

文章编号:1005-0523(2018)06-0096-07

基于改进蚁群算法模型的三维火灾动态疏散策略

傅军栋,黄鹿鸣,刘武,陈俐

(华东交通大学电气与自动化学院,江西 南昌 330013)

摘要:提出了一种基于改进蚁群算法模型的三维火灾动态疏散策略,解决复杂建筑群体内发生火灾时存在的人员疏散问题。该方法首先使用栅格法对设计的建筑物进行三维环境建模;然后使用改进生物启发式蚁群算法对发生火灾时的疏散路线进行自动规划,得出最短的疏散路径;最后针对火情点动态扩散的特性,实时规划出最佳的人员疏散路线。该方法不仅对蚁群算法模型进行了改进,而且在算法中增加目标启发函数和回退策略,一定程度上缩短了路径搜索的时间和提高算法运行效率。仿真实验结果证明了该策略在三维火灾动态疏散的有效性。

关键词:火灾动态疏散;三维环境建模;改进生物启发式蚁群算法;火情点;疏散路线

中图分类号:TP399

文献标志码:A

随着社会的发展,大型场馆和大规模的集会变得越来越多,无论是建筑的结构和功能,还是人员的分布都逐渐变得复杂。在紧急状态下人员的疏散是未来智慧建筑^[1-2]发展的一个重要保证,尤其在火灾时周边环境的复杂性、火势蔓延的不可预知性以及人员疏散的盲目性,使得实时找出一条最为优化的路径指引人员疏散变得越来越重要^[3-5]。

目前,随着人工智能的发展,路径规划的主要方法有 Dijkstra 算法^[6],人工免疫算法^[7-8],神经网络算法以及蚁群算法等。Dijkstra 算法的基本思想是先计算点点之间的距离,然后依次计算各点到出发点的最短距离。人工免疫算法以模拟抗体的产生、抗体与抗原的粘合、激励、克隆等自然过程来实现路径的选择与规划。

近年来,广泛使用蚁群算法和神经网络算法来解决路径规划问题。文献[9]提出一种基于粒子群参数优化的改进蚁群算法,给出一种全局异步和精英策略相结合的信息素更新方式,极大的缩短了求解的搜索时间。但该算法仅考虑的是简单的 TSP 问题,未在路径规划中涉及到障碍物节点。文献[10]提出一种复杂环境下路径规划的改进蚁群算法,给出了新的信息素更新规则,提高了算法的全局搜索能力。文献[11]针对蚁群算法在求解过程中收敛速度慢且容易陷入局部最优,提出了建立信息素启发因子和期望启发因子的互锁关系。文献[10-11]都使用栅格法对机器人的搜索路径进行环境建模,使得机器人的搜索路线变得可观,但两者都只是针对静态障碍物且建立的都是二维环境模型。文献[12-14]建立在栅格法的基础上,全面阐述了三维空间模型的构建以及其运动节点领域模型的生成。文献[15]给出一种基于生物启发模型的三维路径规划和安全避障算法,很好的解决了自治水下机器人的路径规划问题。但该算法只介绍简单的障碍物自动规避,不能解决复杂环境中搜索陷入“死循环”以及指定必经节点的最短路径规划问题。

以上研究中,通过对算法参数和模型的改进,一定程度上缩短了路径搜索的时间和提高了算法的工作

收稿日期:2018-05-24

作者简介:傅军栋(1972—),男,副教授,研究方向为超智能控制。

效率;但对于选择最为优化的三维火灾疏散路径没有涉及。本文结合生物启发模型和模糊数学理论提出一条新的火灾动态疏散策略。该方法首先使用栅格法对人员在火灾疏散时所处的工作环境进行三维建模;其次,应用改进的生物启发式蚁群算法求解出静态的疏散路径;最后根据制定的火情蔓延范围确定人员逃生过程中所选择的实时最短疏散路径。

