

多源传感器变形监测预警系统设计与实现

徐艺文, 刘 飞, 王 吉

[上海勘察设计研究院(集团)股份有限公司, 上海市 200438]

摘 要: 提出了一种基于微服务架构的变形监测预警系统, 旨在解决城市基础设施结构变形监测中多源传感器集成应用的难题。系统通过微服务架构设计, 实现了数据采集、传输、处理、存储、展示和分析预警等全流程功能, 并成功接入、集成了 9 类传感器设备。在实际工程应用中, 系统的可靠性和稳定性得到了充分验证, 能够有效监测城市基础设施的结构变形情况, 并及时发出预警信息, 为城市安全管理提供了有力支持。同时, 针对物理架构设计、实时通信、点位图绘制、预警引擎实现以及 Web 端和移动端实现等关键问题给出了具体解决方案。

关键词: 变形监测; 多源传感器; 自动化监测; 预报警; 微服务架构

中图分类号: TP29; TU99; U

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)12-0277-05

Design and Implementation of Multi-Source Sensor Deformation Monitoring and Early Warning System

XU Yiwen, LIU Fei, WANG Ji

[Shanghai Institute of Survey, Design and Research (Group) Co., Ltd., Shanghai 200438, China]

Abstract: A deformation monitoring and early warning system based on a micro-services architecture is proposed, which is aimed to solve the difficulties in the integrated application of multi-source sensors in the monitoring of urban infrastructure structural deformation. Through the design of the micro-service architecture, the full-process functionalities including data acquisition, transmission, processing, storage, visualization, analysis and early warning are achieved, which successfully integrate nine types of sensor devices. The reliability and stability of the system have been thoroughly validated in the practical engineering applications, which can effectively monitor the structural deformation of urban infrastructure and promptly issue early warning information to provide the powerful support for the safety management of the city. Furthermore, the specific solutions are given to key issues such as physical architecture design, real-time communication, point map rendering, early warning engine implementation, and the implementation of both web and mobile platforms.

Keywords: deformation monitoring; multi-source sensor; automated monitoring; early warning; micro-services architecture

0 引 言

城市基础设施是保障城市正常运行和健康发展的物质基础。目前中国城市基础设施在建体量和运营存量数量巨大, 比如城市轨道交通, 截至 2023 年底, 中国境内在建线路总长 5 671.65 km, 运营线路总长 11 224.54 km, 运营城市达 59 座^[1], 线网规模和运营线路数量均居世界首位。然而, 随着服役年限的

增加, 基础设施受材料老化腐蚀、赋存环境和外部工程影响, 结构安全隐患不容忽视。随着城市数字化的推进, 自动化监测技术在城市基础设施运维结构安全监测中呈现出多样化的发展态势。测量机器人、静力水准仪、激光测距仪、电水平尺、GNSS 等多源传感器已在城市轨道交通保护区监测、桥梁结构健康监测、水利工程变形监测等方面^[2-7]得到了应用。

为实现城市基础设施结构安全状况的全面感知, 单一变形监测技术已难以满足复杂场景的需求, 通常需要结合多种自动化监测感知手段, 涉及多类型、多厂家的传感设备。然而, 由于不同设备的通信协议、数据采集终端、配套软件等存在显著差异, 兼

收稿日期: 2025-03-19

作者简介: 徐艺文(1992—), 女, 硕士, 工程师, 从事系统开发及物联感知技术在结构监测中的应用研究工作。

通信作者: 刘飞(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事工程自动化监测研究应用和低空遥感监测应用工作。电子信箱: 13916697003@163.com

容性问题突出,导致多源异构数据分散、数据集成与融合分析复杂、数据共享度低,进而增加了管理难度和运维成本。针对这些问题,本文设计并实现了一套基于浏览器/服务器(B/S)模式的变形监测预警系统^[8]。该系统采用微服务架构^[9],支持多类型、多厂商传感器的无缝接入与集成,具备多源传感器数据的实时处理、高效存储、智能分析预警及可视化展示等功能,有效提升了监测数据的整合能力和系统运维效率。

1 系统总体设计

通过实际工程项目应用调研和分析,业务需求呈现出以下特点:

