

建筑结构变形监测技术的应用

郑骐¹, 王建², 赵雷², 刘如意², 张亚东(通讯作者)²

(1. 山东高速铁建装备有限公司; 2. 济宁港航建设有限公司)

【摘要】通过协同创新机制、技术标准构建维度, 系统解析该领域的核心驱动力与发展路径。变形监测正从单一测量向智能诊断、从定期监测向实时感知、从事后处置向预先控制的方向深度发展, 这对实现建筑领域的可持续发展具有重要战略意义。

【关键词】建筑结构; 变形监测; 测绘工程; 应用实践

【基金项目】2024年山东省职业教育教学改革研究项目: 人工智能背景下AIGC嵌入建筑结构设计教育的教学创新与实施路径研究, 项目编号H13G600806

中图分类号: TU3; TU196

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2026.03.047

Application of Deformation Monitoring Technology of Building Structure

ZHENG Qi¹, WANG Jian², ZHAO Lei², LIU Ru-yi², ZHANG Ya-dong²

(1. Shandong High-speed Railway Construction Equipment Co., Ltd.; 2. Jining Port and Shipping Construction Co., Ltd.)

【Abstract】Through the construction dimension of collaborative innovation mechanism and technical standard, the core driving force and development path of this field are systematically analyzed. Deformation monitoring is undergoing profound development from single measurement to intelligent diagnosis, from regular monitoring to real-time perception, and from post-disposal to pre-control, which has important strategic significance for realizing sustainable development in the construction field.

【Keywords】building structure; deformation monitoring; surveying and mapping engineering; application practice

1 引言

建筑结构变形监测技术作为建筑全生命期智慧化管理的核心技术, 其创新发展正在深刻重塑建筑领域的价值创造模式与安全治理体系^[1]。其技术体系与应用价值正随着智能感知技术的发展而不断深化, 其核心价值体现在安全运维、设计优化和长效维护三个维度, 具有科学决策和风险控制双重意义^[2]。现阶段, 我国《建筑变形监测技术规程》(JGJ 8-2016) 修订工作已启动, 新增智能监测、区块链存证等章节^[3]。变形监测技术正在从“被动监测”向“主动认知”跃迁, 其深度应用将推动建筑领域向智慧化、韧性化方向转型, 将成为实现城市高质量发展的重要技术支撑^[4]。

2 研究背景

2.1 技术标准与规范体系构建

住房和城乡建设部2023年发布的《建筑结构监测数据标准》(GB/T 51408) 首次规定点云数据LOD分级与应变数据采样频率要求。现阶段, 国际标准化组织(ISO)与中国工程建设标准化协会(CECS)已建立三级规范体系^[5]。基础标准如ISO 19901 海洋结构

监测、GB 50026 工程测量规范。技术方法标准如CECS 298 建筑变形测量技术规程、ASTM D4492 结构健康监测标准。最终通过数据交互标准, 如BIM-IFM 数据接口协议、Sensor ML 传感器标记语言进行模型架构^[6]。通过构建“监测—分析—预警—决策”全流程标准, 实现监测数据误差控制在 $\pm 0.3\text{mm}$ 内。

2.2 多学科协同创新

变形监测技术的突破依赖于“建筑结构+地质工程+智能感知+数据科学”的四维融合体系。

地质—结构耦合机制: 通过地质雷达探测与岩土工程数值分析, 建立“地基→基础→上部结构”的变形传递模型。

物理感知层创新: 光纤传感网络BOTDR(布里渊光时域反射技术)和BOTDA(布里渊光时域分析技术)与量子惯性测量单元的结合, 实现亚毫米级三维形变场重构。

数据科学赋能: 基于数字孪生的多物理场耦合仿真, 融合有限元与机器学习建立预测模型。结合无人机倾斜摄影与SfM(Structure from Motion)算法, 实现大规模建筑群的快速变形评估。

