

基于模糊综合评价的桥梁可靠性分析

郑兆阳, 王育德, 李晓阳, 张全权

(河北工程大学 土木工程学院, 邯郸 056038)

摘要: 桥梁作为重要交通设施, 服役期间长期受到环境侵蚀、超载等影响, 导致桥梁的损伤, 降低其安全性和可靠性, 所以对于在役桥梁进行可靠性分析是十分必要且紧迫。在役钢筋混凝土桥梁可靠性影响在役钢筋混凝土桥梁可靠性的因素众多, 通过对影响其可靠性的主要因素分析, 构建影响桥梁可靠性指标体系, 将影响桥梁可靠性的各因素通过定性和定量的方式表示, 运用模糊综合评价理论并结合现行规范构建多级模糊综合评判模型, 设定各层级等级评判标准, 选用岭型函数式, 通过指标的评级标准确定定量指标的隶属度, 对于定性指标赋予隶属度“1”或“0”来表示。最后结合重庆市某桥梁实例基于多级模糊运算对桥梁的可靠性进行评判, 验证方法的有效性, 为管理者制定养护控制决策提供依据。

关键词: 钢筋混凝土桥梁; 层次分析法; 综合模糊评价; 可靠性分析

中图分类号: U448 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2026) 05-0099-09

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.05.015

Bridge Reliability Analysis based on Fuzzy Comprehensive Evaluation

ZHENG Zhaoyang, WANG Yude, LI Xiaoyang, ZHANG Quanquan

(School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: As an important transportation facility, bridges are affected by erosion and overload during service, which will accelerate the damage of bridges, their safety and reliability. Therefore, it is necessary and urgent to carry out reliability for bridges in service reliability of existing reinforced concrete bridges there are many factors that affect the reliability of existing reinforced concrete bridges. The main factors that affect the reliability of existing reinforced concrete bridges are analyzed. The main factors that affect the reliability of existing Reinforced concrete bridges are analyzed. The factors that affect the reliability of bridges are expressed qualitatively and quantitatively. The fuzzy comprehensive evaluation theory is combined with the current norms. The multi-level fuzzy comprehensive evaluation model is established. The grade evaluation of each level is determined by the rating of indexes. The membership degree of quantitative indexes is determined by the rating of indexes. The qualitative indexes are expressed by the membership degree of "1" or "0" Finally, the reliability of a bridge in Chongqing is evaluated based on multi-level fuzzy operation, which provides the basis for the manager to make maintenance control decision.

Key words: reinforced concrete bridge; AHP; comprehensive fuzzy evaluation; reliability analysis

项目来源: 国家自然科学基金资助项目 (52278171); 河北省自然科学基金资助项目 (E2020402079)。

作者简介: 郑兆阳 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 结构项目管理。

收稿日期: 2024-07-03

研究与应用

0 引言

国内外每年均有老旧桥梁因承载能力不足、老化严重等隐患威胁人民生命财产安全, 迈阿密过街天桥、河源东江大桥坍塌事故即为实例。我国上世纪 90 年代大规模修建的桥梁, 受当时客观条件限制, 部分存在设计施工、材料方面的缺陷, 现已进入病害高发期, 服役形势严峻。为保障人民生命财产安全, 亟需通过可靠性分析评估桥梁实际服役状态。

国内对桥梁可靠性研究已有一些成果, 如高亚丽^[1] 基于增大截面法构建了钢筋混凝土 T 梁正截面抗弯概率模型, 得出钢筋的抗拉强度、截面高度和混凝土强度等是影响桥梁加固后抗力的主要因素, 对比了构件在加固前后不同活恒载比下所对应目标抗力和汽车荷载效应对可靠指标的影响; 刘月飞等^[2] 基于桥梁健康监测系統积累大量数据, 使用一次移动平均法消除信号耦合性和随机性影响, 构建贝叶斯动态线性模型, 预测监测数据的变化趋势, 通过一次二阶矩法评估钢板组合梁桥的可靠性; 边晓亚等^[3] 针对桥梁可靠性分析的不确定性和难以明确功能函数等问题, 基于非概率可靠性理论的响应面界限法, 对非概率可靠性指标求解, 评估在役桥梁可靠性; 肖青凯^[4] 基于桥梁健康监测系統积累数据, 将贝叶斯动态模型和 Vine copula 模型相结合, 在考虑桥梁失效模式时变非线性相关性的条件下, 构建评估桥梁结构体系时变可靠性的多变量贝叶斯动态 Vine copula 模型, 通过可靠度计算方法预测钢板组合梁桥可靠度; 梁灿等^[5] 基于动态贝叶斯网络的时变可靠性分析方法, 分析构件性能退化对钢板组合梁桥可靠性的影响; 周海怡等^[6] 通过改进层次分析法结合熵权法, 引入模糊理论, 建立模型进行桥梁可靠性评估和研究; 王华等^[7] 将检测到的少量数据的模糊变量形式转变为随机变量形式, 基于蒙特卡洛法计算模糊可靠度; 王天鹏等^[8] 提出模糊失效准则下拉锁锈蚀可靠度分析模型, 并采用服役期离散化的方法简化时变可靠度计算; 鹿健^[9] 基于层次分析法的变权综合评价法对混凝土桥梁安全进行评估研究; 黄腾腾等^[10] 总结在役混凝土桥梁影响因素, 并基于工程实例运用模糊理论对既有桥梁耐久