- (1)数据多源性。涉及多类型大量传感器设备,自动化监测数据呈现几何级增长趋势。
- (2)场景多样性。不同基础设施会产生不同应

用场景和不同需求,特殊场景下有定制化的需求。

- (3)用户类型多。场景多样性带来涉及部门增多,即使同一场景下用户类型也不尽相同,有业主用户、单位管理员、部门管理员、项目经理、普通用户等多种角色。

综合考虑当前业务需求、系统稳定性以及未来可扩展性,本系统采用微服务架构进行开发。该架构不仅支持服务的独立部署与弹性扩展,还能有效提升系统的可维护性和灵活性,同时为后续业务功能的迭代与集成提供良好的技术支撑。

1.1 系统架构设计

系统架构由感知层、网络层、数据层、业务层和展示层组成,并遵循微服务设计理念,对不同的业务模块进行解耦,形成独立的服务。系统架构图见图1。

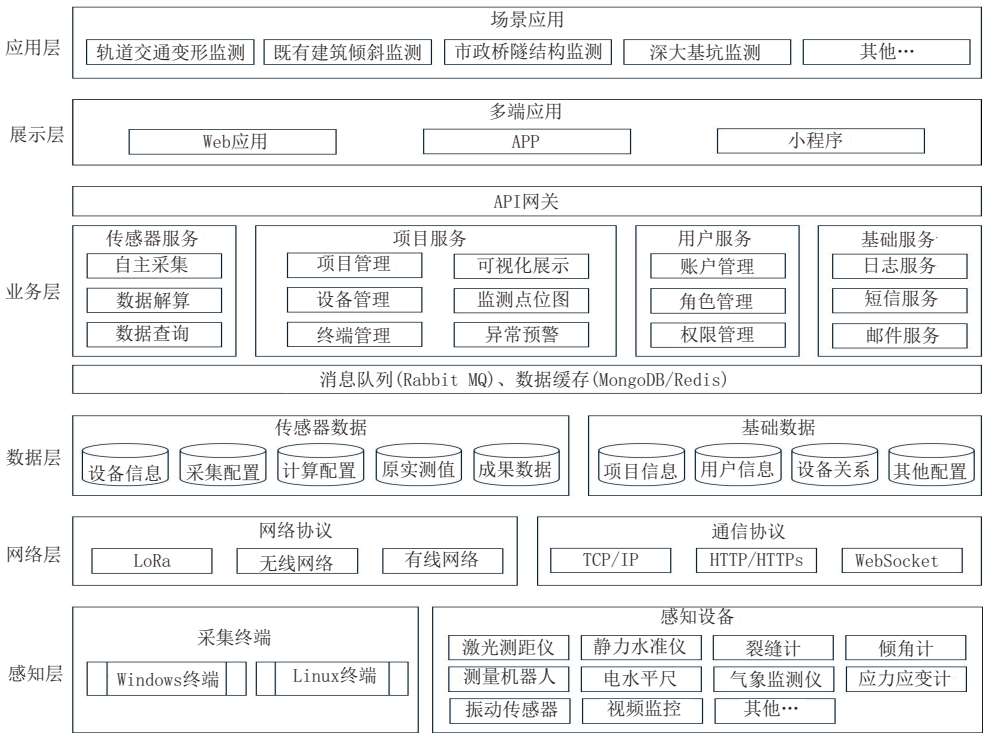


图 1 系统架构图

- (1)感知层。包括智能采集终端、各类传感设备和数据传输设备等物理组件。负责各类变形数据的采集,是整个系统的数据源头。
- (2)网络层。承担数据传输的职责,同时负责接受和发送指令,确保信息在系统内部流畅传递。
- (3)数据层。负责存储和管理各类数据,为上层服务提供数据支持。数据分为两大类,一类是与传感器相关的数据,包括传感器的信息、采集配置、计算配置、原始测值和成果数据等;一类则是与项目相关的数据,包括基本项目配置、用户信息管理等。

(4)业务层。是整个系统的核心内容,在该层实现具体的服务功能,处理服务间的通信,以及提供应用程序所需的基础服务。系统基于面向业务的逻辑,将服务按照传感器服务和系统服务进行细致划分。对于每类传感器的采集、处理和成果查询都进行独立开发和部署。各类服务之间通过 RabbitMQ 消息队列的形式进行通信。所有的服务再通过集成统一的 API 网关,来进行服务的统一管理和对外接口的提供。

