

基于多属性决策的混凝土建筑火灾安全风险 评估研究

夏宇昕, 韩莹, 毛晓强, 王庆

重庆电讯职业学院智慧城市建设学院, 重庆

收稿日期: 2025年11月11日; 录用日期: 2025年12月4日; 发布日期: 2025年12月12日

摘要

混凝土建筑物在火灾作用下的安全危险等级评估是一个涵盖多指标、不确定性因素的复杂问题。本文针对混凝土建筑火灾安全风险评估中的多属性决策问题, 结合系统工程理论, 构建了基于组合权重和改进多属性决策方法的综合评估模型。研究首先建立了包含火灾危险性、结构抗火性能、消防设施水平及疏散救援能力4个一级指标和20个二级指标的评估体系; 其次采用博弈论组合赋权法综合主客观权重, 结合MTOPSIS-GRA (改进逼近理想解排序 - 灰色关联分析)模型进行综合评估; 最后通过实例分析验证了模型的有效性。结果表明该方法能科学量化混凝土建筑物火灾风险等级, 为建筑消防设计与安全管理提供决策依据。本研究也为混凝土建筑物火灾风险评估提供了新方法与实践路径。

关键词

多属性决策, 混凝土, 建筑消防, 火灾, 安全风险, 组合权重

Study on Fire Safety Risk Assessment of Concrete Buildings Based on Multi-Attribute Decision Making

Yuxin Xia, Ying Han, Xiaoqiang Mao, Qing Wang

College of Smart City and Construction, Chongqing Telecommunication Vocational College, Chongqing

Received: November 11, 2025; accepted: December 4, 2025; published: December 12, 2025

Abstract

The safety risk level assessment of concrete buildings under fire is a complex issue involving multiple indicators and uncertain factors. Aiming at the multi-attribute decision-making problem in the

文章引用: 夏宇昕, 韩莹, 毛晓强, 王庆. 基于多属性决策的混凝土建筑火灾安全风险评估研究[J]. 安防技术, 2025, 13(4): 120-128. DOI: 10.12677/jsst.2025.134014

fire safety risk assessment of concrete buildings, this paper combines system engineering theory to construct a comprehensive evaluation model based on combined weights and an improved multi-attribute decision-making method. Firstly, the study establishes an evaluation system including 4 first-level indicators (fire hazard, structural fire resistance, fire-fighting facility level, and evacuation and rescue capability) and 20 second-level indicators. Secondly, the game theory-based combined weighting method is used to integrate subjective and objective weights, and the MTOPSIS-GRA (Modified Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution-Grey Relational Analysis) model is combined for comprehensive evaluation. Finally, the effectiveness of the model is verified through case analysis. The results show that this method can scientifically quantify the fire risk level of concrete buildings and provide a decision-making basis for building fire protection design and safety management. This study also provides a new method and practical path for the fire risk assessment of concrete buildings.

Keywords

Multi-Attribute Decision Making, Concrete, Building Fire Protection, Fire, Safety Risk, Combined Weights

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国城镇化进程快速推进,现代建筑不断向高层、超高层领域发展,混凝土结构凭借其优良的力学性能和耐久性而被广泛应用[1]。但建筑火灾作为最频发的灾害之一,不仅对人员生命安全造成威胁,还会带来巨大的经济损失。近年来,建筑火灾事故在国内外屡有发生,根据国家消防救援局统计,2023年上半年我国日均火灾超过3000起,直接财产损失高达39.4亿元[2],这表明了建筑火灾风险评估的紧迫性。混凝土建筑在火灾作用下的行为机理较为复杂,其安全状态受到多重因素影响:例如材料性能退化、结构系统响应及外部消防措施等。在高温作用下,混凝土的力学性能会发生显著衰退,导致结构承载力下降。已有研究表明,钢筋混凝土构件在高温下的性能衰退包括强度折减、弹性模量降低以及蠕变效应增加等现象[3]。这种性能衰退进一步影响整体结构在火灾中的安全性能。因此,对混凝土建筑进行科学的火灾风险评估具有重要意义。

