

文章编号:1673-9469(2024)03-0080-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.03.011

基于改进 AHP-灰云模型的模块栈桥加工 制造安全风险评价

崔邯龙¹, 曹燕^{1*}, 倪时华², 陆喜成³

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 中煤建筑安装工程集团有限公司, 河北 邯郸 056106;
3. 邯郸市建筑工程施工安全监督总站, 河北 邯郸 056008)

摘要: 为了对新型模块式钢栈桥加工安全风险进行客观评价, 保障生产顺利进行, 采用改进 AHP-灰云模型对某模块栈桥加工制造过程进行安全风险评价。从人、机械、物料、环境和管理 5 个方面开展系统研究, 建立了包括 9 项二级指标和 28 项三级指标的安全风险评价指标体系。采用改进的层次分析法确定指标权重值, 将现场安全风险评估值输入灰云模型, 进行风险等级的确定。研究结果表明该方法适用于模块栈桥加工制造安全风险评价, 经分析吊车与地面作业交叉情况、机械设备的检查维修、噪声的影响三项指标风险值较高, 并提出相应的风险防范措施。

关键词: 模块栈桥; 安全风险评价; 灰云模型; 风险评价指标体系

中图分类号: TU714

文献标识码: A

Safety Risk Assessment of Modular Trestle Processing and Manufacturing Based on Improved AHP-Gray Cloud Model

CUI Hanlong¹, CAO Yan^{1*}, NI Shihua², LU Xicheng³

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;
2. China Coal Construction & Installation Engineering Group Co., Ltd., Handan, Hebei 056106, China;
3. Handan Construction Safety Supervision, Handan, Hebei 056008, China)

Abstract: In order to objectively evaluate the safety risks of the processing of the new modular steel trestle and ensure smooth production, an improved AHP grey cloud model was used to evaluate the safety risks of the manufacturing process of a certain modular wharf. A systematic study was conducted from five aspects: human, machinery, materials, environment, and management, and a safety risk assessment index system was established, including 9 secondary indicators and 28 tertiary indicators. Using an improved Analytic Hierarchy Process to determine the weight values of indicators, the on-site safety risk assessment values are input into the Grey Cloud model to determine the risk level. The research results indicate that this method is suitable for the safety risk assessment of module trestle processing and manufacturing. After analyzing the intersection between cranes and ground operations, inspection and maintenance of mechanical equipment, and the impact of noise, the risk values of three indicators are relatively high, and the corresponding risk prevention measures are proposed.

Key words: module trestle bridge; safety risk assessment; gray cloud model; risk evaluation index system

钢结构作为一种重要的建筑结构形式, 具有高强度、轻质、可塑性好等特点, 被广泛应用于建

筑工程中。随着钢结构市场规模的不断扩大, 安全问题备受关注。因此, 对钢结构的安全性进行

收稿日期: 2023-08-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52278171)

作者简介: 崔邯龙(1977-), 男, 河北邢台人, 硕士, 副教授, 从事施工技术、项目管理、BIM 技术理论及应用方面的研究。

* 通信作者: 曹燕(1998-), 女, 河南信阳人, 硕士研究生, 从事施工技术与项目管理方面的研究。

研究,最大限度地减少安全事故的发生,具有重要的现实意义。

周红波等^[1]通过分析 109 起钢结构事故,建立案例基础数据,与风险评估过程相结合形成可视化交互界面,利用 web service 技术进行远程信息共享,实现了在线风险评估,提高了安全风险评估的效率。卢锡雷等^[2]提出基于熵权和层次分析法的主客观安全评价模型,用于大型钢结构施工安全风险评价。丁艺杰等^[3]采用模糊综合评价法对钢结构施工过程进行安全性评价,以降低安全事故的发生概率。胡韞频等^[4]引入改进的人为因素分析及分类系统对大跨度钢结构施工进行安全风险因素识别,并结合贝叶斯网络模型进行风险分析。

