

基于电解质倾角传感器模块的低功耗4G WiFi 倾斜形变智能监测系统开发

陈晓燕¹, 王 静¹, 吴 薇^{2,3*}

¹苏州合衡动电子科技有限公司, 江苏 苏州

²江苏矽望电子科技有限公司, 江苏 南京

³杭州电子科技大学电子信息学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2025年1月20日; 录用日期: 2025年2月14日; 发布日期: 2025年2月28日

摘 要

本文介绍了一种集成了自研电解质倾角传感器、无线模组(支持WiFi和4G)、温湿度、电池电压及振动监测模块的低功耗倾斜稳固性形变监测系统。该系统设计旨在通过高精度、低功耗的技术手段, 实现对结构健康状态的实时监测与预警, 特别适用于无法直接供电的远程或野外环境。本文详细阐述了系统的硬件构成、软件平台、核心优势以及在边缘计算领域的应用潜力, 为结构健康监测领域提供了新的解决方案。

关键词

电解质传感器, 低功耗, 倾斜监测, 形变监测, 边缘计算, 结构健康监测

Development of a Low-Power 4G WiFi Intelligent Tilt and Deformation Monitoring System Based on an Electrolyte Tilt Sensor Module

Xiaoyan Chen¹, Jing Wang¹, Wei Wu^{2,3*}

¹Suzhou Gitak Technology Co., Ltd., Suzhou Jiangsu

²Cynoware Electronics, Inc., Nanjing Jiangsu

³School of Electronic Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou Zhejiang

Received: Jan. 20th, 2025; accepted: Feb. 14th, 2025; published: Feb. 28th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 陈晓燕, 王静, 吴薇. 基于电解质倾角传感器模块的低功耗 4G WiFi 倾斜形变智能监测系统开发[J]. 嵌入式技术与智能系统, 2025, 2(1): 48-58. DOI: 10.12677/etis.2025.21005

Abstract

This paper introduces a low-power tilt stability deformation monitoring system that integrates a self-developed electrolyte inclinometer sensor, wireless modules (supporting WiFi and 4G), and temperature, humidity, and vibration monitoring modules. The system is designed to achieve real-time monitoring and early warning of structural health conditions through high-precision and low-power technologies, making it particularly suitable for remote or outdoor environments without direct power supply. This paper provides a detailed explanation of the system's hardware composition, software platform, core advantages, and potential applications in the field of edge computing, offering a new solution for the structural health monitoring field.

Keywords

Electrolyte Sensor, Low Power Consumption, Tilt Monitoring, Deformation Monitoring, Edge Computing, Structural Health Monitoring

Copyright © 2025 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

基础设施建设的快速发展，桥梁、大坝、高层建筑等结构的健康监测成为确保公共安全的重要环节[1]。随着数字化进展，国家已经在很多智能监测方面要求采用倾角传感器作为一个监测方式。目前市场上的倾角传感器都是以 MEMS 倾角传感器为主[2]，因为其特性在长期稳定性实时监测方面有待提升，另外传统的有线监测系统受限于布线难度和成本，尤其在偏远或恶劣环境中显得力不从心。因此，开发一种低功耗、高精度、易于部署的无线监测系统显得尤为迫切。本文提出的基于自研电解质传感器的监测系统，正是针对这一需求而设计。

2. 电解质倾角传感器介绍

2.1. 倾角传感器介绍

2.1.1. 倾角传感器概念

在数字化智能化进程中，传感器起到了一个核心作用，数据采集。传感器种类有 7000 多种。

倾角传感器是一种基于惯性原理和牛顿第二定律的加速度传感器，它通过测量加速度并利用积分计算线速度和直线位移。由于其高精度、准确监测、及时预警以及对外界影响的强大抗性，使得它在各种测量角度的应用中发挥着重要作用。

倾角传感器结构设计有固态摆和液态摆两种，如下图 1。

其中电解质倾角传感器内部结构如下图 2。

电解质倾角传感器包括电极和具有腔体结构的壳体，在腔体内注入有特殊配比的电解液，在壳体上设置有贯穿壳体的电极孔，所述电极插入到型腔电极孔内。电极的一端深入到腔体内，电极的另一端位于壳体外，所述壳体的材料为陶瓷材料[3]。通过采用陶瓷材料制成的壳体，陶瓷材料硬度高，而且可以使用压注成型溢价烧结融合，使得倾角传感器的设计与加工更加便利，另外，陶瓷材料的壳体，其表面

