

商用建筑室内火灾应急疏散路径规划算法

董皓男，叶晓彤，郝从朴

(武汉大学 测绘学院，武汉 湖北 430072)

摘要：商用建筑室内结构复杂，人群密度大。室内火灾发生时，有效的疏散路径能减少人员伤亡和财产损失。本文就商用建筑火灾的疏散问题，提出一种基于组合赋权法和实时监测的 Dijkstra 优化算法的疏散路径规划算法。首先，利用结合层次分析法和熵权法的组合赋权法确定室内房间疏散顺序，基于此再使用可以实时监测人员分布的改进 Dijkstra 算法规划疏散路线。模拟实验表明，本文提出的算法，能优先疏散火源点附近房间，同时最大可能避免疏散路径上的拥挤，保证疏散方案的稳定性。

关键词：商用建筑，室内火灾疏散，层次分析法，熵权，组合赋权法，改进 Dijkstra 算法

Emergency Evacuation Path Planning Algorithm for Indoor Fire In Commercial Buildings

Dong Haonan, Ye Xiaotong, Hao Congpu

(School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan, Hubei, 430072)

Abstract: Commercial buildings have a complex indoor structures and high indoor population density. An effective and reasonable evacuation plan can reduce casualty loss when indoor fire occurs. This paper proposes an improved evacuation algorithm for commercial building evacuation, based on combined weight and Dijkstra algorithm. First, a model of the combination of analytic hierarchy process (AHP) and entropy weight is employed to determine the evacuation priority of each indoor room. Then on the basis of the priority order, evacuation routes are planned by the improved Dijkstra algorithm which can monitor population distribution during the process. Mimic experiment shows that the improved algorithm can preferentially evacuate the rooms near the fire origin, avoid the indoor congestion, and ensure the stability of the evacuation plan.

Key Words: Commercial Buildings, Indoor Fire Evacuation, AHP, Entropy Weight, Combination weight, Improved Dijkstra Algorithm

1. 引言

随着大型商业建筑内部结构趋于复杂化,在室内火灾等紧急事情发生时,室内人员难以快速做出较为合理的疏散反应,导致烧伤、CO 中毒等直接伤害和诸如踩踏事件等的二次伤害。所以,提供一种快速、合理的商用建筑室内火灾应急疏散方法具有重要意义。

目前,室内疏散问题学界提出大量宏观疏散算法。刘毅,沈斐敏提出基于改进蚁群算法的考虑火灾实时扩散的最短路径规划模型,但该算法随环境变化则会改变原有的疏散路线,无法应用于多层商用建筑的疏散规划中^[1]。赵卫绩等人提出的 Floyd 算法采用动态规划的思想^[2],但因无法保证全局最优性,动态规划算法很少被采用于设计疏散算法。相对于启发式搜索算法、动态规划算法,Dijkstra 算法可以保证疏散路线相对固定的要求,可用于设计商用建筑室内火灾的疏散路径。迟光华,谢君等提出基于 Dijkstra 算法的分阶段疏散算法^[3],缩短了学校多楼层内学生疏散的整体时间,但该算法要求疏散客体遵循一定的等候时间,无法应用于大型的商用建筑疏散内人群疏散。杨建芳等人提出多楼层应急疏散算法^[4],优先疏散撤离时间较长的楼层,以达到均衡疏散时间的目的,但该算法无法保证火灾点附近人群疏散的顺序。韩李涛,郭欢,张海思等人提出一种多出口室内应急疏散路径规划算法,引入虚拟节点,将多源多出口问题转化为单源多路径问题,有效提高了 Dijkstra 算法的搜索效率^[5]。张江华,刘志平,朱道立则提出基于网络优化思想的算法^[6],在疏散过程中更新路径容载量,以解决拥堵问题。因此,针对上述方法在处理商用建筑室内火灾疏散时的局限,提出一种新的疏散路径规划算法,并通过实验,说明该算法的可行性。

