

# 深基坑自动化监测应用研究

王伟

江苏中达勘察设计有限公司, 江苏 常州

收稿日期: 2026年3月24日; 录用日期: 2026年4月16日; 发布日期: 2026年4月24日

## 摘要

本文以深基坑工程为背景, 系统研究了在线式测斜系统在基坑深层水平位移监测中的应用。该仪器融合传感技术、物联网与移动计算, 可实现深层水平位移的自动采集、无线传输与云端处理。系统由数据采集、传输和处理三大模块组成, 具备全天候、无人值守、实时监控等优势。工程应用中, 在某基坑重点部位布设自动化监测点, 并与人工监测点进行对比分析。结果表明, 在线式测斜系统能够准确反映基坑围护结构的水平位移变化趋势, 监测数据与人工监测成果具有高度相关性(相关系数分别达0.98和0.96), 差值在2 mm以内的占比超过92%。自动化监测数据曲线呈“半喇叭口状”, 与实际工况吻合良好。在线式测斜系统不仅提升了监测效率, 还保障了施工安全, 具有显著的工程实用价值。

## 关键词

在线式测斜仪, 城市地铁, 深基坑, 监测

# Research on the Application of Automated Monitoring in Deep Excavation

Wei Wang

Jiangsu Zhongda Survey and Design Co., Ltd., Changzhou Jiangsu

Received: March 24, 2026; accepted: April 16, 2026; published: April 24, 2026

## Abstract

This paper systematically studies the application of an online inclinometer system in the monitoring of deep horizontal displacement in foundation pits, taking the deep foundation pit engineering of subway tracks as the background. This instrument integrates sensing technology, the Internet of Things, and mobile computing, enabling automatic collection, wireless transmission, and cloud processing of deep horizontal displacement data. The system consists of three major modules: data collection, transmission, and processing, and possesses advantages such as all-weather operation,

unattended operation, and real-time monitoring. In engineering applications, automated monitoring points were set up at key locations of a subway foundation pit and compared with manual monitoring points. The results indicate that the online inclinometer system can accurately reflect the trend of horizontal displacement changes in the foundation pit retaining structure. The monitoring data exhibits a high correlation with manual monitoring results (correlation coefficients of 0.98 and 0.96, respectively), with over 92% of the differences being within 2 mm. The automated monitoring data curve presents a “half-horn shape,” which aligns well with actual working conditions. The online inclinometer system not only enhances monitoring efficiency but also ensures construction safety, demonstrating significant practical engineering value.

## Keywords

Online Inclinometer, Urban Subway, Deep Foundation Pit, Monitor

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

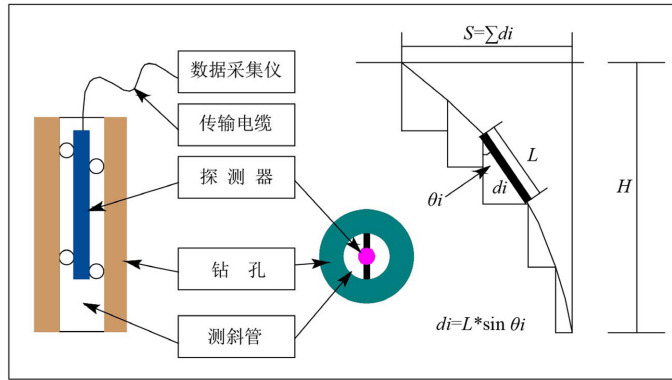
## 1. 引言

伴随着国内城市发展速度加快，交通建设也同步快速建设，城际铁路、地铁等地下交通工程日益增多，其中施工过程中会出现大量深基坑工程，为保障工程顺利推进与周边施工的安全，及时监测深基坑的水平位移成为工作中重点内容。若未能及时监测和控制，可能引发基坑坍塌、周边建筑物沉降等严重事故。因此，开展深基坑水平位移的精准、连续监测具有重要的工程意义[1]-[3]。传统的基坑水平位移监测主要依赖人工测量方法，如采用滑动式测斜仪进行逐点测量。该方法虽然精度较高，但存在测量效率低、数据采集不连续、受天气和现场条件限制大等不足。尤其是在基坑开挖的关键阶段，变形发展迅速，人工监测难以实现对变形过程的实时捕捉，存在信息滞后的风险。此外，人工监测需要技术人员频繁进入施工现场，增加了安全风险[4]-[6]。因此，如何实现对基坑深层水平位移的自动化、实时化监测，成为当前岩土工程监测领域的研究热点。

