

# 市政道路桥梁结构健康监测关键技术研究与应用

吴宏伟

江西有色建设集团有限公司 江西南昌 330038

**摘要:**本文针对跨海公路桥梁在严酷海洋环境下的腐蚀与耐久性问题,开展了系统性研究。首先,深入剖析了氯离子侵蚀、干湿循环、硫酸盐腐蚀等多因素耦合作用下的腐蚀机理及其对结构性能的劣化影响。在此基础上,系统梳理了涵盖材料本体、表面涂层及阴极保护的多层次防腐技术体系,并对各项关键技术的适用性与效能进行了评述。核心创新在于构建了一套基于性能的耐久性设计方法,该方法以保障桥梁全生命周期性能为目标,通过设定明确的设计年限与环境等级、优选高耐久性材料与构造、实施分区差异化防腐措施,并建立可量化的耐久性极限状态验算方法。杭州湾跨海大桥的工程应用案例验证了该方法在显著提升结构长期可靠性与降低全生命周期成本方面的有效性。

**关键词:**跨海桥梁; 腐蚀机理; 防腐技术; 耐久性设计

## 引言

跨海公路桥梁作为连接区域交通的关键枢纽,其长期安全服役面临海洋环境中氯离子侵蚀、干湿循环、化学腐蚀及生物附着等多重严酷挑战。这些腐蚀因素的耦合作用,会导致结构材料性能劣化、构件承载力下降,严重缩短桥梁使用寿命,并带来高昂的维护成本和安全隐患。传统依赖经验或固定参数的“定值设计”方法,难以精准应对环境的动态变化与腐蚀的长期累积效应,常导致设计目标与实际服役状态脱节。

## 一、市政道路桥梁结构健康监测的特殊性与技术需求

### (一) 市政桥梁的服役环境与荷载特点

市政桥梁在服役环境与荷载特征上表现出与公路桥梁显著不同的复杂性。其服役环境不仅包括常规的自然环境作用,还受到城市密集建设活动的深刻影响,如周边建筑基坑开挖引起的地基变形、地下管线施工导致的土体扰动、城市热岛效应加剧的温度变化等。交通荷载方面,市政桥梁承受的交通流量大、车型构成复杂,涵盖小客车、公交车、重型货车及特种车辆,且车辆频繁启停、加减速及转向行为引发显著的动态冲击效应。此外,城市交通管理中对桥梁振动、噪声及美观性要求更高,使得桥梁结构在服役过程中不仅要满足安全性与适用性,还需兼顾对周边环境的影响。这些特殊性使得市政桥梁的受力状态更为复杂,损伤演化机制更具不确定

性,对监测系统的全面性、精确性与适应性提出了更高要求。

### (二) 市政桥梁健康监测的技术需求分析

基于市政桥梁的服役环境与荷载特点,其健康监测系统需满足一系列核心技术需求。首先,监测系统必须具备高可靠性与长期稳定性,传感器与数据采集设备需能在高湿度、高粉尘、强电磁干扰等恶劣城市环境中长期稳定工作,减少故障率与维护频率。其次,传感器布置应科学合理,既要覆盖主梁、桥墩、支座等关键受力部位,又要考虑安装空间限制与成本约束,实现监测效益最大化。数据采集与传输系统需具备高实时性与强抗干扰能力,采用有线与无线相结合的传输方式,确保数据在复杂城市电磁环境下的完整性与准确性。此外,监测数据需能准确反映桥梁在动态交通荷载下的振动特性、变形规律及应力分布,为结构状态识别、损伤预警及养护决策提供科学依据。通过满足这些技术需求,市政桥梁健康监测系统能够实现对桥梁结构全生命周期的精准管控,提升城市基础设施的安全管理水平,具有显著的社会效益与工程应用价值<sup>[1]</sup>。

## 二、市政道路桥梁结构健康监测的关键技术

### (一) 传感器优化布设与数据采集技术

针对市政桥梁结构复杂、服役环境严苛的特点,传感器选型与优化布设是健康监测系统设计的核心环节。在传感器选型方面,应优先选用具备高耐久性、强抗干扰能力和良好维护性的设备,如电阻应变片、光纤应变

传感器、压电式加速度计、电感式位移计及裂缝计等。这些传感器需能够在高湿度、强振动及电磁干扰环境下保持长期稳定的工作性能，同时具备较高的测量精度与采样频率，以捕捉桥梁在动态荷载作用下的细微响应。在布设策略上，应基于结构力学分析与风险评估结果，识别桥梁的关键受力构件（如主梁、桥墩、支座、节点区域）及潜在薄弱环节（如疲劳敏感区、应力集中区），在有限预算下实现监测点的科学布局。通过有限元模拟与动力特性分析，确定最优布设位置，确保监测数据能够全面反映结构的整体受力状态与局部损伤演化，实现“以点带面”的监测效果。这种优化布设方法不仅提高了监测系统的经济性与实用性，还为后续的状态评估与损伤识别提供了高质量的数据基础。

