

基于熵权法-灰色关联的变截面连续梁桥风险评价

丁金鹏

(中铁十八局集团建筑安装工程有限公司, 天津 300308)

摘要: 本文针对变截面连续梁桥施工中, 由于环境复杂、工艺难度大及多风险因素叠加引发的安全问题, 构建了基于熵权法与灰色关联理论的复合风险评价模型。通过文献调研和工程实践, 建立了涵盖人员、管理、技术、材料设备、环境及结构6个一级指标和23个二级指标的施工风险指标体系。采用专家评分方法获取初始数据, 经归一化处理后利用熵权法计算各指标的信息熵和权重, 以反映各风险因素所含信息量的差异; 通过构造参考序列和比较序列, 采用灰色关联分析定量确定施工风险样本与最劣状态之间的关联程度, 并依据关联度划分风险等级。以南昌市某高速公路桥梁工程为例, 评价结果表明, 该工程整体施工风险处于中等水平, 其中技术、管理和人员风险为关键风险领域。

关键词: 变截面连续梁桥; 熵权法; 灰色关联理论; 施工安全风险评价; 风险控制

中图分类号: U447

文献标识码: A

Risk Assessment of Variable Cross-Section Continuous Girder Bridges Based on Entropy Weight Method and Grey Relational Analysis

DING Jinpeng

(China Railway 18th Bureau Group Construction and Installation Engineering Co., Ltd., Tianjin 300308, China)

Abstract: Variable cross-section continuous girder bridges are prone to potential safety risks during construction due to complex environments, sophisticated processes, and the superposition of multiple interacting risk factors. To address these challenges, this study develops a composite construction risk evaluation model by integrating the entropy weight method and grey relational analysis. Based on literature investigation and engineering practice, a hierarchical risk indicator system comprising six primary indicators and twenty-three secondary indicators covering personnel, management, technology, materials and equipment, environment, and structural factors is established. Expert scoring is adopted to obtain the initial evaluation data, which are normalized before using the entropy weight method to determine the information entropy and corresponding weights of each indicator, thereby quantifying the heterogeneity in the information carried by different risk factors. Reference and comparison sequences are then constructed, and grey relational analysis is employed to quantify the correlation between construction risk samples and the worst reference state, upon which the construction risk levels are classified. An application to a highway bridge project in Nanchang City indicates that the overall construction risk is at a medium level, with technical, management, and personnel risks identified as the key risk domains.

Key words: variable cross-section continuous girder bridges; entropy weight method; grey relational theory; construction safety risk assessment; risk control

近年来, 随着高速公路建设的迅速发展及桥梁结构技术的不断创新, 变截面连续梁桥作为一种常见的桥梁结构形式, 因其具有良好的力学性

能和适应复杂地形的能力, 在高速公路立交、跨线桥梁等工程中得到广泛应用^[1-2]。然而, 由于其结构设计复杂且施工工艺特殊, 在施工过程中

收稿日期: 2025-09-09

作者简介: 丁金鹏, 工程师, 本科, 研究方向为机场净化系统, 道路与桥梁施工

会遇到许多不确定因素和潜在风险。特别是在变截面连续梁桥需要跨越现有交通路线或复杂地貌时，施工难度和风险会进一步增加^[3]。因此，构建科学、系统的施工安全风险评价模型，对于准确识别和衡量变截面连续梁桥施工过程中的风险因素，以及提前制定针对性的应对措施并确保施工的安全与质量，具有重要的理论和实际价值。

