

基于灰色关联和组合赋权的桥梁剩余寿命预测

Remaining Life Prediction of Bridges based on Grey Correlation and Combination Weighting

李晓阳, 王育德

(河北工程大学 土木工程学院, 邯郸 056038)

摘要: 为了预测钢筋混凝土桥梁的剩余寿命, 建立了钢筋混凝土桥梁的剩余寿命预测模型, 通过灰色关联度法得出各指标的灰色关联度系数, 根据改进层次分析法及反熵权法得到各指标的组合权重, 通过指标的权重得出构件的最终评判结果, 综合得到桥梁的恶化程度和恶化速度, 最终根据设定好的结构寿命的终结标准、恶化指数和恶化系数得出桥梁的剩余寿命。结果表明: 将建立的桥梁剩余寿命预测模型应用到实例中, 预测出桥梁的剩余寿命, 并且结果与实际情况相符, 表明所建立的桥梁剩余寿命预测模型切实可行, 为预测桥梁剩余寿命提供了新的研究方法。

关键词: 钢筋混凝土桥梁; 灰色关联; 组合赋权; 剩余寿命

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 03-0107-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.03.020

LI Xiaoyang, WANG Yude

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

Abstract: In order to predict the remaining life of reinforced concrete bridges, a prediction model for the remaining life of reinforced concrete bridges was established. The grey correlation coefficient of each indicator was obtained through the grey correlation method. The combined weight of each indicator was obtained based on the improved analytic hierarchy process and the inverse entropy weight method. The final evaluation result of the components was obtained through the weight of the indicators, and the degree and speed of deterioration of the bridge were comprehensively obtained. Finally, the remaining life of the bridge was obtained based on the set end criteria, deterioration index, and deterioration coefficient of the structural life. The results show that applying the established bridge remaining life prediction model to the example can predict the remaining life of the bridge, and the results are consistent with the actual situation, indicating that the established bridge remaining life prediction model is feasible and provides a new research method for predicting the remaining life of the bridge.

Key words: reinforced concrete bridge; grey correlation; combination weighting method; remaining life

0 引言

桥梁是重要的交通设施, 根据统计, 到 2021 年年底, 我国公路桥梁总数达到 96.11 万座、总长 7 380.21 万 m。我国钢筋混凝土桥梁大多建于上世纪 90 年代, 现在已进入结构性能退化加速期与病害集中显现期。据行业统计数据显示, 运营超过 25 年的在役桥梁中, 63.7% 存在不同程度的结构损伤, 对

基金项目: 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: 李晓阳 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 结构项目管理。

收稿日期: 2023-09-18

研究与应用

于桥梁的剩余寿命预测是十分有必要的。

付利民^[1]将温度和相对湿度作为函数的影响主因并修改其扩散系数,分别代入不同的数学模型中发现其适用于计算钢筋混凝土结构的碳化寿命预测;胡俊^[2]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,构建了一个钢筋混凝土板梁结构具备 95% 保障率的桥梁使用寿命模型;徐方圆^[3]基于动态称重系统制定车荷载模型,分析了桥梁疲劳损伤发展在不同车辆荷载作用下的规律,提出混凝土桥梁多轴车辆作用下的疲劳寿命预测方法;樊学平等^[4]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;王继林等^[5]在考虑荷载和耐久性两个因素对结构的极限承载力和正常使用状态下功能可靠度影响的基础上,对桥梁实现了寿命预测;韩非^[6]将结构的硫酸盐侵蚀寿命准则、碳化寿命准则和承载力寿命准则相结合,提出混凝土结构在硫酸盐侵蚀环境下的损伤基础和高温环境下的使用寿命预测;陈光等^[7]根据悬索桥结构的特点,采用基于疲劳累积损伤理论的数学模型法,针对各种外因和内因对部件疲劳累积损伤的综合作用展开了估算,并预测了悬索桥主缆的剩余寿命;王俊峰^[8]基于经典疲劳损伤累积准则和 P-M 准则,提出改进疲劳损伤累积算法,最后结合时变车载和钢筋锈蚀模型提出混凝土桥梁疲劳寿命的预测方法;吴云涛^[9]在传统可靠度分析方法的基础上,结合随机有限元法在桥梁结构可靠度分析中的应用,通过 ANSYS 响应面法对现役简支 T 梁的剩余寿命进行估算;王伟芳^[10]将车辆荷载与混凝土的退化过程相结合,通过贝叶斯更新方法得到了服役桥梁的剩余寿命;毕高波等^[11]运用健康监测的方法,对桥梁结构混凝土材料的应力指标进行监测,得到材料的强度可靠度变化趋势,并采用蒙特卡洛方法预测桥梁的剩余寿命;Yuan 等^[12]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;Mansell 等^[13]分析过去和现在的交通运营情况,通过有限元分析对桥梁进行疲劳寿命分

