

跨海混凝土桥梁耐久性评价中权重值计算方法研究

李涛^{1,2}, 向敬², 闫晓慧¹, 何茂林²

(1. 上海城建职业学院 市政工程智慧诊断技术创新中心, 上海市 201100; 2. 浙江海洋大学, 浙江 舟山 316022)

摘要: 跨海桥梁耐久性关系到结构物使用安全及寿命, 针对评价指标体系权重值计算方法问题, 采用了区间多属性群策方法与数理优化相结合的计算方法, 将具有专家风险态度的主观权重与客观权重进行组合权重值计算, 并通过实证对比分析了组合赋值计算方法与当前规范计算方法的异同, 验证了改进后组合赋值计算方法的可靠性和优越性。研究结果为跨海混凝土桥梁的耐久性评价提供了理论依据和支撑, 该方法不仅可以提高其评价的准确性和科学性, 还对工程实践具有指导意义。

关键词: 跨海混凝土桥梁; 组合赋值计算方法; 桥梁耐久性

中图分类号: TU375.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)03-0133-06

Study on Weight Value Calculation Method in Durability Evaluation of Sea-crossing Concrete Bridge

LI Tao^{1,2}, XIANG Jing², YAN Xiaohui¹, HE Maolin²

(1. Intelligent Diagnosis Technology Innovation Center of Municipal Engineering, Shanghai Vocational College of Urban Construction, Shanghai 201100, China; 2. Zhejiang Ocean University, Zhejiang 316022, China)

Abstract: The durability of sea-crossing bridges is related to the safety and service life of structures. Aiming at the calculation method of weight value of evaluation index system, the method of interval multi-attribute group strategy combined with mathematical optimization is adopted to calculate the combined weight value of subjective and objective weights with expert risk attitude. The similarities and differences between the new method for calculating the combinatorial weights and the current standard method are analyzed through empirical comparison to verify the reliability and advantages of the modified combinatorial weight calculation method. The study results provide the theoretical basis and support for evaluating the durability of sea-crossing concrete bridges. The method not only improves the accuracy and scientificity of its evaluation, but also provides the guidance for engineering practice.

Keywords: sea-crossing concrete bridge; combinatorial weight calculation method; bridge durability

我国的公路桥梁总长度达7 380.21万 m^[1], 随着服役时间的增加, 桥梁耐久性也逐渐下降, 定期对桥梁的耐久性进行评估是确保桥梁安全和使用寿命的关键任务。在当前桥梁耐久性评价的方法中, 包括层次分析法^[2,3]、模糊综合评价法^[4-6]、神经网络法^[7]、可拓物元法^[8,9]等。Thomas L. Satty^[10]构建了层次分析法来评价桥梁耐久性。Van Loargoven^[11]将模糊比较判断和三角模糊数运算运用到层次分析法中。王侗等^[12]基于模糊推理规则, 免去了权重计算, 对某斜拉桥的结构状态进行评估。杨晓红^[13]首先采

用遗传算法对神经网络的结构和连接权值进行了优化, 提高了神经网络的预测性能。虽然国内外对桥梁耐久性评估理论研究较多, 但不同桥型分部分项的权重推荐区间等没有形成确定性结论。

跨海混凝土桥梁耐久性评价中, 最为关键和复杂的问题是指标的权重值计算方法。不同的研究者采用了不同的方法来解决这一问题, 孙晓东^[14]为了“放大”指标之间的相对重要程度, 通过乘法集成原理将主客观赋权法进行乘法集成得出了差异度更大的指标权重值。刘德海^[15]将决策者风险偏好信息与客观信息结合, 以最小偏差为目标建立了线性规划模型得出了最小偏差下的组合权重值。Zhou^[16]利用偏差区间和固定区间属性, 基于熵权法得出了一种区间权重值。Yang^[17]提出了一种三阶段方法来确定多属性群决策中的指标权重值。郝伟^[18]将主成份分

收稿日期: 2024-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(51879236)

作者简介: 李涛(1974—), 男, 博士, 教授, 从事混凝土材料、桥梁结构耐久性研究工作。

通信作者: 闫晓慧(1988—), 女, 博士, 讲师, 从事道路桥梁材料与结构研究工作。电子邮箱: 406779136@163.com

析法与多维偏好线性规划法结合计算了指标的权重值,通过构造变权修正模型对权重值进行了修正。这些方法都在一定程度上提高了评价的精度和准确性,但仍存在一些限制,评价过程中权重值计算不能单一的依靠主观或客观,需要综合主观经验判断和客观数据的计算。综上所述,本论文采用主观与客观的组合权重进行计算,以探究跨海混凝土桥梁耐久性评价过程中评价指标体系的赋权值计算方法问题。

