

# 大数据技术在桥梁日常养护监测中的应用

龚朝平

(四川省宜宾公路养护管理总段工程队, 四川 宜宾 644000)

**摘要** 桥梁作为交通基础设施的关键节点, 其养护监测水平直接影响通行安全与使用寿命。本文以宜宾市石马溪大桥为研究对象, 结合区域亚热带季风气候与复杂交通荷载特点, 系统探讨大数据技术在桥梁日常养护监测中的应用路径。通过工程实例阐述数据采集传输、存储处理、分析建模及决策支持等核心技术的实施方法, 提出将大数据技术与桥梁养护深度融合, 可实现结构状态的实时感知与精准评估, 显著提升养护效率与决策科学性, 以期为西南地区既有病害桥梁的智能化养护提供技术参考。

**关键词** 大数据技术; 桥梁养护; 监测系统; 状态评估; 石马溪大桥

中图分类号: TP31; U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.007

## 0 引言

桥梁是交通网络中的咽喉工程, 其结构健康状态直接关系到区域经济发展与民生安全。宜宾市地处四川南部, 受亚热带季风气候影响, 年均降水量达 1 400 mm, 雨季集中且多强降雨, 同时作为区域交通枢纽, 桥梁长期承受重载车辆通行压力。石马溪大桥作为宜宾市通往菜坝机场及周边县市的重要通道, 长期超负荷运行导致结构病害频发, 传统养护模式面临数据碎片化、评估滞后性等难题<sup>[1]</sup>。随着大数据、人工智能等技术的快速发展, 为桥梁养护监测提供了全新解决方案。当前, 桥梁养护领域的数字化转型已成为行业趋势, 但在既有病害桥梁的复杂环境下, 数据采集的针对性、分析模型的适应性及系统集成的兼容性等仍存在技术瓶颈。基于此, 本文以石马溪大桥养护监测工程为案例, 深入剖析大数据技术在日常养护监测中的具体应用, 构建全流程技术体系。

## 1 工程概况

### 1.1 工程基本情况

本工程为宜宾市石马溪大桥养护监测项目, 该桥位于 XQ44 宜飞路翠屏区境内, 跨越石马溪, 桥梁中心桩号 K3+409, 全长 520 m, 全宽 17.0 m, 净宽 16.0 m, 跨径组合为 4×25 m 预应力混凝土现浇简支板梁+2×9.59 m 钢筋混凝土现浇连续板梁+8×50 m 预应力混凝土预制简支 T 梁, 设计荷载为汽车-超 20 级、挂车-120, 2003 年建成通车, 是当地管养桥梁中最长的梁式桥。项目区域属亚热带季风气候, 年均降水量 1 400 mm, 雨季集中在 7 月至 9 月且多强降雨; 沿线地质以砂岩、泥岩为主, 部分桥段存在潜在滑坡风险。根据公路试

验检测公司出具的特殊检查报告, 该桥存在简支梁底板裂缝、T 梁梁底破损、盖梁开裂、伸缩缝损坏等病害, 虽已设置限速 20 km/h、限载 20t 标志, 但超限车辆仍频繁通行, 结构损伤持续加剧。监测范围涵盖桥梁结构位移、应力应变、温度、振动及车辆荷载等参数, 计划通过大数据技术构建一体化养护监测平台, 实现数据实时采集、智能分析与预警决策<sup>[2]</sup>。

### 1.2 重难点分析

本项目实施重难点主要体现在三个方面。一是监测环境复杂, 石马溪大桥为既有运营桥梁, 需在不影响交通通行的前提下布设传感器, 且 5#-6# 跨计划拆除重建, 传感器选型需兼顾临时性与连续性; 同时高温高湿多雨的气候条件, 对传感器耐久性提出更高要求, 如车辆荷载监测传感器需满足 -40 ~ 75 °C 环境温度使用需求。二是数据处理难度大, 全桥共布设 117 个监测点, 含 4 车道车辆荷载动态监测, 单座桥梁日均产生监测数据超 3 GB, 涵盖应力、挠度、振动、车辆轴重等多源数据, 格式差异大, 需建立统一的数据标准与融合机制, 避免形成数据孤岛。三是评估模型适应性不足, 桥梁既有病害与车辆荷载、环境因素的关联规律复杂, 如梁体裂缝扩展与超载车辆通行频次的相关性需专项分析, 需开发适用于该桥的个性化病害诊断模<sup>[3]</sup>。

