

# 城市交通荷载下桥梁结构长期性能监测与评估

罗亚东

江西安基建设工程有限公司，江西南昌，330000；

**摘要：**城市化进程推动城市交通流量激增，重载车辆占比不断上升，桥梁作为交通网络核心，其长期性能直接影响通行安全与城市运行效率。长期承受复杂交通荷载后，桥梁易出现材料劣化、构件损伤等问题，且损伤累积具有隐蔽性与渐进性，传统定期检测已无法满足精细化管理需求。本文针对城市交通荷载特性，研究桥梁结构长期性能的监测技术与评估方法。通过分析交通荷载与桥梁响应的耦合关系，构建多源数据融合监测框架，实现结构参数的实时捕捉；基于监测数据建立适配模型，精准识别性能衰减规律与风险，为桥梁全生命周期养护提供科学依据。

**关键词：**城市交通荷载；桥梁结构；长期性能；性能监测；评估方法

**DOI：**10.64216/3104-9664.25.02.039

## 引言

桥梁是城市交通的关键组成部分，承担日常通勤与物资运输功能，其结构稳定性是城市运转的基础。我国城市规模扩大使机动车保有量持续增加，交通荷载呈现大流量、重荷载、高频次特征，加重了桥梁受力负担。早期建成桥梁因设计标准低、服役时间长，在长期交通荷载作用下性能逐渐衰减，裂缝、沉降等病害频发，威胁通行安全。传统检测依赖人工巡检与周期试验，存在周期长、成本高的问题，难以实现损伤早期预警与全程追踪。

## 1 城市交通荷载特性与桥梁结构作用机制

### 1.1 交通荷载时空分布特征

城市交通荷载的时空分布受多种因素影响，呈现出明显的不均衡性。不同城市功能区的桥梁，其承载的交通荷载特性差异显著。商业区周边桥梁在工作日白天时段，交通流量集中，以小型客运车辆为主；工业区附近桥梁则常年有大量货运车辆通行，荷载强度相对较高。从时间维度来看，早晚通勤高峰时段，桥梁承受的荷载频率大幅增加，车辆密集通行易产生连续的荷载冲击；平峰时段交通流量减少，荷载强度与频率均有所下降。这种时空分布差异会导致桥梁结构不同部位的受力状态不断变化，荷载脉冲效应与累积作用交替影响，对桥梁结构的长期性能产生复杂影响。

### 1.2 交通荷载类型与力学特征

城市交通中各类车辆的荷载特性与力学作用存在明显区别，需针对性开展分析。客运车辆以小型轿车、

公交车为主，轴重相对较轻，荷载分布较为均匀，对桥梁的作用以高频次、小幅值的反复荷载为主。货运车辆尤其是重载货车、集装箱车辆，轴重较大且分布不均，部分超载车辆的轴重甚至远超设计标准，会对桥梁结构产生强烈的局部应力作用。在交通拥堵场景下，车辆频繁启停会产生瞬时冲击荷载，这种荷载的幅值突然增大，易引发桥梁结构的振动响应。瞬时荷载与长期累积荷载的力学作用机制不同，前者可能导致结构出现突发性损伤，后者则会加速材料疲劳与性能衰减，明确这些特征对后续监测与评估工作至关重要。

### 1.3 荷载与桥梁耦合作用机理

交通荷载与桥梁结构的耦合作用是引发结构损伤的核心因素，需基于结构动力学理论深入探讨。当交通荷载的作用频率与桥梁结构的自振频率接近时，易发生共振现象，此时桥梁的振动幅值会显著增大，大幅提升结构的受力负担。荷载作用的幅值大小直接决定了结构内部应力的峰值，幅值越大，结构出现塑性变形与裂缝的风险越高。不同类型的桥梁结构，其自振特性存在差异，与交通荷载的匹配关系也各不相同。简支梁桥与连续梁桥在相同荷载作用下，响应规律就存在明显区别。

## 2 桥梁结构长期性能监测技术体系构建

### 2.1 监测指标筛选与确定

监测指标体系的科学性直接决定监测结果的有效性，需结合桥梁结构特点合理筛选。力学指标能够直观反映桥梁的受力状态，位移指标可体现桥梁整体的变形情况，通过监测关键截面的位移变化，能及时发现结构的异常沉降或挠度；应变指标则聚焦于构件局部的应力

分布,是判断构件是否处于安全状态的核心依据;振动频率指标可间接反映结构刚度的变化,刚度下降往往是结构损伤的早期信号。耐久性指标关注材料性能的劣化过程,混凝土碳化深度直接影响钢筋的保护效果,碳化深度增加会加速钢筋锈蚀;钢筋锈蚀率则直接反映钢筋的损伤程度,这些指标共同构成全面的监测体系,确保不遗漏关键性能信息。