1 构建跨海混凝土桥梁耐久性评价指标体系

桥梁长期暴露在海洋环境中,氯离子是钢筋锈蚀的“元凶”,严重影响桥梁耐久性,论文参考了史波^[19]氯盐环境下混凝土耐久性的研究、金伟良等^[20]关于东南沿海公路桥梁耐久性现状以及郝伟等^[21]对除冰盐与冻融环境下在役混凝土桥梁耐久性评估的研究,结合《公路桥涵养护规范》(JTG H11—2004)^[22]和《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21—2011)^[23]规范,混凝土结构物的耐久性与环境类别有直接联系,沿海地区跨海混凝土桥梁的服役环境严酷,跨海桥梁受力状况也复杂多变,如海上台风及灾害天气带来的影响,在构建了跨海混凝土桥梁耐久性评价指标体系时综合考虑海洋环境与跨海桥梁自身结构损伤因素,如表1所列。

表1 跨海混凝土桥梁耐久性评价指标体系

评价对象	一级指标	二级指标
跨海混凝土桥梁耐久性MI	上部结构MI ₁	主梁混凝土保护层厚度特征与设计值之比MI ₁₁
		主梁钢筋锈蚀MI ₁₂ /%
		主梁混凝土裂缝宽度MI ₁₃ /mm
		主梁混凝土碳化MI ₁₄ /mm
	下部结构MI ₂	桥墩混凝土保护层厚度特征与设计值之比MI ₂₁
		桥墩钢筋锈蚀MI ₂₂ /%
		桥墩混凝土裂缝宽度MI ₂₃ /mm
		桥墩混凝土碳化深度MI ₂₄ /mm
	海洋环境因素MI ₃	桥墩混凝土强度MI ₂₅ /MPa
		表面氯离子含量MI ₃₁ /%
服役环境湿度MI ₃₂ /%		
桥面系MI ₄	服役环境温度MI ₃₃ /°C	
	伸缩缝MI ₄₁ /mm	
	栏杆、护栏MI ₄₂	
	桥面排水MI ₄₃	
		桥面铺装MI ₄₄

1.1 跨海混凝土桥梁耐久性评价的关键因素

1.1.1 评价方法

可拓集^[24]作为描述矛盾的工具,在计算机、人工智能、控制、检测、管理等领域被广泛应用,多级优度评价方法是解决复杂工程实际问题的一种方法,能够定量的评价一个复杂对象,并根据实际需要对待评价指标进行筛选,论文采用可拓集优度综合评价方法。

1.1.2 关联函数

依据可拓集理论,设跨海混凝土桥梁耐久性评价等级为 $p = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$, 区间 $X = [a, b]$, $X_0 = [a_0, b_0]$ 分别为评价指标 MI_{ij} 关于评价因素 $p_t (t = 1, 2, \dots, m)$ 的标准区间和满意区间^[25,26], a_{ij} 为指标 MI_{ij} 的实测值,其中 $X_0 \subset X, a_{ij} \in X$, 跨海混凝土桥梁耐久性评价指标的关联函数为:

$$\rho(a_{ij}, X_0^j) = \begin{cases} a_0 - a_{ij}, & a_{ij} \leq \frac{a_0 + b_0}{2} \\ a_{ij} - b_0, & a_{ij} \geq \frac{a_0 + b_0}{2} \end{cases} \quad (1)$$

$$f_{p_t} = \begin{cases} \frac{-\rho(a_{ij}, X_0^j)}{|a_0 - b_0|}, & a_{ij} \in X_0^j \\ \frac{\rho(a_{ij}, X_0^j)}{\rho(a_{ij}, X^i) - \rho(a_{ij}, X_0^j)}, & a_{ij} \notin X_0^j \end{cases} \quad (2)$$

$$f_{p_t}^* = \frac{f_{p_t}}{\max_{t=1}^m |f_{p_t}|}, t = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

记 $f(MI_{ij}) = (f_{p_1}, f_{p_2}, \dots, f_{p_m})$ 为指标 MI_{ij} 关于因素集 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ 的关联度, $f_{p_t}^*$ 为规范化关联度: $f_{p_t}^* = (f_{p_1}^*, f_{p_2}^*, \dots, f_{p_m}^*)$ 。

