

基于博弈论—云模型的医院建筑火灾风险评估*

Fire Risk Assessment of Hospital Buildings based on Game Theory—cloud Model

宋维举, 武向阳, 石华旺, 谯 锋

(河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 为了评估医院建筑火灾风险, 提出基于博弈论—云模型的医院建筑火灾风险评估模型。通过分析医院建筑火灾的事故原因, 建立了包含16个评价指标的医院建筑火灾风险评估指标体系, 将博弈理论的综合赋权思想和云模型理论结合, 构建了基于博弈论—云模型的医院建筑火灾风险评估模型, 用该模型来确定各评价指标的综合权重和评价对象的风险等级; 将该模型应用于某医院, 评价得出火灾风险等级为“较安全”, 与现实情况基本一致。结果表明: 所建模型可以用于公共医院建筑火灾风险评估, 可为公共医院建筑火灾评估提供借鉴。

关键词: 火灾风险评估; 博弈论; 云模型; 改进层析分析法; 熵权法

中图分类号: TU998 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 05-0142-07

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.05.026

SONG Weiju, WU Xiangyang, SHI Huawang, QIAO Feng

(School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: In order to evaluate the risk of hospital building fires, proposes a hospital building fire risk assessment model based on game theory cloud model. By analyzing the causes of hospital building fires, a risk assessment index system for hospital building fires was established, which includes 16 evaluation indicators. The comprehensive weighting idea of game theory and cloud model theory were combined to construct a hospital building fire risk assessment model based on game theory cloud model. This model was used to determine the comprehensive weight of each evaluation indicator and the risk level of the evaluation object; Applying this model to a hospital, the fire risk level was evaluated as "relatively safe", which is consistent with the actual situation. The results indicate that the established model can be used for fire risk assessment of public hospital buildings, and can provide reference for fire assessment of public hospital buildings.

Keywords: fire risk assessment; game theory; cloud model; improved chromatography; entropy weight method

0 引言

医院是救死扶伤、治病救人的场所, 是重要的公共建筑, 一旦发生火灾, 可能发生重大财产损失和人员伤亡^[1]。由于医院建筑的复杂性和特殊性, 防火工作变得至关重要。从2000年至今, 医院建筑火灾偶有发生, 比如伊拉克首都医院2021年4月25日发生火灾, 导致82人死亡, 110人受伤, 造成了不可弥补的损失。因此, 研究医院火灾风险具有十分重要的意义。目前, 针对医院建筑的火灾风险评估研究较少。刘进等^[2]对风险矩阵法进行了改进, 并提出了融合

* 基金项目: 河北省自然科学基金项目 (E2019402395); 邯郸市科技计划项目 (21422053231)。

作者简介: 宋维举 (1986—), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 建筑消防安全、建筑安全管理。

通信作者: 武向阳 (1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 建筑消防安全、建筑安全管理。

收稿日期: 2023-03-21

改进风险矩阵法与层次分析法的医院建筑火灾风险评估模型，确定医院建筑的火灾风险等级；张朝晖^[3]运用安全检查表法对医院建筑评价指标打分，并利用层次分析法进行消防安全评估；温超敏^[4]运用德尔菲法建立医院消防安全评价体系，采用层次分析法确定指标权重以及选取指数评价法进行医院火灾评价，并对医院消防提出改善建议。在其他公共建筑方面，李杨等^[5]从火源、建筑物、人员三方面建立公共建筑火灾评价体系，并运用证据理论确定公共建筑的火灾风险等级；刘晗等^[6]采用 AHP 和熵权法综合赋权确定古建筑火灾风险指标权重，利用改进集对分析法确定古建筑火灾风险等级；张立宁等^[7]运用熵权理论确定各评价指标的权重，引入未确知测度理论，构建了基于未确知测度的城市地下商业综合体评价模型，对城市地下商业综合体火灾风险进行评价。学者们的研究成果对于医院建筑火灾风险评估有一定的借鉴意义，但现阶段对火灾风险评价主要还是采用集对分析法、未确知理论等，这些方法存在指标分析不明确和风险等级划分模糊等问题。此外，在火灾风险指标权重的确定上存在主客观不均衡等问题。