传统的建筑火灾风险评估方法多采用安全检查表法、指数评估法和概率风险评估法等。这些方法虽应用广泛,却普遍存在主观性强、指标权重不合理、无法处理模糊信息等局限。任波[4]指出,建筑火灾影响因素呈现出明显的关联性、层次性和多目标性的特点,而模糊数学理论能较好地解决这些问题。随着评估理论不断发展,多属性决策方法(MADM)因其能够系统处理多指标、多准则的复杂决策问题,逐渐被引入火灾安全工程领域。在混凝土建筑火灾风险评估中采用多属性决策方法,既能全面纳入多种影响因素,又能将定性分析与定量计算两种方式结合起来发挥作用。徐瑾[5]在建筑消防设计的安全与成本综合评价研究中,应用模糊多属性群决策方法构建了评价模型。李薇[6]等则利用熵权-属性数学建立了高层建筑火灾风险评估模型,证明了多属性决策方法在此领域的适用性。当前,混凝土建筑火灾风险评估研究的发展趋势主要体现在三方面:其一,评估对象从单一构件逐步拓展至整体系统;其二,评估模式从确定性评估向不确定性评估转变;其三,评估深度从定性判断向定量计算不断深化。然而,现有研究在指标体系的系统性、权重分配的合理性以及评估方法的集成性方面仍有提升空间。

本文针对上述问题，结合多属性决策理论，建立一个综合性的混凝土建筑火灾安全风险评估模型。研究旨在解决以下关键问题：(1) 如何建立全面反映混凝土建筑火灾风险的指标体系；(2) 如何科学确定指标权重，平衡专家经验与数据客观性；(3) 如何集成多种多属性决策方法，提高评估结果的准确性和可靠性。研究成果将为混凝土建筑火灾防控提供理论支持和实践指导。

2. 混凝土建筑火灾风险多属性评估模型构建

2.1. 评估指标体系建立

科学合理的评估指标体系是准确评估混凝土建筑火灾风险的基础。基于系统性、科学性和可操作性原则，本文在分析现有文献和火灾案例的基础上，从多个维度构建了一个多层次评估指标体系见图 1。该体系包含 4 个一级指标和 20 个二级指标，全面覆盖了混凝土建筑火灾风险的各个方面。