- (5)展示层。作为整个系统与用户直接交互的

模块,集成了整个项目的管理流程,为用户提供最终的服务。系统提供 Web 网站、APP 和微信小程序来实现系统的多端访问。

1.2 系统功能设计

系统由后台管理、自主采集、数据解算、成果展示和异常预警 5 个功能模块组成。系统功能架构设计见图 2。

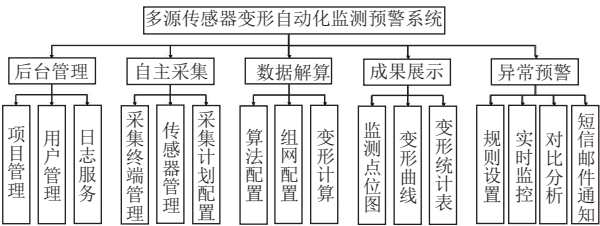


图 2 系统功能架构设计

各模块功能如下：

(1)后台管理。该模块涵盖了项目管理(包括创建和归档项目,设置项目名称、监测方法和地理位置等信息)、用户管理(涉及用户注册、登录及权限配置)、日志管理(提供用户操作日志的记录和查询功能)。

(2)自主采集。该模块包括采集终端管理、传感器管理和采集计划配置。采集终端管理是对终端信息(名称、归属等)、与测站(同一种类型并且在同一现场的多个传感器集合)映射关系和属性进行管理。传感器管理功能包括配置传感器的基本信息、通信设置和采集参数,以及监控设备状态。通信参数主要涉及串口通信的设置,例如端口号(COM口)和波特率等。采集参数的配置取决于传感器的类型:对于静力水准仪,通常只需设定仪器ID和编号;而对于测量机器人,则需要详细配置所有测点的学习测量数据、测点类型、棱镜常数以及测量指标的限差等。状态监控功能负责显示和监控工控机及传感器的工作状态和电池电量等信息。此外,采集计划模块允许用户对传感器的采集任务进行定制化配置。

(3)数据解算。该模块包括算法配置、组网配置和变形计算,系统提供原始测量数据、中间计算成果和变形成果。根据不同传感器类型和成果要求,配置不同组网形式和计算算法,包括平面自由构网平差、高程经典间接平差^[10]、自由设站基准线平面位移计算、粗差探测和滤波^[11]、温度补偿修正等。

(4)成果展示。该模块主要有 4 种可视化方式:第一,监测成果变形量可视化,以多测项、多维度断面和历时曲线图为主,曲线图上高亮变形量最值,展

示数据变化趋势和规律;第二,项目监测点位图,采用二维平面图展示所有测点分布情况,同时鼠标移动到变形曲线上某点时,图中对应点突出显示,直观呈现监测点的位置及其变形情况;第三,成果统计表,对项目多测项成果最值和速率等进行统计汇总;第四,根据变形成果和配置的预、报警规则进行分级标识(根据报警等级设置最高可分绿、黄、橙、红 4 级),前述 3 种可视化方式中均按此进行标识,风险情况一目了然。

(5)异常预警。自动化的数据具有全天候、实时性强的特点,传统方式中,数据异常和设备损坏的发现主要依赖人工检查,这种方式存在滞后性和遗漏的问题。系统开发预警规则引擎,通过预警规则配置,实现在数据采集阶段迅速识别异常情况,包括数据的突变、采集终端掉线以及传感设备异常等,同时触发系统预警,并将预警信息通过短信和邮件第一时间发给相关负责人。

2 系统关键技术实现

2.1 系统物理架构实现

系统物理架构由 5 个部分组成:传感器、采集终端、移动通信网络路由器、服务器、浏览器(见图 3)。



图 3 系统物理架构

(1)传感器是安装在现场,直接采集物理量(即原始测量数据)的设备,目前系统支持静力水准仪、测量机器人、激光测距仪、电子水平尺、倾角计、气象监测仪、裂缝计、应力应变计、振动传感器等 9 类传感器的接入。

(2)智能采集终端即工业控制计算机,安装在现场,与传感器通过串口物理连接,部署多源传感器集成管理程序控制传感器采集数据;与移动通信网络路由器通过 RJ45 网线或无线连接,通过网络执行服务器各项指令,同步测量数据和各项配置等。通常情况下,1 台工控机可以连接控制多种类型的多台传感器。

