等^[20-21]。基于上述问题, 本文将 Dijkstra 算法与蚁群算法相结合, 首先采用 Dijkstra 算法规划疏散起始位置到出口的初始最短路径, 通过在启发信息引入火灾产物对疏散速度影响系数和改进信息素更新方法的方式对传统蚁群算法进行改进, 使用改进蚁群算法对 Dijkstra 算法规划的初始最短路径进行优化, 从而避免算法陷入局部最优解, 提升疏散效率。

2.1 启发信息改进

火灾发展过程中会产生大量的热和烟气影响人员的疏散速度。文献 [22] 认为能见度、CO 和烟气温度的是影响疏散速度的主要原因, 并引入当量速度 v_i 和当量速度系数 $V_{ij}(t)$ 的概念, 从而量化 3 种火灾产物对人员疏散速度的影响, 其表达式如式 (5) (6) 所示:

$$v_i = v_0 \cdot V_{ij}(t) \tag{5}$$

$$V_{ij}(t) = f_{ij}(K) \cdot f_{ij}(Q) \cdot f_{ij}(T) \tag{6}$$

式中, v_0 为人员基准速度 (m/s); $f_{ij}(K)$ 、 $f_{ij}(Q)$ 、 $f_{ij}(T)$ 分别为关于能见度、CO 和烟气温度的函数。

2.1.1 能见度影响函数

文献 [23] 通过实验得到能见度影响系数 $f_{ij}(K)$ 与可见度的关系式, 能见度影响系数主要由减光系数 K 决定, 如式 (7) (8) 所示:

$$f_{ij}(K) = \begin{cases} 1 & K \leq 0.35 \\ 2.75 - 5K & 0.35 < K \leq 0.5 \\ 0.25 & K > 0.5 \end{cases} \tag{7}$$

$$S = \frac{4}{K} \tag{8}$$

式中, S 为能见度 (m), K 为减光系数 (m^{-1})。

2.1.2 CO 影响函数

文献 [24] 通过实验得到 CO 浓度影响系数和 CO 含量的函数, 如式 (9) 所示:

$$f_{ij}(Q) = \begin{cases} 1 & \\ 1 - [0.2125 + 1.788\varphi(CO)] \cdot \varphi(CO)t & \varphi(CO) < 0.1 \\ 0 & 0.1 \leq \varphi(CO) < 0.25 \\ & \varphi(CO) \geq 0.25 \end{cases} \tag{9}$$

式中, $\varphi(CO)$ 为 CO 体积分数 (%); t 为暴露时间 (min)。

2.1.3 温度影响函数

文献 [22] 认为当 $T \leq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 温度对人员疏散速度不产生影响; 当 $30\text{ }^{\circ}\text{C} < T \leq 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 温度对人员的疏散速度产生积极影响; 当 $110\text{ }^{\circ}\text{C} < T \leq 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 温度对人员疏散速度产生消极影响; 当 $T > 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 人员丧失行动能力。具体的温度影响函数如式 (10) 所示:

$$f_{ij}(T) = \begin{cases} 1 & T_s \leq 30 \\ \frac{(v_{\max} - 1.2) \left(\frac{T_s}{30} - 1\right)^2}{1.2} + 1 & 30 < T_s \leq 60 \\ \frac{v_{\max}}{1.2} \left[1 - \left(\frac{T_s}{60} - 1\right)^2\right] & 60 < T_s \leq 120 \end{cases} \tag{10}$$

式中, T_s 为火场实际温度 ($^{\circ}\text{C}$); $v_{\max}$ 为最大逃生速度 (m/s), 一般取 4 m/s。

在火灾现场的复杂环境中, 由于受到火灾产生的烟雾和高温等因素的影响, 最短路径不一定是最快或最安全的疏散路径。因此, 引入当量长度 D_{ij} 代替原算法中的几何长度, 当量长度的表达式如式 (11) 和式 (12) 所示:

$$D_{ij} = d_{ij} \cdot \frac{v_0}{v_i} \tag{11}$$

用当量长度的倒数表示启发信息, 表达式如式 (12) 所示:

$$\eta_{ij}(t) = \frac{1}{D_{ij}} = \frac{V_{ij}(t)}{d_{ij}} \tag{12}$$

2.2 信息素更新方法改进

通过引入局部信息素更新这一步骤, 采用局部更新和全局更新相结合的信息素更新方式, 可以加强蚁群算法的全局搜索能力, 提高最优解的质量。

2.2.1 局部信息素更新

每当蚂蚁从节点 i 到节点 j 这条路径上走过时, 就对该段路径上的信息素进行局部更新, 信息素更新方式如式 (13) 所示:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho)\tau_{ij}(t) + \rho\tau_0 \tag{13}$$