随着传感技术、物联网、无线通信及云计算等技术的发展，自动化监测系统逐渐应用于深基坑工程中。在线式测斜仪作为其中的典型代表，将高精度倾角传感器与数据传输模块集成，能够实时采集围护结构不同深度处的倾角变化，并通过内置算法计算出水平位移。该系统具有全天候、无人值守、数据远程传输、自动报警等优点，可显著提高监测效率和数据可靠性，已在部分基坑工程中得到初步应用[5]-[7]。然而，目前关于在线式测斜系统在城市深基坑中的系统应用研究仍较少，尤其是在复杂地质条件下，其监测精度、稳定性以及与人工监测成果的相关性尚需进一步验证。基于此，本文以某城市深基坑工程为依托，布设在线式测斜系统，采集水平位移数据并与传统人工方法对比，旨在评估在线式测斜系统在实际工程中的适用性和可靠性，为类似工程提供参考依据。

## 2. 基本原理

在深基坑围护结构的桩身侧向位移观测中，通常将测斜管的底端设为固定基准。当桩体受力发生形变时，测斜管的轴线便会出现弯曲，借助测斜仪测量管身各段的倾斜角度变化，从而推算出桩体的水平位移量，工作原理见图 1 所示。



**Figure 1.** Working measurement principle  
**图 1.** 工作测量原理

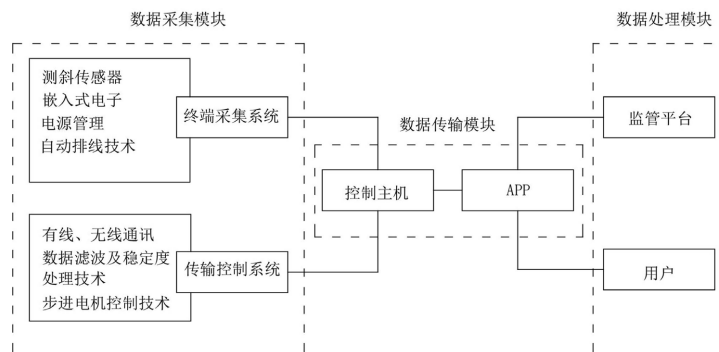
假设安装传感器的位置产生倾斜形变，测斜仪立即产生同量的变形值，处于某一深度的变形量  $d_i$  与输出的角度  $\theta_i$  二者计算关系为：

$$d_i = L * \sin \theta_i \tag{1}$$

式中： $d_i$  为水平位移变化量； $L$  为某一深度的步距； $\theta_i$  为某一深度的角度变化量。那么该深度实际位移变形量统计为  $S_i = \sum_1^i d_i = d_1 + d_2 + \dots + d_i$ 。

在线式测斜仪是一种集成了传感器技术、物联网通信以及移动计算等前沿科技的机电一体化设备，能够实现数据的自动采集与移动存储等功能。该仪器被固定于测斜管的顶端，可对工程项目中的深层水平位移进行不间断的自动监测，所获得的数据通过内部的传输模块实时发送至云服务器。其供电方式灵活，既可使用内置锂电池，也可接入外部电源；测斜仪及其无线探头均具备优异的户外防护能力，能够有效抵御雨水和灰尘[7]。

在线式测斜系统主要分为三个关键组成部分：数据采集、数据传输和数据处理，其结构如图 2 所示。其中，数据采集部分由终端采集单元与传输控制单元组成，负责将现场获取的数据经传输模块发送至数据处理单元。数据处理模块则承担数据的存储、分析与综合管理任务，可自动生成相应的数据报表和变化曲线。工程技术人员通过监控平台即可随时查阅监测数据，该平台还支持项目管理、参数调整、数据维护及报表输出等多种功能。整个系统无需人员现场值守，能够实现全天候连续监测，从而大幅提升了监测工作的效率。



**Figure 2.** System architecture  
**图 2.** 系统构架

### 3. 工程应用

#### 3.1. 工程概况

常州某地块深基坑项目位于常州市天宁区市中心,北侧为29F办公大厦,南侧为常州市某人民医院,西侧为某大厦辅楼(停车塔楼),地上12层,地下一层。基坑周边密布各类市政管线,周边环境复杂。为实时监测施工过程中深基坑对周边环境的影响,按照监测方案对深基坑布设监测点与自动化测斜系统。

#### 3.2. 在线式测斜系统布置

该基坑工程的常规监测项目包括围护结构顶部的水平和垂直位移、深层土体水平位移、支撑结构的轴力变化、基坑周围地下水位动态以及地表沉降等,这些监测内容均由人工现场完成。为了检验在线式测斜系统在实际工况下的运行性能与适应性,选取了基坑的重点监测区域,在原有的人工监测孔附近布设了在线式测斜系统:

- 1) 测斜管和固定式测斜仪安装。在基坑重点监测部位布设2个在线式测斜自动化监测点,点号为 $ZQT_{ZD1}$ 、 $ZQT_{ZD2}$ ,人工监测点的点号为 $ZQT_1$ 、 $ZQT_2$ ,人工监测点和自动化监测点的距离1m左右。
- 2) 将测斜管固定于基坑围护结构的钢筋骨架上,待围护结构混凝土浇筑完毕,采用测斜仪对已安装管道进行检验,确认管身顺直、内部通畅,确保后续可进行人工测量及在线式测斜仪的布设。验收合格后,对监测孔孔口采取防护措施并标明对应孔号。
- 3) 待冠梁浇筑完毕,结合现场实际工序安排,在基坑开挖施工启动前,完成在线式测斜仪的布设与功能验证。确保传感器读数稳定、数据上传正常,且后台系统可正常接收监测数据。

#### 3.3. 数据采集及处理

##### 1) 数据采集

在线式测斜系统现场安装完毕后,技术人员立即着手测定初始值。依据相关技术规程,对监测点需连续测量三次,取三次结果的算术平均值作为本次监测的初始基准值。初始基准值确定后,再根据工程需求设置监测频率及其他参数。本项目将监测时间间隔设为每两小时自动采集一次,系统通过内置数据传输模块,把现场采集的实时监测数据发送至数据中心服务器统一存储。

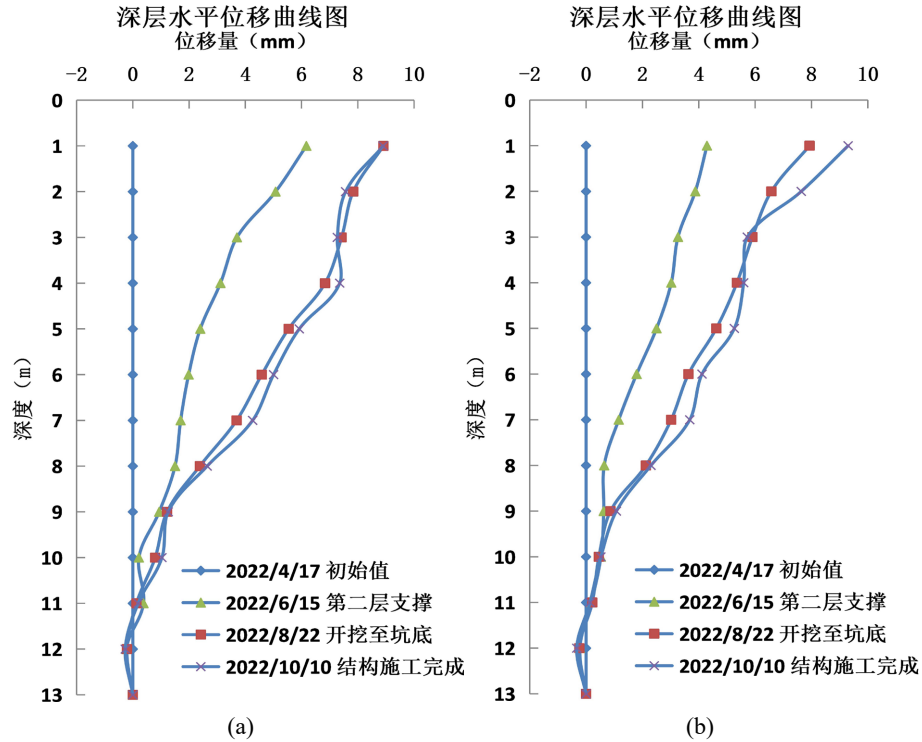
##### 2) 数据处理

该在线式测斜系统可独立完成野外测量作业,无需人工干预数据读取与记录。数据处理模块自动解析接收到的原始监测数据,采用数据滤波算法与稳定度判别技术,从而有效提高最终测量结果的准确性与可信度。测量过程中,原始数据及变形趋势可动态可视化展示,分析成果以图形、曲线或报表等形式输出,并能根据具体监测需求自动生成定制报告。技术人员可通过网络在线查阅各类图形曲线、数据报表及历史演变记录,便于在现场快速分析数据并得出结论。所有监测数据均支持远程传输与实时共享,技术人员采集到的原始资料可随时传送给协作人员进行分析。系统内置报警阈值设置功能,一旦监测点数据出现异常波动,系统会即刻触发自动预警。

#### 3.4. 数据分析

##### 1) 监测成果

该系统在外业采集数据时,以一米为采样距离。监测结果显示,深层水平位移量随深度增加呈现出由大逐渐减小的变化规律,对应的位移曲线形态近似为向上扩张的半喇叭状。针对这类变形特征,施工过程中应重点关注支护结构顶部的水平位移变化,并及时采取加设支撑的措施以控制变形发展。以监测点 $ZQT_{ZD1}$ 与 $ZQT_{ZD2}$ 为例,图3分别展示了不同深度位移变形值。



**Figure 3.** Horizontal displacement curve graph. (a) Monitoring point  $ZQT_{ZD1}$  results curve chart; (b) Monitoring point  $ZQT_{ZD2}$  results curve chart  
**图 3.** 水平位移曲线图。(a) 监测点  $ZQT_{ZD1}$  成果曲线图；(b) 监测点  $ZQT_{ZD2}$  成果曲线图

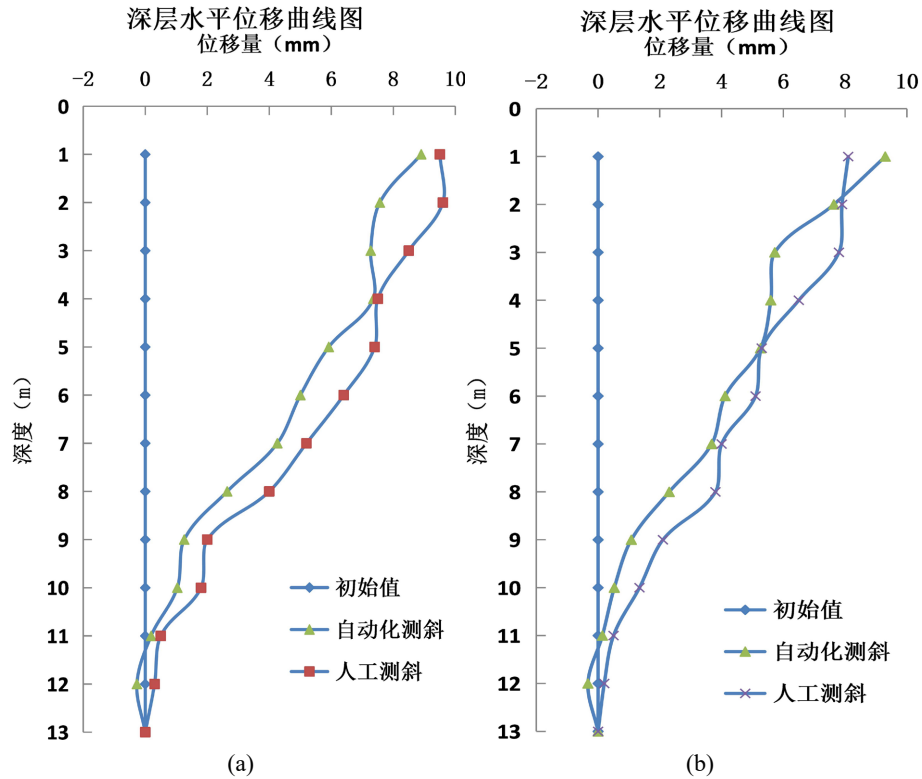
2) 系统成果与人工监测成果相关性分析

为评估在线式测斜系统所获数据的准确度与稳定性，将自动化监测结果与人工测量数据进行对比分析，见图 4 所示。首先，分别统计两种方式在各深度位置测得的水平位移差值，统计结果显示：差值在 1 毫米以内的测点占总数的 65%，差值在 1 至 2 毫米之间的占 27%，而差值超过 2 毫米的占 8%。从图 4 给出的深层水平位移对比曲线可见，人工监测与自动化测斜的累计位移变化曲线均呈现“半喇叭口”形态，这一形态与基坑开挖过程中围护结构的受力变形机理密切相关。在基坑开挖初期，围护结构顶部尚未设置或仅设置首道支撑，结构处于近似悬臂受力状态，主动土压力作用使坑顶产生最大水平位移。随着开挖深度增加，支撑系统逐步施加，围护结构侧向变形受到约束，位移增量向坑底方向衰减。该变形特征符合弹性地基梁理论中“悬臂—支撑”阶段变形分布规律，即围护结构水平位移沿深度呈非线性衰减趋势，最大位移点处于坑顶附近或第一道支撑以下某一位置，具体取决于支撑刚度、土层性质及开挖深度等因素。本工程中观测到的“半喇叭口状”曲线，反映了围护结构在逐层开挖、支撑施加过程中的典型受力响应，与理论计算及同类工程经验规律一致。