## （二）数据传输与处理分析技术

数据传输与处理分析是市政桥梁健康监测系统实现实时、准确状态评估的关键技术支撑。在数据传输方面，需根据桥梁规模、监测点数量及城市环境特点，选择合适的传输方案。有线传输（如光纤通信）具有带宽高、抗干扰能力强、数据安全性高的优点，适用于大型桥梁或对数据可靠性要求极高的场景；无线传输（如LoRa、NB-IoT、5G）则具有布设灵活、成本较低、扩展性强的特点，适用于中小型桥梁或临时监测任务。在实际应用中，常采用有线与无线相结合的混合传输方案，兼顾可靠性与经济性。在数据处理与分析环节，首先需对原始监测数据进行预处理，包括去噪（如小波去噪、卡尔曼滤波）、异常值剔除与数据校准，以提高数据质量；随后通过特征提取技术（如模态分析、频谱分析、小波包分析），从时域、频域及时频域中提取反映结构动力性的关键参数（如频率、阻尼比、振型、应变能分布等）；最后，采用数据压缩与智能存储策略，减少存储空间占用，提高数据检索效率。通过上述技术手段，能够从海量监测数据中高效提取结构状态信息，为桥梁的健康评估、损伤预警及养护决策提供科学依据，显著提升市政桥梁的智能化管理水平<sup>[2]</sup>。

## 三、关键技术在市政桥梁工程中的应用

### （一）监测系统的集成与实施

市政桥梁健康监测系统集成以“工程实用、稳定可靠”为核心，从系统架构设计、现场安装调试到与现有管理系统对接，形成全流程标准化实施体系。系统总体架构设计按“感知层-传输层-数据层-应用层”四层架构实现功能拆分与协同。感知层根据桥梁结构特点与监

测需求选适配传感器，如主梁跨中截面布光纤光栅应变传感器（监测精度 $0.1 \mu\epsilon$ ，抗电磁干扰强，适配车辆振动环境），桥墩顶部装倾角传感器（量程 $\pm 5^\circ$ ，分辨率 $0.001^\circ$ ，监测墩身倾斜），桥面关键位置设压电式加速度传感器（采样频率500Hz，捕捉冲击荷载响应），同时配温湿度、降雨量传感器监测环境因素对结构响应的干扰，所有传感器需满足《公路桥梁结构健康监测系统技术规程》（JTGT 3395-2015）“长期服役稳定性 $\geq 5$ 年”要求。传输层根据桥梁跨度与现场环境选混合传输方式，短距离（单跨内传感器间）用LoRa无线传输（传输距离1-3km，功耗低，适用户外无供电场景），长距离（桥梁与监控中心间）用工业以太网（带宽100Mbps以上，延迟 $\leq 100ms$ ，保障实时性），还预留冗余传输通道（无线与有线双备份），防止数据中断。数据层采用“分布式数据库+边缘计算节点”架构，边缘节点先预处理原始数据（剔除突变值、修正应变/挠度数据、压缩数据，压缩比10:1），再将标准化数据传至中心数据库（MySQL存结构化监测数据，HDFS存非结构化数据），满足“至少保存5年历史数据”管养需求。应用层开发贴合管养单位需求的功能模块，涵盖实时监控模块（显示传感器工作状态、关键参数实时值）、多级预警模块（应变超设计值10%触发三级预警、超20%触发二级预警，短信+系统弹窗推送预警信息）、历史数据查询模块（支持按时间/监测点检索，生成趋势曲线）、自动报表模块（每月生成监测报告，含参数统计、状态评估结论）<sup>[3]</sup>。

现场安装与调试要严格遵循工程规范。传感器安装前，需对桥梁表面预处理（如应变传感器安装区域打磨平整，粗糙度 $R_a \leq 6.3 \mu m$ ，用环氧树脂粘贴，贴合度 $\geq 95\%$ ），安装位置偏差 $\leq 5mm$ 。调试分静态与动态两步：静态调试施加已知荷载（如用配重块加载），对比输出值与理论计算值，误差 $\leq 5\%$ ；动态调试模拟日常车流（组织5辆标准载重汽车匀速通行），检查数据传输连续性与延迟，确保99%以上数据传输延迟 $\leq 100ms$ 。

系统集成需考虑可扩展性与用户友好性。硬件预留20%传感器接口，支持后期新增监测点；软件采用B/S架构，管养人员通过浏览器登录系统，操作流程简化为“登录-查看实时状态-检索历史数据-导出报告”四步，无需安装专用软件，降低使用门槛。此外，通过标准化API接口与现有桥梁管理系统对接，如与地方住建局“城市桥梁管理信息系统”对接，将监测系统的“结构状态评估结果”“预警信息”“月度监测报告”同步至