(3)移动通信网络路由器是安装在现场的网络通讯设备,提供网络用于连接至 Internet。

(4)服务器是管理所有采集终端的中枢,通过公网与所有联网的工控机维持网络连接,达到实时测

量、实时返回数据的效果,存储了工控机的配置、测量计划、历史测量数据等信息,与工控机保持同步。

(5)展示端是用户使用界面,包括配置信息、数据采集和数据展示等功能。

2.2 多源传感器集成实时通讯的实现

系统多源传感器实时通讯实现过程见图4。



图4 实时通讯流程

系统多源传感器主要包含3个模块:

(1)传感器和采集终端之间。系统通过串口通信实现了一套标准化的通信协议^[12]。该协议包含了共有属性、共有逻辑和公用接口,为传感器的拓展接入提供了基础框架。在具体应用中,根据不同类型传感器的特性进行适配,从而实现对传感器的控制。最终使得采集终端实现对多源传感器的适配和集成。

(2)采集终端和服务器之间。通过TCP技术实现,在服务器上部署TCP服务,利用TCP协议的长连接技术和定制的测量协议来相互通信。长连接技术就是采集终端里的每一个自动化测站分别与服务器建立TCP连接,向服务器发送自动化测站唯一标识,完成一个注册操作;之后定期发送预定义、长度很短、没有实际业务含义的数据包(通常被称作心跳包)来检测连接是否畅通,形成实时测量基础。测量协议是自定义的两者间通讯的命令,主要包括开始测量、停止测量、刷新配置、返回测量结果等命令,从而实现实时测量。

(3)服务器和网页端之间。除了使用传统的HTTP,还使用了WebSocket技术^[13]。WebSocket技术可以提供全双工双向实时通讯功能,在服务器端搭建一套WebSocket Server来实现;同时使用消息队列实现了网页与服务器、服务器与采集终端的消息通道实时连通的效果,在服务器上部署了基于Redis的消息发布、订阅服务,转发双方的消息:TCP Server接收到采集终端消息发送至消息队列;消息队列发布TCP Server消息;WebSocket Server订阅该消息,当消息来临时发送至网页用户。

2.3 监测点位图可视化

变形监测中点位布置图是呈现点位分布情况的一种直观图形化可视化表达方式,目前常用的以AutoCAD的dwg文件格式为主。本文基于GIS技术

实现了一种网页端监测点位图展示方法。

监测点位图绘制流程见图5。该流程可使监测点位图同时包含空间数据和属性数据,单个点对象可代表不同测项监测点,在网页上可切换显示用户选择的监测点,同步展示点位图和变形曲线,提供点位图和变形曲线上监测点互动功能和监测点定制化展示方式(不同颜色或者不同标识等),显著增强直观性和交互性。

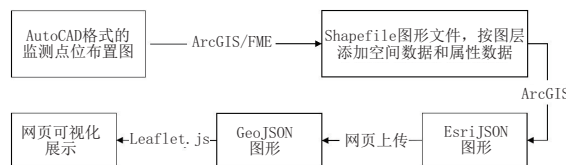


图5 监测点位图绘制流程

2.4 预警引擎实现

系统的预警引擎包含数据异常和设备异常的预警。数据预警、设备预警流程图见图6。

对于数据异常,系统集成常用自动化数据异常值、缺失值等探测方法,并提供累计变化量和阶段变化量的规则设置功能^[14]。用户可以自定义预警阈值、等级和报警联系人,在数据采集完成后即可根据定义规则判断是否触发预警。针对设备的预警,系统提供2种预警机制:一方面,系统构建了异常码预警库,其中详细记录了各类设备异常的异常码、含义及解决方案,当系统检测到设备异常时,会自动匹配库中的异常码,获取对应的异常信息,并将其发送给用户;另一方面,系统设置了掉线预警功能,通过定时任务定期探测各类设备的在线状态,若设备掉线时间超过用户设定的阈值,系统将自动触发预警并通知用户。

系统通过引入预警规则引擎,用户可以根据生产需求自定义预警规则,平台在数据采集阶段即可实时触发规则判断,快速识别数据异常和设备故障。一旦触发预警,系统将通过短信和邮件的方式及时通知预警联系人,从而实现快速响应,提升系统的可靠性和稳定性。

2.5 多终端实现

在展示层,系统采用组件化开发模式,分别开发了PC端Web应用、移动APP和微信小程序。其中,Web应用基于React开发,整合配置、采集、解算、成果展示和预警的全流程数字化链路,构建了一个“开箱即用”的完整解决方案。移动端则聚焦于数据查阅、设备实时状态监控、采集指令下发、项目管理和采集终端管理等核心功能,实现轻量化设计。APP