综上所述，为科学准确地进行医院火灾风险评估，采用改进层次分析法和熵权法确定评价指标的主客观权重，基于博弈论思想确定指标的综合权重，运用云模型理论对医院建筑火灾风险进行综合评价，对比标准云与综合云相似度以及计算贴近度确定医院火灾风险等级。

1 医院建筑火灾风险评估评价指标权重确定

1.1 改进层次分析法——主客观权重

医院建筑火灾风险评估指标的主客观权重由改进层次分析法确定。传统层次分析法 (AHP)^[8]采用九标度法确定各因素的权重，在指标数量较多时其计算量较大，且分析结果受主观影响较大，无法有效保证分析结果的准确性和客观性。改进的层次分析法采用三标度法（见表 1），基于三标度法更容易判

表 1 改进层次分析法判断标准

Table 1 Improve the analytic hierarchy process judgment standard

标度	含义
2	i 因素比 j 因素重要
1	i 因素和 j 因素同等重要
0	i 因素没有 j 因素重要

断两个因素之间相互对比的重要程度，降低了人为主观判断对结果的影响。具体步骤如下：

(1) 根据指标之间的相互影响关系，构建层次结构模型。

(2) 采用三标度法构建比较矩阵 A 。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j} \\ \cdots & \ddots & \cdots \\ a_{i1} & \cdots & a_{ij} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： a_{ij} 为因素 i 与因素 j 的相对重要度。

(3) 由式 (1) 得到比较矩阵 A ，对矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 按行求和，计算重要性排序指数；计算比较因子 c_m ，通过相应公式转换，将比较矩阵 A 变换成中间矩阵 D ， $D = (d_{ij})_{n \times n}$ ，具体计算公式为：

$$s_i = \sum_{j=1}^n A_{ij} \quad (2)$$

$$\begin{cases} s_{\max} = \max(s_i) \\ s_{\min} = \min(s_i) \end{cases} \quad (3)$$

$$c_m = \frac{s_{\max}}{s_{\min}} \quad (4)$$

$$d_{ij} = \begin{cases} \frac{s_i - s_j}{s_{\max} - s_{\min}}(c_m - 1) + 1 & s_i \geq s_j \\ \left[\frac{|s_i - s_j|}{s_{\max} - s_{\min}}(c_m - 1) + 1 \right]^{-1} & s_i < s_j \end{cases} \quad (5)$$

(4) 通过中间矩阵计算最优传递矩阵 H ，其中 h_{ij} 计算公式为：

$$h_{ij} = \frac{1}{n} \sum_k^n \lg \frac{d_{ik}}{d_{jk}} \quad (6)$$

(5) 计算中间矩阵 D 的拟优一致矩阵 V ，其中 v_{ij} 的计算公式为：

$$v_{ij} = 10^{h_{ij}} \quad (7)$$

利用 Matlab 计算矩阵 V 的最大特征值特征向量，归一化处理后特征向量便是所求各指标的权重。

1.2 熵权法——客观权重

利用熵权法确定评价指标的客观权重^[9]。具体计算步骤如下：

(1) 构建 c 个评估对象， e 个评价指标的判断矩阵 $X = (x_{pq})_{ec}$ ，其中 x_{pq} 表示 p 评估对象给指标 q 的

研究与应用

评估值。

(2) 将判断矩阵 X 标准化处理得到 $R = (r_{pq})_{ec}$ 评价矩阵。

$$r_{pq} = \frac{x_{pq} - \min(x_{pq})}{\max(x_{pq}) - \min(x_{pq})} \quad (8)$$

式中: r_{pq} 为评价矩阵的每个元素; $\max(x_{pq})$, $\min(x_{pq})$ 分别为判断矩阵的最大值和最小值。

(3) 确定指标信息熵值 E_p 和信息效用值 d_p :

$$E_p = -\frac{1}{\ln c} \sum_{q=1}^c (f_{pq} \ln f_{pq}) \quad (9)$$

式中 $f_{pq} = \frac{r_{pq}}{\sum_{q=1}^c r_{pq}}$, 第 p 项指标的信息效用值等

于 1 与该指标信息熵值 E_p 相减的结果, 即 $d_p = 1 - E_p$ 。

(4) 确定各指标的熵权:

$$w_p = \frac{1 - E_p}{e - \sum_{p=1}^e E_p} \quad (10)$$

1.3 博弈论——组合赋权

利用改进层次分析法和熵权法计算评价指标的主客观权重之后, 需要确定主观权重和客观权重在指标评价中所占的份额, 保证各指标权重的协调性和合理性, 避免某一赋权方法的偏差。博弈论作为现代数学的重要部分, 常用于求解两个或者多个冲突的最优解, 以期达到预期效益最优^[10]。具体步骤如下:

(1) 将改进层次分析法和熵权法计算得到的各指标权重分别表示为向量 W_1 和 W_2 , 将 W_1 和 W_2 进行综合赋权表达, α_1 和 α_2 为组合系数:

$$W = \alpha_1 W_1^T + \alpha_2 W_2^T \quad (11)$$

(2) 找出最优分配系数, 使 W_1 和 W_2 、 W 权重向量差值最小:

$$\min \|W - W_j^T\|_2 \quad j = 1, 2 \quad (12)$$

(3) 构建向量方程组计算最优分配系数:

$$\begin{cases} \alpha_1 W_1 W_1^T + \alpha_2 W_1 W_2^T = W_1 W_1^T \\ \alpha_1 W_2 W_1^T + \alpha_2 W_2 W_2^T = W_2 W_2^T \end{cases} \quad (13)$$

式中: (W_1, W_2) 、 (W_1, W_1) 、 (W_2, W_2) 为权重向量的内积。

(4) 将 α_1 和 α_2 归一化处理:

$$\alpha'_j = \frac{\alpha_j}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad (14)$$

(5) 指标综合权重向量:

$$W' = \alpha'_1 W_1^T + \alpha'_2 W_2^T \quad (15)$$

2 基于博弈论—云模型的医院火灾风险评价模型

2.1 云模型理论

云模型是一种在概率论与模糊数学理论相结合的基础上, 实现某一个定性表示与定量表示相互转换的认知计算模型, 它能够反映出模糊性与随机性的内在关联, 建立起定性表示与定量之间的映射^[11]。云模型方法不仅考虑了医院建筑火灾安全评价的模糊性, 而且还考虑了其随机性, 弥补了模糊综合评价、灰色理论等风险评价方法的不足。

通过期望 Ex 、熵 En 、超熵 He 三个数字特征量来反映医院建筑火灾风险的定量特征。期望 Ex 是云在论域分布中的数学期望; 熵 En 反映论域内可以被模糊概念接受的云的取值范围; 超熵 He 是熵的不确定性度量, 在云图上为云滴的凝聚程度, 反映了评价指标的随机性。

2.2 模型计算步骤

2.2.1 标准云的确定

在参考 GB 50016—2014《建筑设计防火规范》基础上, 综合考虑医院建筑火灾安全管理的实际情况, 将建筑火灾风险等级划分为安全、较安全、一般安全、较不安全、危险 5 个等级, 每一个等级区间 $[x_{\min}, x_{\max}]$ 的标准云数字特征根据下式求得, 其中 k 为常数。

$$\begin{cases} Ex = \frac{x_{\min} + x_{\max}}{2} \\ En = \frac{x_{\min} - x_{\max}}{6} \\ He = kEn \end{cases} \quad (16)$$

2.2.2 评价云的确定

根据项目实际情况, 邀请 m 位专家对各评价指标进行打分, 计算出各指标对应的专家打分均值, 利用下式将各专家的打分情况进行综合, 形成各指标评价云, 其中 $S_u^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{u=1}^m (x_u - Ex_b)^2$ 为样本方差, x_u 为专家打分值 ($u = 1, 2, \dots, m$)。

$$\begin{cases} Ex_b = \frac{1}{m} \sum_{u=1}^m x_u \\ En_b = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sum_{u=1}^m |x_u - Ex_b| \\ He_b = \sqrt{S_u^2 - En_b^2} \end{cases} \quad (17)$$

