

文章编号:1005-0523(2020)02-0122-07

基于元胞自动机的建筑火灾预测与疏散系统

郑晓芳,黄鹿鸣,傅军栋

(华东交通大学电气与自动化学院,江西 南昌 330013)

摘要:针对人口密集的较大型建筑,提出了一种基于元胞自动机的建筑火灾预测与疏散系统。该方法首先使用栅格法对建筑平面建模,通过元胞自动机模型实现火灾预测与人群疏散在同一界面显示;然后通过改变出口的不同参数,得出使人群疏散最佳的建筑出口设计方案;最后采用改进后的蚁群算法优化建筑内的疏散灯,使其能够动态地指示逃生方向。仿真实验结果表明,该系统能有效地解决建筑群体内发生火灾时存在的出口设计与人员安全疏散问题。

关键词:火灾预测;出口设计;人群疏散;元胞自动机;蚁群算法

中图分类号:TP399

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.02.017

随着城市建设的快速发展,为更好满足人们需求,许多建筑物的建筑面积逐渐增大,结构趋于复杂。当这类建筑发生火灾时,安全成为了人们关注的重点。因此设计一套火灾综合系统,通过对火灾蔓延情形的预测,以及人们在疏散时现场情况模拟,为建筑出口设计和保障人员安全提供有效的参考。

现有技术中,对于火灾的扩散及人群的疏散模型多采用 Helbing 的社会力模型^[1-2]、Agent 模型^[3-4]和元胞自动机模型^[5-6]。社会力模型能对大规模人群进行模拟,但不能根据实际特点表现出每个人的差异性;Agent 模型主要针对单一个体,不适用于群体;而元胞自动机模型能灵活用于单个或是人群的仿真,且相比之下更具有自然性和真实性。文献[7]提出基于遗传算法的元胞空间林火蔓延预测模型,改进了元胞自动机在进化过程不充分的缺点,能较清晰模拟出林火蔓延动态过程。文献[8-9]提出了大型建筑空间内基于改进型蚁群算法的火灾疏散,分别得到优化的单人疏散路径及整体人群疏散中最佳的一条主要疏散路径,对于人群密集的建筑空间内,仅针对单个或部分个体的疏散,没有宏观考虑整个疏散群体的最佳逃生方法。

本文采用元胞自动机模型,分别对火源及人群进行建模仿真,再采用改进后的蚁群算法对疏散灯指示方向进行优化,所得结果可有效地反映建筑空间内着火后的火情变化趋势及人员疏散情况,疏散灯能根据实际情况准确指示方向。

1 火灾预测系统

1.1 元胞自动机预测模型

本文采用二维元胞自动机模型,该模型结构通常有3种划分方式:三角形,正方形,正六边形。首先,对建筑的平面图选用正方形的网格方式进行划分。火灾发生时每个网格将处于3种状态:未燃烧,正在燃烧,已燃烧。假设建筑空间内任意网格位置一发生火灾立即被探测器探测出,则着火点处被标记为红色,此时的红色网格有扩散能力,能够扩散至相邻网格,采用 Moore($r=1$)的邻域模型来模拟火灾蔓延时的情形,如图1所示。

收稿日期:2019-09-23

作者简介:郑晓芳(1963—),女,教授,研究方向为建筑电气及其智能化。

1.2 火灾蔓延模型

建筑火灾的危险性与其蔓延速度有着密切的联系,找到一个合适的火源模型才能更精准预测火灾。在本文所涉及的仿真中,考虑到建筑火灾的火源热释放速率大小会随时间的变化而发生改变,采用 T^2 模型。该模型适用于非稳态火源,它能够真实地模拟出火灾初期到增长阶段所发生的变化。网格被标记成红色的一瞬间,该模型的数学表达式如下

$$Q=\delta(t-t_0)^2 \tag{1}$$

式中: δ 为火灾增长系数,国际标准 ISO/TS16733 中,定义了缓慢、中等、快速、超快速 4 种标准的 T^2 火灾类型,其中的 δ 分别取:0.002 931, 0.011 27,0.046 89,0.187 8, 可以根据实际情况选择不同的系数,相关火灾增长系数选择标准如下表 1 所示; t 为着火后的时间,s; t_0 为开始有效燃烧需要的时间,s; Q 为火源的功率,MW。