性进行综合评价; 樊学平等^[11] 将多变量贝叶斯动态线性模型、多维 Gaussian Copula 技术和可靠度计算方法 (FOSM) 相结合, 基于考虑控制点的变形失效非线性相关, 同时利用监测点的动态极值挠度信息, 对大跨桥梁主梁体系的动态可靠性进行评估。胡俊^[12] 根据桥梁结构技术状况的评分, 运用极小值分布拟合统计法, 构建了一个在高荷载等级、货运车比例较大情况下钢筋混凝土板梁结构具备 95% 保障率的桥梁使用寿命模型。Yuan^[13] 等基于疲劳裂缝扩展模型和非线性结构分析方法, 建立了混凝土桥梁疲劳寿命预测的贝叶斯网络。韩非^[14] 等基于结构的承载力寿命、碳化寿命和硫酸盐侵蚀寿命三种不同的寿命准则, 在考虑了硫酸盐侵蚀环境和高温环境中的损伤, 对混凝土结构的剩余寿命进行预测。朱祥意^[15] 等人进行了不同冻融循环处理后的混凝土试块的四点弯曲疲劳试验, 显示混凝土试块在不同冻融循环下的弯曲疲劳寿命符合 Weibull 分布特性, 对不同冻融循环和不同可靠性概率条件下混凝土试块的疲劳寿命进行预测。

以上研究发现对于桥梁可靠性分析主要基于现场检测数据, 通过不同分析方法建立数学模型进行研究, 采取不同方法结果会出现一定偏差, 但在可接受范围。为丰富桥梁可靠性研究方法和理论以及对现役钢筋混凝土桥梁做出准确的可靠性评价, 通过层次分析法结合综合模糊评价对桥梁可靠性进行研究, 及非对称贴近度对结果进行处理, 确定可靠等级, 为管理者制定养护控制决策提供依据。

1 确定桥梁可靠性评价指标体系

基于行业规范, 明确钢筋混凝土桥梁可靠性影响因素, 构建钢筋混凝土桥梁可靠性分析指标体系。重点研究桥梁的结构性缺损。选取主梁、一般上部结构、桥墩桥台、墩台基础作为子单元, 将影响桥梁可靠性的众多因素作为指标层, 构建桥梁可靠性评价指标体系模型, 如图 1 所示。

根据结构的失效内容和逻辑, 可以将体系分为 3 个层次: 指标层、子单元、目标层。指标层作为评价的第一层, 指鉴定单位; 指标层组合在一起形成了体系的第二层, 子单元; 最后一层目标层则由于子单元组合而成, 即评价的对象。

研究与应用

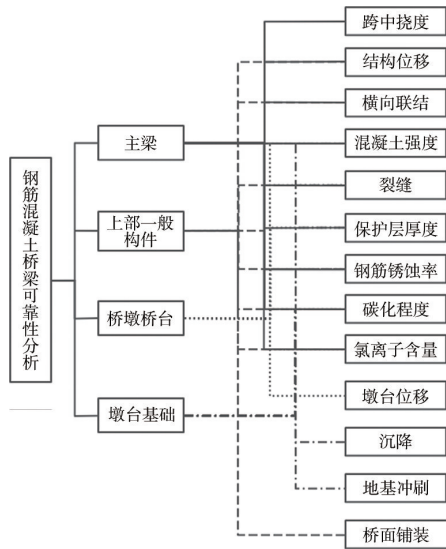


图1 桥梁可靠性评价指标体系模型

Fig. 1 Model of bridge reliability evaluation index system

2 模糊综合评价

2.1 确定隶属函数

以模糊数学为基础，借助模糊数学中的部分概念对桥梁可靠性进行模糊评价。在评估过程中将所有指标参数用不同等级的隶属度表达出来，而不是一一对应的数值，这样能使评估结果更加贴近实际情况。根据各因素的性质选用岭型函数式，分别为偏小型(a)、中间型(b)、偏大型(c)，如图2所示。

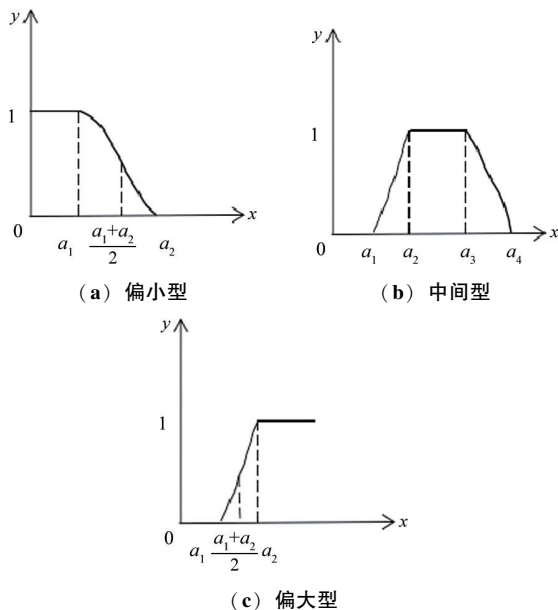


图2 岭型函数式

Fig. 2 Ridge-type function formula

偏小型岭型函数式：

$$A(x) = \begin{cases} 1, & x \leq a_1 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \left[\frac{\pi}{a_2 - a_1} \left(x - \frac{a_1 + a_2}{2} \right) \right], & a_1 < x \leq a_2 \\ 0, & x > a_2 \end{cases} \quad (1)$$

中间型岭型函数式：

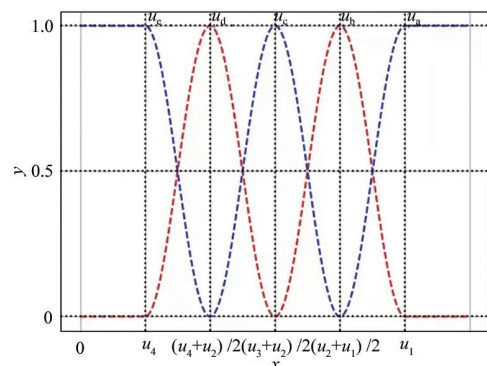
$$A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a_1 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \left[\frac{\pi}{a_2 - a_1} \left(x - \frac{a_1 + a_2}{2} \right) \right], & a_1 < x \leq a_2 \\ 1, & a_2 \leq x < a_3 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \left[\frac{\pi}{a_4 - a_3} \left(x - \frac{a_3 + a_4}{2} \right) \right], & a_3 \leq x < a_4 \\ 0, & x \geq a_4 \end{cases} \quad (2)$$

偏大型岭型函数式：

$$A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a_1 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \left[\frac{\pi}{a_2 - a_1} \left(x - \frac{a_1 + a_2}{2} \right) \right], & a_1 < x \leq a_2 \\ 1, & x > a_2 \end{cases} \quad (3)$$

2.1.1 定量指标

当 u 为定量指标时， $u \geq u_1$ 时为a级， $u_2 \leq u < u_1$ 时为b级， $u_3 \leq u < u_2$ 时为c级， $u_4 \leq u < u_3$ 时为d级， $u > u_4$ 时为e级，为了使函数具有连续性，设 u_1 是a的最大值， $\frac{u_1 + u_2}{2}$ 是b的最大值， $\frac{u_2 + u_3}{2}$ 是c的最大值， $\frac{u_3 + u_4}{2}$ 是d的最大值， u_4 是e的最大值，其隶属函数分布图如图3所示。

图3 指标 u 的隶属函数分布图Fig. 3 Distribution diagram of membership function for indicator u

研究与应用

各级隶属函数表达式为:

$$\mu_a(u) = \begin{cases} 1 & u > u_1 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \left[\frac{2\pi}{u_1 - u_2} \left(u - \frac{3u_1 + u_2}{4} \right) \right] & \frac{u_1 + u_2}{2} < u \leq u_1 \\ 0 & u \leq \frac{u_1 + u_2}{2} \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_b(u) = \begin{cases} 0 & u < u_1 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \left[\frac{2\pi}{u_1 - u_2} \left(u - \frac{3u_1 + u_2}{4} \right) \right] & \frac{u_1 + u_2}{2} < u \leq u_1 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \left[\frac{2\pi}{u_1 - u_3} \left(u - \frac{u_1 + u_3 + 2u_2}{4} \right) \right] & \frac{u_2 + u_3}{2} < u \leq \frac{u_1 + u_2}{2} \\ 0 & u \leq \frac{u_2 + u_3}{2} \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_c(u) = \begin{cases} 0 & u > \frac{u_1 + u_2}{2} \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \left[\frac{2\pi}{u_1 - u_3} \left(u - \frac{u_1 + u_3 + 2u_2}{4} \right) \right] & \frac{u_2 + u_3}{2} < u \leq \frac{u_1 + u_2}{2} \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \left[\frac{2\pi}{u_2 - u_4} \left(u - \frac{u_1 + u_2 + u_3 + u_4}{4} \right) \right] & \frac{u_3 + u_4}{2} < u \leq \frac{u_2 + u_3}{2} \\ 0 & u \leq \frac{u_3 + u_4}{2} \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu_d(u) = \begin{cases} 0 & u > \frac{u_2 + u_3}{2} \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \left[\frac{2\pi}{u_2 - u_4} \left(u - \frac{u_2 + u_4 + 2u_3}{4} \right) \right] & \frac{u_3 + u_4}{2} < u \leq \frac{u_2 + u_3}{2} \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \left[\frac{2\pi}{u_3 - u_4} \left(u - \frac{u_3 + 3u_4}{4} \right) \right] & u_4 < u \leq \frac{u_3 + u_4}{2} \\ 0 & u \leq u_4 \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu_e(u) = \begin{cases} 1 & 0 < u \leq u_4 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \left[\frac{2\pi}{u_3 - u_4} \left(u - \frac{3u_4 + u_3}{4} \right) \right] & u_4 < u \leq \frac{u_3 + u_4}{2} \\ 0 & \frac{u_3 + u_4}{2} < u \end{cases} \quad (8)$$

将各定量指标实际数值和判定标准代入对应的

隶属函数中, 可得到相应评价模糊集, 从而构成模糊评判矩阵 R 。

2.1.2 定性指标

在现行的标准和规范中, 对很多指标无法给出具体评判数值, 无法使用上述隶属函数表示, 如结构位移、墩台位移、基础沉降等定性指标, 基于此, 将指标所属评判等级的隶属度设为“1”, 其余等级隶属度均为“0”, 由此来获得指标的评价模糊集。

2.2 层次分析法确定权重

2.2.1 建立层次评价模型

确定决策事件, 分析其影响因素, 建立一个由各影响因素组成的逐层支配的、系统的、条理化的层次评价模型。

2.2.2 构造判断矩阵

根据建立的层次评价模型, 比较各评价指标重要程度, 构成判断矩阵 $\{A\}_{n \times n} = (a_{ij})_{n \times n}$ 。其中 a_{ij} 代表两个因素的相对重要程度。通常用 1-9 分评定法进行赋值, 见表 1。

表 1 影响因素比较评分标准

分值	含义
1	两因素相比, 同样重要
3	两因素相比, 前者比后者稍微重要
5	两因素相比, 前者比后者明显重要
7	两因素相比, 前者比后者强烈重要
9	两因素相比, 前者比后者极端重要
2, 4, 6, 8	前述相邻比较的中间值
倒数	相应两个因素交替次序的重要性

2.2.3 求解权重向量

求解公式为:

$$A \cdot \omega = \lambda_{\max} \omega \quad (9)$$

式中: $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵 A 的最大特征值, ω 为对应判断矩阵 A 最大特征值的特征向量。

通常采用方根法和和积法求解特征向量和特征值^[8]。

方根法:

$$\omega_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} / \left(\sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \right) \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

和积法:

$$\omega_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(a_{ij} / \sum_{k=1}^n a_{kj} \right) \quad k = 1, 2, \dots, n$$

(11)

研究与应用

和行归一化：

$$\omega_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} / \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} \right) \quad (12)$$

2.2.4 一致性检验

通过特征向量计算各个因素的权重，有时会出现 A 比 B 重要，B 比 C 重要，但最后 C 却比 A 重要的矛盾情况，为避免该事件发生，对数据进行一致性检验，确保各元素重要程度协调性，判断权重系数分配合理性。将专家对两两因素进行评判时思维逻辑上一致性的程度记作 CI ，也称一致性指标：

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (13)$$

$$CR = CI / RI \quad (14)$$

式中： CR 为一致性比率， RI 为平均随机一致性指标，具体结果见表 2。

表 2 平均随机一致性指标数值
Table 2 Average random consistency index value

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.00	0.00	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49

当 $CR < 0.1$ 时，表示判断矩阵通过一致性检验，各元素重要程度协调一致，权重系数分配较为合理，反之则需重新调整权重系数分配，直至判断矩阵通过一致性检验。

2.3 多级模糊运算

将权重向量 A 和模糊矩阵 R 进行合成得到由各因素评判结果组成的目标的模糊综合评判结果 B ：

$$B = AR \quad (15)$$

也就是单级模糊综合评判模型：

$$B = [b_1 \quad b_2 \quad \cdots \quad b_n] = [a_1 \quad a_2 \quad \cdots \quad a_n] \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (16)$$

在实际桥梁问题中，因其影响因素的复杂性，单级模糊综合评判不能反映出各因素的隶属关系，因此难以贴合实际情况，而多级模糊综合评判能全面考虑各因素不同层次间的隶属关系，可更好解决因素复杂难以分配权重的问题。

多级模糊综合评判模型：

$$B' = A' \cdot R' = A' \cdot \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_s \end{bmatrix} = A' \cdot \begin{bmatrix} A_1 \cdot R_1 \\ A_2 \cdot R_2 \\ \vdots \\ A_s \cdot R_s \end{bmatrix} \quad (17)$$

