

轨道交通桥梁隧道服役状态评估方法及指标体系研究

王 睿

重庆轨道交通运营有限公司 重庆 401120

摘 要：本文聚焦轨道交通桥梁隧道服役状态评估，阐述其理论基础，包括服役状态定义与评估原则。分析结构自身、环境及荷载等因素对服役状态的影响。研究常规检测、基于监测数据及综合评估等方法。构建评估指标体系，明确构建原则，选取安全、功能、耐久性维度指标，确定指标权重，对指标量化与标准化。旨在为轨道交通桥梁隧道的科学评估提供理论与方法支持，保障其运营安全与可靠。

关键词：轨道交通；桥梁隧道；服役状态评估；评估方法；指标体系

1 轨道交通桥梁隧道服役状态评估理论基础

1.1 服役状态定义

轨道交通桥梁隧道的服役状态是指其在投入运营后，在结构自身特性、外部环境作用及荷载长期影响下，所呈现的结构完整性、功能有效性及安全可靠性的综合表现。该状态涵盖结构几何形态、材料性能、力学响应及使用功能等多个维度，直接反映结构能否满足设计要求及运营安全标准^[1]。从结构完整性来看，包括构件是否存在裂缝、变形、腐蚀等损伤，连接部位是否牢固可靠；功能有效性体现为是否能保障轨道交通车辆安全平稳通行，满足设计时速、承载能力及通行效率等要求；安全可靠性的则涉及结构在正常及极限工况下抵御风险、避免事故的能力。服役状态具有动态变化特性，会随服役时间增长、环境侵蚀及荷载累积而逐渐演变，因此需通过持续评估把握其变化规律，为养护维修提供科学依据。

1.2 评估原则

轨道交通桥梁隧道服役状态评估需遵循科学性、系统性、实用性及动态性四大核心原则。科学性原则要求评估过程以力学、材料科学、结构工程等专业理论为支撑，采用经过实践验证的检测技术与分析方法，确保评估结果客观准确，避免主观臆断。系统性原则强调评估需覆盖结构全生命周期及全组成部分，不仅关注主体结构，还需兼顾附属设施，综合考量结构自身、环境及荷载等多方面因素，形成完整的评估体系。实用性原则聚焦评估成果的可操作性，评估指标需简洁明确，评估方法需经济高效，能够直接为养护决策提供清晰指引，便于工程技术人员实际应用。动态性原则体现为评估需适应结构服役状态的变化特性，定期开展评估并更新数据，结合结构损伤发展规律及运营条件变化，及时调整评估参数与标准，保障评估工作与结构实际状态始终匹配。

2 轨道交通桥梁隧道服役状态影响因素分析

2.1 结构自身因素

结构自身因素是决定轨道交通桥梁隧道服役状态的基础条件，主要包括设计质量、施工工艺及材料性能三方面。设计质量直接影响结构先天性能，合理的结构选型、截面设计及节点构造能提升结构抗荷载能力与耐久性，若设计中存在截面尺寸不足、受力模式不合理等问题，会导致结构在服役初期就存在安全隐患。施工工艺决定结构实际质量与设计意图的契合度，模板安装精度、混凝土浇筑振捣质量、钢结构焊接工艺及防水施工质量等，都会影响结构整体性与耐久性，如混凝土振捣不密实会产生内部空隙，加速钢筋锈蚀与结构开裂。材料性能是结构长期服役的保障，混凝土强度、钢筋抗拉强度、钢结构耐腐蚀性及防水材料抗渗性等，直接决定结构抵抗损伤的能力，材料性能衰减会导致结构承载力下降，如混凝土碳化会降低保护层碱性，引发钢筋锈蚀，进而影响结构稳定性。

2.2 环境因素

环境因素是导致轨道交通桥梁隧道服役状态劣化的重要外部条件，主要包括自然气候、地质条件及周边环境三类。自然气候因素中，温度变化会使结构产生热胀冷缩，反复循环易引发裂缝；降雨、湿度会加速混凝土碳化、钢筋锈蚀及钢结构腐蚀，沿海地区的氯离子还会加剧腐蚀速度；冻融循环会使混凝土内部水分结冰膨胀，导致表层剥落与内部开裂。地质条件方面，地基不均匀沉降会使结构产生附加应力，引发结构变形与裂缝；地震活动会对结构造成瞬时冲击，导致结构损伤甚至破坏；软土地基易发生固结沉降，影响结构稳定性。周边环境因素包括周边施工活动产生的振动与沉降，可能导致结构基础扰动；工业排放的腐蚀性气体与液体，会加剧结构材料腐蚀；地下水渗漏会软化地基，同时对结构

