

高层建筑工程变形监测测绘方法与实践

张建国* 白冰洋

西安建筑科大工程技术有限公司, 中国·陕西 西安 710000

摘要: 高层建筑的变形监测工作, 是保障建筑整体结构安全的重要环节, 本研究以无人机摄影测量和三维激光扫描的协同监测方式为核心研究对象, 结合 2025—2026 年最新的工程实测数据与相关技术成果, 整理出三项可落地应用的实践方案, 分别是基准点的空天地一体化布设方案、多源监测数据的交叉验证机制、监测频率的动态调整规则。本研究遵循“空中面状覆盖、地面定点高精、数据互为校核”的协同工作逻辑, 希望能够为高层建筑全生命周期的变形监测工作, 提供实用的技术参考依据。

关键词: 高层建筑; 变形监测; 无人机航测; 三维激光扫描; 多源数据融合

Methods and Practices for Deformation Monitoring and Surveying of High-Rise Building Projects

Zhang Jianguo*, Bai Bingyang

Xi'an University of Architecture and Technology Engineering Co., Ltd., China Shaanxi Xi'an 710000

Abstract: The deformation monitoring of high-rise buildings is an important part of ensuring the overall structural safety. This study focuses on the collaborative monitoring approach using drone photogrammetry and 3D laser scanning. By combining the latest engineering measurement data and relevant technical results from 2025–2026, we have put together three practical, implementable solutions: an integrated aerial-ground setup for reference points, a cross-validation mechanism for multi-source monitoring data, and dynamic adjustment rules for monitoring frequency. This research follows a collaborative workflow of "aerial area coverage, precise fixed ground points, and mutual data verification," aiming to provide practical technical guidance for deformation monitoring throughout the lifecycle of high-rise buildings.

Keywords: High-rise buildings; Deformation monitoring; Drone photogrammetry; 3D laser scanning; Multi-source data fusion

0 引言

高层建筑在施工荷载叠加、地基土体固结、环境温度变化等多种因素的共同作用下, 会产生能够被观测到的沉降、倾斜等变形现象; 当建筑累积的变形数值超出设计允许范围时, 建筑整体的结构安全就会受到威胁。《建筑变形测量规范》(JGJ 8-2016) 中有明确规定, 一级建筑的沉降监测精度需要达到 ± 1.0 毫米, 这一标准也对建筑变形监测的技术方法, 提出了较为严格的施工要求。近两年来, 无人机摄影测量技术与三维激光扫描技术逐步成熟, 给高层建筑变形监测工作带来了全新的技术思路。郑勇峰等人的研究提出了空天地技术融合的监测方法^[1], 该方法是以北斗/GNSS 设备搭建基准点位, 结合阵列工业相机视准线监测技术增设监测点位, 对应的实验结果可以看出, 技术融合后的水平位移中误差为 4.2 毫米, 垂直位移中误差为 6.7 毫米。刘震通过相关试验研究发现^[2], 把移动三维激光扫描技术应用在超高层建筑地基基础静载变形检测工作中, 各段距离的观测值误差都不会超过 1 毫米, 整体测量精度

表现良好。在实际工程应用中, 现有技术指标和工程实际需求之间, 存在着需要协调优化的差距——无人机摄影测量可以有效捕捉建筑“面”层面的整体变形趋势, 但是监测精度会受到控制点布设质量的影响, 三维激光扫描能够精准采集建筑局部的变形细节, 却存在监测覆盖范围有限的问题。因此, 如何结合两种技术的应用优势, 弥补单一技术的作业短板, 是本文重点探讨的内容。

1 基准网络的空天地一体化布设

1.1 北斗/GNSS 基准点的深埋与复测

在建筑楼宇密集的城市城区中, 基准点会受到施工振动持续作用、区域地表沉降牵连的双重干扰, 点位稳定性容易受到影响。郑勇峰等的研究成果, 为基准点布设工作提供了可行的技术思路, 该研究依托北斗/GNSS 设备的高精度定位功能, 搭建出稳定性较强的空间参考框架。针对高层建筑的监测场景, 相关人员可以在建筑基坑正式开挖施工前, 在施工影响区域以外的位置, 布设 3-4 个深埋式基准点, 布设位置需要距离基坑边缘至少 3 倍开挖深度。

基准桩基需要穿透表层杂填土，嵌入原状土层的深度不低于1.5米，点位顶部需要安装强制对中螺杆，保障定位精度。整体监测周期，主要包含建筑施工阶段和运营前三年阶段，工作人员需要每6个月对基准点高程开展一次复测工作，以此核验基准点位的整体稳定性。刘震的相关研究进一步验证了移动三维激光扫描技术的监测精度可以满足基准核验需求，该技术应用于超高层建筑地基基础静载变形检测时，各段距离观测误差均不超过1毫米，具备极高的测量精度，能够为基准点的稳定性检测工作，提供可靠的技术支撑。

1.2 监测点的靶标化设计与可识别优化

在常规的建筑变形监测作业中，工作人员一般会在建筑外立面粘贴小型反光贴片作为监测点位，这类普通贴片在无人机拍摄的影像画面中，很难实现自动化识别，后续的数据处理工作，需要投入大量的人工操作，整体作业效率偏低。本研究提出一项低成本的优化方案：将传统监测点位改造为“黑白同心圆靶标”样式，靶标外径设置为10厘米，内径设置为3厘米；该类靶标图案具备旋转不变的特性，和混凝土、幕墙等建筑外立面材质能够形成鲜明的色彩对比，方便AI算法自动提取影像中的点位坐标。与此同时，改造后的靶标，也可以作为地面三维激光扫描的靶标使用，激光照射在黑白交界位置时，会产生强烈的回波信号，能够辅助工作人员完成点云数据的配准工作。单个物理监测点位，可同时适配两种监测设备的数据采集工作，是实现多技术协同监测的重要基础。

表1 不同监测点标识方案的适用特征对比

标识类型	影像可识别距离(米)	激光回波强度	自动化提取方式
普通反光贴片	30-50	中	人工选点
黑白同心圆靶标	80-120	强	自动识别
角反射器	200以上	极强	自动识别

数据来源：根据文献[1][3]技术方案及现场测试整理

角反射器的布设成本相对较高，单个设备的成本大约在500-800元之间，适合布置在建筑重点监测断面，每栋建筑布设3-4个即可；黑白同心圆靶标几乎没有额外成本，能够大面积布置在建筑监测点位上，适配大范围监测作业。

2 多源监测数据的协同采集与交叉验证

2.1 无人机摄影测量的面状覆盖策略

无人机摄影测量技术具备大范围检测的优势，单次飞行作业就能够完整采集整栋建筑的外观信息，搭载高清摄像设备的无人机，按照预先规划好的飞行路线前进，依托倾斜拍摄的模式，能从多个不同角度同步拍摄建筑影像，

完成空中三角加密运算处理后，就能生成建筑实景三维立体模型，间隔固定时间段重复开展飞行拍摄作业，对比前后两次生成的模型形态，便可算出建筑产生的形变数值。郑勇峰等人开展的试验工作得出结论，多种技术融合运用之后，水平位移测算误差为4.2毫米，垂直位移测算误差为6.7毫米，测量精度可以满足毫米级别形变监测的标准要求，实际开展现场作业时，一般选定建筑主体结构封顶阶段，作为首次拍摄建模的基准时间，往后每间隔三个月时间，或是建筑向上修建五层结构之后，再次启动飞行拍摄工作，无人机飞行高度需要保持统一，高度浮动差值不能超出5米，保障多次拍摄的观测角度大致相同，减少视角偏差带来的测算误差。

2.2 三维激光扫描的点位高精采集

无人机摄影测量可以掌握建筑整片区域的形变走向，三维激光扫描技术则能够精准测算单个点位的细微形变数值，作业人员手持扫描设备，或是把设备固定架设起来，能够快速收集建筑室内外高密度点云信息，单处位置扫描耗时不会超过三分钟，每平方米范围内能够采集数千个点位数据。刘震的相关研究，验证出三维激光扫描技术在建筑形变检测工作里的实际运用效果，设备实测距离误差均稳定在1毫米之下，设备整体测算精准度表现良好，工作人员可以在建筑承重立柱、剪力墙墙体、沉降缝隙两侧位置安放扫描标记靶标，每次扫描作业记录下特征点位的三维坐标参数，对照往期留存的坐标数据，就能推算出局部位置的形变幅度，周命端等人总结出依托激光雷达点云测算高层建筑倾斜程度的运算方式，也为该项检测工作提供了对应的技术支撑，借助这套算法可以精准算出建筑倾斜角度^[3]。对比无人机摄影测量手段，三维激光扫描设备能够统计点位绝对坐标参数，不只是测算相对位置变化，设备运行状态也不会被光照环境干扰，设备存在的不足就是观测视野存在局限，很难完整获取建筑楼顶以及高层区域的全部信息。

表2 无人机摄影测量与三维激光扫描的技术特征对比

技术指标	无人机倾斜摄影	地面三维激光扫描
单次覆盖范围	整栋建筑+周边区域	单侧立面或内部1-2个房间
位移测量精度	水平4.2mm / 垂直6.7mm	优于1mm
单次作业时间	15-20分钟	30-60分钟
主要产出成果	整体变形场、三维模型	关键节点变形量、裂缝宽度

数据来源：文献[1][2]实验数据综合

2.3 两种数据的交叉验证机制

两套独立监测设备得出的检测结果相互对照，能够有

效提升最终结论的可靠程度, 实际现场作业期间, 无人机摄影测量、三维激光扫描收集到的数据, 偶尔会出现数值不统一的情况, 这类数据偏差, 也能够反馈出建筑形变的实际状态。现场处理这类数据差异时, 可以将地面三维激光扫描的统计结果当作参照标准, 这类数据的绝对测算精度更有保障, 一旦两类设备得出的形变数据差值超出3毫米, 工作人员先要核查无人机采集的数据质量, 依次核对像控点位布置布局、空中三角加密运算状态、模型拼接匹配效果等内容, 要是无人机相关数据不存在异常问题, 数据偏差大概率代表建筑出现不均匀形变现象, 无人机影像能够反映整片区域的形变整体趋势, 激光扫描可以锁定单个点位的具体形变数值, 两项数据出现差距, 也能体现出建筑不同位置形变幅度的梯度变化情况。高奎英等人的研究内容, 能够为多尺度数据核对工作提供参考思路^[4], 研究人员针对神东矿区地表沉降状况开展监测作业, 对照无人机激光雷达差分数据、卫星位移追踪数据可以发现, 沉降幅度偏小的区域, 卫星位移追踪技术测算结果更为准确, 沉降幅度偏大的区域, 无人机激光雷达技术检测效果更占优势, 该类现象能够说明, 各类监测技术应对不同形变幅度场景, 各自拥有适配优势, 作业人员需要结合监测区域实际形变特点, 挑选主要使用的监测手段。

3 监测频率的动态调整与数据管理

3.1 从固定周期到触发式监测

传统监测工作都会按照固定时间间隔推进, 建筑施工阶段每周开展一次检测, 建筑封顶完工之后, 调整为每月检测一次, 这种统一化的监测模式存在两处明显弊端——建筑形变速度缓慢的阶段, 固定检测频次会消耗多余人力物力, 建筑形变速度突然加快的阶段, 固定间隔又容易漏掉关键形变数据。对此, 相关人员应灵活调整监测频次, 参照上一轮统计得出的形变数据, 重新规划下一次的检测间隔时长, 实际操作环节中, 可以划分三项数值界限, 形变速度每月低于0.5毫米划为安全区间, 形变速度处于每月0.5毫米至1.5毫米之间划为关注区间, 形变速度每月超出1.5毫米划为预警区间, 监测数值落在安全区间内, 检测间隔可以拉长至两个月, 数值进入关注区间, 检测频次缩短至十五天一次, 一旦达到预警区间标准, 立刻开启每日不间断监测模式, 同时把相关异常情况上报对应管理部门。想要顺利落实这套监测调整规则, 就需要搭配简易的数据统计系统, 系统可以自动核算每期形变变化速度, 和预设数值界限展开比对, 同步生成后续的监测工作安排表, 高层建筑监测项目整体耗时较长, 普遍维持在三至五