1.2 赋权值计算方法优化

1.2.1 主观权重赋值计算方法

赋权值计算方法是耐久性评价的关键,论文基于区间数理论对权重值计算方法进行优化,具体步骤如下。

按照德尔菲法,邀请 l 位专家组成跨海混凝土桥梁耐久性评价专家组: $D = \{d_1, d_2, \dots, d_l\}$, 每一位专家分别独立地对指标 MI_{ij} 关于跨海混凝土桥梁耐久性影响程度给出区间数^[27]形式的评价结果 $B_{ij}^k = [b_{ij}^L, b_{ij}^U]$, 其中 $B_{ij}^k = [b_{ij}^L, b_{ij}^U]$ 为专家 $d_k (d_k \in D)$ 对指标 MI_{ij} 关于跨海混凝土桥梁耐久性影响大小的评价结果, b_{ij}^L, b_{ij}^U 分别为区间数的上限和下限, $b_{ij}^L, b_{ij}^U \in [0, 100], b_{ij}^L < b_{ij}^U$ 。

因跨海混凝土桥梁耐久性评价中存在正向指标

I_1 和负向指标 I_2 ,为消除各个指标之间的量纲差异,对评价值 B^k_{ij} 按照公式(4)、(5)标准化处理得到标准化结果 $Z^k_{ij} = [Z^{L}_{ij}, Z^{U}_{ij}]$ 。

$$\begin{cases} Z^L = b^L / \sqrt{\sum (b^U)^2}, \\ Z^U = b^U / \sqrt{\sum (b^L)^2}, \end{cases} \quad \text{MI}_{ij} \in I_1 \quad (4)$$

$$\begin{cases} Z^L = 1/b^U / \sqrt{\sum 1/(b^L)^2}, \\ Z^U = 1/b^L / \sqrt{\sum 1/(b^U)^2}, \end{cases} \quad \text{MI}_{ij} \in I_2 \quad (5)$$

得出标准化打分结果后用可能度大小^[28]将专家信息转化为指标主观权重信息步骤如下。

步骤一:记标准化后区间数为 $Z^k_{ij} = [Z^{L}_{ij}, Z^{U}_{ij}] (j = 1, 2, \dots, h)$ 组成待集结区间数组为 $\{Z^k_{i1}, Z^k_{i2}, \dots, Z^k_{im_k}\}$,根据公式(6)对进行两两比较计算可能度。

$$p(a \geq b) = \max \left\{ 1 - \max \left\{ \frac{b^U - a^L}{(a^U - a^L) + (b^U - b^L)}, 0 \right\}, 0 \right\} \quad (6)$$

步骤二:根据可能度计算结果构建可能度矩阵 $P = (p_{ij})_{m_h \times m_h}$, p_{ij} 表示在区间数组 $\{Z^k_{i1}, Z^k_{i2}, \dots, Z^k_{im_k}\}$ 中第*i*个区间数大于第*j*个区间数的可能度($i, j = 1, 2, \dots, m_h; h = 1, 2, \dots, r$)根据公式(6),若存在区间数 $A = [a^-, a^+], b = [b^-, b^+]$ 满足 $a^- = b^-, a^+ = b^+$,则 $p(A \geq B) = p(B \geq A) = 1$,可能度矩阵表示为:

$$P = (p_{ij})_{n \times n} \begin{bmatrix} 1 & p_{12} & \dots & p_{1m_h} \\ p_{21} & 1 & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m_h 1} & p_{m_h 2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

步骤三:根据公式(8)对可能度矩阵的每一行元素进行合成,得到可能度排序向量 $f = (p_1, p_2, \dots, p_{m_h})$ 。

$$p_i = \left(\sum_{j=1}^n p_{ij} + \frac{n}{2} - 1 \right) / [n(n-1)], (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

步骤四:根据 p_i 的大小对区间数 Z^k_{ij} 从大到小进行排序,得到排序向量 $(y_1, y_2, \dots, y_{m_h})$,其中 y_i 表示区间数组 $\{Z^k_{i1}, Z^k_{i2}, \dots, Z^k_{im_k}\}$ 中第*i*大的区间数。