在大空间发生火灾时,使用的表达式也会随之发生变化,此时可不考虑 t_0 ,即忽略开始有效燃烧所需时间,式(1)可以简化为

$$Q=\delta t^2 \tag{2}$$

表 1 火灾增长系数
Tab.1 Fire growth coefficient

火灾类别	典型可燃材料	热释放速率达到 1MW 的时间/s
缓慢	硬木	584
中等	棉质、聚酯材料	292
快速	纸箱、木垛、泡沫塑料	146
超快速	池火、轻质窗帘等家纺	73

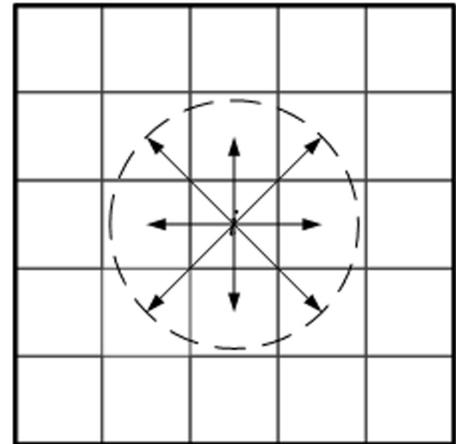


图 1 Moore($r=1$)模型
Fig.1 Moore ($r=1$) model

2 火灾疏散系统

火灾疏散系统主要考虑建立更贴合实际的人群疏散模型及建筑空间内疏散指示灯的优化问题。该系统可与预测系统使用相同的网格背景,只是此时网格意义有所不同,分别表示为:障碍物、人及空网格。

2.1 整体人员疏散模型

对于整体人员在火灾场景中的行动趋势,建立“静态场”和“动态场”模型,并加入人与人之间碰撞摩擦、着火点、障碍物等影响因素进行模拟研究。

2.1.1 静态场与动态场模型的建立

通过静态场 S_j 来描述周边物理环境的影响,这里主要考虑出口对人的吸引力,再用动态场 D_j 描述火灾发生时个人行走路径,其中动态场主要考虑人们的从众心理。两个场的数学表达式如式(3),式(4),式(5)所示

$$S_j=d_{\max}-d_{(j,e)} \tag{3}$$

$$d_{(j,e)}=\sqrt{(x_j-x_e)^2+(y_j-y_e)^2} \tag{4}$$

假设该人当前所在网格为 (x_j, y_j) , 式中 d_{\max} 为建筑空间内所有的网格中人与最远出口之间的距离,m;

$d_{(j,e)}$ 表示当前网格与某一出口 e 间的距离, m 。

$$d_{(j,e)} = \frac{n_{ij}}{\sum_{m=1}^k P_m} \tag{5}$$

式中: n_{ij} 为所有经过该网格人的数量, 个; p_m 为在此之前经过相邻网格的人数, 个。

2.1.2 着火点的排斥力

当人们发现火灾发生, 其逃生方向必然是着火点的反方向, 具体表现为人们对着火点的排斥力 P , 采用式(6)进行描述

$$P = \frac{\sqrt{(i-i_f)^2 + (j-j_f)^2}}{d_{max}} \tag{6}$$

式中: (i_f, j_f) 为火灾初期时的中心坐标。

2.1.3 整体人员移动流程

每个人进行移动时可选择的方向有 8 个, 向这 8 个方向移动的人需遵循距离最短原则, 对选择同一出口的元胞, 当前元胞所在位置与出口位置距离最短即时优先移动。若是在距离相等的情况下则采用随机的方式, 这种情况下元胞移动的概率是均等的。该移动方法流程图见图 2。

步骤 1: 利用式(3), 式(4)选择距离出口最近的元胞, 距离近的元胞优先移动, 同时也选择即将移动的方向;

