

智慧监测技术在桥梁养护中的应用研究

董玉磊 郭士贤

天津市政工程设计研究总院有限公司 天津 西青 300392

【摘要】：针对跨江跨海大跨度桥梁和城市高架在重载与环境耦合作用下的养护矛盾，研究构建感知层、网络层、平台层与应用层协同的桥梁智慧监测体系，并在江苏南通长江双塔悬索桥完成验证。系统以 FBG 应变、GNSS 位移与宽频加速度为核心，结合边端同步、异常筛选与卡尔曼去噪，云端开展模态识别、趋势分解与风险分级，实现状态连续感知与事件驱动决策。应用结果显示，裂缝发现时间由 72 小时降至 2 小时，养护响应由 24 小时缩短至 4 小时，结构隐患事故发生率由 1.2% 降至 0.1%。年度直接费用由 500 万降至 350 万，日均巡检覆盖由 5 千米提升至 7 千米，证明该体系可在不增加冗余投入的前提下显著提升安全冗余与资源配置效率。

【关键词】：智慧监测；桥梁养护；边云协同；FBG 应变；GNSS 位移

DOI:10.12417/2705-0998.26.07.027

引言

跨江跨海大跨度桥梁与城市环线高架长期处于重载交通与海风盐雾等环境的耦合工况，传统依赖步巡与车巡的模式难以捕捉高频荷载引发的状态波动，隐患识别与损伤扩展之间存在显著滞后。更为关键的是，巡检影像与记录分散在多套系统，缺少统一编码与时序关联，难以支撑全寿命可追溯管理，也难以与交通组织与资源调度联动。为破解效率低与认知滞后的矛盾，亟需将多源传感、稳定通信、边云协同计算与诊断模型进行一体化编排，以形成面向决策的风险表达，推动养护由被动响应转向前瞻调度。基于此，本文围绕跨江大跨度悬索桥的典型工况，设计覆盖感知到应用的体系化方案，强调时空一致性、运维可达性与业务闭环，旨在为桥梁群的数字化、网络化与智能化养护提供可落地的技术路径与评估依据。

1 智慧监测技术在桥梁养护中的应用需求分析

鉴于跨江跨海大跨度桥梁与城市环线高架长期承受重载交通以及环境耦合作用，传统以人工巡检为核心的养护模式存在效率低与认知滞后的矛盾。定期步巡与车巡依靠目测和简易量测，难以捕捉高频荷载引发的状态波动，隐患识别晚于损伤扩展；巡检影像与文字记录分散在多套系统，数据缺乏编码与时序关联，难以形成可复用的全寿命资料。从交通运行角度来看，结构安全影响网络通行能力与服务水平，单点构件劣化会把瓶颈效应传导至主干道与匝道，引发管制与拥堵并抬升应急难度。由此推导，面向全寿命期的智慧监测需求愈加明确，其内涵可界定为把多源传感、通信传输、边云协同计算与诊断模型联合起来使用，以连续感知结构状态并输出面向决策的风险信息。结合跨江桥梁与城市高架的差异化工况，应围绕实时状态感知、数据驱动决策与养护资源优化构建监测体系，选用应变、加速度、位移与腐蚀电位等传感组合，在边端完成采样、同步与异常筛选，并把云端承载寿命预测与风险分级，进一步把病害处置优先级与交通组织和资源配置进行联动编排，为后续技术实现与应用评估提供需求依据。

2 智慧监测技术在桥梁养护中的应用实现

2.1 桥梁智慧监测系统架构设计

围绕跨江大跨度桥梁在高频荷载与海风盐雾耦合作用下的全寿命管理目标，架构设计把感知层、网络层、平台层与应用层进行分层解耦与协同编排，形成边云协同的闭环业务流，见图 1。为保证可落地性，本文以江苏省南通段跨越长江的双塔悬索桥为对象展开描述，把传感部署、通信组织、数据治理与业务应用进行一体化设计，强调时空一致性与运维可达性。