式中, τ_0 为初始信息素浓度。

2.2.2 全局信息素更新

在蚁群达到终点后, 选出搜索路径中最短的一条, 对该条路径上每一节点的信息素进行全局更新, 信息素更新方式如式 (14) (15) 所示:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \rho\Delta\tau_{ij}(t) \quad (14)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \frac{1}{L_h} \quad (15)$$

式中, L_h 为本次迭代所有蚂蚁搜索到的最优路径长度。

2.2.3 信息素阈值限定

局部更新和全局更新的信息素更新方法在提高疏散效率的同时, 不可避免地出现了收敛过早的问题。因此, 引入信息素阈值限定方法, 将每一条路径上的信息素浓度控制在 $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ 之间, 以此来避免信息素浓度过大或过小, 确保解的全局性, 解决蚁群算法的过早收敛问题。全局更新最优路径上信息素阈值的上下界^[25]可由下式确定:

$$\tau_{ij} = \begin{cases} \tau_{\min} & \tau_{ij} \leq \tau_{\min} \\ \tau_{ij} & \tau_{\min} < \tau_{ij} < \tau_{\max} \\ \tau_{\max} & \tau_{ij} \geq \tau_{\max} \end{cases} \quad (16)$$

式中, $\tau_{\min}$ 和 $\tau_{\max}$ 分别表示信息素浓度的最小值和最大值。

2.3 改进蚁群算法流程

按照上述规则, 本文建立的改进蚁群算法运算详细步骤如图 1 所示。

改进蚁群算法的具体流程如下:

- 1) 根据实际地形, 采用栅格地图法创建环境模型;
- 2) 利用 Dijkstra 算法规划出初始路径;
- 3) 将蚁群算法参数初始化;
- 4) 算法开始迭代;
- 5) 通过火灾仿真获取火灾产物数据, 根据式 (5) ~ (12) 计算各节点间的启发信息矩阵;
- 6) 根据式 (1) 计算节点转移概率, 选择下一节点;
- 7) 确定节点后, 根据式 (13) 对走过的路径上的信息素进行局部更新;
- 8) 判断蚁群是否达到终点, 若达到终点, 则转向 9), 否则转向 4);
- 9) 选出蚁群搜索路径中最短的一条路径, 根据式 (14) 和式 (15) 对进行全局信息素的更新;
- 10) 判断迭代次数是否达到最大迭代次数, 若是, 则输出最优路径, 结束程序, 否则转向 4)。

3 仿真分析

为了验证改进蚁群算法规划疏散路径的可靠性和有效性, 以西安某地铁站台为研究对象进行仿真分析。该地铁站台长 112 m, 宽 14 m, 楼梯 2 个, 柱子 22 个。站台最右侧设有卫生间。站台中部有一个通往站厅层的

