

桥梁健康监测系统全过程管理研究

潘有健^{1,2} 林雁贝^{1,2} 刘伟^{1,2} 吴志勇^{1,2} 陈钰培^{1,2}

1 广州市城市年票项目建设有限公司, 广东广州, 510220;

2 广东诚泰交通科技发展有限公司, 广东广州, 510000;

摘要: 桥梁健康监测系统全过程管理对保障交通基础设施安全运营具有重要意义, 以服役超 27 年的江湾大桥为研究对象, 构建了涵盖前期规划设计与实施建设以及运营维护三个阶段的全过程管理体系。建成包含 295 个监测点的完整监测网络, 实现环境、作用与结构响应以及结构变化四大类监测指标的全覆盖, 为桥梁养护决策提供了科学依据, 研究成果为类似工程项目提供了可复制的管理模式和技术标准。

关键词: 桥梁健康监测; 全过程管理; 项目实施; 运维优化; 江湾大桥; 数字化管理

DOI: 10.69979/3029-2727.26.02.045

引言

《交通强国建设纲要》明确提出加强交通基础设施养护, 《数字交通“十四五”发展规划》强调推进基础设施数字化转型, 桥梁健康监测系统建设迎来重要发展机遇, 江湾大桥作为广州市重要的跨江通道, 1998 年 1 月建成通车运营至今已服役超 27 年, 属变截面三跨预应力混凝土连续箱梁结构, 长期运营中出现结构老化和局部病害。为保障桥梁安全运营, 亟需建设健康监测系统实现结构状态实时监控, 研究围绕前期规划设计, 实施建设与运营维护以及优化升级全流程展开, 系统总结全过程管理的核心要素与关键措施以及实践成效。

1 桥梁健康监测系统全过程管理体系构建

1.1 全过程管理核心内涵

桥梁健康监测系统全过程管理指的是从系统前期规划设计开始一直到后期运营维护结束的完整生命周期管理过程, 这个过程涵盖需求分析、方案制定、实施建设与系统调试以及运营维护和持续改进等关键环节, 该管理理念着重强调各阶段之间的系统性衔接和协调配合, 以此确保监测系统在整个服役期内都能够保持最佳运行状态^[1]。全过程管理的关键之处在于构建标准化管理框架与制度, 凭借合理的组织安排以及清晰的权责划分对监测系统构建与运营实施全面管控。这种管理方式呈现出前期规划具备前瞻性, 中期执行具有规范性以及后期运维拥有长效性这三个主要特点, 通过统筹监测资源并且改进管理程序达成对桥梁状况动态监控与精

准评判^[2]。

1.2 管理体系核心要素

桥梁健康监测系统全程管理体系重点内容能划分成技术与组织以及风险控制这三大关键部分, 技术层面包含监测设备选型, 传感器布设与数据采集传输以及信息处理分析等环节的规范化管理, 目的是保障系统技术方案的合理性与稳定性^{[3][4]}。组织层面涉及管理机构搭建, 人员配置与职责划分以及协作机制建立, 以此形成健全项目管理组织结构与运行模式, 风险控制层面涵盖对技术, 进度、质量以及成本等风险的辨识与评估与应对策略, 构建多角度风险防御体系^[5]。这些要素相互联系且协同运作, 通过标准化工作流程和质量控制体系, 实现对桥梁结构状况的持续全面监测, 为桥梁安全运行提供有力支撑^[6]。

2 江湾大桥全过程管理实践

2.1 前期规划设计阶段管理

江湾大桥健康监测系统前期规划设计管理工作, 依据桥梁已运行 27 年的实际情形, 开展了系统的现状调研与需求分析工作, 调研阶段借助专项检测揭示出桥梁结构老化和局部损伤等方面问题, 进而确定了需要重点监测的部位以及关键指标内容。方案设计过程中, 针对该桥预应力混凝土连续箱梁的结构特性, 规划了桥址区和主梁内环境温湿度监测、混凝土构件温度监测、桥墩顶部加速度监测、主梁竖向和梁端纵向位移以及支座位移监测、主梁关键截面应变监测、主梁竖向振动加速度

监测、混凝土结构裂缝监测，同时构建了桥梁数字化管理平台。技术论证环节严格按照 JT/T1037-2022 等规范标准要求，组织专家对监测方案进行了技术可行性与成本效益评估工作。实施准备阶段完成了施工图设计以及采购计划制定任务，还特别考量了城市桥梁交通疏导与施工安全管理的相关要求，该前期规划设计阶段充分体现了江湾大桥项目的实践特点与技术创新之处。

2.2 实施建设阶段管理

在江湾大桥健康监测系统建设的过程中管理措施充分考量城市桥梁特殊施工环境，交通疏导阶段专门设计 6 车道通行方案，且利用夜间作业方式有效降低对珠江前航道通航干扰^[7]。传感器安装环节成功攻克既有结构改造技术难题并成功布设 88 个振弦式应变计，18 个差压变送器和 3 个空气温湿度传感器等设备，且所有工作严格遵循 CJJ99-2017 等规范质量标准^[8]。数据采集系统建设中顺利解决跨江大桥复杂线路铺设问题，并构建覆盖全桥的数据传输网络，系统联调阶段借助桥梁数字化管理平台，实现监测数据实时采集和智能分析功能，如图 2 所示专项施工方案和逐点验收制度的实施，确保 295 个监测点建设质量，为江湾大桥健康监测系统稳定运行提供可靠保障^[9]。

