

## 基于IAHP的地下商业街火灾风险评价

潘杰,施式亮,李润求,唐凌

(湖南科技大学 能源与安全工程学院,湖南 湘潭 411201)

**摘要:**为了降低地下商业街火灾带来的损失,提出运用区间层次分析法(IAHP)对地下商业街火灾进行风险评价。采用改进的Delphi法,从防火能力、灭火能力、消防管理和疏散能力4个方面,构建地下商业街火灾3级安全评价指标体系。运用区间特征根法(IEM)计算各评价指标的权重值,并在总目标下进行权重排序。为了印证评价模型的可靠性,以湘潭河西地下商业街火灾系统为实例进行运算,结果表明湘潭河西地下街火灾主要危险因素为:人员的逃生能力、消防宣传力度、火灾负载,评价结论与实际情况相符。

**关键词:**湘潭;地下商业街;火灾;区间层次分析法;IAHP;风险评价;权重排序

**中图分类号:**X932

**文献标识码:**A

## Underground commercial street fire risk evaluation based on IAHP

PAN Jie, SHI Shi-liang, LI Run-qiu, TANG Lin

(School of Energy & Safety Engineering, Hunan university of science & technology, Hunan Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** To reduce the losses caused by fire disaster of underground commercial street, Using Interval Analytic Hierarchy Process (IAHP) to assess the risk of underground commercial street fire disaster. Applying modified Delphi method from 4 aspects such as: fire resistance property, fire-fighting capability, fire management and evacuation capability to build third-level safety evaluation index system of underground mall fire disaster. Adopting IEM to calculate the weight value of each index, and conduct the rank of weight value under the overall objective. To confirm the reliability of evaluation model, Took west Xiangtan underground commercial street fire disaster system as an example for calculation, the result of evaluation showed that the main risk factors of the underground commercial street of west Xiangtan fire disaster are divided into three aspects: ability of escaping, fire fighting propaganda, fire load of fire disaster. AS a result, evaluation conclusion correspond with the actual situation.

**Key words:** underground commercial street; fire; Interval Analytic Hierarchy Process; IAHP; safety evaluation; rank of weight value

随着城市经济的发展,地下商业街的规模已成为城市发达水平的重要衡量标准。与地上建筑相比,地下建筑火灾存在火灾负载大、火势难以控制、扑救困难、人员伤亡及财产损失大等特点<sup>[1-3]</sup>。据统计,地下空间一旦发生火灾,其造成的损失远胜于地上空间火灾。因此,采用科学的方法对地下商业街火灾进行安全评价,有着极其重要的意义。为了解决这些问题,马德钟等<sup>[4]</sup>采用贝叶斯网络模型对地下空间火灾进行风险评

价,此方法解决了地下商业街火灾因素的不确定性,但其结构繁杂,评价结果容易出现偏差;杨胜州等<sup>[5]</sup>对地下交通枢纽站火灾烟气控制进行数值模拟研究,但对于地下商业街这样的模糊系统,该方法计算量大且容易忽视火灾诱发潜在因素;吴凤等<sup>[6]</sup>对地下商业街火灾烟气流动进行实验研究,但其偶然性强,且操作环境条件高。区间层次分析法(Interval Analytic Hierarchy Process,简称IAHP)将区间模糊数学与传统AHP相结合<sup>[7]</sup>。在

