

文章编号:1005-0523(2017)03-0118-07

基于蚁群算法的火灾动态疏散

傅军栋,刘业辉,李江辉

(华东交通大学电气与自动化工程学院,江西 南昌 330013)

摘要:随着社会的快速发展及城市人口的迅速增长,高层建筑越来越多,而当高层建筑发生火灾时,人员的安全和财产可能造成重大损失,设计出合理的动态疏散方案显得极其重要。结合某商场的工程实例,通过改善的蚁群算法规划出最佳的疏散路线,将平面疏散与垂直疏散融合,提出了三维疏散的方案。结合实例静态环境与动态环境下运算结果表明本文研究的火灾动态疏散蚁群算法在大型商场环境中具有有效躲避动态障碍物(火灾产物)的优点,可以实现合理的路径规划和安全疏散,为动态疏散指示系统的设计提供更加有效的疏散路径。

关键词:动态疏散;蚁群算法;路径规划;安全疏散

中图分类号:TP18

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2017.03.018

随着社会经济快速发展,现代大型建筑为了满足人们日益增长的生活需求,不同建筑区域划分及功能要求各不相同,使得建筑物内部结构复杂、通道迂回,由此带来的消防隐患不容忽视。传统固定路线的消防疏散指示系统已经不再适合当前的大型建筑结构,并可能在最危急的时刻将人们引向错误的逃生路径。为了能在发生火灾时快速有效地疏散人员,安全疏散技术的研究十分关键^[1]。

目前,蚁群算法应用在旅行商(TSP)问题^[2]以及机器人路径规划^[3]等领域比较多,旅行商问题表示给定 n 个城市,有一个旅行商从某一城市出发,访问每个城市各一次再回到原出发城市,找出巡回路径最短的问题。文献[2]就是用蚁群算法对旅行商(TSP)问题进行求解,而文献[3]讨论了蚁群算法的人员疏散,将蚁群算法应用到人员疏散逃生中,就是对传统的旅行商问题进行改进,但是并没有考虑到真实火灾中火灾产物对人员疏散的影响。文献[4]以及文献[5]研究了机器人路径规划的二维空间疏散,大多考虑静态障碍物,没有考虑动态障碍物,建立栅格环境时,没有实际分析建筑物内部结构的特点。鉴于上面所述,本文通过某商场实例工程的设计,根据5层平面图的防火分区进行粗划分,再根据就近疏散原则^[6]进行细划工作区域的新思路,建立栅格环境进行平面疏散,把二维空间上升到三维空间,采用三维路径显示和三维建筑物场景相结合^[7],并且把火灾现场探测到的烟雾浓度、温度、CO浓度综合考虑到蚁群算法中,搜索疏散的最优路径,发生火灾时结合动态疏散和静态疏散,更加符合实际,从而达到安全疏散的目的。

1 算法模型的建立

1.1 二维栅格地图的建立

本文提出的火灾动态疏散是在平面上利用蚁群算法在二维栅格地图的基础上实现二维空间疏散,根据实例工程,分析其建筑内部结构,采用栅格标识法建立二维地图,每个网格表示一个栅格。地图表示的精度跟栅格粒度成正比,根据工作区域的大小确定栅格粒度的大小。栅格标识可采用下述两种表示方法:

收稿日期:2016-12-31

作者简介:傅军栋(1972—),男,副教授,研究生导师,主要研究方向为电力系统、建筑电气及智能化研究。

通讯作者:刘业辉(1993—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统及其自动化。

1) 直角坐标法。以栅格阵左上角为坐标原点,水平向右为 x 轴正方向,竖直向下为 y 轴正方向,每一栅格区间对应坐标轴的一个单位面积。任一栅格均可用直角坐标 (x, y) 唯一标识。

2) 序号法。按从左到右,从上到下的顺序,从栅格阵左上角第一个栅格开始,给每一个栅格一个序号 n (从1开始计),则序号 n 与栅格块一一对应。在栅格地图中,若某个栅格的8个方向都是无障碍的普通栅格,则人员运动的方向分为8个方位。

结合动态疏散的特点,采用序号法更容易表示最佳疏散路径,有利于简化算法。本文以某商场第5层的平面图作为实例分析,其平面图如图1所示。

当发生火灾时,与发生火灾区域相邻防火分区的防火卷帘门必须全部关闭,因此图1将被划分为3块区域:5A,5B,5C。根据动态疏散的安全疏散和就近疏散原则^[7],5A区3个楼梯通道,可细化为3个区域:5A1,5A2,5A3;5B区3个楼梯通道,可细化为3个区域:5B1,5B2,5B3;5C区有4个楼梯通道,故可细化为4个区域:5C1,5C2,5C3,5C4,整个区域划分如图2所示。