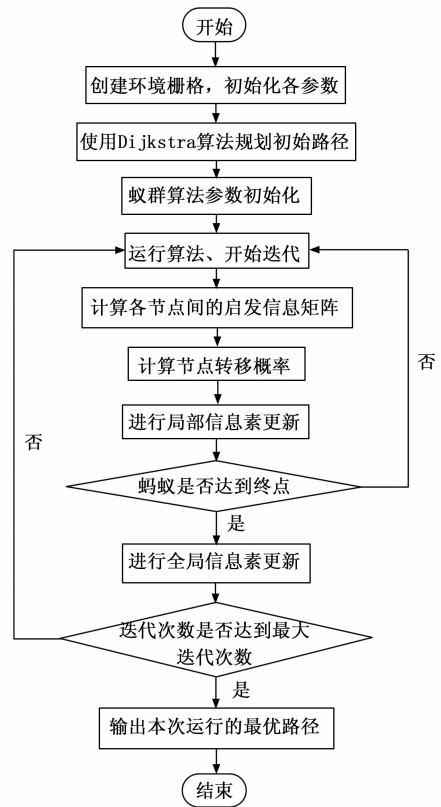


图 1 改进蚁群算法流程图

无障碍电梯, 两组通往站厅层的楼扶梯分布于无障碍电梯两侧。

3.1 火灾仿真实验

为获得地铁站台的火灾产物数据, 采用 Pyrosim 软件进行火灾仿真实验。依据地铁站台实际地形, 以 1:1 的比例建立地铁站台三维模型, 如图 2 所示。



图 2 地铁站台三维模型

在站台内分别对称均匀布置 20 组可见度传感器、CO 传感器和温度传感器, 传感器均距离地面 1.6 m, 根据传感器位置划分出 20 个区域, 如图 3 所示。火源位置与栅格地图中的火源位置相同, 依据《地铁设计规范 GB50157-2013》中火灾疏散时间不得超过 6 min 的规定, 设置火灾烟气模拟时长为 360 s。区域 1 的火灾产物仿真结果如图 4 所示。

基于火灾产物仿真数据, 根据式 (6) ~ (9) 计算火灾发生后不同时间各区域的当量速度系数, 计算结果如表 1 所示。假定节点 i 到节点 j 的当量速度系数为节点 i 和节点 j 的当量速度系数平均值, 根据式 (12) 计算启发信息, 最终实现火灾动态场景的改变。

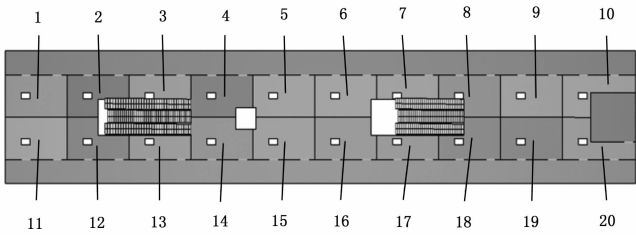


图3 区域划分

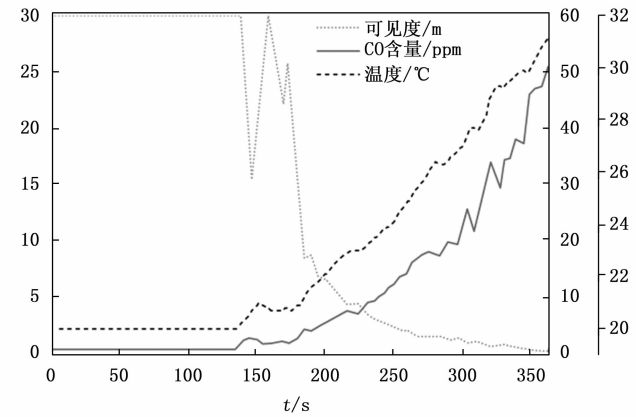


图4 区域1的可见度、CO含量和温度

表1 火灾发生第360 s时各区域当量速度系数							
区域	当量速度系数	区域	当量速度系数	区域	当量速度系数	区域	当量速度系数
1	0.79	6	0.26	11	0.25	16	1
2	0.81	7	0.25	12	0.25	17	0.25
3	0.78	8	0.25	13	0.25	18	1
4	0.83	9	0.25	14	0.25	19	1
5	0.35	10	0.25	15	0.25	20	1

3.2 环境建模

目前环境模型建立的方法主要包括栅格法、切线图法、拓扑法、几何法等^[26-27]。为更直观地分析和研究,本文采用栅格法构建环境模型。栅格法的基本原理是将空间环境划分为多个栅格单元,根据实际情况设置障碍物和可疏散的空间^[28]。以西安某地铁站台作为研究对象,依据图2中该站台内的构筑物建立56×7的栅格地图,每个栅格为2 m×2 m的正方形,如图5所示。根据每个栅格的状态将其分为自由通行栅格、障碍物栅格和火源栅格。图中白色栅格为自由通行栅格,黑色栅格为障碍物栅格,阴影栅格为火源栅格,黑色三角为疏散起点,白色圆点为疏散终点。