年, 搭建这类小型系统投入的成本, 能够依靠人力成本缩减逐步抵消。

3.2 环境因子的校正处理

温度变化带来的影响具备代表性, 钢结构建筑所处环境温度差达到20℃时, 按照 $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 的线膨胀系数计算, 每百米建筑结构就会产生24毫米左右的伸缩形变, 该类形变幅度已经超过规范设定的累计沉降允许范围, 没有针对温度影响做出修正处理, 监测系统就会错误判定建筑出现异常形变问题。对此, 现场工程作业可以采用对应修正方式, 在建筑关键断面位置安放温度感应设备。也可以调取楼宇自控系统内部留存的气温记录, 整理每次监测时段的环境温度数据, 把历次形变数值和温度数值做线性关联分析, 算出温度变化和建筑形变之间的对应比例, 用现场实测形变数值扣除温度造成的伸缩变化, 得到建筑真实产生的结构形变数据, 只有真实形变数值触碰预警界限时, 才启动对应的应急处置方案。

3.3 长期数据的基准更新策略

监测工作开展的时间越久, 基准点位自身发生位移变动的可能性就会不断增加, 就算前期埋设深埋式基准点位, 整片区域的地表沉降现象, 依旧会带动基准点位出现位置偏移, 杜钊锋等人针对华北平原开展调研分析^[5], 发现长年累积形成的地表沉降问题, 已经逐步演变成突出的地质环境隐患。长时间开展监测的工程项目, 必须定时复测基准点位状态, 采用滚动更新基准的处理方式会更加贴合现场实际, 每间隔半年时间, 对全部基准点位统一开展水准联动测算, 统计各个基准点位和点位群组平均高程之间的偏移幅度, 单个基准点位累计偏移数值超过 ± 2 毫米, 就将该点位判定为不稳定点位, 后续监测收集到的数据, 依照其余状态稳定的基准点位重新换算统计, 监测报告当中也要标注基准点位调整的具体情况, 保障所有监测数据都能够溯源核对。运用这类处理办法, 不用每次监测都重新测算绝对高程数值, 只需要半年时间借助高精度水准仪, 完成闭合线路的测量工作即可, 百米高度的高层建筑, 选取三处基准点位搭配六处监测点位组成测量环线, 两名测量工作人员半天时间就能够完成全部测算任务, 整体作业产生的成本也处于合理范围。

4 结语

高层建筑形变监测相关工作, 正在逐步脱离单点取样、固定周期、人工操作的传统模式, 朝着全域摸排、灵活调整、智能测算的方向不断发展, 无人机摄影测量技术, 可以快速获取建筑整体区域的形变分布情况, 三维激光扫

描技术,能够精准统计关键结构点位的细微形变参数,可两项技术相互搭配运用,形成大范围整体摸排、单点精细测算、数据互相核验的完整作业体系。

参考文献:

- [1] 郑勇峰,刘岭,莆杰艺等.基于空天地技术融合的变形监测自动化方法研究[J].自动化技术与应用,2025,44(10):12-16+124.
- [2] 刘震.超高层建筑地基基础静载变形检测技术研究[J].中国建筑金属结构,2025,14(55):57.
- [3] 周命端,覃钰涵,宋峤等.利用激光雷达点云的高

耸建筑安全倾斜监测算法[J].测绘科学,2026,51(01):98-107.

[4] 高奎英,都伟冰,陈建华等.OT技术联合无人机LiDAR在矿区地表沉陷监测中的应用研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2025,44(1):80-87.

[5] 杜钊锋,李国鹏,刘站科等.国家重点沉降区域多监测手段综合分析[J].测绘学报,2025,54(3):481-492.

作者简介:*通讯作者:张建国(1990-),男,汉族,甘肃白银人,本科,助理工程师。