

中文引用格式:向鹏成,郭佩文,张雪芹. 基于模糊认知图的桥梁运营安全风险决策研究[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(9): 202–211.

英文引用格式:XIANG Pengcheng, GUO Peiwen, ZHANG Xueqin. Research on bridge operational safety risk decision-making based on fuzzy cognitive maps[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(9): 202–211.

基于模糊认知图的桥梁运营安全风险决策研究^{*}

向鹏成^{1,2,3}教授, 郭佩文^{**1}, 张雪芹⁴高级工程师

(1 重庆大学 管理科学与房地产学院, 重庆 400044; 2 重庆大学 可持续建设国际研究中心, 重庆 400045; 3 重庆大学 建设经济与管理研究中心, 重庆 400045; 4 重庆市建筑科学研究院有限公司, 重庆 400042)

中图分类号: X913.4 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.09.0861

资助项目: 重庆市社会科学规划重大项目(2023ZDSC12); 重庆设计集团科研项目(2023-C2)。

【摘要】 为探究桥梁运营安全风险决策机制, 防范桥梁运营重大安全风险, 搭建桥梁运营安全风险感知—风险认知—风险决策三阶段理论框架, 利用 Heronian 有序加权平均(H-OWA)算子处理专家评分, 建立决策因素的交互矩阵; 确定模糊认知图(FCM)概念节点的含义及结构, 揭示因素间的映射关系; 收集某铁路桥梁2020年1月1日列车通行时的监测数据, 开展工程应用与验证分析。结果表明: 桥梁结构加速度、应变、位移的权重重要度排序与迭代过程重要度排序最高, 是桥梁结构健康感知关键指标; 桥梁下部结构加固策略的实施效果在低、中、高风险情景下均显著高于防水隔热、上部结构加固, 有效提升桥梁的整体稳定性和安全性。

【关键词】 模糊认知图(FCM); 桥梁运营安全; 风险决策; Heronian 有序加权平均(H-OWA)算子; 维护策略

Research on bridge operational safety risk decision-making based on fuzzy cognitive maps

XIANG Pengcheng^{1,2,3}, GUO Peiwen¹, ZHANG Xueqin⁴

(1 School of Management Science and Real Estate, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2 International Research Center for Sustainable Built Environment, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3 Construction Economics and Management Research Center, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 4 Chongqing Construction Science Research Institute Co., Ltd., Chongqing 400042, China)

Abstract: In order to investigate the decision-making mechanism for operational safety risks in bridges and mitigate major operational safety hazards, a three-stage theoretical framework comprising risk perception, risk cognition, and risk decision-making for bridge operational safety was established. H-OWA operator was employed to process expert evaluations, constructing an interaction matrix for decision factors.

* 文章编号: 1003-3033(2025)09-0202-10; 收稿日期: 2025-04-27; 修稿日期: 2025-06-30

** 通信作者: 郭佩文(1995—), 女, 吉林延边人, 博士研究生, 研究方向为安全与风险管理、一带一路与国际工程管理。E-mail: peiwen_guo@stu.cqu.edu.cn。

The meanings and structure of concept nodes within FCM were defined to elucidate the mapping relationships between factors. Monitoring data collected during train passages on a specific railway bridge on January 1, 2020, was utilized for conducting engineering application and validation analysis. The results show that the weight importance ranking of bridge structure acceleration, strain, and displacement is the highest among the iterative process importance ranking, indicating their critical roles in perceiving bridge structure health. Moreover, the implementation effect of reinforcement strategies for the substructure of the bridge is significantly higher than that of waterproofing and insulation and reinforcement of the superstructure under low, medium, and high-risk scenarios, effectively enhancing the overall stability and safety of the bridge.

Keywords: fuzzy cognitive maps (FCM); bridge operational safety; risk decision-making; Heronian ordered weighted averaging (H-OWA) operator; maintenance strategies

0 引言

桥梁的老龄化引发桥梁结构性能下降、安全事故概率增加等隐患,这使桥梁运营安全风险的决策复杂性显著提升^[1]。桥梁运营安全风险是桥梁结构和运营环境内外因素耦合作用的结果^[2],该风险特征增加了全寿命周期维护策略制定的复杂性与不确定性。因此,构建科学合理的运营安全风险决策模型,准确测度维护策略的实施效果,对于保障桥梁运营安全具有重要意义。

诸多学者对此开展了研究,在风险评估研究领域,CHENG Minyuan 等^[3]建立基于风险优先级的桥梁维护决策模型,提出以风险成本最小化为目标的项目排序方法。张劲泉等^[4]构建服役桥梁可靠性评估体系,将耐久性、适用性及安全性纳入安全性评价体系。周海怡等^[5]结合行业规范和专家经验,确立了评价指标体系,构建城市桥梁可靠性模糊综合评价模型。ZHANG Minggong 等^[6]提出博弈论与云模型组合赋权方法,为跨区域重大基础设施项目提供了支持性评估框架。WEI Sen 等^[7]采用改进逼近理想解排序法模型,评估香港—珠海—澳门大桥的运营维护绩效,揭示了检测数据质量对决策有效性的关键影响。