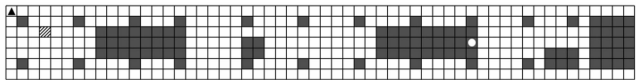


图5 地铁站台栅格地图

3.3 改进蚁群算法仿真实验

3.3.1 改进蚁群算法与蚁群算法对比实验

为验证改进蚁群算法在地铁站台人员疏散路径规划中的有效性和收敛速度,对传统蚁群算法和改进蚁群算法进行仿真实验对比。本文主要从搜索节点个数、路径长度、迭代次数、转折点和平滑度5个方面进行评估。在栅格地图内设置疏散起点和终点,考虑最恶劣情况下的疏散场景,疏散起点设置在站台最左侧,疏散终点设置在2号楼梯口。在蚁群算法中,参数的取值会对算法的运行结果造成影响^[29]。经过多次参数取值试验,最终取得最优参数组的取值,各参数设置如下:信息素相对权重 $\alpha=1$ 、启发信息相对权重 $\beta=1$ 、信息素挥发系数 $\rho=0.3$ 、信息素强度 $Q=20$ 、蚂蚁数量 $m=100$ 和最大迭代次数 $N_{\max}=100$ 。仿真结果如图6~9所示,仿真结果对比如表2所示。

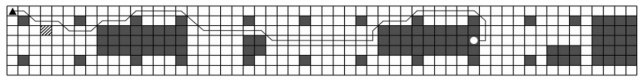


图6 Dijkstra算法路径规划

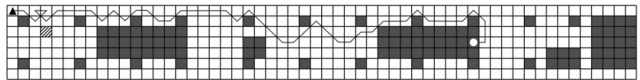


图7 蚁群算法路径规划

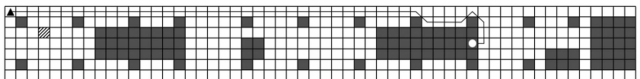


图8 改进蚁群算法路径规划

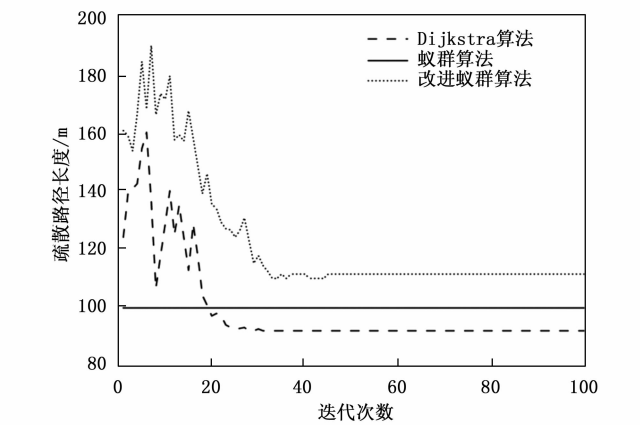


图9 算法对比路径规划收敛曲线

指标	节点数/个	最优路径长度/m	迭代次数/次	转折点/个	平滑度
Dijkstra 算法	47	100.3	1	18	良
蚁群算法	48	111.9	45	33	差
改进蚁群算法	46	92.5	30	6	优

从图 6 中可以看出,可以看出 Dijkstra 算法在火源附近所规划的路径并非最优,但其路径平滑度良好。从图 7 可以看出,蚁群算法所规划的疏散路径,在遇见障碍物时容易陷入局部最优解,存在频繁转弯和无效路径规划的问题,导致路径长度和火源处停留时间增加、疏散效率降低,难以规划出最优路径。图 8 为使用改进蚁群算法规划的疏散路线,可以看出,改进蚁群算法可以很好地规划出安全快速的疏散路径,所规划的疏散路径平滑,转折点少,且在障碍物密集处和稀疏处均可规划出最优路径。图 9 是 3 种算法的收敛曲线图,从图中可以看出,在相同的环境下,Dijkstra 算法、蚁群算法和改进蚁群算法规划的路径最优路径长度分别为 100.3、111.9 和 92.5 m。在计算速度方面,改进蚁群算法收敛速度快于蚁群算法的收敛速度,在第 30 次迭代就找到最优路径。Dijkstra 算法是在计算了所有节点到起点的最短距离后获得的最优路径,因此迭代次数为 1 次。

3.3.2 不同火灾时期下改进蚁群算法仿真实验

火灾发展过程中,各项火灾产物参数随火灾的发展而变化。为验证火灾蔓延情况下改进蚁群算法的有效性,运用 Matlab 软件对 120、240、360 s 这 3 个火灾时期的疏散路径进行仿真实验对比。算法各参数不变,仿真结果如图 10~13 所示。