多级模糊综合评判的判别思想是先按照模型对最底层各元素进行单级模糊综合评判，得到各自结果 $B_1 \sim B_s$ ，再将得到的 S 个结果重新组合，得到一个全新模糊关系矩阵 R' ，将之对应的因素权重向量逐层运算得到最终评判结果。

2.4 评判结果的处理

非对称贴近度的原则是对模糊综合评判的结果进行处理，进而得到具体化的评判结果。非对称贴近度是用来表示事物对等级标准的属于程度，具体步骤如下：

假设 $D_i = (0, \cdots, 0, 1, 0, \cdots, 0)$ 时一个子集，这个子集能较好地表现等级 V_i 表示的信息量，换言之，当对目标的综合模糊评价结果是 D_i 时，则目标的等级就一定代表着 v_i 所对应的等级，这时，将 $D_i = (1, 2, \cdots, n)$ 成为评价等级 $V_i (i = 1, 2, \cdots, n)$ 的特征模糊子集。

若评价等级 V_i 上存在模糊子集 B_j ，用 $N(B_j, D_i)$ 来表示模糊子集 B_j 与 D_i 之间的贴近程度，如果结果满足 $N(B_j, D_i) = \max_{1 \leq i \leq n} \{N(B_j, D_i)\}$ ，那么目标的等级一定属于 V_i 所对应的等级。

如果评判结果 $B = (B_1, B_2, \cdots, B_n)$ 和特征模糊子集 $D_1 = (1, 0, \cdots, 0)$ 的贴近度为 $N(B, D_1)$ ，则贴近度表示为：

$$N(A, B) = 1 - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |\mu_A^p(V_k) - \mu_B^p(V_k)|^{\frac{1}{k}} \quad (18)$$

其中 $\mu_A(V_k)$ 是指各个因素对于 V_k 的隶属度， p 适当正实数，在进行等级评估时通常取 1。

在评估等级 $V = \{V_1 \quad V_2 \quad \cdots \quad V_m\}$ 中，等级 $v_j (j \in J_m)$ 中含有理想子集 $(0, \cdots, 1, \cdots, 0)$ ，其中 1 是第 j 个分量，此向量为 v_j 的理想目标，记为 D_j 。在计算 $N(A, B) (2 \leq j \leq n)$ 时，应将其 A 标准化：

$$A^{(j)} = \{a_j, a_{j-1}, a_{j+1}, a_{j-2}, a_{j+2}, \cdots\} \quad (19)$$

则 $N(A, B_j) = N(A^{(j)}, B_1)$ ， $B_1 = \{1, 0, 0, \cdots, 0\}$ 。

3 桥梁可靠性评价

3.1 各指标隶属函数

为验证方法有效性，以重庆市某桥梁为例，预测其可靠性。该桥始建于 1998 年，上部结构采用

研究与应用

2 m×10 m 现浇肋板式钢筋混凝土梁，单幅桥宽 4.34 m。
主梁梁高 1.05 m，肋宽 0.46 m，全桥共设置 4 道横隔板，横隔板高度 0.47 m，宽 0.26 m。

依据 JTG/T H21—2011《公路桥梁承载力检测评定规程》，将各预测指标定量处理，结果见表 3。

表 3 桥梁预测指标值 Table 3 Bridge prediction index value													
构件	跨中挠度 q1	结构位移 q2	横向联结 q3	混凝土强度 q4	裂缝 q5	保护层厚度 q6	钢筋锈蚀 q7	混凝土碳化 q8	氯离子含量 q9	墩台位移 q10	沉降 q11	地基冲刷 %q12	桥面铺装 q13
主梁	1/4568	一般	一般	Kbt=1.18; Kbm=1.29	9	0.96	-400	0.06	0.53				
桥墩 桥台				Kbt=1.18; Kbm=1.29	7	0.97	-435	0.18	0.7	有滑移和倾斜现象，但发展速度稳定			
上部 一般 构件		一般	一般	Kbt=1.18; Kbm=1.29	8	0.96	-427	0.18	0.64				部分铺装层表面有裂缝，伸缩缝局部堵塞
桥台 基础				Kbt=1.17; Kbm=1.28	6	0.97	-437	0.19	0.67		出现下沉，发展稳定	基础无冲刷现象	