为保证求得的主观权重与已知的部分权重信息之间的误差最小,以及区间数与其集结结果误差最小,论文按如下非线性规划模型进行优化:

$$\begin{aligned} \min \psi \sum_{j=1}^{m_h} w_j p_j^L + (1 - \psi) \sum_{j=1}^{m_h-1} \left(\frac{w_j - w_{j+1}}{w_{j+1}} + \frac{w_{j+1} - w_j}{w_j} \right) \\ \min \psi \sum_{j=1}^{m_h} w_j p_j^U + (1 - \psi) \sum_{j=1}^{m_h-1} \left(\frac{w_j - w_{j+1}}{w_{j+1}} + \frac{w_{j+1} - w_j}{w_j} \right) \end{aligned}$$

$$\text{s.t } w_j \in H, j=1, 2, \dots, m_h \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^{m_h} w_j = 1$$

$$\begin{cases} p_j^L = \left(\frac{y_{ij} - z_{ij}^L}{z_{ij}^L} + \frac{z_{ij}^L - y_{ij}}{y_{ij}} \right) \\ p_j^U = \left(\frac{y_{ij} - z_{ij}^U}{z_{ij}^U} + \frac{z_{ij}^U - y_{ij}}{y_{ij}} \right) \end{cases} \quad (10)$$

式中: w_j 为待求解的指标权重; p_j^L, p_j^U 为区间信息偏差参数; ψ 为实参数,满足 $0 < \psi < 1$,用于衡量区间信息集结结果总偏差之和和权重信息总偏差之和的相对重要程度; H 为跨海混凝土桥梁耐久性评价中部分指标权重信息;记 $\zeta^k(\text{MI}_{ij}) = (\zeta^k_{1}, \zeta^k_{2}, \dots, \zeta^k_{m_h})$ 为第*k*个专家评价信息下指标 MI_{ij} 的主观权重。

区间广义有序加权双曲绝对风险规避效用多重平均(IGOWUM-HARA)算子公式(11)能有效的降低专家风险态度带来的不利影响,从而提高指标主观权重的合理性。设 $\tilde{W} = (w_1, w_2, \dots, w_l)$ 为专家的权重向量,且 $w_k \geq 0, \sum_{k=1}^l w_k = 1$ 。根据各指标的权重 $\zeta^k(\text{MI}_{ij})$,利用IGOWUM-HARA算子对每一位专家决策矩阵 \tilde{T}^k 进行信息集结,构建专家综合决策矩阵。利用公式(9)计算专家的权重向量 $\tilde{W} = (w_1, w_2, \dots, w_l)$ 。

$$\text{IGOWUM-HARA}(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_n) =$$

$$\frac{1 - \gamma}{\beta} \left[\left(\left(\sum_{i=1}^n w_i \left(\frac{\beta}{1 - \gamma} \tilde{y}_i + \eta \right)^{\lambda \gamma} \right) / \left(\sum_{i=1}^n w_i / \left(\frac{\beta}{1 - \gamma} \tilde{y}_i + \eta \right)^{\lambda \gamma} \right) \right)^{1/2\lambda \gamma} - \eta \right] \quad (11)$$

式中: γ 为调节风险厌恶系数的参数,当 $\gamma > 1$ 时,风险厌恶系数递增,当 $\gamma < 1$ 时风险厌恶系数递减; β, η, λ 是实参数,满足 $\beta > 0, \eta > 0, \gamma \in (-\infty, 0) \cup (0, 1), \lambda \in (-\infty, 0) \cup (0, +\infty)$ 。

论文根据有序加权算术平均算子^[29],利用专家权重 $\tilde{W} = (w_1, w_2, \dots, w_l)$ 对指标权重 $\zeta^k(\text{MI}_{ij})$ 进行初次修正:

$$\xi(\text{MI}_{ij}) = (w_1, w_2, \dots, w_l) \cdot \begin{pmatrix} \zeta^1(\text{MI}_{ij}) \\ \zeta^2(\text{MI}_{ij}) \\ \vdots \\ \zeta^l(\text{MI}_{ij}) \end{pmatrix} \quad (12)$$

记 $\xi(\text{MI}_{ij})$ 为指标 MI_{ij} 的带有专家风险态度的主

观权重(记ERA权重), $\sum_j^{m_h} \xi(MI_{ij}) = 1$;

1.2.2 客观权重赋值计算方法

客观权重赋值来源于跨海桥梁实际监测数据,论文利用实体项目监测数据,利用熵权法^[30]计算指标客观权重,步骤如下:

记指标 MI_{ij} 的监测数据为一个 n 元数组 $(I_{ij1}, I_{ij2}, \dots, I_{ijn}), I_{ijq}(q = 1, 2, \dots, n)$ 为指标 MI_{ij} 的第 q 个实测值。

步骤一:计算指标 MI_{ij} 下,第 q 个实测值的比重。

$$z_{ijq} = I_{ijq} / \sum_{q=1}^s I_{ijq} \quad (13)$$

其中: $I_{ijq} > 0$ 。

步骤二:计算指标 MI_{ij} 的熵值 e_{ij} 。

$$e_{ij} = -k \sum_{q=1}^s I_{ijq} \ln(I_{ijq}) \quad (14)$$

其中: $k = \frac{1}{\ln n}, e_{ij} \geq 0$ 。

若 I_{ijq} 全部相等,则 $z_{ijq} = \frac{1}{n}$,此时 $e_{ij} = k \ln n$ 。

步骤三:计算指标 MI_{ij} 的差异性系数 g_{ij}

$$g_{ij} = 1 - e_{ij} \quad (15)$$

步骤四:确定客观权重 $\varphi(MI_{ij})$

$$\varphi(MI_{ij}) = g_{ij} / \sum_{j=1}^{m_h} g_{ij} \quad (16)$$

1.3 综合权重赋值计算

为兼顾主观、客观信息的综合权重赋值,论文基于加法集成原理^[31]将指标主客观权重进一步修正:

$$W(MI_{ij}) = f(\xi(MI_{ij}), \varphi(MI_{ij})) = A\xi(MI_{ij}) + B\varphi(MI_{ij}) \quad (17)$$

为指标 MI_{ij} 理论上最优的综合权重,其中 A, B 为待定的实参数,为了减小由于主观赋权和客观赋权而产生的差异,构建如下优化模型:

$$\max \sum_{j=1}^{m_h} W(MI_{ij}) k_{ij}$$

$$s.t. A > 0, B > 0, A^2 + B^2 = 1, \sum_{j=1}^{m_h} W(MI_{ij}) = 1 \quad (18)$$

根据 Lagrange 条件极值原理可得,在满足 $A > 0, B > 0, A^2 + B^2 = 1$ 的条件下,使得 $\sum_{j=1}^{m_h} W(MI_{ij}) k_{ij}$ 取值最大时:

$$A = \frac{\sum_{j=1}^{m_h} \xi(MI_{ij}) k_{ij}}{\sqrt{(\sum_{j=1}^{m_h} \xi(MI_{ij}) k_{ij})^2 + (\sum_{j=1}^{m_h} \varphi(MI_{ij}) k_{ij})^2}} \quad (19)$$

$$B = \frac{\sum_{j=1}^{m_h} \varphi(MI_{ij}) k_{ij}}{\sqrt{(\sum_{j=1}^{m_h} \xi(MI_{ij}) k_{ij})^2 + (\sum_{j=1}^{m_h} \varphi(MI_{ij}) k_{ij})^2}} \quad (20)$$

k_{ij} 为指标 MI_{ij} 的关联度。根据式子(17)可知

$W(MI_{ij})$ 是同时具有主观信息与客观信息的综合权重。

1.4 跨海混凝土桥梁耐久性评价

基于可拓集多级优度评价方法进行跨海混凝土桥梁耐久性评价,具体步骤如下:

(1)计算二级指标关联度。结合《公路桥涵养护规范》(JTG H11—2004)^[22]和《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21—2011)^[23]确定二级指标关于各个评价因素的标准区间与满意区间,根据公式(1)、(2)建立关联函数并计算二级指标的关联度

$$f(MI_{ij}) = (f_{p1}, f_{p2}, \dots, f_{pm}) \quad (21)$$

式中: f_{pm} 为指标 MI_{ij} 关于因素 p_m 的关联度值。

(2)计算综合权重与一级指标关联度。根据公式(18)计算二级指标组合权重 $W(MI_{ij}) (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m_h; h = 1, 2, \dots, r)$,利用公式(10)计算一级指标关联度:

$$F(MI_i) = (W(MI_{i1}), W(MI_{i2}), \dots, W(MI_{im_h})) \times \begin{pmatrix} f_{(MI_{i1})} \\ f_{(MI_{i2})} \\ \vdots \\ f_{(MI_{im_h})} \end{pmatrix} \quad (22)$$

其中: $F(MI_i) = (F_{p1}, F_{p2}, \dots, F_{pm})$ 为一级指标 MI_i 关于因素集 $\{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ 的关联度,根据前文得到规范化关联度 $f_{MI_i}^* = (f_{p1}^*, f_{p2}^*, \dots, f_{pm}^*)$ 。

(3)评价结果。根据规范化关联度计算结果 $f_{MI_i}^*$,计算桥梁耐久性评价结果。

$$F = (W_1, W_2, \dots, W_n) \times \begin{pmatrix} f_{MI_1}^* \\ f_{MI_2}^* \\ \vdots \\ f_{MI_n}^* \end{pmatrix} \quad (23)$$