## 2.2 监测数据采集与传输

多源监测数据的高效采集与稳定传输是实现长期性能监测的技术保障。传感网络技术的发展为数据采集提供了多样化手段,光纤传感技术具有精度高、抗干扰能力强的特点,适用于应变、温度等指标的长期监测;压电传感技术响应速度快,在冲击荷载监测中表现优异。将多种传感手段整合应用,可实现优势互补,提升数据采集的整体质量。数据传输采用无线与有线相结合的方式,有线传输在桥梁主体结构部分应用,具有稳定性高、传输速率快的优势;无线传输则用于难以铺设线路的部位,灵活性强。这种混合传输网络能够保障监测数据在复杂环境下,依然可以及时、准确地传输至数据中心。

## 2.3 监测数据预处理与融合

监测数据在采集与传输过程中,易受外界干扰产生噪声与异常值,必须经过预处理才能用于后续分析。滤波技术是常用的去噪手段,通过设置合理的滤波参数,可有效剔除高频噪声,保留数据中的有效信息;平滑处理则能修正数据的微小波动,使数据变化趋势更加清晰。对于多源监测数据,单一数据源的信息存在局限性,数据融合技术能够将不同来源、不同类型的数据进行整合分析。通过建立数据融合模型,可综合各方面信息,弥补单一数据的不足,实现对桥梁结构性能状态的全面感知。经过预处理与融合后的监测数据,准确性与可靠性大幅提升,为后续的性能评估提供高质量的数据支撑。

# 3 基于监测数据的桥梁结构性能评估模型

## 3.1 结构性能衰减规律量化

长期监测数据是分析桥梁结构性能衰减规律的核心依据,通过对这些数据的深入挖掘,可实现衰减规律的量化表达。基于时间序列分析方法,将监测指标数据与时间变量建立关联,构建结构性能指标的演化模型。该模型能够清晰呈现性能指标随服役时间的变化趋势,进而计算出性能衰减速率。不同桥梁结构的性能衰减情况存在差异,这与结构材料特性密切相关,混凝土强度、钢筋韧性等都会影响衰减速度。同时,结构的受力状态

也起到关键作用,长期处于高应力状态的部位,衰减速率明显更快。明确性能衰减的关键影响因素,能够为预测结构未来性能变化提供可靠依据,使评估结果更具针对性。

## 3.2 多维度评估指标体系建立

桥梁结构性能评估需从多个维度展开,才能全面反映结构的实际状态。承载能力是核心评估维度,直接关系到桥梁的通行安全,涵盖结构的强度、刚度等关键指标;耐久性维度关注结构在长期使用过程中抵抗环境侵蚀的能力,决定了桥梁的服役寿命;适用性维度则聚焦于桥梁满足正常使用要求的程度,包括行车舒适性、结构变形控制等方面。层次分析法是确定各指标权重的有效方法,通过建立层次结构模型,结合专家意见与实际工程经验,对各指标的重要程度进行量化。结合城市桥梁的服役需求与运营特点,制定符合实际场景的性能等级划分标准,使评估结果更贴合工程应用需求。

## 3.3 动态评估模型构建与验证

动态评估模型能够实现对桥梁结构性能的实时评估与预测,融合机器学习算法与结构力学理论是模型构建的关键思路。结构力学理论为模型提供了坚实的理论基础,明确了结构受力与性能之间的内在关系;机器学习算法则具备强大的数据处理与模式识别能力,能够从大量监测数据中挖掘潜在规律。基于实时监测数据,模型可动态更新评估结果,及时反映结构性能的变化情况。模型建立后,需要通过历史数据回溯进行验证,将模型的预测结果与历史实际性能状态进行对比分析。通过调整模型参数,不断优化模型性能,确保模型的准确性与可靠性,为实际工程应用提供有力支持。

# 4 桥梁结构长期性能的影响因素与调控路径

## 4.1 交通荷载影响因素敏感性分析

交通荷载相关因素对桥梁结构性能的影响程度不同,敏感性分析可明确各因素的重要性。控制变量法是开展敏感性分析的常用方法,在分析某一因素影响时,保持其他因素不变,仅改变目标因素的取值,观察结构性能指标的变化幅度。荷载强度的增加会直接导致结构应力水平上升,对性能的影响最为显著;荷载频率的提高会加速材料疲劳过程,使性能衰减速度加快;车辆行驶速度的变化会影响荷载作用的持续时间与冲击效应,进而对结构性能产生影响。通过敏感性分析,可确定各影响因素的敏感阈值,当因素取值超过阈值时,结构性能会出现明显下降,这为制定交通荷载调控措施提供了