根据岭型隶属函数图及其隶属函数表达式，可以得出主梁、上部一般结构、桥墩桥台和墩台基础的各指标隶属情况，即分别隶属于各个等级的程度，见表 4。

表 4 各构件指标隶属度 Table 4 Membership degrees of each indicator						
构件	指标	完好 (a)	较好 (b)	一般 (c)	较危险 (d)	危险 (e)
主梁	跨中挠度			1.0		
	结构位移			1.0		
	横向联结			1.0		
	混凝土强度	1.0				
	裂缝	1.0				
	保护层厚度	1.0				
	钢筋锈蚀			0.5	0.5	
	混凝土碳化	1.0				
	氯离子含量		0.49	0.51		
	墩台位移					1.0
上部 一般 结构	混凝土强度	1.0				
	裂缝	1.0				
	保护层厚度	1.0				
	钢筋锈蚀			0.5	0.5	
	混凝土碳化	1.0				
	氯离子含量		0.49	0.51		
	墩台位移					1.0
	沉降					1.0
	地基冲刷					1.0
	桥面铺装					1.0

续表4						
构件	指标	完好 (a)	较好 (b)	一般 (c)	较危险 (d)	危险 (e)
桥墩 桥台	混凝土强度	1.0				
	裂缝	1.0				
	保护层厚度	1.0				
	钢筋锈蚀			0.49	0.51	
	混凝土碳化	1.0				
	氯离子含量			0.5	0.5	
墩台 基础	墩台位移		1.0			
	混凝土强度	1.0				
	裂缝	1.0				
	保护层厚度	1.0				
	钢筋锈蚀			0.49	0.51	
	混凝土碳化	1.0				
	氯离子含量			0.5	0.5	
	沉降		1.0			
	地基冲刷		1.0			
	桥面铺装					1.0

3.2 各指标权重的确定

查阅相关文献、对比分析专家建议并对影响桥梁可靠性因素深度分析，得到构件判断矩阵，见表 5~8。

表 5 主梁判断矩阵的值
Table 5 The value of the main beam judgment matrix

指标	跨中挠度	结构位移	横向联结	混凝土强度	裂缝	保护层厚度	钢筋锈蚀	混凝土碳化	氯离子含量
跨中挠度	1	2	2	4	3	2	2	2	4
结构位移	1/2	1	1	3	2	1	1	1	3
横向联结	1/2	1	1	3	1	1	1/2	1	1/3
混凝土强度	1/4	1/3	1/3	1	1/3	1	1/5	1/4	1/4
裂缝	1/3	1/2	1	3	1	3	1/3	1/2	1/2
保护层厚度	1/2	1	1	1	1/3	1	1/5	1/3	1/2
钢筋锈蚀	1/2	1	2	5	3	5	1	2	1
混凝土碳化	1/2	1	1	4	2	3	1/2	1	1
氯离子含量	1/4	1/3	3	4	2	2	1	1	1

表 6 上部一般结构判断矩阵的值
Table 6 The value of the upper general structure judgment matrix

指标	结构位移	混凝土强度	横向联结	裂缝	保护层厚度	钢筋锈蚀	混凝土碳化	氯离子含量	桥面铺装
结构位移	1	3	1/3	2	1	1	1	3	1
混凝土强度	1/3	1	1/2	1/3	1	1/5	1/4	1/4	1
横向联结	3	2	1	1	1	1/3	1/2	1/2	1
裂缝	1/2	3	1	1	3	1/3	1/2	1/2	2
保护层厚度	1	1	1	1/3	1	1/5	1/3	1/2	2
钢筋锈蚀	1	5	3	3	5	1	2	2	4
混凝土碳化	1	4	2	2	3	1/2	1	2	1
氯离子含量	1/3	4	2	2	2	1/2	1/2	1	3
桥面铺装	1	1	1	1/2	1/2	1/4	1	1/3	1

表 7 桥墩桥台判断矩阵的值
Table 7 The value of the judgment matrix for bridge piers and abutments

指标	混凝土强度	裂缝	保护层厚度	钢筋锈蚀	混凝土碳化	氯离子含量	墩台位移
混凝土强度	1	1/3	1	1/5	1/4	1/4	1/2
裂缝	3	1	3	1/3	1/2	1/2	1
保护层厚度	1	1/3	1	1/4	1/3	1/3	3
钢筋锈蚀	5	3	4	1	2	2	2
混凝土碳化	4	2	3	1/2	1	1	2
氯离子含量	4	2	3	1/2	1	1	1
墩台位移	2	1	1/3	1/2	1/2	1	1

表 8 墩台基础判断矩阵的值
Table 8 The value of the judgment matrix for pier and abutment foundation

指标	混凝土强度	裂缝	保护层厚度	钢筋锈蚀	混凝土碳化	氯离子含量	沉降	地基冲刷
混凝土强度	1	1/3	1	1/5	1/4	1/4	1/4	1/4
裂缝	3	1	3	1/3	1/2	1/2	1/2	1
保护层厚度	1	1/3	1	1/4	1/3	1/3	1/3	1
钢筋锈蚀	5	3	4	1	2	2	1	2
混凝土碳化	4	2	3	1/2	1	1	1/2	2
氯离子含量	4	2	3	1/2	1	1	1	2
沉降	4	2	3	1	2	1	1	2
地基冲刷	4	1	1	1/2	1/2	1/2	1/2	1