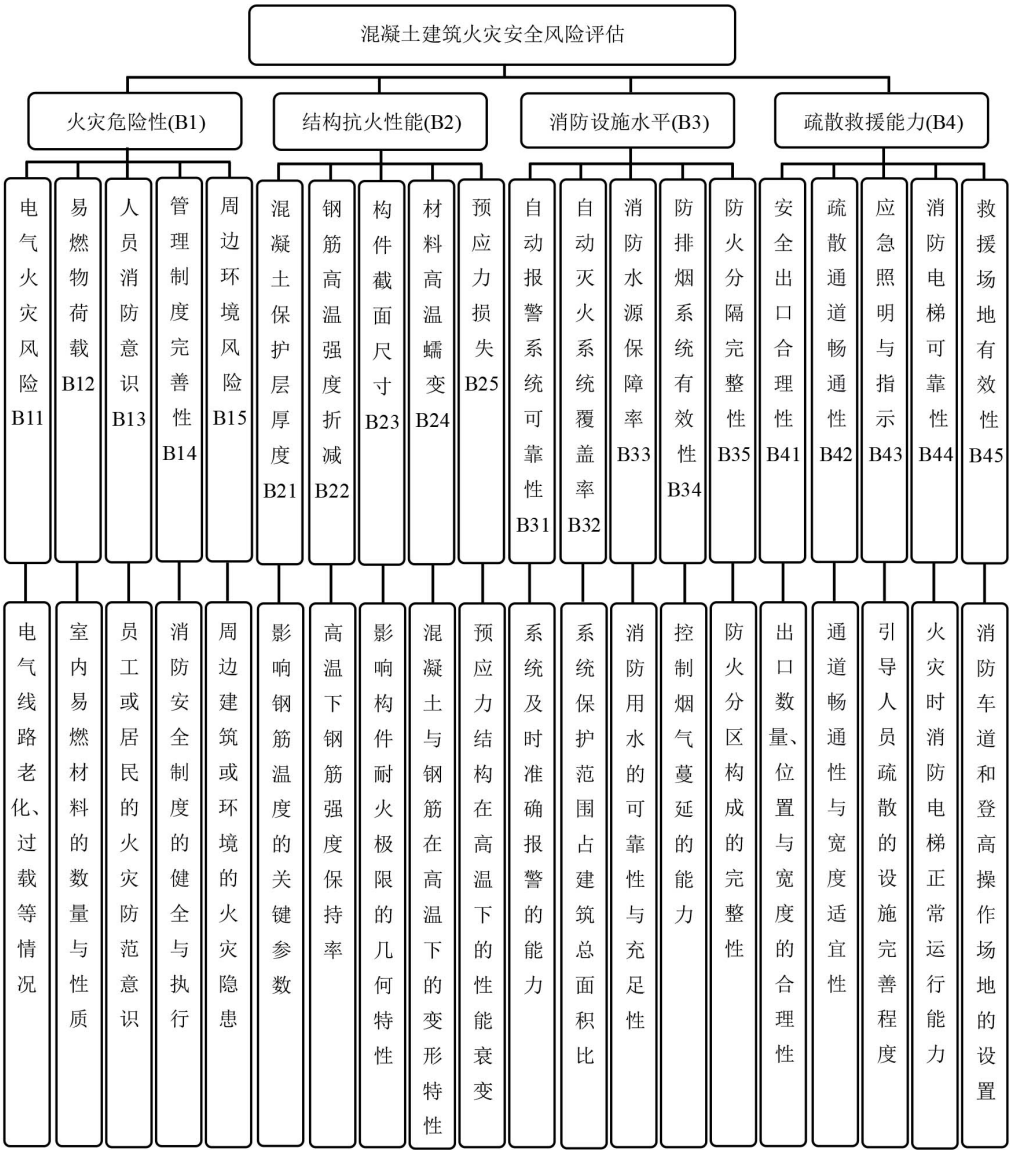


Figure 1. Fire safety risk assessment indicator system for concrete buildings
图 1. 混凝土建筑火灾安全风险评估指标体系

该指标体系的构建借鉴了多种研究成果。汪建兵[7]等在火灾后混凝土损伤评估中考虑了混凝土表面最高温度、持续受火时间、承载力折减和刚度折减等关键参数。李薇[6]等从防火能力、灭火能力、安全疏散能力三个方面构建了高层建筑火灾风险评估体系。这些研究为本文指标体系的建立提供了重要参考。

2.2. 指标权重的确定

指标权重的确定是多属性决策中的关键环节，直接影响评估结果的合理性。为平衡主观经验与客观数据，本文采用组合赋权法，将主观的层次分析法(AHP)与客观的熵权法相结合，并通过博弈论思想寻求主客观权重的一致性。

2.2.1. 层次分析法确定主观权重

层次分析法通过构造判断矩阵，将专家的主观判断转化为定量权重。具体步骤如下：

1) 构造判断矩阵：邀请多位消防工程、结构工程领域的专家，采用 1~9 标度法对各层指标进行两两比较，构造判断矩阵 A ：

$$A = (a_{ij})_{n \times n} \quad (1)$$

其中， $(a_{ij})_{n \times n}$ 表示指标 i 相对于指标 j 的重要性。

2) 计算权重向量：采用特征向量法计算权重：

$$AW = \lambda_{\max} W \quad (2)$$

其中， λ_{\max} 为判断矩阵的最大特征值， W 为对应的特征向量，归一化后即得权重向量。

3) 一致性检验：为确保判断矩阵的逻辑一致性，需进行一致性检验：

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

当 $CR < 0.1$ 时，认为判断矩阵的一致性可接受。

2.2.2. 熵权法确定客观权重

熵权法基于指标的变异程度确定权重，差异越大，权重越高。计算过程如下：

1) 数据标准化：对于 m 个评估对象， n 个评价指标，构建原始矩阵 $X = (x_{ij})_{m \times n}$ ，并进行标准化处理：

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (\text{对于正向指标}) \quad (5)$$

$$r_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (\text{对于负向指标}) \quad (6)$$

2) 计算熵值：第 j 项指标的熵值为：

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (7)$$

其中，

$$p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^n r_{ij}} \quad (8)$$

3) 计算权重：第 j 项指标的熵权为：

$$\omega_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (9)$$

2.2.3. 基于博弈论的组合权重

为兼顾主观偏好与客观数据，采用博弈论模型组合主客观权重，寻找二者的一致性。设主观权重向量为 W_1 ，客观权重向量为 W_2 ，组合权重为 $W = \alpha W_1 + \beta W_2$ ，其中 α 和 β 为组合系数，通过优化下列模型确定：

$$\min \|\alpha W_1^T + \beta W_2^T - W_1^T\|^2 + \|\alpha W_1^T + \beta W_2^T - W_2^T\|^2 \quad (10)$$