基于此，许多学者对变截面连续梁桥的施工风险评价与控制技术进行了深入研究，并取得了一系列具有应用价值的重要成果。郑祖恩等^[4]通过专家调查法与层次分析法识别变截面连续梁桥悬臂浇筑风险因素，提出基于模糊综合评判法的两级风险评价框架，实现了施工风险的定量评估，为复杂工况下的风险管控提供了技术路径。卢睿等^[5]结合模糊数学基本原理与层次分析法，建立了针对变截面混凝土桥梁安全评估的模糊层次分析评判模型，通过对比现场检测验证了模型的正确性。赖笑等^[6]针对变截面桥梁施工过程中存在的风险隐患，构建基于 LEC - 灰色关联理论的复合风险评价模型；运用灰色关联度理论动态优化指标权重，引入相对危险度完成风险源的优先级排序与安全等级划分。闫兴非^[7]聚焦变截面连续梁桥拆除阶段安全评估，基于层次分析法构建拆除技术状况评定体系，为悬臂倒拆工艺的安全决策提供分层量化依据，丰富了变截面连续梁桥拆除阶段的风险评价与控制技术体系。晁铁彦^[8]针对变截面连续梁施工提出基于 LEC 法的危险源动态识别技术，通过构建危险性等级划分标准揭示了高处坠落等风险需重点防控，补充了基于量化分级的危险源分类管控策略。柳向辉等^[9]分析了传统灰色理论在预测桥梁施工状态时的缺陷，以变截面连续梁桥为工程载体，提出基于线性最优化的灰色模型改进方法，实证表明优化后的模型预测误差较传统最小二乘法显著降低。在既有研究的基础上，本文针对变截面连续梁桥施工风险评价中主观权重依赖性强、风险指标动态关联机制解析不足等问题，提出了融合熵权法与灰色关联理论的复合风险评价模型。

上述研究为变截面连续梁桥施工风险评价提供了多角度的理论支撑与方法借鉴，本文进一步依据文献资料、工程实践经验以及变截面连续梁桥的施工特性，构建了一套全面且多层次的施工安全风险指标体系，用于该类桥梁的施工安全风险评价。在此基础上，根据风险程度的不同，本文还提出了相应的施工管理措施。这些研究为变截面连续梁桥的施工安全风险评价与控制提供了有力支持。

1 变截面连续梁桥风险评价模型

1.1 变截面连续梁桥风险指标体系建立

变截面连续梁桥作为一种复杂的桥梁结构形式，其施工过程涉及多变的施工环境、复杂的结构设计、特殊的施工工艺以及众多的参与方，这些因素相互交织，使得施工过程中存在诸多不确定性和潜在风险。这些风险不仅可能延缓工程进度、降低工程质量，更潜藏着引发重大安全事故的隐患，进而造成人员伤亡及巨额经济损失。因此，构建一个科学、完备且系统的施工安全风险指标体系，是开展风险识别、评估及控制的基础，对保障施工安全与质量具有深远的理论与实践价值。本文依托文献研究与工程实践积累以及变截面连续梁桥的施工特性，构建了一套全面且多层次的施工安全风险指标体系。该体系包括人员风险、管理风险、技术风险、材料设备风险、环境风险和结构风险 6 个一级风险指标，并进一步细化为 23 个二级风险指标（表 1）。该指标体系的建立，旨在为变截面连续梁桥施工安全风险的定量分析与评价提供科学依据，从而为工程管理者制定针对性的风险控制措施奠定坚实的基础，确保施工过程的安全与高效。

表 1 施工安全风险指标体系

一级指标	二级指标
U ₁ 人员风险	U ₁₁ 作业人员技能不足
	U ₁₂ 违章作业行为
	U ₁₃ 疲劳作业与管理疏忽
	U ₁₄ 人员安全意识淡薄
U ₂ 管理风险	U ₂₁ 安全制度执行不力
	U ₂₂ 监测频率不足
	U ₂₃ 应急预案缺失
	U ₂₄ 技术方案不合理
U ₃ 技术风险	U ₃₁ 悬臂浇筑线形偏差
	U ₃₂ 合龙段高差控制失效
	U ₃₃ 挂篮系统适应性不足
	U ₃₄ 预应力张拉顺序错误
	U ₃₅ 临时固结拆除时机不当
U ₄ 材料设备风险	U ₄₁ 模板系统刚度不足
	U ₄₂ 预应力孔道定位偏差
	U ₄₃ 材料供应商出现问题
	U ₄₄ 测量仪器精度不足
U ₅ 环境风险	U ₅₁ 极端气候影响
	U ₅₂ 地质条件不均匀沉降
	U ₅₃ 地理位置复杂
U ₆ 结构风险	U ₆₁ 变截面区应力集中
	U ₆₂ 施工阶段体系转换风险
	U ₆₃ 长期收缩徐变效应