目前的研究多集中在施工阶段,且在评价过程中未考虑风险指标的模糊性和随机性^[5]。在钢结构加工阶段,由于涉及到大型设备、机械操作和重型材料,更要重视安全管理。成套式模块栈桥采用全钢筑造的半封闭式结构^[6-7]。作为一种新型装配式钢结构栈桥,目前尚未见到有关其安全风险方面的文献报道。基于此,本文选取了改进 AHP-灰云模型,对模块栈桥加工安全风险进行分析。AHP-灰云模型能够将评估对象的模糊性和随机性转化为确定的定量值,从而提高评估结果的准确性。

1 模块栈桥加工制造安全风险评价指标体系

建立模块栈桥加工制造安全风险评价指标体系时使用检查表法将安全风险因素制作成表格,并发放给施工人员进行检查核对,判断加工过程是否存在表中所列的风险,之后将表格汇总并邀请管理人员进行定量分析,最终选择较为重要的影响因素建立指标体系。

本文从人、机械、物料、管理和环境五个方面分析,在筛选的主要影响因素中确定 9 个二级指标和 28 个三级指标,以此构建模块栈桥加工制造安全评价指标体系,见表 1。

2 改进 AHP-灰云模型的风险评价

2.1 层次分析法

传统的层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 是一种多准则决策方法,它通过将决策问题分解成多个层次,建立层次结构模型^[8],从而对决

表 1 模块栈桥加工制造安全风险评价指标体系
Tab. 1 safety risk assessment index system for the processing and manufacturing of module trestle

一级指标	二级指标	三级指标
人 A	技能水平 A ₁	作业人员技术水平 A ₁₁
		现场管理人员配置 A ₁₂
		各方协调配合能力 A ₁₃
	安全意识 A ₂	作业人员文明程度 A ₁₄
		人员安全防护佩戴情况 A ₂₁
	身体状况 A ₃	作业人员违章作业情况 A ₂₂
机械 B	机械准备 B ₁	作业人员工作强度 A ₃₁
		作业人员身体健康情况 A ₃₂
		标志标识的设置 B ₁₁
	机械作业 B ₂	机械设备的选择 B ₁₂
		机械设备的检查维修 B ₁₃
		机械的灵敏度 B ₂₁
物料 C	物料 C ₁	吊车与地面作业交叉情况 B ₂₂
		波纹板压型机作业情况 B ₂₃
		危险作业的防护措施 B ₂₄
	安全管理 D ₁	用电规范程度 B ₂₅
		工业气瓶的使用 C ₁₁
		构件的运输及堆放 C ₁₂
管理 D	安全管理 D ₁	危险物体情况 C ₁₃
		岗前安全培训 D ₁₁
		预防、应急措施 D ₁₂
	技术管理 D ₂	加工制作方案 D ₂₁
		安全技术交底 D ₂₂
		吊点的设置 D ₂₃
环境 E	生产环境 E ₁	金属烟雾、弧光辐射 E ₁₁
		噪声的影响 E ₁₂
		光线及照明 E ₁₃
		喷漆作业情况 E ₁₄

策问题进行分析 and 评价。

传统的 AHP 法在一致性检验方面存在一定的局限性,需要进行复杂的计算和判断,容易出现主观性和不确定性等问题。

改进的层次分析法不需要进行一致性检验,使得计算更加简便,思路如下:

(1) 邀请 N 位专家对 n 个指标的重要性进行打分,分值记为 $A_{111}, A_{112}, \dots, A_{11N}$ (其中 A_{11N} 表示第 N 位专家对指标 A_{11} 的打分值);

(2) 计算出此指标的平均值: $(A_{111}, A_{112}, \dots, A_{11N})/N$;

(3) 利用平均值两两比较,构造判断矩阵;