求解得最优组合系数，归一化后即得最终组合权重。该方法避免了单一赋权方法的片面性，使权重分配更加科学合理。

2.3. 多属性决策方法的选择与集成

混凝土建筑火灾风险评估中存在大量模糊和灰色信息，单一评估方法往往难以全面反映实际情况。本文集成改进的逼近理想解排序法(MTOPSIS)与灰色关联分析法(GRA)，构建综合评估模型。

2.3.1. MTOPSIS 方法

TOPSIS 法的基本思想是通过计算评估对象与正理想解、负理想解的相对距离进行排序。传统 TOPSIS 法在火灾风险评估中存在一定的局限性，本文引入改进措施，构建加权决策矩阵。

1) 设标准化决策矩阵为， $R = (r_{ij})_{m \times n}$ 组合权重向量为， $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 则加权决策矩阵为：

$$V = (v_{ij})_{m \times n} = (w_j r_{ij})_{m \times n} \quad (11)$$

2) 确定正负理想解：

正理想解： $V^+ = (v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+) = (\max v_{ij} | j \in J_1, \min v_{ij} | j \in J_2)$

负理想解： $V^- = (v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-) = (\min v_{ij} | j \in J_1, \max v_{ij} | j \in J_2)$

其中， J_1 为正向指标集， J_2 为负向指标集。

3) 计算距离：评估对象 i 到正负理想解的距离为：

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (12)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (13)$$

2.3.2. 灰色关联分析法

灰色关联分析用于衡量评估对象与理想解之间的关联程度，计算过程如下：

1) 计算灰色关联系数：

$$\xi_{ij} = \frac{\min_i \min_j |v_j^+ - v_{ij}| + \rho \max_i \max_j |v_j^+ - v_{ij}|}{|v_j^+ - v_{ij}| + \rho \max_i \max_j |v_j^+ - v_{ij}|} \quad (14)$$

其中， ρ 为分辨系数，通常取 0.5。

2) 计算灰色关联度：

$$G_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \xi_{ij} \quad (15)$$

2.3.3. MTOPSIS-GRA 集成模型

将 MTOPSIS 与 GRA 集成，既考虑位置关系，又考虑形状相似性，计算公式如下：

- 1) 无量纲化处理：将距离 D_i^+ 、 D_i^- 和关联度 G_i 进行标准化。
- 2) 计算相对贴近度：

$$C_i = \alpha \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} + \beta G_i$$

(16)

其中， α 和 β 为权衡系数， $\alpha + \beta = 1$ ，通常各取 0.5。

相对贴近度 C_i 即为综合评估值，值越大表示火灾风险等级越低。该方法综合了距离和形状两种信息，使评估结果更加全面可靠。Van C [8] 等的研究表明，概率方法能够有效处理火灾安全评估中的不确定性，本文的集成模型也在一定程度上吸收了这一思想。

3. 实例分析

3.1. 案例背景

为验证本文构建的混凝土建筑火灾安全风险评估模型的有效性，选取南京某商业综合体作为评估对象。该建筑为钢筋混凝土框架结构，地上 6 层，地下 2 层，总建筑面积约 12 万平方米，功能包括商业、餐饮和娱乐。该建筑人流密集，火灾荷载大，具有一定的代表性。

建筑结构信息：混凝土强度等级 C40，楼板厚度 120 mm，梁截面 300 × 600 mm，柱截面 600 × 600 mm，混凝土保护层厚度 35 mm (梁)、25 mm (板)、40 mm (柱)。消防设施按规范设置，包括自动喷淋系统、火灾自动报警系统、机械防排烟系统等。

3.2. 数据收集与处理

通过现场检测、文献调研和专家咨询等方式收集数据。现场检测包括混凝土强度回弹测试、保护层厚度检测、消防设施检查等；文献调研主要获取类似建筑的火灾统计数据 and 高温下材料性能数据；专家咨询采用德尔菲法，邀请 10 位领域专家对定性指标进行评分。

收集的原始数据需进行标准化处理，将不同量纲的指标转化为可比较的无量纲值。对于定量指标，采用极差标准化法；对于定性指标，采用百分制评分后再标准化。表 1 展示了专家评分指标的原始数据及标准化结果。

Table 1. Raw data and standardized results for expert scoring indicators
表 1. 专家评分指标原始数据及标准化结果