图 10 第 120 s 火灾疏散路径规划

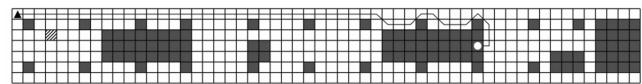


图 11 第 240 s 火灾疏散路径规划



图 12 第 360 s 火灾疏散路径规划

对比图 10~12 可以看出,3 个火灾时期的疏散路径的长度相近,由于站台两侧受火灾产物的影响较大,疏散路径常拐向受火灾产物影响较小的障碍物缺口处。但随着火灾的发展,疏散路径拐弯次数减少,疏散路径向障碍物缺口处转向次数由 3 次减少到 1 次,且只选择拐进远离火源的缺口处。这是因为火灾产物影响范围扩大,越靠近火源的缺口处的火灾产物对疏散人员的影响越大。图 13 是 3 个火灾时期的改进蚁群算法收敛曲线图。从图 13 中可以看出,在疏散时间上,随着火灾的蔓延,人员的疏散速度明显减慢,3 个火灾阶段疏散时

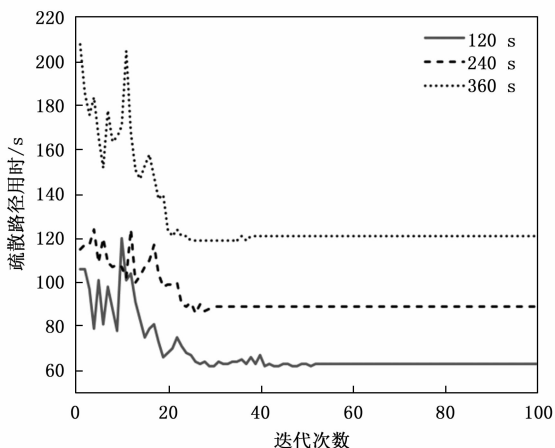


图 13 不同火灾时期路径规划收敛曲线

间分别为 64.01、88.63 和 121.81 s,这是因为火灾产生的物质逐渐增多,从而对疏散人员的影响程度不断加大,导致疏散时间增加。以上结果可知,改进蚁群算法可实现火灾疏散路线的动态规划。

4 结束语

本文考虑火灾产物的影响,通过 Dijkstra 算法规划疏散初始路径,引入火灾产物和当量速度系数对蚁群算法启发信息进行改进,用当量长度代替几何长度,提出了考虑火灾环境下的改进蚁群算法。以西安某地铁站台为例进行仿真分析,首先通过 Pyrosim 软件进行地铁站台火灾模拟实验,获取地铁站台内 20 个区域的可见度、CO 含量和温度动态参数,确定了 20 个区域的当量速度系数;其次建立地铁站台栅格地图,进行蚁群算法与改进蚁群算法仿真对比实验,改进蚁群算法获得的最优路径长度仅 92.5 m,比蚁群算法求解的长度少 19.4 m、迭代次数少 15 次。改进蚁群算法所规划路径短、收敛快,明显优于蚁群算法。

参考文献:

- [1] 张苏英,郭宝樑,赵国花,等. 基于改进蚁群算法的大型综合建筑火灾疏散路径规划 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19 (36): 258-264.
- [2] YAN W Y, WANG J H, JIANG J C. Subway fire cause analysis model based on system dynamics: a preliminary model framework [J]. Procedia Engineering, 2016, 135: 430-437.
- [3] DIJKSTRA E W. A note on two problems in connection with graphs [J]. Numerische Mathematics, 1959, 1 (1): 269-271.
- [4] HART P E, NILSSON N J, RAPHAEL B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths [J]. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, 1968, 4 (2): 100-107.