1.2 熵权法确定指标权重

熵权法是一种基于信息熵的客观赋权方法，能有效规避主观赋权偏差，常用于多指标决策分析^[10-11]。指标的熵值越小，所包含的有效信息就越多，因此所占的权重就越高。熵权法能提升决策的客观性，有效减少主观因素的干扰。

(1) 数据准备及归一化。针对表1建立的风险指标体系（ m 个样本、 n 个指标），邀请专家对风险指标进行打分，形成初始的评分矩阵 X 。为消除各个风险指标的量纲差异，采用极差法对指标进行归一化处理：

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (1)$$

式中， y_{ij} 表示归一化处理后的数据， x_{ij} 表示专家评分数据，得到标准化矩阵 Y 。

(2) 信息熵计算。第 j 个风险指标的信息熵 E_j 计算如下：

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (2)$$

其中， m 为样本数； p_{ij} 为第 j 项个风险指标下第 i 个评价样本所占的比重，假定 $p_{ij}=0$ 时， $p_{ij} \ln(p_{ij})=0$ ，其中 p_{ij} 计算公式为：

$$p_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}} \quad (3)$$

(3) 熵权确定。根据信息熵计算指标权重 w_j 为：

$$w_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)} \quad (4)$$

式中， $1 - E_j$ 表示第 j 个风险指标的差异系数，信息熵越小，该指标的差异系数越大，则提供的信息量越多，风险指标的权重也就越大。

1.3 基于灰色关联的施工安全风险评估

灰色关联分析法^[12]通过量化风险因素与参考序列之间的关联程度，能够有效解析多指标间的动态交互机制，适用于变截面连续梁桥施工风险的动态评价。

(1) 确定参考序列与比较序列。以施工安全风险最劣状态为基准，选取各一级指标的风险临界值构建参考序列。对于正向型指标（值越大风险越高），取所有样本中最大值；对于负向型，则取最小值。

$$X_0 = \{x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n)\} \quad (5)$$

实际施工过程中第 i 个评价样本的风险指标数据构成比较序列 X_i^* ：

$$X_i^* = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)\} \quad (6)$$

其中 $i=1, 2, \dots, m$ 。

(2) 数据归一化处理。按照式(1)对参考序列和比较序列进行归一化处理。

(3) 计算关联系数。第 i 个评价样本中第 j 个风险指标与参考序列的关联系数为 γ_{ij} ：

$$\gamma_{ij} = \frac{\min_j \Delta i(j) + \rho \max_j \Delta i(j)}{\Delta i(j) + \rho \max_j \Delta i(j)} \quad (7)$$

式中， ρ 为分辨系数，通常取 $\rho=0.5$ ^[12]，用于调节关联差异的灵敏度。

(4) 计算加权灰色关联度。结合熵权法确定的权重 w_j ，计算各样本的综合灰色关联度：

$$R_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot \gamma_{ij} \quad (8)$$

R_i 值越大，表明该评价样本的风险状态与参考序列（最劣状态）的关联性越强，即施工风险等级越高。

(5) 风险等级划分。根据灰色关联度 R_i 的分布范围，可将施工安全风险划分为5个等级（表2），以实现风险状态的量化分级与动态预警。该风险等级划分区间的确定严格遵循《公路桥梁施工安全风险评估指南》等行业规范中关于工程风险分级的通用原则，确保分级逻辑与行业管理要求统一。同时，参考桥梁施工风险评价领域的相关研究，如赖笑等^[6]、冯运卿等^[10]在类似工程风险评价中所采用的五级风险划分方法，并结合变截面连续梁桥的施工特点进行适配。

表2 施工安全风险等级划分标准

关联度区间	风险等级
$R_i \geq 0.80$	V级（高风险）
$0.70 \leq R_i < 0.80$	IV级（较高风险）
$0.60 \leq R_i < 0.70$	III级（中等风险）
$0.50 \leq R_i < 0.60$	II级（较低风险）
$R_i < 0.50$	I级（低风险）

2 工程实例应用

2.1 工程概况

南昌市绕城高速公路西二环 TJ1 标段全长 25.6 km（桩号 K1+000~K26+600），采用双向六车道高速公路标准建设，设计速度 100 km/h，整体式路基宽 33.5 m。标段内厚田枢纽 C 匝道桥第四联为预应力混凝土变高连续箱梁，总长为 120 m，跨径组合为（32+56+32）m，上跨既有昌樟高速公路主线。该联箱梁为两箱四室预应力混凝土（后张）结构，顶宽 12.25 m，顶板厚度 0.3~0.6 m，腹板厚度 0.4 m，底板厚度 0.32~