明确依据。

#### 4.2 环境耦合因素作用分析

桥梁结构长期处于自然环境中，环境因素与交通荷载的耦合作用会加剧结构性能衰减。温度变化会使桥梁结构产生热胀冷缩变形，当变形受到约束时，会产生温度应力，与交通荷载产生的应力叠加后，易导致结构出现裂缝；湿度环境会影响混凝土的物理力学性能，使混凝土强度下降，同时为钢筋锈蚀提供了条件；酸雨侵蚀会加速混凝土碳化与钢筋锈蚀的进程，破坏结构的保护层。这些环境因素并非单独作用，而是与交通荷载相互影响，形成耦合效应。多因素耦合作用下，结构损伤的演化路径更加复杂，损伤发展速度也明显加快，明确这一规律对制定全面的防护策略至关重要。

#### 4.3 性能提升调控策略制定

基于影响因素分析结果，从多个层面制定调控策略，可有效提升桥梁结构性能。交通管制层面，通过设置限重、限速标志，控制重载车辆通行数量与行驶速度，减少不利交通荷载对桥梁的作用；结构加固层面，针对性能衰减严重的部位，采用粘贴碳纤维布、增大截面等加固技术，提升结构的承载能力与耐久性；养护维修层面，建立定期养护制度，及时修复结构出现的微小损伤，防止损伤进一步发展。不同性能状态的桥梁，其调控需求存在差异。

### 5 桥梁结构长期性能监测与评估的应用体系

#### 5.1 信息管理平台构建

监测与评估信息管理平台是实现桥梁结构精细化管理的重要载体，需整合多方面功能。平台应具备数据采集功能，能够自动接收来自各类传感器的监测数据；数据处理功能，对采集到的数据进行实时预处理与融合分析；评估功能，调用建立的评估模型，自动完成结构性能评估。数据可视化展示是平台的重要特点，通过图表、曲线等形式，直观呈现监测数据与评估结果，便于管理人员快速掌握结构状态。同时，平台还需具备数据查询、报表生成、预警提示等实用功能。

#### 5.2 结构性能预警机制建立

结构性能预警机制能够实现对桥梁安全风险的及时防控，为养护决策提供时间保障。预警阈值的设定是建立预警机制的核心，需基于大量的监测数据与评估结果，结合桥梁的设计标准与服役要求，划分不同的预警

等级，如一级预警、二级预警等，各级预警对应不同的阈值范围。当监测指标达到某一预警等级的阈值时，系统会自动触发相应的预警信号。预警信号可通过短信、平台弹窗等多种方式传递给相关管理人员，确保信息能够及时送达。管理人员接到预警信号后，可迅速组织现场核查，制定应对措施，避免安全事故的发生，保障桥梁的安全运行。

#### 5.3 全生命周期养护决策支持体系

全生命周期养护决策支持体系能够实现桥梁养护的科学化与精细化，提升养护工作的效果。该体系以长期监测与评估结果为核心依据，综合考虑桥梁的服役年限、结构类型、性能状态等多种因素。通过分析结构性能的演化趋势，预测不同养护方案下结构的性能变化情况。在制定养护计划时，不仅要保障结构的安全性，还要兼顾经济性，优化养护资源的配置。对于服役早期性能良好的桥梁，以日常养护为主；对于服役中期性能开始衰减的桥梁，增加定期检测与预防性养护；对于服役后期性能较差的桥梁，重点安排加固维修或改造工程。

### 6 结论

本文围绕城市交通荷载下桥梁结构长期性能监测与评估展开系统研究，得出以下主要结论。城市交通荷载具有显著的时空分布差异与复杂的力学特征，其与桥梁结构的耦合作用是引发结构性能衰减的核心因素，荷载强度与频率对性能的影响最为敏感。构建的多源数据融合监测体系，整合了多种传感与传输技术，经过预处理后的监测数据能够精准反映结构状态，为后续评估提供可靠支撑。

#### 参考文献

- [1] 赖济华. 汽车荷载作用下城市桥梁振动响应研究[D]. 广东工业大学, 2020.
- [2] 左栋梁. 基于车致振动响应的城市轨道交通桥梁损伤诊断方法研究[D]. 大连交通大学, 2019.
- [3] 高洪. 基于静载试验的城市轨道交通桥梁安全评价[J]. 工程地球物理学报, 2013, 10(02): 268-270.
- [4] 李慧华, 李靖. 地震作用下城市轨道交通桥梁整体损伤评估方法[J]. 中国科技信息, 2024, (22): 68-71.
- [5] 陈鹏涛, 漆泰岳, 梁孝, 等. 城市轨道交通列车轮轨垂向力测量方法[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(03): 81-86.