2. 室内火灾应急疏散路径规划算法

考虑到商用建筑室内火灾事件有以下问题: 1) 着火点附近人群无法进行优

先疏散，或者疏散路线受到其他室内房间、楼层疏散人群的干扰，易发生着火点附近大面积的人员伤亡。2) 室内人群通常未接受系统性的疏散训练，当火灾发生时，人群容易自发、无序疏散，易发生因跟随疏散行为而造成的拥堵现象。

基于以上问题，本文提出一种基于组合赋权法和改进 Dijkstra 算法的商用建筑室内火灾疏散方法。基本思想为利用组合赋权法确定火灾情况下室内房间的疏散顺序，保证火灾点附近的人群疏散优先性。其次，考虑传统算法将所有道路认为是无限容载量的弧段，忽略了人群疏散过程中的在疏散道路上聚集的问题，本文为每条弧段设置人数容载量，随路径的规划实时检测道路人员分布并更新路线，解决疏散路径上的拥堵问题。

2.1 组合赋权法确定房间疏散顺序

传统 Dijkstra 算法对室内的各个房间进行等权疏散，然而实际疏散过程中，需要确定各个室内房间疏散顺序，本文对此进行改进。利用基于序数的层次分析法和熵权法计算各疏散指标的主、客观权重，采用组合赋权法，给出疏散序列，以保证室内火灾情况下，火灾点附近房屋优先疏散。

层次分析法^[7]可以根据影响室内火灾的特点和人群特征，可以给出各个指标对于目标层的主观权值，本文利用基于序数的层次分析法确定指标的主观权值^[8]。

室内火灾下的指标层次图如图 1 所示，专家对两两因素进行比较^[9]，其中，专家对 f_i, f_j 因素比较时，用 L_1 表示 f_i 比 f_j 重要的人数所占总人数百分比，用 L_2 表示 f_j 比 f_i 重要出现频数所占总数百分比，令 $\Delta L = L_1 - L_2$ 。通过统计分析，建立起 ΔL 与权值映射表，以评分映射表代替传统层次分析法中的打分赋权，构造成对比较矩阵 A 。其中映射表如表 1 所示：

表 1 ΔL -评分映射表

ΔL	0~0.15	0.15~0.3	0.3~0.45	0.45~0.6	0.6~0.75	0.75~0.9	0.9~1
评分	1	2	3	4	5	6	7

对矩阵 A 一致性检验，求取比较矩阵特征值，计算第 k 层相对于上一层的的权重 $w^{(k)}$ ，即得到层次分析法下，各层指标相对于上一层指标的权重^[10]。

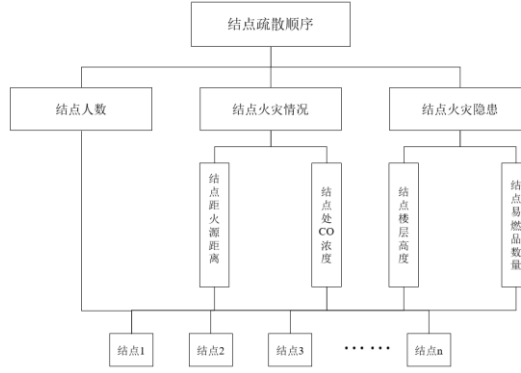


图 1 火灾下室内房间疏散顺序指标结构图

熵权法通过衡量某一信息自身的差异程度，反应某一指标对系统的整体作用，指标信息差异越大，信息熵权越小，则该指标对目标的影响就越大，是目前广泛应用于实际的客观赋权法之一^[11]。根据图 1 所示的各项指标，熵权法定权首先根据室内待疏散房间个数 m 及决策指标数 n 构建决策矩阵 $(r_{ij})_{m \times n}$ 。然后对矩阵进行无量纲化、归一化处理。根据(1)式，计算指标熵 e_j 。

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m \overline{r_{ij}} \cdot \ln \overline{r_{ij}} \quad (1)$$