(4) 根据判断矩阵计算特征向量 W , 得出三级指标对应权重,并将各个层级的指标按照重要程度进行排序。

2.2 灰云模型理论

灰云模型表达概念的灰性和随机性,灰云的数字特征用峰值(C_x)、左右界值(L_x, R_x)、熵 E_n 、超熵 H_e 等数值来表征。完整灰云的数字特征记为 $GL(C_x; L_x, R_x; E_n; H_e)$ 。各数字特征间的关系为^[9]

$$C_x = \frac{L_x + R_x}{2} \quad (1)$$

$$E_n = \frac{R_x - L_x}{6} \quad (2)$$

$$H_e = \frac{E_n}{\alpha} \quad (3)$$

式中: α 为常数,反映了 E_n 和 H_e 之间的线性关系,能调整灰云模型的雾化程度,一般取6~8,本研究取8^[10]。图1为灰云模型的数字特征。

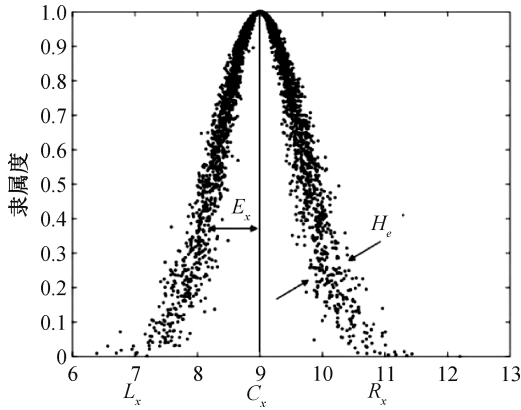


图1 灰云模型数字特征

Fig. 1 Digital characteristics of the gray cloud model

将灰云模型引入到灰色白化权函数中建立灰云模型白化权函数,其上限测度、适中测度、下限测度灰云模型白化权函数为

$$f_1(x) = \begin{cases} \exp\left[-\frac{(x - E_x)^2}{2(E_n')^2}\right] & x \in [L_x, E_x] \\ 1 & x \in [E_x, R_x] \\ 0 & x \notin [L_x, R_x] \end{cases} \quad (4)$$

$$f_2(x) = \begin{cases} 0 & x \notin [L_x, R_x] \\ \exp\left[-\frac{(x - E_x)^2}{2(E_n')^2}\right] & x \in [L_x, R_x] \end{cases} \quad (5)$$

$$f_3(x) = \begin{cases} 1 & x \in [L_x, E_x] \\ \exp\left[-\frac{(x - E_x)^2}{2(E_n')^2}\right] & x \in [E_x, R_x] \\ 0 & x \notin [L_x, R_x] \end{cases} \quad (6)$$

式中: x 为风险评估值, $f_1(x)$ 为上限测度灰云模型

白化权函数, $f_2(x)$ 为适中测度灰云模型白化权函数, $f_3(x)$ 为下限测度灰云模型白化权函数, E_x 为灰云模型峰值对应的横坐标, E_n' 为以 E_n 为期望、以 H_e 为标准差的随机数。

2.3 改进 AHP-灰云模型评价方法

改进 AHP-灰云模型评价方法的具体步骤如下:

(1)邀请专家对三级指标的重要程度进行打分,利用改进的层次分析法确定各级指标权重 ω ;

(2)根据规范及现场实际风险情况的评估值,划分评估指标等级并绘制灰云标尺;

(3)风险等级计算。

白化权值的计算:把评估值 x 输入到白化权函数公式中进行计算。为尽可能消除随机数导致白化权值的误差,取 $n=1000$ 次的均值作为最终的白化权值^[11],计算方法见公式(7),再根据公式(8)确定指标 j 的四个聚类系数 $\sigma_e(j)$ ($e=1,2,3,4$),最后由公式(9)(10)求出评估结果。

$$f(j) = \frac{f_1(j) + f_2(j) + \dots + f_n(j)}{n} \quad (7)$$

$$\sigma_e(j) = \frac{f_e(j)}{\sum_{e=1}^4 f_e(j)} \quad (8)$$

$$\sigma' = \sum_{i=1}^n \sigma_i(j) \times \omega_j \quad (9)$$

$$\sigma_z = \max\{\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4\} \quad (10)$$