1 三维工作环境的构成

为了清晰的表述算法的工作原理,先对二维火灾疏散路径规划的平面环境模型进行阐述,然后上升为实际的三维空间模型。

1.1 二维火灾疏散环境模型

将火灾疏散的工作环境离散化为二维栅格地图,每个栅格的状态定义为“自由点”、“障碍物点”或“火情点”,如图 1(a)所示。在栅格图的基础上,建立与其运动相关的邻域模型。人体在疏散过程中的运动轨迹与地图上的栅格一一对应,如图 1(b)所示。人员处于栅格 i 时,其圆形区域内相邻的 8 个栅格为下一刻可选的疏散位置,具体疏散方向取决于两个栅格之间信息素浓度的大小以及启发函数值。

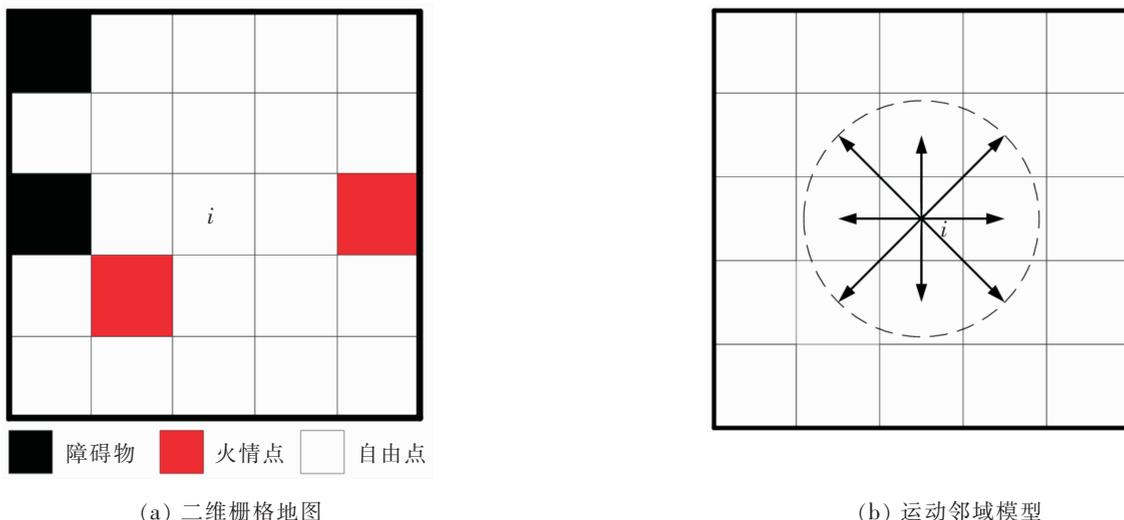


图 1 二维栅格环境模型
Fig.1 Two-dimensional grid environment model

1.2 三维火灾疏散环境模型

对于图 1 中的二维栅格模型,在垂直方向增加一维,即为实际的三维环境模型。将三维空间均匀划分成 $n \times n \times n$ 个等大小的单元,以栅格单元为路径规划中的最小移动单位。根据从左至右、从下至上的原则对每个栅格进行编号,每个栅格为 $1 \sim n^3$ 之间的唯一编码。每个栅格在三维空间模型中坐标都用其中心点位置来表示,其栅格序号与坐标位置对应关系由式(1)和式(2)决定。三维火灾疏散环境中,人员疏散时有 6 个运动自由度(上下、左右以及前后),其结构模型如图 2 所示。以 $n=3$ 模型为例,其最底层栅格编码和前向编码如表 1 所示。该模型中,人员活动区域共三层,非楼梯口位置时,下一个可能运动的位置仅在平面的 8 个位置;楼梯口位置时增加上下 2 个方向,邻域范围扩展为 10 个位置。其疏散方向与二维模型相同,取决于两个栅格之间信息素浓度大小以及启发函数值。

$$\begin{cases} x = \text{mod}(G-1, n) + 0.5 \\ y = f[\text{mod}(G-0.1, n^2)/n] + 0.5 \\ z = c(G/n^2) - 0.5 \end{cases} \quad (1)$$