其中， $\overline{r_{ij}}$ 表示信息去量纲化、归一化后的值。

最后，利用(1)式，计算每个指标的熵权值 g_j 。

$$g_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (2)$$

考虑到层次分析法能反映指标经验权重，但具有一定的主观性，熵权法客观反映指标的客观统计权重，但缺乏一定的理论支撑。因此，本文采用组合赋权法，结合层次分析法和熵权法，得到合理、客观的指标权重。

设层次分析法中，第 j 个指标的权值设为 p_j ，熵权法中，则为 q_j 。令该指标的组合权值为 W_j ，则有：

$$W_j = \theta p_j + (1 - \theta) q_j \quad (3)$$

为求系数 θ ，以组合权值与层次分析法权值和组合权值与熵权法权值的平方

和最小为目标建立方程组^[12]：

$$\min \Omega = \sum_{j=1}^n [(W_j - p_j)^2 + (W_j - q_j)^2] \quad (4)$$

求解得到的组合权值计算式为：

$$W_j = \frac{1}{2} p_j + \frac{1}{2} q_j \quad (5)$$

则，每个房间的疏散顺序，即疏散顺序如下式， $weight_j$ 值越大，则疏散顺序越高，疏散顺序越靠前。

$$weight_i = \sum_{j=1}^n r_{ij} \times W_j, i=1, \dots, m \quad (6)$$

2.2 更新道路容载量解决路径拥堵问题

Dijkstra 算法是基于图的最短路径算法。为解决疏散拥堵问题，在算法运行时，实时更新图中弧段的人流容载量，同时，提出以最小疏散时间代替最短疏散路径的方法，改进弧段权值，以解决疏散方案失效问题。保证疏散路径避免人群拥堵，避免绕远或经过火灾区域。

为便于说明方法实现原理，设室内房间集为 $N = \{a | a=1, 2, \dots, A\}$ ，道路节点集 $R = \{u | u=1, 2, \dots, U\}$ ，出口节点集 $E = \{d | d=1, 2, \dots, D\}$ ， H_k 表示第 k 个室内房间的人数；图中任意弧段定义为 l_{ij} ，表示 i, j 房间之间的弧段。 c_{ij} 表示该弧段的人流容载量， c_{ij}^* 表示该弧段剩余容载量， $v_{ij}^{(k)}$ 为第 k 个房间人群经过该段弧段的速度， $t_{ij}^{(k)}$ 为第 k 个房间的人群经过 l_{ij} 弧段的时间；第 k 个房间的疏散路径表示为：

$$RT^{(k)} = \sum l_{ij}, \text{ 疏散的总时间为 } T^{(k)} = \sum t_{ij}。$$

生成抽象图时，若火灾发生在房间 i 处，则 $l_i = \infty$ ，即与该道路房间所有的弧段不连通，以解决疏散路径经过或靠近火灾点的问题。

假设第 k 个房间的人群作为一个整体进行疏散，实际疏散过程中，疏散方案要考虑图中弧段的人流容载量，防止过饱和产生的拥堵现象。容载量计算公式为：

$$C_{ij} = \rho_{\max} s_{ij} \quad (7)$$

第 k 个房间的疏散路径为 $RT^{(k)}$ ，则 $\{l_{ij} | l_{ij} \in RT^{(k)}\}$ 中的所有弧段的容载量按 (8) 式更新：

$$c_{ij}^* = c_{ij} - H_k \quad (8)$$

每得到一条疏散路径时，需要对该条疏散路径上所有弧段的人流密度进行更新。当路径剩余容载量 c_{ij}^* 小于当前房间人数 H_k 时，即 $c_{ij}^* - H_k < 0$ ，则需要设置该弧段不连通，并用新的邻接矩阵进行后续的路径规划。

