

商用建筑室内火灾应急疏散路径规划算法

董皓男¹, 叶晓彤¹, 郝从朴²

(武汉大学 测绘学院, 武汉 湖北 430079)

摘要: 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件发生时, 有效的疏散路径能减少人员伤亡和财产损失。论文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, 其次, 提出了可以考虑动态人流分布以避免拥堵的改进 Dijkstra 算法, 最后给出了室内火灾疏散路径规划的实现步骤。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, 430079)

Abstract: With the growing complexity of the indoor structure of commercial buildings, efficient evacuation routes can reduce casualty loss when indoor fire occurs. This paper proposes an improved evacuation algorithm for commercial building evacuation, which employs combined weight and introduces a monitor system based on Dijkstra algorithm. First, a weighting model considering of population, fire condition and potential fire risks is employed to determine the evacuation priority of indoor room, as a combination of AHP and entropy weight method. Then on the basis of the priority order, evacuation routes are planned by the improved Dijkstra algorithm which can monitor real-time population distribution during the process. At last it represents the implementation of the evacuation routes. 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

商业建筑内部结构复杂, 人群密度大, 室内火灾发生时, 一种快速、合理的应急疏散方案能减少人员伤亡。目前, 针对室内疏散问题, 学界提出大量宏观疏散算法。刘毅, 沈斐敏提出的算法随环境变化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], 因无法保证全局最优性则很少被采用于设计疏散算法。迟光华, 谢君等提出基于 Dijkstra 算法的分阶段疏散算法^[3]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], 无法保证火灾点附近人群疏散的顺序。

因此, 本文提出一种新的疏散路径规划算法, 并通过实验, 说明算法可行性。

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。2) 疏散人群容易发生拥堵现象。

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, 优先疏散火灾点附近的人群。其次, 为每条弧段设置人数容载量, 随路径的规划更新道路容载量, 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

本文利用基于序数的层次分析法^[5]和熵权法计算各疏散指标的主、客观权重, 采用组合赋权法, 确定房间疏散顺序。

层次分析法可以根据影响室内火灾的

收稿日期: 2019 年 7 月 9 日

基金项目: 武汉大学大学生科技创新项目: 国家级项目(项目编号: 201810486076)

作者简介: 董皓男(1997——)男, 本科生, 主要研究方向为摄影测量。E-mail: august_dong@163.com

叶晓彤(1998——)女, 本科生, 主要研究方向为地理信息系统。E-mail: yext0422@126.com

郝从朴(1997——)男, 本科生, 主要研究方向为地理信息系统。E-mail: 441623793@qq.com

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。室内火灾下的指标层次图如图 1 所示。

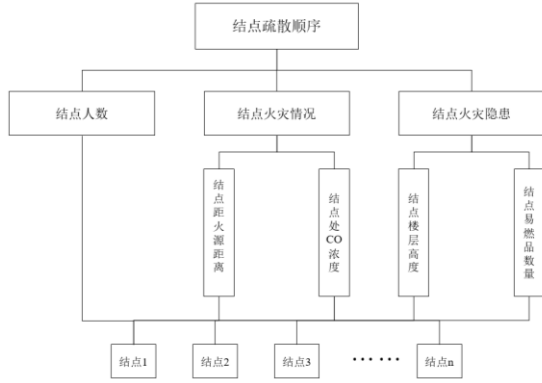


图 1 火灾下室内房间疏散顺序指标结构图

Fig 1: Indoor Room Evacuation Sequence indicator structure under fire.

