引文格式：李谋思,柯洋,朱齐. 多元传感器在基坑自动化监测中的应用及精度分析[J]. 地理空间信息, 2025, 23(4):105-108. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.04.023

# 多元传感器在基坑自动化监测中的应用及精度分析

李谋思[1]，柯　洋[1]，朱　齐[1]，李世麟[1]
（1. 武汉市勘察设计有限公司，湖北 武汉 430022）

**摘　要：**为研究多元传感器在基坑自动化监测中的组合应用及数据的可靠性。在某基坑项目监测实施过程中，利用测量机器人、阵列位移计、钢筋计、水位计等多类型传感器，结合数据采集模块和通信模块组建基坑自动化监测系统，实现对基坑内围护结构位移、支撑轴力、深层水平位移、水位等项目的自动化监测，并采用人工监测方法进行数据对比分析。结果表明，传感器自动化监测数据与人工监测数据变形趋势一致，可真实反映基坑在施工期间变形情况。传感器自动化监测精度可靠，可实现动态测量，提高基坑监测智能化、信息化水平，在类似工程中可做推广应用。

**关键词：**多元传感器；自动化监测系统；人工监测；可靠性
**中图分类号：**P258　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）04-0105-04

## Application and Accuracy Analysis of Multi-sensor in the Foundation Pit Automation Monitoring

LI Mousi[1], KE Yang[1], ZHU Qi[1], LI Shiling[1]
(1. Wuhan Geotechnical Engineering and Surveying Co., Ltd., Wuhan 430022, China)

**Abstract:** To study the combined application of multi-sensor in automation monitoring of foundation pit and the reliability of data, in the monitoring process of a foundation pit project, we used various sensors such as measuring robot, array displacement meter, steel bar meter and water level meter and combined with data acquisition module and communication module to establish an automation monitoring system for foundation pit, so as to realize the automation monitoring of displacement, supporting axial force, deep horizontal displacement and water level in foundation pit. We compared and analyzed the data by manual monitoring methods.The results show that the deformation trend of automation monitoring data of sensors is consistent with that of manual monitoring data, which can truly reflect the deformation of foundation pit during construction. The automation monitoring accuracy of sensor is reliable, which can realize dynamic measurement and improve the intelligent and informational level of foundation pit monitoring, and be popularized and applied in similar projects.

**Key words:** multi-sensor, automation monitoring system, manual monitoring, reliability

随着城市建设发展的加速，城市用地愈发紧张，建筑基坑设计深度及规模不断增大，为保证深基坑安全施工，对基坑及周边环境的安全作出科学的预判，必须对基坑进行监测。基坑监测作为基坑“动态设计、信息化施工”原则的重要环节，及时、准确、高效反映基坑形变及受力情况，对工程安全施工具有重要作用。传统人工监测模式监测周期长、信息反馈慢，且无法连续监测基坑的形变与受力情况，容易受到人为因素干扰[1-3]。为满足实时监测的需求，近年来利用新技术、新方法实现基坑智能化监测已成为研究热点，如采用测量机器人对围护结构、立柱等进行位移及沉降监测，采用传感器对土体或支护结构深层水平位移进行监测，并利用计算机、物联网、4G等技术搭建监测平台，实现对传感器的控制及对监测数据的分析管理、数据发布等[4-5]。

本文以武汉某项目深基坑监测工程为例，对基坑自动化监测系统的组建及技术应用进行探讨。该工程位于武汉市江汉区，项目占地面积约30 500 m$^2$，基坑周长约590 m，面积约23 000 m$^2$，场址地貌单元属于长江一级阶地。本工程设三层地下室，开挖深度为18.1 m。基坑支护形式采用1 m或1.2 m厚度地下连续墙+2道钢筋砼圆环内支撑+桩顶放坡，内外侧壁采用三轴搅拌桩或高压旋喷桩作槽壁加固，止水帷幕采用落底式CSM或者TRD等厚水泥土搅拌墙；坑中坑采用1∶1.2放坡+坡面挂网喷砼或者拉森钢板桩支护。本基坑上层滞水控制措施为坑内集水明排+坡面喷射混凝土止水；承压水控制措施为落底式止水帷幕+中深管井疏干降水。周边环境复杂，基坑北侧及东侧均为