析。利用有限元方法结合累积疲劳理论,根据未来的交通需求统计,预测出铁路桥的剩余使用寿命;Nesterova 等^[14]认为估计现有结构剩余寿命的最适当的方法之一是在关键细节中对监测的动作或负载影响进行外推,并基于有限的交通和静风作用数据,评估高架桥钢正交各向异性桥面在其设计寿命结束时的可靠性;Fathalla 等^[15]构建了一个人工神经网络模型 (ANN),该模型将疲劳寿命与裂纹联系在一起。采用多尺度模拟和伪裂纹法,基于现场检测的表面裂纹的各种形态,预测出真实钢筋混凝土桥面的剩余疲劳寿命。

以上研究发现对于桥梁的可靠性分析和剩余寿命预测主要是从现场的检测数据和建立数学模型来研究,通过现场的检测数据计算可靠度来预测桥梁的剩余寿命这种完全客观的手段得到的结果的准确性不高,与实际情况会出现偏差,在预测桥梁剩余寿命的预测指标权重存在着主客观失衡等问题。因此将灰色关联度和组合赋权相结合,以此方法来预测桥梁剩余寿命,使得最后的预测结果更符合桥梁实际情况,更加科学合理。

1 确定桥梁剩余寿命预测指标体系

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、基础作为子单元,将影响桥梁可靠性的因素作为指标层,构建了桥梁剩余寿命预测指标体系模型,如图 1 所示。

将所有指标分为程度型指标和速度型指标^[16]。程度型指标指裂缝的宽度、长度、累计面积占结构表面积的百分比等,有无锈蚀钢筋,有无结构变位,混凝土剥落情况等;速度型指标则指结构服役环境的气候变化(温湿度、有无干湿交替、有害气体浓度)、氯离子含量钢筋锈蚀电位、保护层厚度等。程度型指标和速度型指标,分别对应桥梁的恶化程度和恶化速度,通过恶化程度和恶化速度得出桥梁的最终剩余寿命。