其中: W_i 为一级指标 MI_i 的权重, $F = (F_1, F_2, \dots, F_m)$ 为桥梁耐久性关于各个等级的关联度。根据关联度 F ,计算最大关联度 $F_i = \max\{F_1, F_2, \dots, F_m\}$ 。利用最大关联度原则,确定桥梁耐久性评价结果为 t 级 ($t = 1, 2, \dots, m$)。

2 案例验证

2.1 跨海混凝土桥梁技术状况评价

选取 G9211 甬舟高速公路舟山跨海大桥东通与主通之间的非通航桥进行耐久性评价指标。结合《公路桥涵养护规范》(JTG H11—2004)^[22]和《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21—2011)^[23]规范将

耐久性分为五个等级: $p = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5\}$, 记 $C_i = MI_i, c_{ij} = MI_{ij}$; 论文利用浙江交工交通科技发展有限公司《G9211甬舟高速公路东通与主通之间的非通航孔桥(K42+414)2021年桥梁定期检查报告》中对实例桥梁的检测数据。

2.2 主观权重值计算

制作调查问卷表,邀请多位桥梁工程方面的专家组成评价专家组 $D = \{d_1, d_2, d_3, d_4\}$ 分别独立的对各级的指标进行打分,得到打分结果 $B_{ij}^k = [b_{ij}^L, b_{ij}^U]$; 利用公式(4)、公式(5)进行标准化: $Z_{ij}^k = [z_{ij}^L, z_{ij}^U]$, 按照公式(6)、公式(8)计算可能度,根据可能度大小对 Z_{ij}^k 按从大到小进行排序得到排序向量 (y_1, y_2, \dots, y_n) ; 利用公式(9)求解对各个专家主观信息下的一级、二级指标主观权重 z^k 。

2.2.1 指标主观权重值计算

利用 IGOWUM-HARA 算子进行信息集结,利用公式(6)、公式(8)计算可能度大小排序 (y_1, y_2, \dots, y_n) 。根据公式(9)进行求解,计算结果见表2、表3。

表2 二级指标主观权重、专家权重表

二级指标	专家1	专家2	专家3	专家4	专家权重
c_{11}	0.306 1	0.273 1	0.261 7	0.272 1	
c_{12}	0.187 8	0.205 1	0.212 4	0.216 9	(0.253 6, 0.272 2,
c_{13}	0.172 0	0.175 3	0.190 5	0.191 8	0.202 0, 0.272 2)
c_{14}	0.334 1	0.346 5	0.335 4	0.319 2	
c_{21}	0.213 4	0.218 5	0.221 7	0.235 8	
c_{22}	0.147 8	0.150 4	0.150 9	0.158 8	
c_{23}	0.208 4	0.2185	0.221 7	0.235 8	(0.228 6, 0.278 6,
c_{24}	0.222 1	0.213 3	0.209 8	0.194 0	0.214 3, 0.278 6)
c_{25}	0.208 4	0.199 4	0.195 9	0.175 7	
c_{31}	0.392 3	0.421 6	0.452 4	0.405 1	
c_{32}	0.311 2	0.311 5	0.294 1	0.302 2	(0.333 0, 0.2478,
c_{33}	0.296 5	0.266 9	0.253 5	0.292 7	0.187 0, 0.232 2)
c_{41}	0.234 4	0.149 7	0.237 2	0.029 9	
c_{42}	0.198 0	0.100 3	0.195 9	0.027 7	(0.331 0, 0.244 3,
c_{43}	0.187 7	0.100 3	0.184 8	0.027 7	0.180 5, 0.244 3)
c_{44}	0.379 9	0.649 7	0.382 1	0.914 6	

表3 一级指标主观权重、专家权重表

一级指标	专家1	专家2	专家3	专家4	专家权重
C_1	0.410 3	0.423 5	0.427 9	0.341 2	
C_2	0.264 3	0.267 5	0.277 2	0.313 9	(0.261 1, 0.256 4,
C_3	0.152 1	0.146 0	0.154 7	0.186 2	0.221 3, 0.261 1)
C_4	0.173 3	0.163 1	0.140 2	0.158 8	