2.2.3 综合云的确定

根据评价云和权重计算所得数据计算综合云模型，综合云能够综合反映项目的实际评价结果，基于评价云的期望、熵、超熵和各评价指标权重，计算综合云的数字特征值计算公式为：

$$\begin{cases} Ex_z = \sum_{u=1}^m w_c Ex_{bu}^2 \\ En_z = \sqrt{\sum_{u=1}^m w_c En_{bu}^2} \\ He_z = \sum_{u=1}^m w_c He_{bu} \end{cases} \quad (18)$$

其中， w_c 为评价指标权重。

2.2.4 云图相似度

云图相似度越大，说明两个云图特性越相似。因此，通过对比综合云与医院建筑火灾风险标准云之间的云图相似度，可确定具体项目的火灾安全等级，相似度越大，安全等级越贴合^[12]。标准云和综合云的相似度 s 的计算过程如下：

(1) 正态随机数 $E'_n \sim N(En, He^2)$ 和 $x_u \sim N(Ex, En^2)$ ；

(2) 计算 x_u 在标准云中的确定度 $s'_u = e^{-\frac{(x_u - Ex_b)^2}{2En_b^2}}$ ；

(3) 重复上述步骤得到 m 个 s'_u 确定度，最终确定信度为 $s = \frac{1}{m} \sum_{u=1}^m s'_u$ 。

3 医院建筑火灾风险评估模型的应用

3.1 医院建筑火灾风险指标体系

建立全面、系统的医院建筑火灾风险评估体系是对医院建筑火灾风险性有效评价的基础，也是使火灾风险性评价结果准确的前提^[7]。从医院建筑火灾事故成因角度出发，结合医院建筑火灾的特点，咨询专家对医院火灾风险评估指标选取的建议，依据 GB 50016—2014《建筑设计防火规范》和参考相关文献^[12-13]，构建由安全管理能力、消防设备、防火能力、疏散能力 4 个一级指标，及应急预案演习等 16 个二级指标的医院建筑火灾风险评估指标体系，如图 1 所示。

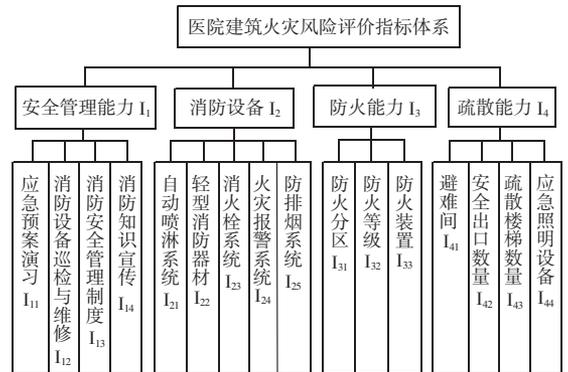


图 1 医院建筑火灾风险评估指标体系

Fig. 1 Hospital building fire risk assessment index system

为了验证基于博弈论—云模型理论的医院建筑火灾风险评估模型有效性，以华北某中医院建筑为实例进行火灾风险评估。该中医院项目地下 2 层，地上 9 层，一至六层为门诊部，七至九层为住院部，建筑面积约为 22 599.29 m²，建筑耐火等级为一级。在已确定的评价指标基础上，邀请火灾安全管理、建筑消防相关专家 10 人分别对指标进行打分，根据打分情况确定二级指标的评价数值，见表 2。

表 2 二级指标评价数值

Table 2 Evaluation value of secondary indicators

序号	专家指标打分															
	I ₁₁	I ₁₂	I ₁₃	I ₁₄	I ₂₁	I ₂₂	I ₂₃	I ₂₄	I ₂₅	I ₃₁	I ₃₂	I ₃₃	I ₄₁	I ₄₂	I ₄₃	I ₄₄
1	5.8	1.6	6.1	5.0	4.1	2	3.1	2.8	3.6	4.5	3.4	2.7	4.5	5.1	5.8	1.9
2	5.9	2.4	6.1	5.3	3.4	1.9	3.3	2.9	3.7	4.6	2.9	1.9	5.2	4.6	4.5	2.4
3	6.0	2.7	6.2	4.9	4.3	2.1	3.4	3.0	3.8	4.3	3.4	2.0	4.6	3.9	5.7	1.8
4	5.8	2.1	6.3	5.0	3.7	1.9	3.3	2.7	3.9	4.6	2.8	2.6	5.7	4.2	4.8	2.1
5	5.9	2.5	6.1	4.8	3.9	1.5	3.1	2.9	3.4	3.8	3.6	3.5	4.9	4.6	4.6	2.4
6	6.0	3.0	6.2	5.4	3.1	2.1	3.4	3.2	3.0	4.0	3.7	3.0	5.3	4.5	5.4	1.5
7	6.0	1.9	6.4	5.1	3.9	2.6	3.2	3.1	3.2	3.7	3.1	4.0	5.2	3.8	5.5	2.6
8	5.9	2.3	6.3	5.1	4.0	1.6	3.1	2.5	3.6	4.7	2.8	2.6	5.5	5.0	5.3	1.4
9	5.8	1.4	6.0	4.9	3.2	1.3	3.1	2.7	3.7	4.9	3.5	3.4	5.0	4.7	5.2	2.5
10	5.9	1.8	6.1	5.0	3.6	1.9	3.2	2.6	3.5	4.1	3.0	2.7	4.8	4.3	5.0	1.7