## 2 大数据技术在桥梁养护监测中的关键应用

### 2.1 多源数据采集与传输技术

数据采集需结合石马溪大桥结构与病害特点, 构建全域感知网络。在 1#-14# 跨跨中梁底装 56 个表面式光纤光栅应变传感器, 量程 ±1 500  $\mu\epsilon$ 、分辨率 1  $\mu\epsilon$ 、

采样频率 10 Hz, 监测加固及重建跨段受力; 1#-14#跨梁体两侧及桥台设 30 个光纤光栅静力水准仪, 量程 100 mm、精度 0.1% F.S.、采样频率 1 Hz, 跟踪垂直位移; 4#、8#、10#、12#跨梁底装 8 个光纤光栅加速度传感器, 量程 2 g、测量频率 100 Hz, 监测梁体振动; 6#、10#、14#桥墩设 8 个光纤光栅位移计, 量程 100 mm、分辨率 0.01% F.S., 捕捉墩梁相对位移; 4#、9#、14#跨梁底装 3 个表面式光纤光栅温度传感器, 量程 -20 ~ +90 °C、精度 0.5 °C、采样频率 1 Hz, 修正温度影响; 桥头双向 4 车道布动态石英称重系统, 含石英压电传感器 (额定轴载 0 ~ 150 KN、车辆适应速度 0.5 ~ 150 km/h)、700 万像素车牌识别仪 (识别率 ≥ 95%) 及 3×2 mLED 屏, 实现超载非现场执法<sup>[4]</sup>。

传输采用“无线 + 有线”模式, 主体数据经 30m 光纤传至野外机柜, 偏远区域用 LoRa 技术, 传输距离 3 km、数据丢包率 ≤ 1%; 关键数据通过 4G 网络实时上传, 非关键数据经边缘计算节点预处理后定时上传。监测节点配置续航能力 ≥ 72 h 的备用电源, 传感器需经过 85% 湿度、60 °C 高温环境测试, 工作稳定性 ≥ 95%; 数据采集系统与桥梁管理系统对接, 实现监测点位置、设备型号、校准记录等元数据的自动关联。

## 2.2 数据存储与处理平台构建

数据存储需满足海量异构数据的高效管理需求, 采用“分布式文件系统 + 关系型数据库 + 时序数据库”的混合存储架构。对于传感器原始数据, 采用 HDFS 分布式文件系统存储, 单节点存储容量不低于 10TB, 支持数据副本机制, 副本数量 3 个, 确保数据可靠性; 结构参数检测报告、加固维修记录等结构化数据, 存储于 MySQL 关系型数据库, 采用主从复制模式实现数据备份。针对桥梁监测的时序特性, 引入 InfluxDB 时序数据库, 写入吞吐量达 10 万条 / 秒, 数据保留策略按“热数据 3 个月、冷数据 5 年”设置, 冷数据自动迁移至低成本存储介质。数据处理采用流处理与批处理相结合的方式, 实时数据通过 ApacheFlink 流处理框架进行清洗, 剔除异常值、填补缺失值, 异常值识别采用  $3\sigma$  准则与滑动窗口算法结合的方式, 处理延迟控制在 500 ms 以内; 历史数据采用 ApacheSpark 进行批处理分析, 挖掘结构性能退化规律, 如梁体应变与超载车辆通行频次的关联关系。平台部署于本地私有云, 服务器集群包含 2 台数据处理服务器、1 台数据库服务器, 服务器配置为 2 个英特尔®至强®处理器 E5-2650 (八核 2.0GHz)、8GB 内存, 数据库服务器硬盘不小于 2TBSAS, 支持弹性扩展; 通过 Kubernetes 实现容器化管理, 服务可用性达 99.9%。数据接口采用