0.9 m。施工过程中,工程面临的主要技术难点在于(32+56+32)m的连续悬浇梁施工条件复杂,处于大纵坡(2.5%)、超高(4%)及小曲线半径($R=600$ m)路段,导致挂篮受力复杂且行走轨迹控制难度大。此外,挂篮跨越高速公路时净空不足,影响通行及施工安全。

2.2 风险指标权重计算

为科学确定变截面连续梁桥施工风险指标权重,组建了由桥梁施工专家、设计单位技术负责人、监理工程师及项目总工等10人构成的评价团队。评价人员均具备10年以上桥梁工程相关工作经历,其中包括高级工程师6名、工程师4名,确保对该类桥梁施工风险的认知与评价专业性。评价过程采用Likert5级量表(1分表示风险影响极低,5分表示风险影响极高),对表1中

$$Y_1 = \begin{bmatrix} 0.667 & 0.333 & 1.000 & 0.000 & 0.333 & 0.667 & 1.000 & 0.000 & 0.667 & 0.333 \\ 1.000 & 0.000 & 1.000 & 0.000 & 0.500 & 1.000 & 0.500 & 0.500 & 0.000 & 1.000 \\ 0.333 & 0.667 & 0.000 & 1.000 & 0.667 & 0.667 & 0.000 & 0.667 & 0.667 & 0.333 \\ 0.667 & 0.333 & 0.000 & 0.667 & 0.333 & 0.667 & 0.333 & 0.333 & 0.667 & 1.000 \end{bmatrix} \quad (10)$$

再将矩阵 Y 各值代入式(2)和式(3):

$$E_1 = -\frac{1}{\ln 10} \times \sum_{i=1}^{10} p_{ij} \ln(p_{ij}) = 0.865 \quad (11)$$

同理可得: $E_2 = 0.822$, $E_3 = 0.880$, $E_4 = 0.920$ 。将 E_1 代入式(4):

$$w_1 = \frac{1 - E_1}{\sum_{j=1}^4 (1 - E_j)} = 0.264 \quad (12)$$

同理,可依次求得其余二级指标的权重,然后求出6个一级指标的权重,汇总如表3。

表3 风险指标权重

一级指标	权重	二级指标	权重
U_1 人员风险	0.174	U_{11} 作业人员技能不足	0.264
		U_{12} 违章作业行为	0.346
		U_{13} 疲劳作业与管理疏忽	0.234
		U_{14} 人员安全意识淡薄	0.156
U_2 管理风险	0.184	U_{21} 安全制度执行不力	0.250
		U_{22} 监测频率不足	0.140
		U_{23} 应急预案缺失	0.334
		U_{24} 技术方案不合理	0.278
U_3 技术风险	0.236	U_{31} 悬臂浇筑线形偏差	0.195
		U_{32} 合龙段高差控制失效	0.201
		U_{33} 挂篮系统适应性不足	0.260
		U_{34} 预应力张拉顺序错误	0.175
		U_{35} 临时固结拆除时机不当	0.169

23项二级风险指标的影响程度进行打分。评分标准以《公路桥涵施工技术规范》等行业标准为依据,结合近年来国内变截面连续梁桥施工典型风险事故案例分析结论,划定各指标风险影响边界。打分完成后,通过专家集中讨论对初始评分进行一致性校验,消除个体认知偏差,最终形成权威、可靠的初始评价矩阵。

以人员风险 U_1 的4个二级指标为例,收集整理10位专家的评分结果形成矩阵 X_1 。

按式(1)对矩阵 X_1 进行归一化处理,得到矩阵 Y_1 。

$$X_1 = \begin{bmatrix} 4 & 3 & 5 & 2 & 3 & 4 & 5 & 2 & 4 & 3 \\ 5 & 3 & 5 & 3 & 4 & 5 & 4 & 4 & 3 & 5 \\ 3 & 4 & 2 & 5 & 4 & 4 & 2 & 4 & 4 & 3 \\ 4 & 3 & 2 & 4 & 3 & 4 & 3 & 3 & 4 & 5 \end{bmatrix} \quad (9)$$