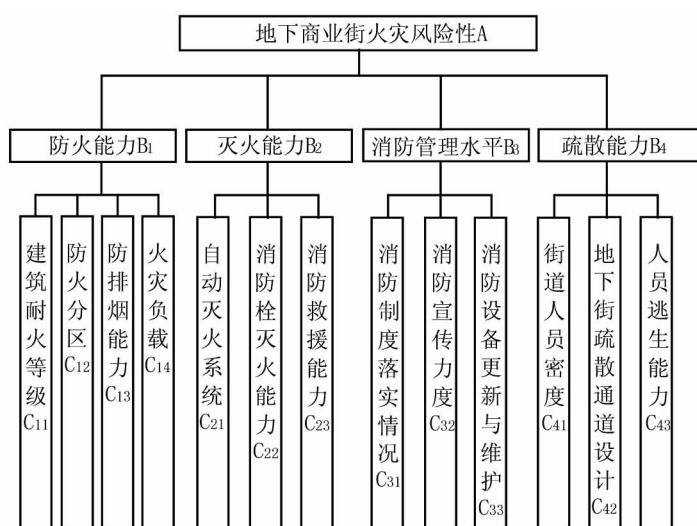


图1 地下商业街火灾安全评价层次结构

Fig.1 Hierarchy structure of safety assessment

继承了传统层次分析法(AHP)化繁为简和全面考虑优点的同时,优化了专家打分环节,克服传统层次分析法的片面性。基于此,本文提出运用区间层次分析法(IAHP)对地下商业街火灾进行风险评价。

## 1 基于 IAHP 地下商业街火灾风险评价模型

### 1.1 地下商业街火灾风险评价指标体系

运用改进的 Delphi 法,咨询地下商业街总设计师、街内安全防火负责人和消防机构,结合人、物、环境和管理,构建地下商业街火灾 3 级风险评价指标体系<sup>[8]</sup>。分别定义为目标层、准则层和影响因子层。地下商业街火灾风险层次结构模型如图 1 所示。

### 1.2 地下商业街火灾风险区间判断矩阵

IAHP 定量过程与 AHP 相似,专家结合评分标度对影响因子间对比严重程度进行区间评估。专家组由 6 名资深防火专家组建而成,评分标度采用 AHP“1~9”标度<sup>[9]</sup>。由地下商业街火灾安全评价层次指标体系,结合专家评分结果,可构造 5 个区间判断矩阵,即:总目标下区间判断矩阵( $B-A$ ),防火能力区间判断矩阵( $C_{1i}-B_1$ ),灭火能力区间判断矩阵( $C_{2i}-B_2$ ),消防管理水平区间判断矩阵( $C_{3i}-B_3$ )和疏散能力区间判断矩阵( $C_{4i}-B_4$ )。

### 1.3 IAHP 权重计算与排序

IAHP 权重计算方法主要包括区间特征根法、随机模拟法、迭代法、构造互补矩阵法等。笔者选择区间特征根法(IEM)。由于计算量较大,宜采

用计算机软件运算。主要计算过程如下<sup>[10]</sup>:

设  $A = (a_{ij})_{n \times n}$  为一致性区间矩阵,即  $a_{ij} = [a_{ij}^-, a_{ij}^+]$  且  $a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}} = [\frac{1}{a_{ij}^+}, \frac{1}{a_{ij}^-}]$ , 记  $A^+ = (a_{ij}^+)_{n \times n}$ , 并且记  $A = [A^-, A^+]$ , 同样对于区间向量  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 也存在  $x_i = [x_i^-, x_i^+]$ , 记  $x^- = [x_1^-, x_2^-, \dots, x_n^-]^T$ ,  $x^+ = [x_1^+, x_2^+, \dots, x_n^+]^T$ , 并记  $x = [x^-, x^+]$ 。

(1)将区间判断矩阵分解成两个定值矩阵: $A^-$ 、 $A^+$ 。计算这两个判断矩阵的最大特征根: $\lambda^-, \lambda^+$ ;

(2)计算最大特征根所对应的归一化特征向量: $x^-, x^+$ ;

(3) $x = [kx^-, mx^+]$  是对应于  $\lambda$  的全体特征向量,  $x^-, x^+$  分别为  $A^-, A^+$  对应  $\lambda^-, \lambda^+$  的任一正特征向量, 其中  $k, m$  为满足  $0 < kx^- \leq mx^+$  的全体正实数。由  $A^- = (a_{ij}^-)_{n \times n}$ ,  $A^+ = (a_{ij}^+)_{n \times n}$  计算  $k, m$  值:

$$k = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^+}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^+}}; m = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^-}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^-}} \quad (1)$$