3 全过程管理优化建议

3.1 技术优化策略

根据江湾大桥健康监测系统的运行经验来确定，技术改进方向要聚焦提高监测精确度以及系统稳定性，在传感器部署优化方面，针对主梁跨中断面监测数据出现异常波动的状况，推荐加装温度补偿传感器并改进温度影响剥离算法。数据处理技术需要加强异常值检测能力，利用机器学习方法构建桥梁结构响应的基准模型，以此提升预警系统的准确度与可靠性^[12]。系统集成的优化应着重解决数据传输稳定性问题，考虑江湾大桥跨江环境电磁干扰特性，建议采用光纤通信替代部分无线传输方案，平台功能优化要强化数据展示与趋势分析能力，开发满足城市桥梁管理养护需求的专门功能模块，还需要建立标准化的设备维护与校准机制，确保监测系统长期稳定运行的数据质量和系统可靠性。

3.2 管理机制优化

江湾大桥健康监测系统管理经验确定全流程管理优化路径和核心要点，组织管理层面要组建专业化运维队伍，并清晰划分各环节技术主管与质量管控职责，以杜绝管理衔接不畅和责任界定不清情况^[13]。运维机制方面应健全故障处理流程，实行全天候值班值守且制定应急方案，推行预防性维护策略并规范备件库存标准。成本控制机制要构建贯穿项目全周期的成本管理体系，改进设备配置方案与保养措施，质量管理机制需制定数据质量评判准则和异常处理规范，来保障监测数据真实性与完整性，人才培养机制应强化运维人员技术能力培养，并设立技术资格认证制度增强管理队伍专业素养。

3.3 行业推广价值

江湾大桥健康监测系统开展全流程管理实践的相关经验有着重要示范意义与推广价值，在技术标准推广方面，该项目制定的城市桥梁监测系统技术规范，还有 295 个测点的布设方案，能为同类预应力混凝土连续箱梁桥建设提供直接技术依据，在管理模式上，其全过程管理体系体现出较强系统性与可操作性，尤其是城市桥梁交通疏导和夜间施工环节管理经验具备普遍应用前景。成本控制策略对于行业发展有着显著的参考价值，江湾大桥项目在投资受限条件下完成全范围监测部署，为同类工程成本管理提供了有效的范式^[14]。数据应用成效为桥梁养护工作科学决策树立了典范，该项目同时为交通基础设施数字化升级与智慧交通体系构建提供了关键技术支撑与实践参考^{[15][16]}。

4 结语

江湾大桥健康监测系统全过程管理实践取得显著成效，建成覆盖环境、作用、结构响应、结构变化四大类的 295 个监测点，实现桥梁结构状态全方位监控，设备运行稳定性良好，全过程管理在桥梁健康监测系统建设中具有重要价值，通过规划与实施以及运维闭环管理，有效保障了系统建设质量和运营效率。随着人工智能数据分析技术与远程集群监控技术的不断发展，智慧监测技术将进一步融入全过程管理体系，推动桥梁健康监测向智能化与自动化方向发展，为交通基础设施数字化转型和交通强国建设提供有力支撑。

参考文献

- [1] 郑川, 周勇, 黄福武. 桥梁健康监测与养护决策系统的研究与应用 [J]. 西部交通科技, 2025, (10): 188-190.
- [2] 马建杰, 张瑞嘉. 公路桥梁健康监测系统的设计与实现 [J]. 智慧中国, 2025, (03): 28-29.
- [3] 李良才. 常规跨径桥梁健康监测技术路线及方法研究 [J]. 工程建设与设计, 2025, (19): 82-84.
- [4] 钱晨. 徐浦大桥结构健康监测系统传感器布点方案设计 [J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2024, 47(04): 59-71.
- [5] 孟令强. 桥梁健康监测系统安全预警阈值设定研究 [J]. 铁道建筑技术, 2024, (12): 171-173+193.
- [6] 胡琼清, 邱卓, 刘培, 等. 东昌高速公路赣江特大桥结构健康监测系统设计 [J]. 江西建材, 2023, (11): 104-106.
- [7] 向东刚, 邹云华, 龚凯. 特大悬索结构桥梁健康监测系统设计与运用 [J]. 交通工程, 2024, 24(11): 109-115+121.
- [8] 曾凯琳. 长大连续刚构桥梁健康监测系统及实施方案 [J]. 工程技术研究, 2025, 10(06): 184-186.
- [9] 刘尧, 任广军. 桥梁健康监测系统在桥梁管养中的应用 [J]. 工程建设与设计, 2024, (22): 52-54.
- [10] 朱金鹏. 桥梁健康监测动态预警阈值研究 [J]. 湖南交通科技, 2024, 50(04): 182-186+212.
- [11] 陶清平. 桥梁健康监测系统在桥梁养护管理中的应用 [J]. 建筑技术开发, 2020, 47(24): 105-106.
- [12] 刘宸铭, 王富艳. 高速公路桥梁结构健康监测与安全评估、预警研究 [J]. 湖北应急管理, 2025, (20): 52-54.
- [13] 董敏. 超龄服役斜拉桥公路养护管理新模式探索 [J]. 时代汽车, 2025, (20): 7-9.
- [14] 王莹峰. 桥梁健康监测技术在桥梁维修加固全周期中的综合应用——以成都二绕高速五凤互通 E匝道 3 号大桥为例 [J]. 运输经理世界, 2025, (23): 91-94.
- [15] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2024[J]. 中国公路学报, 2024, 37(12): 1-160.
- [16] 周吉辰. 大跨度连续梁桥结构健康监测 [J]. 中国公路, 2024, (23): 110-113.