步骤 2: 已选定目标的元胞是否存在竞争情况, 即在当前元胞选择下一个位置时, 结合上述式(5), 式(6), 式(7), 考虑是否存在其他元胞选择同一个目标位置, 是否存在冲突情况, 假设有的话, 则采用随机进入的方式; 如果竞争失败, 再按照上述规则选择次优网格移动, 如若仍旧未得到移动机会, 则停止移动;

步骤 3: 按照步骤 2 中的方法, 所有的元胞同时进行移动;

步骤 4: 直到所有的元胞从出口走出即表示疏散完毕则可退出循环。

2.2 疏散指示灯优化模型

2.2.1 改进的蚁群算法模型

采用改进的蚁群算法建筑空间内的疏散灯进行优化。即取当前疏散灯所在位置作为每一只蚂蚁的初始位置, 算法结束后将生成一条最佳疏散路径, 根据该路径所通往的出口位置作为安全疏散灯指示的参考。疏散灯能够指示上下或左右两种方向, 对于上下指示型疏散灯, 若得到的出口位置在其水平方向以上, 则其指示方向是上, 反之若在其水平方向以下, 则指向下; 对于左右指示型疏散灯, 若最终选择的出口位置在其垂直方向以左, 则其指示方向为左, 反之在垂直方向右方, 则指向右。

为了使疏散路径和时间尽可能地减短, 从而选择最佳的出口位置, 对信息素模型 ant cycle system 的更新方式进行优化。在蚂蚁的移动过程中, 对选择同一个目标移动网格的蚂蚁数进行记录为 n , 该数据表示为竞争力, 即拥挤程度, 当竞争力越小的情况下, 拥挤程度越低, 蚂蚁移动受到的阻碍更小, 疏散用时少, 长度

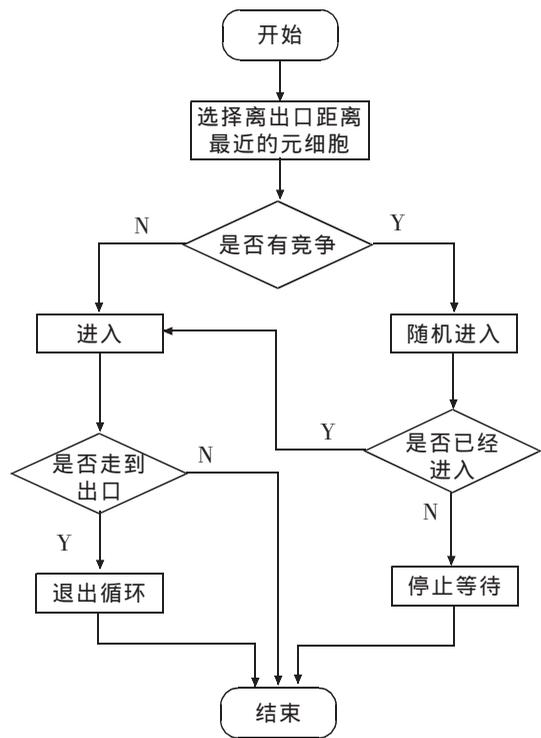


图 2 元胞移动流程图
Fig.2 Cell movement flow chart

也更短;反之,若该数据大,表示拥挤程度大,则蚂蚁可能会选择绕行的方式能减少疏散时间。疏散路径模型的启发函数、迭代过程中信息素更新表达式如式(7),式(8),式(9)所示

$$P_{je}^u = \begin{cases} \frac{[\tau_{je}(t)]^\alpha \times [\eta_{je}(t)]^\beta}{\sum_{h \in B_u} [\tau_{jh}(t)]^\alpha \times [\eta_{jh}(t)]^\beta}, & h \in B_u \\ 0, & h \notin B_u \end{cases} \quad (7)$$

$$\eta_{je} = \frac{1}{d_{j,e}} \quad (8)$$

式中: P_{je}^u 为蚂蚁 u 从当前位置 j 到出口 e 的转移概率; τ_{je} 为 t 时刻当前位置 j 到出口 e 路径上信息素浓度; η_{je} 表示人从当前位置 j 转移到出口 e 的期望程度; B_u 为蚂蚁到达出口 e 过程中遇到的障碍集合; d 为信息素的重要程度因子; β 是启发函数的重要程度因子。

$$\tau_{je}(t+1) = (1-\rho)\tau_{je}(t) + \sum_{k=2}^q \frac{C}{S_k+n+d_f} \quad (9)$$