统计分析后，根据序数百分比建立权值映射表，评分分为 7 个等级，之后计算层次分析法下的权重^[6]。

熵权法是目前广泛应用于实际的客观赋权法之一^[7]。根据图 1 所示的各项指标，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 $(r_{ij})_{m \times n}$ 。然后对矩阵进行去量纲化、归一化处理。计算每个指标的熵权值 g_j 。

考虑到层次分析法具有一定的主观性，熵权法缺乏一定的理论支撑。本文采用组合赋权法，以得到合理、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 。组合权值计算式为^[8]：

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

则，每个房间的疏散顺序，即疏散顺序如(2)式， $weight_j$ 值越大，则疏散顺序越高，疏散顺序越靠前。

$$weight_i = \sum_{j=1}^n r_{ij} \times W_j, i=1, \dots, m \quad (2)$$

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。算法运行时，实时更新图中弧段的人流容载量，并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、绕远或经过火灾区域。

设室内房间集为 $N = \{a | a=1, \dots, A\}$ ，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： $RT^{(k)} = \sum l_{ij}$ ，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，防止疏散路径经过火灾点。

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：

$$C_{ij} = \rho_{\max} s_{ij} \quad (3)$$

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(4)式更新：

$$c_{ij}^* = c_{ij} - H_k \quad (4)$$

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 $c_{ij}^* - H_j < 0$, 则使该弧段不连通, 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。

$$t_{ij}^{(k)} = \frac{l_{ij}}{v_{ij}^{(k)}} \quad (5)$$

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:

$$\min T^{(k)} = \max \sum t_{ij} \quad (6)$$

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 和火灾发生点位置, 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, 显示路径不存在, 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; 否则存储路径。
 - 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。

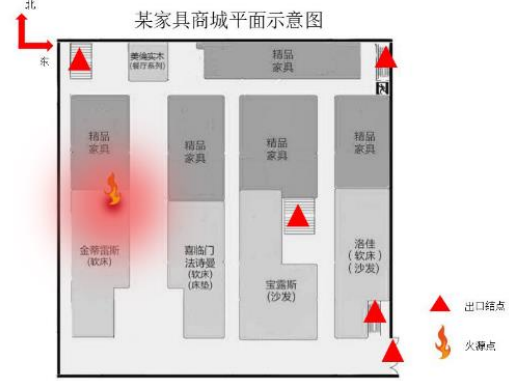


图 2 家具商场火情示意图

Fig2: Fire Map of the Mall

通过商场视频提取、前期资料调查、无线传感器网络通信等手段, 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。

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, 并查询映射表。

一级指标评分结果为: 人数比火情为 2: 1, 人数比火灾隐患为 5: 1, 火情比火灾隐患为 5: 1。同理, 统计各二级指标的百分比, 映射得到二级指标评分为: 据火源距离比 CO 浓度为 1: 5。楼高比易燃物数量为 1: 5, 所以一、二级指标的成对比较矩阵为:

$$A_1^1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 5 \\ 1/2 & 1 & 5 \\ 1/5 & 1/5 & 1 \end{bmatrix}, A_2^2 = A_3^3 = \begin{bmatrix} 1 & 1/5 \\ 5 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

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, 计算权值结果为: 一级指标权值: 房间人数为 0.556, 火灾情况为 0.353, 火灾隐患为: 0.008。

二级指标权值：CO 浓度为 0.833，火源距离为 0.167。楼层高为 0.167，易燃物浓度为 0.833。故以房间 CO 浓度表示房间火灾情况，以房间易燃物数量代表火灾隐患。

模拟获取房间各指标数据，利用组合赋权法计算一级指标组合权值结果：房间人数为 0.435，火灾情况为 0.35，火灾隐患为 0.215。

再由(2)式，计算得到的房间疏散顺序为：7, 3, 1, 8, 5, 6, 10, 4, 2, 9。(即第七号房间作为第一个疏散的结点)

3.2 规划疏散路径

根据已知静态地图，取 $v_{ij} = 3m/s$ ，并利用公式(5)计算得到疏散用时。选用 $\rho_{max} = 4人/m^2$ 计算道路容载量^[9]，同时使用权值计算结果，利用改进的 Dijkstra 算法进行全区域的疏散路径规划。路径规划结果如表 1 所示：

表 1 根据实际情况优化后的疏散路径规划

Tab 1: Optimized Evacuation Path Planning Based On Real Condition

起点序号	疏散顺序	人数/人	路线	疏散用时/s
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 3 所示