(4)求区间权重向量  $W$ :

$$W = [kx^-, mx^+] \quad (2)$$

(5)为了简化运算,将区间权重向量转化为中心形式:

$$\bar{W} = [m(A_i), r_i] \quad (3)$$

式中  $m(A_i)$  是相对权重的估计, 有  $m(A_i) = \frac{1}{2}(kx_i^- + mx_i^+)$ ;  $r_i$  为相对权重估计不确定性偏差, 有  $r_i = m(A_i) - kx_i^-$ 。

(6)总目标下权重排序:

如果我们已经计算出  $k-1$  层上  $n_{k-1}$  个元素相对于总目标的排序权重区间矢量  $W^{(k-1)} = (W_1^{(k-1)}, W_2^{(k-1)}, \dots, W_n^{(k-1)})^T$ , 第  $k$  层上  $n_k$  个元素对第  $k-1$  层上第  $j$  个元素为准则的排序权重区间矢量设为  $P^{(k)} = (P_{1j}^{(k)}, P_{2j}^{(k)}, \dots, P_{nj}^{(k)})$ , 式中不受  $j$  支配的元素的权重为 0。令  $P^{(k)} = (P_1^{(k)}, P_2^{(k)}, \dots, P_{n-1}^{(k)})$ , 为  $n_k \times n_{k-1}$  阶矩阵, 表示  $k$  层上元素对无  $k-1$  层上各元素的排序。则第  $k$  层上元素对总目标的合成排序矢量  $W^{(k)}$  由下式给出:

$$W^{(k)} = (w_1^{(k)}, w_2^{(k)}, \dots, w_n^{(k)})^T = P^{(k)} \cdot W^{(k-1)}$$

$$\text{通常: } W^{(k)} = P^{(k)} P^{(k-1)} P^{(k-2)} \dots W^{(2)} \quad (4)$$

式中  $W^{(k)}$  为第  $k$  层元素相对于总目标的权重值;  $P^{(k)}$  为第  $k$  层上元素对  $k-1$  层上各元素的权重排序。

2 应用实例

2.1 地下商业街基本情况

湘潭河西地下商业街由湘潭河西建设北路、韶山中路、车站路的地下部分呈三角之势环绕而成,如图2所示。全线贯通于2014年10月,全长1800 m。人行街道宽4.5 m,内设600个商铺,由于部分区域有商贩摆摊,所以实际商铺为678个。其中90%左右商铺以销售服装与鞋包为主,其它为餐饮、电器和游乐场等。地下街平均人流量约为50人/min。整条地下街共有40号进出口,进出口成对存在,所以约每隔90 m设1对进出口,街内有明显安全出口引导标识。进出口阶梯长约12 m,宽2.5 m,部分单向进口或出口宽1.5 m。街道无明显消防宣传公告。内设30处室内消防栓,街内每隔100 m,设置电动防火卷帘门。地下街通风靠10台大功率风机24 h不停运转维持。设有6名执勤人员。



图2 湘潭地下商业街线路图

Fig.2 Street circuit diagram

2.2 参数的确定

经综合考虑,专家组成员确定如下:火灾安全评价方面的大学教授2名,湘潭消防支队防火副部长2名,湘潭地下商业街防火负责人2名。由专家对5个判断矩阵进行区间赋值,赋值结果见表1~表5。

表1 总目标下区间判断矩阵

Tab.1 Interval judgment matrix under total objective

| A              | B <sub>1</sub> | B <sub>2</sub> | B <sub>3</sub> | B <sub>4</sub> |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| B <sub>1</sub> | [1,1]          | [1/4,1/3]      | [1/3,1/2]      | [5,6]          |
| B <sub>2</sub> | [3,4]          | [1,1]          | [4,5]          | [7,8]          |
| B <sub>3</sub> | [2,3]          | [1/5,1/4]      | [1,1]          | [4,5]          |
| B <sub>4</sub> | [1/6,1/5]      | [1/8,1/7]      | [1/5,1/4]      | [1,1]          |