项目来源：武汉市城建局科技计划项目（202349）。
第一作者简介：李谋思（1991—），硕士，工程师，主要从事工程测量、工程监测工作，E-mail：1941419608@qq.com。

城市主干道，且道路下方各有一条已运营地铁线路及地下管廊，南侧为城市次干道，西侧为绿地。本基坑重要性等级为一级。

为了保证本深基坑安全施工，对基坑支护及周边环境的影响做出科学的预判，对本基坑围护结构形变、深层水平位移、支撑轴力、地下水位实行了自动化监测，并辅以人工监测数据进行对比分析。

## 1 基坑监测系统的组建

本基坑监测项目包括周边环境（周边地表、道路、地下管廊）竖向位移，围护结构竖向位移、水平位移及深层水平位移，土体深层水平位移，砼支撑轴力，地下水位等。其中周边环境（周边地表、道路、地下管廊）竖向位移采用人工监测模式，基坑内各测项采用传感器自动化监测模式。

### 1.1 自动化监测

采用自动化监测的项目，其传感器的埋设方法、计算原理与常规人工监测相似，主要区别在于现场增加固定的采集端或采集设备（如传感器、采集器等）和持续供电的设施，以实现对预埋测点或传感器的连续采集，并通过通信设备远程将监测数据发送至监测云平台进行数据储存、处理、展示和发布等[6]。

数据采集传输单元是连接传感器单元和监测云平台的枢纽中心，现场传感器数据通过采集传输单元实现自动化采集，通过无线GPRS发送至监测云平台，平台通过施工区域内覆盖的4G网络，控制设备的采集过程，并进行远程控制。数据采集终端均采用模块化设计，自身耗电功率较小，供电方式采用太阳能电池板结合蓄电池模式[7-9]。

#### 1.1.1 围护结构顶部监测

围护结构顶部竖向位移、水平位移自动化监测采用测量机器人进行测量。测量机器人自动化监测在地铁监测中应用较为广泛，技术成熟[10-11]。测量机器人架设于观测站房，配备电子气温气压计、控制系统、通信系统及不间断供电系统等实现自动化监测。

#### 1.1.2 围护结构及土体深层水平位移监测

深层水平位移自动化监测系统由测斜管、阵列位移计、采集模块、通信模块和温度计等组成。测斜管在绑扎或埋设前应先检查测斜管质量，测斜管连接时需保证上、下管段的导槽相互对准、顺畅，各段接头及管底应保证密封，测斜管管口、管底也应采取保护措施；采用钻孔法布设土体测斜孔时，测斜管与钻孔之间的空隙应填充密实；测斜传感器安装前还需用测试探头对测斜管安装质量进行测试[12]。

阵列位移计通过MEMS微机电系统测量加速度计，在不同的轴向上的加速度变化量来反映对应轴向与重力方向的角度变化量，通过角度的变化量推算相应节点的位移变化量。利用测控技术、重力加速度测量技术、传感器温度补偿技术及相关算法，实现对监测物体 $X$ 、$Y$ 、$Z$ 三维变形量的实时在线监测。

阵列位移计安装时要注意 $X$ 方向与测斜管主要变形方向保持一致，可用手提或木架等辅助等方式投送，投送时严禁弯折挤压；阵列位移计随定向导轮同步下放并触底后，需用尾节定向轮固定上部方向、记录阵列位移计此刻的 $X$ 方向；安装完成后，安装下压件套装并固定下压盖，最后连接供电、保护装置，整套阵列位移计设备系统即安装完成，如图1所示。

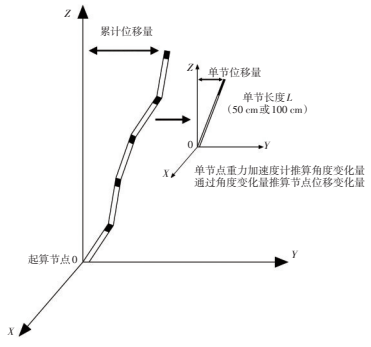



图1 阵列位移计工作原理

#### 1.1.3 砼支撑轴力监测

支撑轴力自动化监测系统由钢筋计、采集模块和通信模块组成。在支撑绑扎钢筋时，将主筋截断，钢筋计与支撑主筋焊接，钢筋计线路通过PVC管走线至围挡护栏上防护箱内，与采集端相连，并设置定时监测参数，采集数据后通过传输模块传输回监测云平台进行处理。