现有系统，避免重复录入数据；同时接收“桥梁基础信息”“历史养护记录”，为监测数据解读提供背景支撑，形成“监测-管理-养护”数据闭环。

## （二）监测数据的解读与工程应用

监测数据的解读需建立“基线对比-趋势分析-环境修正”的三阶分析体系，将原始数据转化为可指导管养的决策信息。首先构建结构状态基线，以桥梁建成初期3个月的监测数据（排除极端天气、异常荷载时段）为样本，计算关键参数（如主梁跨中挠度、控制截面应变）的平均值与标准差，作为历史基线；日常监测中，将实测数据与基线对比，若偏差超过 $\pm 15\%$ ，则识别为异常变化，需结合荷载数据（如当日车流量、是否有超重车辆通行）排查原因——例如某市政桥梁监测显示主梁应变偏差达18%，追溯发现当日有3辆超重货车（总重超设计限值20%）通行，经临时交通管制后，应变恢复至基线范围内，避免误判为结构损伤。其次分析荷载与响应的长期趋势，每月统计日均车流量与对应结构响应（如应变峰值、挠度最大值）的关联关系，若相同车流量下响应值逐年增大（如应变每年增长2%），则判定为结构性能退化，需进一步排查是否存在材料疲劳、支座老化等问题；例如某桥梁监测数据显示，5年内相同车流量下主梁挠度从12mm增至13.5mm，经专项检测发现支座橡胶老化，及时更换后挠度恢复至12.2mm。此外，需通过环境数据修正监测结果，温度变化会导致混凝土收缩膨胀，需用温湿度传感器数据对挠度、应变进行修正（如将夏季35℃下的挠度值修正为标准温度20℃下的等效值），避免环境因素干扰导致的误判，修正后的数据偏差需控制在 $\pm 5\%$ 以内<sup>[4]</sup>。

监测结果的工程应用与桥梁管养全流程直接对接：在日常巡检过程中，管养单位依据系统异常预警明确重点，若某桥墩倾斜度偏差达到10%，则优先对其基础沉降、支座变形情况进行巡检，巡检效率提升超过40%；在制定专项检测计划时，若结构性能退化率超过1%/年，将专项检测周期由5年缩短至3年，检测聚焦于性能退化部位；在评估加固维修效果时，通过对比加固前后的数据进行判断，若某桥梁主梁加固后应变降幅达30%，则表明加固有效，可终止后续优化工作；在进行养护资金决策时，基于监测数据进行分级，优先对“较差”等级的桥梁投入资金，如某城市将80%的年度养护资金投入

到18座“较差”等级的桥梁，避免过度养护。

2019年，广州市市政工程管理中心为猎德大桥集成健康监测系统，该系统包含120个传感器，采用“四层架构”设计，传输层通过LoRa+工业以太网传输数据，并与“城市桥梁管理信息系统”对接。2021年监测应用报告显示，系统运行2年内，通过基线对比识别异常3次，异常隐患发现时间从7天缩短至1天；基于趋势分析评估得出主梁性能退化率为0.8%/年，专项检测周期确定为3年；在养护资金分配方面，将年度养护预算从200万元优化至164万元，成本降低18%。该实例验证了监测系统集成的实用性以及数据解读的指导价值，为市政桥梁健康监测技术的推广提供了实践参考<sup>[5]</sup>。

## 结语

市政道路桥梁结构健康监测技术的研究与应用，不仅为桥梁的安全运营提供了科学保障，也为城市基础设施的智能化管理开辟了新路径。通过关键技术的不断优化与创新，监测系统在复杂服役环境下的适应性与可靠性得到了显著提升，实现了从数据采集到工程应用的全链条闭环管理。未来，随着物联网、人工智能及大数据技术的深度融合，市政桥梁健康监测将向更高精度、更强智能的方向发展，进一步推动桥梁管养模式的变革。此外，标准化体系建设与跨区域数据共享平台的构建，也将成为行业发展的主要趋势，助力形成覆盖广泛、响应迅速的桥梁安全管理网络，为城市可持续发展提供坚实支撑。

## 参考文献

- [1] 蔡友发. 基于机器视觉的桥梁结构健康检测关键技术研究 [D]. 天津大学, 2021.
- [2] 张锦程. 基于智慧云端高精度的桥梁健康监测技术应用研究 [D]. 北京建筑大学, 2022.
- [3] 魏必成, 林毅标, 陈美忠. 省级特大桥梁结构健康监测平台设计与关键技术分析 [J]. 福建交通科技, 2022 (001) : 000.
- [4] 孙利民, 尚志强, 夏烨. 大数据背景下的桥梁结构健康监测研究现状与展望 [J]. 中国公路学报, 2019, 32 (11) : 20. DOI: CNKI: SUN: ZGGL.0.2019-11-002.
- [5] 李帆. 云计算技术在桥梁结构健康监测中的应用 [J]. 公路, 2022 (004) : 067.