

既有隧道结构病害整治效果评价与长效维护研究

袁博怀

中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075

DOI:10.61369/ETQM.2026070010

摘 要： 针对既有隧道结构病害整治效果评价与长效维护问题，构建系统化理论框架与实践路径。通过明确评价指标体系构建原则，分类梳理评价方法适用性，深入分析病害类型与整治技术关联性 & 施工质量与环境条件影响，建立基于模糊综合评判与层次分析法的多方法融合评价模型。在此基础上，设计维护周期与分级响应策略，构建结构性能退化预测模型及维护决策支持系统，形成评价与维护协同运行机制。研究成果为隧道工程全生命周期管理提供理论支撑，推动管养工作向精细化、智能化方向发展。

关 键 词： 隧道结构；病害整治；效果评价；长效维护；协同运行

Evaluation of Remediation Effects and Research on Long-term Maintenance of Existing Tunnel Structures

Yuan Bohuai

CCCC First Highway Consultants Co., Ltd. Xi'an, Shaanxi 710075

Abstract： Addressing the evaluation of remediation effectiveness and long-term maintenance of existing tunnel structures, this study constructs a systematic theoretical framework and practical path. By clarifying the principles for constructing the evaluation index system, classifying the applicability of evaluation methods, and deeply analyzing the correlation between defect types and remediation technologies as well as the influence of construction quality and environmental conditions, a multi-method integrated evaluation model based on fuzzy comprehensive evaluation and the Analytic Hierarchy Process (AHP) is established. On this basis, maintenance cycles and graded response strategies are designed, and a structural performance degradation prediction model and a maintenance decision support system are constructed to form a collaborative operation mechanism for evaluation and maintenance. Research results provide theoretical support for the full life-cycle management of tunnel engineering and promote the development of management and maintenance work towards refinement and intelligence.

Keywords： tunnel structure; disease treatment; effect evaluation; long-term maintenance; collaborative operation

引言

既有隧道长期处于运营状态时，会因荷载发生改变、材料出现劣化及环境影响渐渐显现出结构病害，所以整治工作成了保障运营安全非常关键的部分。当下的整治效果评价大多依靠经验来判断，缺少系统的理论引导，且评价和管理环节彼此分离，无法达成闭环运行。创建起科学合理的整治效果评价框架，并依此创建长效管理机制，已是隧道工程领域迫切须解决的重要任务。本文针对评价理论框架、影响因素分析、综合评价方法、长效管理机制以及协同运行体系实施系统阐述，目的在于给隧道结构全生命时段的养护提供理论依据和技术支持。

一、整治效果评价理论框架

（一）评价指标体系构建原则

整治效果评价要以评价指标体系为基础，该体系的形成需遵照科学与系统性原则。从科学性角度看，指标选取要依据结构力学特性以及病害发展规律，如此，评价结果才会客观体现整治工

程的真实成果。就系统性而言，指标应包含结构安全、使用功能、耐久性能以及经济性等诸多层面，进而合成层次清晰、逻辑严谨的有机整体^[1]。而且，这个指标体系还要具有可操作性与动态适应能力，利于现场收集数据，并且可以按照结构服役状况的改变实施动态调节。指标量化的明确性与可比性十分关键，唯有统一量纲并执行标准化处理，才有可能给后续的综合评价赋予可

作者简介：袁博怀（1991.08-），男，汉族，浙江省杭州市人，学历：本科，职称：中级，研究方向：土木工程隧道。邮箱 951583735@qq.com

靠的数据支撑。

（二）评价方法分类与适用性

评价方法的选择会直接影响到整治效果评判是否准确可靠，当前的方法大致可归为定性评价、定量评价和混合评价三类。定性评价大多依靠专家经验和工程类比，适合数据难以获取或者评价指标不好量化的情形，主观色彩比较浓。定量评价按照检测数据并做力学计算，结果比较客观，但是要有完善的检测系统。混合评价方法把前两者的优势结合起来，利用层次分析、模糊综合评判等方式来处理多源信息，很适合像隧道整治效果这样存在诸多因素相互交织的复杂系统。在实践时，应该依据整治工程的特性、数据的完整性及评价的目的恰当选取或把不同的方法整合，优化评价结果的科学性与可信度。

二、整治效果影响因素分析

（一）病害类型与整治技术关联性

不同病害类型对整治技术的适应性存在明显区别，这种关联性会直接左右整治的效果。衬砌裂缝、渗漏水、背后空洞以及结构变形这些典型的病害，它们产生的原因和力学机制有所不同，应对的技术涵盖注浆加固、粘贴复合加强材料、锚杆加固以及套衬补强等。如果技术选择和病害特点不相符，就有可能造成整治效果差或者引发二次病害。所以，要形成病害特征与整治技术之间的对应关系，清楚各类技术的作用原理和合适条件。在整治施工过程中，技术参数是否合理、工艺控制是否严格，都会影响到最终效果，在评定的时候应充分考虑。

（二）施工质量与环境条件影响

施工质量属于影响整治效果的关键要素，其波动情况与材料性能、施工工艺以及人员操作等众多因素存在联系。材料配比出现偏差、注浆压力调节失当、界面处理较为粗糙这些质量瑕疵，都会影响到整治结构的整体与耐久性。环境条件通过温度起伏、地下水侵蚀以及列车振动荷载等方式，不断施加影响于整治区域，促使结构性能逐步下降^[2]。特别是在复杂地质与运行状况下，环境因素的不确定给整治效果的长久稳定性带来考验。所以，在评定时要把施工质量验收数据和环境监测数据归入分析系统中，全方位了解影响整治效果的主要变量。

三、整治效果综合评价方法

（一）基于模糊综合评判的评价模型

整治效果包含诸多指标与层级，存在不少模糊性信息，这种情况下，模糊综合评判模型可以有效应对。模型首先要形成评价因素集和评语集，再通过隶属度函数把定性叙述转为成定量显示，达成不同指标信息的统一表现形式。按照单因素评判结果，并遵照权重向量执行综合计算，可以得出整治效果在各个评语等级之下的隶属度分布情况。在确定评价标准时，可参考国家相关技术规范，如《铁路隧道养护维修规则》（TG/GW 103-2022）中关于衬砌裂缝宽度、渗漏水程度等具体限值的规定，为指标量

化提供依据。整个模型的重点在于如何合理创建隶属度函数以及如何合理地选取合成算子，其中，隶属度函数要联系指标特点和工程经验来确定；合成算子则应当依据评价重点从加权平均型、主因素凸显型等多种类型当中挑选合适的那种，以此做到兼顾整体协调性与关键因素灵敏度的目的。

（二）基于层次分析法的权重确定

权重系数体现出各个评价指标对于整治效果贡献程度存在差别，层次分析法给多指标权重的确定带来一种系统的方法。此方法把评价目标层层拆解成准则层和指标层，通过创建两两比较的判断矩阵，让专家按照相对重要性来赋值。矩阵的一致性检查是保证权重合理的关键步骤，必须经过这个检查才能够计算出特征向量进而得出权重分配^[3]。在隧道整治效果评价当中，结构安全类指标常被给予较高权重，经济性、施工便捷性之类的指标权重则低一些。层次分析法把主观评判和逻辑校验融合起来，既能重视工程经验又可免除盲目性，给后续的综合评价赋予可靠的权重根基。

（三）多方法融合的评价机制

单一评价方法存在局限性，多方法融合能发挥各自优势，改善评价结果的稳定性。融合机制可采用串联或并联结构，串联结构把不同方法按序应用到评价流程当中，前面用层次分析法确定权重，后面用模糊综合评判做计算；并联结构则是同时运用大量方法独立评价，通过对比和整合得到综合结论。在数据不全或者评价边界不清的时候，融合机制可以采用灰色关联分析、可拓理论等方法加以补充验证。创建起模块化、可设置的评价框架，做到对各类整治工程类型较为灵活的适应，使评价过程具备更强的适应性和可靠性。

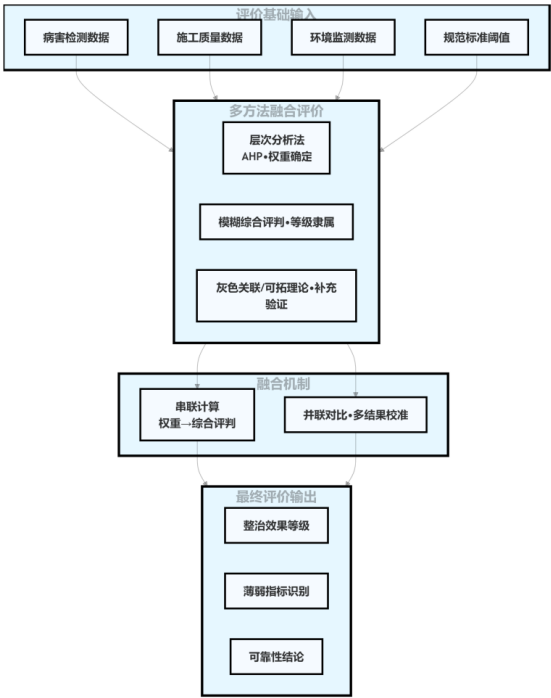


图3-1：多方法融合整治效果评价机制示意图

四、长效维护机制构建

（一）维护周期与分级响应策略

长效管理机制重点在于按照结构状态恰当确定管理时间与措施强度。管理期限要打破传统固定频率形式，转为依靠性能状态的条件激发形式，通过监测数据动态评定结构退化情况。分级反应策略遵照评定结果把结构状态划分成不同级别，并相应采用日常巡视检查、预防性管理、局部修补以及大修加固等不同的举措。当状态良好时主要依靠监测，一旦状态变差立即干预，防止病害加重。分级反应策略要有清晰的启动标准和负责人员，创建从状态判定到举措执行的管理循环，保证管理资源得到精确安排发挥最大效能。

（二）结构性能退化预测模型

结构性能退化预测是达成主动管理的技术根基，重点在于形成契合隧道服役特征的退化模型。创建该模型要综合考量诸多因素，如材料老化、荷载历时、环境腐蚀及整治干涉等，可选取经验模型、力学模型或者数据激发模型之类的形式。经验模型依靠大量长时间观察得来的数据执行回归分析得出，适宜用于同类型隧道宏观走向预测；力学模型依据损伤机理，能剖析出关键参数的作用规律；数据激发模型凭借机器学习算法，从检测数据里找出潜在的退化模式。实际操作时，可采取模型合成的办法，利用即时的检测数据持续调整模型参数，优化预测的准确度和时效性。

（三）维护决策支持系统设计

决策支持系统的长效维持机制得以落实，它起到关键的承载作用。其设计依据数据融合、模型激发以及决策可视化这三条原则。该系统包含数据采集层、信息处理层、模型分析层和决策输出层这样一些架构层级，可以达成从最初的检测数据向维持建议自动转变的效果^[4]。其中的数据采集层要整合诸如结构健康检测、日常巡视检查以及过往治理情况记录等多种来源的信息；信息处理层负责执行数据清理、特点获取和状态判断；模型分析层汇集包含性能衰退预测、维持策略优化等重要模型；而决策输出层则以直观可视的形式显现结构状态评价结论和维持计划提议。系统需具备自学习与自优化能力，伴随数据不断汇集，其决策的科学性会持续加强。

五、评价与维护协同运行

（一）评价结果向维护反馈路径

评价结果若能向管理环节给予有效反馈，则可打破评价与管理之间的壁垒。其反馈路径包含信息传递、问题定位以及策略适配三

个环节。信息传递要创建起标准化的评价报告格式，清楚地划定结构状态等级、主要影响指标以及整治效果较为薄弱之处。问题定位凭借评价结果的指标层分解，精确找出致使状态变差的关键要素。策略适配依据问题定位的情况，从管理策略库当中找到合适的技术手段。反馈机制重视时效性和循环性，评价完毕以后应当立即把结论推送给管理端，管理执行之后的效果评价要回馈到评价系统，从而形成起评价－管理－再评价这样一条完备的链路。

（二）动态调整与优化机制

隧道结构的服役环境和自身性能一直在变，所以其评价与管理体系要有动态调整的能力。动态调整机制表现在三个方面，即指标权重、评价阈值以及管理策略。指标权重要按照结构服役阶段的特点定期校正，比如在管理初期着重关注施工瑕疵的影响，在管理中后期重点放在材料劣化和疲劳效应上。评价阈值应当遵照结构性能的发展规律以及风险承受标准来动态修正，防止因固定阈值而产生误判。管理策略的优化依靠汇集的治理案例和成果数据，通过对比分析各种策略的经济性与有效性，不断更新策略库。这个机制使得评价和管理体系一直能与结构的实际状况契合。

（三）全生命周期管理集成框架

全生命时段运作融合框架把评价和管理放在同一个体系中，包含隧道从规划创建到管理管理，再到改造退役整个过程。这个框架以结构性能数据库为核心，整合设计参数、施工记录、历次整治情况及长期检测得到的数据，由此形成起牵涉全生命时段的数字资产^[5]。凭借此创建数据共享和业务协作的平台，让规划阶段的性能目标去引导管理策略的制订，并用管理执行的数据核查设计是否合理。框架还采用了性能基准线和风险警报机制，做到了从被动应对到积极防范的转变。通过全生命时段数据的连贯和业务的协同，大幅度地延长隧道的服务时间并减小全生命时段成本。

六、结语

本文就既有隧道结构病害整治效果评定与长效管理执行系统性探究。从评价理论框架出发，确定指标体系形成原则和评价方法类别，再细致分析影响整治效果的主要因素。通过创建结合模糊综合评判和层次分析法的多方法整合评价模型，做到了整治效果的科学评定。依此制定出涵盖管理期限分级、性能退化预测以及决策辅助系统的长效管理机制。且搭建起评价与管理相配合运作的体系，达成了从评价到管理再到动态优化的完整闭环。此研究成果能够给隧道结构全生命时段的养护提供理论依据，促使隧道管理工作朝着精准化、智能化不断前行。

参考文献

[1] 史超. 富水条件下隧道结构渗漏水治理技术浅析 [J]. 建筑与预算, 2025, (09): 46-48.
[2] 杨朝帅, 郑若泓, 李达强. 既有高速公路隧道衬砌裂缝处治技术研究 [J]. 低温建筑技术, 2024, 46(02): 153-158.
[3] 毕湘利. 上海轨道交通提升盾构隧道结构本质安全的创新实践 [J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(01): 1-5.
[4] 李林毅, 阳军生, 王立川, 等. 强降雨作用下高速铁路隧道仰拱隆起原因分析及整治 [J]. 现代隧道技术, 2021, 58(01): 27-36.
[5] 闫鑫. 基于事故树法的公路隧道结构养护分析 [J]. 交通世界, 2020, (32): 86-88.