式中: $f(j)$ 为指标 j 的最终白化权值; $f_n(j)$ 为指标 j 的第 n 个白化权值, $1 \leq n \leq 1000$; $\sigma_e(j)$ 为指标 j 在灰度 e 上的聚类系数, $1 \leq e \leq 4$; σ' 为 $\sigma_i(j)$ 的上级指标聚类系数, ω_j 为指标 j 对应的权重; σ_z 为项目整体风险聚类系数, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ 为四个灰度的聚类系数(z 所对应的灰度即风险等级)。

3 工程应用

3.1 车间概况

模块栈桥生产车间位于河北省邯郸市永年区临洺关镇,占地8.67万 m^2 。成套式模块栈桥生产车间分为加工区、焊接区、打磨区、装配区、喷涂区、成品区及原材区。

模块栈桥加工流程为原材料进厂材质检验→钢卷板开平→波形板成型机压板→纵裁机剪板→波纹板平焊缝拼装焊接→压弧机压弧→栈桥侧板

拼装、焊接→栈桥构件加工→栈桥预拼装→喷砂除锈→涂漆→保温→装车、运输。

3.2 风险评价

3.2.1 指标权重的确定

邀请来自高校、施工单位、模块栈桥生产厂的专家对各个指标的重要性进行打分,求出每个指标的专家打分平均值,再两两进行比较,建立层次分析法的判断矩阵,根据 2.1 改进的层次分析法计算各风险指标的权重,结果见表 2。

表 2 三级指标权重值

Tab. 2 Weight values of the three-level indicators

评价指标	权重值/%
作业人员技术水平 A ₁₁	3.236
现场管理人员配置 A ₁₂	2.920
各方协调配合能力 A ₁₃	3.157
作业人员文明程度 A ₁₄	3.552
人员安全防护佩戴情况 A ₂₁	3.552
作业人员违章作业情况 A ₂₂	4.025
作业人员工作强度 A ₃₁	3.315
作业人员身体健康情况 A ₃₂	3.394
标志标识的设置 B ₁₁	2.684
机械设备的选择 B ₁₂	3.315
机械设备的检查维修 B ₁₃	3.946
机械的灵敏度 B ₂₁	3.394
吊车与地面作业交叉情况 B ₂₂	4.262
波纹板压型机作业情况 B ₂₃	2.999
危险作业的防护措施 B ₂₄	3.867
用电规范程度 B ₂₅	3.631
工业气瓶的使用 C ₁₁	3.710
构件的运输及堆放 C ₁₂	3.473
危险物体情况 C ₁₃	3.157
岗前安全培训 D ₁₁	4.499
预防、应急措施 D ₁₂	4.262
加工制作方案 D ₂₁	3.710
安全技术交底 D ₂₂	4.262
吊点的设置 D ₂₃	3.788
金属烟雾、弧光辐射 E ₁₁	3.946
噪声的影响 E ₁₂	2.999
光线及照明 E ₁₃	3.236
喷漆作业情况 E ₁₄	3.710

权重占比前五的为岗前安全培训 D₁₁, 吊车与地面作业交叉情况 B₂₂, 预防、应急措施 D₁₂, 安全技术交底 D₂₂, 作业人员违章作业情况 A₂₂。再由三级指标计算出一、二级指标的权重, 结果见表 3。