#### 1.1.4 地下水位监测

地下水位自动化监测系统由水位计、采集模块和通信模块组成。水位计布置在水位观测井内，水位计测头需下放至适当深度，量测渗压计探头的下放深度，仪器线缆引至采集端，并将水位孔封闭，防止地表水进入管内引起测量误差，在水位监测孔顶做保护窨井，可采用人工监测进行复核[13]。

### 1.2 人工监测

在项目实施过程中，为验证自动化监测数据的可靠性，采用自动化监测的各测项均布设有一定数量的人工监测点，采用人工定期监测，以便后续进行数据对比分析。

围护结构人工监测点位选取靠近地铁侧点位，水平位移监测采用测量机器人进行监测，围护结构顶部

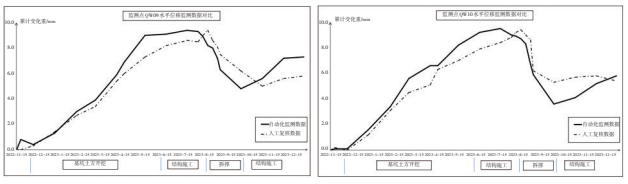
竖向位移采用人工水准进行监测；围护结构深层水平位移及土体深层水平位移监测均预留人工测斜孔进行监测，其中围护结构深层水平位移监测孔及土体深层水平位移监测各 2 个；支持轴力人工监测点 2 组，第一道支撑及第二道支撑各布设一组，布设于自动化监测轴力同断面处；地下水位监测通过水位计进行人工监测，其中坑外水位监测孔 3 个、坑内水位监测孔 3 个；人工监测与自动化监测时间间隔控制在 2 h 以内，人工监测频率根据现场施工工况确定，原则上不低于 1 次/月。

## 2　基坑监测数据可靠性与精度分析

目前，本项目基坑地下结构已施工完毕，正在进行地上结构施工，各施工阶段自动化监测及人工监测数据分析如下。

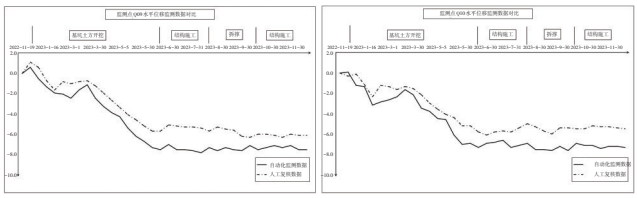
### 2.1　全站仪自动化监测数据分析

测量机器人自动化监测数据采集频率 2 次/d，并定期进行人工基准网复核及修正。因本项目基坑为规则多边形，内支撑为环形，水平位移监测采用基于虚拟中心点算法，该方法可快速准确地将全站仪观测值归算为水平位移量[14]。水平位移监测人工复核采用视准线法，竖向位移监测采用人工水准复核，利用差分数据处理算法，对数据进行平差计算[15]。人工复测周期涵盖基坑施工全过程，根据施工进度，复测频率 1 次/周~1 次/月，选取基坑 CD 段 2 个围护结构顶部监测点在典型工况下监测数据进行对比，成果如图 2~3 所示。



a 监测点 QW09 水平位移监测数据对比　　b 监测点 QW10 水平位移监测数据对比

图 2　监测点水平位移监测数据对比曲线图



a 监测点 Q09 竖向位移监测数据对比　　b 监测点 Q10 竖向位移监测数据对比

图 3　监测点竖向位移监测数据对比曲线图

由图 4 可知，全站仪自动化水平位移监测数据与人工监测数据虽存在一定较差，在不同工况阶段变形趋势保持一致；由图 5 可知，全站仪自动化竖向位移监测数据与人工监测数据也存在一定较差，随着监测时间延长，竖向位移较差呈现先变大后趋于平缓的趋势，数据变形趋势仍能保持一致。

### 2.2　深层水平位移监测数据分析

深层水平位移自动化监测采用 QM-ADM 系列阵列位移计，传感器布设间距 m/个，自动化监测数据采集频率 4 h 一次。人工监测孔布设于基坑 BC、DE 段中部位置，土体及桩体各预埋了 2 个监测孔进行人工监测，桩体人工监测孔与自动化监测孔埋设于同一幅地连墙中，土体人工监测孔与自动化监测孔间距约 3~5 m。人工复测周期涵盖基坑施工全过程，根据施工进度，复测频率 3 次/周~1 次/月，监测数据如图 4~5 所示。