研究与应用

以主梁为例, 主梁判断矩阵为:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 & 4 & 3 & 2 & 2 & 2 & 4 \\ 1/2 & 1 & 1 & 3 & 2 & 1 & 1 & 1 & 3 \\ 1/2 & 1 & 1 & 3 & 1 & 1 & 1/2 & 1 & 1/3 \\ 1/4 & 1/3 & 1/3 & 1 & 1/3 & 1 & 1/5 & 1/4 & 1/4 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 3 & 1 & 3 & 1/3 & 1/2 & 1/2 \\ 1/2 & 1 & 1 & 1 & 1/3 & 1 & 1/5 & 1/3 & 1/2 \\ 1/2 & 1 & 2 & 5 & 3 & 5 & 1 & 2 & 1 \\ 1/2 & 1 & 1 & 4 & 2 & 3 & 1/2 & 1 & 1 \\ 1/4 & 1/3 & 3 & 4 & 2 & 2 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

通过 SPSSUA 数据科学分析平台进行分析, 结果显示此矩阵最大特征值 $\lambda_{\max} = 9.731$, 特征向量归一化处理后为 $\{0.22, 0.13, 0.08, 0.04, 0.08, 0.05, 0.17, 0.12, 0.11\}$ 。将 $\lambda_{\max} = 9.731$ 带入求出 $CI = 0.091$, 查表 2 得出 $RI = 1.46$, $CR = 0.063 < 0.1$, 判断矩阵具有一致性, 主梁中各指标的权重值, 如图 4 所示。

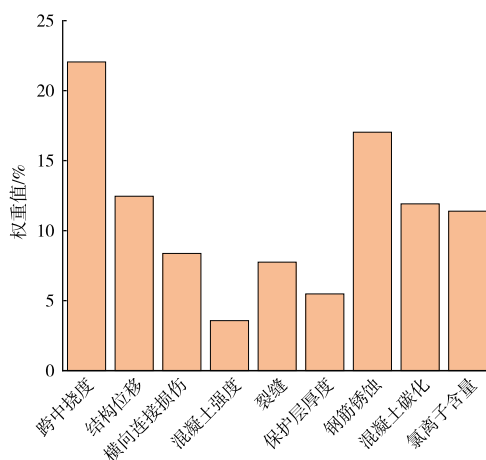


图 4 主梁各预测指标权重值

Fig. 4 Weight values of various prediction indicators for the main beam

$$A_1 = [0.22, 0.13, 0.08, 0.04, 0.08, 0.05, 0.17, 0.12, 0.11]$$

同理用 SPSSUA 数据分析平台可得到上部一般结构、桥墩桥台和墩台基础各指标权重值:

$$A_2 = [0.12, 0.04, 0.09, 0.1, 0.06, 0.24, 0.15, 0.13, 0.07]$$

$$A_3 = [0.05, 0.12, 0.07, 0.3, 0.19, 0.17, 0.1]$$

$$A_4 = [0.04, 0.09, 0.05, 0.24, 0.14, 0.16, 0.19, 0.09]$$

得出单级模糊综合评判模型:

$$B_1 = A_1 \cdot R_1 = [0.29, 0.05, 0.57, 0.09, 0]$$

$$B_2 = A_2 \cdot R_2 = [0.40, 0, 0.41, 0.19, 0]$$

$$B_3 = A_3 \cdot R_3 = [0.43, 0.10, 0.23, 0.24, 0]$$

$$B_4 = A_4 \cdot R_4 = [0.32, 0.28, 0.20, 0.20, 0]$$

3.3 多级模糊运算及结果处理

根据 JTJ/T H21—2011《公路桥梁承载力检测评定规程》中各构件的权重值并结合近几年研究和专家建议, 对桥梁各构件的重要程度进行分析, 得到如下判断矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 & 3 \\ 1/3 & 1 & 1/3 & 1/2 \\ 1/2 & 3 & 1 & 2 \\ 1/3 & 2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

通过 SPSSUA 数据科学分析平台进行分析, 结果显示此矩阵的最大特征值为 $\lambda_{\max} = 4.071$, 特征向量归一化处理后为 $[0.45, 0.11, 0.28, 0.16]$ 。将 $\lambda_{\max} = 4.071$ 带入求出 $CI = 0.024$, 查表 2 得出 $RI = 0.89$, 进行一致性检验, 得出 $CR = 0.027 < 0.1$, 判断矩阵满足一致性要求, 桥梁各构件的权重为: $A = [0.45, 0.11, 0.28, 0.16]$

由上面计算的单级模糊综合评判模型, 可得到模糊关系矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.29 & 0.05 & 0.57 & 0.09 & 0 \\ 0.4 & 0 & 0.41 & 0.19 & 0 \\ 0.43 & 0.1 & 0.23 & 0.24 & 0 \\ 0.32 & 0.28 & 0.20 & 0.20 & 0 \end{bmatrix}$$