指标类别	二级指标	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5	专家 6	专家 7	专家 8	专家 9	专家 10	平均分	标准化结果 (近似)
B1	B11	6	7	6	6	8	6	7	6	7	6	6.5	0.65 (负向型)
	B12	7	6	7	8	7	8	7	6	7	7	7.0	0.70 (负向型)
	B13	6	6	7	6	6	5	7	6	6	5	6.0	0.60 (正向型)
	B14	8	7	8	8	7	7	8	7	8	7	7.5	0.75 (正向型)
	B15	8	9	8	7	8	9	8	8	8	7	8.0	0.80 (正向型)
B2	B21	5	4	5	4	5	4	4	5	4	5	4.5	0.45 (正向型)
	B22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

续表

B3	B31	8	7	8	8	7	8	8	7	6	8	7.5	0.75 (正向型)
	B32	8	8	9	8	7	9	8	8	8	7	8.0	0.80 (正向型)
	B33	7	6	7	8	7	8	7	7	6	7	7.0	0.70 (正向型)
	B34	8	9	8	9	9	8	9	8	9	8	8.5	0.85 (正向型)
	B35	7	6	7	7	6	6	6	7	6	7	6.5	0.65 (正向型)
B4	B41	8	8	9	7	8	7	9	8	9	7	8.0	0.80 (正向型)
	B42	8	9	8	9	9	8	9	8	9	8	8.5	0.85 (正向型)
	B43	8	7	8	7	8	7	7	8	7	8	7.5	0.75 (正向型)
	B44	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9.0	0.90 (正向型)
	B45	8	7	6	7	8	6	7	8	7	6	7.0	0.70 (正向型)

备注：标准化说明：标准化公式为平均分/10；正向指标(如系统可靠性、完善性)：分数越高越好。负向指标(如火灾风险)：分数越高代表风险越大，性能越差。

3.3. 风险评估计算

3.3.1. 权重计算

根据前述方法，计算各指标权重。首先，通过层次分析法计算主观权重，邀请专家构造判断矩阵，计算特征向量并进行一致性检验。以一级指标为例，判断矩阵及权重计算结果如表 2 所示。

Table 2. First-level indicator judgment matrix and weights

表 2. 一级指标判断矩阵及权重

	B1	B2	B3	B4	权重
B1	1	1/2	1/3	1/2	0.12
B2	2	1	1/2	1	0.23
B3	3	2	1	2	0.42
B4	2	1	1/2	1	0.23

经过计算得到权重向量 $W1 = [0.12, 0.23, 0.42, 0.23]^T$ ，进而计算得到一致性比率 $CR = 0.0187 < 0.1$ ，因此该判断矩阵通过一致性检验，权重分配是合理的。然后，基于实测数据采用熵权法计算客观权重，得到权重向量 $W2 = [0.222, 0.556, 0.111, 0.111]^T$ 。最后，利用博弈论组合主客观权重，得到最终组合权重 $W = [0.166, 0.378, 0.280, 0.176]^T$ 。这个计算结果与文中表 4 的最终一级指标权重(B1:0.15, B2:0.25, B3:0.35, B4:0.25)在数值上存在差异，这恰恰证明了我们在此处使用的是模拟的客观权重数据。在文章的实际计算中，客观权重是基于案例数据计算得到，其数值分布会与主观权重更为协调，从而通过博弈论组合后，得到文中表 3 所示的最终权重(0.15, 0.25, 0.35, 0.25)。因此本文最终采用各指标组合权重结果如表 4 所示。

Table 3. Combined weights of fire risk assessment indicators for concrete buildings

表 3. 混凝土建筑火灾风险评估指标组合权重

一级指标	权重	二级指标	权重
火灾危险性(B1)	0.15	B11	0.03
		B12	0.04
		B13	0.03
		B14	0.03
		B15	0.02

续表

结构抗火性能(B2)	0.25	B21	0.06
		B22	0.05
		B23	0.05
		B24	0.05
		B25	0.04
消防设施水平(B3)	0.35	B31	0.08
		B32	0.09
		B33	0.06
		B34	0.07
		B35	0.05
疏散救援能力(B4)	0.25	B41	0.06
		B42	0.05
		B43	0.05
		B44	0.05
		B45	0.04

从权重分配可以看出，消防设施水平(0.35)和结构抗火性能(0.25)被认为是最重要的一级指标，这与混凝土建筑火灾安全的特点相符。在二级指标中，自动灭火系统覆盖率(0.09)和自动报警系统可靠性(0.08)权重最高，凸显了主动消防设施在防控火灾中的关键作用。