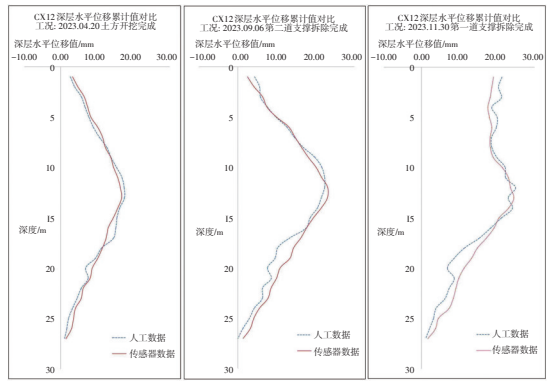



图 4　桩体深层水平位移监测数据对比

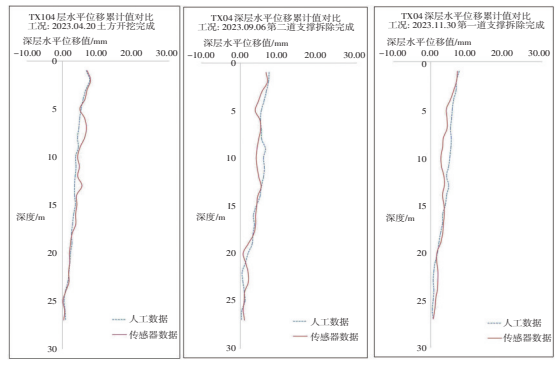


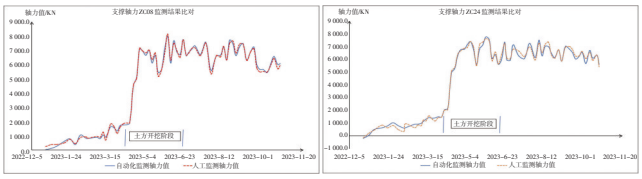

图 5　土体深层水平位移监测数据对比

由图 4~5 可知，围护结构深层水平位移监测最大累计变形量约 25 mm，最大变形处位于基坑深度 2/3 处、土体深层水平位移监测最大累计变形量约 10 mm。自动化监测反映深层水平位移监测趋势与人工监测趋势一致，可真实反映围护结构及土体在基坑施工期间变形情况。

### 2.3　支撑轴力监测数据分析

支撑轴力监测采用振弦式钢筋计进行测量，配备气象传感器，结合多通道振弦采集仪进行数据采集，利用 4G 技术实现数据传输。人工监测选取 2 组支持轴力，点位布设与自动化监测轴力相同，钢筋计采集线同过 PVC 管走线至围挡护栏上固定，并做好防护。

人工复测周期涵盖基坑施工全过程，根据施工进度，复测频率3次/周~1次/月，监测数据如图6所示。




a 监测点ZC08支撑轴力监测数据对比　　b 监测点ZC24支撑轴力监测数据对比

图6 支撑轴力监测数据对比

由图6可知，支撑轴力自动化监测与人工监测监测符合性较好，受力变化趋势一致，可真实反映支撑在基坑施工期间变形情况。

### 2.4 地下水位监测数据分析

地下水位监测采用QMDT-231S型水位计，采用投入式安装，水位监测孔顶做保护窨井，揭开即可进行人工复测，为验证地下水位监测数据准确性，选取坑外3个坑外地下水位监测孔、3个坑内地下水位监测孔进行数据复核，自动化监测数据采集频率1 h一次，根据施工进度，人工复测周频率3次/周~1次/月，人工监测数据采集点与自动化数据采集点保持一致。

根据现场工况，2022年9月27日—2022年11月15日，现场处于冠梁及支撑施工期，2022年11月15日—2022年12月10日，现场进行降水实验。由表1及表2数据可知，地下水位自动化监测数据与人工监测数据趋势相同，本项目地下水位监测预警值为1 000 mm，按照允许变形值的1/10~1/20作为精度指标，地下水位自动化监测数据与人工监测数据较差均在100 mm以内，满足要求。

