

深基坑周边建筑沉降报警及自动化监测技术应用

刘广庆

湖南省核地质调查所 湖南长沙 410000

DOI: 10.32629/ems.v8i8.21605

[摘要] 针对城市建成区老旧砖混建筑物紧邻深基坑，在开挖过程中引发土体长期蠕变，易造成周边老旧砖混建筑不均匀沉降，传统人工监测存在数据空白、预警滞后缺陷。依托 5 年长周期一级基坑监测工程经验，在建筑沉降触发红色报警后，创建静力水准仪 + 无线倾角传感器自动化监测体系，搭配天宝 DiNi- 03 水准仪定期校核，数据严密平差，形成强有效监测体系。系统于 2025 年 3 月 2 日提前捕捉沉降数据突变异常，时序数据与现场土体蠕变、水位变化工况高度吻合，及时推送沉降加速及预警，及时采取堵水措施，有效保证基坑和人员安全，证明该监测方案可有效识别变形发展前兆，在工程风险预判方面具备实用价值。一年多实测表明，自动化与人工数据比对偏差较小，本套监测体系能满足二等变形监测标准；自动化采样频次提升 10~20 倍，现场测绘人力投入降低 57%，可为同类城区基坑长期变形监测提供参考方案。

[关键词] 建筑沉降报警；自动化监测；静力水准仪；倾斜仪；人工天宝水准仪；监测组合体系；实测应用

1 前言

1.1 研究背景与工程依托

随着国内城市更新工程大规模推进，中心城区深基坑、高边坡复合项目紧邻老旧居民楼、城市主干道、地下综合管线已经成为普遍现状。基坑土方开挖阶段变形监测普遍得到建设单位、监理单位和住建主管部门重视，监测频次充足、人员配置完善；但基坑土方开挖周期长、卸荷扰动范围大，开挖完成后深部土体固结蠕变周期较长，杂填土、砂层，土层在后期数年内依旧会持续产生压缩沉降，仅开展施工期短期监测不足以把控后期土体缓慢变形风险。

本文研究依托本人作为项目负责人全程主持的城区深基坑五年期监测项目开展研究，监测周期 2020.10-2025.12。基坑北侧分布多栋低层砖混基础住宅楼、高层住宅楼。项目前期沿用传统人工监测方案，基坑土方开挖在第 50 个月出现住宅楼沉降红色报警。针对红色报警事件，本人结合测绘精密测量技术引入静力水准仪、倾角传感器搭配天宝高精度水准仪形成多源监测体系，通过独立坐标系严密平差得到实测变形数据，理清基坑开挖扰动、土体蠕变变形与建筑物沉降之间的耦合关系，最终形成自动化监测协助人工精密仪器监测的长期常态化监测体系。本工程的监测处置经验，对城市复杂环境的基坑开挖扰动土体和建筑物基础，以及后期长期变形监测具备较高实践参考价值。

1.2 国内外研究现状

国外学者较早开展自动化监测设备在基坑及建筑物监测领域的应用研究，将 DIC 数字图像相关技术、电容式静力水准系统、倾角传感器应用到基坑围护、高层建筑物变形监测领域；Trimble 高精度水准仪长期用于自动化监测设备可靠性校核；国外研究更多侧重于开挖期间短期变形分析，对于基坑长周期开挖扰动及 5 年期土体蠕变阶段实测案例偏少，缺少针对多次预警之后监测方案优化调整的工程实例。

国内方面，JGJ8- 2016《建筑变形测量规范》、GB50026- 2020《工程测量标准》对精密变形监测的观测等级、平差方法、预警阈值做出明确规定。国内测绘行业学者在 GNSS 监测、全站仪自动化监测、静力水准沉降监测方面开展大量试验研究，数字图像相关法在基坑深层位移监测中得到广泛应用，可实现非接触、全天候变形采集。大量工程实践证明天宝 DiNi- 03 水准仪可以满足老旧建筑物二等水准沉降监测精度要求。但现阶段国内多数基坑项目依旧重视短期开挖监测，长周期开挖扰动及竣工后长期监测仍然依靠定期人工观测，基坑围护监测数据和楼房沉降监测分开研判；楼房倾斜多数依靠四角沉降差值推算，缺少倾角仪实测数据验证；当建筑物基础长期扰动，沉降触发红色预警之后，如何组合自动化设备和人工精密仪器、通过独立坐标系、严密平差、校核监测成果的成套技术方案研究相对薄弱。

综合国内外现有研究成果，目前存在三点不足：基坑变形与周边建筑物沉降数据独立分析，无法判断两者时序关联；

人工观测频次偏低, 雨季夜间监测数据缺失; 房屋倾斜仅采用沉降差计算, 缺少实测倾斜值进行验证。基于以上行业在监测方面的痛点(见图1), 结合本项目红色报警工程实践开展监测方案优化研究。

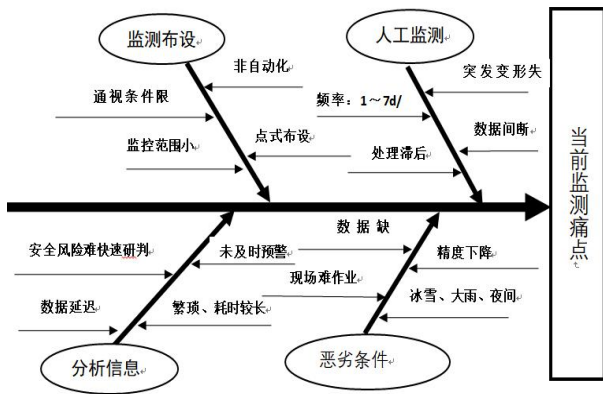


图1 当前监测痛点

1.3 研究内容与创新点

本文主要开展的研究内容: 依托五年监测全过程实测数据, 针对红色预警事件创建监测体系, 基于工程独立坐标系对监测数据开展严密平差分析, 对比自动化监测与传统人工监测精度差异, 本课题研究创新点, 见图2。

创新点1: 建筑物沉降触发红色预警, 对老旧建筑物四个墙角竖向沉降增加静力水准仪自动化监测项目; 在房屋顶部增加倾斜监测项目, 采用倾角仪自动化监测, 追踪房屋倾斜情况, 弥补人工监测数据不足和滞后的问题;

创新点2: 老旧建筑物竖向沉降保持天宝 DiNi- 03 水准仪人工加密观测, 对静力水准仪自动化监测数据进行校准, 及时和研判静力水准仪自动化监测数据的变化趋势;

创新点3: 结合天宝 DiNi- 03 水准仪人工加密观测数据, 辅助沉降差计算房屋倾斜率, 对倾角仪自动化监测数据进行对比, 联合判定倾斜率。

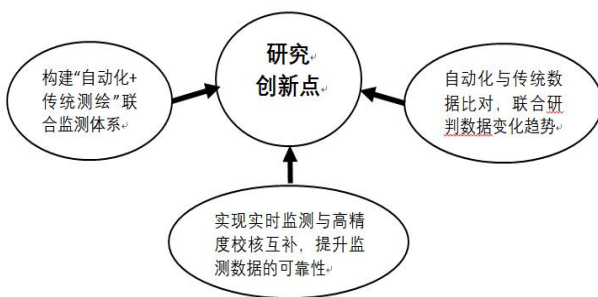


图2 研究创新点

1.4 技术路线

现场踏勘→工程独立坐标系基准网复测及平差→前期传统人工监测→建筑物沉降红色报警后采用静力水准仪+天宝水准仪+倾角仪联合监测→监测数据严密平差→精度对比分析→总结监测模式并推广应用。

2 相关规范依据、传统监测短板与仪器设备参数

2.1 项目执行国家现行规范标准

本项目所有监测工作严格依据现行国家及行业规范开展: GB50497- 2019《建筑基坑工程监测技术标准》、JGJ8- 2016《建筑变形测量规范》、GB50026- 2020《工程测量标准》、GB/T12897- 2006《国家一、二等水准测量规范》。结合规范条文及本项目老旧建筑特点和房屋工程地质条件, 结合设计院提出预警控制指标: 周边建筑物单日沉降速率 $>2\text{ mm/d}$ 或者累计沉降 $>20\text{ mm}$ (后期开专家会议调整 110.0 mm)判定为红色预警; 房屋整体倾斜率大于 2% 判定结构安全超限(后期开专家会议调整 4%)。

高程监测按照二等水准观测等级执行, 精高程度: 0.5 mm , 所有监测成果统一归化至项目工程独立坐标系; 水准观测完成之后采用附和水准路线严密平差; 观测数据采用商用平差软件完成网平差, 无需国家大地坐标转换与脱密处理, 数据成果安全、合规、可直接用于工程分析及期刊收录。

2.2 传统人工监测方案及其固有短板

2.2.1 前期传统监测布设方式

基坑土方开挖阶段以及开挖初期, 项目沿用常规监测手段: 周边建筑物沉降观测选用天宝 DiNi- 03 电子水准仪开展二等水准观测, 同样 $1\sim3\text{ d}$ 观测 1 次; 楼房倾斜依靠 4 个墙角沉降观测值计算沉降差值, 结合建筑边长计算倾斜率; 水准观测完成后分别利用 Trimble Business Center 和南方测绘平差软件开展严密平差。基坑前期开挖土体扰动剧烈, 测绘人员适当加密观测频次, 监测成果整体稳定。基坑长周期开挖至 2 年以后, 土体进入快速蠕变阶段, 监测频率增加到 1 d 观测 $1\sim2$ 次。

2.2.2 城区环境下传统监测模式存在短板

(1) 观测频次不足: 人工监测 $1\sim3\text{ d}$ 开展 1 次观测, 深夜时段、暴雨天气测绘人员不能进场作业, 变形加速发展阶段的数据无法获取, 监测滞后问题突出;

(2) 监测数据割裂: 基坑围护监测数据和楼房沉降监测数据分别整理归档, 工作人员无法结合时序变化分析基坑长

期开挖扰动、土体蠕变诱发楼房沉降的内在联系；

（3）倾斜判定可靠性不足：前期房屋倾斜仅仅依靠沉降差值计算得出，缺少倾角传感器实测数据校核，计算结果存在不确定性，倾斜异常判断说服力不足。

2.2.3 监测仪器的选择

目前，对常用监测技术进行对比，见图 3，从图中可以看出，静力水准仪在沉降监测中凸显其优势。磁致式静力水准仪具有使用寿命长、稳定性好、精度高、重复性好、性价比高等特点。

监测方法	几何水准测量	三角高程测量	GPS	静力水准测量	摄影测量
精度	较高	低	低	高	高
成本	低	低	很高	高	很高
运营费用	高	高	低	低	高
自动化程度	低	低	高	高	低
适用范围	受地形起伏限制	不受地形限制	易受障碍影响	监测范围小	易受障碍影响

图 3 目前常用监测技术对比

2.3 监测仪器设备技术参数

本项目进入第 50 个月，邻近北侧一栋老旧建筑物出现红色报警，加强监测阶段，采用自动化监测设备与人工精密仪器配套开展监测工作，仪器设备性能参数如下：

（1）天宝 DiNi- 03 电子水准仪：仪器标称精度 0.3 mm/km，配套条码水准尺，用于人工二等水准加密观测，观测数据导入 Trimble Business Center 软件完成水准网严密平差；

（2）磁致伸缩静力水准仪：仪器测量精度 0.01 mm，量程 0~100，分辨率 $\leq 0.1\%FS$ ，工作温度：-20~+60℃，自带模块，4G 网络定时上传沉降数据，设备安装在建筑物墙角位置，仪器见图 4；

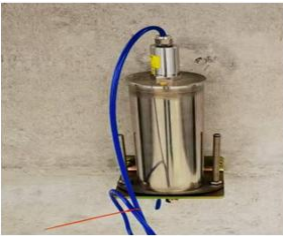


图 4 磁致伸缩液位传感器示意图



图 5 倾角传感器示意图

（3）倾角传感器：测量量程：±15° 测量精度：±0.01° 分辨率：0.001°，非线性：≤0.05%FS，工作温度：-20℃~+60℃，通讯：RS485 Modbus，实时采集墙体倾角数据，用于房屋倾斜自动化监测；仪器见图 5；

（4）数据处理软件：南方测绘平差软件、Trimble

Business Center 计算软件；全部监测成果统一转换至项目工程独立坐标系。

3 工程概况、基准网布设与初始监测方案

3.1 工程本体概况

本商业基坑项目位于城市建成核心区，项目监测周期：2020.10~2025.12 历经 5 年有余。基坑开挖深度约 14m，北侧连接边坡高度 5~15m，局部深度达 30m，支护形式为基坑支护为桩锚支护+内支撑，整体为一级安全等级深基坑边坡复合工程。基坑北侧紧邻一住宅小区楼房，中间为一陡坎，呈折线型分布，延伸长约 100m，陡坎现采用重力式毛石挡墙支护，基坑正北侧 3~10m 分布有一栋老旧楼房，于 1994 年建成、为地上 7 层砖混结构住宅楼（无地下室，共 28 户），建筑面积约 3257m²，楼面结构现浇板+预制板，房屋采用冲孔灌注桩基础，桩径 350mm，桩深约 4~8m，桩尖进入砾石层 800mm 以上，单桩承载力≥250kN，混凝土设计强度等级为 C20。结构整体性较好但对不均匀沉降较为敏感，是本监测项目沉降出现红色报警的老旧楼房。

东侧基坑顶距城市主干道道路 14.5m，道路下埋设有各类管网，如给水、电力、燃气和军用等管网。南侧基坑顶距另一主干道道路约 14m，道路下埋设有各类管网，如给水、电力、燃气和军用等管网以及地下通道。西侧基坑顶距某住宅楼小区约 6m，该住宅楼小区采用浅基础，临边无管线。西北侧临近高层住宅楼小区 6 号栋，之间分布一长约 34m，高约 12m，坡度近垂直的高陡边坡，坡向约 172°，该段边坡左侧约 16m，下部采用排桩支挡，桩径 1.5m，桩距 2.5m，右侧为毛石挡墙，临边无管线。另有基坑东侧地下深层地铁 7 号线于本场地施工 2 年后开始施工，至今未完工。