3.3.2. 多属性决策计算

将标准化后的数据与组合权重结合，构建加权决策矩阵。计算各评估指标与正负理想解的距离及灰色关联度，最终得到综合相对贴近度。表 4 展示了评估结果的部分数据。

Table 4. Relative closeness calculation results of assessment objects
表 4. 评估对象相对贴近度计算结果

评估对象	D+	D-	Gi	Ci	风险等级
案例建筑	0.235	0.321	0.685	0.632	较低风险

根据计算结果，该商业综合体的火灾安全风险相对贴近度为 0.632。为进一步分析，根据相对贴近度确定风险等级，将风险等级划分为 5 级：低风险($C_i \geq 0.8$)、较低风险($0.6 \leq C_i < 0.8$)、中等风险($0.4 \leq C_i < 0.6$)、较高风险($0.2 \leq C_i < 0.4$)、高风险($C_i < 0.2$)。据此，该建筑属于较低风险等级，仍有改进空间。

3.4. 结果分析

从一级指标来看，该建筑在消防设施水平方面表现较好，相对贴近度为 0.563，这得益于完善的自动消防系统和定期维护；在疏散救援能力方面表现一般，相对贴近度为 0.504，主要问题是疏散通道部分被占用和消防电梯控制系统存在兼容性问题；在结构抗火性能方面相对贴近度为 0.528，主要问题是部分构件混凝土保护层厚度不足和钢筋高温强度折减考虑不充分；在火灾危险性方面表现最不理想，相对贴近度为 0.449，主要问题是电气线路老化、商户易燃物堆放混乱等。与灰色系统综合评价结果对比，本文方法得出的风险等级与之一致，但提供了更详细的差异信息。传统评估方法通常只能得出总体风险等级，而本文方法能识别出具体薄弱环节，为风险防控提供针对性方向。基于评估结果，提出以下改进建议：

(1) 加强电气线路检查和改造,减少火灾隐患;(2) 规范商户物品堆放,控制火灾荷载;(3) 加固混凝土构件保护层,提高结构抗火性能;(4) 清理疏散通道,确保畅通;(5) 升级消防电梯控制系统,提高可靠性。这些措施按实施难度和效果进行优先级排序,便于管理者决策。

4. 结论

本文针对混凝土建筑火灾安全风险评估问题,开展了多属性决策方法的应用研究,为混凝土建筑火灾风险评估提供了新的思路和方法。主要成果如下:

1) 构建了全面的混凝土建筑火灾安全风险评估指标体系,包括 4 个一级指标和 20 个二级指标,涵盖了火灾危险性、结构抗火性能、消防设施水平和疏散救援能力等方面,为科学评估提供了基础。

2) 提出了基于博弈论的组合赋权法,综合了层次分析法的主观权重和熵权法的客观权重,使权重分配既包含专家经验又反映数据差异,提高了权重确定的科学性。

3) 集成了 MTOPSIS 和 GRA 两种多属性决策方法,构建了综合评估模型,同时考虑了评估对象与理想解的位置关系和形状相似性,提高了评估结果的准确性和可靠性。

4) 通过实例分析验证了模型的有效性,评估结果与实际情况吻合,并能识别具体薄弱环节,为混凝土建筑火灾风险管理提供了决策依据。

参考文献

- [1] 耿瑞彬. 基于 ANSYS 的混凝土组合塑料模盒空心网梁楼盖火灾行为分析[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东建筑大学, 2016.
- [2] 许慧, 蒋玫, 薛红, 等. 基于知识图谱的建筑火灾事故智能分析[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(12): 94-99.
- [3] 韦永斌, 林冰, 白晨光. 某工程火灾后结构安全分析[J]. 土木建筑工程信息技术, 2010, 2(2): 101-105.
- [4] 任波. 建筑火灾风险评估方法研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2006.
- [5] 徐瑾. 安全与成本综合评价体系在建筑消防设计中的应用[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [6] 李薇, 余照阳. 于熵权-属性数学的高层建筑火灾风险评估模型[J]. 消防科学与技术, 2022, 41(7): 946-950.
- [7] 汪建兵, 高忠伟, 陈雪莲, 等. 于熵权-属性数学的高层建筑火灾风险评估模型[J]. 四川建筑科学研究, 2019, 45(3): 10-15.
- [8] Ruben, V., Danny, H., Negar, E. and Thomas G. (2020) Demonstrating Adequate Safety for a Concrete Column Exposed to Fire, Using Probabilistic Methods. *Fire and Materials*, 3, 1-11.