

混凝土梁式桥预防养护后评价的理论与方法研究

邓嘉骏¹, 范凌泰¹, 吴杰¹, 李后川²

¹江苏扬子江高速通道管理有限公司 江苏南京

²江苏高速公路工程养护技术有限公司 江苏南京

【摘要】本文聚焦混凝土梁式桥，系统阐述了预防养护后评价的理论基础、框架及方法。论文采用物联网、计算机视觉、数字孪生等先进技术，提出 AHP-熵权法组合赋权与灰色模糊综合评价的量化方法，构建了涵盖实施过程、长期效果的多层次后评价指标体系，实现了数据采集、病害识别、效果仿真的智能化，解决了传统后评价“数据不足、效率低下”的痛点。通过分析物联网、大数据及人工智能等先进技术在后评价中的应用前景，以期提升我国混凝土梁式桥预防养护的精细化、智能化管养水平提供理论支撑。

【关键词】混凝土梁式桥；预防养护；后评价；指标体系

【收稿日期】2025 年 5 月 14 日 **【出刊日期】**2025 年 6 月 12 日 **【DOI】**10.12208/j.ace.2025000204

Research on the theory and method of post-evaluation of preventive maintenance of concrete beam bridge

Jiajun Deng¹, Lingtai Fan¹, Jie Wu¹, Houchuan Li²

¹Jiangsu Yangtze River Expressway Management Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu

²Jiangsu Highway Engineering Maintenance Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu

【Abstract】This study focuses on concrete girder bridges and systematically elaborates on the theoretical basis, framework, and methods for post-evaluation of preventive maintenance. Integrating advanced technologies including the Internet of Things (IoT), computer vision, and digital twins, it proposes a quantitative evaluation method combining the AHP-entropy weight method with gray-fuzzy comprehensive evaluation, and establishes a multi-level post-evaluation index system encompassing both the implementation process and long-term effects. This achieves the intellectualization of data collection, disease identification, and effect simulation, addressing the "insufficient data and low efficiency" bottleneck in traditional post-evaluation. By analyzing the application prospects of advanced technologies such as IoT, big data, and artificial intelligence in post-evaluation, this study aims to provide theoretical support for enhancing the refined and intelligent management and maintenance level of preventive maintenance for concrete girder bridges in China.

【Keywords】Concrete beam bridge; Preventive maintenance; Post-evaluation; Index system

1 引言

混凝土梁式桥是交通基础设施网络的关键组成，其安全与耐久性直接影响社会经济运行效率和公共安全^[1]。在环境侵蚀、材料老化及交通荷载增长的共同作用下，既有混凝土桥梁性能退化问题日益突出，传统“修复性养护”模式因成本高、效果有限难以满足需求^[2]。预防养护作为主动性、低成本策略，在桥梁性能显著下降前实施早期干预，已被证实成本效益优于传统方法，而其有效性、经济性及长期影响亟需科学评估体系验证^[3-4]。预防养护后评价是养护措施实施后，对技术效果、经济效益及环境社会影响进行全面系统评估的过程，既是检验单个养护项目成败的依据，也是积

累养护知识、优化未来决策、实现桥梁资产科学管理的关键环节^[5]。当前国内外在桥梁养护管理领域研究广泛^[6-8]，但针对混凝土梁式桥预防养护的系统性后评价理论体系仍不完善，本文旨在梳理整合相关理论基础，构建逻辑清晰、操作性强的后评价框架与方法体系，探讨智能化技术带来的新机遇，推动桥梁管养向“数据与模型驱动”转型。