另一方面，假设疏散人群在没有环境阻力情况下为流体，人群行进的速度处处相等，所以 $v_{ij}^{(k)}$ 为常数，故静态图中，最短路径即为最小疏散时间。

$$t_{ij}^{(k)} = \frac{l_{ij}}{v_{ij}^{(k)}} \quad (9)$$

当疏散开始时，所有室内结点处的人群同一时间开始疏散，因此疏散的整体用时即为所有单一室内结点疏散的时间的最大值。即：整个图中的最小疏散时间转化为：

$$\min T^{(k)} = \max \sum t_{ij} \quad (10)$$

2.3 室内火灾疏散方法实现步骤

室内火灾疏散方法实现步骤如下：

- 1) 火灾发生时，通过图像处理方式和无线传感器网络，获得室内各个房间人流密度 H_k 和火灾发生点特性，利用组合赋权法计算出室内房间的疏散顺序。
- 2) 利用改进 Dijkstra 算法，按照房间疏散顺序，规划第 k 个房间疏散时间 $T^{(k)}$ 最短的路线。
 - ① 初始化数据，存储房间，弧段长度，人流密度，设置不连通弧段，构建邻接矩阵。
 - ② 设置连通所有出口的虚拟出口，将多源问题简化为单源问题，用 Dijkstra 算法规划逆序寻找从虚拟出口到各个人群聚集点的最短路径。
 - ③ 按疏散优先级确定待疏散人群聚集点 a_k ，判断是否找到至出口的最短路径，若还未找到，报错路径不存在，若找到，则进入④。

- ④ 对从 a_k 至出口的路线中的每一条弧段进行人流检测，若有弧段超出容载量，则更新邻接矩阵，转入②；否则将路径存储。
- ⑤ 存储路径 $RT^{(k)}$ ，判断待疏散房间是否遍历完，若遍历结束，则转入⑥，否则，转入③。
- ⑥ 输出结果，算法结束