式中: ρ 为信息素的挥发程度($0 < \rho < 1$), C 为常数,表示人完成一次疏散所释放的信息素总量, S_k 为第 k 个人所经过路径的长度, m ; n 为路径中所遇到的竞争人数,个; d_f 为火与蚂蚁之间的距离, m 。

2.2.2 疏散灯指示步骤

将改进的蚁群算法优化元胞自动机模型,将以上动、静态场、排斥力等因素作为对蚂蚁运动的指导,从而获取最优路径。该路径生成具体步骤及疏散灯指示方法如下:

- 步骤 1:各个参数初始化,确定建筑平面内障碍物、出口 e 所在位置、状态;
- 步骤 2:蚂蚁开始搜索,从当前位置 j 根据式(7),式(8)选择下一个移动位置,并且更新对应禁忌表;
- 步骤 3:按照式(9)更新路径信息素。如果蚂蚁到达终点,当前新的路径优于已有路径,则保留当前路径;
- 步骤 4:重复步骤 2、步骤 3 直到所有蚂蚁迭代结束;
- 步骤 5:输出最优路径,选择最佳出口;
- 步骤 6:疏散灯指示方向选择。

3 算例分析

3.1 示例模型及仿真

本文采用候车厅作为火灾的预测与疏散背景,应用改进的元胞自动机模型对火势蔓延及候车厅内人群逃生情况进行仿真,同时记录疏散所用的总时间。其中,设有 2 个宽度为 2 m 的安全出口,4 个宽为 1 m 的检票口,候车厅内座位 40 排,装设有 19 个疏散灯,将该候车厅平面图进行 40×40 网格划分如图 4 所示。假设任意着火点都能够被探测器探测出,仿真中设置随机给出一个着火点,总疏散人数为 1 000 人,仿真中用红色方块代表着火区域,人被标记为黑色圆圈。为体现该系统对于出口设计的优化功能及疏散灯在紧急情况下有助于指挥疏散,以下将未加入疏散灯与加入疏散灯情况分别考虑。