性能以及可加工性大大优于玻璃材料的亮体，因而可以制造出性能更优越，可靠性更高、并结构可以更加多样性、应用更加宽泛的倾角传感器。

电解质倾角传感器技术原理

衡动

功能： 监测角度，震动位移，复零..... 倾角传感器都可以测量
产品形式： 芯 Sensor 模拟信号 + 电路 == 数字信号

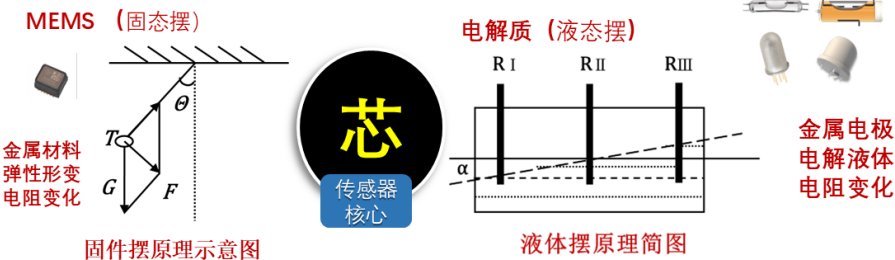


Figure 1. Structural diagram of liquid pendulum and solid pendulum principles in tilt sensors
图 1. 倾角传感器液态摆与固态摆原理结构图

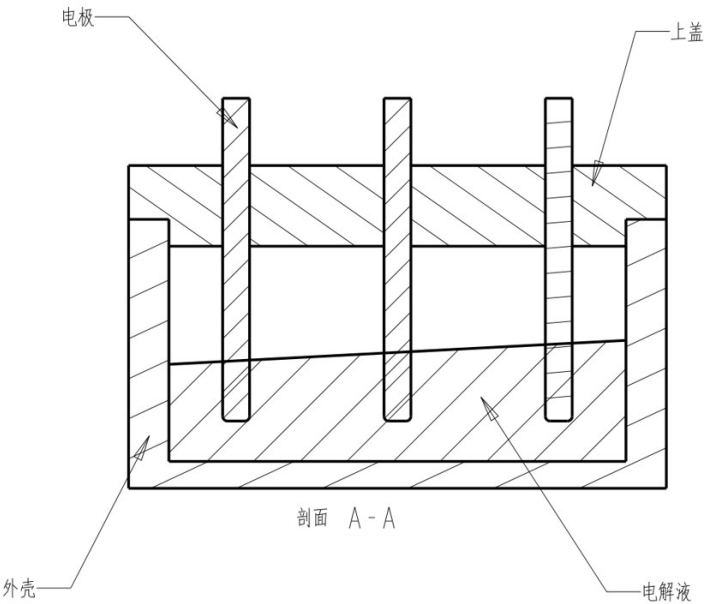


Figure 2. Product structure diagram of electrolyte (liquid) tilt sensor
图 2. 电解质(液态)倾角传感器产品结构图

2.1.2. 倾角传感器应用场景

让我们深入了解倾角传感器在多个领域中的应用情况：

倾角传感器的应用场景

1. 太阳能和定向卫星通讯天线的俯仰角测量利用
倾角传感器帮助确定太阳能电池和通讯卫星的方位与倾斜角度，优化利用效率。
2. 建筑类(古建筑保护)，大型施工周边设施的保护监测
高精度的倾角传感器用于监测建筑设施的摆幅、振动和倾斜变化，保障其安全。

3. 大坝监测

倾角传感器提供大坝和基岩的状态变化数据，确保大坝的安全运行。

4. 桥梁桥塔测斜

实时监测桥梁的细微变化，分析其安全程度。

5. 钻井倾斜控制：在钻井施工中，倾角传感器帮助准确测量钻杆的倾斜角度，确保施工质量和效率。

6. 各种仪器几何小角度精密测量

- 1) 高精度精密水平测量。
- 2) 重力仪，全站仪精密水平调平。
- 3) 机械设备的三维 XYZ 精密测量以及调整等。
- 4) 称重准确性经由倾角传感器补偿提升。

