

# 固定式基坑测斜系统研制

吴伟

(同济大学土木工程学院 上海 200092)

**摘要:** 基坑测斜工作是保障基坑安全的重要环节,但目前仍采用人工使用测斜仪监测的常规方法,不仅工作效率低,而且监测频率低,无法满足数据实时采集和自动化管理的要求。结合物联网技术,研究开发了一种基于倾角传感器的远程自动基坑测斜系统。本文介绍了其工作原理,系统构成,以及对其性能进行的试验。经测定,传感器分辨率为 $0.000002\text{ rad}$ ,长期数据误差 $0.0002\text{ rad}$ ,工程适用精度为 $0.0001\text{ rad}$ 。在实验室环境下,系统防水性达到 $100\text{ m}$ 水压,测量相对误差为 $0.12\text{ mm/m}$ ,初步满足了基坑工程监测的远程自动化要求。

**关键词:** 基坑; 测斜; 水平位移; MEMS; 倾角传感器

**中图分类号:** TU198.7    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 420.4099

## Research of an in-place slope monitoring system for excavation

Wu Wei

(Department of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Slope monitoring is a critical step to ensure the safety of excavation. However, conventional manual method using inclinometer is unable to fulfill real-time data acquisition and automated management because of its inefficiency and low monitoring frequency. So we use Internet of Things technology to develop a remote and automatic slope monitoring system based on electronic dip angle sensor. This paper presents the operating principle, constitution of this system and tests of its performance. According to the results, resolution, long term error and applicable accuracy of the sensor are  $0.000002\text{ rad}$ ,  $0.0002\text{ rad}$ , and  $0.0001\text{ rad}$  respectively. In the laboratory, the system has water repellency under the water pressure of  $100\text{ m}$  and relative tolerance of  $0.12\text{ mm/m}$ , which tentatively satisfies remote automation of excavation monitoring.

**Keywords:** excavation; slope monitoring; horizontal displacement; MEMS; inclinometer

## 1 引言

目前的基坑计算理论中经验成分较多,土体参数不确定性大,导致无法准确地进行基坑设计并指导施工<sup>[1]</sup>,特别是在像上海这样的沿江沿海软土地区<sup>[2]</sup>。而基坑安全事故的发生都伴随着地基土体的位移。因此,准确预测施工引起的位移场是评估基坑安全的基础。

地墙等围护结构变形是其中的重要指标。目前基坑围护墙深层水平位移监测(测斜)工作普遍采用活动式测斜仪进行人工测读。然而,其数据连续性差,采集分析周期长,受现场环境干扰大,不能及时指导施工。另外,在测斜管变形过大时,活动测斜仪探头容易发生卡位<sup>[3]</sup>,无法继续使用。随着微电子、无线通信、信息感知和处理技术的快速发展,物联网技术越来越多地被应用到自然灾害的监测等领域中<sup>[4]</sup>。已有的固定式测斜装置通过将类似于活动式测斜

仪的测斜探头固定安装在测斜管内,通过网络传输数据以实现自动化监测。但由于探头之间为并联方式,出线较多,安装的探头数量受测斜管尺寸及造价所限,导致探测深度不足或者探头间距过大造成精度不高。

鉴于此现状,着眼于基坑工程围护墙体和土体的深层水平位移实时自动化监测,利用计算机技术,通信技术,传感器和网络技术,本文介绍了一种基于倾角传感器的固定式智能测斜系统的研究、试制,并对其各方面性能进行的测试,以保证其满足基坑现场的实时监测要求。

## 2 智能基坑测斜系统

智能测斜系统由测斜传感系统、无线传输系统以及数据处理、发布系统构成,具体如图1所示。倾斜传感器固定在测斜管中,并预埋在待监测土体或地下结构物内。测斜传感系统将随着土体或结构位移变化而引发倾斜角度变

化。无线传输系统按设定的采集频率将该倾斜角度的变化值实时传输至远端服务器。系统软件就可以由传感器倾角变化值与相邻两个倾斜传感器之间的距离(传感器标距)相乘换算出这一段管体的相对水平位移值。最后各段管体的相对水平位移值逐段叠加可得整根测斜管的水平位移值。



图 1 智能测斜系统构成示意图

## 2.1 测斜传感系统

测斜管直径 75 mm, 2 m 一段, 之间由套管连接, 尺寸能够满足大多数地下构件的安放要求。管体具有一定柔性, 连接套管较短使管段连接处能够有一定的相对转动, 能减少传感器之间的位移相互影响, 这有利于保证测斜管能够随土体发生一致的变形。测斜管如安装在地墙等刚度较大的结构体当中则不存在这种影响。