根据指标属性将指标分为正向指标和反向指标,正向指标表示指标数值越大越好,反向指标则反之,将各指标进行分类处理,见表 1。

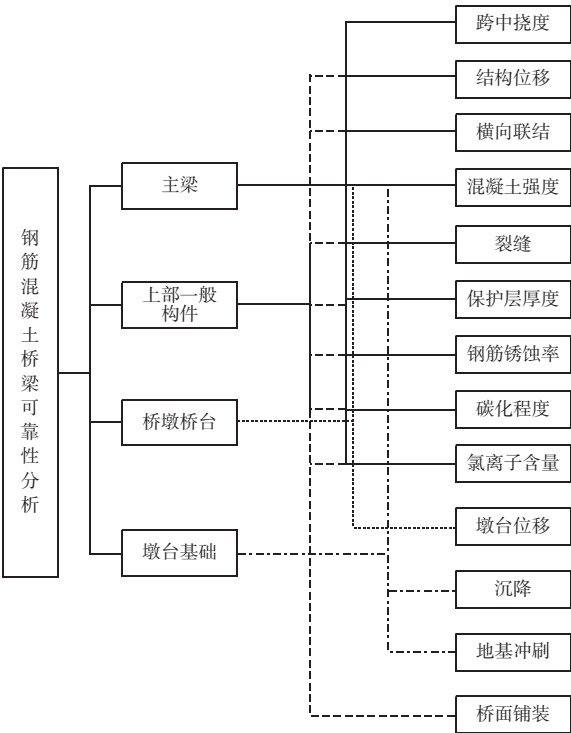


图1 桥梁可靠性评价指标体系模型
Fig.1 Model of bridge reliability evaluation index system

表1 指标分类
Table 1 Index classification

指标	指标类型	指标属性
跨中挠度 q_1	程度型	反向
结构位移 q_2	程度型	反向
横向联结 q_3	程度型	反向
混凝土强度 q_4	程度型	正向
裂缝 q_5	程度型	反向
保护层厚度 q_6	速度型	正向
钢筋锈蚀率 q_7	速度型	正向
碳化程度 q_8	速度型	反向
氯离子含量 q_9	速度型	反向
墩台位移 q_{10}	程度型	反向
沉降 q_{11}	程度型	反向
地基冲刷 q_{12}	速度型	反向
桥面铺装 q_{13}	程度型	正向

2 灰色关联度的确定

2.1 确定比较序列和参考序列

恶化程度比较序列：

$$\begin{aligned} Y_1(j) &= [q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad q_4 \quad q_5] \\ Y_2(j) &= [q_2 \quad q_3 \quad q_4 \quad q_5 \quad q_{13}] \\ Y_3(j) &= [q_4 \quad q_5 \quad q_{10}] \\ Y_4(j) &= [q_4 \quad q_5 \quad q_{11}] \end{aligned}$$

恶化速度比较序列：

$$\begin{aligned} X_1(j) &= [q_6 \quad q_7 \quad q_8 \quad q_9] \\ X_2(j) &= [q_6 \quad q_7 \quad q_8 \quad q_9] \\ X_3(j) &= [q_6 \quad q_7 \quad q_8 \quad q_9] \\ X_4(j) &= [q_6 \quad q_7 \quad q_8 \quad q_9 \quad q_{12}] \end{aligned}$$

其中： Y 为恶化程度， X 为恶化速度。

参考序列为各指标的最优值集合，当指标属性为正向指标取其最大值，为反向指标取其最小值，根据JTG/T H21—2011《公路桥梁承载力检测评定规程》，取各指标上下限见表2。

表2 指标取值区间
Table 2 Index value range

指标	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	q_6	q_7	q_8	q_9	q_{10}	q_{11}	q_{12}	q_{13}
上限		1	1	1		1				1	1		1
下限	1/600			0.7	55%	0.55	-500	2	1%			20%	

2.2 规范化处理

假设指标 q_s 的取值区间是 $[q_s^L, q_s^U]$ ，正向指标最大值为最优取值，反向指标最小值为最优取值，对指标 q_s 的无量纲化进行规范化处理。得到其规范后的恶化程度矩阵 A_i 和恶化速度矩阵 B_i 。

$$p_{s正} = \frac{q_s - q_s^L}{q_s^U - q_s^L} \text{ (正向)} \quad p_{s反} = \frac{q_s^U - q_s}{q_s^U - q_s^L} \text{ (反向)} \tag{1}$$

当 p_s 越大时,说明关于第 S 个指标的损伤程度越大, p_s 越小则损伤程度越小。

2.3 确定灰色关联系数

灰色关联系数 β_s 的表达式为：

$$\beta_s = \frac{\rho}{1 + \rho - p_s} \tag{2}$$

式中： ρ 为分辨系数，取值范围为（0~1），为降低对结果误差的影响，保证结果的一致性，统一取0.5。

3 组合权重的确定

3.1 改进层次分析法确定主客观权重

假设矩阵 $R = [r_{ij}]$ ，其中 r_{ij} 表示第 i 个指标相对于第 j 个指标的标度值，标度值的含义见表3，且必须满足以下条件：（1） $r_{ij} > 0$ ；（2） $r_{ii} = 1$ ；（3） $r_{ij} = 1/r_{ji}$ 。

假设有 n 个指标为 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，基于重要程度不减的原则对其进行主观排序，结果为 $x_1 \geq x_2 \geq x_3 \geq \dots \geq x_n$ ，比较 x_i 和 x_{i+1} 的重要度关系，给与它们相对应的标度，记为 t_i ，即得到了相邻2个指标之间

研究与应用

表 3 标度值及其含义

Table 3 Scale values and their meanings

标度值	含义
1.0	相同重要
1.2	稍微重要
1.4	强烈重要
1.6	明显重要
1.8	绝对重要

的标度值 $t_1, t_2, \dots, t_{n-1}$ 。根据重要程度的传递性得到矩阵中的其他值, 则最后的判断矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1 t_2 & \cdots & \prod_{i=1}^{n-1} t_i \\ \frac{1}{t_1} & 1 & t_2 & \cdots & \prod_{i=2}^{n-1} t_i \\ \frac{1}{t_1 t_2} & \frac{1}{t_2} & 1 & \cdots & \prod_{i=3}^{n-1} t_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{\prod_{i=1}^{n-1} t_i} & \frac{1}{\prod_{i=2}^{n-1} t_i} & \frac{1}{\prod_{i=3}^{n-1} t_i} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

此矩阵满足一致性要求, 可以不用进行检验直接进行权重的计算^[17], 各指标的权重表达式为:

$$W_{si} = \left(\prod_{j=1}^n r_{ij} \right)^{1/n} / \sum_{i=1}^n \left(\prod_{j=1}^n r_{ij} \right)^{1/n} \quad (4)$$

式中: W_{si} 为第 i 项指标的权重值; $\prod_{j=1}^n r_{ij}$ 为矩阵 R 中第 i 行所有元素的积。

3.2 反熵权法确定客观权重

反熵权法是基于熵值的反熵, 指标的差异越大, 反熵就越大, 从而对应的权重就越高, 与通常使用的熵值法相比, 能够避免指标差异性过大时导致权重分配出现极端的情况发生, 保证了预测结果的合理性^[18]。

各指标的反熵值为:

$$h_i' = - \sum_{j=1}^m r_{ij} \ln(1 - r_{ij}) \quad (5)$$

其中

$$r_{ij} = x_{ij} / \sum_{j=1}^m x_{ij} \quad (6)$$

最后得到各指标的客观权重系数 W_{oi} :

$$W_{oi} = h_i' / \sum_{j=1}^m h_j' \quad (7)$$

3.3 确定指标组合权重

组合赋权法能够避免主观赋权法和客观赋权法两种单一评价方法的不足, 将主观和客观相结合, 能够提高结果的科学性和稳定性。

利用改进层次分析法计算出指标的主观权重 ω_{si} , 通过反熵权法计算出指标的客观权重 ω_{oi} , 计算出组合权重系数:

$$\omega_i = \frac{\alpha_i \omega_{si} + \beta_i \omega_{oi}}{\sum_{i=1}^m (\alpha_i \omega_{si} + \beta_i \omega_{oi})}, \quad 1 \leq i \leq n \quad (8)$$

式中: α_i 和 β_i 分别为主观权重和客观权重的相对重要系数:

$$\begin{cases} \alpha_i = \omega_{si} / (\omega_{si} + \omega_{oi}) \\ \beta_i = \omega_{oi} / (\omega_{si} + \omega_{oi}) \end{cases}, \quad 1 \leq i \leq n \quad (9)$$

4 桥梁剩余寿命预测模型

4.1 恶化程度和恶化速度的确定

各构件的综合结果, 如式 (10) 所示:

$$R_i = \sum_{s=1}^n \beta_s \omega_s, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (10)$$

由各构件的判定结果, 进行桥梁的整体预测, 将构件评定值作为新的指标值重新进行计算, 它只是对构件评定的综合处理, 将结构的恶化程度记为 R , 恶化速度记为 $\dot{R}$ 。

4.2 在役桥梁剩余寿命预测

R 和 $\dot{R}$ 为结构整体的实际指标集和结构损伤极限值之间的关联度, 利用式 (2) 得到规范化后的指标后, 得到 F 和 $\dot{F}$, 以结构的耐久性能劣化到某一程度 φ 作为桥梁寿命的终结标准^[19], 由此计算桥梁的恶化程度 φ 和恶化速度 $\dot{\varphi}$:

$$\varphi = F \times 100\% \quad (11)$$

$$\dot{\varphi} = \dot{F} \times 1\% / \text{年} \quad (12)$$

假设结构已经服役 T_f 年, 服役至今共进行过 n 次维修保养, 记录第 n 次维修加固发生在 T_i 年, 计算第 i 次养护维修混凝土强度补强值与混凝土设计强度的比值, 记为 η_i , 可得:

$$\alpha T_f^\beta + \sum_{i=1}^n \eta_i \alpha (T_f - T_i)^\beta - \sum_{i=1}^n \eta_i = \varphi \tag{13}$$

$$\alpha \beta T_f^{\beta-1} + \sum_{i=1}^n \eta_i \alpha \beta (T_f - T_i)^{\beta-1} = \dot{\varphi} \tag{14}$$