3. 实验模拟与结果分析

为证明疏散算法的合理性，本文以某商品家具馆室内房间起火为背景，进行模拟实验。

模拟火灾情况描述如下：该商场西南角软床家具处起火，疏散出口分布在商场的东、西两侧，火情示意图如图 2 所示。

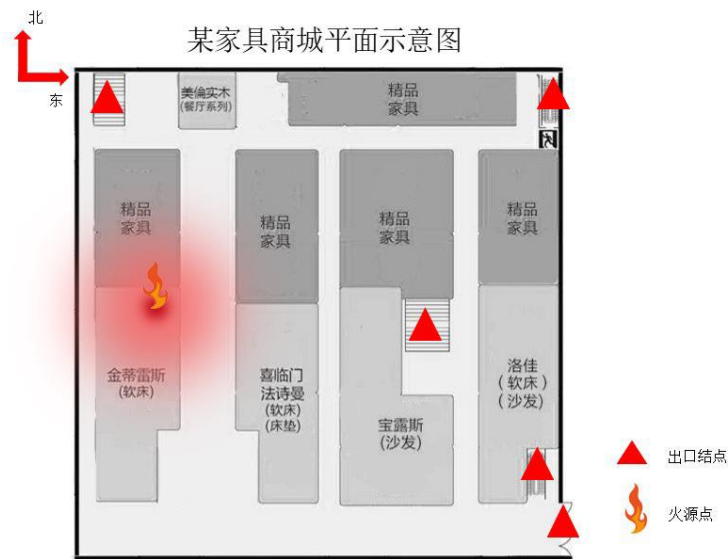


图 2 家具商场火情示意图

通过商场视频提取、前期资料调查、无线传感器网络通信等首段，可获得商场内部各个房间的人数、易燃物数量、CO 浓度以及弧段路径长度等信息。

利用 ArcGIS 软件，提取商场的图结构，共提取出 5 个出口结点，10 个房间结点，17 个道路结点。提取出的图结构如图 3 所示：

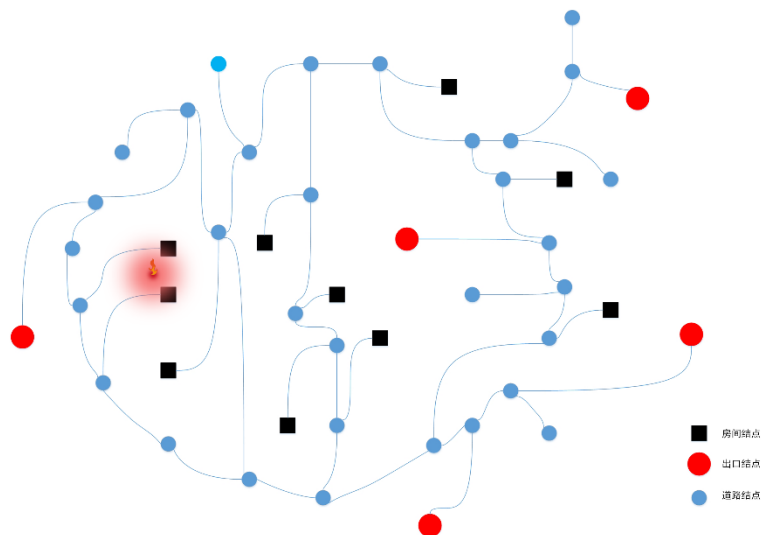


图 3 商场抽象图结构

3.1 确定疏散顺序

利用 2.1 节中基于序数的层次分析法，统计专家对一级指标重要性评定人数占总人数的百分比 L_1, L_2 ，并查询映射表，统计结果如表 2：

表 2 一级指标百分比统计结果

指标	L_1	L_2	ΔL	评分结果
人数-火情	0.6	0.4	0.2	2
人数-隐患	0.8	0.2	0.6	5
火情-隐患	0.8	0.2	0.6	5

利用表 2 中的评分结果，构造一级指标的成对比较矩阵：

$$A_1^1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 5 \\ \frac{1}{2} & 1 & 5 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

同理，统计各二级指标的百分比，结果如表 3、4 所示：

表 3 火情下二级指标统计百分比统计结果

指标	L_1	L_2	ΔL	评分结果
距火源距离-CO 浓度	0.2	0.8	-0.6	1/5

表 4 火灾隐患下二级指标统计百分比统计结果

指标	L_1	L_2	ΔL	评分结果
楼高-易燃物数量	0.2	0.8	-0.6	1/5

一级指标和二级指标的成对比较矩阵为：

$$A_2^2 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{5} \\ 5 & 1 \end{bmatrix}, A_2^3 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{5} \\ 5 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

三个矩阵的一致性检验值分别为 0.0462，0，0，均小于 1，因此一致性检验通过，可以使用矩阵计算各级指标的权值。计算结果如表 5 所示：

表 5 一、二级指标对应权重

一级指标	二级指标			
	人数	房间火灾情况		房间火灾隐患
权重	0.556	0.353		0.009
二级指标	火源距离	CO 浓度	楼层高	易燃物数量
	0.1667	0.8333	0.1667	0.8333

根据二级指标的权重，以房间 CO 浓度值代表房间火灾情况，房间易燃物数量代表房间火灾隐患，即 CO 浓度越大，房间火情越危急，房间易燃物越多，火灾隐患越大。

获取房间各指标数据如表 6 所示，其中因一级指标权重较大，为体现人数在影响疏散顺序的特性，明显提高 3、7 号结点的人数。

表 6 各房间一级指标实验数据

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
人数(个)	16	3	50	5	11	20	50	10	9	6
CO(mg / m^3)	10.87	3.73	12.3	7.19	2.89	1.21	11.56	5.25	3.05	0.6
可燃物(kg)	12.12	12.94	3.91	3.4	19.41	12.23	16.47	16.21	9.72	20.7

根据表 6 中数据，计算三个一级指标的熵权，熵权结果如表 7 所示：

表 7 一级指标熵权

指标	房间人数	房间火灾情况	房间火灾隐患
熵权	0.320	0.342	0.337

根据(5)式，计算各一级指标的组合权，结果如表 8 所示：

表 8 一级指标的组合权值

指标	房间人数	房间火灾情况	房间火灾隐患
组合权值	0.435	0.35	0.215

由(6)式，计算各个室内房间在室内火灾下的疏散顺序如表 9 所示：

表 9 室内房间疏散顺序

房间序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
疏散顺序	3	9	2	8	5	6	1	4	10	7