RESTfulAPI 标准, 支持与宜宾市智慧交通平台的数据交互, 接口响应时间不超过 200 ms。

## 2.3 结构状态分析与评估模型

基于大数据的结构评估需建立多层次分析模型, 实现从数据到知识的转化。采用机器学习算法构建结构响应预测模型, 以历史监测数据为训练样本, 输入参数包括环境温度、车辆轴重、降雨量等, 输出结构应变、位移等响应值, 模型采用随机森林算法, 预测误差控制在 5% 以内; 通过对比实际监测值与预测值的偏差, 识别结构异常状态, 偏差阈值按 95% 置信区间动态调整。针对桥梁典型病害, 建立基于关联规则的病害诊断模型, 挖掘传感器数据与病害类型的关系, 如 T 梁跨中应变超  $1\ 200\ \mu\epsilon$  且超载车辆日均通行超 50 辆时, 梁底裂缝扩展风险支持度不低于 60%; 采用 LSTM 神经网络构建结构性能退化模型, 输入历史损伤数据, 预测未来 3 年的性能衰减趋势, 预测精度达 85% 以上。对加固及重建跨段关键构件, 开发数字孪生模型, 通过有限元模型与监测数据的实时融合, 实现结构应力分布的可视化展示, 模型更新频率与监测数据采集频率同步; 结合全生命周期数据, 建立构件剩余寿命评估模型, 考虑材料劣化、荷载累积、环境侵蚀等因素, 寿命预测误差不超过 10%。分析模型定期进行迭代优化, 新纳入的监测数据每半年重新训练一次模型参数, 确保模型适应性<sup>[5]</sup>。

## 2.4 智能预警与决策支持系统

预警系统需实现多级告警与精准推送, 基于结构安全阈值设置三级预警机制: 一级预警对应参数超出正常范围但未达限值, 如梁体应变超  $1\ 000\ \mu\epsilon$ , 通过系统平台自动提示; 二级预警对应参数接近限值, 如挠度超 80 mm (限值 100 mm), 向养护负责人发送短信预警; 三级预警对应参数超限, 如超载车辆轴重超 150 KN, 启动声光报警并自动推送至应急指挥平台, 同时联动 LED 警示屏显示“超载车辆请桥下绕行”。预警阈值采用“规范值 + 个性化修正”的方式确定, 个性化修正基于同类桥梁历史数据与专家经验, 修正系数在 0.8 ~ 1.2 之间。决策支持系统构建养护方案生成模型, 根据结构状态评估结果、交通流量、养护资源等约束条件, 自动生成养护建议, 包括养护时机、措施类型、所需材料等, 如某跨应变持续超预警值时, 建议采用碳纤维布加固并估算材料用量与成本; 采用遗传算法优化养护计划, 以养护成本最小化与结构可靠性最大化为目标, 求解最优养护策略, 方案生成时间不超过 10 分钟。系统内置知识库, 存储桥梁病害案例、处理措施、规范条文等知识, 采用知识图谱技术

实现关联查询，支持通过自然语言提问获取相关信息；开发移动应用终端，养护人员可实时查看监测数据、接收预警信息、上传现场检查结果，终端支持离线操作，网络恢复后自动同步数据。每月生成养护监测报告，包含结构状态评估、养护建议、实施效果等内容，报告采用自动生成与专家审核相结合的方式，确保结论准确性。

### 3 大数据技术应用的实施策略

#### 3.1 数据质量管控机制

建立全流程数据质量管控体系，从采集到应用各环节设置质量控制点。传感器安装前进行计量校准，校准误差不超过 0.5% F. S，校准记录存入区块链系统，不可篡改；数据采集阶段采用实时校验机制，对超出量程的数据标记为无效并自动重试采集，重试次数不超过 3 次。数据传输过程中采用 MD5 加密校验，确保数据完整性；入库前进行格式校验，不符合标准的数据自动退回并记录异常原因。定期开展数据质量评估，评估指标包括完整性、准确性、时效性，完整性要求达 98% 以上，准确性通过现场抽检验证，抽检比例不低于 5%，时效性要求关键数据延迟不超过 10 分钟。建立数据质量责任追溯机制，明确传感器维护人员、数据管理人员的职责，质量问题采用鱼骨图分析法追溯根源；每季度发布数据质量报告，针对薄弱环节制定改进措施，如传感器故障率高的区域增加维护频次，传输不稳定路段优化通信方案。数据质量与养护决策挂钩，低质量数据自动标注，不纳入评估模型计算。