按照分类法，我们可以看到静态倾角传感器可以在 2 个领域有很好应用场景(图 3)。



Figure 3. Diagram of two major application scenarios for tilt sensors
图 3. 倾角传感器 2 大类应用场景图

2.2. 电解质倾角传感器和 MEMS 倾角传感器特性比较

倾角传感器的特性关键在于漂移和可重复性。

传感器的漂移是指传感器在长期使用过程中，其输出信号与真实测量值之间的偏差随时间累积或发生变化的现象。简单来说，漂移会导致传感器读数逐渐偏离实际值，从而影响测量的准确性和可靠性。

传感器的可重复性通常以输出结果的标准偏差或最大误差范围表示，单位与传感器的测量值相同。例如，如果一个温度传感器在多次测量同一温度时输出的结果波动较小，则表明该传感器具有高可重复性。

MEMS 倾角传感器通过温度补偿、高精度制造、优化结构设计和抗干扰技术，包括高精度电源，可以减少供电不稳定对测量重复性的影响。实现了低漂移和高可重复性。然而，在某些苛刻环境下，如何进一步提升补偿和抗干扰能力成为 MEMS 倾角传感器难点。

与 MEMS 产品对比, 本文设计构思合理的电解质型倾角传感器则解决了上面的难题, 具备优越抗漂移, 且具备良好的可重复性(图 4)。

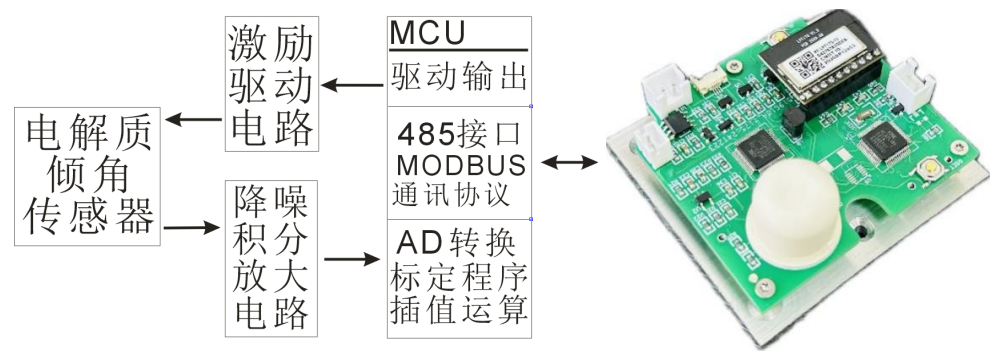


Figure 4. Signal processing flowchart of electrolyte tilt sensor
图 4. 电解质型倾角传感器的信号处理流程图

本文的电解质型倾角传感器电压输出与角度成比例。鉴于读值是以比率计值, 因此无需高精度和高稳定的供电电压, 只要倾角传感器驱动电压与模数转换(A/D)基准电压相同即可。电解质型传感器能够在任何电压下(5 伏、3.3 伏等)运行, 因而其电子器件十分简单, 易实现功率。通过密封结构, 更好地实现高可重复性(图 5)。



Figure 5. Performance and cost-effectiveness comparison between electrolyte and MEMS tilt sensors
图 5. 倾角传感器性能电解质对比于 MEMS 性价比图片