表2 防火能力区间判断矩阵

Tab.2 Interval judgment matrix under Fire prevention ability

| B <sub>1</sub>  | C <sub>11</sub> | C <sub>12</sub> | C <sub>13</sub> | C <sub>14</sub> |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| C <sub>11</sub> | [1,1]           | [1/4,1/3]       | [1/6,1/5]       | [1/7,1/5]       |
| C <sub>12</sub> | [3,4]           | [1,1]           | [1/3,1/2]       | [1/8,1/6]       |
| C <sub>13</sub> | [5,6]           | [2,3]           | [1,1]           | [1/3,1/2]       |
| C <sub>14</sub> | [5,7]           | [6,8]           | [2,3]           | [1,1]           |

表3 灭火能力区间判断矩阵

Tab.3 Interval judgment matrix under fire extinguishing capability

| B <sub>2</sub>  | C <sub>21</sub> | C <sub>22</sub> | C <sub>23</sub> |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| C <sub>21</sub> | [1,1]           | [1/9,1/7]       | [1/7,1/6]       |
| C <sub>22</sub> | [7,9]           | [1,1]           | [5,6]           |
| C <sub>23</sub> | [6,7]           | [1/6,1/5]       | [1,1]           |

表4 消防管理水平区间判断矩阵

Tab.4 Interval judgment matrix under fire management level

| B <sub>3</sub>  | C <sub>31</sub> | C <sub>32</sub> | C <sub>33</sub> |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| C <sub>31</sub> | [1,1]           | [1/7,1/6]       | [1/3,1/2]       |
| C <sub>32</sub> | [6,7]           | [1,1]           | [3,4]           |
| C <sub>33</sub> | [2,3]           | [1/4,1/3]       | [1,1]           |

表5 疏散能力区间判断矩阵

Tab.5 Interval judgment matrix under Human factor

| B <sub>4</sub>  | C <sub>41</sub> | C <sub>42</sub> | C <sub>43</sub> |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| C <sub>41</sub> | [1,1]           | [1/2,1]         | [1/5,1/4]       |
| C <sub>42</sub> | [1,2]           | [1,1]           | [1/7,1/5]       |
| C <sub>43</sub> | [4,5]           | [5,7]           | [1,1]           |

2.3 权重计算与排序

采用 Excel 软件进行权重计算。经计算可得到5个区间判断矩阵中心形式的区间权重向量,依次为: $\bar{W}$ 、 $\bar{W}_1$ 、 $\bar{W}_2$ 、 $\bar{W}_3$ 、 $\bar{W}_4$ 。

$$\begin{aligned}\overline{W} &= \begin{bmatrix} 0.1707 & 0.0062 \\ 0.5615 & 0.0204 \\ 0.2017 & 0.0073 \\ 0.0505 & 0.0018 \end{bmatrix} & \overline{W}_1 &= \begin{bmatrix} 0.0575 & 0.0017 \\ 0.1224 & 0.0049 \\ 0.2613 & 0.0083 \\ 0.5430 & 0.0210 \end{bmatrix} \\ \overline{W}_2 &= \begin{bmatrix} 0.0611 & 0.0023 \\ 0.6941 & 0.0155 \\ 0.2345 & 0.0009 \end{bmatrix} & \overline{W}_3 &= \begin{bmatrix} 0.0972 & 0.0033 \\ 0.6967 & 0.0129 \\ 0.2183 & 0.0140 \end{bmatrix} \\ \overline{W}_4 &= \begin{bmatrix} 0.1332 & 0.0073 \\ 0.1543 & 0.0173 \\ 0.7096 & 0.0103 \end{bmatrix}\end{aligned}$$

一般情况下,用  $m(A_i)$  的数值大小来表示权重大小。那么对于 B-A 矩阵,可以直接将  $\overline{W}$  中的  $m(A_i)$  归一化就能得到其权重值。对于 C-B 判断矩阵,首先将  $\overline{W}_1$ 、 $\overline{W}_2$ 、 $\overline{W}_3$ 、 $\overline{W}_4$  进行归一化,然后将归一化的  $m(A_i)$  与之对应的上一层次的  $m(A_i)$  相乘,这样就可以得到这个因素对目标层的权重大小。例如对于  $C_1$  这个元素,首先将  $\overline{W}$  进行归一化,处理后得到  $m(A_i)$  的值为 0.093 4,  $B_1$  相对于总目标的权重为 0.173 4,那么  $C_1$  相对于总目标的权重为  $0.0934 \times 0.1734 = 0.0162$ 。同理,对所有的元素进行相对于总目标的权重计算,计算结果见表 6。