2 预防养护后评价的理论基础

2.1 预防养护与后评价的核心内涵

预防养护的本质是“主动干预、成本优化”，其实施需满足两个前提：一是桥梁技术状况等级 ≥ 3 级（《公路桥梁技术状况评定标准》JTG/TH21-2011），仅存在

轻微缺陷（如表层裂缝、混凝土碳化深度 $\leq 5\text{mm}$ ）；二是养护措施需具备成本效益优势，即初期投入低于未来修复成本的现值。常见的混凝土梁式桥预防养护措施包括：混凝土表面涂层防护（氟碳漆、硅烷浸渍）、裂缝低压注浆修补、钢筋阻锈剂注入、支座防尘防水处理等，核心目标是延缓退化速率、延长结构使用寿命。

后评价作为养护决策的“反馈机制”，具有回溯性、系统性与导向性三大特征：回溯性体现为对已实施养护项目的效果复盘；系统性要求覆盖技术、经济、社会环境全维度；导向性强调将评价结果转化为未来养护策略优化的依据。其核心逻辑是：通过数据收集-指标量化-综合评价-问题诊断-决策优化的闭环流程，实现养护资源的高效配置。

2.2 混凝土梁式桥的退化机理与影响因素

混凝土梁式桥的退化是环境、荷载与材料特性耦合作用的结果，其核心退化路径可归纳为三类，氯离子侵蚀-钢筋锈蚀路径：海洋环境或除冰盐使用场景下，氯离子通过混凝土孔隙扩散至钢筋表面，破坏钝化膜，引发锈蚀膨胀，导致混凝土开裂剥落，退化速率与氯离子扩散系数、混凝土水胶比正相关；荷载疲劳-结构损伤路径：车辆荷载反复作用下，主梁受拉区产生疲劳裂缝，裂缝宽度随荷载循环次数（ N ）呈指数增长，当裂缝宽度 $\geq 0.3\text{mm}$ 时，结构承载能力显著下降；环境老化-性能衰减路径：混凝土碳化（ CO_2 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应）导致 pH 值降低，加速钢筋锈蚀；冻融破坏（水结冰体积膨胀）造成混凝土表层剥落；碱集料反应引发内部开裂，此类退化与环境温湿度、暴露时间直接相关。此外，桥梁不同构件的退化速率存在显著差异：主梁因直接承受荷载与环境侵蚀，年退化速率要快一些，桥墩、桥台等下部结构受影响较小，年退化速率要慢一些，这一特征为后评价中指标权重分配提供了依据。

2.3 后评价的核心理论模型

2.3.1 基于可靠性的剩余寿命预测模型

采用半马尔可夫过程构建退化状态转移模型，将桥梁技术状况划分为5个状态，通过历史数据拟合状态转移概率矩阵，结合养护措施对转移概率的修正系数，预测养护后桥梁的剩余寿命，该模型已在某跨海大桥主梁养护后评价中应用，取得良好效果。

2.3.2 生命周期成本（LCC）分析模型

将预防养护视为长期投资，计算全生命周期（通常取60年）内的总成本现值，公式如下。

其中， $C_{initial}$ 为养护初始成本， $C_{maintain}$ 为年度维护成本， $C_{failure}$ 为潜在失效损失成本， r 为折现率（通

常取4%~6%）。通过对比养护前后的LCC差值，量化经济效益（ $\Delta LCC=LCC_0-LCC_1$ ， $\Delta LCC>0$ 为有效）。

$$LCC = C_{initial} + \sum_{t=1}^n \frac{C_{maintain}(t) + C_{failure}(t)}{(1+r)^t}$$

2.3.3 多准则决策（MCDM）模型

针对后评价的多目标冲突问题（如技术效果最优与成本最低的矛盾），采用层次分析法（AHP）-熵权法组合赋权，结合灰色关联分析（GRA）进行方案排序。其核心步骤为：（1）构建目标层（综合评价）-准则层（技术、经济、社会环境）-指标层（12项具体指标）的层次结构；（2）采用AHP确定主观权重 ω_1 ，熵权法确定客观权重 ω_2 ，组合权重 $\omega=\alpha\omega_1+(1-\alpha)\omega_2$ （ $\alpha=0.6$ ，兼顾主观经验与客观数据）；（3）计算各评价对象与理想方案的灰色关联系数，关联系数越大，评价效果越优。