场地地层自上而下依次为杂填土、粉质黏土、圆砾、中粗砂、粉细砂、强风化泥质粉砂岩、中风化泥质砂岩；场地内上层滞水初见水位埋深为 0.30~7.00m，其稳定水位埋深为 0.10~6.50m，潜水初见水位埋深为 2.10~18.30m，其稳定水位埋深为 1.70~17.80m；雨季降水之后地下水位抬升，土体有效应力下降，土体压缩变形速率加快。本项目基坑开挖周期长、卸荷扰动持续时间久，长周期开挖导致周边土体应力持续重分布，开挖至中后期土体逐步进入蠕变阶段，持续对正北侧住宅楼基础产生附加应力，中后期沉降和安全风

险显著提升，必须全过程动态加密监测。

3.2 工程独立坐标系监测基准网布设和平差成果

3.2.1 基准点布设

在基坑及边坡变形影响范围以外稳定区域选定 3 处固定水准点位 BM1、BM2、BM3，建立项目专属工程独立高程基准控制网。高程基准网布设二等附和水准路线，围绕基坑、边坡外围稳定区域形成闭合环，观测完成后基于独立坐标系开展严密平差，无需依托国家大地坐标，无需脱密处理，成果可直接用于论文展示与期刊收录。

3.2.2 基准网平差结果

平差结果分析：经过独立坐标系严密平差计算，平面点位最大闭环误差 0.25 mm，高程最小闭环误差 0.02 mm，见表 1。基准网整体精度满足精密变形监测要求，3 个基准点远离基坑边坡扰动区域，点位长期稳定，可以作为后期所有监测项目的起算基准。

表 1 独立坐标系基准网复测平差结果统计表（单位：m）

基准点编号	原始高程数据	复测高程数据	高程闭环误差	点位稳定性评价
BM-01	52.01094	52.01092	0.00002	稳定
BM-02	66.994	67.99408	0.00008	稳定
BM-03	60.00000	60.00025	0.00025	稳定

3.3 红色报警：建筑物沉降出现红色报警，沉降—倾斜组合监测方案

3.3.1 红色报警概况

基坑土方开挖、基坑支护施工至第 50 个月（即 2024 年 12 月），2024 年 12 月 17 日中午基坑北侧 CD 段支护桩侧壁出现涌砂现象，于次日基坑侧壁涌砂封堵成功，在 2024 年 12 月 18 日人工天宝水准仪观测时，发现观测数据明显出现较大异常，紧急复测后，报告出单日沉降速率 9.94 mm/d（超出规范报警值 2mm/d），基于独立坐标系的水准网严密平差得出正北 1#住宅楼累计沉降 114.37 mm（超出设计累计报警值 110mm），触发红色预警（见表 2）；监测单位紧急启动应急预案，对本栋老旧楼房 72 小时连续加密监测，监测频率 2 小时一次，数据稳定后 2~6 小时一次。为解决楼房监测频次不足、倾斜判定依据薄弱问题，与项目组商议确定了，对老旧房屋加强监测的方案：竖向沉降采用四角静力水准仪自动化监测搭配天宝 DiNi- 03 水准仪人工加密观测；房屋倾斜采用倾角仪自动化监测结合沉降差计算法联合判定倾斜率。

观测点编号	C15	C16	C34	C35
监测数据累计值 mm	114.37	-74.86	-90.74	-89.47
报警值 mm	110	77	77	77
点位稳定性评价	红色报警	接近黄色报警	黄色报警	黄色报警

表 2 触发黄色、红色预警数值

前阶段房屋出现持续缓慢下沉后，基坑及边坡经过注浆加固，位移整体平稳，本次沉降报警原因分析：主要由支护施工锚索扰动房屋基础深部土体，基坑施工过程中连续抽排水，致使基础下伏砂层中，砂粒经过地下水运移流失，出现涌水、涌泥情况，次日出现监测数据超限和报警。

3.3.2 老旧楼房竖向沉降创新监测方案

1. 老旧楼房竖向沉降优化监测方案

为弥补监测频率小、数据不连续、数据空白、预警滞后的缺陷，依托 5 年长期基坑监测工程经验，监测项目组，在建筑沉降触发红色报警后，创建了老旧楼房上下转角点，布设静力水准仪（下转角）+ 无线倾角传感器（上转角）自动化监测体系，搭配天宝 DiNi- 03 水准仪测量比对和定期校核自动化数据，时时跟踪自动化监测数据及预警信号，经专业软件严密平差，提前捕捉沉降数据突变异常，研判风险征兆，及时推送沉降加速及预警，提醒工程部门采取处置措施，有效保证基坑和人员安全，形成强有效监测体系。

2. 自动化监测布点特征

在出现报警的 1#住宅楼四个墙角下，分别安装 1 台磁致伸缩静力水准仪，共计 4 台；在四个墙角对应的上部房顶部位，分别安装 1 个无线倾角传感器共计 4 个。以前期验收合格的独立坐标系高程基准网作为起算依据，静力水准仪每 30 min 自动采集沉降数据并通过 4G 网络上传后台，同步优化监测校核机制。静力水准仪监测结构示意图，见图 6。

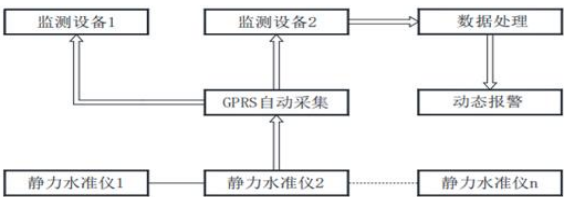


图 6 静力水准仪监测结构示意图

3.3.3 静力水准仪竖向沉降误差分析及优化研究

3.3.3.1 静力水准仪数据误差分析

结合现场实测工况，明确温度形变、管路工况、设备安

装是静力水准仪数据偏差的核心诱因，各类误差相互叠加，易产生数毫米虚假沉降变形，具体分为五大类根源因素。

3.3.3.1.1 传感介质（液体）热胀冷缩

静力水准仪依托连通管内硅油、乙二醇等液体液面高差判定沉降，液体热膨胀系数远大于金属设备与混凝土结构。项目现场全天昼夜温差显著，白天日晒升温、夜间快速降温，管路及罐体内部液体体积随温度剧烈波动，引发液面虚假升降；同时建筑南北、向阳与背阴测点存在3~8℃不均衡温差，各测点管路液体伸缩量不一致，造成点位数据偏差。此外，若采用普通防冻液替代专用低膨胀硅油，液体膨胀系数翻倍，温度干扰误差将进一步放大。未开展温度修正前，系统单日可出现2~3 mm无诱因虚假沉降，严重干扰变形判定。

3.3.3.1.2 连通管路梯度温差误差

项目监测管路多露天敷设，软管横跨外墙、露天楼板，管内液体与室内仪器形成持续温差；房屋四角测点连通管路长短不一，液体总容量存在差异，同等温度下伸缩量不同；且初期管路未做保温防护，昼夜管壁温度剧烈波动，管路形成连续温度梯度，诱发液面整体偏移，是监测变形虚高的关键现场因素。

静力水准仪系统温差修正核心公式（多测点连通系统）

T_r ：基准静力水准仪液体温度（℃）

T_i ：第 i 号测点静力水准仪液体温度（℃）

α ：连通液体体积热膨胀系数

H_0 ：连通管路内等效液柱基准高度（系统常量，标定获取）

温度引起的虚假沉降量修正值：

$$\Delta S_{i,temp} = \alpha \cdot H_0 \cdot (T_i - T_r)$$

实测沉降修正后真值

$$S_{i,real} = S_{i,raw} - \Delta S_{i,temp}$$

$S_{i,raw}$ ：仪器原始读数沉降值（mm）

$S_{i,real}$ ：消除温度影响后的真实沉降（mm）

3.3.3.1.3 系统安装与基准点温度失衡误差

基准静力仪布设于树下、挡土墙背阴区域，与露天布设的监测测点存在5℃以上稳定温差，在不同时段造成观测点全部数据系统性偏移，晴天时温差更大，偏移变化更明显。项目初期仅采用全局统一温度系数修正，未布设多点测温探头，无法适配各测点差异化温度工况，温度补偿不彻底，数据失真问题持续存在。

3.3.3.1.4 管路气泡衍生误差

施工注液流速过快裹挟大量空气、管路敷设出现上拱凸起拐点积聚气团、温度波动引发管路负压进气、设备密封老化微渗进气，多重因素导致管路残留气泡。气泡阻断液体连通平衡，造成测点液面数据失真、变形虚增；且气泡随温度变化移位，导致监测数据时而正常、时而偏差，数据稳定性极差，是现场极易忽略的隐蔽误差来源。

3.3.3.2 静力水准仪优化研究

针对上述误差诱因，结合项目五年期长期监测需求，制定全方位针对性优化措施，彻底消除系统性偏差，实现自动化监测数据与精密水准仪人工数据高度统一。

一是全域保温防护，对所有监测及基准点连通管路、仪器设备包裹防晒保温材料，最大限度削弱昼夜、冬夏温差带来的液体与设备形变误差。

二是精准温度补偿，摒弃全局统一温度修正模式，为每台仪器加装独立测温传感器，启用单点独立温度分段修正公式，解决基准点与监测点、南北测点温差失衡问题。

三是优化数据比对时段，避开正午高温、凌晨低温极端工况，优先选择昼夜恒温时段开展自动化数据与天宝水准仪人工数据比对核验，规避极端温度干扰。

四是建立月度校准机制，每月开展人工精密水准闭合联测，覆盖房屋四角测点及基准墩，定期重置静力水准仪系统零点，形成误差闭环管控。

五是彻底排查排气，重新梳理管路走向，消除所有上拱高点，保证管路全程下坡流向基准储液罐；采用低速循环冲液方式，彻底排出管路残余气泡；全面检查更换老化密封圈、加固管路卡箍，杜绝微渗进气问题，从源头消除气泡误差。

平差结果表明，优化后的静力水准仪自动化监测成果与天宝高精度水准仪人工观测成果差值最大小于2.12mm，数据吻合度较高，可辅助反映建筑物真实沉降变化。为明确前期自动化监测数据偏差诱因、完善监测体系，本文针对静力水准仪监测系统开展系统性误差溯源分析，并制定针对性优化改进方案。

3.3.4 房屋倾斜监测：倾角仪自动化监测协助沉降差计算

在楼房顶层4个角部安装4台倾角传感器，布设示意图见图7。



图 7 倾角传感器布设图

传感器实时采集墙体倾角，测定倾斜率；人工天宝水准仪测量沉降差值计算倾斜率方法，则应用 4 个墙角沉降观测值计算倾斜率：倾斜率=两点间沉降差值/两点间楼房中心距；对比两组监测数据（见图 8）比对结果：倾角仪实测东、西侧房屋倾斜率最大分别为 0.53‰和 0.45‰，人工天宝水准仪测量沉降差值计算东、西侧倾斜率最大 0.22‰和 0.53‰，两组结果偏差很小，差值 0.08‰~0.31‰，楼房倾斜率远小于规范限值 2‰，楼房整体结构安全。

测量时间	倾角99464东-西-斜率	倾角99464南-北-斜率	测量时间	倾角99084东-西-斜率	倾角99084南-北-斜率
2025-03-02 00:01:23	-0.000104941	0.000789905	2025-03-02 01:00:53	-4.76539E-05	-1.11293E-05
2025-03-02 00:01:23	-0.000104941	0.000789905	2025-03-02 02:00:54	-0.000147842	-7.69496E-05
2025-03-02 00:01:23	-0.000104941	0.000789905	2025-03-02 03:00:55	-9.15679E-05	-3.30545E-05
2025-03-02 01:01:23	-0.000117287	0.000802703	2025-03-02 04:00:53	-0.000149217	-6.86813E-05
2025-03-02 01:01:23	-3.63514E-05	0.000829907	2025-03-02 05:00:54	-9.29423E-05	-6.86813E-05
2025-03-02 01:01:23	-0.000117287	0.000744775	2025-03-02 06:00:53	-0.000157453	-7.2794E-05
2025-03-02 04:01:23	-0.000108621	0.000679955	2025-03-02 07:00:54	-0.000157453	-0.000102929
2025-03-02 04:01:23	-0.000108621	0.000679955	2025-03-02 08:00:54	-0.000205487	-7.96448E-05
2025-03-02 05:01:23	-0.000136491	0.000717185	2025-03-02 09:00:53	-0.000189014	-1.7982E-05
2025-03-02 06:01:23	-0.000136312	0.000653751	2025-03-02 10:00:54	-0.000140976	4.50518E-05
2025-03-02 07:01:23	-0.000110425	0.000613757	2025-03-02 11:00:54	-0.000189014	7.76377E-05
2025-03-02 08:01:24	-0.000113171	0.000633061	2025-03-02 12:00:53	-0.000205487	0.000116309
2025-03-02 09:01:24	-9.84504E-05	0.000799944	2025-03-02 13:00:53	-6.82399E-05	0.00021223
2025-03-02 10:01:23	-1.8693E-05	0.00069854	2025-03-02 14:00:54	-6.27525E-05	0.000131364
2025-03-02 11:01:23	-0.0001022	0.00079473	2025-03-02 15:00:53	2.37152E-05	0.000227306
2025-03-02 12:01:23	-0.000120033	0.000707624	2025-03-02 16:00:54	2.23406E-05	0.000186196
2025-03-02 13:01:23	-0.000176277	0.001176439	2025-03-02 17:00:53	9.92045E-05	0.000177976
2025-03-02 15:01:24	-9.2598E-05	0.00122328	2025-03-02 18:01:00	0.000130769	0.000201268
2025-03-02 16:01:23	-1.3027E-05	0.001321241	2025-03-02 19:00:54	0.000112929	0.000135494
2025-03-02 17:01:24	-6.17281E-06	0.001358472	2025-03-02 20:00:53	-9.87202E-07	4.91627E-05
2025-03-02 18:01:26	-5.69262E-05	0.001319855	2025-03-02 21:00:54	-3.66718E-05	4.23119E-05
2025-03-02 19:01:24	-0.000165399	0.001179196	2025-03-02 22:00:53	-0.000114903	1.21668E-05
2025-03-02 20:01:24	-0.00022703	0.001108855	2025-03-02 23:00:53	-7.3731E-05	-1.6611E-05
2025-03-02 21:01:23	-0.000269555	0.001093701	2025-03-03 00:00:53	-7.64728E-05	-6.04596E-05
2025-03-02 22:01:24	-0.000284646	0.001071624	2025-03-03 01:00:54	-0.000157453	-0.000128977
2025-03-02 23:01:24	-0.000384646	0.001071624	2025-03-03 02:00:53	-0.000116274	-0.000146791
2025-03-02 23:01:24	-0.00038541	0.001070254	2025-03-03 03:00:54	-0.00012789	-0.000159122
2025-03-02 23:01:24	-0.00038541	0.001070254	2025-03-03 04:00:55	-6.6869E-05	-0.000176936

图 8 倾角传感器数据

3.3.5 优化方案可行性

通过本次方案优化，楼房沉降借助静力水准仪全天候监测+人工精密仪器定期校核，倾斜率判定结合倾角仪实测值和沉降计算值相互印证，监测成果说服力明显提高。最终确定长期监测模式：静力水准仪自动化监测楼房沉降、倾角传感器自动化监测房屋倾斜，人工天宝水准仪定期校核自动化设备精度，实现自动化监测辅助提供全面数据，人工精密仪器定期校核的标准化监测体系，全程依托工程独立坐标系完成数据统一解算与平差分析。综述，这一套优化方案，按现场实际情况，能满足当前监测评价。

3.4 2025 年 3 月自动化提前预警实测与工程价值

自 2025 年 3 月 2 日开始，静力水准仪沉降监测时序突变上升，倾角传感器记录的南北向倾斜数据指标（见图 9）同步单向增大，监测系统于 3 月 3 日触发沉降加速预警。相较于两

天一次的人工观测模式，自动化监测提前 1d 捕捉变形前兆。

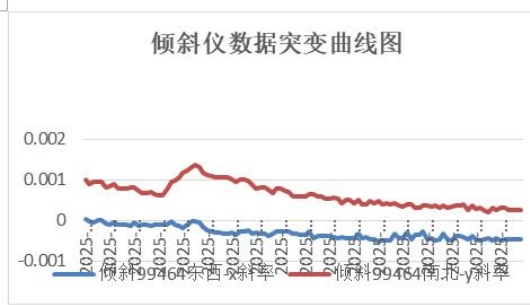


图 9 3 月 2 日倾斜仪数据突变曲线图

3 月 3 日天宝 DiNi- 03 水准仪观测频次提升至 1d 观测 1 次，观测数据导入 Trimble Business Center 开展附合水准严密平差，自动化观测成果与人工精密观测成果形成对照校核，具体平差统计结果见表 3。

表 3 3 月 3 日楼房四角沉降自动化监测—天宝水准仪人工观测平差结果（单位：mm）

测点编号	静力水准仪自动化 观测沉降值	天宝水准仪人工观测 累计沉降值	比对差值
S1（东北角）	-2.16	-0.64	-1.52
S2（东南角）	-5.12	-3.47	-1.65
S3（西南角）	-8.42	-6.30	-2.12
S4（西北角）	-4.23	-2.57	-1.66

平差结果分析：基于独立坐标系平差计算，静力水准仪观测成果和天宝高精度水准仪观测差值最大-2.12 mm，观测差值最小-1.52 mm，自动化监测数据可信；后台系统可以生成沉降-时间连续曲线，直观反映沉降发展趋势；施工单位依据监测成果开展地基注浆加固，后期楼房沉降速率降低至-0.1~0.5 mm/d 以内。后期形成常态化监测模式：日常依靠静力水准仪自动化监测，每月 1 次天宝水准仪人工校核设备精度。

时序曲线表明，3 月 3 日各测点沉降速率持续超过 2.0 mm/d，建筑物倾斜同步发展，监测变化规律与场地土体蠕变、地下水位抬升工况能够相互印证。收到预警信息后，施工单位及时实施沙包+水泥浆封孔处置，有效控制建筑物总沉降量，将变形维持在安全可控范围，规避房屋垮塌和墙体开裂风险。