表 6 总目标下权重值

Tab. 6 Weight value under total objective

| 评价准则           | 权重值     | 评价指标                  | 总权重值    |
|----------------|---------|-----------------------|---------|
| 防火能力<br>(B1)   | 0.173 4 | 建筑耐火等级( $C_{11}$ )    | 0.010 1 |
|                |         | 防火分区( $C_{12}$ )      | 0.021 6 |
|                |         | 防排烟系统( $C_{13}$ )     | 0.046 0 |
|                |         | 火灾负载( $C_{14}$ )      | 0.095 7 |
| 灭火能力<br>(B2)   | 0.051 2 | 自动灭火系统( $C_{21}$ )    | 0.003 2 |
|                |         | 消防栓灭火能力( $C_{22}$ )   | 0.035 9 |
|                |         | 消防救援能力( $C_{23}$ )    | 0.012 1 |
|                |         | 消防制度落实情况( $C_{31}$ )  | 0.019 7 |
| 消防管理<br>水平(B3) | 0.204 9 | 消防宣传力度( $C_{32}$ )    | 0.141 0 |
|                |         | 消防设备更新与维护( $C_{33}$ ) | 0.044 2 |
|                |         | 街道人员密度( $C_{41}$ )    | 0.076 2 |
| 疏散能力<br>(B4)   | 0.570 5 | 地下街疏散通道设计( $C_{42}$ ) | 0.088 2 |
|                |         | 人员逃生能力( $C_{43}$ )    | 0.406 0 |

对指标层的权重值大小排序,排序结果为: $C_{43} > C_{32} > C_{14} > C_{42} > C_{41} > C_{13} > C_{33} > C_{22} > C_{12} > C_{31} > C_{23} > C_{11} > C_{21}$ 。由排序结果可知各影响因子造成事故损失的危险程度。

## 2.4 评价结果分析

通过权重排序结果,得出湘潭地下商业街火

灾主要危险在于:人员的逃生能力,消防宣传力度,火灾负载。湘潭地下商业街出口隐蔽,街道行人大多为普通市民,缺乏安全逃生技能,疏散困难;街内广告众多,却无一用于消防宣传引导,顾客缺乏防火意识与灭火能力;商品类型大多为服装、鞋、包等,火灾负载大。

## 2.5 火灾风险管理对策措施

结合上文评价结论与相关文献参考,制定地下商业街火灾风险管理对策措施。

(1)提高疏散效率:地下商业街人口密度大,且出口隐秘,火灾发生时行人由于缺乏逃生技能,容易发生拥堵甚至踩踏事故。地下街应该联合当地消防机构定期进行消防演练,优化逃生路线。同时加强消防宣传与安全疏散引导,提高火灾疏散效率。

(2)分区设置空间:地下商业街火灾负载大,火势蔓延迅速,为了减缓火势的蔓延,可采用分区设计。分区类型一般包括敞开式和封闭式,湘潭地下街采用封闭式,火灾发生时可关闭防火门,抑制火灾发展,防止火势扩大。

(3)提升排烟能力:地下街火灾发生时,烟气容易聚集。为了使烟气迅速消散,在每个分区设立排烟口,通风机必须具备足够的风量,并保证风机在高温下能持续作业。

(4)加强防火监督:地下街商品类型多为易燃物品,一旦起火,火势极易扩大。对于这些“重灾区”,必须加强监督,防患于未然。首先配备精密摄像头与温感探测器,一旦发现火源,第一时间扑灭;其次,对店员进行防火培训,提高防火意识,同时也能提醒与纠正顾客的不安全行为;最后,配备专业消防巡视人员,24 h 巡查街内情况。

## 3 结论

运用 IAHP 评价地下商业街火灾系统,由 AHP 与模糊数学结合而成,评价过程层次分明,评价结论科学可靠,克服了专家决策的不确定性。以湘潭河西地下商业街为工程实例,其评价结果表明主要危险在于:人员的逃生能力,消防宣传力度,火灾负载,评价结果与实际情况相符。印证了 IAHP 运用于地下商业街火灾风险评价的可行性。

## 参考文献:

[1] 姜树立,刘华伟. 地下商业建筑火灾的特点及预防措施

- [J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2008, 10(6): 146-150.
- [2] 王路之, 王果山, 朱玉贵. 哈尔滨市地下商业街火灾特点及灭火对策[J]. 武警学报, 1998(1): 25-31.
- [3] 毛海林. 浅谈大型商场的火灾危险性及消防安全管理对策—以重庆市沙坪坝区三峡广场地下商场为例[J]. 中国科技投资, 2012, 2(12): 10-13.
- [4] 马德仲, 丁文飞, 刘胜楠. 基于贝叶斯网络的地下空间火灾风险评估方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(11): 151-155.
- [5] 杨胜州, 莫善军, 潘宏宏. 地下交通枢纽站火灾烟气控制数值模拟研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(12): 49-52.
- [6] 吴凤, 邓军. 地下商业街烟气流动实验研究[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(12): 60-63.
- [7] 王振, 刘茂. 应用区间层次分析法(IAHP)研究高层建筑火灾安全因素[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(1): 12-18.
- [8] 葛悦, 汪彤, 徐亚博. 基于灰色层次分析法的突发事件应急管理评价[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(12): 81-86.
- [9] 王飞, 胡静娴, 黄晶. AHP和模糊综合评判在绿色建筑中的评价研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2014, 2(31): 106-109.
- [10] 吴育华, 诸为, 李新全, 等. 区间层次分析法—IAHP[J]. 天津大学学报: 自然科学版, 1995, 28(5): 700-705.
- (责任编辑 王利君)

(上接第70页)

松, 空地面积大, 有部分机械残留。此外, 二矿的标志性建筑也在。适合做科普教育基地。

此区域的废旧厂房现状与博物参观展览区的厂房相似, 做相同的改造处理。在此基础上, 一部分做成科普系列馆, 令游客了解矿业生产加工, 为游客普及矿业科普知识, 空地上可做露天科普教育基地; 另一部分做成学校教育基地, 为学生提供实习实践的资源场地, 一些厂房改建为学生宿舍, 厂房东侧空地的煤渣, 铲车等一系列工具都可作为教学使用。

区域南边的二矿标志性建筑独具特色, 是二矿的精神文化象征。它由4个相连的圆柱形建筑组成, 下面被废旧火车道贯穿。可保留现状, 清理周边环境, 树立标牌介绍, 留出空地广场作为观赏建筑的活动空间。它与入口的标志性雕塑、山顶的眺望亭共同构成一条轴线, 串联起整个公园。

## 4 结论

针对峰峰矿区二矿实际情况, 提出了打造综合性煤矿特色公园方案, 并对二矿进行了区域、交

通、空间及树林等整体规划。希望能为峰峰矿区及其他小型煤矿工业废弃地景观规划提供参考。

## 参考文献:

- [1] 峰峰煤矿编委会. 峰峰煤矿志: 第二部[Z]. 北京: 新华出版社, 2009.
- [2] 李晓丹, 孙思嘉, 赵大千, 等. 矿业遗产保护研究探讨—以峰峰矿区为例[J]. 中国园林, 2013(9): 101-105.
- [3] 李晓丹, 陈智婷, 孙思嘉. 峰峰矿区矿冶工业遗产保护改造规划研究[J]. 城市发展研究, 2014(12): 13-16.
- [4] 刘抚英. 后工业景观设计[M]. 上海: 同济大学出版社, 2013.
- [5] 李宏彦. 大同晋华宫矿国家矿山公园煤矸山景观设计初探[D]. 上海: 华东师范大学, 2010.
- [6] 王辉, 李俊卿, 王鹏飞. 传统农耕文化在景观中的表达[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2014, 31(1): 40-43.
- [7] 万营娜, 寇华旭, 郭东阁, 等. 花洲书院园林特征分析[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2014, 31(1): 44-46.

(责任编辑 王利君)