3.2 仿真结果与分析

3.2.1 未加入疏散指示灯情况

在未加入疏散指示灯模型中,主要研究火灾蔓延预测情况及疏散所用时间,根据图 3 中的背景进行仿真后得到仿真过程及仿真后图像如图 4 所示

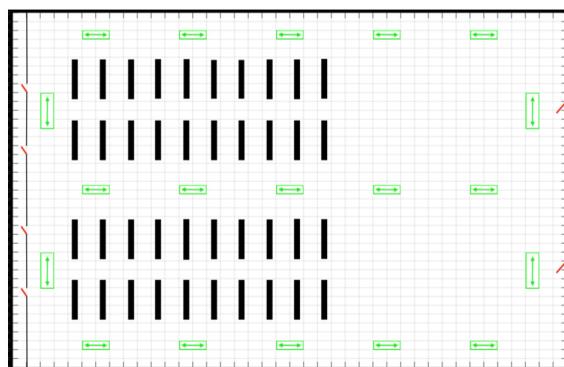


图 3 模型平面图

Fig.3 Model plan

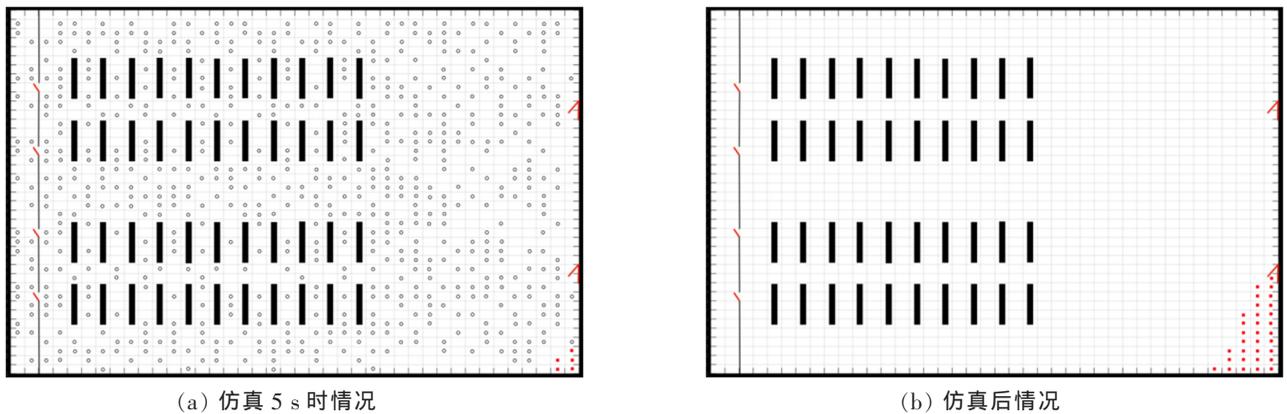


图4 未加入疏散灯仿真情况

Fig.4 Simulation without evacuation lamp

图4(a)中被红色方块标记的网格即为火灾初期的位置,图4(b)中增加的红色方块即为该火灾预测系统对于该处发生火灾后的蔓延预测。以上仿真实验记录得所有人员疏散完毕所用时间为408s,车站建筑属于一、二级耐火建筑,根据《建筑设计防火规范》GB50016-2014中5.5.16规定:一、二级耐火等级的民用建筑与高层建筑,其允许疏散时间为5~7min,即300~420s。从以上实验数据可以看到,所有疏散时间均在安全范围内,故上述建筑的出口设计方案都符合防火规范。

由于以上仿真的疏散时间为408s,已经接近规范中的下限值,为了通过仿真对该建筑出口设计方案进行优化,采用控制变量的方法,改变以上建筑内的出口数量及宽度进行仿真,并记录疏散所用时间作为比较,使最终得到的出口设计方案在满足基本安全规范的前提下,还能兼顾疏散速度的提升及建筑的施工成本。根据《建筑设计防火规范》GB50016-2014中5.5.15规定:一、二级耐火等级建筑,其安全出口数量不得少于2个、疏散宽度不应小于1.4m。在上述建筑出口方案的基础上,分别设置出口数量固定为2,3,4个时,将出口宽度增至2.2,2.4,2.6,2.8m进行仿真,得到不同情况下疏散时间如表2,表3,表4所示。

表2 出口数量为2时随出口宽度变化所用疏散时间

Tab.2 Evacuation time used when the number of exits is 2 as the width of the exit changes

出口宽度/m	疏散时间/s
2.0	408
2.2	376
2.4	352
2.6	341
2.8	334

表3 出口数量为3时随出口宽度变化所用疏散时间

Tab.3 Evacuation time used when the number of exits is 3 as the width of the exit changes

出口宽度/m	疏散时间/s
2.0	354
2.2	328
2.4	314
2.6	302
2.8	299

表4 出口数量为4时随出口宽度变化所用疏散时间

Tab.4 Evacuation time used when the number of exits is 4 as the width of the exit changes

出口宽度/m	疏散时间/s
2.0	321
2.2	305
2.4	298
2.6	290
2.8	285

从表2,表3,表4中的总体数据可以看到,每一种出口设计方案都能够满足基本规范,对于出口宽度和出口数量的增加都能够一定程度上减少疏散时间,区别在于减少时间的多少不同,若出口数量与宽度盲目增加,可能导致疏散速度提升不明显的同时增加了建筑施工成本。为能够通过仿真能够得到更为经济且能在较大程度上提升疏散速度的最佳出口设计方案,采用以上3个表格中的数据在同一平面内分别绘制折线图进行分析比较,如图5所示。