得出 $B = A \cdot R = [0.35, 0.1, 0.4, 0.15, 0]$ 。

利用非对称贴近度的原则对模糊综合评判的结果进行处理, 将结果标准化可得: $B_1 = [0.35, 0.1, 0.4, 0.15, 0]$, $B_2 = [0.1, 0.35, 0.4, 0.15, 0]$, $B_3 = [0.4, 0.1, 0.15, 0.35, 0]$, $B_4 = [0.15, 0.40, 0.1, 0.35]$, $B_5 = [0, 0.15, 0.4, 0.1, 0.35]$, 当 $D_1 = [1, 0, 0, 0, 0]$ 时, 由式 16 计算可得: $N = (B_1, D_1) = 0.535$, $N = (B_2, D_1) = 0.430$, $N = (B_3, D_1) = 0.557$, $N = (B_4, D_1) = 0.429$, $N = (B_5, D_1) = 0.301$, 可以看出, $N = (B_3, D_1) = 0.557$ 的值最大, 所以桥梁为 3 类桥, 可靠性一般, 结果与桥梁检测报告中的结果一致。

4 结论

通过综合模糊评价对桥梁可靠性进行分析，主要内容和结论如下：

(1) 结合现行标准和影响钢筋混凝土桥梁可靠性的 2 个主要方面：钢筋和混凝土，建立钢筋混凝土桥梁可靠性综合模糊评价指标体系，将体系分为指标、构件和目标 3 个层次，层层递进，最终得到整体的可靠性等级进行评判，此方法建立指标体系更全面细化，更加贴合实际。

(2) 构建钢筋混凝土可靠性模糊综合评判模型。基于岭型隶属函数确定可靠性评判指标隶属度，利用函数式确定定量指标数值，运用层次分析法确定指标权重，定性定量相结合，降低评判主观性，使钢筋混凝土桥梁各层次等级和评判结果更准确，保证评判科学性和准确性。

(3) 影响梁桥可靠性因素众多，此次只选取最关键的影响因素构建指标体系，以后研究可多角度考虑影响因素，从而构建更全面细化的指标体系。

参 考 文 献

- [1] 高亚丽. 增大截面法加固 RC 梁桥的可靠度研究 [D]. 西安：长安大学，2013.
- [2] 刘月飞，肖青凯，屈广，等. 无先验信息情况下基于解耦极值荷载效应的桥梁时变可靠性分析 [J]. 重庆交通大学学报（自然科学版），2018，37（9）：1-6，65.
- [3] 边晓亚，陈旭勇，陈谦，等. 非概率响应面界限法在桥梁可靠性评估中的应用 [J]. 土木工程与管理学报，2018，35（4）：107-111.
- [4] 肖青凯. 基于 Vine copula 和贝叶斯动态模型的桥梁可靠性研究 [D]. 兰州：兰州大学，2018.
- [5] 梁灿，王佐才，辛宇，等. 基于动态贝叶斯网络及构件性能退化的钢板组合梁桥时变可靠性分析方法 [J]. 世界桥梁，2023，51（4）：99-106.
- [6] 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（增刊 1）：156-161.
- [7] 王华，王龙林，王希瑞，等. 少量检测数据下服役钢筋混凝土桥梁时变可靠性评估 [J]. 西部交通科技，2021（12）：75-77，132.
- [8] 王天鹏，张建仁，王磊，等. 模糊失效准则下桥梁拉索锈蚀时变可靠性分析 [J]. 公路交通科技，2021，38（8）：59-66.
- [9] 鹿健. 基于变权理论的混凝土梁式桥梁安全评估分析 [J]. 山西建筑，2019，45（19）：115-117.
- [10] 黄腾腾，徐祖恩，张大伟，等. 基于模糊理论的混凝土梁桥耐久性综合评估 [J]. 公路，2019，64（3）：141-145.
- [11] 樊学平，杨光红，尚志鹏，等. 考虑适用性的大跨桥梁主梁动态可靠性融合预测 [J]. 吉林大学学报（工学版），2022，52（1）：144-153.
- [12] 胡俊. 基于桥梁技术状况的统计数学模型确定使用寿命方法 [J]. 上海建设科技，2018（04）：25-28.
- [13] Yuan M, Liu Y, Yan D, et al. Probabilistic fatigue life prediction for concrete bridges using Bayesian inference: [J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22（3）：765-778.
- [14] 韩非. 带硫酸盐侵蚀损伤的玄武岩纤维混凝土高温后性能研究 [D]. 中国矿业大学，2022.
- [15] 朱祥意，陈徐东，潘凡，宁英杰，陈晨. 冻融作用下自密实混凝土疲劳寿命可靠性分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报，2023，55（03）：118-127.

E-mail: fmhzhly@163.com