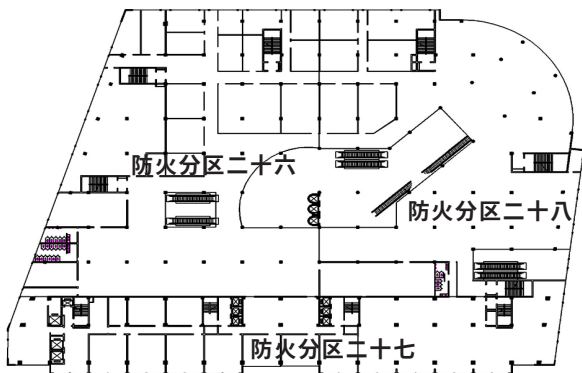


图1 某商场第5层平面图

Fig.1 Five floor plan of a shopping mall

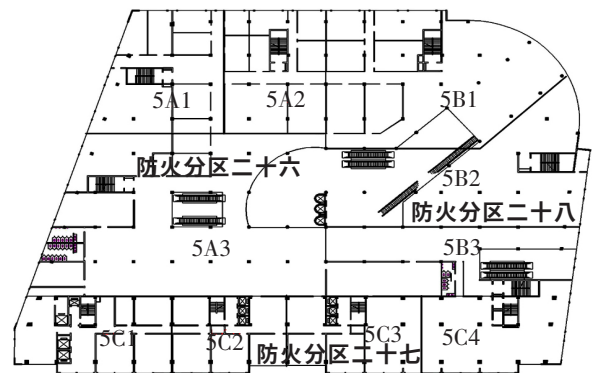


图2 某商场第5层规划平面图

Fig.2 Five floor plan of a shopping mall

在建立栅格环境模型时,将其物理平面与栅格图相对应,在算法中定义 G 表示栅格地图矩阵;0表示可通行节点;1表示静态障碍节点即不能通行的节点,如墙壁或者其他障碍物;2表示动态障碍节点即火灾发生时由于烟雾浓度、温度、CO浓度较高影响通行的节点;3表示安全出口节点;4表示起始节点。在火灾发展过程中,可通行节点随着火势的变化可能变成动态障碍节点。

栅格定义的原则:①每个房间区域房间门为通行节点,用白色栅格表示,房间内均设为静态障碍节点,用黑色栅格表示;②防火卷帘门会在第一时间封闭自动扶梯,因此也设为静态障碍节点,用黑色栅格表示;③消防电梯是为消防人员救人和灭火专用的电梯,不能作为普通人员疏散通道,也设为静态障碍节点,用黑色栅格表示;④动态障碍节点用红色栅格表示;⑤安全出口节点用绿色栅格表示;⑥起始节点用蓝色栅格表示。

1.2 三维疏散路径分析

当楼梯间发生火灾时,如果探测器探测到走廊某一处发生火灾,则必然该处不能作为逃生路线,本文引用的某商场走廊宽度为2m,刚好占用两个栅格,无论火势大小,发生火灾处两个栅格都用红色栅格表示,表示此处不能作为逃生节点;楼梯间发生火灾时,此楼梯间就不能作为垂直疏散的疏散节点,安全出口节点将变为动态障碍节点。将楼层数设为 m ,各层出口设为 n ,建立矩阵,根据火情得出可以疏散的可能路径,结合每层以安全出口做的平面疏散方案,可以得到三维疏散方案。

1.3 蚁群算法的建立

1.3.1 动态疏散蚁群算法的相关描述

蚁群算法是模拟自然界蚁群觅食寻路过程最短路径搜索的原理,而建立的一种新型优化算法。蚁群算

法的实现,通过人工蚂蚁模拟蚁群行为,使其和自然界的蚁群一样有共同的目标,有相互协作的正反馈机制等。本文是综合旅行商(TSP)问题和机器人路径规划问题的应用^[8],即蚁群算法应用到火灾的动态疏散。蚁群觅食过程通过信息素进行交流,能很好地实现信息的正反馈作用,蚂蚁之间的信息互通与火灾情况疏散时人员疏散的相互协作行为具有相似性,因此,利用蚁群算法进行人员疏散的路径寻优是比较合适的。在没有发生火灾即静态环境下,不用考虑火灾的影响,利用蚁群算法运算出的最佳路线就是躲避静态障碍物后的最短路径;在发生火灾时的动态疏散过程中,针对引言部分一些文献提出的不足之处,本文考虑到火灾产物的影响。蚁群算法的改进之处:考虑烟雾浓度、温度、CO 浓度的影响,计算疏散通道的当量长度,改善期望启发函数的表达式。