2.3 技术演进与未来挑战

2.3.1 面临挑战

多源数据融合:多物理场耦合作用下的变形机理认知不足。不同技术的数据格式、精度和采样率差异导致融合困难。

实时性与成本平衡:高精度传感器网络部署成本高,低功耗无线传输技术需突破。

复杂环境干扰:城市多路径效应影响 GNSS 精度,恶劣天气限制无人机作业。

跨尺度数据融合的技术瓶颈(从宏观变形到微观材料损伤的关联分析)。

2.3.2 当前技术

智能感知网络:5G+北斗+物联网构成的天—空—地一体化监测系统。

认知计算框架:混合现实与数字孪生驱动的交互式诊断系统。

韧性设计反馈:基于变形数据的结构拓扑优化算法。

3 基于结构工程的测绘技术

3.1 测绘技术分析

3.1.1 传统测绘技术

全站仪:通过角度和距离测量获取三维坐标,适用于局部高精度变形监测(如柱、梁节点位移)。

水准仪:测量高程变化,常用于沉降监测,精度可达毫米级。

收敛计:用于隧道或狭窄空间内的位移测量,通过钢尺或光纤监测变形量。

3.1.2 现代遥感技术

三维激光扫描(LiDAR):通过密集点云数据构建建筑三维模型,对比多次扫描结果分析整体变形趋势,适用于历史建筑、大跨度结构监测。

合成孔径雷达干涉测量(InSAR):利用卫星雷达影像探测地表毫米级形变,适合大区域建筑群沉降监测(如城市地面沉降对建筑的影响)。

无人机摄影测量:结合倾斜摄影和正射影像生成高分辨率三维模型,高效覆盖复杂建筑外立面变形监测。

3.1.3 传感器网络技术

光纤光栅传感器:通过光信号波长变化感知应变和温度,抗电磁干扰,适用于长期埋入式监测。

加速度计与倾角仪:实时监测振动频率和倾斜角度,用于高层建筑风振、地震响应分析。

GNSS(全球导航卫星系统):通过高精度定位监测建筑物整体位移,适用于超高层或大跨度结构。

3.1.4 图像处理技术

数字图像相关(DIC):通过对比变形前后图像特征点位移计算应变场,适用于实验室模型或局部表面变形分析。

深度学习辅助分析:利用卷积神经网络(CNN)自动识别裂缝、倾斜等异常特征,提升监测效率。

通过上述技术,精准匹配技术特性与工程需求,现代测绘技术正推动建筑监测从“事后处置”向“智能预防”跨越。而随着智能化、微型化技术的突破,建筑结构健康监测将更加高效、精准,为城市安全与可持续发展提供坚实保障。

3.2 实践建议

①技术选型原则:根据建筑类型,变形类型及精度需求选择组合方案。短期应急监测侧重快速响应,长期健康监测需兼顾稳定性。

②标准化流程:建立基准网→布设监测点→多期数据采集→变形分析→阈值预警→报告生成。须遵循《建筑变形测量规范》(JGJ 8-2016)等标准,确保数据可比性。

③跨学科协作:测绘工程师与结构工程师、数据科学家联合建模,结合力学分析解释变形成因(如荷载变化、地基软化)。

4 全周期监测技术

4.1 全生命周期测绘技术体系

如表 1 所示,建筑结构全周期监测测绘技术体系是贯穿建筑全生命周期(规划—设计—施工—运维—改造)的动态管理框架,其核心价值在于实现“时空连续、数据贯通、智能决策”。

表 1 全周期监测技术配置策略

建筑阶段	监测重点	技术方案	精度要求
规划阶段	地质稳定性评估	InSAR+地质雷达	±1mm

续表

建筑阶段	监测重点	技术方案	精度要求
设计阶段	结构性能验证	FEM 仿真+风洞试验数据耦合	±1mm
施工阶段	模板沉降、支撑变形	自动化全站仪+无线倾角仪	±1mm
竣工初期	收缩徐变、地基固结	三维激光扫描+静力水准仪	±0.5mm/30m
运营阶段	疲劳损伤、环境侵蚀	FBG 传感器网络+无人机热成像	±0.1℃/±2με
改造阶段	结构体系转换应力	DIC+微震监测	±5με/±0.01g