表 3 一、二级指标权重值

Tab. 3 Weights values of primary and secondary indicators

二级指标	权重/%	一级指标	权重/%
技能水平 A ₁	11.30		
安全意识 A ₂	11.03	人	34.79
身体状况 A ₃	12.46		
机械准备 B ₁	11.82		
机械作业 B ₂	12.25	机械	24.07
物料 C ₁	11.72	物料	11.72
安全管理 D ₁	8.18		
技术管理 D ₂	8.62	管理	16.80
生产环境 E ₁	12.63	环境	12.63

3.2.2 评估指标等级及数字特征

对模块栈桥生产车间的工作人员及管理人员发放调查问卷——模块栈桥生产车间实际风险情况调查表, 得到各个指标的风险评估值见表 4。

表 4 安全风险指标评估值

Tab. 4 Evaluation values of safety risk indicators

评价指标	评估值
作业人员技术水平 A ₁₁	3.571
现场管理人员配置 A ₁₂	3.857
各方协调配合能力 A ₁₃	4.143
作业人员文明程度 A ₁₄	3.143
人员安全防护佩戴情况 A ₂₁	4.000
作业人员违章作业情况 A ₂₂	4.143
作业人员工作强度 A ₃₁	4.714
作业人员身体健康情况 A ₃₂	3.143
标志标识的设置 B ₁₁	3.143
机械设备的选择 B ₁₂	3.714
机械设备的检查维修 B ₁₃	4.143
机械的灵敏度 B ₂₁	3.429
吊车与地面作业交叉情况 B ₂₂	4.857
波纹板压型机作业情况 B ₂₃	3.286
危险作业的防护措施 B ₂₄	4.000
用电规范程度 B ₂₅	3.857
工业气瓶的使用 C ₁₁	3.857
构件的运输及堆放 C ₁₂	4.429
危险物体情况 C ₁₃	3.714
岗前安全培训 D ₁₁	3.143
预防、应急措施 D ₁₂	3.143
加工制作方案 D ₂₁	3.286
安全技术交底 D ₂₂	3.429
吊点的设置 D ₂₃	3.286
金属烟雾、弧光辐射 E ₁₁	3.714
噪声的影响 E ₁₂	4.857
光线及照明 E ₁₃	3.429
喷漆作业情况 E ₁₄	3.714

根据车间实际情况及《企业职工伤亡事故分类》^[12]将风险等级划分为4级,由低到高分别为IV、III、II、I,对应4个灰度 $e=1,2,3,4$ 。本次问卷采用10量级打分法,分值越高表示风险越大。模块栈桥生产车间灰云模型数字特征如表5所示。

表5 灰云模型数字特征

风险等级	左右界值	峰值	熵	超熵
IV(低风险,可以接受)	(0,4)	2	2/3	1/12
III(中度风险,需要控制整改)	(2,6)	4	2/3	1/12
II(高度危险,必须控制管理)	(4,8)	6	2/3	1/12
I(巨大风险,不可容许的,必须立即整改)	(6,10)	8	2/3	1/12

3.2.3 计算白化权值

为尽可能消除随机数计算白化权值的误差,取1000次的均值作为最终的白化权值。计算结果如下:

$$f_1(A_{11})(3.571) = 0.069, f_2(A_{11})(3.571) = 0.806$$

$$f_1(A_{12})(3.857) = 0.025, f_2(A_{12})(3.857) = 0.976$$

$$\vdots$$

式中: $f_1(A_{11})(X)$ 为指标 A_{11} 对应的第一个白化权值, (X) 为指标 A_{11} 的评估值。

根据公式(8)计算三级指标的聚类结果,见表6。

三级指标中风险排名前五的分别是:吊车与地面作业交叉情况、机械设备的检查维修、噪声的影响、作业人员工作强度、机械的灵敏度。根据指标权重和指标的灰云聚类结果,用公式(9)和表4权重值计算出一、二级指标的风险等级和整个项目的风险等级,见表7、表8。

二级指标风险等级由大到小分别为机械准备>机械作业>身体状况>生产环境>物料>安全意识>技能水平>技术管理>安全管理;一级指标风险等级由大到小分别为机械>环境>人员>物料>管理。