$$G = (z-0.5) \times n^2 + (y-0.5) \times n + x + 0.5 \quad (2)$$

式中: G 称为三维模型中栅格序号; (x, y, z) 称为栅格 G 对应的三维坐标; f 为建筑楼层底端; c 为建筑楼层顶端。

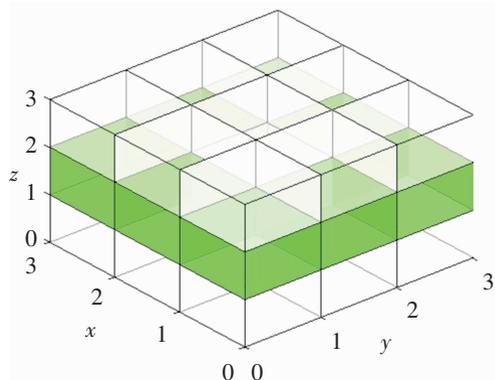


图2 三维火灾疏散环境模型

Fig.2 Three-dimensional fire evacuation environment model

表1 建筑栅格编号图

Tab.1 Building grid numbering chart

| 排序 | 最底层栅格 编号顺序图 | 前向栅格 编号顺序图 |
|----|----------------|---------------|
| 1 | 1-2-3 | 1-2-3 |
| 2 | 4-5-6 | 10-11-12 |
| 3 | 7-8-9 | 19-20-21 |

2 算法模型建立

发生火灾时,人员在疏散过程中不仅会遇到墙体、柱子等静态障碍物;还会随着火势的蔓延时刻遭遇动态火情点,人员需规避各静态和动态障碍物以最短的疏散路径到达出口位置。本文所提出的火灾动态疏散策略主要分成以下3个部分:①分析几大算法在疏散路径规划的特点;②对蚁群算法进行有针对性改良,从而求出静态火灾疏散路径;③根据制定火情蔓延范围确定人员逃生过程中所选择的实时最短疏散路径。

2.1 经典算法特点分析

针对最优的疏散路径的算法求解,主要分为传统算法与智能优化两大类,其中传统算法有 Dijkstra、A* 算法、Floyd 算法等,智能优化算法有蚁群算法、粒子群算法等。

Dijkstra 算法是作为传统算法寻找最安全最短路径的代表,具有 100%可寻到最优解、结构简单的特点,但缺点也是十分明显的,搜索效率低下、花费时间长,Samah Kafa 对 Dijkstra 算法进行改进^[6],提高了搜索速度,可还是不能掩盖其时间、空间高复杂度的问题。

神经网络算法近年在各领域都崭露头角,其优秀的自适应学习能力,可通过深度学习,不断优化疏散路径,最终得出最优解。由于需要大量路线学习样本,较为复杂,所以实现十分复杂,通用性差^[17]。

猫群算法与粒子群等算法皆为火灾路径疏散运用的较多的智能算法,与蚁群算法相同都是拟动物行为的仿生算法^[18-20],求解过程简便、易于实现,是现代紧急疏散路径规划问题求解的主要工具主要原因,但存在收敛速度、搜索速度和易陷入“死循环”等缺点。

2.2 改进生物启发式蚁群算法

早期的蚁群算法模型由 Marco Dorigo 等得出,用蚂蚁的行走路径来表述待优化问题的可行解,整个蚂蚁群体的所有路径构成待优化问题的解空间。路径较短的蚂蚁释放的信息素量较多,随着时间的推移,较短的路径上累积的信息素浓度逐渐增高,进行蚂蚁会集中在路径较短的线路中。主要应用于求解旅行商问题^[21-23]、运输调度问题^[24-25]和指派问题^[26-27]等方面。