2.2.2 改进的专家风险态度主观权重值计算

利用公式(12)计算各个指标带有专家风险态度

的主观权重值(以下简称ERA权重),根据熵权法对求解二级指标客观权重,如图1所示。

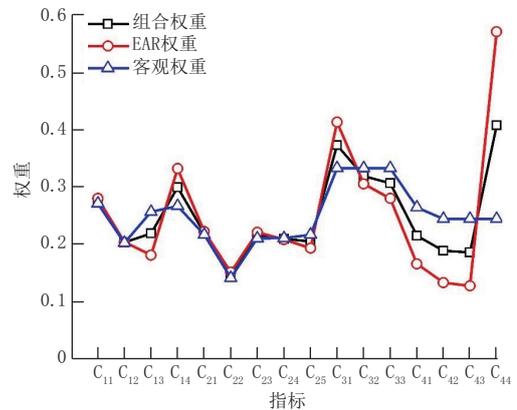


图1 指标权重分布图

2.3 关联度计算

根据公式(1)、(2)、(3)、(22)计算二级指标的关联度、一级指标规范关联度,利用公式(23)计算桥梁耐久性评价结果:

$$F = (0.399\ 5, 0.280\ 9, 0.160\ 0, 0.159\ 6)$$

$$\begin{pmatrix} -1.000\ 0 & -0.586\ 3 & -0.230\ 5 & -0.011\ 1 & -0.509\ 5 \\ -1.000\ 0 & -0.737\ 4 & -0.105\ 2 & -0.122\ 9 & -0.359\ 1 \\ -0.597\ 3 & -1.000\ 0 & -0.876\ 1 & -0.962\ 0 & -0.497\ 6 \\ -1.000\ 0 & -0.933\ 2 & -0.799\ 7 & -0.399\ 0 & -0.050\ 3 \end{pmatrix}$$

$$= (-0.392\ 1, -0.256\ 6, -0.389\ 4, -0.750\ 3, -0.935\ 6)$$

根据综合关联度计算最大关联度:

$$F_{\max} = \max\{-0.392\ 1, -0.256\ 6, -0.389\ 4, -0.750\ 3, -0.935\ 6\} = F_2 = -0.256\ 6$$

根据最大关联度原则,判断该桥梁耐久性评价等级为2级。

2.4 结果比较分析

专业检测公司2021年检测评价总体技术状况评分为84.24,等级为2类。检测权重值按照《公路桥涵养护规范》(JTG H11—2004)^[22]中给定的梁式桥各部件权重值。桥梁总体技术状况评分按照公式(24)、公式(25)计算:

$$SPCI(SBCI或BDCI) = \sum_{i=1}^m PCCI_i(BCCI_i或DCCI_i) \times W_i \quad (24)$$

$$D_r = SPCI \times W_{SP} + SBCI \times W_{SB} + BDCI \times W_D \quad (25)$$

式中:SPCI为桥梁上部结构技术状况评分,值域为[0, 100];SBCI为桥梁下部结构技术状况评分,值域为[0, 100];BDCI为桥面系技术状况评分,值域为[0, 100];m为上部结构(下部结构、桥面系)的被评定部件种类数;W_i为第i类部件的权重,取值按表2-8;D_r为桥梁技术状况评分,值域为[0, 100];

$W_{SP}(W_{SB}, W_D)$ 为上部结构(下部结构、桥面系)在全桥中的权重。

现有规范采用定性定量描述方法进行桥梁技术状况评定,对于评价指标采用的固定值,不能利用数据本身的特点来减少人为判断主观因素的影响,没有充分利用桥梁自身监测数据,论文利用综合权重赋值计算方法得到的耐久性评价结果,通过与实际检测结果对比分析,提高了评估的有效性和客观性,更加符合跨海混凝土桥梁耐久性的实际服役状况。

3 结 语

(1)主观权重赋值计算方法有效降低专家个体的风险态度、经验和水平不同所带来的评价结果差异,从而显著提升了跨海混凝土桥梁耐久性评价的准确性和科学性。

(2)综合权重计算方法克服了主观与客观信息权重计算方法各自的局限性,平衡了两者的优缺点。通过实例验算验证了本文提出的综合权重值计算方法在跨海混凝土桥梁耐久性评价中具备更高的有效性和客观性。

参考文献:

- [1] 殷岳,梅深.交通运输部发布《2021年交通运输行业发展统计公报》[J].水道港口,2022,43(3):346.
- [2] DONG Q, L. SAATY T. AN ANALYTIC HIERARCHY PROCESS MODEL OF GROUP CONSENSUS[J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2014, 23(3): 363-375.
- [3] Ming Te Liang, Jai He Wu, Chih Hsin Liang. Multiple layer fuzzy evaluation for existing reinforced concrete bridges[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2001, 7(4): 133-144.
- [4] 李涛,黄亚娥,向敬,等.基于模糊可拓集的跨海系杆拱桥耐久性评估[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(7):2470-2479.
- [5] Jiangang Cai, Fenghui Dong, Zuolong Luo. Durability of concrete bridge structure under marine environment[J]. Journal of Coastal Research, 2018(83): 429-435.
- [6] Dabous Abu Saleh. Fuzzy-based method to account for subjectivity and uncertainty in bridge condition assessments [C]//Construction Research Congress 2020: Infrastructure Systems and Sustainability Volume. New York: ASCE, 2018:52-59.
- [7] Kei Kawamura, Ayaho Miyamoto, Dan M. Frangopol, et al. Performance evaluation of concrete slabs of existing bridges using neural networks[J]. Engineering Structures, 2003, 25(12): 1455-1477.
- [8] 李涛,黄亚娥,钱亚.在役跨海系杆拱桥结构安全的可拓预警模型[J].湘潭大学学报(自然科学版),2022,44(1):116-126.
- [9] Li Qing fu, Yu Ying qiao. Durability evaluation of concrete bridges based on the theory of matter element extension—entropy weight method—unascertained measure[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021(52): 1-13.
- [10] Saaty T L. Decision making with the analytic hierarchy process [J]. Services Sciences, 2008(1): 83-98.
- [11] P J M van Laarhoven, W Pedrycz, A fuzzy extension of Saaty's priority theory[J]. Fuzzy Sets and Systems 1983, 11(3): 199-227.
- [12] 王倩,曾东山,范剑锋,等.基于模糊推理规则的桥梁结构状态评估[J].武汉理工大学学报,2006,28(10):70-72,100.
- [13] 杨晓红,刘乐善.用遗传算法优化神经网络结构[J].计算机应用与软件,1997,14(3):59-65.
- [14] 孙晓东,焦玥,胡劲松.基于组合权重的灰色关联理想解法及其应用[J].工业工程与管理,2006(1):62-66.
- [15] 刘德海,于倩,马晓南,等.基于最小偏差组合权重的突发事件应急能力评价模型[J].中国管理科学,2014,22(11):79-86.
- [16] Mi Zhou, Xin Bao Liu, Jian Bo Yang, et al. Evidential reasoning approach with multiple kinds of attributes and entropy-based weight assignment[J]. Knowledge-Based Systems, 2018(163): 358-375.
- [17] Guo liang Yang, Jian Bo Yang, Dong Ling Xu, et al. A three-stage hybrid approach for weight assignment in MADM[J]. Omega, 2016(71): 93-105.
- [18] 郝伟,魏雪萍.基于灰色关联度的高寒地区混凝土梁桥耐久性评估[J].安全与环境学报,2021,21(5):1889-1897.
- [19] 史波.氯盐环境下基于概率和性能的混凝土结构耐久性研究[D].大连:大连理工大学,2009.
- [20] 金伟良,吕清芳,潘仁泉.东南沿海公路桥梁耐久性现状[J].江苏大学学报(自然科学版),2007(3):254-257.
- [21] 郝伟,韦丽,陶泽,等.除冰盐与冻融环境下在役混凝土桥梁耐久性评估[J].安全与环境学报,2022,22(3):1207-1216.
- [22] JTG H11—2004,公路桥涵养护规范[S].
- [23] JTG/T H21—2011,公路桥梁技术状况评定标准[S].
- [24] Chunyan Yang. Extension innovation method[M]. CRC Press, 2018.
- [25] Wen Cai, Chunyan Yang, Florentin Smarandache, et al. Extenics and innovation methods[M]. Taylor and Francis: CRC Press, 2013.
- [26] Wen Cai, Chunyan Yang, Guanghua Wang. A new cross discipline—Extenics[J]. 中国科学基金(英文版),2005,13(1):55-61.
- [27] Meng Wang, Dongxiao Niu. Research on project post-evaluation of wind power based on improved ANP and fuzzy comprehensive evaluation model of trapezoid subordinate function improved by interval number[J]. Renewable Energy, 2019, 132(6): 255-265.
- [28] 李德清,曾文艺,尹乾.区间数排序方法综述[J].北京师范大学学报(自然科学版),2020,56(4):483-492.
- [29] Yager. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decisionmaking[J]. IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, 1988, 18(1): 183-190.
- [30] Qin Yuan, Guan Ke, Kou Jialiang, et al. Durability evaluation and life prediction of fiber concrete with fly ash based on entropy weight method and grey theory[J]. Construction and Building Materials, 2022, 327(11): 1-11.
- [31] 郭亚军著.综合评价理论与方法[M].北京:科学出版社,2002.