式中： α 为恶化系数； β 为恶化指数。代入计算得到 α 和 β ，以结构耐久性性能恶化到 10% 作为桥梁寿命终结的标志，可得到桥梁的剩余寿命 T ：

$$a(T_f + T)^\beta + \sum_{i=1}^n \eta_i \alpha (T_f + T - T_i)^\beta - \sum_{i=1}^n \eta_i = 10\% \tag{15}$$

5 桥梁剩余寿命预测模型应用

5.1 预测指标灰色关联系数的确定

为了验证模型的有效性，以重庆市某桥梁为例，预测其剩余寿命。该桥建于 1998 年，上部结构采用 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。

根据 JTG/T H21—2011《公路桥梁承载力检测评定规程》^[20] 中桥梁技术情况分类界限和桥梁检验报告，将各预测指标定量处理，结果见表 4。

表 4 桥梁预测指标值 Table 4 Bridge prediction index value			
构件	预测指标	具体值	构件 预测指标 具体值
主梁	q ₁	1/4568	q ₄ $K_{bt} = 1.17, K_{bm} = 1.28$
	q ₂	0.78	q ₅ 7
	q ₃	0.75	q ₆ 0.97
	q ₄ $K_{bt} = 1.18, K_{bm} = 1.29$		桥墩 q ₇ -435
	q ₅ 9		桥台 q ₈ 0.18
	q ₆ 0.96		q ₉ 0.7
	q ₇ -400		q ₁₀ 0.85
	q ₈ 0.06		q ₄ $K_{bt} = 1.17, K_{bm} = 1.28$
	q ₉ 0.53		q ₅ 6
	q ₁₂ 0.75		q ₆ 0.97
	q ₄ $K_{bt} = 1.18, K_{bm} = 1.29$		q ₇ -437
	q ₃ 0.71		桥台 q ₈ 0.19
	q ₅ 8		基础 q ₉ 0.67
上部一般构件	q ₆ 0.96		q ₁₁ 0.82
	q ₇ -427		q ₁₂ 4
	q ₈ 0.18		
	q ₉ 0.64		
	q ₁₃ 0.69		

根据 2.1 介绍的灰色关联系数计算过程，各构件指标的灰色关联度系数见表 5~6。

表 5 桥梁程度型预测指标灰色关联度系数
Table 5 Grey correlation coefficient of bridge degree type prediction index

构件名称	预测指标	灰色关联度系数
主梁	跨中挠度	0.365
	结构位移	0.391
	横向联结	0.400
	混凝土强度	0.342
	裂缝	0.374
上部一般结构	结构位移	0.400
	横向联结	0.413
	混凝土强度	0.342
	裂缝	0.369
	桥面铺装	0.617
桥墩桥台	混凝土强度	0.342
	裂缝	0.364
墩台基础	墩台位移	0.370
	混凝土强度	0.342
	裂缝	0.359
	沉降	0.378

表 6 桥梁速度型预测指标灰色关联度系数
Table 6 Grey correlation coefficient of bridge speed type prediction index

构件名称	预测指标	灰色关联度系数
主梁	保护层厚度	0.354
	钢筋锈蚀	0.714
	混凝土碳化	0.340
	氯离子含量	0.515
上部一般结构	保护层厚度	0.354
	钢筋锈蚀	0.774
	混凝土碳化	0.355
	氯离子含量	0.581
桥墩桥台	保护层厚度	0.349
	钢筋锈蚀	0.794
	混凝土碳化	0.355
墩台基础	氯离子含量	0.625
	保护层厚度	0.349
	钢筋锈蚀	0.799
	混凝土碳化	0.356
	氯离子含量	0.602
	地基冲刷	0.384

5.2 预测指标组合权重的确定

基于改进层次分析法确定主观权重时，通过发放问卷的方式确定各构件指标的重要程度，发放对象为桥梁的检测人员、加固人员、施工现场的技术负责人等，对收集到的问卷结果进行整理统计，以主梁程度型指标为例，有 5 个指标跨中挠度、结构位移、横向联结、混凝土强度、裂缝，对其进行主观排序，结果为混凝土强度 > 裂缝 = 横向联结 >