本文针对普通蚁群算法所存在的搜索速度慢、易陷入“死循环”等缺陷,提出了目标启发函数和回退策略等改进方案。

1) 目标启发函数。通常情况下,定义启发函数 $\eta_{ij}=1/d_{ij}$,如此会导致蚂蚁寻径过程中只看重眼前较短的路径而忽略与目标节点之间的距离,减缓了蚂蚁的搜索速度。针对这种情况,启发函数做如下改进

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij} + d_{jd}} \\ d_{jd} = \sqrt{(x_j - x_d)^2 + (y_j - y_d)^2} \end{array} \right. \quad (3)$$

其中: η_{ij} 称为目标启发函数; d_{jd} 称为j点到目标节点之间的距离。本算法从全局规划角度考虑,对于存在多

个节点路径规划问题,选择全长路径最短的规划路线。

2) 回退策略。一些复杂的障碍物环境中,蚂蚁寻优过程可能会陷入死循环,如图 3 所示。当蚂蚁进入栅格 22 时,不能向周围的栅格移动,火灾疏散陷入“死循环”。为解决陷阱问题,本文使用一种蚂蚁回退策略。首先,蚂蚁 k 处于节点 22 时无后续节点可选,将节点 22 添加到禁忌表中;然后蚂蚁 k 从节点 22 回退至 16 仍陷入死循环,再将节点 16 添加至禁忌表中;最后蚂蚁 k 回退至 4,重新选择节点 3 或 5 作为后续节点,则蚂蚁 k 跳出死循环。

2.3 火灾疏散路径决策设计

将人体在火灾时的疏散路径离散化,三维的路径规划问题转变为人体在逃生时选择的下一个行驶位置。结合火灾发生时产生的动态火情点和建筑物内的固定障碍点,综合决策出人体在逃生时选择的下一个行驶位置。首先计算出人体当前所处时刻与领域内各个节点之间距离,然后根据轮盘赌原则选择下一步行驶位置。轮盘赌原则主要是通过比较随机概率与转移概率之间的大小进行判断,进行转化为求目标启发函数值

$$P = \{P_n | \eta_{pn} = \max \{ \eta_{ij} | 0 < |d_{ij}| \leq \sqrt{3} \}, P_p = P_c, P_c = P_n \} \quad (4)$$

式中: P 称为疏散路径集合; P_c, P_p, P_n 分别称为人体运动的当前位置,前一时刻位置和下一时刻位置。

为简化模型,本文做如下假设:

- 假设 1 人员的年龄、性别对疏散均无影响且身体健康状况良好;
- 假设 2 在无阻碍情况下,人员的奔跑速度一致且为匀速;
- 假设 3 上层楼梯到下层楼梯之间距离为层高;
- 假设 4 把人体在运动过程中看成质点。

3 仿真实验分析

本文以某省电力通信大楼为例,共 6 层,其层高为 3 m,为标准办公建筑。火灾发生于电梯前室,该实验旨在制定出相邻办公区人员疏散路线。

3.1 仿真实验环境与初始化

在三维火灾疏散环境中,人员有 6 个运动自由度,基于对人员的假设,实验仿真环境是 18 m×18 m×18 m (长、宽、高)的三维立体环境,栅格化后是 6×6×6 的三维栅格地图环境,每个栅格大小为 3 m×3 m×3 m,其中高度 3 m 为层高,共 216 个栅格。模型的控制参数设置为:群体数量 $m=50$,信息素启发因子 $\alpha=1$,期望启发因子 $\beta=5$,信息素蒸发因子 $\rho=0.5$,最大迭代次数 $I=50$,信息素强度 $Q=5$ 。

3.2 静态火灾环境下路径规划

基于改进生物启发式蚁群算法模型,在 Matlab 中仿真出人员疏散时处于动态火灾环境下的全局路径规划效果图如图 4 所示。起始节点 $S=211$,目标节点 $D=35$,其中 S 为发生火灾时六层人员所处位置点, D 为底层楼梯位置点。人员从起点运动楼梯口、电梯口等疏散出口位置时需要避开静态障碍物和动态障碍物。其顶层静态障碍物点有栅格点 199、201、202、207、213,火情点有栅格点 203。非楼梯口位置时人体只能在本层疏散,下一刻到达的位置可能有相邻的 8 个位置;楼梯口位置时,人体只能往下和相邻 8 个位置,共 9 个位置。