研究与应用

3.2 指标综合权重确定

3.2.1 确定指标主权重

根据专家的建议, 利用改进层次分析法确定指标的主权重。现以一级指标为例进行求解, 求解过程依据公式 (1) ~ (7)。

(1) 对一级指标进行两两对比, 构建比较矩阵 A :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 & 2 \\ 0 & 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

(2) 通过比较矩阵 A 计算中间矩阵 D , 重要性排序指数 s_i : $s_1 = 7$, $s_2 = 4$, $s_3 = 1$, $s_4 = 4$, $s_{\max} = 7$, $s_{\min} = 1$, $c_m = 7$ 。

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 7 & 4 \\ \frac{1}{4} & 1 & 4 & 1 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{4} & 1 & \frac{1}{4} \\ \frac{1}{4} & 1 & 4 & 1 \end{bmatrix}$$

(3) 计算中间矩阵 D 的最优传递矩阵 H :

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 0.512 & 1.025 & 0.512 \\ -0.512 & 0 & 0.512 & 0 \\ -1.025 & -0.512 & 0 & -0.512 \\ -0.512 & 0 & 0.512 & 0 \end{bmatrix}$$

(4) 计算中间矩阵 D 的拟优一致矩阵 V :

$$V = \begin{bmatrix} 1 & 3.25 & 10.59 & 3.25 \\ 0.31 & 1 & 3.25 & 1 \\ 0.09 & 0.31 & 1 & 0.31 \\ 0.31 & 1 & 3.25 & 1 \end{bmatrix}$$

(5) 利用 Matlab 进行矩阵求解, 得到一级指标安全管理能力、消防设备、防火能力、疏散能力的权重分别为: 0.58、0.18、0.06、0.18。按照上述过程计算二级指标的权重, 各指标主权重结果见表 3。

3.2.2 确定指标客观权重

熵权法计算指标客观权重时, 根据表 2 中二级指标的数值, 由式 (8) ~ (10) 计算各级指标的客观权重, 各指标客观权重计算结果见表 3。

表 3 医院建筑火灾风险评价指标权重

Table 3 Hospital building fire risk assessment index weight

一级指标				二级指标			
编号	改进 AHP	熵权法	综合权重	编号	改进 AHP	熵权法	综合权重
I ₁	0.58	0.26	0.56	I ₁₁	0.179 8	0.091 7	0.175 0
				I ₁₂	0.040 6	0.052 7	0.041 3
				I ₁₃	0.278 4	0.053 3	0.266 2
				I ₁₄	0.081 2	0.058 8	0.080 0
I ₂	0.18	0.32	0.19	I ₂₁	0.021 6	0.053 2	0.023 3
				I ₂₂	0.007 2	0.046 7	0.009 3
				I ₂₃	0.086 4	0.131 5	0.088 8
				I ₂₄	0.052 2	0.052 0	0.052 2
				I ₂₅	0.012 6	0.037 2	0.013 9
I ₃	0.06	0.20	0.07	I ₃₁	0.038 4	0.055 5	0.039 3
				I ₃₂	0.015 6	0.083 9	0.019 3
				I ₃₃	0.006 0	0.059 3	0.008 9
I ₄	0.18	0.22	0.18	I ₄₁	0.021 6	0.056 0	0.023 5
				I ₄₂	0.073 8	0.052 9	0.072 7
				I ₄₃	0.073 8	0.056 2	0.072 8
				I ₄₄	0.010 8	0.059 2	0.013 4