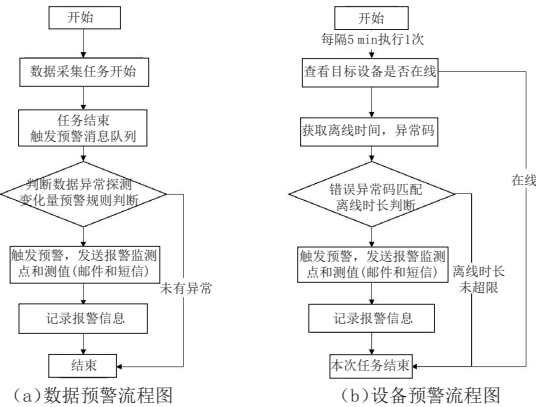


图 6 数据预警和设备预警流程图

采用 React Native 结合 Expo 框架搭建,小程序则基于 Uni APP 进行快速开发。多端开发策略不仅确保了平台的灵活性和可访问性,还让用户能够随时随地高效地使用平台功能。Web 应用成果界面见图 7;移动端界面见图 8。



图 7 Web 应用成果界面



图 8 移动端界面

3 系统应用

系统在城市轨道交通保护区运维监测、市政桥梁隧道健康监测、建筑物加固监测等近百个基础设施结构变形监测项目中得到了广泛应用。以上海地铁 14 号线某区间自动化监护测量项目为例,为应对周边基坑施工引发的隧道变形风险,系统共采用 3 台智能终端集成部署了 3 类多源传感器(包括 140 台激光测距仪、132 台静力水准仪和 2 台测量机器人),构建了多维度、高精度的结构变形监测体系^[15]。

首先,系统通过 5G 无线网络与有线网络的混合通信架构,实现了监测数据和采集指令的实时双向

传输;其次,基于系统自主研发的解算算法,对隧道水平收敛、竖向沉降和水平位移等关键指标进行实时解算;再次,运用 GIS 技术,系统在成果展示界面中(见图 7),不仅实现了监测点位的空间分布展示,还实现了监测点位与变形值的动态映射;最后,系统配备的预警引擎项目进行全天候的异常监控。在项目实施期间,系统运行稳定,为工程决策提供了及时、可靠的数据支持,有效保障了地铁隧道的结构安全和项目顺利实施。

实践表明,该系统实现了多源传感器数据采集、传输、处理、展示及分析预警的全流程覆盖,能够高效集成多类型、多厂商传感器,并支持在线实时数据传输;基于多种先进算法与 Web 平台,系统显著提升了监测效率和数据质量,基本实现全流程自动化,测量数据 100% 可控,管控能力大幅提升;同时,得益于微服务模块化架构设计,系统能够快速响应特殊项目或场景的定制化需求,具备较强的灵活性和扩展性。

4 结 语

设计并实现了一种基于微服务架构的多源传感器集成变形监测系统,详细阐述了系统的主要功能及关键技术实现。该系统实现了从数据采集、传输、处理、存储到展示与分析预警的全流程结构变形自动监测,并构建了 Web 端与移动端平台,支持多源数据的融合、共享与共用。通过在近百余工程项目中的实际应用,系统验证了其高度的稳定性与可靠性,显著提升了数据质量与作业效率,同时能够快速响应定制化需求,在城市基础设施结构变形监测领域具有广泛的应用推广价值。

参考文献:

[1] 中国城市轨道交通协会.城市轨道交通 2023 年度统计和分析报告[R]. 北京:中国城市轨道交通协会,2024.

[2] ZHOU J G, XIAO H L, JIANG W W, et al. Automatic subway tunnel displacement monitoring using robotic total station[J]. Measurement, 2020(151): 107251.

[3] 柏文锋.基于全自动全站仪的地铁隧道自动化变形监测系统的设计与实现[J].城市勘测,2014(3):97-99.

[4] 付和宽.地铁隧道内静力水准观测的精度分析[J].现代测绘,2011(1):43-46.

[5] 王如路.电子水平尺在地铁监护工程中的应用[J].地下工程与隧道,2003(2):30-32.

[6] 姜卫平,梁娱涵,余再康,等.卫星定位技术在水利工程变形监测中的应用进展与思考[J].武汉大学学报(信息科学版),2022(10):1625-1634.

(下转第 296 页)