#### 3.2 系统安全与标准化建设

系统安全需构建多层次防护体系，网络层面采用防火墙、入侵检测系统，划分安全区域，不同区域间采用 ACL 访问控制策略；数据传输采用 SSL/TLS 加密，密钥每 72 小时自动更新；服务器部署杀毒软件与漏洞扫描系统，每周进行一次全盘扫描，高危漏洞修复时间不超过 24 小时。数据安全方面，敏感信息如桥梁关键参数采用 AES-256 加密存储，访问权限按“最小权限”原则设置，分为管理员、操作员、访客三级，操作记录全程审计；建立数据备份与恢复机制，每日进行增量备份、每周进行全量备份，备份数据异地存放，恢复时间不超过 4 小时。标准化建设包括数据采集标准、数据接口标准、分析模型标准，数据采集标准规定传感器布设位置、采样频率、精度要求等，参考《公路桥梁结构监测技术规程》并结合项目实际细化；数据接口采用国家标准 GB/T39000 系列，确保 interoperability；分析模型输出格式统一为 JSON，包含评估指标、

置信度、建议措施等要素。定期参与行业标准化交流，推动区域内数据标准协同。

#### 3.3 养护协同与应用推广

建立跨部门协同机制，整合养护管理部门、检测单位、执法机构等多方资源，成立大数据应用专项工作组，每月召开协调会议，解决实施过程中的问题。搭建协同工作平台，实现监测数据、检查记录、养护计划、超载车辆信息等共享，平台用户按角色分配权限，支持在线审批、电子签章等功能，流程处理时间缩短 30% 以上。与高校科研院所合作开展技术攻关，针对既有病害桥梁特殊环境下的监测技术进行研究，开发专用传感器与分析模型；建立“产学研用”示范基地，培养大数据与桥梁养护复合型人才，每年组织 2 次技术培训，培训内容包括系统操作、数据分析、模型应用等。在应用推广方面，先以石马溪大桥为试点，总结经验后逐步推广至周边同类桥梁；形成可复制的技术方案，包括系统架构、设备选型、实施步骤等，编制《大数据桥梁养护监测应用指南》；通过行业研讨会、技术交流会等形式分享应用成果，推动技术标准化与产业化。

### 4 结语

本项目通过在宜宾市石马溪大桥应用大数据技术，构建了从多源数据采集到智能决策支持的完整养护监测体系，有效解决了传统养护模式中的数据碎片化、评估滞后等问题。实践结果表明，系统运行稳定，数据采集准确率达 98% 以上，结构异常预警响应时间缩短至 10 分钟以内，养护计划制定效率提升 50%，桥梁结构性能退化趋势预测精度达 85%，验证了大数据技术在既有病害桥梁养护中的适用性与有效性。该工程案例证实，大数据技术的深度应用可实现桥梁养护从“事后维修”向“事前预防”的转变，显著提升养护科学性与经济性，同时通过车辆荷载监测与执法协同，有效遏制超限车辆通行，延缓结构病害发展。

### 参考文献：

- [1] 张敬伟, 满新杰. 结构健康监测技术在公路桥梁养护中的应用 [J]. 交通节能与环保, 2023, 19(S1):143-146.
- [2] 吴佳辰. 大数据背景下市政城市道路养护管理研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2023(22):196-198.
- [3] 谷明. 探讨大数据在高速公路预防性养护中的应用 [J]. 交通科技与管理, 2023, 04(01):59-61.
- [4] 管晓嫚, 李坤, 王银广, 等. 桥梁养护管理信息大数据发展 [J]. 智能城市, 2020, 06(20):102-103.
- [5] 曹海盛. BIM 技术在桥梁健康养护监测中的应用探索 [J]. 公路交通科技 (应用技术版), 2020, 16(09):183-186.