3.2.3 博弈论综合权重确定

由改进层次分析法和熵权法确定指标的主客观权重之后, 即可由二级指标权重构造出相对应的 W_1 与 W_2 , 根据式 (13) 求得最优权重分配系数, 并对其进行归一化处理, 即可得:

$$\begin{pmatrix} \alpha'_1 \\ \alpha'_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.946 \\ 0.054 \end{pmatrix}$$

进而求得各指标的综合权重, 见表 3。

3.3 火灾风险等级确定

3.3.1 计算标准云

将建筑火灾风险等级划分为安全、较安全、一般安全、较不安全、危险 5 个等级, 分别对应的取值范围为 100 ~ 90、90 ~ 75、75 ~ 60、60 ~ 35、35 ~ 0, 其中 $k = 0.1$, 然后根据式 (16) 计算标准云, 计算结果见表 4。利用 Matlab 进行编码生成标准云图, 如图 2 所示。

表 4 火灾风险等级标准云

Table 4 Fire risk rating standard cloud

安全等级	评分区间	Ex	En	He
安全	(90, 100]	95.000	0.667	0.067
较安全	(75, 90]	82.500	2.500	0.250
一般安全	(60, 75]	67.500	2.500	0.250
较不安全	(35, 60]	47.500	4.167	0.417
危险	(0, 35]	17.500	5.833	0.583

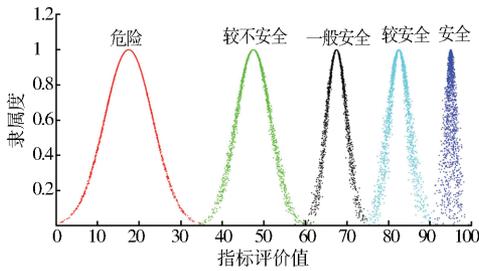


图2 标准云图

Fig. 2 The standard cloud

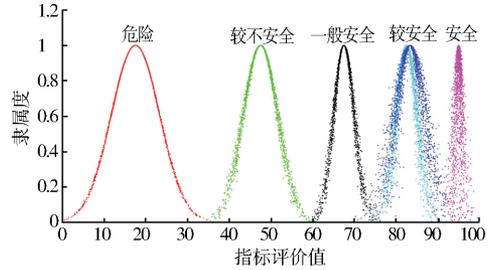


图3 综合云图和标准云图

Fig. 3 Integrated cloud and standard cloud

3.3.2 计算评价云

依据火灾安全等级划分标准，邀请 10 位火灾安全管理、建筑消防相关专家对医院建筑进行安全评价，然后根据评级结果利用式 (17) 进行评价云计算，计算结果见表 5。

表5 专家评价云数据

Table 5 Experts evaluate cloud data

指标	专家打分	E_x	E_n	H_e
I_{11}	84, 81, 89, 85, 81, 86, 90, 83, 87, 91	85.7	3.634	0.725
I_{12}	60, 54, 57, 59, 53, 52, 49, 48, 50, 51	53.3	4.210	0.617
I_{13}	95, 85, 93, 84, 92, 89, 94, 93, 88, 91	90.4	3.909	1.008
I_{14}	80, 86, 82, 85, 74, 76, 85, 75, 77, 83	80.3	4.887	1.850
I_{21}	77, 85, 79, 75, 76, 78, 78, 75, 79, 83	78.5	3.007	1.296
I_{22}	85, 82, 81, 89, 85, 84, 83, 86, 84, 83	84.2	2.055	0.919
I_{23}	85, 86, 84, 87, 86, 89, 83, 87, 90, 89	86.6	2.255	0.262
I_{24}	88, 86, 75, 79, 75, 77, 81, 86, 78, 77	80.2	5.062	1.529
I_{25}	75, 76, 78, 79, 78, 77, 80, 79, 75, 77	77.4	1.754	0.379
I_{31}	80, 81, 85, 85, 86, 84, 87, 83, 86, 84	84.1	2.130	0.672
I_{32}	75, 76, 74, 79, 76, 73, 74, 75, 76, 78	75.6	1.754	0.548
I_{33}	66, 63, 71, 72, 64, 61, 70, 66, 69, 70	67.2	4.001	1.457
I_{41}	82, 86, 84, 86, 87, 85, 86, 83, 84, 87	85.0	1.754	0.434
I_{42}	76, 77, 77, 75, 76, 81, 75, 76, 80, 79	77.2	2.105	0.177
I_{43}	80, 81, 85, 86, 87, 89, 87, 86, 84, 83	84.8	2.807	0.279
I_{44}	65, 66, 70, 75, 74, 64, 69, 68, 70, 71	69.2	3.508	0.871