由图 5 可知,对于出口数量的确定,从纵坐标的疏散时间来看,将出口数量由 2 个增至 3 个时所降低的疏散时间明显多于将出口数量由 3 个增至 4 个的情况,说明将该候车厅的出口数量增至 3 个时,能在较大程度上提升疏散效率,而若是仅考虑速度上的提升,继续将出口数量增加到 4 个,此时疏散速度的提升并不明显,却增加了建筑成本。从三条折线的倾斜程度来看,当出口间距增至 2.2 m 时,相比之下有最大的斜率,说明仅将出口间距增加 0.2 m 即可在原基础上降低较多的疏散时间,此时若将出口宽度继续增加,疏散时间的降低程度已经不够明显。综上所述,对于该候车厅模型,同时将出口数量增至 3 个、出口宽度增至 2.2 m 时,能够大大提升疏散效率,该情况下所用的疏散时间为 328 s,在疏散时间上比原方案缩短了 80 s,在考虑建筑施工经济性上,对比原方案来说变动不大,为该候车厅的最佳出口设计方案。除考虑疏散时间、经济性以外,若对建筑的平面设计还有美观的要求,如要求出口能够对称设计,希望出口数量为偶数时(假设要求 4 个),从表 4 可知:当出口数量为 4 个、出口宽度为 2 m 时,所用的疏散时间为 321 s,对比出口数量为 3 个、出口宽度为 2.2 m 的疏散时间 328 s,两种方案时间差别不大,同样能够在较大程度上提升疏散效率,此时即可进行方案的替换。通过该系统对建筑内出口的优化设计,不仅能加快建筑空间内人群的疏散速度,而且考虑了优化出口所需成本,可根据仿真实验数据及实际要求灵活地调整出口设计,得到最佳方案。

3.2.2 考虑疏散指示灯情况

同样采用上述候车厅作为疏散背景,采用改进的蚁群算法,将各个疏散灯位置作为出发点,设置蚂蚁数量为 20,信息素重要程度因子启发函数重要程度因子,信息素挥发程度,常数 $C=30$,迭代次数初值为 1,最大迭代次数为 100,有 6 个目标出口(检票口也作为疏散出口)。结合第 2 节中所改进的模型进行仿真,取两次典型示例如图 6,图 7 所示。

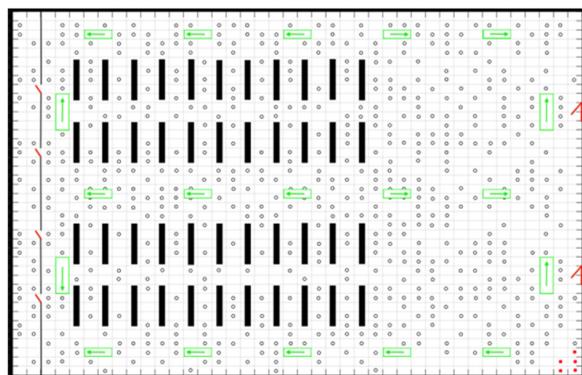


图 6 火源靠近某一出口
Fig.6 The fire source near an exit

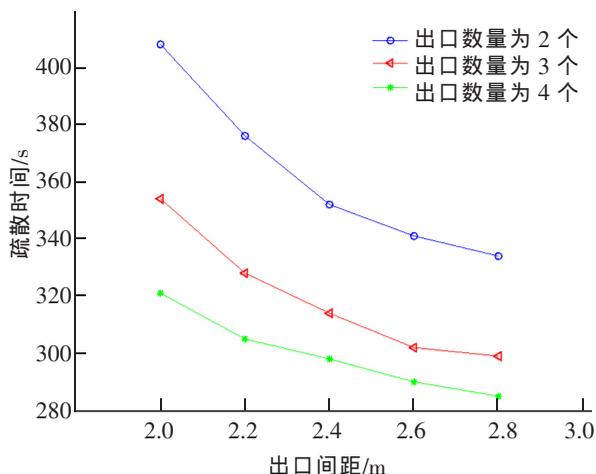


图 5 不同出口数量时出口宽度改变对疏散时间的变化
Fig.5 Evacuation time with exit width changes for different number of exits