研究与应用

跨中挠度 > 结构位移，比较前后 2 个指标的重要度关系，给与它们相对应的标度，则最后的判断矩阵为：

R = [[1, 1.6, 1.6, 1.92, 2.3], [1/1.6, 1, 1, 1.2, 1.44], [1/1.6, 1, 1, 1.2, 1.44], [1/1.92, 1/1.2, 1/1.2, 1, 1.2], [1/2.3, 1/1.44, 1/1.44, 1/1.44, 1]]

此矩阵满足一致性要求，可以不用进行检验直接进行权重的计算，根据式（4）求出主梁各程度型指标的权重为：[跨中挠度，结构位移，横向联结，混凝土强度，裂缝] = [0.163，0.135，0.195，0.312，0.195]。

根据改进层次分析法确定的主观权重和反熵权法确定的客观权重，分别求出他们的相对重要系数，最后得出各构件的组合权重，结果见表 7~8。

5.3 桥梁剩余寿命预测

由式（10）得出各构件的评定结果为：
程度型预测指标：[主梁，上部一般构件，桥墩桥台，墩台基础] = [0.371，0.411，0.356，0.359]；
速度型预测指标：[主梁，上部一般构件，桥墩桥台，墩台基础] = [0.508，0.552，0.546，0.532]。

表 7 桥梁程度型预测指标组合权重
Table 7 Combination weight of bridge degree based prediction indicators

构件	预测指标	α_i	β_i	组合权重
主梁	跨中挠度	0.436	0.564	0.188
	结构位移	0.441	0.559	0.153
	横向联结	0.486	0.514	0.199
	混凝土强度	0.540	0.460	0.288
	裂缝	0.572	0.428	0.172
上部一般结构	结构位移	0.493	0.507	0.170
	横向联结	0.562	0.438	0.181
	混凝土强度	0.444	0.556	0.320
	裂缝	0.570	0.430	0.180
	桥面铺装	0.468	0.532	0.149
桥墩桥台	混凝土强度	0.459	0.541	0.447
	裂缝	0.570	0.430	0.304
	墩台位移	0.489	0.511	0.248
墩台基础	混凝土强度	0.394	0.606	0.395
	裂缝	0.499	0.501	0.249
	基础沉降	0.619	0.381	0.356

表 8 桥梁速度型预测指标组合权重
Table 8 Combination weight of bridge speed based prediction indicators

构件	预测指标	α_i	β_i	组合权重
主梁	保护层厚度	0.468	0.532	0.170
	钢筋锈蚀	0.646	0.354	0.268
	混凝土碳化	0.712	0.288	0.189
	氯离子含量	0.297	0.703	0.373
上部一般结构	保护层厚度	0.480	0.520	0.145
	钢筋锈蚀	0.586	0.414	0.281
	混凝土碳化	0.637	0.363	0.224
	氯离子含量	0.346	0.654	0.350
桥墩桥台	保护层厚度	0.337	0.663	0.226
	钢筋锈蚀	0.643	0.357	0.267
	混凝土碳化	0.604	0.396	0.228
	氯离子含量	0.408	0.592	0.279
墩台基础	保护层厚度	0.318	0.682	0.195
	钢筋锈蚀	0.664	0.336	0.256
	混凝土碳化	0.527	0.473	0.174
	氯离子含量	0.453	0.547	0.244
	地基冲刷	0.502	0.498	0.131

看出该桥梁各构件恶化程度最大的是上部一般构件，其次分别为主梁、墩台基础和桥墩桥台，恶化速度为上部一般构件最大，其次分别为桥墩桥台、墩台基础和主梁，桥梁整体恶化情况见表 9。

表 9 桥梁整体恶化形势
Table 9 Overall deterioration condition of the bridge

指标属性	关联系数	等效规范化的 关联系数	恶化程度 /%	恶化速度 /（%/年）
程度型	0.4423	0.3695	3.695	
速度型	0.5142	0.5276		0.5276