3.2 规划疏散路径

根据已知静态地图，仅考虑节点到出口距离这一单一因素，使用 Dijkstra 算法可以得到区域的基础疏散路径规划。取 $v_{ij} = 3m/s$ ，并利用比例尺利用公式(9)计算得到疏散用时。路线结果如表 10 所示：

表 10 基于 Dijkstra 算法的基础室内疏散路径规划

起点序号	人数	路线	疏散用时
1	3	0→15→34→25→10	23.44
2	12	1→16→37→39→26→11	28.26
3	50	2→17→33→25→10	27.19
4	18	3→18→36→16→37→39→26→11	50.77
5	16	4→19→18→36→16→37→39→26→11	55.88
6	11	5→20→27→12	25.65
7	50	6→21→17→33→25→10	48.23
8	10	7→22→23→45→46→29→14	53.98
9	3	8→23→45→46→29→14	49.37
10	16	9→24→41→27→12	19.04

选用 $\rho_{max} = 4人/m^2$ 计算道路的容载量^[12]，同时使用表 4 中的人数、环境信息和表 7 中的权值计算结果，用优化后的算法进行全区域的疏散路径规划。规划结果如表 11 所示：

表 11 根据实际情况优化后的区域疏散路径规划

起点序号	疏散优先级	人数	路线	疏散用时
1	3	3	0→15→35→36→16→37→39→26→11	52.99
2	9	12	1→16→37→39→26→11	28.26
3	2	50	2→17→21→43→44→45→46→29→14	105.38
4	8	18	3→18→36→16→37→39→26→11	50.77
5	5	16	4→19→18→36→16→37→39→26→11	55.88

6	6	11	5→20→27→12	25.65
7	1	50	6→21→17→33→25→10	48.23
8	4	10	7→22→23→45→46→29→14	53.98
9	10	3	8→23→45→46→29→14	49.37
10	7	16	9→24→41→27→12	19.04

3.3 路径显示与效果评定

以 1、3、7、4、8、9、10 号源点为例，将算法规划的疏散路线在场馆平面图上进行可视化，结果如图 4 所示：

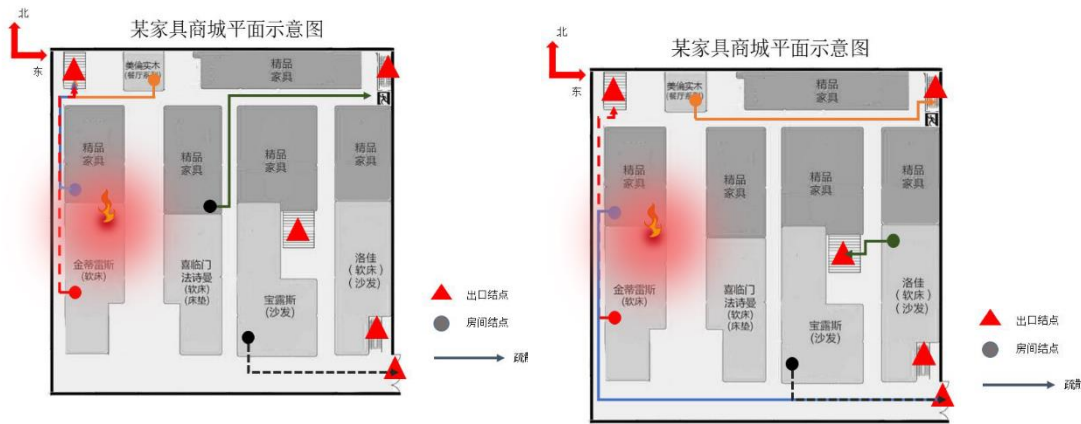


图 4 普通路径规划（左）和优化方案路径规划（右）

从上述两图可以看出，普通 Dijkstra 算法路线规划仅考虑了结点间的物理距离，并没有将不同人员聚集点出的实时人数分布纳入考量。因此在整体疏散方案中，每个出口处最终疏散的人员并不均匀，并且容易出现部分弧段过度拥挤而部分弧段空置等不合理情况。经过优化后的算法充分考虑了每个节点处的人员、受灾严重情况等环境因素，并对路段上可能出现的拥堵进行分配过程中的实时监测。当弧段上人流超出容载量时，则为当前人群重新规划疏散路径。为进一步展示算法的优化效果，表 12 列举了算法优化前后各出口和部分弧段处疏散的人数比较。