续表

一级指标	权重	二级指标	权重
U_4 材料设备 风险	0.157	U_{41} 模板系统刚度不足	0.393
		U_{42} 预应力孔道定位偏差	0.256
		U_{43} 材料供应商出现问题	0.191
		U_{44} 测量仪器精度不足	0.161
U_5 环境风险	0.148	U_{51} 极端气候影响	0.417
		U_{52} 地质条件不均匀沉降	0.271
		U_{53} 地理位置复杂	0.312
U_6 结构风险	0.101	U_{61} 变截面区应力集中	0.414
		U_{62} 施工阶段体系转换风险	0.347
		U_{63} 长期收缩徐变效应	0.239

2.3 基于灰色关联的施工风险分析

(1) 专家评分矩阵构建。上面已经通过熵权法求出6个一级指标的权重,另外选取10名专家对6个一级指标进行评分(1分表示风险影响极低,5分表示风险影响极高),构建专家评分矩阵 X_2 。

$$X_2 = \begin{bmatrix} 4 & 3 & 2 & 5 & 4 & 3 & 4 & 1 & 3 & 4 \\ 4 & 1 & 5 & 4 & 2 & 3 & 4 & 3 & 2 & 3 \\ 5 & 4 & 4 & 3 & 5 & 5 & 3 & 2 & 4 & 5 \\ 2 & 5 & 3 & 3 & 4 & 2 & 5 & 4 & 5 & 2 \\ 1 & 4 & 2 & 5 & 3 & 4 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 2 & 3 & 2 & 3 & 1 & 2 & 3 & 5 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

(2) 数据归一化处理。按照式(1)对 X_2 进行归一化处理,得到矩阵 Y_2 。

$$Y_2 = \begin{bmatrix} 0.750 & 0.500 & 0.250 & 1.000 & 0.750 & 0.500 & 0.750 & 0.000 & 0.500 & 0.750 \\ 0.750 & 0.000 & 1.000 & 0.750 & 0.250 & 0.500 & 0.750 & 0.500 & 0.250 & 0.500 \\ 1.000 & 0.667 & 0.667 & 0.333 & 1.000 & 1.000 & 0.333 & 0.000 & 0.667 & 1.000 \\ 0.000 & 1.000 & 0.333 & 0.333 & 0.667 & 0.000 & 1.000 & 0.667 & 1.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.750 & 0.25 & 1.000 & 0.500 & 0.750 & 0.250 & 0.500 & 0.750 & 1.000 \\ 0.500 & 0.250 & 0.500 & 0.250 & 0.500 & 0.000 & 0.250 & 0.500 & 1.000 & 0.000 \end{bmatrix}$$

(14)

每个指标的最大值（即风险最高值）构成参考序列 $X_3 = [5 \ 5 \ 5 \ 5 \ 5 \ 5]$ ，归一化后为全 1 矩阵： $X_3^* = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$ 。

根据式（8）计算每位专家评分的关联系数，有：

$$\gamma = \begin{bmatrix} 0.667 & 0.500 & 0.400 & 1.000 & 0.667 & 0.500 & 0.667 & 0.333 & 0.500 & 0.667 \\ 0.667 & 0.333 & 1.000 & 0.667 & 0.400 & 0.500 & 0.667 & 0.500 & 0.400 & 0.500 \\ 1.000 & 0.600 & 0.600 & 0.428 & 1.000 & 1.000 & 0.428 & 0.333 & 0.600 & 1.000 \\ 0.333 & 1.000 & 0.428 & 0.428 & 0.600 & 0.333 & 1.000 & 0.600 & 1.000 & 0.333 \\ 0.333 & 0.667 & 0.400 & 1.000 & 0.500 & 0.667 & 0.400 & 0.500 & 0.667 & 1.000 \\ 0.500 & 0.400 & 0.500 & 0.400 & 0.500 & 0.333 & 0.400 & 0.500 & 1.000 & 0.333 \end{bmatrix}$$

(15)