产生侵蚀, 这些因素共同作用加速结构服役状态劣化^[2]。

2.3 荷载因素

荷载因素是引发轨道交通桥梁隧道结构损伤与性能衰减的直接诱因, 主要分为恒载、活载及偶然荷载三类。恒载是结构长期承受的固定荷载, 包括结构自身重量、桥面铺装重量、附属设施重量等, 其大小与分布在设计阶段已确定, 但若施工过程中存在材料超耗、附属设施违规增加等情况, 会导致实际恒载超出设计值, 使结构长期处于超负荷状态, 引发持续变形与裂缝。活载是运营过程中变化的荷载, 核心为轨道交通车辆荷载, 包括列车重量、行驶速度及制动产生的附加力, 列车反复通行产生的疲劳荷载会使结构构件产生累积损伤, 行驶中的冲击荷载还会加剧局部结构受力; 此外, 桥面或隧道内的养护设备、临时堆放物等也属于活载范畴。偶然荷载虽发生概率低但危害极大, 包括地震荷载、洪水冲击荷载、车辆撞击荷载及极端风荷载等, 这类荷载易导致结构突发严重损伤, 甚至引发坍塌等重大事故。

3 轨道交通桥梁隧道服役状态评估方法研究

3.1 常规检测方法

常规检测方法是轨道交通桥梁隧道服役状态评估的基础手段, 通过直观检查与专项检测结合实现对结构状态的初步判断, 主要包括外观检查、无损检测及局部破损检测三类。外观检查由专业人员借助肉眼观察、卷尺、裂缝宽度仪等简易工具, 对结构表面裂缝、变形、腐蚀、剥落等损伤进行全面排查, 记录损伤位置、形态及发展程度, 该方法操作简便、成本低, 能快速掌握结构整体状态, 是评估工作的首要环节。无损检测技术包括超声波检测、回弹法、雷达探测等, 超声波检测可探测混凝土内部空洞、钢筋位置及焊缝质量; 回弹法用于检测混凝土强度; 雷达探测能穿透结构表层, 排查内部缺陷及防水层破损情况, 这类方法无需破坏结构, 可实现对结构内部性能的无损评估。局部破损检测针对关键部位采用钻芯取样、拉拔试验等方法, 直接获取材料强度、粘结性能等核心数据, 虽会对结构造成轻微损伤, 但数据精度高, 可作为无损检测结果的验证依据, 三种方法结合形成常规检测的完整体系。

3.2 基于监测数据的评估方法

基于监测数据的评估方法依托实时监测系统获取结构动态信息, 通过数据处理与分析实现对服役状态的精准评估, 是现代评估技术的核心发展方向。该方法首先需在结构关键部位布设传感器, 包括应变计、位移计、加速度传感器、腐蚀传感器等, 实时采集结构应力应变、位移变形、振动特性、材料腐蚀程度等数据, 数据

传输采用无线或有线方式, 确保信息实时性与稳定性。数据处理阶段需通过滤波、降噪等技术剔除干扰信号, 保障数据准确性; 随后采用数据分析方法, 包括趋势分析、突变检测、模态分析等, 趋势分析可掌握结构性能长期衰减规律, 突变检测能及时发现异常损伤, 模态分析通过识别结构固有频率变化判断损伤程度。该方法能实现对结构状态的实时监控与动态评估, 及时预警潜在风险, 相比常规检测更具时效性与连续性, 为结构养护提供精准的数据支撑。

3.3 综合评估方法

综合评估方法融合多种评估手段与数据来源, 通过系统整合实现对轨道交通桥梁隧道服役状态的全面精准评估, 适用于复杂工况下的结构评估需求。该方法以常规检测数据、实时监测数据为基础, 同时整合结构设计资料、施工记录、养护历史、环境监测数据等多方面信息, 构建完整的评估数据体系, 避免单一数据来源的局限性^[3]。评估过程中采用层次分析、模糊综合评价、神经网络等数学模型, 层次分析用于梳理各影响因素的层级关系, 确定权重分配; 模糊综合评价能有效处理评估中的模糊性问题, 对结构状态进行多维度评分; 神经网络通过模拟人脑分析过程, 实现对复杂数据的深度挖掘与状态预测。综合评估方法不仅关注结构当前状态, 还结合历史数据预测未来性能演变趋势, 综合考量安全、功能、耐久性等多项目标, 最终形成全面的评估结论, 为养护维修方案制定提供科学依据, 提升结构运营安全保障水平。

4 轨道交通桥梁隧道服役状态评估指标体系构建

4.1 指标体系构建原则

轨道交通桥梁隧道服役状态评估指标体系构建需遵循针对性、全面性、可操作性及稳定性四大原则, 确保指标体系科学合理且符合实际应用需求。针对性原则要求指标紧扣结构服役状态核心要素, 针对桥梁与隧道的不同结构特性分别设计指标, 如桥梁需重点关注梁体挠度、支座性能等指标, 隧道需突出衬砌裂缝、围岩稳定性等指标, 避免指标泛化。全面性原则强调指标需覆盖结构安全、功能、耐久性三大核心维度, 安全维度包括承载能力、抗灾性能等指标, 功能维度涵盖通行效率、附属设施完好性等指标, 耐久性维度涉及材料老化、腐蚀程度等指标, 形成完整的评估框架。可操作性原则要求指标选取需结合现有检测技术, 确保指标数据可通过常规检测或监测手段获取, 指标定义清晰明确, 便于量化分析。稳定性原则体现为指标体系需在一定时期内保持稳定, 同时预留调整空间, 可根据技术发展与运营条