在桥梁结构健康监测研究领域,HEYKOOP 等^[8]论证了智能传感系统在桥梁状态评估中的补充作用,发现多参数监测可显著提升隐蔽病害的识别率。高少强等^[9]研发了数字图像相关法,实现了运营状态下桥梁伸缩缝三维变形的精准捕获。袁阳光等^[10]基于挠度监测建立混凝土桥梁实时安全评估方法,得出挠度容许值及评估周期建议。WEI Yuntao 等^[11]重构列车引起的动态应力时间历程,结合可靠性理论预测高速铁路桥梁疲劳寿命。

KASPAREK 等^[12]进行钢拱桥轨道-桥梁交互作用的长期监测,揭示了温度循环与列车荷载的耦合影响机制。POLONI 等^[13]提出无参考的桥梁挠度监测方法,通过分布式应变传感器与逆有限元法实现桥梁动态监测。

上述研究为桥梁运营安全管理奠定了理论和技术基础,然而,将主观评分数据与客观监测数据相结合的研究仍显不足,鉴于此,笔者分析桥梁运营安全风险决策因素和维护策略;构建基于 Heronian 有序加权平均(Heronian Ordered Weighted Averaging, H-OWA)算子和模糊认知图(Fuzzy Cognitive Maps, FCM)的风险决策模型;融合专家评分数据和桥梁结构健康监测数据展开仿真分析;结合实际工程案例开展工程应用与验证分析,以期桥梁运营安全风险提供管理提供参考。

1 桥梁运营安全风险决策因素及维护策略分析

1.1 桥梁运营安全风险决策三阶段因素识别

在心理学和认知科学领域,人类信息处理过程通常可划分为感知—认知—决策三阶段,桥梁运营安全风险决策过程可视为运营安全风险信息的处理与应用。风险感知阶段是桥梁运营安全风险决策的起始点,初步感知和了解桥梁结构本身的物理状态、健康程度以及外部环境条件。风险认知阶段进一步深入的分析和评估桥梁发生安全风险事故的概率和后果。风险决策阶段是考虑如何在保障桥梁结构安全和适应环境特征的前提下,制定科学合理的维护计划和措施。

参考《公路桥梁结构安全监测系统技术规程》^[14],识别桥梁运营安全风险决策因素,结果见表 1。

表 1 桥梁运营安全风险决策因素

Table 1 Decision factors of bridge operational safety risks

维度	因素	含义
结构健康感知	加速度	桥梁由于车辆行驶、风力等外部因素产生的振动加速度
	应变	桥梁结构在受到外部荷载时,内部产生的变形程度
	位移	桥梁在外部荷载作用下的整体或局部位移量
	结构温度	桥梁结构内部的温度分布情况
	结构湿度	桥梁结构内部的湿度情况
	桥梁结构	桥梁的整体结构状况
运营环境感知	空气温度	桥梁所在区域的空气温度
	空气湿度	桥梁所在区域的空气湿度
	降雨量	桥梁所在区域的降雨量
	风速	桥梁所在区域的风速和风向
	车速	列车通行时速
	运营环境	桥梁运营所处的综合环境
安全风险评估	发生概率	在特定时间内,桥梁发生安全事故的概率
	人员伤亡	桥梁事故中受伤或死亡的人员数量
	经济损失	桥梁事故直接或间接造成的经济价值损失
	环境影响	桥梁事故对周围环境造成的负面影响
	安全事故	桥梁发生的各类安全事故
运营维护策略		保障桥梁结构安全性能的措施

1.2 桥梁运营安全维护策略分析

桥梁的上部结构直接承受交通荷载和环境作用,通过加固上部结构提高桥梁的承载能力和抗变形能力,减少由车辆荷载、风载等动态作用引起的加速度和应变。上部结构加固处治方法包含连接处和构件加固。桥梁的下部结构支撑上部结构并将荷载传递给地基,通过加固下部结构提高其抵抗外力的能力,减少位移和应变,防止结构变形和损伤。下部结构加固处治措施包含盖梁加固、墩台身加固、墩台基础加固、墩台地基加固。

此外,桥梁的防水隔热性能是其抵御自然侵蚀、保持结构稳定的重要防线。防水隔热策略包含“防排堵截”,通过设置防水层、排水系统和防渗措施,提高桥梁的抗渗性能、主动排除周围水源、隔绝水源以及减少地表水下渗。

2 桥梁运营安全风险决策模型构建

2.1 利用 H-OWA 建立交互矩阵

H-OWA 是用于多属性决策和信息聚合的数学工具。由于 H-OWA 算子综合考虑了属性间的关联关系,在修正主观误差方面展现出良好效果^[15]。利用 H-OWA 算子计算专家评分的计算步骤如下:

1) 统计 n 位专家对 m 个指标的评分,第 1 个指标的评分为 $a_1, a_2, \dots, a_n$,采用降序的方式重新排

列,得到降序评分 $b_1, b_2, \dots, b_n, b_1 > b_2 > \dots > b_n$ 。

2) 引入含权重调节参数 ρ 的 H-OWA 算子优化权重数据,其数学表达式为:

$$\overline{w}_1^H = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_i O_\rho(H_i) \right)^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

$$O_\rho(H_i) = \sum_{j=1}^{n+1} \varphi_j^h b_{i(j)}^h \tag{2}$$

$$\varphi_j^h = \frac{C_m^{j-1}}{\sum_{k=1}^{n+1} C_n^{k-1}}, j = 1, 2, \dots, n + 1 \tag{3}$$

式中: $\overline{w}_1^H$ 为第 1 个指标经 H-OWA 算子优化后的权重; i 为重复元素的索引, $i = 1, 2, \dots, n$; $O_\rho(H_i)$ 为局部聚合函数; H_i 为扩展后的有序序列, $H_i = [b_1, b_2, \dots, b_{i-1}, b_i, b_{i+1}, \dots, b_n]$; j 为扩展序列 H_i 按降序排列后的索引; 组合数权重向量 $\phi^h = [\phi_1^h, \phi_2^h, \dots, \phi_{n+1}^h]$, $\phi_j^h \in [0, 1]$; $b_{i(j)}^h$ 为 H_i 中第 j 个最大评分; C_n^{j-1} 为从 n 个元素中选取 $j-1$ 个的组合数; k 为选择的元素个数, $k = 1, 2, \dots, n+1$ 。

3) 计算影响度和被影响度。修正后的权重矩阵 $W^H = (W_1^H, W_2^H, \dots, W_m^H)^T$, 影响度 ϕ 为每个因素对其他因素的综合影响程度, 被影响度 ψ 表示每个因素受到其他因素的综合影响程度, 计算如下:

$$W_1^H = \overline{w}_1^H / \sum_{i=1}^m \overline{w}_i^H \tag{4}$$

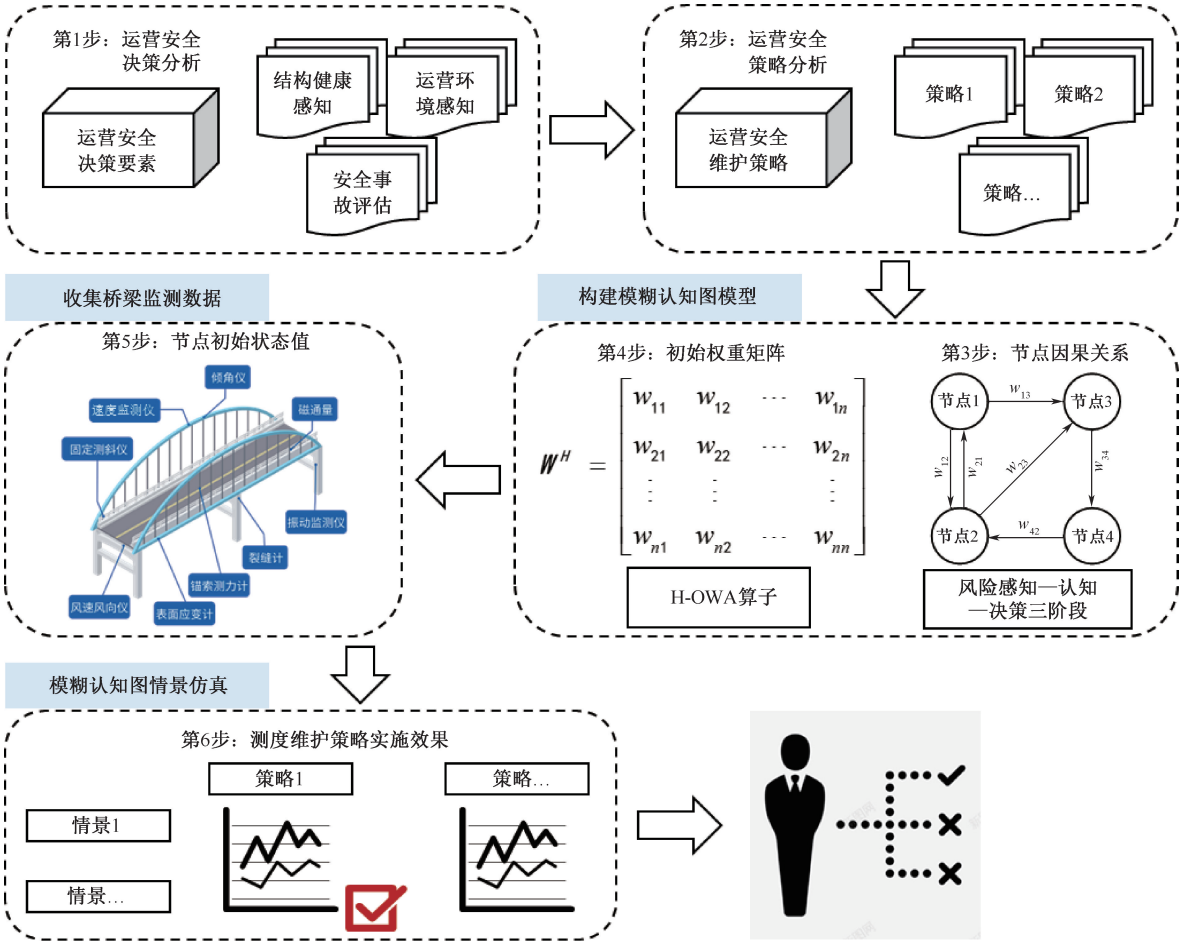


图 1 桥梁运营安全风险决策模型
Fig. 1 Bridge operational safety risk decision-making model

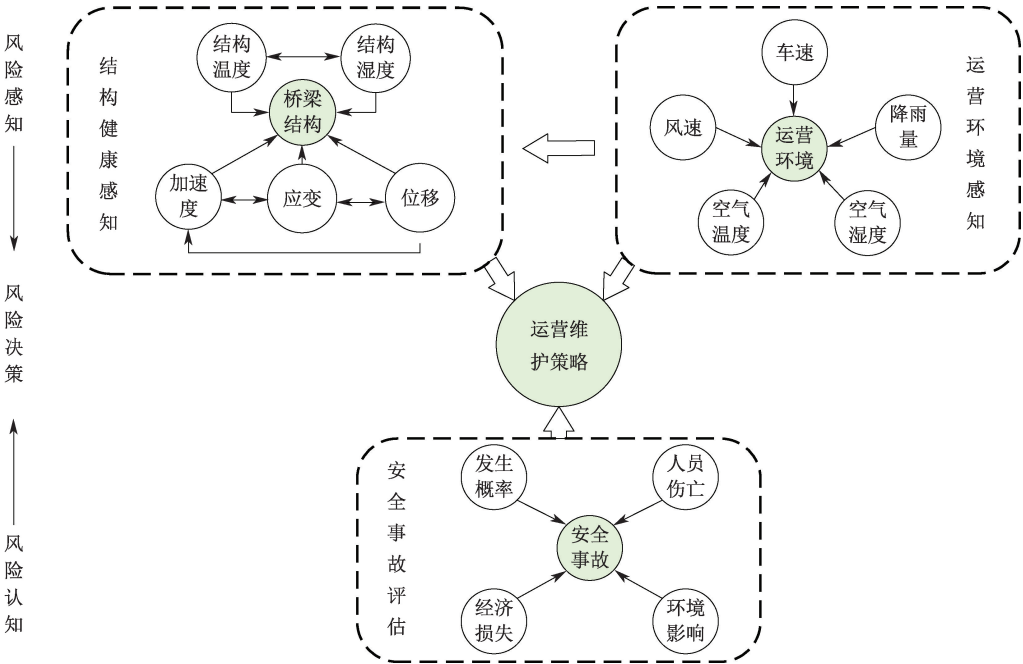


图 2 桥梁运营安全风险决策 FCM 模型节点因果关系
Fig. 2 Causal relationship between nodes in FCM model for bridge operational safety risk decision-making

步骤5:收集并统计桥梁结构状况、运营环境的监测数据,对样本数据进行标准化处理,作为FCM模型节点的初始状态值。

步骤6:设定低风险、中风险和高风险3个仿真情景,测度不同仿真情景下3种维护策略的实施效果,确定在特定环境下最佳的维护策略。

3 桥梁运营安全风险决策工程应用

3.1 监测数据获取

某钢制铁路桥全长115 m,宽度12.4 m,由2条

装有道砟的电气化轨道组成,主要用于承载客运列车,最高速度限制为160 km/h。空间坐标按纵向(x 轴)、横向(y 轴)、垂直向(z 轴)定义,传感器布设位置如图3所示。

2020年1月1日08:11:54—08:12:41期间,列车通行时的监测数据见表2。标准化处理原始监测数据 τ ,得到标准化处理后的监测数据 τ_0 :

$$\tau_0 = \frac{\tau - \min(\tau)}{\max(\tau) - \min(\tau)}$$

(10)

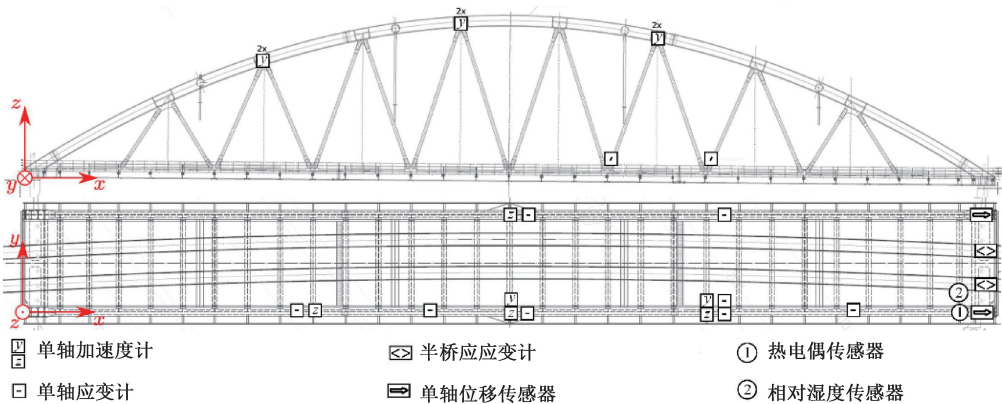


图3 铁路桥测量设置

Fig.3 Measurement settings for railway bridge

表2 桥梁结构监测数据统计

Table 2 Bridge structure monitoring data statistics

数值	横向 加速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	桥面 应变/ ($\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$)	支座 位移/ m	桥面 温度/ $^{\circ}\text{C}$	桥面 湿度 /%	平均空 气温度/ $^{\circ}\text{C}$	平均相 对湿度/ %	总降 雨量/ mm	地表10 m 处平均 风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	车速/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)
最小值	-0.300	-0.000 005 5	-0.018 99	2.453	69.257	-0.120	67.533	0	0.43	0
最大值	0.342	0.000 000 4	-0.018 93	12.319	97.375	13.095	98.093	0.2	4.43	160
监测值	0.018	-0.000 002 1	-0.018 94	2.898	91.076	0.707	98.093	0	1.30	103.5
标准化	0.496	0.565	0.783	0.045	0.776	0.063	1	0	0.218	0.647

3.2 风险情景模拟

参考国际隧道协会发布的 *Guidelines for Tunnelling Risk Management*^[17],划分风险发生概率、人员伤亡、经济损失以及环境影响的风险等级,通过式(10)计算各等级取值,结果见表3。设定安全认知因素(发生概率,人员伤亡,经济损失,环境影响)的初始值如下:低风险节点初始值为(0.003,0.05,0.05,0.05),中风险节点初始值为(0.03,0.1,0.1,0.1),高风险节点初始值为(0.3,0.5,0.5,0.5)。

3.3 安全策略分析

3.3.1 因素分析

计算桥梁结构健康感知因素重要度排序,结果

见表4。

1) 权重重要度排序。因素权重代表各概念节点之间的相对重要性,由表4可知:加速度直接反映桥梁动态响应和潜在不稳定性,被赋予最高权重。位移是衡量桥梁结构形变程度和稳定性的关键指标,其重要性仅次于加速度。应变与桥梁材料的强度和耐久性紧密相关,对于评估桥梁结构的长期稳定性和抗裂性能具有重要价值。

2) 稳态值排序。稳态值是指在FCM迭代过程中,各概念节点状态达到稳定时的取值,反映了这些因素在长期或特定条件下对桥梁结构运营安全风险决策的影响程度。由表4可知:加速度稳态值较大,

表 3 桥梁运营风险等级标准

Table 3 Grading criteria for bridge operational risk levels

指标阈值			低风险			中风险	高风险
			等级 1	等级 2	等级 3	等级 4	等级 5
风险发生 概率	范围/%		[0, 0.000 3)	[0.000 3, 0.003)	[0.003, 0.03)	[0.03, 0.3)	[0.3, 1]
	取值/%		0.003			0.03	0.3
人员伤亡	范围/ 人	死亡 (含失踪)	—	(0, 3)	[3, 10)	[10, 30)	[30, +∞)
		重伤	(0, 5)	[5, 10)	[10, 50)	[50, 100)	[100, +∞)
	取值/%		0.05			0.1	0.5
经济损失	范围/万元		[0, 500)	[500, 1 000)	[1 000, 5 000)	[5 000, 10 000)	[10 000, +∞)
	取值/%		0.05			0.1	0.5
环境影响	范围/人		[0, 50)	[50, 100)	[100, 500)	[500, 1 000)	[1 000, +∞)
	取值/%		0.05			0.1	0.5

表 4 桥梁结构健康感知因素重要度排序结果

Table 4 Result of importance ranking of bridge structural health perception factors

指标	权重重要度统计					迭代过程统计				综合 排序
	ϕ	ψ	$\phi+\psi$	$\phi-\psi$	求和 (排序)	初始值	稳态值 (排序)	损失值	收敛速度 (排序)	
加速度	1.141	1.141	2.281	0.000	2.281(1)	0.495 8	0.887 1(1)	-0.391 3	0.065 2(2)	1
应变	0.851	0.851	1.702	0.000	1.702(3)	0.565 2	0.858 0(3)	-0.292 8	0.048 8(3)	3
位移	0.869	0.869	1.738	0.000	1.738(2)	0.783 0	0.860 1(2)	-0.077 2	0.012 9(4)	2
结构温度	0.303	0.263	0.566	0.040	0.606(4)	0.045 1	0.760 7(5)	-0.715 6	0.119 3(1)	4
结构湿度	0.263	0.303	0.566	-0.040	0.606(4)	0.776 0	0.767 0(4)	0.009 0	0.001 5(5)	5

表明桥梁受到外部荷载突变的影响较大,这增加了不稳定性和潜在的安全风险。该桥的位移稳态值意味着桥梁在某些部位存在较大形变,可能导致结构疲劳等问题。该桥的应变稳态值表明材料承受较大应力,可能形成或扩展现有裂纹,从而影响桥梁的完整性和安全性。

3) 收敛速度排序。收敛速度表示 FCM 中概念节点从初始状态到稳态的过渡速度,反映桥梁对外部变化的反应迅速性。由表 4 可知:该桥的温度收敛速度较快,表明该桥能够迅速适应外部温度变化,保持结构的稳定性。加速度收敛速度表明该桥能够迅速响应外部,保持结构的动态稳定性。应变收敛速度表明该桥能够迅速适应外部载荷或环境变化,保持结构的完整性。

4) 综合排序。综合排序融合因素权重、稳态值及收敛速度指标。由表 4 可知:加速度在权重重要度排序和稳态值排序中都位列第一,且在收敛速度

排序中也位于前列,因此,加速度被认定为最重要的指标。同时,位移和应变监测在桥梁运营安全风险决策中具有重要作用。

3.3.2 策略仿真

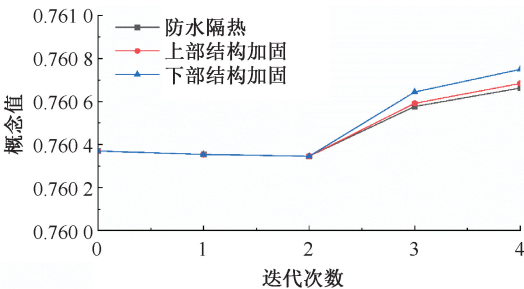
防水隔热策略改善了桥梁结构温度和结构湿度,令结构温度和结构湿度的初始值提升 50%;桥梁上部结构加固策略改善桥梁的动态响应和应力分布,令加速度和应变的初始值提升 50%;桥梁下部结构加固策略改善桥梁的应力分布和结构变形,令应变和位移的初始值提升 50%。相互作用矩阵不变,直到系统重新达到稳态,以加速度 A 为例, $A^{(1)}=0.780\ 2$, $A^{(2)}=0.859\ 2$, $A^{(3)}=0.880\ 4$, $A^{(4)}=0.885\ 6$, $A^{(5)}=0.886\ 8$, $A^{(6)}=0.887\ 1$,当迭代次数 $t\geq 5$, $|A^{(t)}-A^{(t-1)}|=0.000\ 3<0.001$,满足收敛条件 0.001,最终确定基准稳定值为 0.887 1。3 种风险情景下不同维护策略的仿真过程如图 4 所示,结果见表 5。

表 5 不同风险情景下策略模拟结果

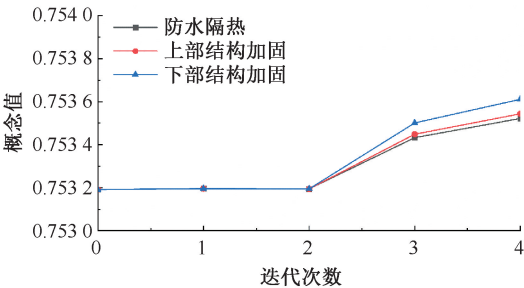
指标	基准 稳定值	防水隔热		上部结构加固		下部结构加固	
		稳定值	差异/%	稳定值	差异/%	稳定值	差异/%
加速度	0.887 1	0.887 1	0.008 9	0.933 6	5.249 5	0.894 0	0.788 9
应变	0.858 0	0.858 1	0.009 8	0.915 7	6.716 8	0.915 0	6.641 5

续表 5

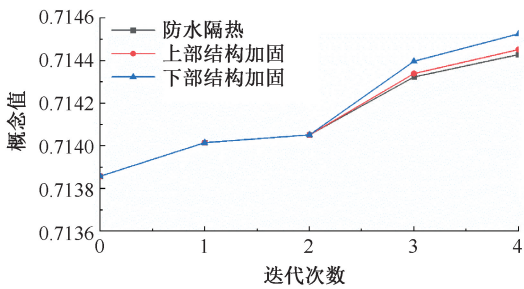
指标		基准 稳定值	防水隔热		上部结构加固		下部结构加固	
			稳定值	差异/%	稳定值	差异/%	稳定值	差异/%
位移		0.860 1	0.860 2	0.009 7	0.866 0	0.684 1	0.916 3	6.532 0
结构温度		0.760 7	0.855 2	12.414 0	0.760 9	0.018 4	0.760 9	0.0184
结构湿度		0.767 0	0.859 7	12.087 6	0.767 2	0.018 0	0.767 2	0.018 0
桥梁结构		0.967 9	0.970 1	0.230 7	0.970 3	0.245 9	0.970 7	0.290 5
运营维 护策略	低风险	0.760 4	0.760 7	0.038 6	0.760 7	0.041 4	0.760 7	0.050 0
	中风险	0.753 2	0.753 5	0.044 0	0.753 5	0.046 8	0.753 6	0.055 7
	高风险	0.713 9	0.714 4	0.080 1	0.714 5	0.083 4	0.714 5	0.093 8



(a) 低风险情景



(b) 中风险情景



(c) 高风险情景

图 4 不同风险情景下策略模拟过程

Fig. 4 Strategic simulation under risk scenarios

1) 风险情景分析。桥梁运营安全风险决策模拟时,基准稳定值的大小揭示变量对决策系统的影响程度。由表 5 可知;加速度、应变和位移的稳定值分别为 0.887 1、0.858 0 和 0.860 1,说明这些变量在桥梁结构安全运营决策中起到关键作用,与因素综合排序研究结论一致。

不同风险情景下的基准稳定值表征未实施桥梁维护策略的初始状况。在低风险情景下,决策稳定值为 0.760 4,表明在较为理想的状态下,即使不采

取额外的维护措施,桥梁的运营安全仍能保持在相对可靠的水平。随着风险等级的提升至中等,决策稳定值略有下降至 0.753 2,这暗示了风险增加时,桥梁的稳定性和可靠性开始受到影响。在高风险情景下决策稳定值进一步降至 0.713 9,这一显著降低说明在严峻环境下,未经维护的桥梁可能面临较大的安全风险,应采取积极的维护和加固策略,确保桥梁结构的完整性和功能性不受影响。

2) 策略实施过程。由图 4 可知:策略实施前期,中低风险情景下作用效果不明显,高风险情景下作用效果稍有提高。表明在策略实施初期,特别是针对中低风险情境,维护措施带来的即时效果并不显著。然而在高风险情景下,由于桥梁结构面临更严重的损坏和退化,因此,维护措施能够在一定程度上提前预防和减缓这些风险,从而表现出较好的效果。

策略实施后期作用效果显著增强,但 3 种维护策略作用效果的差异逐渐显现。其中,下部结构加固策略的持续作用最显著并持续增强,这表明加固措施不仅在初期为桥梁提供了更强的支撑,而且随着时间的推移,其效果愈发明显。上部结构加固策略虽然持续作用同样表现出了持久的增强效果,确保了桥梁上部结构在长期使用过程中能够维持良好的工作状态,抵抗各种外力和环境因素的侵蚀,从而保障桥梁的整体性能和安全性。此外,防水隔热策略的持续作用效果相对较小,表明尽管防水隔热策略直接提升桥梁结构强度的作用有限,但长期来看对于延长桥梁使用寿命和减少维护成本具有重要意义。3 种维护策略的持续作用和长期效果证明了定期维护和及时加固对于桥梁安全的重要性。

3) 策略稳态分析。由表 5 可知:稳态值由大到小依次是下部结构加固、上部结构加固、防水隔热。结构加固策略对应变的稳态值提升幅度最为显著,防水隔热策略对结构温度的改善效果更为突出。

下部结构加固策略虽然对加速度稳定值的提升

相对较低,仅为 0.788 9%,但应变稳定值和位移稳定值分别提升 6.641 5%和 6.532 0%,分别达到 0.915 0和 0.916 3。此外,该策略对桥梁结构稳定值的提升最为显著,达到 0.290 5%。低风险、中风险和高风险情境下的提升幅度分别为 0.05%、0.055 7%和 0.093 8%,在高风险情境下,下部结构加固策略效果显著,通过增强桥梁的基础支撑,可有效减少由环境变化或重大负载引起的风险。

上部结构加固策略显著提高加速度和应变稳定值。其中,桥梁加速度稳定值增加 5.249 5%,达到 0.933 6;应变稳定值上升 6.716 8%至 0.915 7;位移稳定值提升 0.684 1%,为 0.866 0。这一策略同样提高了桥梁结构稳定值,增幅为 0.245 9%。在不同风险情境下,该策略的稳定值提升幅度在低风险、中风险和高风险情境中分别为 0.041 4%、0.046 8%和 0.083 4%。说明在中高风险情境下,其对加速度和应变的改善能够有效应对更为复杂和变化的负载条件。增强桥梁的上部结构,如桥面和支撑梁,有助于提升桥梁整体的承载能力和抗变形能力。

防水隔热策略的实施显著提升结构的温度与湿度稳定值。具体而言,结构温度稳定值提升 12.414%至 0.855 2,结构湿度稳定值也相应提升 12.087 6%至 0.859 7,同时,桥梁结构的整体稳定值也略有提高,达到 0.230 7%。不同风险情境下的策略稳定值也呈现出相应的增长,低风险、中风险和

高风险情境下的提升幅度分别为 0.038 6%、0.044%和 0.080 1%。防水隔热策略虽然在各风险情境下的实施效果相对较小,但对于保障桥梁运营安全仍有不可忽视的作用,保护桥梁结构不受环境侵蚀,确保其在各种气候条件下的稳定性和使用寿命。

4 结 论

1) H-OWA 权重统计及 FCM 迭代结果表明:权重重要度和稳态值排序均为加速度>位移>应变,收敛速度排序为结构温度>加速度>应变,综合排序为加速度>应变>位移。因此,加速度、位移和应变为桥梁运营安全风险决策中的关键指标。

2) FCM 策略仿真结果表明:就风险情景而言,高风险情境下桥梁稳定性显著下降,需强化维护以保障安全。就策略时效而言,维护策略后期效果增强,下部结构加固的持续作用最突出。就策略效能而言,下部结构加固对应变和位移等改善最显著,防水隔热侧重温湿度调控。

3) 提升风险感知的客观性和准确性对于制定桥梁运营安全风险决策至关重要。文中提出的风险“感知—认知—决策”三阶段模型存在传统主观认知的局限性,提出以下改进方向:在感知阶段,通过多源传感网络实现全息化状态捕获;在认知阶段,引入数据驱动的智能分析模型;在决策阶段,构建数字孪生支持的动态决策系统。

参 考 文 献

- [1] ANG A, DE L. Modeling and analysis of uncertainties for risk-informed decisions in infrastructures engineering [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2005, 1(1): 19-31.
- [2] 王建民. 公路桥梁结构运营荷载下安全状态评价方法[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(7): 48-54.
WANG Jianmin. Evaluation method for safety state of highway bridge structure under operation load [J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(7): 48-54.
- [3] CHENG Minyuan, KHITAM A, KUEH Y. Risk score inference for bridge maintenance projects using genetic fuzzy weighted pyramid operation tree [J]. Automation in Construction, 2024, 165: DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105488.
- [4] 张劲泉, 李鹏飞, 董振华, 等. 服役公路桥梁可靠性评估的若干问题探究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(增 1): 159-173.
ZHANG Jinquan, LI Pengfei, DONG Zhenhua, et al. Study on some reliability evaluation problems of existing highway bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(S1): 159-173.
- [5] 周海怡, 鲍全贵, 叶茂, 等. 基于组合赋权法的城市桥梁可靠性模糊综合评价[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(增 1): 156-161.
ZHOU Haiyi, BAO Quanguai, YE Mao, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of urban bridge reliability based on combination weighting method [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(S1): 156-161.
- [6] ZHANG Minggong, XUE Xiaolong, LUO Ting, et al. The supportability evaluation of cross-regional major infrastructure projects based on the combination weighting of the game theory-cloud model [J]. Engineering Construction and

Architectural Management, 2024, 31(9): 3 679–3 705.

- [7] WEI Sen, LI Yanping, YANG Hanqing, et al. A comprehensive operation and maintenance assessment for intelligent highways: a case study in Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge [J]. *Transport Policy*, 2023, 142: 84–98.
- [8] HEYKOOP I, HOULT N, WOODS J, et al. Development and field evaluation of a low-cost bridge bearing movement monitoring system [J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2024, 14(4): 931–946.
- [9] 高少强, 刘利生, 杨新伟. 数字图像相关法在桥梁伸缩缝监测预警中的应用[J]. *中国安全科学学报*, 2018, 28(增2): 171–175.
- GAO Shaoqiang, LIU Lisheng, YANG Xinwei. Application of digital image correlation method on monitoring and warning of bridge expansion joint [J]. *China Safety Science Journal*, 2018, 28(S2): 171–175.
- [10] 袁阳光, 伊廷华, 辛公锋, 等. 基于挠度监测的混凝土桥梁实时安全评估方法研究[J]. *土木工程学报*, 2025, 58(3): 68–82.
- YUAN Yangguang, YI Tinghua, XIN Gongfeng, et al. Study on real-time safety assessment methods of concrete bridges by deflection monitoring [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2025, 58(3): 68–82.
- [11] WEI Yuntao, YI Tinghua, YANG Donghui, et al. Fatigue life prediction for high-speed railway bridges by reconstructing monitoring-based dynamic stress [J]. *Measurement Science and Technology*, 2024, 35(10): DOI: 10.1088/1361–6501/ad5dd8.
- [12] KASPAREK J, RYJACEK P, ROTTER T, et al. Long-term monitoring of the track-bridge interaction on an extremely skew steel arch bridge [J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2020, 10(3): 377–387.
- [13] POLONI D, MORGESE M, WANG Chengwei, et al. Reference-free distributed monitoring of deflections in multi-span bridges [J]. *Engineering Structures*, 2025, 323: DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.119277.
- [14] JT/T 1037—2022, 公路桥梁结构监测技术规范[S].
- JT/T 1037—2022, Technical specifications for structural monitoring of highway bridges [S].
- [15] 陈娜, 郭浩然, 张志鹏, 等. 基于 H-OWA 算子和投影寻踪的地铁站水灾安全韧性评估[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(4): 148–154.
- CHEN Na, GUO Haoran, ZHANG Zhipeng, et al. Evaluation of subway station flood safely resilience based on H-OWA operator and projection pursuit [J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(4): 148–154.
- [16] 王乾坤, 朱科, 郭佩文. DEMATEL 和模糊认知图在地铁深基坑施工安全风险动态评估中的应用[J]. *安全与环境学报*, 2024, 24(11): 4 143–4 153.
- WANG Qiankun, ZHU Ke, GUO Peiwen. Application of DEMATEL and fuzzy cognitive map in dynamic assessment of safety risk in subway deep foundation pit construction [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2024, 24(11): 4 143–4 153.
- [17] ESKESEN S, TENGBORG P, KAMPMANN J, et al. Guidelines for tunnelling risk management: International tunnelling association, working group No. 2 [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2004, 19(3): 217–237.

作者简介: 向鹏成 (1974—),男,四川万源人,博士,教授,博士生导师,主要从事工程项目管理、安全风险与应急管理等方面的研究。E-mail: pcxiang@cqu.edu.cn。