通过开发多模态数据融合算法,解决从宏观地质运动到微观材料损伤的尺度跨越问题。结合智能诊断技术,构建变形机理知识图谱,支持从数据异常到物理成因的推理决策。通过建立监测数据所有权与隐私保护框架,符合 GDPR 等国际标准。

4.2 协同应用案例

4.2.1 高层建筑监测

组合方案:GNSS(整体位移)+光纤光栅(核心筒应变)+无人机(外立面裂缝)。

4.2.2 地质灾害预警

组合方案:InSAR(区域沉降趋势)+地面激光扫描(滑坡体精细变形)。

4.3 未来技术融合方向

5G+边缘计算:实现 GNSS 与 LiDAR 数据实时融合,将处理延迟从小时降至分钟级。

AI 自动化分析:深度学习算法自动识别 InSAR 相位解缠错误,准确率提升至 95% 以上。AI 算法(如迁移学习)优化数据处理流程,实现变形趋势预测与异常预警。

微小型化传感器:MEMS 激光雷达重量降至 200g,可集成到消费级无人机。MEMS 传感器与 5G 网络结合,构建低成本分布式监测系统。

数字孪生集成:测绘数据与 BIM、有限元模型动态耦合,模拟结构性能退化过程。

多平台协同:卫星—无人机—地面传感器协同监测,形成“空—天—地一体化”监测网。

4.4 突破路径

成本控制:低功耗 LPWAN 技术使单传感器年能耗成本降低明显,如采用 LoRa 组网,系统总造价也

降低显著。

人才转型:培养具备 BIM+GIS+数据分析能力的复合型人才,引入土木工程师学习 Python 数据处理可使报告效率提升 3 倍。

5 技术本质的三重解构

时空感知革命:突破传统离散测量模式,构建空天地一体化监测网络,如上海中心大厦集成 GNSS、光纤传感与 BIM 技术,实现毫米级三维形变场动态捕捉,将监测频率提升至秒级响应。

数据范式转型:通过边缘计算与区块链技术实现数据确权存证,某跨海大桥项目构建分布式账本,确保百万级监测数据的溯源可信度提高,为结构健康评估提供司法级证据链。

认知决策升级:开发混合现实诊断系统,将数字孪生与物理监测深度融合。深圳宝安国际机场通过 MR 眼镜实现变形场可视化诊断,使结构评估效率提升 4 倍,误差率降至 0.3% 以内。

未来阶段,通过数字孪生与区块链结合技术,建立不可篡改的监测数据链,此技术演进不仅改变着建筑运维方式,更推动着从“建造物”到“智能体”的认知革命——建筑正在成为能感知、会呼吸、可进化的城市生命体。

6 结语

测绘技术作为建筑结构变形监测的核心手段,在数据采集、分析和可视化方面发挥着关键作用。通过不断推动数字化测绘技术的应用和发展,可为经济社会发展提供更加全面、精准的信息支持,推动测绘地理信息事业的蓬勃发展。

参考文献

[1] 詹陈耀. 桥梁工程测量中的结构变形分析技术[J]. 工程与建设, 2024, 38 (6): 1395-1397.
[2] 邹晓磊. 深基坑支护结构变形监测的工程测量标准化关键技术[J]. 大众标准化, 2024 (21): 51-53.
[3] 吴国峰. 智能建筑幕墙施工结构变形监测技术研究[J]. 绿色建造与智能建筑, 2024 (9): 62-64+68.
[4] 陈庆华. 建筑结构变形监测中的测量技术与方法[J]. 工程与建设, 2024, 38 (3): 680-683.
[5] 刘燕萍, 程效军, 贾东峰. 不同结构建筑的测绘与建模[J]. 河南科学, 2010, 28 (2): 194-197.
[6] 付仁俊. 建筑工程测量对工程质量的作用和意义[J]. 住宅与房地产, 2019 (9): 185.