1) 火灾产物影响系数。分别引入火灾现场烟雾浓度、温度、CO 浓度对疏散的影响系数 $f_{ij}(\rho_v)$, $f_{ij}(T)$, $f_{ij}(CO)$, 从而计算影响人员行动的火灾产物影响系数 $M_{ij}(T)$ 。

$$M_{ij}(t) = f_{ij}(\rho_v) \times f_{ij}(T) \times f_{ij}(CO) \quad (1)$$

2) 几何长度。任意栅格间几何长度指两栅格间的直线长度,记作 $L(g_i, g_j)$ 或 $L(p(x_i, y_i), p(x_j, y_j))$ 。 $L(g_i, g_j)$ 由公式(2)确定:

$$L(g_i, g_j) = \sqrt{(x_i^2 - x_j^2) + (y_i^2 - y_j^2)} \quad (2)$$

式中: g_i, g_j 分别表示第 i 和第 j 个栅格; $p(x_i, y_i), p(x_j, y_j)$ 分别表示 g_i, g_j 的直角坐标。

3) 当量长度。由于疏散通道的火场产物对人员疏散的影响,几何空间上最短的疏散路径并不等于疏散时间最短的路径,考虑火灾产物的影响,疏散通道的当量长度 $D_{ij}(t)$ 可表示如下。

$$M_{ij}(t) = M_{ij}(t) \times L_{ij} \quad (3)$$

式中: $M_{ij}(t)$ 为 t 时刻在火灾环境下疏散人员的活动性指数; L_{ij} 是第 i 个栅格和第 j 个栅格之间的几何长度, m。

4) 期望启发函数。传统蚁群算法中的启发式信息函数 $\eta_{ij}(t)$ 表示路径上的启发信息对蚂蚁选择路径的影响程度,而在人员火灾动态疏散中,函数 $\eta_{ij}(t)$ 也是表示疏散人员从当前节点向下一个节点转移的启发程度,而本论文中上面所述的当量长度代替传统的几何长度,则表达式可表示:

$$\eta_{ij}(t) = \frac{1}{M_{ij}(t) \times L_{ij}} \quad (4)$$

由公式(4)可知, $\eta_{ij}(t)$ 与 $M_{ij}(t)$ 和 L_{ij} 成反比关系,当没有发生火灾时, $M_{ij}(t) = 1$, 当发生火灾时,随着火灾的不断增大, $M_{ij}(t)$ 值也不断增大,所以选择下一栅格时,倾向于选择当量长度更短的栅格。

1.3.2 动态疏散蚁群算法的实现流程

根据动态疏散的蚁群算法的数学模型,分析其算法的具体流程步骤。首先对建筑内部结构分析,把建筑平面图细化为多个工作区域,建立二维栅格环境,初始化节点的静态、动态属性,初始化参数后,计算当量长度矩阵,启动迭代,在禁忌表、路径选择策略、信息素更新策略的约束条件下搜索最佳疏散路线,直到找到安全出口,输出最优路径。具体实现步骤如下:

第 1 步:本算法相关参数初始化,设置蚂蚁个数 $m=30$,表征信息素重要程度的参数 $Alpha=1$,表征启发式因子重要程度的参数 $Beta=5$,信息素蒸发系数 $Rho=0.5$,最大迭代次数 $NC_max=50$,信息素增加强度系数 $Q=15$,初始烟雾浓度矩阵 $Rhoy$,初始温度矩阵 T ,初始 CO 浓度矩阵 $Rhoy$,初始信息素矩阵 Tau 、禁忌表 $Tabu$ 。