表 12 优化前后出口处和各弧段人流量对比

序号	11	12	13	15	26-11	18-34	18-22
普通	103	46	27	13	103	100	0
优化后	50	49	27	63	50	50	50

从表 12 可以看到优化后的算法使人员分布更加合理，充分利用了空间资源。同时，优化后的算法完全避免了弧段上可能产生的拥堵，并合理利用空置的弧段资源。以弧段 26-11 和 18-34 为例，普通规划方案中两条弧段上的人流均超出了

弧段容载量,造成拥挤,由公式可知疏散时间无限延长;在优化的算法中该情况被有效避免。与此同时,原来空置的弧段 18-22 也在优化方案中分担了疏散工作。

4. 结论

本文使用层次分析法和熵权法的组合赋权法建立了综合考虑人数、火灾情况和火灾隐患的赋权模型,给不同人群聚集点赋予合理的疏散优先级,同时提出了可以考虑动态人流分布避免拥堵的改进 Dijkstra 算法。通过模拟实验验证,本赋权方法带有一定主观性,但可以通过矩阵一致性检验,结果合理。同时仿真实验证明基于此优先顺序的动态监测优化算法可以有效避免在疏散过程中可能出现的拥堵,并提高室内空间的利用率,使疏散过程更加有序,进而提升全区域的疏散效果。

本文在算法思路实现了对疏散过程的动态监测。在疏散过程中考虑疏散时间的动态变化和实现多楼层之间的联动是下一步研究的方向。

参考文献

- [1] 刘毅,沈斐敏.考虑灾害实时扩散的室内火灾疏散路径选择模型.控制与决策.2017
- [2] 赵卫绩,巩占宇,王雯,樊守芳.几种经典的最短路径算法比较分析.疾风学院学报(自然科学版).2018.12
- [3] 迟光华,谢君,李强,杨辽,李响.一种用于制定多层多出口的室内应急疏散规划的方法.遥感信息.2013.12
- [4] 杨建芳,高岩,王宏杰.多层建筑物应急疏散模型和算法.系统仿真学报.2014.2
- [5] 韩李涛,郭欢,张海思.一种多出口室内应急疏散路径规划算法.测绘科学.2018.1
- [6] 张江华,刘志平,朱道立.多源点突发灾害事故应急疏散模型与算法.管理科学学报.2009.6
- [7] 崔建国,林泽力,吕瑞,蒋丽英,齐义文.基于模糊灰色聚类 and 组合赋权法的飞机健康状态综合评估方法.航空学报.2013.5
- [8] 张乐,曹爽,李士雪,徐凌忠,李群伟.层次分析法的改进及其在权重中的应用.中国卫生统计.2016.2
- [9] Tezcan Sahin, Saffet Ocak, Mehmet Top. Analytic Hierarchy Process for Hospital Site Selection. Healthy policy and Technology. 2019.2

- [10] 姜启源, 谢金星, 叶俊. 数学模型(第四版). 高等教育出版社. 北京. 2011.1. P263-P266
- [11] 冯义, 李洪东, 田廓, 熊浩, 张贯一. 基于熵权和层次分析法的电力客户风险评估及其规避. 继电器. 2007.12.16
- [12] 李晗. 恶劣天气下港口船舶应急疏散顺序研究. 大连海事大学硕士学位论文. 2018.3
- [13] 屈云超, 密集人群疏散行为建模与动态特性研究, 北京交通大学博士学位论文, 2015.1