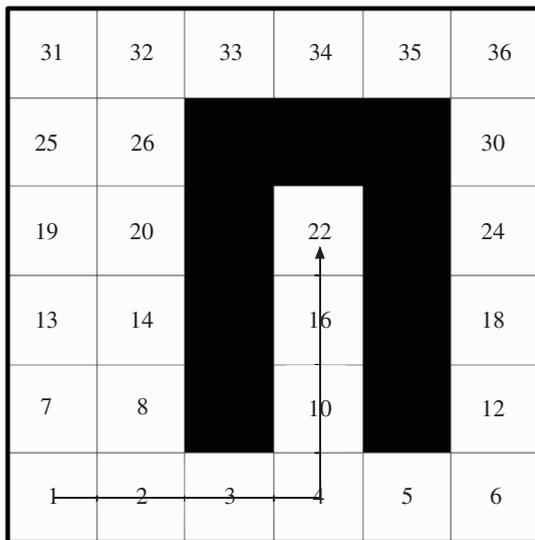


图 3 蚂蚁寻优陷入死循环示意图
Fig.3 Ant searching for the best in the dead loop sketch

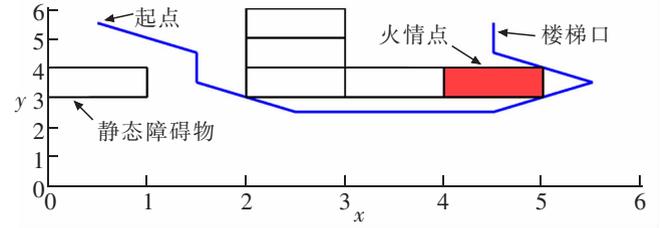
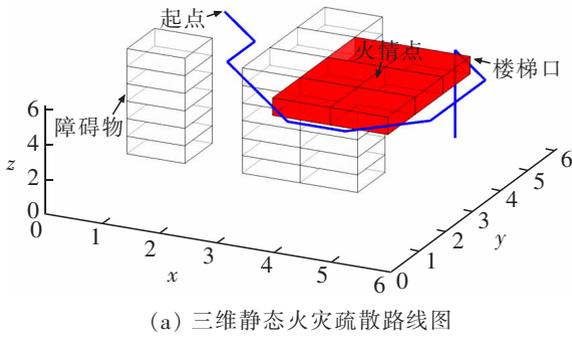


图4 静态火灾疏散路线图

Fig.4 Static fire evacuation route map

3.3 动态火灾环境下路径规划

随着火势的蔓延,火情点的范围扩散至栅格点 196、197、202、203、208、209 六个位置,在此火灾环境下,其动态火灾疏散路径如图 5 所示。

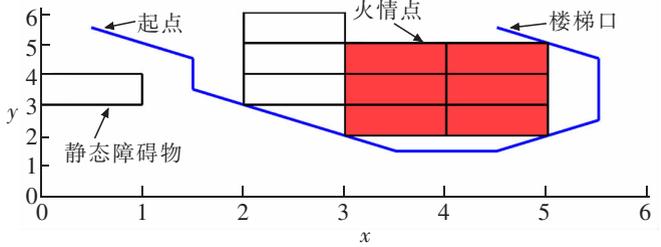
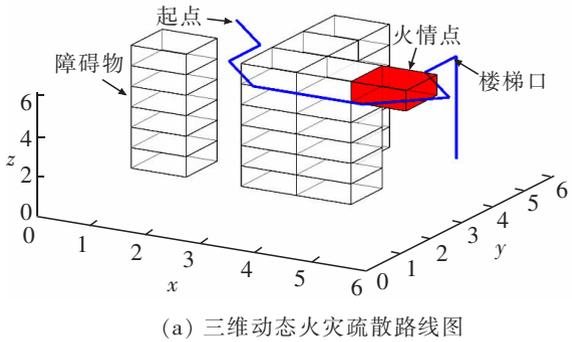