第 2 步:启动迭代,设置好起始点,将 m 只蚂蚁放在起始节点上。

第 3 步:选择下一节点,在邻接矩阵中找出与当前栅格相邻的自由栅格,根据轮盘赌选择策略选择下一个要经过的栅格,并更新禁忌表 $Tabu$ 。

第 4 步:记录本次迭代路线和长度,判断是否到达安全出口,若达到就记录本次迭代路线和长度,更新

信息矩阵 Tau 、启发因子信息 $Beta$,每次迭代结束后清空禁忌表 $Tabu$,以用于下一次迭代时记录存储路径;否则返回第 3 步。

第 5 步:输出最佳疏散路线图,判断是否满足最大迭代次数,若满足则获得最佳疏散路线,输出最佳疏散路线图和收敛曲线图,否则,返回第 2 步。

2 算法的仿真

2.1 仿真实验环境与初始化

在建筑内部结构的室内环境中,采用二维栅格环境建模,本文针对前面所建立的 5A3 区域的栅格环境进行仿真,实验仿真环境是 $50\text{ m}\times 50\text{ m}$ 的二维环境,栅格化后是 50×50 的二维栅格地图环境,设置每个栅格的大小 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$,共 2 500 个栅格,栅格地图的原始坐标为 $(0,0)$ 。初始化改善的蚁群算法的参数,本文的参数设置为:取蚂蚁个数 $m=30$,表征信息素重要程度的参数 $Alpha=1$,启发式因子 $Beta=5$,最大迭代次数 $NC_{\max}=50$,信息素挥发因子 $Rho=0.5$,信息素增加强度系数 $Q=15$ 。

2.2 静态环境下静态疏散

静态环境表示在没有发生火灾的情况下,根据就近疏散原则,每个防火分区的人员进行疏散时,找到最近的楼梯通道进行疏散,所以在模拟仿真实验时,蚁群算法运算的结果表示通向最近楼梯通道的最短路径,也就是正常状态下的疏散指示路径。5A3 区域的静态疏散路线如表 1 所示。

表 1 静态疏散路线表
Tab.1 Static evacuation route table

最短路线	最短路线长度/m
1314,1265,1216,1167,1118,1069,1020,971,921,872,822,772,722,672,622,572,522,472,422,371	20.219 0

2.3 动态环境下的动态疏散

动态环境表示发生火灾时,烟雾浓度、温度、CO 浓度随着火势的增大而不断变化,本文设计时大致分为 3 个阶段:起始阶段,增长阶段,蔓延阶段。参考《建筑消防与安防》^[9]可知,在大型商场中容易起火的是存放可燃物品的仓库,也就是图中的 5C1 区域中的仓库,依据就近疏散原则,把 5C1 区域再次划分为 5C11,5C12,建立栅格环境时使其简单化。

位于 5C11 区域的仓库发生火灾时有两个门 M1,M2 可以逃生,5S1 表示楼梯口,蓝色方块表示待疏散人员的出发点。

1) 第 1 阶段,火灾起始阶段。在火灾初期,获得火灾警报后,开始疏散人员,此时火灾产物对人员移动速度的影响几乎考虑不计,设定起火位置领域的温度、一氧化碳浓度和烟雾浓度较高的区域为动态障碍节点。疏散人员必须绕过静态和动态障碍节点,经过 M1 到达最近的疏散楼梯通道,运算结果如图 3 和表 2。

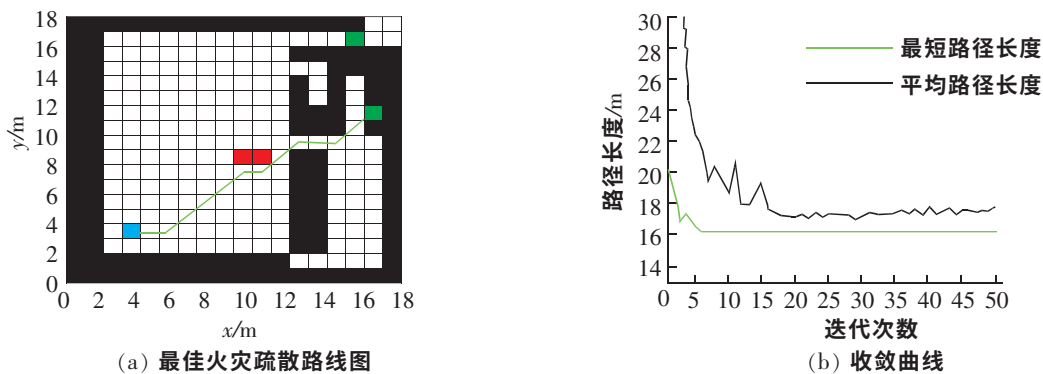


图 3 火灾初期最佳疏散路线图
Fig.3 Optimal evacuation route in the early stage of fire

表 2 火灾初期疏散路线表
Tab.2 Early fire evacuation route table

最佳疏散路线	最佳疏散路线长度/m
256, 257, 258, 241, 224, 207, 190, 191, 174, 157, 158, 159, 142, 125	16.313 7