3. 系统设计

在核心传感器基础上, 本文的低功耗倾斜稳固性形变监测系统有两种实现方式, 如下面两图图 6、图 7 所示。

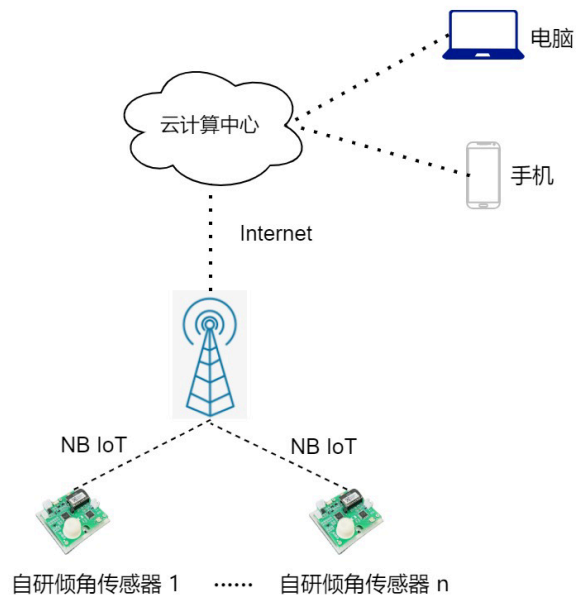


Figure 6. Low-Power tilt stability deformation monitoring system implementation 1 (without Router)
图 6. 低功耗倾斜稳固性形变监测系统实现方式 1 (无路由器)

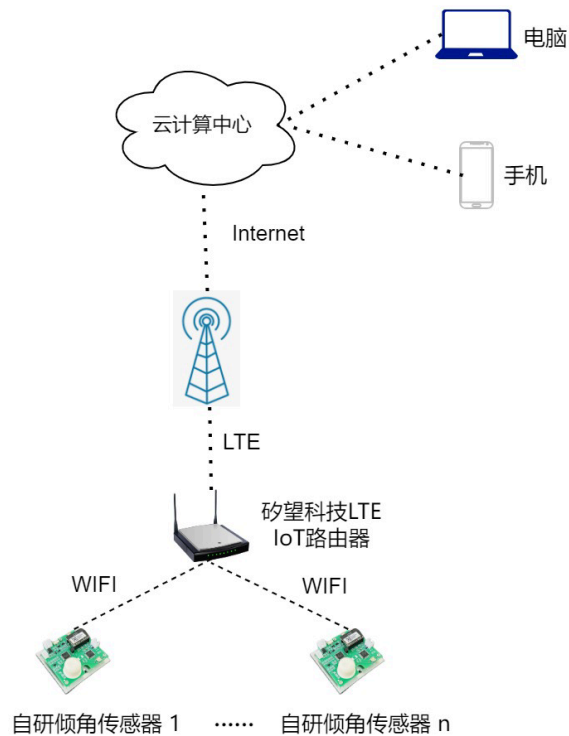


Figure 7. Low-Power tilt stability deformation monitoring system implementation 2 (using LTE IoT Router)
图 7. 低功耗倾斜稳固性形变监测系统实现方式 2 (采用 LTE 路由器)

3.1. 硬件部分

3.1.1. 自研电解质倾角传感器

自研电解质倾角传感器如下图 8 所示。



Figure 8. Tilt sensor module with environmental sensors for temperature control and vibration detection
图 8. 倾角传感器模组带温控振动等环境传感器图片

自研形变倾斜监测仪产品规格如下表 1 所示。

衡动智能倾斜传感测量仪 4G/WiFi

产品型号：ILDG20004G，ILDW2000 WF

Table 1. Key parameters table for Low-Power 4G Wi-Fi stability system testing
表 1. 低功耗 4G Wi-Fi 稳固系统测试主要参数表

项目	科目	参数
倾角测量	测量范围	±15°
	测量分辨率	0.0007°
	测量精度	0.02°
	数据格式	Modbus-RTU
振动测量	量程	±3 g
	精度	0.5 mg
通讯模式	支持多模式	4G，WiFi 可以定制
	无线天线	内置全向天线或定向天线，可根据需求选择
供电功耗	多种方式，可定制	DC 7 V~12 V，防反接；太阳能，电池
	待机状态	≤60 mA
	休眠状态	≤10 μmA
	通信状态	≤120 mA
软件与用户界面 附加功能	软件配置	支持移动 APP 或 Web 平台进行远程配置与监控
	数据存储与处理	根据需求内置存储与数据处理能力
工作环境	工作温度	-30°C~+60°C
	储存湿度	0%~95% RH (无凝露)
	IP 等级	IP68

该自主研发的电解质倾角传感器，测量精度达到 0.02° ，分辨率达 0.007° ，重复度也在 0.02° ，确保了微小倾斜变化也能被准确捕捉。该传感器还可以根据客户需求，提供定制化服务，满足不同应用场景下的特殊要求。该传感器高精度确保环境参数测量的准确性，为结构健康评估提供全面数据支持。

