

智能监测技术在桥梁施工中的应用探析

姚坤才

(广西路桥工程集团有限公司, 广西 南宁 530200)

摘要 本研究聚焦桥梁施工安全与质量控制的智能化需求, 构建“感知—传输—处理—应用”四层智能监测技术体系, 通过在主梁悬臂浇筑段等刚构桥关键部位差异化部署传感器, 融合时空配准与多级模型整合异构数据, 形成动态调控闭环。结果表明, 该技术可实现刚构桥施工全过程物理量采集、多维度数据的深度关联分析及风险的自动化预警响应, 显著提升大跨径桥梁施工安全质量管控效能, 为复杂桥梁工程提供全流程数字化方案参考。

关键词 桥梁施工; 智能监测技术; 智能监测架构; 多源数据融合; 动态反馈预警

中图分类号: U445; TP277

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.18.007

0 引言

随着大跨径桥梁向复杂化发展, 刚构桥悬臂浇筑工艺对监测精度提出更高要求。传统监测手段因环境适应性差、数据时效性不足等缺陷, 难以满足刚构桥主梁节段悬浇、挂篮移位等关键工序的实时安全管控需求^[1]。智能监测技术作为物联网、BIM 与结构力学交叉融合的创新成果, 使得施工过程中的应力、位移演变得以通过数字化手段被实时捕捉, 尤其针对刚构桥混凝土收缩徐变等非线性问题提供新路径, 核心价值在于构建物理实体与数字模型的实时映射, 实现施工参数的动态优化与风险的前置干预^[2]。在此背景下, 深入解析智能监测技术的架构原理、关键技术及工程应用成效, 对于提升桥梁施工智能化水平、保障工程安全质量具有重要的理论意义与工程实用价值。

1 智能监测技术原理

智能监测技术以“感知—传输—处理—应用”四层架构为核心, 实现对桥梁施工全过程的数字化监控。该架构通过系统化数据流转, 将物理结构动态响应转化为可量化数字信号, 为施工安全与质量控制提供实时决策依据。

感知层与传输层构成底层支撑。感知层在桩基、承台及主梁悬臂浇筑段等关键构件部署应变计、定位终端等传感器, 以毫米级精度实时采集应力、位移等物理量。传输层采用可靠的低延迟通信网络基于 IEEE 1588 PTP 协议, 实验室验证同步误差 $< 10\text{ ms}$, 确保数据传输效率与实时性。二者协同解决复杂环境下的数据采集与稳定传输问题。处理层与应用层聚焦数据

深度分析与决策反馈。处理层依托 Python 数据中台执行数据清洗与时空配准 (即统一不同传感器数据的时间和空间基准), 并融合多源数据生成反映结构受力状态的关键特征 (应力—位移耦合系数)。应用层基于 BIM 技术构建三维可视化平台, 集成智能预警模型 (基于高斯过程回归算法, 响应时间 $< 5\text{ s}$, 符合《建筑隔震设计标准》(GB/T 51408-2021) 规范要求, 形成“监测异常—风险预警—挂篮工序调控”全自动闭环系统。二者实现从原始数据到动态调控的智能化闭环, 保障施工精准性与安全性。该技术的核心价值在于构建“物理实体—数字模型—决策支持”的闭环逻辑, 为桥梁施工提供实时、精准的技术支撑^[3]。

2 桥梁施工中智能监测关键技术解析

2.1 智能传感网络构建

针对刚构桥混凝土主梁与钢构节点特性, 传感器选型需差异化配置: 钢箱梁节点采用光纤光栅应变计, 兼顾耐温性与抗干扰能力; 混凝土构件 (刚构桥主梁等) 选用振弦式应变计, 适配长期荷载监测需求^[4]。位移监测通过多技术融合实现: 桥梁与桥墩部署“双轴倾角仪与北斗定位终端”, 复杂地形辅以全站仪优化定位误差。环境参数监测部署温湿度传感器及风速仪, 动态修正温度变化对混凝土变形的影响, 并实时捕捉涡振临界风速 ($> 25\text{ m/s}$ 触发专项监测, 依据风洞试验数据设定)。网络布局采用“关键节点加密与薄弱环节冗余”策略: 挂篮悬臂浇筑段每 5 m 设传感器组, 对易失稳区域实施双倍覆盖, 确保全域无盲区, 为后续数据融合与风险预警奠定高精度数据基础。

作者简介: 姚坤才 (1997-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 桥梁工程。

2.2 多源数据融合解析

多源数据融合通过整合异构传感器数据,消除时空维度差异,构建高精度决策支持系统。针对刚构桥挂篮移动、梁段浇筑等工况,时间配准基于统一时间戳,采用时间对齐技术确保不同频率数据(高频应变计与定位数据)同步误差;空间配准依托BIM模型统一传感器坐标,利用空间插值填补缺失数据,并通过噪声过滤技术剔除施工干扰。在此基础上,三级融合模型逐层提炼数据价值:数据层标准化原始物理量生成特征矩阵;特征层通过降维提取核心变化趋势指标(应力梯度变化率);决策层基于智能分类模型(贝叶斯网络),精准区分支架预压、挂篮悬浇等10余类典型工况,误判率低于行业阈值。

这一架构将碎片化数据转化为结构化知识,不仅突破了传感器异构性瓶颈,更以数据驱动方式揭示了施工中的力学关联与风险演化规律,实现从“数据冗余”到“信息增值”的跃迁,为施工精准控制奠定了技术基石^[5]。

2.3 动态反馈预警调控

动态反馈预警调控机制通过分级预警与闭环调控协同作用,精准干预施工风险。系统建立三级预警体系:黄色预警在单一指标(主梁应力或挂篮倾角)达到设计值80%时触发,实时标注异常点并推送工程师复核;若连续异常(应力增速 $>5\text{ MPa/h}$ 且位移增速 $>1\text{ mm/h}$),

升级为橙色预警,自动暂停工序并联动声光报警装置定位风险区域;红色预警在应力或位移超安全阈值时激活,秒级生成撤离路线并通知管理层。闭环调控集成有限元模型,当监测数据与理论值偏差 $>10\%$ 时,自动反演分析(即利用计算机模型推演原因)并生成施工参数修正方案(挂篮预拱度调整),将预警转化为可执行指令。通过上述机制,智能监测系统不仅实现了风险的即时阻断,更在根源上驱动施工参数的动态优化,形成“数据驱动决策、决策反馈控制”的闭环逻辑,为桥梁施工的安全性与精准性提供了技术保障^[6]。

3 智能检测技术在桥梁施工中的案例应用

3.1 工程背景与适配方案

某南方地区连续刚构桥主跨680 m,采用挂篮悬臂浇筑工艺,施工环境面临严峻挑战:海洋盐雾侵蚀传感器、强台风(最大风速 35 m/s)威胁结构稳定、超大节段(单节段800 t)吊装风险极高。传统监测手段因环境干扰与数据时效性不足,难以满足高精度实时控制需求。为此,该项目引入智能监测技术体系,通过系统性技术适配,实现了全流程数字化管控。该体系以“感知—传输—处理—应用”四层架构为核心,其具体技术流程如图1所示。感知层通过多源传感器实时采集物理参数,传输层依托混合网络完成数据过滤与传输,处理层实现多源数据融合与特征提取,应用层基于BIM平台构建可视化预警系统。

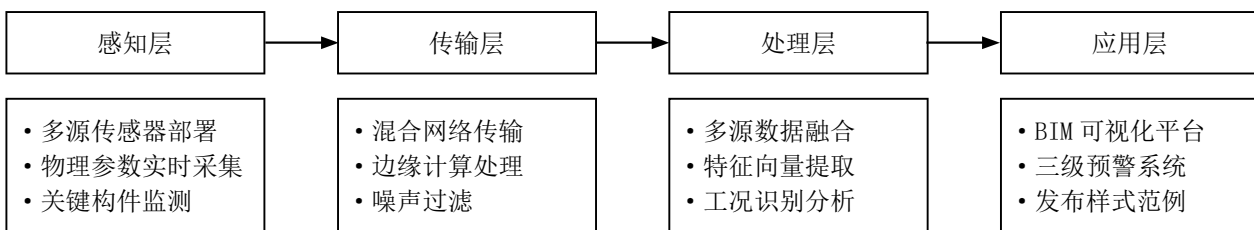


图1 桥梁智能监测技术体系分层架构流程图

项目团队在智能传感网络构建中,针对不同构件特性与环境条件差异化部署传感器:主梁悬臂浇筑段采用振弦式测力计耦合北斗定位终端及双轴倾角仪,形成“索力—位移—倾角”多参数监测网络;钢箱梁焊接节点加密布置光纤光栅应变计,辅以温湿度传感器实时追踪并修正焊接热应力变形;位移监测融合北斗定位与全站仪技术,通过优化算法和动态校准控制空间误差($\pm 3\text{ cm}$);环境参数增设风速仪,结合盐雾腐蚀模型自动补偿信号衰减,实时捕捉涡振临界风速。为提升多源数据的可用性,项目聚焦时空一致性处理:基于UTC时间戳建立统一时间轴,利用动态时

间规整算法对齐异构数据源(同步误差 $<10\text{ ms}$,基于PTP协议时间同步系统及FastDTW算法优化,实验室实测误差 $5\sim 8\text{ ms}$);依托BIM模型统一空间坐标系,通过克里金插值填补缺失数据并滤除振捣噪声。在此基础上,项目团队构建三级融合模型:数据层标准化原始物理量生成特征矩阵;特征层借助主成分分析提炼核心指标;决策层基于贝叶斯网络精准识别挂篮走行、梁体浇筑等典型工况。基于融合数据,动态反馈预警调控机制集成有限元模型实现闭环干预:建立三级预警体系,分别针对单指标异常、连续异常及超阈值风险进行人工复核、工序暂停及秒级撤离;预警触

发后，系统自动反演施工参数偏差，生成修正指令并联动设备执行调整，形成“监测—分析—调控”闭环逻辑。

3.2 综合效益与技术总结

智能监测技术在桥梁施工中的系统性应用，通过“感知—传输—处理—应用”四层架构的闭环逻辑，实现了从数据采集到动态调控的全流程智能化^[7]，其效益在跨海大桥项目中得到充分彰显。在安全管控方面，技术通过三级预警机制实时响应异常指标：黄色预警触发工程师复核，橙色预警自动暂停工序并定位风险源，红色预警秒级生成撤离方案。在质量提升层面，通过全站仪（徕卡 TS60）每 30 分钟自动采集梁体坐标，

施工全程 120 个测点数据显示误差均值为 ± 8.3 mm（标准差 ± 1.7 mm），满足 ± 10 mm 控制目标（《公路桥涵施工技术规范》允许 ± 25 mm），主梁应力监测经振弦式传感器（型号 Geokon 4000）校准，200 次张拉记录显示精度为 $\pm 1\%$ （设计允许 $\pm 3\%$ ）。焊缝热应力识别效率的提升则源于光纤光栅应变计与温湿度传感器的协同部署。施工效率优化依托标准化技术包的输出，包含 15 类构件传感器模板、分工况预警阈值及数据处理代码库，使监测数据自动采集率显著上升，人工巡检频次减少，单节段拼装验收时间压缩，整体工期缩短^[8]。为直观呈现技术应用的量化效益，表 1 对比了传统方式与智能监测技术在核心维度的差异。

表 1 桥梁施工智能监测技术综合效益对比

指标类型	具体指标	传统方式	智能监测技术	提升效果
安全管控	风险事故率	行业基准值	↓ 85%	事故规避能力显著增强
质量提升	梁体线形误差控制精度	± 25 mm	± 10 mm	精度 ↑ 60%
	主梁应力监测精度	$\pm 3\%$	$\pm 1\%$	精度 ↑ 67%
	焊缝热应力识别效率	基准效率（1x）	↑ 3 倍	异常识别速度加快
效率优化	单节段拼装验收时间	6 h	3.5 h	时间 ↓ 42%
	整体工期节省	0 天	20 天	施工周期显著缩短
	人工巡检频次	基准频次（100%）	↓ 60%	自动化替代重复劳动

该技术推动桥梁行业从“事后检测”向“事前控制”转型，通过动态反馈机制（参数自动修正）与施工工艺融合，量化施工参数优化路径，并以数据驱动揭示力学与风险演化规律。其适用于大跨度桥梁及复杂环境（海洋、峡谷等），虽在极端天气传感器稳定性、数据融合算法普适性及初期成本方面仍需持续优化，但其标准化技术包（传感器模板、预警阈值库、代码库）为同类项目提供了高效可复用的智能建造范式，显著降低了技术门槛，有力推动桥梁施工迈入更精准、更智能的新阶段。

4 结束语

本文构建的“感知—传输—处理—应用”四层智能监测架构，通过高精度传感神经、多源数据融合大脑、动态预警调控四肢的协同，实现了刚构桥施工全流程的数字化闭环管控。某南方工程验证其在复杂环境下可实现风险前置预警与参数动态优化，提升安全与质量管控效能。当前技术存在极端天气传感器稳定性不足、数据融合算法泛化能力待提升及初期成本较高等局限。未来研究需深化全生命周期协同、构建 AI 分析平台、推动国产化硬件算法适配及标准化，为桥梁工

程乃至更广阔基建领域的智能化转型升级提供更强大、更包容的技术引擎。

参考文献：

- [1] 周延翔. 智能监测技术在桥梁结构健康评估中的应用研究 [J]. 智能城市, 2025, 11(03): 158-160.
- [2] 雷静瑶. 智能监测技术在道路桥梁养护施工中的应用 [J]. 汽车画刊, 2025(02): 134-136.
- [3] 黄文波, 咸莹. 桥梁智能健康监测技术及应用分析 [J]. 高科技与产业化, 2024, 30(11): 34-35.
- [4] 陈思远. 智能检测技术在桥梁施工中的应用 [J]. 企业科技与发展, 2022(04): 194-196.
- [5] 柏云飞. 智能传感技术在桥梁结构健康监测中的应用研究 [J]. 石河子科技, 2024(03): 55-57.
- [6] 望远福. 桥梁智能健康监测技术与应用现状研究 [J]. 交通世界, 2023(25): 147-149.
- [7] 姚学涛. 智能技术在桥梁抗震监测中的应用 [J]. 集成电路应用, 2024, 41(06): 122-123.
- [8] 张涛. 智能安全检测技术在桥梁施工中的应用 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2023(09): 154-156.