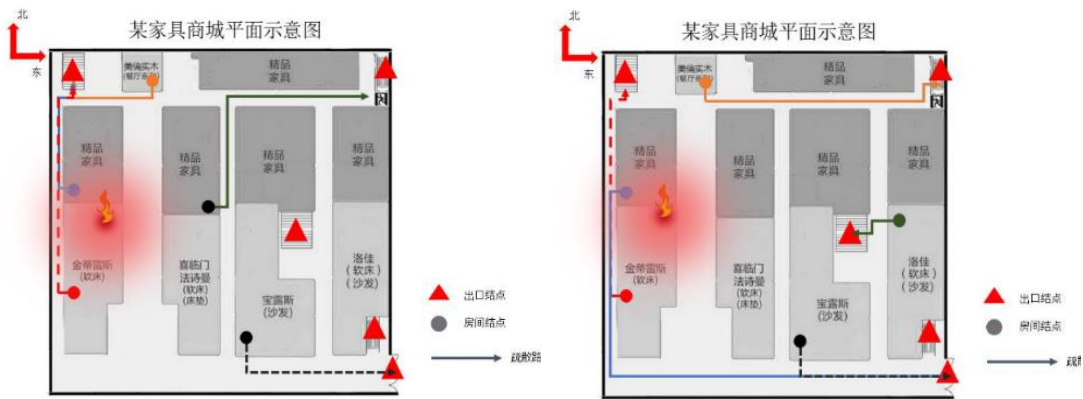


图 3 传统疏散路径（左）和优化后疏散路径（右）

Fig 3: Traditional Evacuation Path (Left) and Optimized Evacuation Path (Right)

从上述两图可以看出，传统 Dijkstra 算法路线规划仅考虑了结点间的物理距离，未将不同人员聚集点处的实时人数分布纳入考量，故在整体疏散方案中，每个出口处最

终疏散的人员并不均匀，且容易出现部分道路过度拥挤而部分道路空置等不合理情况。优化后的算法在考虑每个节点处的人员、受灾严重情况等环境因素后，对路段上可能出

现的拥堵进行实时监测。当弧段上人流超出容量时，则为当前人群重新规划疏散路径。

举了算法优化前后各出口和部分弧段的疏散的人数比较。

为进一步展示算法的优化效果，表 2 列

表 2 优化前后出口处和各弧段人流量对比

Tab 2: Comparison of Optimized Population to Origin Population of Exits and Arcs

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

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量(50 人)而造成拥挤，所以疏散时间无限延长。在优化的算法中该情况被有效避免。同时，原空置的弧段 18-22 也进行了疏散人员的分配。而 11 出口则由原始的 103 人下降至 50 人。

因此，优化后的算法使人员分布更加合理，也避免了弧段上可能产生的拥堵，合理利用了空置的弧段资源。

4 结论

本文使用结合层次分析法和熵权法的组合赋权法建立了赋权模型，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以避免拥堵的改进 Dijkstra 算法。通过模拟实验验证，本方法可以有效避免在疏散过程中可能出现的拥堵现象，提高室内空间的利用率，提升疏散方案的安全性。

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] 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

[6] Tezcan Sahin, Saffet Ocak, Mehmet Top. Analytic Hierarchy Process for Hospital Site Selection. Healthy policy and Technology. 2019.2

[7] 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

[8] 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

[9] 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

基金项目：
武汉大学大学生创新创业国家级项目(编号：201810486076)
Foundation Support: Wuhan University National Innovation and Entrepreneurship Program for undergraduates. (Number:201810486076)

第一作者简介：
董皓男，本科生，主要研究方向为摄影测量与遥感。
Email: august_dong@163.com

First Author: Haonan Dong, Undergraduate, majors in Photogrammetry. Email: august_dong@163.com

叶晓彤，本科生，主要研究方向为地理信息系统。
Email: yext0422@126.com

First Author: Xiaotong Ye, Undergraduate, majors in Geographic Information System.
Email: yext0422@126.com