该电解质倾角传感器支持数据直接透传至用户自定义系统或接入现有数据平台，提高系统集成度和兼容性。

该电解质倾角传感器支持内置温度、湿度、振动监测模块，全面监控环境因素对结构的影响。

该电解质倾角传感器采用低功耗技术，结合唤醒功能省电模式，显著延长电池寿命至 3~6 个月，定制版本可达 2~3 年。同时该传感器支持电池、太阳能等多种供电方式，适应不同场景下的能源供应条件。同时配备可调零的安装支架和防水外壳，便于现场快速部署和维护。

3.1.2. 通讯模组

该自主研发的电解质倾角传感器集成了支持 NB IoT 或 Wifi 通讯模组。当使用 NB IoT，实现的方式成为图 6 所示的低功耗倾斜稳固性形变监测系统实现方式 1 (无路由器)。

当电解质倾角传感器支持 Wifi 模组，它实现的方式成为图 7 所示的低功耗倾斜稳固性形变监测系统实现方式 2 (采用 LTE 路由器)。本文的 LTE 路由器由本文的共同作者的公司研发的高性价比，高可靠性的矽望科技物联网 LTE 路由器，如下图 9 所示。

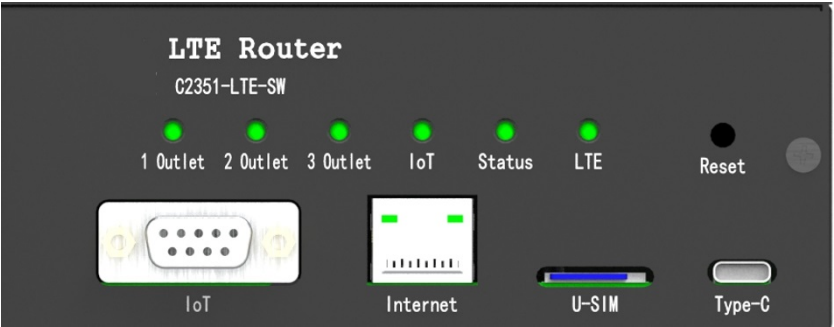


Figure 9. IoT LTE router
图 9. 物联网 LTE 路由器

3.2. 软件系统

对于图 7 所示的低功耗倾斜稳固性形变监测系统实现方式 2 (采用 LTE 路由器)，总体系统架构采用参考文献[4]的开源架构，如下图 10 所示。

第一层是本文自研电解质倾角传感器模块。它使用 Modbus 通信协议，经过 WiFi 模块，将数据传给物联网 LTE 路由器。

第二层物联网 LTE 路由器接收数据后，对数据进行预处理，包括倾斜度、温度、振动、沉降等关键参数等的初步处理和评估，然后通过 MQTT 协议和第三层开源云平台之间通信。

第三层首先要构建高效的数据存储系统，确保海量监测数据的稳定写入与快速检索。其次进行智能分析既运用先进的数据处理算法，对采集到的数据进行清洗、整合与深度挖掘。然后建立多种计算评估模型，包括倾斜度、温度、振动、沉降等关键参数的突变检测，进行趋势分析等。最后实现预警系统与平台对接，包括预警系统可根据不同应用场景和需求进行灵活配置，确保预警信息的及时性和准确性。同时提供开放的数据接口，支持与用户自有数据平台或第三方平台的无缝对接，实现数据共享与协同工作。

第四层是用户通过电脑客户端或手机客户端从第三层云平台获取数据显示。

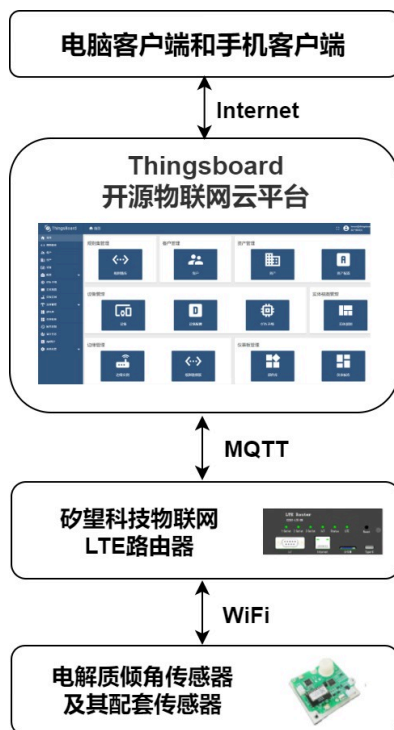


Figure 10. Diagram of the overall scheme design
图 10. 总体方案设计示意图

4. 实验与测试

实验设置

2024 年 11 月开始我们开始安装实验。

结构图：一个是 Wi-Fi 通信，一个是 4G 通信，安装在建筑的不同位置，见下**图 11**：



Figure 11. Installation diagram of Low-Power 4G and Wi-Fi stability testing product
图 11. 低功耗 4G 和 Wi-Fi 稳固测试产品安装图片

平台数据展示与评估

安装后分别完成与展示平台的连接，数据库建立，导入展示平台(图 12)。

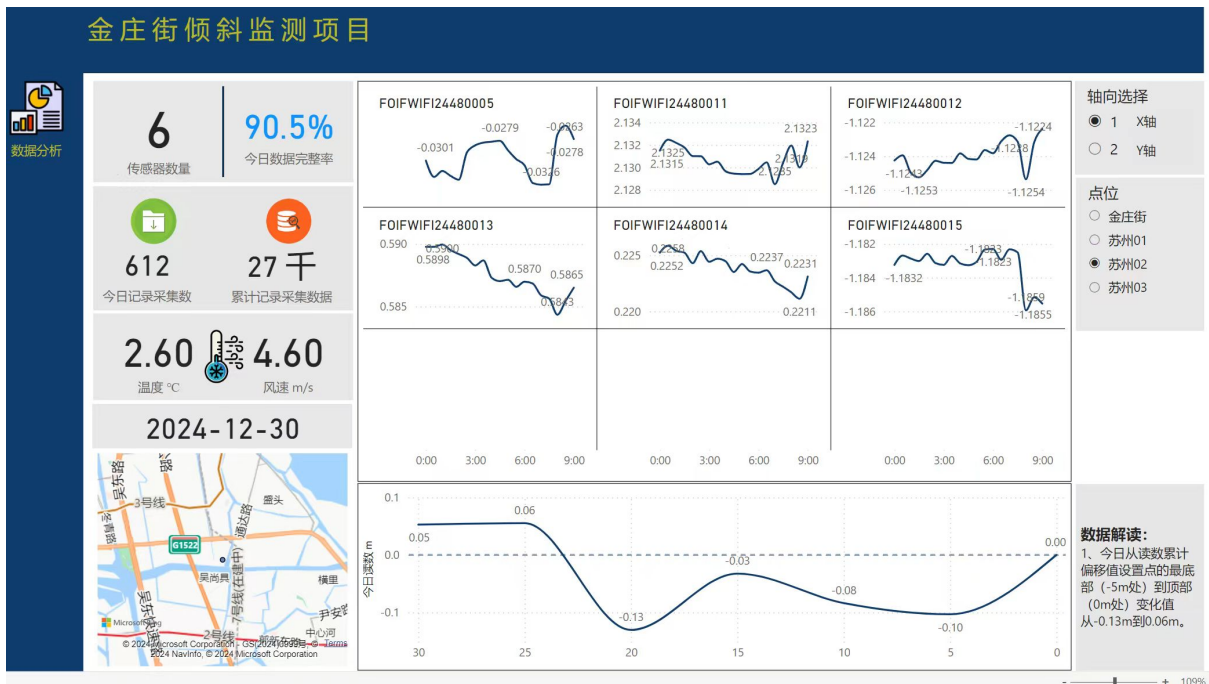


Figure 12. Platform data display diagram

图 12. 平台数据展示图

介绍

汇总表，传感器数量，采集次数，环境指标，双轴 X，Y 方向的不同时间数据，累积变化趋势等。采集数量以及地点都是可以选择设定。

本系统已经在当地的巡抚古建筑场景使用。

该地段属于道前街道正处于名城改造项目范围，江苏按察使署旧址建筑历史悠久，历经约 300 年，需要在周边施工改造过程中进行实时监测(图 13，图 14)。



Figure 13. Installation site diagram

图 13. 安装地点示意图

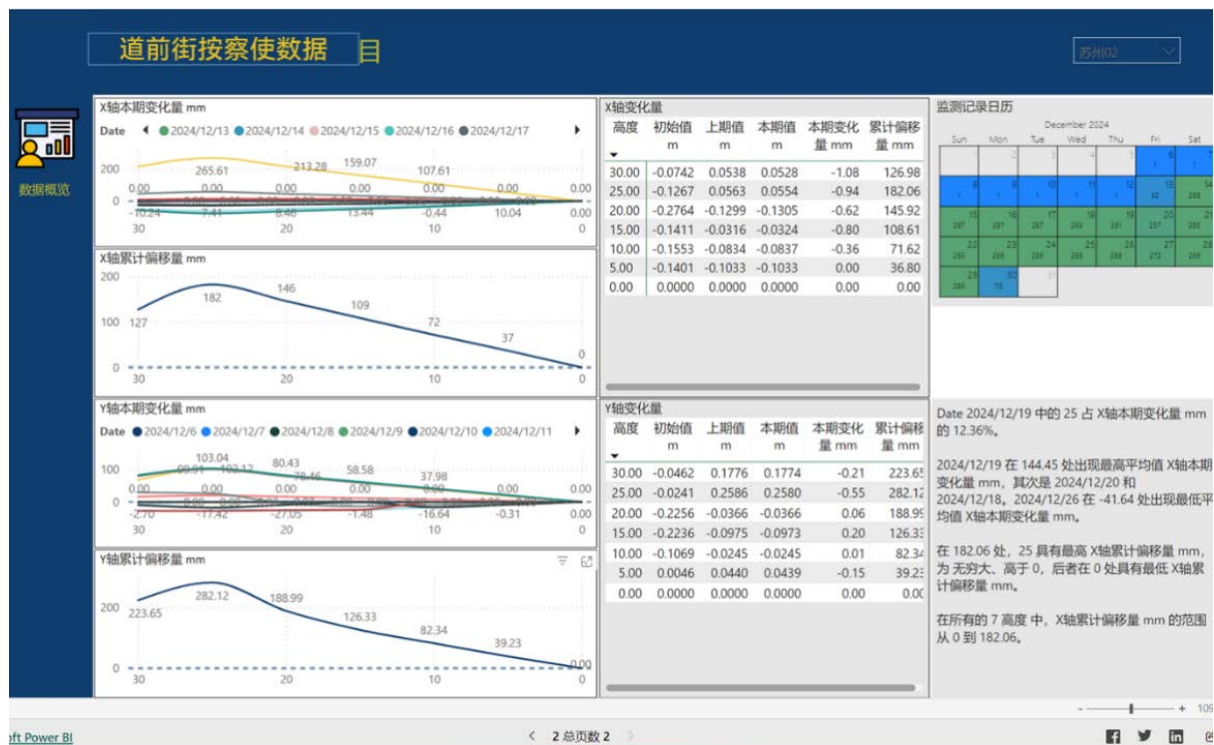


Figure 14. Trend chart of monitored raw data
图 14. 监测原始数据趋势图

原先需要人员每一天去地点人工监测，手工记录，显示可以在平台上看到所要的数据。
当然后续预警系统等需要进一步开发。

5. 结果分析与讨论

本研究成功研发了一种基于自研电解质传感器的低功耗倾斜稳固性形变监测系统，具有高精度、低功耗、易部署、智能化等显著优势。该系统的应用将极大地提升了结构健康监测的效率和准确性，为基础设施的安全运维提供强有力的技术支持。未来，我们将继续优化系统性能，拓展应用场景，推动结构健康监测技术的进一步发展。

参考文献

- [1] 李勇, 闫维明, 陈彦江. 基于倾角测试的桥梁变形实时监测研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(5): 65-69.
- [2] 陈烁辉, 周翔, 王汉其. 高精度倾角传感器检测系统的设计与实现[J]. 自动化与仪表, 2012, 27(12): 18-21.
- [3] 张彪, 郭景坤. 陶瓷材料特殊热膨胀性能的设计[J]. 功能材料, 1993(6): 88-94.
- [4] 吴薇, 吕亚欣. 服务国外市场的 AIoT 开源方案及其应用[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2022(9): 4-9.