3 预防养护后评价的框架与方法体系

3.1 构件后评估评价框架

基于“目标导向-分层设计-闭环反馈”原则，构建后评价框架，主要包括目标层、准则层、指标层、方法层和结果层，目标层用于量化预防养护项目的综合效益，为养护决策优化提供支撑；准则层涵盖方案设计、施工质量、经济效益和长期效果等，确保评价的全面性；指标层筛选约10项关键指标，兼顾可操作性与针对性；方法层整合传统评价方法与智能技术，实现定性与定量结合；结果层输出综合评价等级（优秀/良好/合格/不合格）、问题清单及优化建议。

3.2 指标体系的量化与标准化

指标量化遵循“定量指标标准化，定性指标量化”原则。定量指标标准化：采用极值法将指标转化为 $[0, 1]$ 区间值，正向指标（如性能提升率）公式为： $x'=(x-x_{\min})/(x_{\max}-x_{\min})$ ；负向指标（如缺陷复发率）公式为： $x'=(x_{\max}-x)/(x_{\max}-x_{\min})$ ；

定性指标量化：公众满意度、技术推广价值等定性指标，通过5分制打分转化为定量值（5分=优秀，4分=良好，3分=合格，2分=较差，1分=不合格），再进行标准化处理。

指标权重确定采用AHP-熵权法组合赋权：邀请10名桥梁工程领域专家采用1-9标度法构建判断矩阵，通过一致性检验（ $CR<0.1$ ）后得到主观权重；基于20个已实施养护项目的历史数据，计算各指标的信息熵，得到客观权重，最终组合权重兼顾专家经验与数据客观性。

3.2.1 灰色模糊综合评价法

针对桥梁养护系统“信息不完全、评价标准模糊”的特点, 采用灰色模糊综合评价法进行多指标综合运算, 步骤如下: (1) 确定评价因子集 $U=\{u_1, u_2, \dots, u_{12}\}$, 评价等级集 $V=\{\text{优秀, 良好, 合格, 不合格}\}$; (2) 构建模糊评价矩阵 $R=[r_{ij}]$ (r_{ij} 为第 i 个指标属于第 j 个等级的隶属度); (3) 结合组合权重向量 ω , 计算综合评价向量 $B=\omega \times R$; (4) 根据最大隶属度原则确定评价等级, 若 $B=[0.35, 0.42, 0.18, 0.05]$, 则评价等级为“良好”。

3.2.2 智能评价方法的创新应用

机器学习预测模型, 以某地区 200 座混凝土梁式桥的养护数据为样本 (输入指标: 初始技术状况、养护措施类型、环境参数; 输出指标: 养护效果等级), 构建 BP 神经网络模型, 隐藏层节点数设 15, 学习率 0.01, 迭代 1000 次, 模型预测准确率达 89.7%, 可快速评估养护效果;

大数据驱动的退化规律挖掘, 基于物联网监测的 10 万条实时数据 (应力、变形、环境温湿度), 采用 K-means 聚类算法划分退化阶段, 通过关联规则挖掘发现“氯离子浓度 $>0.3\%$ + 荷载循环次数 $>10^6$ ”是裂缝复发的关键诱因, 为后评价提供数据支撑。

4 先进技术在预防养护后评价中的应用

4.1 物联网与传感技术: 实现全周期数据采集

通过在桥梁关键部位布设智能传感器网络, 实现养护前后结构状态的连续监测。结构监测时, 采用光纤光栅传感器监测主梁挠度 (测量精度 $\pm 0.01\text{mm}$)、应变 (精度 $\pm 1\mu\epsilon$), 腐蚀传感器实时监测钢筋锈蚀电流密度 (精度 $\pm 0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$)。环境监测时, 温湿度传感器 (测量范围 $-40^\circ\text{C} \sim 85^\circ\text{C}$, 精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$)、氯离子传感器 (测量范围 0~1%, 精度 $\pm 0.01\%$) 记录环境侵蚀参数; 数据传输, 采用 5G+LoRa 双模通信, 确保数据传输实时性 (延迟 $<1\text{s}$) 与稳定性, 构建“感知-传输-存储”一体化数据平台。某高速公路大桥应用该系统后, 养护后评价的数据支撑效率得到了大幅度提升。