系统测斜传感部分由沿深度方向每隔一段距离固定于测斜管内的 MEMS(micro electro mechanical system) 倾斜传感器组成。MEMS 电容式倾角传感器精度高, 集成度高, 体积小, 功耗低, 成本低<sup>[5]</sup>, 因而在工程监测中具有广泛的应用前景。本系统的测斜传感原理与传统测斜仪相似, 相当于将测斜仪进行了微型化, 固定化设计。倾斜传感器在互相垂直的两个方向上布置 SCA103T-D04 型单轴倾角传感芯片, 以此为基础进行了电路设计, 以获取并输出芯片测得的倾角电信号。集成后的倾斜传感器主要技术参数如表 1 所示。

表 1 倾斜传感器技术参数表

标准量程	测量方向	工作温度(°C)	工作电源
$\pm 15^{\circ}, \pm 0.26\text{g}$	双向	$-20 \sim +60$	DC9 V 2 A

倾斜传感器之间由 RS485 总线连接, 用于数据传输及供电。单线串联的方式解决了现有固定式测斜传感器间并联方式导致的出线多、单孔设置探头数量受限的问题<sup>[6]</sup>。为了满足固定及地下防水的要求, 倾斜传感器连接好后, 用灌封胶灌封在塑料盒中。灌封好的倾斜传感模块连成一串, 按间距固定在与测斜管同材质的插条上。测斜管内壁开有用于安插插条的槽, 这样就能够将倾斜传感模块固定在测斜管中。相比于传感器之间用钢丝绳或钢杆<sup>[7]</sup>连接, 与测斜管间通过滑轮接触固定, 因而有可能松动甚至脱落<sup>[8]</sup>, 这种构造虽简单, 但非常牢靠, 传感器能够完全固定

在测斜管上, 只是安装工艺复杂, 且不能回收。考虑到测斜的可靠性以及长时间监测的需求, 最终采用了此种安装方式。安装好的测斜传感系统如图 2 所示。



图 2 测斜传感系统构造示意图

## 2.2 无线传输系统

测斜管测斜传感模块引出端口连接至数据采集节点, 采集节点使用 GPRS 通信网络将数据远程传送至因特网上的云端监测服务器平台, 数据经服务端软件接收处理, 保存至数据库, 供进一步数据分析处理。每个测斜管监测点配一个数据采集节点, 安装一张 SIM 卡, 绑定中国移动分配的一个 IP 地址, 实物如图 3 所示; GPRS 技术成熟稳定, 覆盖面广, 能够保证数据流畅地传输至远端服务器<sup>[9]</sup>。

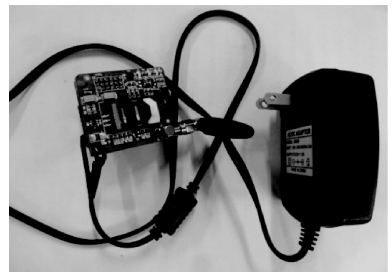


图 3 数据采集节点照片

GPRS 采集节点功耗大, 因此电路设计有休眠唤醒机制, 某一数据采集时刻, 节点依次发送指令唤醒各倾斜传感器采集数据, 并传输到采集节点, 再发送指令使传感器休眠, 整条线路上的传感器均采集完成后, 再将此监测点的数据一起发送到远程服务器, 其余时间断电休眠<sup>[10]</sup>。通过服务器应用软件可以对其采集周期进行设置。这使得系统能够低功耗运行, 方便现场供电不便的监测点使用电池进行供电。

## 2.3 数据处理与发布系统

实时监测会带来大量数据, 对数据进行有效的处理、分

析、展示是监测系统中不可或缺的重要部分。研究团队与南京同睿信息科技有限公司合作,正着手建立基坑工程安全监测系统的网上平台。本平台预期将实现监测数据的实时处理,浏览查询,可视化,分析预警以及输出报表等多种功能。项目的参与各方通过浏览器即可在个人电脑上对工程进行监测,接收预警信息。所有信息的查询都是交互式的,用户点击可视化模型上的测斜管,通过一个关联的数据库,就能得到测量数据的表格及图形化展示,以及相关的现场照片等信息。目前平台的系统框架已经搭建完成,现正进行各个功能模块的开发。测斜系统数据自动处理,分析,展示功能的实现将使智能测斜系统变得完整,真正做到测斜工作的智能化,大大减少工作量,保证预警信息及时有效地传达至监管人员手中。

### 3 测斜系统实验

#### 3.1 传感器测试实验

对集成的倾角传感器进行测试,测定其能够分辨的最小倾角变化及在常用的倾斜角度下的测量误差。标定装置构造如图4,安装杆下端可绕底座固定点转动,上端与螺丝相接,可通过扭动螺丝对这一端施加位移。上端固定有一个百分表,百分表测头抵在安装杆上,能够读取安装杆的位移,除以测头至转动点的距离,即可换算为安装杆的倾角变化弧度值。

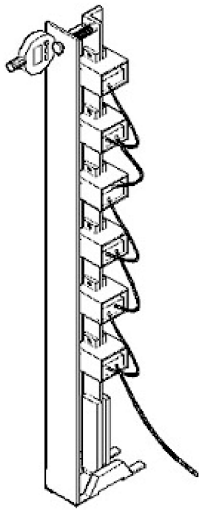


图4 测斜传感模块标定实验示意图

与此同时,传感模块连接至采集节点,上电后开始数据采集。实验中,倾角数据采集、485数据传输、GPRS远程数据传输及数据库操作等各项功能正常,性能指标符合设计要求。

实验一共选取30个传感器,首先让倾角传感器保持不动,重复测量3次,各传感器的输出数据变化最大为 $\pm 0.000002$  rad。因此芯片分辨率验证为 $0.000002$  rad。接

着,设定每3 min采集一次数据,在温度恒定为 $23^{\circ}\text{C}$ 下,保持上电,共进行了3周的数据稳定性测试。结果,在倾角传感器没有外界扰动的情况下,弧度值稳定在 $\pm 0.0002$  rad的范围内,其数据长期稳定度可以接受。

最后,对传感器分别施加涵盖一般工程正常变形的倾角变化,共分3个级别 $0.0003$  rad, $0.001$  rad和 $0.003$  rad,测得倾角变化值误差均在 $\pm 0.0001$  rad以内。实验时由于倾斜传感器安装水平度和安装杆初始倾斜,传感器已经具有一定倾角,但施加倾角变化后距达到量程仍有一定差距,不妨将 $0.0001$  rad作为工程适用精度,便于工程应用。

#### 3.2 测斜传感模块防水实验

防水实验利用混凝土渗透仪进行,实验装置如图5所示。实验时将试模固定在渗透仪的一个试模座上,测斜模块置于试模留出的空腔当中,用混凝土和胶将其密封,导线穿出混凝土试块表面。打开水阀,渗透仪的水泵将往试模中注水。将外露的导线连接至GPRS数据采集节点,陆续打水加压到 $0.5\sim 0.6$  Mpa, $0.7\sim 0.8$  Mpa, $0.9\sim 1.0$  Mpa三阶段实验压力并分别维持3天,确认模块在各实验水压下正常工作与否。



图5 测斜传感模块(虚线标出)防水试验装置

实验结果表明测斜传感模块在 $0.9\sim 1.0$  Mpa的水压下仍可以正常采集数据,其防水性初步得到验证,能够适应大多数工程的水文条件,可以在基坑现场进行应用试验。

#### 3.3 系统运行实验

利用楼梯间两跑楼梯之间的间隙安放测斜管。将测斜管底端树立于底层地坪上,固定使其不发生移动,以此作为不动点。由下至上连接测斜管管段,连至相应高度时,在每层的楼面处用扎带将测斜管固定在楼梯栏杆上,限制其水平位移。安装好的测斜系统实验装置如图6所示。

连接完成后,把导线引出,与数据采集节点连接。连通电源,在远端电脑上通过相应软件接收到各倾斜传感器的初始倾角数据。在楼梯平台与管段间的某些位置对测斜管施加水平位移,用百分表量测得施加的位移值。待位移稳定后读取各传感器此时的倾角数据,将倾角变化值与两个倾斜传感器之间的距离相乘换算出这一段管体的相对水平位移值。最后由各段管体的相对水平位移变化值叠加可得计算点所处高度的绝对水平位移值,与人工用百分表量测得的位移值进行对比。

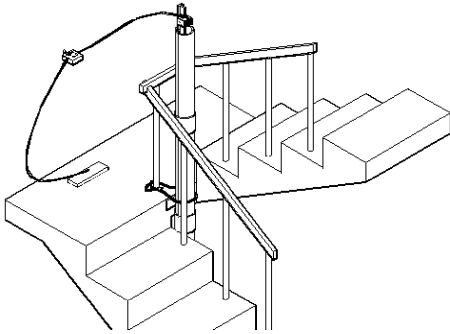


图6 测斜系统试验装置示意图

倾斜传感器间距暂定 1 m 一个,最低的一个距地面 0.5 m,测斜管共安装 10 段,长 20 m。测斜系统测得的及人工测量的测斜管位移对比如表 2 所示,总位移由两个方向的位移矢量合成得到,位移单位为 mm。两种方法所得数据画出的  $x$ 、 $y$  向测斜管变形如图 7 所示。

表2 位移对比

测点高度/m	测斜系统			人工总	差值
	$x$ 向	$y$ 向	总		
16.6	0.12	2.03	2.03	0	2.03
13	-2.2	18.65	18.78	16.5	2.28
9.4	0.18	2.47	2.48	0	2.48
5.8	44.8	0.77	44.81	42.1	2.71
2.2	3.96	-0.05	3.96	1.5	2.46

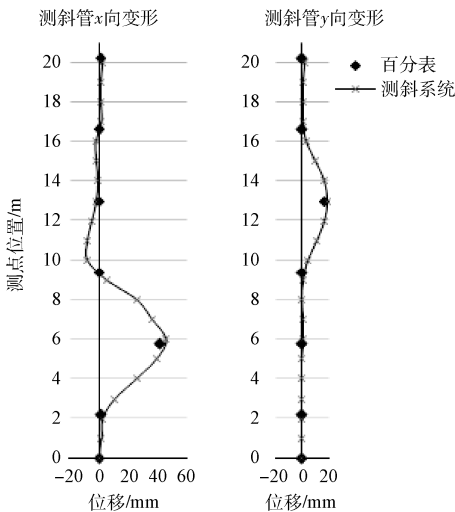


图7 测斜管变形对比

由表中数据可计算得测斜系统的相对误差为 0.12 mm/m,高于规范要求 0.25 mm/m,能满足基坑工程监测要求。

## 4 结 论

本文结合 MEMS 技术和 GPRS 技术,研究试制了一种新型的智能基坑测斜系统,实现了基坑测斜的实时数据采集和自动化管理。经测定,传感器分辨率为 0.000002 rad,长期数据误差 0.0002 rad,工程适用精度为 0.0001 rad;系统防水性达到 100 m 水压;测量相对误差为 0.12 mm/m,初步满足了基坑工程监测的远程自动化要求。后续拟进行传感器的精度测定和温度影响实验等工作。此外系统软件功能有待完善。最后将在基坑现场进行实验,验证其防水性,可靠性及安装工艺的可操作性,并传统测斜方式进行数据对比,评价其测量精度和工程适用性。

## 参考文献

- [1] 王浩,覃卫民,焦玉勇,等. 大数据时代的岩土工程监测——转折与机遇[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2634-2641.
- [2] 黄茂松,王卫东,郑刚. 软土地下工程与深基坑研究进展[J]. 土木工程学报, 2012, 45(6): 146-161.
- [3] 冯春,张军,李世海,等. 滑坡变形监测技术的最新进展[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(1): 11-16.
- [4] 向敏,徐洋,张意. 建筑塔吊倾斜度监测的无线网络动态路由机制[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(9): 1921-1930.
- [5] 许高斌,朱华铭,陈兴. 不等高梳齿电容式三轴 MEMS 加速度传感器[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(8): 704-710.
- [6] 敖道朝,李国维,李临生,等. 基于传感器和无线模式的高速公路边坡自动化监测系统[J]. 公路交通科技, 2015, 32(11): 41-47.
- [7] 李刚,王刚,高幼龙,等. 固定式钻孔倾斜仪在滑坡示范监测中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2009, 23(4): 135-138.
- [8] 李家仁,宋燕敏,文茂华,等. 固定式测斜仪安装方法改进研究[J]. 长江工程职业技术学院学报, 2012, 29(4): 10-12.
- [9] 何春燕,韩文权. 地下水动态监测系统研发与应用示范[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(1): 199-203.
- [10] 楼平. 基于 GPRS 的无线远程气象数据采集传输系统设计[J]. 电子测量技术, 2012, 35(5): 118-122.

## 作者简介

吴伟, 1991 年出生,工学硕士研究生,主要研究方向为基坑监测技术。

E-mail: 1332525@tongji.edu.cn