2) 第 2 阶段,火灾增长初期。火势逐渐向四周扩散,导致部分通道无法通行,火灾产物对疏散人员的影响逐步增大,根据火场的温度、一氧化碳浓度和烟雾浓度更新设置动态障碍节点。在给定的火灾产物影响参数下,疏散人员绕过静态和动态障碍节点,经过 M1 到达疏散楼梯通道,运算结果如图 4 和表 3。

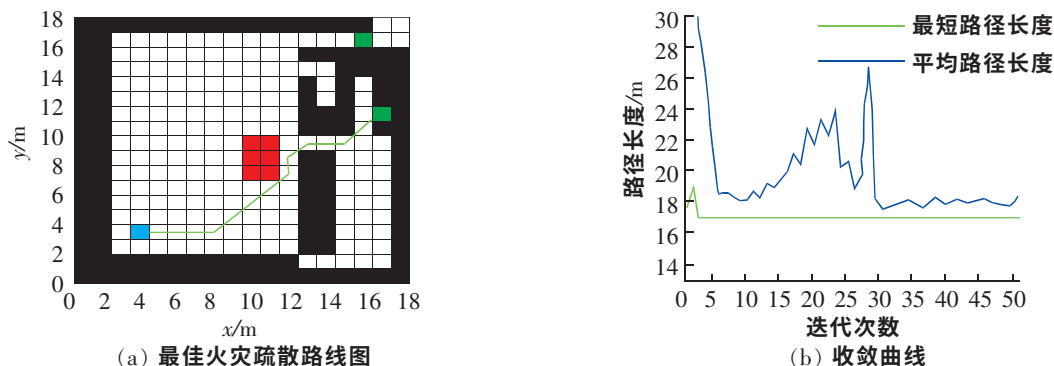


图 4 火灾增长阶段最佳疏散路线图

Fig.4 Optimal evacuation route map for fire growth phase

表 3 火灾增长阶段疏散路线表
Tab.3 Fire growth stage evacuation route table

最佳疏散路线	最佳疏散路线长度/m
256, 257, 258, 259, 260, 243, 226, 209, 192, 174, 157, 158, 159, 142, 125	16.899 6

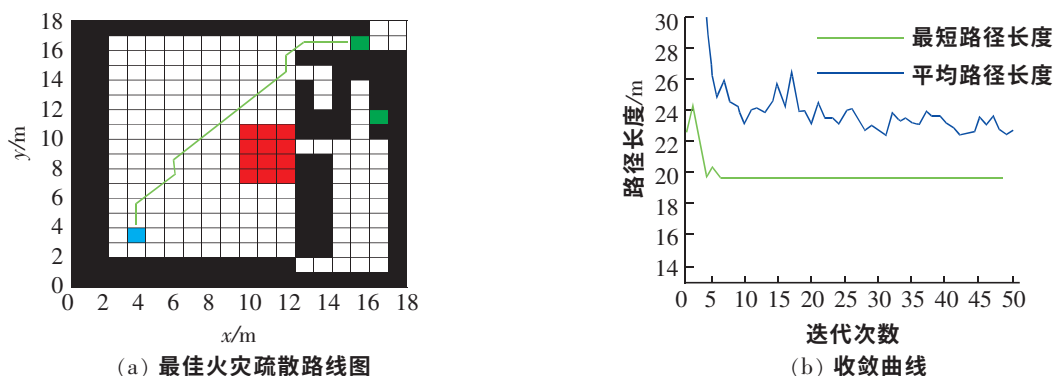


图 5 火灾蔓延阶段最佳疏散路线图

Fig.5 Optimal evacuation route map at the fire spread stage

3) 第 3 阶段,火势迅速蔓延阶段。随着火灾的继续增长,火势开始向多个方向蔓延,火灾产物对疏散人员的影响继续增大,根据火场的温度、一氧化碳浓度和烟雾浓度更新设置动态障碍节点。在给定的火灾产物影响参数下,由于 M1 已经被火灾产物完全遮挡,所以只能通过 M2,本论文设置 5C11 区域 M2(安全出口)与 5A3 区域起始节点(蓝色栅格)一致,故结合 5A3 区域的静态疏散路线,最后到达安全疏散楼梯通道,运算的结果如图 5 和表 4。

表4 火灾蔓延阶段疏散路线表
Tab.4 Fire spread stage evacuation route table

	最佳疏散路线	最佳疏散路线长度/m
5C11	256,238,220,203,186,168,151,134,117,100,83,48,31,32,33,34	19.728 0
5A3	1314,1265,1216,1167,1118,1069,1020,971,921,872,822,772,722,672,622,572,522,472,422,371	20.219 0