表1 坑外地下水位自动化监测与人工监测数据比对表/mm

| 日期 | SW01 | | 较差 | SW02 | | 较差 | SW03 | | 较差 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 自动化监测 | 人工监测 | | 自动化监测 | 人工监测 | | 自动化监测 | 人工监测 | |
| 2022年9月27日 | 12.725 | 12.696 | −29 | 12.581 | 12.533 | −48 | 12.129 | 12.091 | −38 |
| 2022年10月20日 | 12.970 | 12.916 | −54 | 12.910 | 12.872 | −38 | 12.510 | 12.417 | −93 |
| 2022年11月15日 | 12.810 | 12.827 | 17 | 12.750 | 12.744 | −6 | 12.380 | 12.287 | −93 |
| 2022年11月20日 | 13.810 | 13.731 | −79 | 13.840 | 13.825 | −15 | 12.700 | 12.628 | −72 |
| 2023年11月30日 | 14.210 | 14.138 | −72 | 13.370 | 13.291 | −79 | 12.580 | 12.545 | −35 |
| 2023年12月10日 | 14.250 | 14.212 | −38 | 13.770 | 13.784 | 14 | 12.470 | 12.564 | 94 |
| 2023年12月20日 | 13.350 | 13.426 | 76 | 12.700 | 12.658 | −42 | 12.460 | 12.425 | −35 |
| 2023年12月30日 | 13.980 | 13.928 | −52 | 13.630 | 13.545 | −85 | 12.500 | 12.542 | 42 |

表2 坑内地下水位自动化监测与人工监测数据比对表/mm

| 日期 | SW04 | | 较差 | SW05 | | 较差 | SW06 | | 较差 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 自动化监测 | 人工监测 | | 自动化监测 | 人工监测 | | 自动化监测 | 人工监测 | |
| 2022年9月27日 | 11.430 | 11.408 | −22 | 12.820 | 12.774 | −46 | 11.820 | 11.770 | −50 |
| 2022年10月20日 | 11.310 | 11.379 | 69 | 17.960 | 17.883 | −77 | 11.960 | 11.878 | −82 |
| 2022年11月15日 | 11.100 | 11.081 | −19 | 17.400 | 17.312 | −88 | 16.100 | 16.154 | 54 |
| 2022年11月20日 | 14.400 | 14.389 | −11 | 19.900 | 19.845 | −55 | 17.420 | 17.425 | 5 |
| 2023年11月30日 | 16.865 | 16.854 | −11 | 18.684 | 18.658 | −26 | 15.654 | 15.684 | 30 |
| 2023年12月10日 | 14.658 | 14.588 | −70 | 17.030 | 17.086 | 56 | 13.554 | 13.625 | 71 |
| 2023年12月20日 | 10.854 | 10.884 | 30 | 10.930 | 10.864 | −66 | 11.225 | 11.188 | −37 |
| 2023年12月30日 | 11.820 | 11.776 | −44 | 12.160 | 12.230 | 70 | 11.365 | 11.325 | −40 |

## 3 结 语

针对传统人工监测效率低、数据反馈滞后等问题，采用测量机器人、阵列位移计、钢筋计、水位计等多类型传感器组建基坑自动化监测系统，并利用人工监测进行数据复核，传感器自动化监测数据与人工监测数据变形趋势一致，自动化监测精度可靠，可实现动态测量，能满足基坑监测要求。

## 参考文献

[1] 朱波,孙曼曼. 深基坑自动化监测系统设计研究[J]. 测绘与空间地理信息,2023,46(8):184-186

[2] 廖令军,莫成,岳琪迪,等. 基于弱光栅技术的基坑围护结构变形自动化监测研究[J]. 建筑结构,2021,51(增刊):1 963-1 969

[3] 孙泽信,段举举. 某深基坑工程全自动化监测技术的应用[J]. 勘察科学技术,2022(3):52-56

[4] 庞红军,卫建东. 基于测量机器人的深基坑围护结构位移监测技术探讨[J]. 广东建材,2012,28(4):96-98

[5] 赵尘衍,刘全海,谢友鹏,等. 自动化监测技术在地铁基坑工程监测中的应用[J]. 城市勘测,2019(1):196-200

[6] 赵笠,杨嘉威. 深基坑围护结构自动化变形监测与分析[J]. 经纬天地,2022(4):20-23

[7] 徐杨青,程琳. 基坑监测数据分析处理及预测预警系统研究[J]. 岩土工程学报,2014,36(增刊):219-224

（下转第131页）