根据所求得桥梁的恶化程度和恶化速度，将值代入式（13）和（14）中，得出桥梁的恶化系数 $\alpha=0.5146$ 、恶化指数 $\beta=0.0349$ 。再根据设定好的结构寿命的终结标准将恶化系数和恶化指数带入式（15）中，最终得出 $T=32.51$ 年。

6 结论

以钢筋混凝土桥梁的剩余寿命为研究对象，将灰色关联和组合赋权相结合，预测桥梁的剩余寿命，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剩余寿命的影响因素，建立桥梁剩余寿命预测指标体系，将指标分为程度型指标和速度型指标，通过程度型指标最后可得出结构的恶化程度，速度型指标可以得出结构的恶化速度，将灰色关联和组合赋权相结

合,由指标的关联系数得到构件的关联度,最终得到桥梁整体的关联系数,进而得到整体的恶化速度和恶化系数,最后根据恶化指数和恶化系数得出桥梁的剩余寿命。

(2) 将建立的桥梁剩余寿命预测模型应用到实例中,预测出桥梁的剩余寿命,并且结果与实际情况相符,表明所建立的桥梁剩余寿命预测模型切实可行,为预测桥梁剩余寿命提供了新的研究方法。

(3) 主要研究桥梁结构性损伤造成的剩余寿命变化的问题,对于环境因素,车辆荷载等因素并未考虑进去,如何将这些因素的变化考虑进去,使桥梁剩余寿命预测模型更加全面完整有待进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] 付利民. 基于可靠度的既有公路钢筋混凝土桥梁碳化寿命预测研究 [J]. 中国公路, 2017 (1): 126-127.
- [2] 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 (4): 25-28.
- [3] 徐方圆. 基于影响线的混凝土桥梁疲劳寿命预测分析 [J]. 科技创新与应用, 2019 (11): 64-65.
- [4] 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.
- [5] 王继林, 夏叶飞, 袁微微, 等. 预应力混凝土连续箱梁桥 LCPA 法剩余使用寿命预测 [J]. 交通科技, 2022 (3): 64-68.
- [6] 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]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- [7] 陈光, 陈敬坤. 一种悬索桥剩余寿命的预测方法 [J]. 交通世界, 2022 (32): 177-179.
- [8] 王俊峰. 基于足尺构件破坏试验的混凝土桥梁疲劳寿命预测与裂缝分形研究 [D]. 西安: 长安大学, 2022.
- [9] 吴云涛. ANSYS 响应面法在钢筋混凝土桥梁剩余寿命计算中的应用 [J]. 北方交通, 2018, (4): 50-52, 56.
- [10] 王伟芳. 基于贝叶斯更新和检测数据的服役混凝土桥梁剩余寿命预测分析 [J]. 西部交通科技, 2021, (6): 135-138.
- [11] 毕高波, 刘普, 李冬冬, 等. 基于桥梁长期健康监测数据的时变可靠度分析与寿命预测 [J]. 建筑技术开发, 2024, 51 (2): 138-140.
- [12] 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.
- [13] MANSELL B, NGAMKHANONG C, KAEWUNRUEN S. Evaluating the residual life of aged railway bridges [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Forensic Engineering, 2019, 171 (4): 1-11.
- [14] NESTEROVA M, SCHMIDT F, Soize C. Estimation of Remaining Life of the Orthotropic Deck of a Bridge Exposed to Extreme Traffic and Wind Actions [J]. Structural Health Monitoring - an International Journal, 2019.
- [15] FATHALLA E, TANAKA Y, MAEKAWA K. Remaining fatigue life assessment of in-service road bridge decks based upon artificial neural networks [J]. Engineering Structures, 2018, 171 (SEP. 15): 602-616.
- [16] 崔晶晶. 西北干旱地区在役梁桥剩余寿命预测研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.
- [17] 赵书强, 汤善发. 基于改进层次分析法、CRITIC 法与逼近理想解排序法的输电网规划方案综合评价 [J]. 电力自动化设备, 2019, 39 (3): 143-148, 162.
- [18] 徐秋卉. 基于灰色关联和组合赋权的智能输电网综合评价研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2015.
- [19] 张璐. 多因素影响下的混凝土结构耐久寿命预测方法 [J]. 重庆三峡学院学报, 2014, 30 (3): 74-78.
- [20] JTG/T J21—2011, 公路桥梁承载能力检测评定规程 [S].