根据公式(9),得出 $\sigma_1 = 0.107 \times 34.79\% + 0.061 \times 24.07\% + 0.069 \times 11.72\% + 0.268 \times 16.80\% + 0.045 \times 12.63\% = 0.1107$, $\sigma_2 = 0.8303$, $\sigma_3 = 0.0553$, $\sigma_4 = 0$, $\sigma_z = \sigma_2 = 0.8303$,整体风险等级为III级。

表6 三级指标聚类结果

评估指标	$e=1$	$e=2$	$e=3$	$e=4$	风险等级
A ₁₁	0.069	0.806	0.003	0	III
A ₁₂	0.025	0.976	0.008	0	III
A ₁₃	0.010	0.976	0.028	0	III
A ₁₄	0.236	0.437	0.000	0	III
A ₂₁	0.016	1.000	0.016	0	III
A ₂₂	0.009	0.976	0.026	0	III
A ₃₁	0.000	0.560	0.163	0	III
A ₃₂	0.233	0.433	0.000	0	III
B ₁₁	0.230	0.430	0.000	0	III
B ₁₂	0.042	0.907	0.005	0	III
B ₁₃	0.001	0.651	0.348	0	III
B ₂₁	0.002	0.866	0.132	0	III
B ₂₂	0.001	0.653	0.348	0	III
B ₂₃	0.158	0.553	0.000	0	III
B ₂₄	0.015	1.000	0.015	0	III
B ₂₅	0.044	0.951	0.005	0	III
C ₁₁	0.027	0.976	0.009	0	III
C ₁₂	0.003	0.805	0.069	0	III
C ₁₃	0.046	0.948	0.006	0	III
D ₁₁	0.233	0.434	0.000	0	III
D ₁₂	0.232	0.432	0.000	0	III
D ₂₁	0.162	0.558	0.000	0	III
D ₂₂	0.107	0.685	0.001	0	III
D ₂₃	0.159	0.555	0.000	0	III
E ₁₁	0.045	0.909	0.005	0	III
E ₁₂	0.000	0.431	0.230	0	III
E ₁₃	0.132	0.866	0.002	0	III
E ₁₄	0.005	0.907	0.043	0	III

表7 加工制造阶段二级指标风险等级

Tab. 7 Risk level of secondary indicators in the processing and manufacturing stage

指标	$e=1$	$e=2$	$e=3$	$e=4$	风险等级
技能水平 A ₁	0.125	0.866	0.009	0	III
安全意识 A ₂	0.012	0.967	0.021	0	III
身体状况 A ₃	0.177	0.712	0.111	0	III
机械准备 B ₁	0.109	0.751	0.140	0	III
机械作业 B ₂	0.049	0.840	0.111	0	III
物料 C ₁	0.025	0.944	0.031	0	III
安全管理 D ₁	0.349	0.651	0.000	0	III
技术管理 D ₂	0.192	0.808	0.000	0	III
生产环境 E ₁	0.045	0.866	0.089	0	III

表 8 加工制造阶段一级指标风险等级
Tab. 8 Risk level of primary indicators in the processing and manufacturing stage

指标	e=1	e=2	e=3	e=4	风险等级
人	0.107	0.843	0.050	0	Ⅲ
机械	0.061	0.845	0.094	0	Ⅲ
物料	0.069	0.865	0.035	0	Ⅲ
管理	0.268	0.732	0.000	0	Ⅲ
环境	0.045	0.866	0.089	0	Ⅲ

3.3 风险防控措施

该模块栈桥风险等级为Ⅲ级,即中度风险。一旦发生事故将会造成较大的经济损失或者重伤事故,需要采取相应的控制措施以保证工作进行。根据生产车间的实际风险情况,对评估较高的风险指标制定下列措施:

3.3.1 交叉作业风险防控措施

制定明确的作业规范和操作流程:制定吊车和地面作业的明确规范,包括吊车操作规程、地面作业人员的行为规范等,确保各方了解自己的职责和操作要求。设立明确的交通指引和标识:在工厂内设置明确的交通指引和标识,包括交叉路口的标志、行车道的划分、禁止通行区域的标识等,提醒各方注意交通安全。

3.3.2 机械安全风险防控措施

建立安全管理制度:制定机械检查维修的安全管理制度,明确责任和操作规范,包括工作流程、安全操作规程、事故报告和应急预案等。提供充分的培训和教育:对机械检查维修人员进行必要的安全培训和教育,包括机械操作技能、安全操作规程、紧急救援知识等,提高他们的安全意识和技能水平。

3.3.3 噪声的安全风险防控措施

声源控制:采取措施减少噪声的产生,如使用低噪声设备和工具,选择低噪声的工艺和材料,减少机械设备的振动和冲击等。隔离控制:通过隔离措施减少噪声传播,如在噪声源周围设置隔音罩、隔音墙等,将噪声限制在车间内部,减少对周围环境的影响。个人防护措施:提供适当的个人防护装备,如耳塞、耳罩等,给工人提供必要的防护,减少噪声对其耳朵的损害。

4 结论

1) 本文提出了适用于模块栈桥加工制造过程的安全风险评价指标体系:从人、机械、物料、环境

和管理 5 个方面建立了 9 个二级指标和 28 个三级指标。

2) 建立了适用于模块栈桥加工制造的安全风险评价模型;用改进的层次分析法,结合灰云模型理论,建立了基于改进 AHP-灰云模型的安全风险评估模型,并将该模型运用于模块栈桥加工制造过程安全风险评价。

3) 通过对邯郸市某模块栈桥加工制造过程进行安全风险评价,得出项目整体风险等级为Ⅲ级,中度风险。三级指标中吊车与地面作业交叉情况、机械设备的检查维修、噪声的影响风险较高需要时刻关注,并根据生产车间实际情况提出相应风险防范措施。

参考文献:

- [1] 周红波,高文杰,黄誉.大型钢结构风险评估与控制研究及软件开发[J].土木工程学报,2010,43(10):122-129.
- [2] 卢锡雷,陈细辉,张晗辉,等.基于熵权-AHP的建筑工程施工安全评价研究[J].建筑经济,2020,41(S2):225-229.
- [3] 丁艺杰,李慧民,孟海.大跨钢结构施工过程安全性评价与分析[J].工业安全与环保,2018,44(12):9-13.
- [4] 胡镭频,李超,李宗亮,等.大跨度钢结构施工安全风险评价 IHFACS-BN 模型及应用[J].中国安全科学学报,2021,31(08):147-154.
- [5] 孙嘉宁.既有高层住宅消防安全评价研究[D].西安建筑科技大学,2023.
- [6] 万瑜,邱国志,李利军.模块化栈桥结构设计[J].钢结构,2019,34(04):74-79.
- [7] 李兴坡.装配式模块栈桥优化研究[J].煤炭工程,2019,51(9):20-23.
- [8] 邓雪,李家铭,曾浩健,等.层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J].数学的实践与认识,2012,42(07):93-100.
- [9] 王雁凌,张雪佼,阎敬民.基于变权灰云模型的风电场并网技术性综合评价[J].电网技术,2013,37(12):3546-3551.
- [10] 王洪利,冯玉强.基于灰云的改进白化模型及其在灰色决策中应用[J].黑龙江大学自然科学学报,2006(06):740-745+750.
- [11] 刘宁.基于IFAHP-灰云模型的山岭隧道施工坍塌风险评估[D].石家庄:石家庄铁道大学,2021.
- [12] 国家标准局.企业职工伤亡事故分类:GB 6441—86[S].北京:中国标准出版社,1986.

(责任编辑 王利君)