4 监测精度对比与综合效益分析

4.1 监测精度对比

依托一年监测周期内大量观测数据，基于工程独立坐标系统一平差统计得出：沉降位移静力水准仪自动化监测平均

误差 1.52~2.12mm,传统人工全站仪监测平均误差 0.3~0.5 mm, 自动化监测精度相比人工监测有一定差距;竖向沉降静力水准仪观测成果与天宝水准仪观测差值稳定在 ≤ 2.0 mm, 监测频率比人工增加 10~20 倍,自动化监测设备可以有效降低城区车辆振动、人员走动带来的观测误差,数据稳定性、连续性远优于传统人工监测模式,可以作为老旧建筑物精密沉降监测的辅助手段和补充完善方法。

倾角传感器自动化监测倾斜率与人工天宝水准仪测量沉降差值计算倾斜率平均误差 0.08%~0.31%,自动化监测精度相比人工监测更小,可直接进行房屋倾斜情况。

4.2 时间效益

自动化监测系统全天候运行,暴雨天气、深夜时段可以正常采集数据,全年有效观测数据量对比传统人工监测模式提升 10 倍以上,彻底消除夜间和雨季观测空白期,能够及时捕捉变形加速前兆,完美适配本项目长周期监测需求。

4.3 人力及社会效益

前期传统监测模式需要 2 名测绘人员每天定期现场观测;采用自动化监测方案之后,每周 3 次使用天宝水准仪校核设备精度,现场监测人员工作量减少 57%;测绘人员不用长期在危险区域开展作业,消除作业安全隐患;连续完整监测数据为施工单位加固处置、住建主管部门安全管控提供可靠依据,及时规避基坑北侧老旧砖混楼房开裂、倾斜安全风险,取得良好社会效益。

5 结论与展望

5.1 主要结论

1、在建筑物沉降达到红色预警等级后,项目布设静力水准仪、倾角传感器构建自动化监测系统,同时采用天宝精密水准仪开展周期性比对观测和定期校核。实测结果表明,整套监测体系观测精度满足《建筑变形测量规范》JGJ 8-2016 二等变形测量相关要求,能够适用于城区老旧建筑物沉降与倾斜变形的长期安全管控。

2. 自动化监测平台在 2025 年 3 月 2 日捕捉到建筑物沉降速率加快的发展趋势,实现提前预警。对比现场施工工况可以看出,预警时段监测时序变化规律与场地土体扰动、地下水位工况情况高度匹配,证明该监测方案可有效识别变形发展前兆,在工程风险预判方面具备实用价值。

3. 传统人工监测易受时段、天气条件限制,夜间、强降

雨天气难以开展观测,数据存在间断问题。自动化监测能够实现连续不间断数据采集,有效填补观测空白,加密采样频次。采用自动化方案后,现场测绘人员投入减少 57%,兼具时效、人力、安全多重优势。

4. 项目采用管路保温、分段温度修正、每月零点校准、定期管路排气等综合手段进行控制。自动化观测成果与精密水准人工复测差值稳定,有效消除温度、管路带来系统性误差,保障长期监测数据可靠性。

5.2 展望

本次监测方案能够满足老旧建筑变形监测基本需求,但仍存在优化空间。

1. 静力水准监测系统管线敷设长距离通液管路环境温度不均,依然会带来残余误差,后续可以继续优化温度补偿模型,进一步缩小自动化观测与人工水准观测的偏差。

2. 未来可结合区域地质条件、基坑开挖时序建立动态预警模型,摆脱固定阈值预警的局限性,提升预警精准度。

3. 针对城区老旧建筑监测场景,持续探索小型化、易布设、低维护的自动化监测设备方案,整合多源监测数据,提升建筑物变形风险研判水平。

[参考文献]

[1]GB 50497-2019,建筑基坑工程监测技术标准[S]. 中华人民共和国住房和城乡建设部,北京:中国建筑工业出版社,2019.

[2]JGJ 8-2016,建筑变形测量规范[S]. 中华人民共和国住房和城乡建设部,北京:中国建筑工业出版社,2016.

[3]何扬. 新型高精度静力水准监测系统的研发与工程应用[D]. 绍兴文理学院,2023. DOI:10.27860/d.cnki.gsxl.2023.000103.

[4]杨彬,李磊,赵晋睿,等. 建筑物沉降自动化监测预警平台研究[J]. 科技资讯,2026,24(13):44-46. DOI:10.16661/j.cnki.1672-3791.2510-5042-9785.

作者简介:刘广庆(1967-),男,汉族,湖南长沙人,本科,高级工程师,主持多项城市复杂环境的深大基坑、高边坡、周边建构筑物安全监测项目,主要研究精密工程测量、多源自动化监测设备集成、监测数据变形预警分析,擅长基坑(边坡)及周边环境变形监测数据分析及安全风险判断预警,研究方向:基坑(边坡)及周边环境变形监测及风险预警。