3.3.3 计算综合云

通过计算得到评价体系中指标权重和评价云指标后，根据式 (18) 计算项目综合云的数字特征值，结果为： $E_x = 83.345$ ， $E_n = 3.552$ ， $H_e = 0.821$ 。利用 Matlab 程序将标准云和综合云的云图特征绘制在一个坐标系中进行项目火灾安全等级的判定，如图 3 所示。综合云图区间（深蓝色曲线）聚集在 (75, 90]，贴近于“较安全”等级（浅蓝色曲线），并且根据云图相似度计算结果 ($s_1 = 0.065$ ， $s_2 = 0.895$ ， $s_3 = 0.023$ ， $s_4 = 0.018$ ， $s_5 = 0.006$)，可以确定该项目的火灾风险等级为“较安全”。

为了检验博弈论—云模型理论用于医院火灾风险评估的效果，采用风险评价常用的集对分析法、后悔理论进行验证，计算结果见表 6。云模型理论、后悔理论评价法和集对分析法的火灾风险评估结果均为“较安全”，表明建立的云模型评价模型具有可靠性。

表6 三种模型结果对比

Table 6 Comparison of the results of three models

编号	评价方法	应急能力评价结果
方法一	云模型评价法	IV 较安全 (83.345, 3.552, 0.821)
方法二	集对分析法	IV 较安全 ($\mu = 0.287$)
方法三	后悔理论评价法	IV 较安全 (81.973)

3.4 评价结果分析

从该项目的评价结果可知，该项目的火灾风险等级为“较安全”，评价结果在安全范围之内，与项目现场实际贴近，但有可以提高的空间。通过分析一级指标的权重占比可知，“安全管理能力”的权重占比最高，因此应将此指标作为火灾管控的重点内容。除此之外，在二级指标中“安全出口数量、防火分区、消火栓系统、消防安全管理制度、应急预案演习”等指标权重相对较大，需要对此类指标进行合理规划和设计，针对性的提出改善措施，确保医院建筑的火灾安全。

4 结论

以医院建筑为研究对象，将改进层次分析法、熵权法、博弈论、云模型引入到公共医院建筑火灾风险评估中，主要研究结论如下：

(1) 根据医院建筑的特点，构建了医院建筑火灾风险评估指标体系，利用改进层次分析法、熵权法、博弈论方法求解评价指标的综合权重，运用云模型理论确定项目的火灾风险等级，建立了基于博弈论—云模型的医院建筑火灾风险评估模型。

研究与应用

(2) 博弈论—云模型评价方法经改进集对分析法、后悔理论验证, 验证结果相同, 且该评价结果与此项目的实际情况相吻合, 表明所建立的评价模型在公共医院建筑火灾风险评估中切实可行, 为公共医院建筑火灾风险评估提供了新的研究思路。

参 考 文 献

- [1] 艾斯卡尔·模拉克, 岳麟宣. 基于 BIM 的火灾仿真模拟研究 [J]. 新型工业化, 2021, 11 (3): 55-58.
- [2] 刘进, 高轩能. 基于改进风险矩阵法的医院建筑火灾风险评估 [J]. 数学的实践与认识, 2012, 42 (1): 115-121.
- [3] 张朝晖. 基于层次分析法的医院消防安全评估 [J]. 消防科学与技术, 2014, 33 (8): 954-957.
- [4] 温超敏. 基于脆弱性视角的医院消防安全评价研究 [D]. 广州: 暨南大学, 2019.
- [5] 李杨, 王玉娇, 杨志年. 基于 D-S 证据理论的公共建筑火灾风险评估 [J]. 华北理工大学学报 (自然科学版), 2022, 44 (1): 124-128.