4.2 计算机视觉与深度学习: 提升病害识别精度

基于无人机航拍与地面图像采集, 采用改进型 YOLOv8 算法实现桥梁表观病害的自动识别与量化, 采集的 5000 张桥梁图像进行增强 (亮度调整、噪声去除)、标注 (裂缝、剥落、露筋等病害) 数据预处理, 引入注意力机制 (CBAM) 提升小目标识别能力, 裂缝识别精度达 92.3%, 最小识别宽度 0.1mm, 养护前后病害面积的自动计算, 如某桥梁养护前裂缝总面积

12.6m², 养护后降至 2.1m², 技术性能提升率达 83.3%, 为后评价提供精准量化依据。

5 结论

本文针对混凝土梁式桥预防养护后评价“体系缺失、方法单一、技术滞后”的问题, 通过理论梳理、框架构建、技术融合, 形成了系统性的研究成果:

(1) 明确了预防养护与后评价的核心内涵, 揭示了混凝土梁式桥“氯离子侵蚀-钢筋锈蚀”“荷载疲劳-结构损伤”等典型退化路径, 构建了可靠性预测、生命周期成本分析、多准则决策三大理论模型支撑;

(2) 建立了“目标-准则-指标-方法-结果”五级后评价框架, 筛选 12 项关键指标, 提出 AHP-熵权法组合赋权与灰色模糊综合评价的量化方法, 提升了评价的科学性与可操作性;

(3) 整合物联网、计算机视觉、数字孪生等先进技术, 实现了数据采集、病害识别、效果仿真的智能化, 解决了传统后评价“数据不足、效率低下”的痛点;

(4) 提出了指标标准化、智能模型泛化、闭环管养模式等未来研究方向, 为桥梁管养的现代化转型提供了理论参考。

研究表明, 科学的后评价体系能有效量化预防养护的综合效益, 推动养护决策从“经验驱动”向“数据驱动”转变。未来需通过实地工程验证与标准推广, 进一步提升研究成果的实用性与普适性, 为我国混凝土梁式桥的安全耐久与可持续运营提供保障。

参考文献

- [1] 王巍, 张春霞, 乔国栋. 基于灰色模糊综合评判的桥梁预防养护后评估体系研究[J]. 公路, 2014, 59(01): 153-157.
- [2] Fang Y, Sun L. Developing A Semi-Markov Process Model for Bridge Deterioration Prediction in Shanghai[J]. 2019, 11(19): 5524.
- [3] Li L, et al. Deterioration Model for Reinforced Concrete Bridge Girders Based on Survival Analysis[J]. 2022, 10(23): 4436.
- [4] Petcherdchoo A. Probabilistic model for single and multiple action costs in maintaining both condition and safety of deteriorating reinforced concrete bridges[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 19, e02613:1-17.
- [5] Frangopol D M. Bridge life-cycle performance and cost: analysis, prediction, optimisation and decision-making[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2017, 13(10),

1239-1257.

- [6] 邓波. 南大梁高速桥梁预防性养护效果研究[J]. 运输经理世界, 2025, (15): 89-91.
- [7] 贾永新. 桥梁伸缩缝锚固区混凝土预防性养护施工工艺研究[J]. 北方交通, 2025, (05): 6-8+13.
- [8] 陈蚊文. 高速公路混凝土桥梁预防性养护加固措施研

究[J]. 运输经理世界, 2025, (10): 130-132.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS