

工程测量在建筑物变形监测中的误差来源及改进措施

周 卷

(安徽省城建设计研究总院股份有限公司, 安徽 合肥 230041)

摘 要 为解决工程测量在建筑物变形监测中的误差问题, 本文以高层建筑、基坑、桥梁等不同场景为例, 对误差来源展开分析, 明确测量仪器性能、环境干扰、人员操作、方法选择及基准点稳定性是主要影响因素。针对这些问题, 提出仪器全生命周期管控、环境多维度防护、人员三维度培养、方法三阶优化及基准点全周期保障等改进措施, 涵盖从选型到维护、从预防到补偿的全流程方案, 以期工程测量人员及相关建设项目提供实践参考。

关键词 工程测量; 变形监测; 误差控制; 智能监测; 安全评估

中图分类号: TU196.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.042

0 引言

在城市化进程中, 超高层建筑与重大工程数量持续增长, 建筑物变形监测成为保障结构安全的核心环节。精准的监测数据是评估建筑稳定性的前提, 即使是毫米级误差都可能隐藏安全隐患。当前智能监测技术普及背景下, 仪器性能、环境干扰、人员操作等因素仍制约着数据可靠性。本文聚焦工程测量中的误差问题, 梳理主要影响因素, 构建全流程改进方案, 为提升监测精度提供实践路径, 助力工程安全防控体系完善。

1 工程测量在建筑物变形监测中的误差来源

1.1 测量仪器相关误差

测量仪器的性能和状态直接影响变形监测数据的可靠性。不同监测场景对仪器精度存在差异化要求, 如高层建筑倾斜监测需毫米级精度的全站仪, 而基坑沉降观测则依赖精度达 0.1 mm 的水准仪。若选用精度不足的设备, 初始数据采集阶段就会引入系统性偏差, 导致后续变形分析出现误判。仪器校准是控制误差的关键环节, 光学仪器的视准轴偏差、电子设备的传感器漂移, 都会随使用时间累积误差。未按规程每月校准的全站仪, 其角度测量误差可能从 $\pm 2''$ 增至 $\pm 5''$ 以上, 直接放大建筑物变形量的计算误差。长期野外作业会加速仪器老化, 金属部件锈蚀导致轴系间隙增大, 光学镜片霉变影响成像质量, 这些物理损耗使测量重复性下降, 同一监测点的多次读数偏差可能超过规范允许值的 3 倍。

1.2 测量环境影响误差

环境因素通过干扰仪器工作状态和被测物体物理特性引入误差。温度剧烈变化时, 全站仪的金属支架会因热胀冷缩产生毫米级形变, 导致竖轴倾斜误差; 混凝土建筑的墙体在日照下的温差可达 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上, 这种非均匀温度场会引发瞬时形变, 若此时进行测量, 会误将温度应力导致的变形计入结构沉降数据。风力对高精度测量的影响尤为显著, 三级以上风力会使测斜仪探头产生共振, 造成深基坑侧壁位移监测数据波动幅度超过 2 mm; 用于高耸建筑监测的 GPS 接收机, 强风导致的天线抖动会使定位误差增加 $5\text{ mm} \sim 8\text{ mm}^{[1]}$ 。电磁干扰在城市环境中普遍存在, 高压输电线路产生的电磁场会干扰电子水准仪的信号传输, 地铁运行时的电磁脉冲可能导致雷达干涉测量出现相位跳变, 这些干扰直接降低数据的稳定性。

1.3 测量人员操作误差

测量人员的操作规范性与专业判断能力直接影响数据质量。仪器安置阶段, 若对中误差超过 3 mm, 水平角测量误差会呈几何倍数增长; 整平不到位导致的 i 角偏差, 会使水准测量每 100 m 距离产生 0.5 mm 的高程误差。读数环节的人为偏差具有累积性, 光学经纬仪的估读误差通常在 $6'' \sim 10''$, 采用人工记录时还可能因视觉疲劳出现读数错记, 如将 2.345 m 误读为 2.435 m。经验差异导致的判断误差在复杂场景中更为突出, 面对建筑物表面的遮挡物, 新手可能选择不合理的棱镜架设位置; 在处理突发数据跳变时, 缺乏经

作者简介: 周卷 (1993-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 工程测量。

验者易误判为结构突变，而忽略环境干扰的可能性。操作流程的执行偏差同样不容忽视，如在 GPS 测量中未按要求进行静态观测，提前移动仪器会导致基线解算精度下降 40% 以上。

1.4 测量方法选择误差

测量方法的适用性与设计合理性决定误差控制效果。方法与监测对象不匹配时，误差会系统性放大，如采用传统水准测量监测超高层建筑沉降，因测站数过多导致累积误差超过 5 mm，远不及 GPS 静态测量的精度表现；用接触式测斜仪监测软土地区基坑变形，探头与孔壁的摩擦会使数据偏小 20% ~ 30%。每种测量方法都存在固有局限，全站仪极坐标法在超过 300 m 距离后，大气折光影响会使平面位置误差增至 15 mm；InSAR 技术受植被覆盖影响，在绿化密集区域的监测精度会下降 60%。测量步骤设计缺陷会引入额外误差，如数据采集间隔设置过长，可能错过建筑物在暴雨期间的短期变形峰值；观测路线规划不合理导致的往返测不符值，会使闭合差超限，迫使部分数据作废重测^[2]。

1.5 基准点稳定性误差

基准点作为测量基准，其稳定性直接决定整体监测精度。基准点自身沉降多源于地基处理不当，设置在回填土区域的基准点，半年内可能产生 5 mm ~ 8 mm 的下沉，导致所有监测点高程数据出现同向偏差。周边环境扰动对基准点的影响具有突发性，邻近工地的重型机械振动会使基准点产生瞬时位移，某次打桩作业可能导致 30 m 外的基准点偏移 2 mm ~ 3 mm；地下水抽取引发的地面沉降会使基准点随土层整体下沉，在岩溶地区，这种影响可能呈现非线性特征。基准点设置不合理放大误差传递效应，数量不足时难以通过平差消除偶然误差，布设间距超过 500 m 会使联测精度下降；位置选择不当更具隐蔽性，将基准点设置在活跃断层带上，其年位移量可能超过监测对象的变形量，导致误判建筑稳定性。

2 工程测量在建筑物变形监测中的误差改进措施

2.1 测量仪器的优化管理

测量仪器的优化管理需构建全生命周期的精细化管理体系，从选型适配到退役淘汰形成闭环。选型阶段应建立多维度评估矩阵，将监测对象的结构特性、变形速率、精度要求转化为可量化的设备参数指标。例如：在大型桥梁挠度监测中，需选用采样频率不低于 10 Hz 的动态全站仪，配合 0.1 mm 级分辨率的位移传感器，确保捕捉瞬时振动变形；而古建筑沉降监测则需优先考虑轻量化设备，如便携式电子水准仪，其 3 kg 的机身重量可减少了对文物结构的扰动。校准体系实施“双轨制”

运行，日常校准采用自动检校系统，通过激光干涉仪对全站仪的角度、距离测量精度进行实时修正，确保每小时自动校准一次，将短期漂移误差控制在 $\pm 0.5''$ 以内；季度深度校准联合国家计量院，采用绝对法校准技术，利用氦氖激光波长作为基准，将长度测量误差溯源至国际基本单位，使系统误差压缩至 0.3 mm/km 以下。设备维护推行“预测性保养”模式，通过内置传感器采集仪器的振动频率、温度响应等数据，建立故障预警模型，当轴系磨损导致振动幅值超过 0.02 mm 时自动触发维护指令。对使用超过 5 年的仪器，采用“性能衰减曲线”评估法，若精度衰减率超过 15% 则强制更新，替换为搭载 AI 算法的智能测量机器人，其自动目标识别与跟踪功能可减少 80% 的人工操作误差，数据采集效率提升 3 倍以上。

2.2 有效控制测量环境

环境干扰的控制需打造主动干预与智能补偿的协同机制，实现对多因素影响的精准管控。温度调控构建“时空双维”防护网，空间上采用梯度布点的传感器阵列，在监测区域按 5 m 间距布设 10 组温湿度传感器，实时绘制三维温度场分布图，当局部温差超过 5 °C 时自动推送预警信息；时间上建立 72 小时预报模型，结合历史数据预测温度变化趋势，优先选择每日 6 小时 ~ 8 小时进行测量，此时段混凝土建筑的温度梯度最小，变形量仅为正午的 1/5。风力防护实施分级响应策略，当风速处于 3 级 ~ 5 级时，启用三脚架的磁流变阻尼器，通过改变磁场强度调节阻尼系数，使设备振动振幅从 1.2 mm 降至 0.3 mm；风速超过 5 级时，切换至室内远程操控模式，利用无人机搭载测量模块，配合地面基站实现厘米级定位，避免人员现场作业的安全风险^[3]。电磁干扰防护构建多层隔离屏障，在变电站周边 200 m 范围内，测量设备外壳采用纳米晶合金材料，其磁导率可达 80 000，对 50 Hz 工频磁场的屏蔽效能超过 60 dB；数据传输采用跳频扩频技术，在 2.4 GHz 频段内每秒切换 100 次频率，避开电磁干扰峰值区间，使数据丢包率从 15% 降至 0.5% 以下。

2.3 提升测量人员的专业能力

人员能力建设需构建“三维度”培养体系，实现操作技能、误差判断与应急处置的全面提升。操作培训采用“虚实结合”模式，在 VR 仿真系统中还原 12 种典型监测场景，包括暴雨天气、建筑遮挡、电磁干扰等，训练人员在虚拟环境中完成全站仪对中整平的标准动作，要求连续 10 次操作的对中误差均小于 0.8 mm，i 角校准偏差控制在 $\pm 8''$ 以内。引入“数据溯源”制度，每个监测数据需标注操作人员、设备编号、环境参数

等元数据,通过区块链技术形成不可篡改的记录链,当发现数据异常时可逆向追溯至操作环节。经验传承建立“案例—实操”转化机制,精选300个典型误差案例,按仪器误差、环境误差、操作误差等类别建立检索系统,每个案例配套三维动画演示误差产生过程,新手需完成50个案例的模拟处置才能参与现场作业^[4]。应急训练设置“突发场景库”,包括仪器突然断电、数据传输中断、极端天气来临等15种情况,训练人员在3分钟内启动备用方案,如采用备用电池组维持设备运行,通过北斗短报文传输关键数据。

2.4 科学选择与优化测量方法

测量方法的优化需建立“场景适配—缺陷弥补—流程再造”的三阶体系,实现误差源头控制。方法选择构建“多目标决策模型”,将监测精度、成本投入、时间效率等6项指标量化为权重值,通过层次分析法计算综合得分。例如:在软土地区深基坑监测中,分布式光纤传感技术得分85分,显著高于传统测斜仪的62分,因其能实现每米一个监测点的高密度布设,捕捉微小变形的空间分布特征;而在开阔区域的高层建筑监测中,GPS静态测量法得分90分,其平面精度可达1 mm+1 ppm,比全站仪极坐标法节省40%的作业时间。针对方法固有缺陷实施技术融合,全站仪长距离测量时,同步采集大气压力、湿度数据,代入修正公式 $\Delta D = D \times (0.268 \times 10^{-3} \times (t-20) - 0.0026 \times \cos 2\phi - 0.00028)$ 实时补偿,使300 m距离的测量误差从 ± 5 mm降至 ± 1.5 mm;InSAR技术应用时,结合地面水准测量数据进行几何校正,对植被覆盖区采用“去相干点过滤算法”,剔除相干系数低于0.3的监测点,使数据有效性提升50%。流程优化引入“自适应闭环”机制,数据采集阶段设置三级阈值,当变形速率超过1 mm/天,自动将观测频率从1次/天提升至3次/天;当变形量达到预警值的80%时,启动24小时连续监测模式。路线规划采用“蚁群算法”,通过模拟蚂蚁觅食路径优化观测顺序,使测站迁移时间减少25%,同时确保每个监测点的观测时段分布均匀,避免系统误差累积^[5]。建立“交叉比对”制度,对关键监测点采用两种以上方法测量,如GPS与全站仪数据的偏差需控制在 ± 2 mm以内,否则启动复核程序,确保方法选择的科学性。

2.5 基准点合理设置与维护

基准点的管控需构建“选址—建设—监测—更新”的全周期保障体系,确保测量基准的长期稳定。选址实施“三维地质评估”,通过地质雷达探测地下20 m范围内的断层分布、岩溶发育情况,采用标准贯入试验测定土层承载力,要求基准点所在位置的地基承载力特

征值 ≥ 300 kPa,压缩模量 ≥ 20 MPa,且距离活跃断层不少于50 m。在软土地区,需选择在地质钻探揭示的硬土层顶面布设,该层土的黏聚力应大于50 kPa,内摩擦角不小于 25° ,避免后期沉降。建设执行“超标准设计”,基准点主体采用 $\Phi 300$ mm的316L不锈钢桩,桩身埋深不小于8 m,底部嵌入中风化岩层不少于2 m,桩周采用M30水泥砂浆注浆加固,形成直径1.5 m的扩大头,单桩竖向承载力特征值 $\geq 1\,000$ kN。顶部设置强制对中装置,其对中误差 ≤ 0.1 mm,配备不锈钢防护罩,防护等级达到IP68,可抵御暴雨、沙尘暴等恶劣天气。日常维护实施“立体化监测”,每周用水准仪按二等水准测量精度观测高程变化,往返测较差不超过 $0.5\sqrt{L}$ mm;每月用全站仪按一级导线精度测量平面位移,测角中误差 $\leq 5''$,边长相对中误差 $\leq 1/30\,000$;每季度进行一次地质雷达扫描,监测基准点周边5 m范围内的土层密度变化。建立“健康度指数”评估模型,综合沉降速率、平面位移、周边地质条件等参数,当指数低于80分时启动备用基准点,采用加权平均法对历史数据进行修正,权重按基准点稳定性系数分配,确保衔接误差 ≤ 1 mm。备用基准点按主基准点标准建设,数量不少于3个,形成三角形分布的监测网,提高整体系统的冗余度。

3 结束语

建筑物变形监测的误差控制是保障工程安全的关键环节。本文梳理的误差来源与改进措施,形成了从问题识别到解决方案的完整逻辑链。仪器管理的精细化、环境控制的协同化、人员能力的体系化、方法选择的科学化及基准点维护的常态化,共同构成了误差防控的立体网络。这些措施在实际应用中可有效提升监测数据的可靠性,为建筑结构安全评估提供精准依据。未来需结合技术发展持续优化方案,推动变形监测精度向更高维度突破,为工程建设的安全与稳定筑牢防线。

参考文献:

- [1] 姜铭煊,李冉,刘宁.基于移动RTK的建筑工程测量技术研究[J].自动化应用,2025,66(05):230-232.
- [2] 曲强.数字测量技术在建筑工程测量中的应用[J].住宅与房地产,2023(32):98-100.
- [3] 王勤明.试论现代测绘技术在工程测量中的应用[J].世界有色金属,2023(12):132-134.
- [4] 王丹.智能化时代的工程测量服务框架[J].工程勘察,2023,51(01):1-6.
- [5] 张吉.GPS测量技术在工程测绘中的应用及特点[J].房地产世界,2022(06):91-93.