上面所做只是 5C11 区域发生火灾时的平面疏散,因此进一步对其做到三维空间的疏散,根据前面的三维疏散路径分析,由于实例中每层平面图有 3 个防火分区,因此分别建立矩阵 $A_{m \times n}, B_{m \times n}, C_{m \times n}$,其中 m 表示楼层, n 表示出口,矩阵中的元素用 0 或 1 表示,0 表示安全出口节点,1 表示动态障碍节点。找出矩阵中所有的 0 元素,可以得到不同的垂直疏散方案,从中找到最佳垂直疏散路径,结合每层以安全出口做的最佳平面疏散路径,从而得到最佳三维疏散方案。

3 运算结果分析

通过对静态环境和动态环境的运算结果分析可知,当突然发生火灾时,根据避障原理,能够有效绕着火点,表明本文所用的改进蚁群算法在某商场动态疏散具有良好的实用价值;通过对动态环境下的 3 种情况分析可知,在不同情况下,虽然设定的起始点和终点(安全出口)一致,但随着火势的发展,烟雾浓度、温度、CO 浓度不断增大,疏散的路径会根据其影响动态改变,虽然当量长度有可能增加,但可以有效保护人身安全,得到合理可靠的疏散路径,达到智能疏散的目的。

4 结论

1) 把第 5 层复杂的平面图根据 GB50016—2014 规范^[10]划分为多个工作区域,构建二维栅格地图,在其基础上通过改善的蚁群算法,使得该算法能够更好地根据火场的实际情况进行动态疏散。

2) 本文易发生火灾的区域是 5C11 区域中的仓库,在火灾发生的第 3 阶段的平面疏散中结合 5C11 区域动态疏散和 5A3 区域的静态疏散,使得疏散更加合理有效、更加贴近真实情况。

3) 最后融合平面疏散和垂直疏散,把二维空间疏散提升到三维空间疏散,使得本文的火灾动态疏散实际化、人性化、智能化,为以后的智能疏散指示系统设计提供合理有效的三维疏散方案。

参考文献:

- [1] 李强. 智能疏散逃生系统应用简介[J]. 新安全东方消防, 2009, 30(2): 72-74.
- [2] 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(10): 1729-1736.
- [3] 陈庆全,张栋楠,张永平. 基于蚁群算法的动态人员疏散模拟[J]. 微计算机信息, 2012, 10: 424-426.
- [4] 史恩秀,陈敏敏,李俊,等. 基于蚁群算法的机器人全局路径规划方法研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 53-57.
- [5] 李晋. 基于蚁群算法和遗传算法的机器人路径规划研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 36-42.
- [6] 黄颖. 南昌轨道交通消防安全管理的思考[J]. 华东交通大学学报, 2014, 31(3): 74-79.
- [7] 朱庆,胡明远,许伟平,等. 面向火灾动态疏散的三维建筑信息模型[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2014(7): 762-766.
- [8] PEI YANAN, GAN FANGCHENG. Research on data fusion system of fire detection based on neural-network[C]//Circuits, Communications and Systems, 2009. PACCS '09. Pacific-Asia Conference on, Chengdu, China 2009: 665-668.

- [9] 孙萍,张淑敏. 建筑消防与安防[M]. 北京:人民交通出版社,2000:94-95.
- [10] 中华人民共和国国家标准. GB 50016—2014[S]. 北京:建筑设计防火规范,2014.

Fire Dynamic Evacuation Based on Ant Colony Algorithm

Fu Jundong, Liu Yehui, Li Jianghui

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

Abstract: With the rapid development of society and the quickly growth of urban populations, in the case of high-rise building fire, the safety of personnel and property losses is the problem that we must face, and to design a rational dynamic evacuation programme is extremely important. Combining engineering instance of a shopping mall, through the improvement of ant colony algorithm to plan the best evacuation routes of the plane, integration the vertical evacuation, and put forward the idea of three-dimensional evacuation. From the static environment and dynamic environment, the results showed that the ant colony algorithm for dynamic evacuation of fire has the advantage of avoiding dynamic obstacles in large construction environment, achieving reasonable path planning and safe evacuation to provide an accurate and effective evacuation route for the design of dynamic evacuation indication system.

Key words: dynamic evacuation; ant colony algorithm; path planning; safe evacuation

(责任编辑 刘棉玲)