感知层面面向结构状态与环境载荷的耦合表征，选用光纤布拉格光栅作为主缆与主梁关键截面的应变与温度感知单元，配置宽频带加速度计覆盖主跨中部、边跨连接与塔顶位置以支撑模态参数识别，同时把厘米级 GNSS 位移传感器布设在主梁跨中与两塔塔顶以获取低频位移与相对姿态，辅以电化学腐蚀电位探头于锚碇与钢桁段节点，用以刻画材料劣化趋势，并把超声风速仪与路面温湿度点位联动以刻画外部工况。感知层近端设置工业级边缘网关与分布式采集单元，依靠 GNSS 授时与 PTP 时钟对齐完成毫秒级时间同步，运用异常点筛选、数据降噪与事件触发等轻量算法，把数据质量控制前置到边端。网络层把 5G 独立组网专用切片当作主干承载，辅以双路有线光纤与微波链路进行冗余编织，针对高频振动等时序数据运用 MQTT 与自描述二进制帧格式进行传输，对低速环境量则配置 NB-IoT 以降低功耗与流量压力。数据侧链路部署端到端加密与隧道隔离，结合设备指纹与访问白名单完成接入治理，使跨江桥梁两岸与主跨中部边缘节点能够稳定地把采集流与告警流送达平台侧消息队列。

2.2 桥梁状态监测关键技术实现

面向江苏南通长江双塔悬索桥的运行情境，关键技术的实现把 FBG 应变、GPS 动态位移以及加速度振动监测进行协同。FBG 把波分复用链路敷设于主梁跨中与四分点等关键截面，并在同位点配置温度光栅开展温漂补偿，采样频率设为 10 Hz；

边缘网关依靠中值滤波与突变识别完成噪声抑制与事件触发，再把校正应变用于主梁受力与长期趋势判读。GPS 把双频 RTK 测站布设在两塔塔顶与跨中，基准站固定在北岸管养区，流动站输出 10 Hz 位移序列，定位精度优于±5 mm；边端把位移分解为低频漂移与高频响应，并且与气象量进行关联，用于识别风致幅值增长与温差引起的缓变。加速度监测选用宽频带三向传感器覆盖塔顶、跨中以及边跨连接段，采样频率设置为 200 Hz，边缘侧完成去趋势与抗混叠处理，云端再凭借随机子空间辨识和频域分解提取自振频率、阻尼比与振型相对变化。三类量测依靠 GNSS 授时与 PTP 把时间戳对齐至毫秒级，同时在平台侧与数字桥型和交通荷载谱对接，使模态漂移能够回溯至对应车流与风场事件，从而把状态感知与运维处置链接起来。传感安装采用粘帖与螺栓夹持组合，优先考虑海风盐雾下的密封与抗腐蚀设计。

2.3 监测数据采集与预处理方法

结合南通长江双塔悬索桥的运维语境，采集策略把高频连续采样与低频归档报送并行起来使用，以兼顾事件细节与长期演化。应变通道在边端以 10 Hz 采样，并把每 1 h 的均值与 95 百分位汇聚为小时级应变数据；位移通道以 10 Hz 输出，边端完成抗混叠重采样后按 1 min 汇聚为均值与漂移率；加速度通道以 200 Hz 采样，事件触发时保留 10 s 原始片段，同时按 1 min 汇总为有效值与主频峰值。多源时间戳依靠 GNSS 与 PTP 对齐至毫秒量级，数据完整性由边端对丢包率与通道漂移进行巡查。

预处理流程在边端优先开展异常值剔除与噪声抑制。异常检测借助滑动窗口的 3σ 原则，把超过窗口均值 3 倍标准差的样本标记并剔除，窗口长度对应应变设定为 1 h，位移为 10 min，振动为 10 s；孤立缺测采用相邻时刻的局部线性插值恢复连续性。噪声抑制环节把卡尔曼滤波当作状态估计器来使用，在弱非平稳背景下对应变与位移序列进行去噪，同时保留风致与车流引发的有效响应，为云端的模态识别与趋势分解提供稳定输入。

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H \hat{x}_k^-)$$

其中， \hat{x}_k 表示时刻 k 的后验状态估计， \hat{x}_k^- 为时刻 k 的先验状态估计， K_k 为卡尔曼增益， z_k 为观测量，H 为观测矩阵。边端把过程噪声与观测噪声协方差自适应整定，使滤波后的均方误差在不削弱突发事件幅值的前提下得到降低。

3 智慧监测技术在桥梁养护中的应用效果评估

3.1 养护决策优化效果分析

立足南通长江双塔悬索桥的运维语境，把智慧监测上线前后的养护决策链路进行对比，可见关键时效与风险控制指标出现结构性改善，见表 1。监测上线后，FBG 应变、GNSS 位移与加速度振动在边端完成时标对齐与异常筛选，事件引擎把突

发幅值与趋势漂移转译为可执行的告警等级，裂缝发现时间由 72 h 收敛至 2 h，其根本逻辑在于把间歇目测替换为连续感知，并把温度漂移和车流扰动在边端被剥离，使细小刚度退化能够被提前暴露。养护响应时间由 24 h 压缩至 4 h，缘由在于风险分级与工单编排形成联动闭环，系统把检修窗口、物资清单以及路网限速与分流建议一体推送，显著减少跨部门沟通和现场复核的往返次数。需要关注的是，结构隐患事故发生率由 1.2% 降低至 0.1%，并非来源于单一阈值收紧，而是由模态参数漂移、低频位移与环境量的交叉验证共同抑制误报与漏报，使资源被优先投向对损伤演化更为敏感的节点构件。由此推导，智慧监测把状态认知的分辨率与风险表达的业务可用性同步提升，使养护策略从事后纠偏转向前瞻性调度，决策不确定性被量化并纳入排程约束，进而在不增加冗余投入的前提下提高安全冗余度。

表 1 南通长江双塔悬索桥智慧监测前后养护决策效果对比表

指标	监测前	监测后	变化幅度
裂缝发现时间	72 h	2 h	-97.2%
养护响应时间	24 h	4 h	-83.3%
结构隐患事故发生率	1.2%	0.1%	-91.7%

3.2 养护成本与效率提升效果验证

面向江苏南通长江双塔悬索桥的养护情境，结合前文时效与风险控制指标的改善幅度，可以把成本与效率收益进行量化表述，并追溯其技术逻辑。年度养护直接费用由 CNY 5.0 million 降至 CNY 3.5 million，约等于 30% 的降幅，关键驱动在于把周期性大范围巡检转化为事件驱动的定点快速处置，使占道管制与交通组织协调得到压缩；边缘侧完成异常筛选与降噪，回传数据量与重复复核次数同时减少，通信与人力的重复性开销得到削减；工单编排把风险分级、材料清单与施工窗口进行联动，提前完成物资预置与班组排程，紧急采购溢价与夜间加班强度随之下降；计划性窗口对接路网限速与分流策略，使大型吊装与高空作业持续时间缩短，设备租赁与场地占用的日租成本得到同步降低。

从作业效率来看，人均日巡检覆盖长度由 5 km/d 提升至 7 km/d，约等于 40% 的提升幅度，缘由在于把在线诊断与远程复核作为前置环节来使用，现场人员只需对高优先级构件开展验证与处置，低风险差异由监测系统后台闭环处理；移动终端承载电子工单与路径编排，跨岸通行证与作业审批在平台侧一次性完成，等待时间显著收敛；事件触发把短时强风与重载车流的扰动窗口明确标注，巡检与交通管控形成错峰组织，作业有效时段被扩大。需重点关注的是，资源投向与构件风险热度实现绑定，备件仓储与设备维保的节奏被边云协同数据所牵引，单位有效工时的产出被持续提高。由此推导，智慧监测以

信息质量提升为杠杆,把成本结构与时间结构同时改良,并为全寿命预算与年度计划提供可追溯的量化依据。

4 结语

本文面向跨江悬索桥构建了分层解耦的智慧监测体系,实现传感部署、时间同步、数据治理、事件引擎与养护联动的闭环。南通长江双塔悬索桥的应用表明,FBG应变、GNSS位移与加速度的协同能够稳定支撑模态参数识别与趋势诊断,配合边缘异常筛选与云端风险分级,可显著压缩隐患发现与响应时

长,降低事故概率与年度费用,并提升巡检效率与资源利用率。实践同时验证了专网切片与多链路冗余的通信可靠性,证实元数据映射与工单编排在跨部门协同中的价值。面向推广应用,可在不同桥型与城市高架上按工况选择传感组合,并将寿命预测、交通管控与年度预算联动纳入一体化排程。后续将加强数字桥型与荷载谱的自适应融合,推进小样本异常识别与疲劳寿命评估,完善安全与隐私机制,持续提升全寿命期的决策支撑能力。

参考文献:

- [1] 蔡子龙.桥梁健康监测数据处理与分析技术研究进展和发展方向[J].世界桥梁,2025,53(03):102-110.
- [2] 向阳,王明莉,霍义方.基于档案大数据的桥梁智慧化管养研究[J].中国档案,2023,(10):46-47.
- [3] 张浩.公路桥梁钢箱梁顶推智能监控系统研究[J].智能城市,2025,(11):153-156.
- [4] 田文迪,熊玉勇,吴朔阳,范振华,程寿山,彭志科.基于微波全场测振的桥梁轻量化监测技术[J].振动与冲击,2025,44(10):106-115.
- [5] 张云龙,夏云霞,闰金明,程岩峰.基于小波阈值算法的桥梁结构健康监测信号去噪研究[J].青岛理工大学学报,2025,46(03):9-16+71.