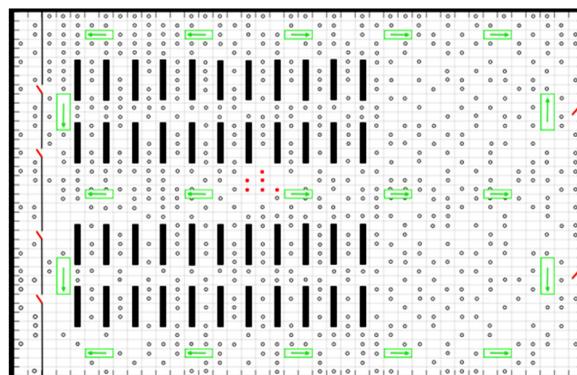


图 7 火源与各出口距离近似相等
Fig.7 The fire source approximately equal to each exit distance

图 6 中的初始火源点位于平面图的右下角,靠近平面图中的右下方出口。从该图中的疏散等指示方向可以看到:最靠近火源处的两个疏散灯指示方向为出口的反方向。除此之外,由于此情景中的人群分布较为均匀,其他疏散灯的指示方向都是按照距离出口最近的原则进行指示,说明疏散灯能同时考虑火源点及出口远近程度。图 7 中的初始火源点位于平面图中间,与各个出口、检票口位置的距离相近,该图中除靠近着火处的疏散灯的指示方向是背离火源方向外,由于此情景的平面图中左上角聚集人群较多,所以可看到位

于左上方处于较密集人群区域的疏散灯,其指示方向与靠近其最近的出口方向相反,说明疏散灯的指示方向不仅仅考虑距离出口的远近及着火位置,而且还考虑了当前人群的拥挤程度。综上所述,该系统将火源位置、就近原则、人群疏密程度一并考虑,对于已着火的建筑空间内人员的疏散有较好的指示作用。

4 结论

本文提出的基于元胞自动机的建筑火灾预测与疏散系统,能优化建筑内疏散通道的设计和建筑内的疏散灯指示方向。文中在对实际工程构建平面模型的基础上,应用改进的蚁群算法。通过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) 该系统将火灾预测与人群疏散相结合,主要利用了元胞自动机模型与改进后的蚁群算法模拟复杂情况的优势,不仅能够预测火情发展趋势,还能优化建筑出口设计。

2) 该系统将蚁群算法求最优路径应用于疏散指示灯,优化元胞自动机模型,使疏散指示灯能够根据实时情况对指示方向进行调整,有利于建筑空间内密集人群的尽快疏散。

参考文献:

- [1] 李天贝,肖梅玲,徐子祺,等. 基于社会力模型的教室内地震疏散仿真[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(3): 281-286.
- [2] 钟少波,余致辰,杨永胜,等. 基于社会力模型的机场人员疏散建模研究[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(10): 3648-3656.
- [3] 杨瀚申,徐华,鞠志伟. 基于 Agent 的三维巷道人员疏散仿真研究[J]. 计算机技术与发展, 2019, 29(3): 132-137.
- [4] 林铭,金华,徐汇川,等. 基于 Agent 模型的城市轨道交通车站人群聚集风险的分析[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(8): 57-62.
- [5] 胥旋,史聪灵,李建,等. 考虑绕行效应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, 2018, 14(2): 20-25.
- [6] 黄旺星,何对燕. 基于改进元胞自动机的室内火灾疏散模型[J]. 消防科学与技术, 2016, 35(11): 1562-1565.
- [7] 杨福龙,曹佳,白夜. 基于元胞自动机的林火蔓延三维模拟仿真研究[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(19): 37-41.
- [8] 王茹,周磊,刘俊. 基于改进蚁群算法的元胞自动机疏散模型研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(1): 38-43.
- [9] 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.

Fire Prediction and Evacuation System for Buildings Based on Cellular Automata

Zheng Xiaofang, Huang Luming, Fu Jundong

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

Abstract: A building fire prediction and evacuation system based on cellular automata is proposed for densely populated large buildings. Firstly, the grid method is used to establish a planar model about the building, and the cellular automaton model is applied to realize the fire prediction and the crowd evacuation on the same interface. Then, the best exit design scheme for evacuating the crowd is obtained by changing different parameters of the exit. Finally, the improved ant colony algorithm is adopted to optimize the evacuation lights in the building, so that it can dynamically indicate the direction of escape. The simulation results show that the system can effectively solve the problem of exit design and personnel safety evacuation in the event of fire in the building group.

Key words: fire prediction; exit design; evacuation; cellular automata; ant colony algorithm