将人工监测的数据和自动化监测数据绘制成曲线图，由图可知二者位移曲线走势趋于一致。并统计二者相关性进行分析工作，为进一步量化分析两种监测方法的相关性，采用 Pearson 相关系数进行统计，其计算公式为：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

式中,  $x_i$ 、 $y_i$  分别为自动化监测与人工监测的位移值,  $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$  为对应均值。相关系数  $r$  的取值范围为 $[-1, 1]$ , 其绝对值大小反映变量间线性相关的密切程度, 通常按表 1 进行分级。



**Figure 4.** Comparison curve diagram of deep horizontal displacement measured by online inclinometer and manual monitoring. (a) Monitoring points  $ZQT_{ZD1}$  and  $ZQT_1$  comparison curve of results; (b) Monitoring points  $ZQT_{ZD2}$  and  $ZQT_2$  comparison curve of results

**图 4.** 在线式测斜仪深层水平位移与人工监测对比曲线图。(a) 监测点  $ZQT_{ZD1}$  和  $ZQT_1$  成果对比曲线图; (b) 监测点  $ZQT_{ZD2}$  和  $ZQT_2$  成果对比曲线图

**Table 1.** Data correlation indicators

**表 1.** 数据相关性指标

$r$ 值	$ r  > 0.95$	$0.8 \leq  r  \leq 0.95$	$0.5 \leq  r  < 0.8$	$0.3 \leq  r  < 0.5$	$ r  < 0.3$
相关性	显著性相关	高度相关	中度相关	低度相关	弱相关

通过数据分析可得, 自动化监测点与人工监测点之间的相关系数分别为 0.98 和 0.96, 对照表 1 中的相关性分级标准, 两者呈显著相关关系。两种监测方式所获取的数据均能准确揭示基坑围护结构水平位移的变化规律, 由此证明在线式测斜系统可有效替代传统人工监测手段。

尽管自动化监测与人工监测成果总体呈高度相关(相关系数分别为 0.98 和 0.96), 但仍有约 8% 的测点差值超过 2 mm。为进一步评估自动化监测系统的可靠性, 有必要对差异产生的可能原因进行剖析:

(1) 测量时间不同步: 人工监测通常按天或特定施工节点进行, 而自动化系统为每 2 小时采集一次。若在两次人工监测间隔内, 基坑发生阶段性变形(如支撑轴力变化、开挖卸载等), 则两者所反映的位移量可能存在时序上的错配, 导致差值增大。

(2) 人工监测的偶然误差：传统滑动式测斜仪依赖操作人员逐点测量，测头的放置深度、提拉速度、方向对齐精度等因素均可能引入偶然误差。尤其在深度较大、测斜管存在轻微扭曲的情况下，多次测量结果之间的重复性有限。

#### 4. 结束语

基于某深基坑的实际工程案例，对在线式测斜系统在深层水平位移监测中的表现进行了系统评估。结果显示，自动化监测所获数据与人工测量结果呈现出极强的一致性，相关系数分别高达 0.98 与 0.96，其中差值控制在 2 毫米以内的测点占比超过 92%；同时，两条位移曲线均呈典型的“喇叭口”形态，充分证明了该系统在工程应用中的准确性与稳定性。真实反映了基坑围护结构的变形规律。在线式测斜系统融合传感技术、物联网与云计算，具备全天候无人值守、数据远程传输、实时报警等优势，有效弥补了人工监测效率低、信息滞后等不足，显著提升了监测工作的安全性与时效性。但也应看到，该系统对布设条件要求较高、前期投入较大，且目前仅能实现单向采集。随着技术进步与成本下降，自动化测斜系统在深基坑及类似工程中必将拥有广阔的应用前景。

#### 参考文献

- [1] 赵超轩, 朱经海. 基坑深层水平位移自动化和人工监测优缺点对比分析[J]. 城市勘测, 2025(5): 198-202.
- [2] 李汉城, 梁炳新. 自动化监测技术在管道基坑中的应用[J]. 科技创新与应用, 2025, 15(21): 189-192.
- [3] 赵焜. 自动化监测技术在深基坑监测中的应用[J]. 中国高新科技, 2025(3): 137-139.
- [4] 王晓初, 刘湘邦, 王义, 等. 一种基坑水平位移自动化监测系统的设计[J]. 工业控制计算机, 2023, 36(10): 26-28.
- [5] 刘志东. 某地铁基坑自动化与人工监测数据对比分析[J]. 工程质量, 2023, 41(S1): 192-196.
- [6] 陈邵斌, 尹俊, 李志强, 等. 超深超大基坑自动化监测技术在工程中的创新实践[J]. 广东土木与建筑, 2023, 30(4): 12-15, 91.
- [7] 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.