- [6] 刘哈, 赵修茗, 赵鑫, 等. 基于五元联系数的古建筑火灾风险评估 [J]. 西安科技大学学报, 2018, 38 (6): 901-909.
- [7] 张立宁, 苟鹏飞, 安晶, 等. 地下商业综合体火灾风险评估 [J]. 消防科学与技术, 2022, 41 (3): 363-367.
- [8] SAATY T L. The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation [M]. 1980.
- [9] 方成宽, 钟春玲. 基于云模型-熵权法的装配式建筑施工安全风险 [J]. 吉林建筑大学学报, 2021, 38 (6): 67-74.
- [10] ZHU D, WANG R, DUAN J, et al. Comprehensive weight method based on game theory for identify critical transmission lines in power system [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 124: 106362.
- [11] 杨汶明, 郑明新, 李正阳, 等. 基于组合赋权云模型的煤系土边坡失稳风险评估 [J]. 公路交通科技, 2022, 39 (2): 49-57.
- [12] 柏羽珊, 王志. 基于云模型的大型客机火灾风险评估 [J]. 沈阳航空航天大学学报, 2020, 37 (3): 68-75.
- [13] 邹馨捷, 萨木哈尔·波拉提, 郝明, 等. 基于 Pyrosim 和 Pathfinder 的高校学生宿舍火灾人员疏散安全性模拟分析 [J]. 安全与环境工程, 2020, 27 (4): 195-200.

(上接第 124 页)

4 结 论

(1) 随着 TLA 掺量的增加, 改性沥青的针入度和延度逐渐减小, 而软化点和黏度逐渐增大; 随着纳米 TiO_2 掺量的增加, 改性沥青除针入度减小外, 其他指标均增大; TLA 掺量不宜大于 25%, 否则会影响改性沥青的施工和易性。

(2) 随着纳米 TiO_2 掺量的增加, 改性沥青的复数剪切模量、车辙因子增大, 相位角减小, 纳米 TiO_2 提高了沥青胶结料的抗剪切变形能力; 改性沥青的蠕变劲度随着纳米 TiO_2 掺量增加不断增大, 而蠕变速率则减小; 纳米 TiO_2 掺量不宜超过 2%。

(3) 掺入 TLA 可改善沥青混合料高温稳定性和水稳定性, 但对低温抗裂性有一定影响; 掺入纳米 TiO_2 可促进沥青混合料的各路用性能, 综合考虑, 2% 的纳米 TiO_2 、25% 的 TLA 的组合方案最优, 利于沥青混合料的使用性能提升。

参 考 文 献

- [1] 佟天宇, 常慧亮. 改性沥青的研究现状及展望 [J]. 炼油与化工, 2021, 32 (6): 1-5.
- [2] 郭诗惠, 刘炳. 纳米材料复配对 SBS 改性沥青流变及抗老化性能的影响 [J]. 中外公路, 2019, 39 (3): 241-246.
- [3] 毕海鹏. 纳米 $\text{TiO}_2/\text{CaCO}_3$ 玄武岩纤维复合改性沥青混合料性能与细观特性研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [4] 刘大梁, 姚洪波, 包双雁. 纳米碳酸钙和 SBS 复合改性沥青的性能 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2007 (3): 579-582.
- [5] 李雪峰, 肖鹏. 纳米 ZnO/SBS 改性沥青的研究 [J]. 石油沥青, 2006 (5): 15-20.
- [6] 王鹏. 碳纳米管/聚合物复合改性沥青界面增强机制及流变特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [7] 杨昆, 刘栋. 天然湖沥青 + SBS 复合改性沥青混合料性能研究 [J]. 公路交通科技, 2015, 32 (7): 28-32.
- [8] 莫石秀. 湖沥青改性沥青作用机理及混合料性能研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.
- [9] 严慧忠, 吕建伟, 赵士峰. 纳米 ZnO/TiO_2 -SBS 复合改性沥青性能和机理研究 [J]. 浙江交通职业技术学院学报, 2018, 19 (4): 19-24.