图5 动态火灾疏散路线图

Fig.5 Dynamic fire evacuation route map

表2 2种状态下疏散路径总长度

Tab.2 Total length of evacuation path in two situations

| 疏散方案 | 火灾疏散路线 | 路径总长度/m |
|------|---|---------|
| 静态 | (211,206,200,195,196,197,204,209,215,179,143,107,71,35) | 14.657 |
| 动态 | (211,206,200,195,190,191,198,204,210,215,179,143,107,71,35) | 16.071 |

从上述图形和表格所知,使用改进后的蚁群优化模型与障碍规避算法,以三维的视角较好的解决了建筑物中火灾发生的人员疏散问题,为建筑智能化发展提供一定思路。对于一层出现 2 个或多个出口位置的火灾现场,该算法会从 n 条疏散路径中选择出一条最佳的疏散路线。

4 结论

本文提出的基于改进蚁群算法模型的三维火灾动态疏散策略,对火灾时的疏散路线进行优化选择。文中在对实际工程构建三维环境模型的基础上,对该方法进行实用性验证。仿真结果表明,本文方法的特点在于:

- 1) 使用栅格法对火灾疏散环境进行空间建模,将传统的二维空间模型上升为三维,让人员在逃生时疏散路线变得更加形象、可观。
- 2) 对传统的生物启发式蚁群算法进行改进,于模型中增加目标启发函数和回退策略,极大的缩短了程

序的运行时间;并将其应用于火灾人员疏散,为人员逃生提供最短的疏散路线。

3) 将火灾发生的情形由静态转化为动态,从实际情况出发,实时制定出最佳的三维火灾动态疏散路线。

参考文献:

- [1] 任红,董艺,韦洁,等. "智慧建筑"理念在现代建筑中应用的探讨[J]. 智能建筑电气技术,2017,11(1):11-16.
- [2] MARK DEAKIN, HUSAM AL WAER. From intelligent to smart cities[J]. *Intelligent Buildings International*, 2011, 3(3):140-152.
- [3] 董崇杰,刘毅,彭勇. 改进布谷鸟算法在人群疏散多目标优化中的应用[J]. 系统仿真学报,2016,28(5):1063-1069.
- [4] 张学锋,张成俊,白晨曦,等. 基于智能体技术的多重灾难人员疏散感知模型[J]. 系统仿真学报,2016,28(3):534-541.
- [5] 赵薇. 智能疏散指示标志诱导系统优化设计与人流控制研究[J]. 中国安全科学学报,2016,26(5):169-174.
- [6] 郑贵林,张丽. 基于智能负荷控制器的建筑电气优化布线研究[J]. 武汉大学学报:工学版,2015,48(3):417-423.
- [7] 郑蕊蕊,赵继印,赵婷婷,等. 基于遗传支持向量机和灰色人工免疫算法的电力变压器故障诊断[J]. 中国电机工程学报,2011(7):56-63.
- [8] 周文明,张年松,杜凯. 基于改进克隆选择的移动机器人路径规划[J]. 信息技术,2017(1):149-153.
- [9] 李擎,张超,陈鹏,等. 一种基于粒子群参数优化的改进蚁群算法[J]. 控制与决策,2013,28(6):873-878.
- [10] 刘锴,游晓明,刘升. 复杂环境移动机器人路径规划的改进蚁群算法[J]. 计算机工程与应用,2016,52(13):60-63.
- [11] 傅军栋,刘业辉,李江辉. 基于蚁群算法的火灾动态疏散[J]. 华东交通大学学报,2017,34(3):118-124.
- [12] 胡中华,赵敏,姚敏. 基于栅格模型及双层规划的无人机三维协同轮流攻击航迹规划[J]. 中国电机工程学报,2011,31(36):162-167.
- [13] 安聪荣,刘展,黄荣附,等. 基于三维栅格模型的最短距离等值面提取[J]. 计算机工程,2011,37(8):7-9.
- [14] 吴玉香,王超. 一种改进的移动机器人三维路径规划方法[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2016,44(9):53-60.
- [15] 朱大奇,孙兵,李利. 基于生物启发模型的 AUV 三维自主路径规划与安全避障算法[J]. 控制与决策,2015,30(5):798-806.
- [16] SAMAH K, HUSSIN B, BASARI A S H. Modification of Dijkstra's algorithm for safest and shortest path during emergency evacuation[J]. *Applied Mathematical Sciences*, 2015, 9:1531-1541.
- [17] 李志强,胡晓峰,杨雪生,等. 虚拟环境中大规模群体行为建模研究进展[J]. 计算机工程与应用,2008,44(8):45-48.
- [18] 林秋怡,汪洁. 基于粒子群优化小波神经网络的大型商场应急疏散能力评价仿真分析[J]. 辽宁科技学院学报,2018,20(1):20-21+51.
- [19] 朱宝. 基于改进粒子群算法的大型公共建筑人员快速高效疏散研究[J]. 太原学院学报:自然科学版,2017,35(2):1-4.
- [20] 许凯波,鲁海燕,程毕芸,等. 求解 TSP 的改进信息素二次更新与局部优化蚁群算法[J]. 计算机应用,2017,37(6):1686-1691.
- [21] 杨进,郑允,马良. 改进的猫群算法求解 TSP[J]. 计算机应用研究,2017,34(12):3607-3610.
- [22] YANG J, DING R, ZHANG Y, et al. An improved ant colony optimization (I-ACO) method for the quasi travelling salesman problem (Quasi-TSP)[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2015, 29(9):1534-1551.
- [23] MAVROVOUNIOTIS M, MULLER F M, YANG S. Ant colony optimization with local search for dynamic traveling salesman problems[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2017, 47(7):1743-1756.
- [24] 陈冬华. 旅行商问题推广及其混合智能算法[J]. 华东交通大学学报,2011,28(2):102-106.
- [25] SAIDI M M, DEHNAVI A S, EVAZABADIAN F, et al. An Ant Colony Algorithm(ACA) for solving the new integrated model of job shop scheduling and conflict-free routing of AGVs[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2015, 86(C):2-13.
- [26] ZHAO B, GAO J, CHEN K, et al. Two-generation Pareto ant colony algorithm for multi-objective job shop scheduling problem with alternative process plans and unrelated parallel machines[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2018, 29(1):93-108.
- [27] LIN Y C, CLAUB M, MIDDENDORF M. Simple probabilistic population-based optimization[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2016, 20(2):245-262.
- [28] TOSUN U. On the performance of parallel hybrid algorithms for the solution of the quadratic assignment problem[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2015, 39:267-278.

Three-Dimensional Dynamic Fire Evacuation Strategy Based on Improved Ant Colony Algorithm Model

Fu Jundong, Huang Luming, Liu Wu, Chen Li

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The 3-D dynamic fire evacuation strategy based on the improved ant colony algorithm was proposed in this paper to solve the issue of emergency evacuation when fires occur in complex buildings. Firstly, the grid method was adopted to establish 3-D environment model for the designed building. Then, by using the improved bio-heuristic ant colony algorithm, evacuation routes were automatically mapped out to obtain the shortest evacuation route. Finally, the best evacuation route was planned according to the dynamic diffusion characteristics of fire points. This approach not only improved the ant colony algorithm model, but also added the target heuristic function and fallback strategy, which, to a certain degree, shortens the time of path searching and improves the efficiency of the algorithm. The simulation results show that this strategy is effective in terms of 3-D fire evacuation.

Key words: dynamic fire evacuation; modeling of 3-D environment; improved bio-heuristic ant colony algorithm; fire point; evacuation route