根据式（16）可以得到针对每个一级指标的关联系数 γ ，将各一级指标的权重 w 与关联系数 γ 汇总如表 4 所示。

表 4 一级指标权重与关联系数表						
一级指标	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6
权重	0.174	0.184	0.236	0.157	0.148	0.101
关联系数	0.590	0.563	0.699	0.606	0.613	0.487

由表 4 可知，将权重和关联系数代入式（8）可知依托工程整体施工风险的灰色关联度为：

$$R = 0.174 \times 0.590 + 0.184 \times 0.563 + 0.236 \times 0.699 + 0.157 \times 0.606 + 0.148 \times 0.613 + 0.101 \times 0.487 = 0.606$$

(16)

根据表 2 风险等级划分标准可知，当 $0.60 \leq R < 0.70$ 时，风险等级为Ⅲ级（中等风险）。表明整体施工风险处于中等水平，需重点关注权重较高的指标。

3 变截面连续梁桥关键风险及应对策略

基于熵权法 - 灰色关联模型评价结果，本工程整体施工风险为中等风险，其中技术风险、管理风险及人员风险为施工风险管控核心。其中，技术风险涉及挂篮系统适应性、合龙精度等核心工艺；管理风险集中于规章制度的执行力度以及应急预案的完善程度；人员风险则以操作规范性和员工的安全意识为核心矛盾。针对上述三类高权重风险，结合工程实际提出分级管控措施，构建“工艺优化 - 管理强化 - 行为规范”三位一体的风险防控体系，以确保施工过程的安全可控。

（1）技术工艺优化。在施工准备阶段，对挂

篮的主桁架结构、锚固系统及其行走轨道进行全面的荷载测试，确保所有部件的抗倾覆系数不低于 2.0，同时严格控制变形量，使之不超过梁长的 1/800。对于曲线段的施工，采用分阶段预压的方式来模拟实际荷载情况，并根据实际情况动态调整轨道的预拱度，使其达到设计值的 1.2 倍。在线形控制方面，实行“双人复核与交叉校验”的双重检查制度。在每节段施工前，利用高精度全站仪进行定位放样；浇筑完成后，再进行高程复测，确保偏差保持在 $\pm 10 \text{ mm}$ 的范围内。在合龙段施工时，选择日温差不超过 10°C 的稳定时段进行作业。采用水箱配重法来平衡荷载，配重量设定为悬臂段自重的 1.1 倍。此外，在混凝土中加入 8% 至 10% 的膨胀剂，以补偿其收缩变形，并在浇筑后覆盖土工布进行至少 14 天的保湿养护，确保合龙段的高差控制在 15 mm 以内。

（2）管理动态优化。建立一个覆盖挂篮倾覆、交通导改等六类高风险场景的专项应急预案库，明确各类应急响应流程和物资调配方案，并每月组织跨部门联合演练，确保跨线施工区的应急响应时间不超过 15 分钟。实行技术方案的双级审查机制，经项目部初审后，再由专家团队对关键参数进行终审，并形成书面会签记录。同时，构建监测数据闭环管理体系，对挂篮变形和线形偏差等数据设定三级预警阈值，分别要求一级限值控制在 70% 以内、二级限值控制在 85% 以内、三级限值控制在 100% 以内；一旦监测数据超标，立即启动整改程序，并在 24 小时内完成原因分析和反馈处理，以实现风险的动态管控。

(3) 人员行为规范。制定高风险工序操作指南,明确包括挂篮行走锚固点检查和预应力张拉持证上岗在内的12项关键工序标准。新进场工人必须通过理论考试,成绩达到75分以上,并在实操考核中确保误差率不超过5%,方可上岗作业。现场管理实行班组长巡查与安全员抽查双重控制机制,重点监督安全带使用率必须达到100%,同时确保临边防护和设备操作均符合规范;对违规行为实行红黄牌警示制度,累计两次警告者将停工接受再教育。此外,依托每周安全课堂、事故案例宣讲,搭配悬挂高度不超过3m的风险警示牌,进一步强化安全文化渗透;将安全行为与绩效考核挂钩,对于连续三个月无违章的班组给予奖励,进而形成制度约束、行为监督和文化引导三位一体的管理闭环。