件变化优化指标,保障评估工作的连续性与适应性。

4.2 评估指标的选取

评估指标的选取需以构建原则为指导,结合轨道交通桥梁隧道结构特性与服役需求,从安全、功能、耐久性三个核心维度系统筛选。安全维度选取承载能力、结构变形、抗灾性能等关键指标,承载能力通过结构应力应变检测结果反映,结构变形包括梁体挠度、隧道衬砌沉降等具体指标,抗灾性能针对地震、洪水等灾害设计抗倾覆、抗冲刷等指标。功能维度选取通行平顺性、附属设施完好率、通行效率等指标,通行平顺性通过轨道平顺度、结构振动幅度衡量,附属设施完好率涵盖伸缩缝、防水层、照明系统等设施的完好程度,通行效率结合列车通过速度、延误情况等数据确定。耐久性维度选取材料老化程度、腐蚀速率、裂缝发展速度等指标,材料老化程度针对混凝土碳化深度、钢结构锈蚀程度检测,腐蚀速率通过长期监测数据获取,裂缝发展速度结合不同时期检测的裂缝宽度变化确定,各维度指标相互补充,全面反映结构服役状态。

4.3 指标权重的确定

指标权重的确定作为评估指标体系构建中至关重要的一环,对评估结果的科学性与准确性起着决定性作用。为达成权重合理分配,需采用主观与客观相结合的综合性方法。主观权重确定方面,选用德尔菲法。精心邀请结构工程、轨道交通、检测评估等多个相关领域的权威专家,依据各指标对轨道交通桥梁隧道服役状态的影响程度进行细致打分。经过多轮严谨的意见征询与全面汇总,逐步形成在专家共识基础上的主观权重。此方法能够充分汲取专业经验,将专家们长期积累的实践智慧融入评估体系,使权重设定更贴合工程实际需求。客观权重确定则采用熵权法、主成分分析法等。熵权法通过深入分析指标数据的信息熵来计算权重,数据离散程度越大,信息熵越小,相应权重也就越高;主成分分析法通过提取数据的主成分,依据主成分贡献率确定权重,这类方法紧密依托实际数据特性,有效避免了主观因素的干扰。最后运用组合权重法,将主观权重与客观权重按照合理比例进行融合,例如采用加权平均法确定最终权重,如此既能兼顾专家经验,又有坚实的数据支撑,确保权重分配既符合工程实际状况,又具备量化依

据,进而大幅提升评估结果的可信度。

4.4 评估指标的量化与标准化

评估指标的量化与标准化是实现指标可比与综合评估的基础,需针对不同类型指标采用差异化处理方法,确保数据格式统一与评估公平。指标量化分为直接量化与间接量化,直接量化指标包括承载能力、裂缝宽度、沉降量等,可通过检测仪器直接获取具体数值,如采用压力试验机检测混凝土强度,采用位移计测量沉降量;间接量化指标包括结构外观等级、附属设施完好性等,通过建立分级标准,将定性描述转化为定量分值,如将结构外观分为优良、合格、不合格三级,对应赋予不同分值^[4]。标准化处理采用极差法、标准差法等,消除指标量纲与数量级差异,极差法通过计算指标实际值与极值的比值实现标准化,适用于数据分布稳定的指标;标准差法通过计算指标标准化得分,反映数据相对离散程度,适用于动态变化的指标。标准化后的数据取值范围统一,可直接用于综合评估计算,确保不同指标间具备可比性,提升评估结果的准确性与合理性。

结束语

轨道交通桥梁隧道服役状态评估意义重大,关乎轨道交通运营安全与稳定。本文从理论基础、影响因素、评估方法到指标体系构建,进行了系统研究。然而,轨道交通发展迅速,服役状态评估面临新挑战。未来需持续优化评估方法,紧跟技术发展,完善指标体系,提升评估的精准性与时效性。同时,加强跨学科研究,推动评估技术智能化,为轨道交通桥梁隧道长期安全服役提供坚实保障。

参考文献

- [1]周珣.朱铝芬.韩雪.等.基于云计算的轨道交通设备运维管理系统的研究与设计[J].交通世界,2021(S2):259-261.
- [2]董岳.基于“智慧地铁”的城市轨道交通智能运维模式创新研究[J].城市轨道交通研究,2022,25(3):240-241.
- [3]许苇.城市轨道交通运营服务标准实施效果评价指标体系研究[J].隧道与轨道交通,2021,(04):11-13+54.
- [4]陈征.城市轨道交通运营管理评价指标体系分析[J].大众标准化,2021,(05):145-147.