

精密工程测量技术在高耸结构变形监测中的精度控制研究

张雅妮

乌审旗国有工程服务有限公司 内蒙古 鄂尔多斯 017300

摘要：高耸结构变形监测精度直接关乎建筑服役安全。本文依托精密工程测量技术，阐述GNSS北斗、测量机器人、静力水准等监测技术的工作原理与适配特性，系统梳理设备、环境、数据处理等多维度误差来源，建立误差建模与精度评估体系。通过落实全流程精度控制策略，结合超高层工程实践验证，有效优化监测精度，可为高耸结构变形监测质控与安全运维提供可靠技术支持。

关键词：精密工程测量技术；高耸结构变形监测；精度控制

引言：现阶段超高层、大型高耸构筑物建设规模持续扩大，结构受温度、风力、荷载作用易产生各类变形，精准监测是规避结构安全风险的关键。高耸结构监测工况复杂，单一测量技术存在精度局限，多源误差易导致监测数据失真。为提升监测精准度，本文围绕精密工程测量技术展开研究，分析变形监测精度影响因素，制定系统化精度控制方案，依托工程实例验证方案可行性与应用效果。

1 高耸结构变形监测与精密工程测量技术基础

1.1 高耸结构变形特征与监测精度要求

(1) 高耸结构典型变形类型可细分为静态变形、动态变形与长期蠕变变形三类。静态变形主要包括地基不均匀沉降引发的竖向位移和结构整体倾斜；动态变形表现为风振偏移、温度形变等短时复变响应；长期蠕变则反映材料在持续荷载下的时效性变形演化规律。(2) 变形影响因素涵盖环境、施工及结构自身三方面。环境因素中，温度变化引起结构热胀冷缩，风力主导动态偏移幅值，雨雪增加附加荷载；施工因素包括浇筑偏差与施工荷载不均衡；结构自身因素涉及材料蠕变特性及内力重分布，各类因素耦合作用加剧变形复杂性^[1]。(3) 分级监测精度标准需依据结构高度、用途及服役年限综合确定。常规高层结构变形监测精度宜控制在毫米级($\pm 1\text{mm} \sim \pm 3\text{mm}$)，超高层及重大基础设施工程应达到亚毫米级($\pm 0.1\text{mm} \sim \pm 0.5\text{mm}$)，并严格遵循《工程测量规范》(GB50026)及《建筑变形测量规程》(JGJ8)等相关标准。

1.2 主流精密工程测量监测技术原理

(1) GNSS/北斗精密监测技术基于载波相位差分定位原理，通过基准站与监测站同步观测卫星信号，解算

三维坐标变化。其优势在于全天候、自动化、连续实时动态监测，特别适用于高耸结构大范围、长周期的变形趋势分析。(2) 测量机器人自动化监测技术依托全站仪自动照准与角度距离精密测量功能，实现对监测点的高频次重复观测。其近距离(一般小于500m)、高精度(测距精度亚毫米级)特性，适用于结构关键部位局部微小变形的高密度跟踪监测。(3) 静力水准与倾角监测技术中，静力水准仪通过连通管内液面变化传递各测点沉降量，精度可达 $\pm 0.1\text{mm}$ ；倾角仪利用MEMS或力平衡传感原理测量姿态角变化，分辨率优于 0.001° 。两者分别适配竖向沉降与整体倾斜的精准连续监测。(4) InSAR遥感监测技术利用合成孔径雷达复图像对的相位差提取地表形变信息，可实现对高耸结构大范围、长时序的宏观变形反演，空间分辨率达米级至亚米级，形变精度达毫米级。

1.3 精密测量技术适配性与精度特性分析

(1) 精度优势：GNSS/北斗适于低频动态与长期静态监测，水平 $\pm 2.5\text{mm}$ 、垂直 $\pm 5\text{mm}$ ；测量机器人静态点位 $\pm 0.5\text{mm}$ ，动态跟踪精度下降；静力水准短期沉降 $\pm 0.1\text{mm}$ ，长期稳定性优异；InSAR单次精度 $\pm 3 \sim 5\text{mm}$ ，适于大尺度形变场识别。(2) 局限：GNSS/北斗受高楼遮挡及多路径影响；测量机器人因大气折射和温度骤变导致测距误差增大；静力水准受液体蒸发与温差干扰；InSAR受大气延迟和时空失相干制约，精度退化明显。(3) 多技术融合互补优势：GNSS/北斗提供绝对基准与宏观趋势，测量机器人补缺局部细节，静力水准与倾角实现高敏感部位连续姿态感知，InSAR保障大范围空间覆盖。多源数据协同融合可显著提升监测系统可靠性、鲁棒性与整体精度，为高耸结构高精度监测奠定基础。

2 高耸结构变形监测精度误差来源与建模分析

2.1 监测设备系统误差分析

(1) 观测设备固有误差源于制造工艺与校准基准偏差。全站仪视准轴误差、水平轴倾斜误差及垂直轴偏差直接劣化角度观测精度；水准器零点残余误差造成高程基准系统性偏移；GNSS接收机天线相位中心偏差(PCO/PCV)随卫星高度角变化引入毫米级定位误差。该类误差具规律性强、可重复性高的特点,需通过出厂标定参数予以校正。(2) 设备安装布设误差直接影响初始基准可靠性。监测点位布设偏移导致测站点坐标传递产生系统偏差;棱镜、天线固定不稳固将引入随机摆动误差,尤其在风振环境下表现显著;传感器安装倾斜致使感测方向偏离设计轴线,倾角监测中初始姿态标定误差将整体偏移后续变形量值,严重影响数据可比性^[2]。(3) 设备老化与运维误差随时间累积逐步凸显。光学镜头镀膜老化、水准管气泡灵敏度下降、电子元件温漂加剧,导致测量重复性逐步劣化;校准周期延长或标定参数未及时更新,系统误差漂移持续嵌入长期观测序列,降低变形趋势判断可信度,需建立定期检定与维护制度予以管控。

2.2 外界环境干扰误差分析

(1) 大气环境误差主要通过改变信号传播路径影响测量精度。大气折光系数变化导致全站仪测距测角产生系统性偏差;气压、湿度及温度梯度影响光波与微波传播速度,GNSS对流层延迟模型残差可达数毫米至数厘米;强风导致仪器基座微振动引入高频随机噪声,恶化观测信噪比。(2) 温度形变误差源自结构热胀冷缩效应与设备热敏感性。昼夜温差可使百米级高耸结构顶端产生厘米级热致位移,与荷载变形叠加难以分离;同时温度变化改变电子元件输出特性及金属尺胀缩,直接引入测值漂移,需辅以温度补偿模型予以修正。(3) 外界荷载干扰误差表现为突发性短时变形扰动。施工荷载、脉动风荷载及邻近车辆振动等动态激励诱发结构瞬时弹性振动,其频率通常高于常规监测采样率,若未有效滤除则混入静态观测序列,造成变形特征误判。

2.3 数据采集与处理误差分析

(1) 人工观测误差集中于操作规范性与视觉判断偏差。全站仪照准目标时视线偏心引入对中误差,水准读数时估读精度受限,观测时序安排不合理引入系统性偏差,需通过多测回观测与严格操作规程加以控制。(2) 数据采集时序误差表现为采样频率不足与多传感器同步性差。采样率若低于结构自振频率2倍,动态变形信息严重丢失;不同设备时钟源不统一导致多源数据融合时间基准失配,需建立统一授时与同步触发机制。(3) 数据

处理算法误差涉及模型选择与参数估计合理性。传统滤波算法虽能平滑噪声但易削峰填谷,损失真实变形极值信息;异常值剔除准则设置不当可致有效数据误删或粗差漏检;参数平差模型偏差直接导致点位精度评定失真。

2.4 监测误差数学建模与精度评估

(1) 各类误差量化建模针对不同误差源建立差异化数学表达。系统误差通过多位置观测、差分校正或附加参数平差建模;环境误差借助实测气象参数构建折射修正函数或温度补偿模型;随机误差用正态分布或稳健统计描述其统计特征。(2) 综合误差叠加分析揭示多源误差耦合机制。线性叠加适用于误差源相互独立情形;存在相关性时需引入协方差传播律构建综合误差协方差矩阵,据此明确综合误差的空间分布规律与量级范围,为误差分配提供依据。(3) 监测精度评估指标体系以中误差(m)、相对误差($K = m/L$)、极限误差($\Delta_{\max} = 2m$ 或 $3m$)为核心指标。中误差反映成果离散程度,相对误差评价精度与变形量级匹配关系,极限误差判定数据有效性及异常识别阈值,三者构成完整精度判定标准,规范数据处理与质量控制全过程。

3 精密工程测量技术在高耸结构变形监测中的精度控制策略与工程应用

3.1 设备与布设环节精度控制

(1) 设备选型与校准管控需依据监测场景精度要求匹配适宜设备。超高层顶部大位移选用GNSS(静态水平精度 $\pm 2.5\text{mm} + 1\text{ppm}$),局部微变形选用测量机器人(测距 $\pm(0.6 + 1 \times 10^{-6}D)\text{mm}$),竖向沉降采用静力水准仪($\pm 0.1\text{mm}$)。建立定期校准制度,全站仪每半年送检、GNSS接收机每年标定天线相位中心,源头控制系统误差。(2) 监测点位优化布设应结合结构变形特征综合设计。控制点选设于稳定基岩或深埋基准桩,避开塔吊摆动区与强电磁干扰;监测点沿高度分层布置,重点布设于加强层、转换层及顶部自由端,确保相邻测站通视良好,高度角 15° 以上无遮挡^[3]。(3) 设备安装标准化管控通过规范流程消除布设精度损耗。棱镜、天线采用强制对中装置固定,安装偏差控制在 $\pm 0.5\text{mm}$ 以内;倾角传感器精密调平,初始姿态标定误差不超过 0.005° ;安装完成后进行现场校核与初始值测定,形成验收记录。

3.2 环境干扰误差抑制与修正

(1) 大气误差修正模型应用是抑制环境误差的有效手段。全站仪测距引入温度(t)、气压(P)、湿度(f)实时修正公式消除大气折射影响;GNSS解算中嵌入Saastamoinen或GPT2w对流层模型,结合实测气象参数对天顶干湿延迟进行实时校正;同步布设气象传感器

以1min采样间隔记录环境参数,确保修正模型的时效性与准确性。(2)温度形变误差分离技术通过时序回归建模实现。利用长期连续监测数据建立结构温度-变形回归方程,以季节周期(365天)及日周期(24小时)为基函数,采用谐波分析或小波变换提取温度相关形变分量,将热胀冷缩引起的周期形变与真实受力变形有效分离,避免将热致位移误判为结构安全隐患^[4]。(3)动态干扰滤波处理采用自适应算法剔除瞬时扰动。引入卡尔曼滤波与小波阈值去噪组合方法,根据信号特征自动调节滤波参数,有效分离风振、施工冲击等高频弹性振动与准静态真实变形;设定动态位移阈值(取3倍中误差),超限数据自动标记并进入人工复核流程,确保动态监测数据可靠性。

3.3 数据采集与处理精度优化

(1)标准化数据采集流程确保观测条件与方法的一致性。制定涵盖观测时序(固定每日清晨与傍晚低风期观测)、采样频率(GNSS1Hz、全站仪每5min自动观测一轮、静力水准每分钟采样)、观测角度(全站仪采用盘左盘右双测回取平均)的操作规范,自动化监测与人工季度复核执行统一作业标准。(2)异常数据智能剔除采用多准则组合判别算法。基于拉依达准则(3σ)、中位数绝对偏差法(MAD)及Pauta变点检测算法综合识别粗差,辅以滑动窗口局部离群因子(LOF)判断异常模式,有效区分突发变形事件与数据错误,保障监测序列的连续性与真实性^[5]。(3)多源数据融合精度提升通过加权融合与联合平差实现。以各技术测量方差倒数确定权重,构建GNSS绝对坐标与全站仪相对位移、静力水准沉降量之间的联合约束方程,采用整体最小二乘解算最优估值,弥补单一技术环境受限时的精度短板,提升整体监测精度与可靠性。

3.4 工程实例应用与精度验证

(1)工程概况与监测方案选取某超高层建筑(高度约400m,地上88层),监测范围涵盖基础沉降、主体倾斜及顶部风振位移,监测周期为施工至运营后两年。配置4台GNSS接收机、1台测量机器人、12个静力水准仪

及3台倾角仪。(2)精度控制方案落地实施将全流程策略系统应用:设备选型严格按指标筛选标定;点位布设经现场踏勘优化确保协同观测条件;安装执行标准化流程,初始值经72小时连续观测取稳;环境修正嵌入软件实时运算,数据采用多源融合联合平差。(3)监测结果与精度验证对比管控前后数据:管控前GNSS垂直向中误差 $\pm 8.2\text{mm}$ 、全站仪点位中误差 $\pm 2.1\text{mm}$;经全流程控制后,GNSS垂直向中误差收敛至 $\pm 3.5\text{mm}$,全站仪点位中误差降至 $\pm 0.8\text{mm}$,静力水准沉降精度稳定于 $\pm 0.15\text{mm}$,全部满足《建筑变形测量规范》一级精度要求,验证策略显著有效。

结束语

本文系统梳理了高耸结构变形监测的技术体系与精度瓶颈,明确各类监测技术的优劣与适配场景,完整剖析多维度误差来源并建立精度评估模型。通过落地设备管控、环境修正、数据优化等全流程精度控制策略,有效提升了高耸结构变形监测数据质量。工程实例证实,多技术融合质控模式可显著降低测量误差,契合行业一级监测精度标准。后续可优化智能滤波算法,深化动态变形误差实时修正技术,进一步提升复杂工况下的监测精度。

参考文献

- [1]王坚,于亦龙.超高层建筑变形GNSS多源融合监测方法及进展[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(6):165-176.
- [2]朱前坤.基于ACVMD-WT法的GNSS-RTK高耸结构动态监测与模态分析[J].振动工程学报,2023,36(6):121-126.
- [3]黄思泉.联合卫星定位和测量机器人的超高层建造过程水平位移监测[J].同济大学学报(自然科学版),2022,50(1):138-146.
- [4]高贯胜.基于无人机摄影测量结合三维激光扫描的超高层建筑变形监测研究[J].信息记录材料,2025,26(8):78-80.
- [5]王利.高精度GNSS动态变形监测误差控制与精度优化[J].导航定位与授时,2023,10(1):12-26.