4 模型局限性

本研究构建的风险评价模型在一定条件下具有较好的适用性,但也存在若干局限:①模型在指标权重确定及灰色关联分析环节,依托专家经验开展研判。研究虽通过多专家背对背打分结合一致性检验,有效削弱了主观偏差,但评价结果仍会在一定程度上受专家专业背景与经验范畴的影响。②所建立的风险指标体系主要针对变截面连续梁桥悬臂浇筑施工阶段,若要应用至其他桥型、施工方法或特殊地质条件,需结合工程实际对指标进行相应调整与验证。③模型目前侧重于施工前的静态风险评估,尚未实现与施工过程中实时监测数据的动态耦合,今后可结合BIM、传感器网络等技术,构建风险动态更新与预警机制。④本方法适用于具有一定专家资源、历史数据及规范管理基础的工程项目,在数据严重缺失或专家参与不足的情况下,建议辅以其他定性或定量方法进行综合判断。

5 结论

本文基于熵权法与灰色关联理论,构建了一种适用于变截面连续梁桥施工风险的评价模型,并结合实际工程案例进行了应用验证。通过多层次、多维度的风险指标体系建立和权重的确定,实现了对施工风险的动态量化评估与分级预警,为变截面连续梁桥施工安全管理提供了科学的决策依据和方法支持,具体得出如下结论:

(1) 结合熵权法与灰色关联理论,以南昌市绕城高速公路西二环TJ1标段厚田枢纽C匝道桥

为例构建模型。该模型成功识别出项目整体施工风险处于中等水平,并明确技术风险、管理风险和人员风险为关键风险领域。

(2) 针对识别出的关键风险因素,构建了“工艺优化-管理强化-行为规范”三位一体的风险防控体系。在技术工艺方面,通过优化挂篮设计与施工工艺,有效降低了技术风险。在管理层面,建立专项应急预案库,实行技术方案双级审查机制,提升了管理风险的动态管控能力。在人员行为方面,通过制定高风险工序操作指南,加强安全培训与考核,有效规范了人员行为,降低了人员风险。这些措施的实施能够显著提升施工风险的管控效果,确保施工过程的安全可控。

参考文献:

- [1] 廖佩钡,宁晓骏,童爽. 基于Dynamo模式+Revit二次开发的变截面连续梁桥初步设计研究[J]. 工业安全与环保,2024,50(5):74-79.
- [2] 高磊. 基于BIM的预应力变截面连续梁桥参数化设计与优化应用[J]. 黑龙江科学,2025,16(2):143-145.
- [3] 徐士见. 预应力混凝土变截面连续梁施工技术探讨[J]. 技术与市场,2023,30(1):107-110.
- [4] 郑祖恩,李志勇,吴欣. 基于模糊综合评判法的预应力混凝土连续梁桥悬臂浇筑施工风险评估[J]. 公路工程,2013,38(2):60-64.
- [5] 卢睿. 基于模糊层次分析的桥梁安全评估方法[J]. 工程与建设,2015,29(5):724-726.
- [6] 赖笑,王锋,谭勇. 基于桥梁风险评价的灰色关联性风险评价模型构建研究[J]. 公路工程,2018,43(4):205-209.
- [7] 闫兴非. 基于层次分析法的连续梁桥倒拆拆除结构状态评定[J]. 城市道桥与防洪,2020(11):110-114,17.
- [8] 晁铁彦,王旭东,张新华,等. LEC法在变截面连续梁施工危险源识别与风险评估中的应用[J]. 施工技术(中英文),2023,52(15):90-97.
- [9] 柳向辉,任鑫,李俊,等. 基于线性最优化的灰色模型在桥梁施工控制中的应用[J]. 工程质量,2024,42(5):36-40.
- [10] 冯运卿,李雪梅,李学伟. 基于熵权法与灰色关联分析的铁路安全综合评价[J]. 安全与环境学报,2014,14(2):73-79.
- [11] 李尚革,冯雪亮. 基于熵权和灰色关联的TBM施工成本风险管理研究[J]. 水利发展研究,2024,24(5):45-52.
- [12] 陈长坤,孙凤琳. 基于熵权-灰色关联度分析的暴雨洪涝灾情评估方法[J]. 清华大学学报(自然科学版),2022,62(6):1067-1073.