

公路桥梁施工监控及监测技术探讨

曹布尔 沈剑飞

浙江致欣检测技术有限公司 浙江 嘉兴 314000

摘要: 公路桥梁建设中, 施工监控与监测技术至关重要。本文先阐述其核心目标, 包括保障结构安全、控制线形精度、优化施工过程及实现全生命周期管理。接着介绍核心内容, 涵盖结构参数、环境与荷载、施工临时设施监测。再说明技术体系, 有传感器、数据采集与传输、数据分析与处理技术。最后探讨未来发展趋势, 如数字孪生、机器人巡检、智能材料应用及5G与物联网融合。这些技术保障桥梁建设质量与安全, 推动行业进步。

关键词: 公路桥梁; 施工监控; 监测技术; 数字孪生; 智能材料

引言: 公路桥梁作为交通基础设施的关键部分, 其建设质量与安全关乎经济发展与社会稳定。施工过程复杂, 受多种因素影响, 易出现结构安全、线形偏差等问题。传统监控监测方式存在局限性, 难以满足现代桥梁建设需求。随着科技发展, 施工监控与监测技术不断创新, 融合多学科知识, 形成一套完整体系。深入研究这些技术, 有助于提升桥梁建设水平, 保障工程质量和安全, 对推动交通事业发展具有重要意义。

1 施工监控与监测技术的核心目标

1.1 结构安全保障

在桥梁建设过程中, 结构安全始终是首要考量。通过构建多维度的实时监测体系, 对桥梁关键部位的应力分布、整体变形趋势及振动响应特征进行动态追踪, 能够及时发现潜在的结构异常。例如, 在混凝土浇筑阶段, 温度应力与收缩徐变可能导致局部应力集中, 借助分布式光纤传感网络开展应变监测, 结合数值模拟分析, 可提前识别超限风险点。对于钢结构桥梁, 高精度倾角仪与加速度计联合采集角度和加速度数据, 经换算分析后可掌握焊接残余应力释放引发的微小变形规律, 为临时支撑体系的动态调整提供依据。这种全过程的应力-变形协同控制机制, 确保结构始终处于安全阈值范围内, 有效规避倒塌、断裂等灾难性事故。

1.2 线形精度控制

大跨径桥梁的几何形态控制直接关系到行车舒适性与结构耐久性^[1]。采用智能全站仪与激光跟踪仪组成的空间坐标测量系统, 开展主梁线形高精度监测。通过建立三维坐标控制网, 对每节段梁体的空间位置进行实时解算, 结合自适应卡尔曼滤波算法, 有效剔除温度、风荷载等环境因素干扰。在悬臂浇筑施工中, 立模标高的动态修正机制融合理论预拱度与实测变形数据, 确保成桥线形与设计曲线的偏差符合《公路工程质量检验评定标

准》(JTGF80/1-2017)要求, 控制在 $\pm L/5000+20\text{mm}$ 的规范允许范围内。这种基于测量-反馈-修正的闭环控制体系, 为复杂结构工程的几何形态精度提供了技术保障。

1.3 施工过程优化

施工参数的动态调整是提升工程效益的关键环节。通过建立监测数据与有限元模型的实时交互机制, 可对预应力张拉时序、混凝土养护制度等关键工艺参数进行优化。例如, 基于应变监测数据反演分析, 可精确掌握预应力损失发展规律, 为张拉力补偿提供量化依据。在合龙段施工中, 温度场监测与应力平衡计算的耦合分析, 可确定最佳合龙时机与配重方案。

1.4 全生命周期管理基础

施工期监测数据构成桥梁健康档案的核心组成部分。高精度应变、位移等初始状态数据的系统采集, 为运营期结构性能退化评估提供了基准参照。以一座设计使用年限为100年的桥梁为例, 通过建立施工-运营监测数据贯通机制, 可实现结构响应特征的连续追踪, 为疲劳损伤识别、剩余寿命预测等维护决策提供科学依据。这种全链条数据管理模式, 使桥梁全生命周期管理从被动维修转向主动预防, 显著提升了基础设施的运维效能。

2 施工监控与监测技术的核心内容

2.1 结构参数监测

应力与应变监测是解析结构受力状态的关键手段^[2]。光纤光栅传感器可长期布设于主梁腹板等应力集中区域, 实现微应变级精准测量。电阻应变片适用于短期高精度监测场景, 通过惠斯通电桥原理将形变转化为电信号输出。两类传感器协同, 可构建全桥关键截面应力场分布图谱, 为评估结构受力均衡性提供量化依据。变形监测体系融合多源测量技术优势。位移传感器捕捉微米级位移变化, 适用于局部变形监测, 精度达1微米; 激光测距仪利用相位比较法实现非接触式测量, 可覆盖千米

级跨径桥梁挠度监测,范围达1500米;北斗高精度定位系统通过多频点载波相位差分技术,将三维坐标解算精度提升至2毫米,为大型桥梁长期沉降观测提供可靠手段。三种技术互补应用,形成从局部到整体、从静态到动态的变形监测网络。振动特性监测聚焦结构动力响应特征。加速度传感器阵列按空间梯度布设,同步采集多自由度振动信号,通过频谱分析提取结构固有频率与阻尼比。结合模态识别算法,解析振型变化规律,为判断结构刚度退化或潜在共振风险提供动态诊断依据。一般500米跨径桥梁会布设30个加速度传感器监测。该技术对索塔风振、车桥耦合振动等复杂工况具有显著适应性。

2.2 环境与荷载监测

环境参数监测构建结构响应外部驱动模型。分布式温度传感器沿桥梁纵向布设,可实时追踪混凝土水化热释放、日照温差等温度场变化,一般每隔5米布设一个传感器,为温度应力计算提供边界条件。风速仪与风压传感器联合工作,可建立三维风场模型,量化风致振动能量输入。湿度监测数据则用于评估钢材锈蚀速率与混凝土碳化深度,为耐久性设计提供环境参数支撑。交通荷载监测量化移动荷载效应。动态称重系统通过压电石英传感器阵列,可同步获取车辆轴重、轴距及行驶速度,结合视频识别技术实现车型分类统计。压电传感器则以1000赫兹高频采样特性捕捉车辆通过时的冲击效应,为评估施工期临时交通管制效果提供动态数据。两类技术融合应用,可构建施工期交通荷载时程曲线,为结构安全验算提供输入参数。

2.3 施工临时设施监测

支架与挂篮稳定性监测建立双重预警机制。应力监测采用振弦式传感器,通过频率变化反演结构内力状态;变形监测采用连通管式静力水准仪,可实时监测支架沉降差。两类数据经安全系数折减计算后,形成稳定性评估矩阵,当支架应力监测值超过设计容许值850千牛时触发预警,为临时结构加固提供决策依据。基础施工监测贯穿成孔至成桩全过程。成孔垂直度监测采用超声波测斜仪,通过声波反射时差计算孔壁偏移量,其测量精度可达0.1度;孔径监测采用井径仪,以机械臂触探方式获取孔壁轮廓数据,其测量范围可达3米;沉渣厚度监测采用电阻率法,通过泥浆电阻率突变点定位沉渣界面^[3]。支护结构变形监测则采用测斜管与钢筋计组合方案,实时追踪深基坑侧壁位移与支护桩内力变化,确保基础施工安全可控。

3 施工监控与监测技术体系

3.1 传感器技术

光纤光栅传感器凭借光信号传输特性,在大跨度桥梁长期监测中展现独特优势。其抗电磁干扰能力可规避施工机械产生的强电场干扰,耐腐蚀特性则适应海洋环境或化学侵蚀场景。分布式布设方案通过单根光纤串联多个监测点,实现千米级跨度内应变场的连续感知,为结构受力分析提供高密度数据支撑。无线传感网络通过自组织拓扑结构实现中小桥梁的快速组网。低功耗节点集成多类型传感器模块,支持应力、温度、振动等参数同步采集,并通过星型或网状通信协议将数据汇聚至网关设备。这种即插即用特性显著缩短了现场部署周期,特别适用于临时监测或抢修工程场景。北斗/GNSS定位系统为桥梁整体变形监测提供厘米至毫米级精度保障。多频点载波相位差分技术通过消除电离层延迟误差,显著提升复杂地形下的定位稳定性。在跨河桥梁监测中,该技术可同步获取两岸桥墩的三维坐标变化,为评估不均匀沉降或河床冲刷影响提供空间基准。

3.2 数据采集与传输技术

分布式采集网络采用模块化设计理念,通过多节点数据采集单元构建全桥监测覆盖。有线传输通道选用RS485总线协议,其差分信号传输机制有效抑制长距离传输噪声;无线传输则融合LoRa低功耗广域网与5G高速通道,根据监测参数重要性动态分配带宽资源。这种混合组网方式兼顾了数据实时性与系统经济性。边缘计算技术的嵌入使采集终端具备初级数据处理能力。通过部署滑动平均滤波、小波降噪等算法,可在原始数据上传前剔除异常值与高频噪声。部分智能采集单元还集成了特征参数提取功能,直接输出结构响应峰值或频谱能量等关键指标,显著减轻中央服务器计算负荷。

3.3 数据分析与处理技术

多源数据融合技术通过空间对齐与时间同步处理,将异构传感器数据映射至统一分析框架。结合BIM模型的空间拓扑关系,可实现监测值与结构构件的精准关联,为工程师提供三维可视化分析界面。这种虚实映射机制使结构状态评估从单一参数判断转向多维度综合诊断。动态特征提取方法融合传统信号处理与深度学习优势。时频分析算法通过短时傅里叶变换或希尔伯特-黄变换,揭示结构响应的时变特性;LSTM神经网络则通过记忆单元捕捉长序列数据中的演化规律,特别适用于预测结构性能退化趋势。两类方法互补应用,构建起从瞬态响应到长期演化的特征提取体系。异常预警机制采用双层判断逻辑提升可靠性。静态阈值预警基于结构设计容许值设定安全边界,动态预测模型则通过ARIMA时间序列分析或卡尔曼滤波算法,建立结构响应的正常波动范围。

贝叶斯网络通过整合多源预警信号，量化风险发生概率，为运维决策提供量化依据支持。

4 施工监控与监测技术的未来发展趋势

4.1 数字孪生技术深度应用

数字孪生技术将推动桥梁监测向全生命周期管理升级^[4]。通过集成多尺度物理模型与实时监测数据，可构建与实体桥梁动态映射的虚拟镜像。该模型不仅能实时渲染结构在荷载作用下的变形场与应力分布，还可模拟施工过程中的力学状态演变，为优化临时支撑体系或调整浇筑顺序提供可视化决策支持。随着技术持续发展，数字孪生在数据融合与算法优化上不断突破，能更精准地反映桥梁实际状态，随着多物理场耦合仿真技术的突破，数字孪生将进一步融合材料性能退化模型，实现结构剩余寿命的动态预测。

4.2 机器人与无人化巡检

智能巡检装备将突破传统人工检测的时空限制。无人机搭载多光谱相机与激光雷达，可自主规划巡检路径，对桥体表面裂缝、剥落等病害进行毫米级识别，其识别精度可达0.5毫米；无人船配备声呐与水下摄像头，能完成深水区桩基冲刷情况的定期扫描，扫描深度可达50米；爬壁机器人通过磁吸附或负压吸附技术，可沿桥墩垂直面攀爬，对隐蔽部位钢筋锈蚀或混凝土碳化进行原位检测，攀爬高度可达100米。未来，随着人工智能算法的优化，这些装备的自主决策与协同作业能力将更强，三类装备协同作业，可构建覆盖空天地水的立体化巡检网络，显著提升检测效率与安全性。

4.3 智能材料与自修复技术

材料科学与监测技术的深度融合正有力催生主动式结构维护体系，为桥梁健康保障开辟新路径。自感知混凝土通过内置光纤或碳纳米管，可实时感知自身应变与损伤发展，这种独特的感知方式能精准捕捉混凝土内部细微变化，为后续修复提供准确依据，当裂缝宽度超过0.2毫米阈值时自动触发修复机制；形状记忆合金凭借相变特性，能在温度或电刺激下恢复预设形状，用于加固松弛的预应力钢束或调整偏位支座，可提供稳定且强劲的恢复力，满足桥梁结构的力学调控需求；微生物矿化

技术通过诱导特定菌种分泌碳酸钙，可实现混凝土裂缝的自愈，愈合宽度可达1毫米。这些智能材料的应用，将使桥梁具备“感知-诊断-修复”的闭环维护能力，实现从被动维护到主动维护的转变，延长桥梁使用寿命。

4.4 5G与物联网融合

5G通信技术为监测系统注入实时性与可靠性双重保障。其低时延特性可支持毫米级位移监测的动态传输，确保振动响应数据的时间同步精度可达1毫秒；大容量特性允许单基站接入5000个监测节点，满足大型桥梁群的全要素感知需求；网络切片技术则为关键监测数据提供专属传输通道，避免施工机械等外部设备的信号干扰^[5]。未来，5G与物联网融合将更紧密，结合边缘计算架构，5G物联网将实现从数据采集到异常预警的全流程本地化处理，大幅缩短结构安全响应时间，响应时间可缩短至0.1秒。

结束语

公路桥梁施工监控与监测技术历经发展，已形成涵盖多方面的完整体系。从核心目标明确到核心内容细化，再到技术体系构建，各环节紧密相连，为桥梁建设提供有力支撑。数字孪生、机器人巡检等未来发展趋势，为技术发展指明方向。这些技术在实际应用中不断优化完善，有效保障桥梁建设质量与安全，提升运维效能。持续探索创新，推动施工监控与监测技术迈向新高度，对公路桥梁事业长远发展意义重大。

参考文献

- [1]王芳.公路桥梁施工监理实施及其质量监控要点分析[J].运输经理世界,2024(26):68-70.
- [2]明照通.基于激光扫描技术的高速公路桥梁施工监测方法研究[J].建设机械技术与管理,2025,38(5):45-46,61.
- [3]田凯.公路桥梁施工阶段混凝土强度实时监测技术研究[J].时代汽车,2025(4):147-149.
- [4]卢乔.高速公路桥梁改扩建施工监测方案研究[J].建筑技术开发,2023,50(2):116-118.
- [5]吴厚琪.软土地基公路桥梁施工基坑支护沉降监测研究[J].山西建筑,2024,50(6):94-96.