- [5] 张毅,代恩灿,罗元. 基于改进遗传算法的移动机器人路径规划[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (1): 313-316.
- [6] COLORNI A. Distributed optimization by ant colonies [C] // Proc. of the First European Conference on Artificial Life. The MIT Press, 1991.
- [7] 熊华捷,蔚保国,何成龙. 基于改进粒子群算法的 UAV 航迹规划方法[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (2): 144-147.
- [8] 陈秋莲,郑以君,蒋环宇,等. 基于神经网络改进粒子群算法的动态路径规划[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49 (2): 51-55.
- [9] 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.
- [10] 王钾,王慧琴,冯路佳. 基于量子蚁群算法的建筑消防疏散路径规划[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (7): 167-172.
- [11] SEO S K, YOON Y G, LEE J S, et al. Deep neural network-based optimization framework for safety evacuation route during toxic gas leak incidents [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 218: 108-102.
- [12] TANG Z H, XIE X W, CAI J J, et al. An optimization method of multi-objective evacuation path for off-site emergency under severe nuclear accidents [J]. Annals of Nuclear Energy, 2022, 174: 109170.
- [13] WANG F, WANG J, CHEN X W. Based on evacuation entropy ant colony evacuation path optimization model considering classified crowds [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 267 (5): 052026.
- [14] LIU M, ZHANG F, MA Y L, et al. Evacuation path optimization based on quantum ant colony algorithm [J]. Advanced Engineering Informatics, 2016, 30 (3): 259-267.
- [15] 叶继红,吕青青. 基于自适应蚁群算法的化工园区毒气泄漏事故疏散路径规划[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18 (12): 148-153.
- [16] 李涛,赵宏生. 基于进化蚁群算法的移动机器人路径优化[J]. 控制与决策, 2023, 38 (3): 612-620.
- [17] 姜雪,杨欢,张培红. 基于蚁群算法的商业步行街应急疏散决策优化[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31 (10): 144-151.
- [18] 王辉,朱龙彪,王景良,等. 基于 Dijkstra-蚁群算法的泊车系统路径规划研究[J]. 工程设计学报, 2016, 23 (5): 489-496.
- [19] 陈国华,梁旭,周利兴,等. 基于路网风险的化工园区疏散路径模型[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, 48 (8): 65-71.
- [20] 赵立财. 基于改进蚁群算法的室内疏散路径优化[J]. 消防科学与技术, 2021, 40 (7): 999-1003.
- [21] 曹祥红,李欣妍,魏晓鸽,等. 基于 Dijkstra-ACO 混合算法的应急疏散路径动态规划[J]. 电子与信息学报, 2020, 42 (6): 1502-1509.
- [22] 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, 2011.
- [23] JIN T. Irritating effects of fire smoke on visibility [J]. Fire Science and Technology, 1985, 5 (1): 1-12.
- [24] MILKE J A. Evaluating the early development of smoke hazard from fires in large spaces [J]. ASHRAE Transactions, 2000, 106 (1): 627-636.
- [25] 屈鸿,黄利伟,柯星. 动态环境下基于改进蚁群算法的机器人路径规划研究[J]. 电子科技大学学报, 2015, 44 (2): 260-265.
- [26] 周敬东,高伟周,杨文广,等. 基于改进蚁群算法的移动机器人路径规划[J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (28): 12484-12490.
- [27] 袁福龙,朱建平. 基于改进蚁群算法的移动机器人最优路径规划[J]. 现代制造工程, 2021 (7): 38-47.
- [28] 徐刚. 基于蚁群算法的机器人移动路径规划优化[J]. 九江学院学报(自然科学版), 2021, 36 (3): 68-70.
- [29] 陈永鸿,甘文杰,武蕾,等. 基于改进蚁群算法的古建筑群火灾疏散路径规划[J]. 科学技术与工程, 2023, 23 (13): 5662-5669.
- [20] LILLICRAP T P, HUNT J J, PRITZEL A. Continuous control with deep reinforcement learning [C] //4th International Conference on Learning Representations, 2016: 1-14.
- [21] SHI Q, LAM H K, XUAN C B. Adaptive neuro-fuzzy PID controller based on twin delayed deep deterministic policy gradient algorithm. Neurocomputing [J]. 2020, 402: 183-194.
- [22] FUJIMOTO S, VAN HOOFF H, MEGER D. Addressing function approximation error in actor-critic methods [C] //Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning, Stockholm: PMLR, 2018: 1587-1596.
- [23] XUE B, ZHANG M, BROWNE W N. Particle swarm optimization for feature selection in classification: a multi-objective approach [J]. IEEE Trans. Cybern, 2013, 43 (6): 1656-1671.