

深基坑施工全过程智能化监测与多源数据融合分析方法研究

尹海勇 刘东宏

浙江省二建建设集团有限公司, 浙江 宁波 315200

[摘要]深基坑工程的地质条件和施工环境复杂,传统监测方法在精度、响应速度和数据完整性上有一定局限,而全过程智能化监测体系的引入,能让基坑变形、支护结构和周边环境得到多维度的实时感知与预警;采用多源数据融合分析技术,可将来自 GNSS、倾斜仪、测斜仪、激光雷达等设备的异构数据集成处理,有效提升数据分析的精确度和可靠性;构建多维信息融合模型,能为风险识别和动态决策提供支持,显著增强深基坑施工的安全性和智能管理水平。

[关键词]深基坑施工;智能化监测;多源数据融合;风险预警;信息集成

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17188

中图分类号: U231

文献标识码: A

Research on Intelligent Monitoring and Multi source Data Fusion Analysis Method for the Whole Process of Deep Excavation Construction

YIN Haiyong, LIU Jianhong

Zhejiang Provincial Erjian Construction Group Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang, 315200, China

Abstract: The geological conditions and construction environment of deep foundation pit engineering are complex, and traditional monitoring methods have certain limitations in accuracy, response speed, and data integrity. The introduction of an intelligent monitoring system throughout the entire process can enable multi-dimensional real-time perception and warning of foundation pit deformation, support structures, and surrounding environment; By adopting multi-source data fusion analysis technology, heterogeneous data from GNSS, inclinometers, inclinometers, LiDAR and other devices can be integrated and processed, effectively improving the accuracy and reliability of data analysis; Constructing a multidimensional information fusion model can provide support for risk identification and dynamic decision-making, significantly enhancing the safety and intelligent management level of deep foundation pit construction.

Keywords: deep foundation pit construction; intelligent monitoring; multi source data fusion; risk warning; information integration

引言

城市建设向纵深发展,深基坑工程在高密度城区越来越常见,工程建设将其安全问题当作关注焦点,而传统监测方式很难满足现代工程对实时性、精度和数据全面性的要求,急需技术升级,智能化监测与多源数据融合技术发展较快,这给深基坑施工提供了全新思路,多种传感信息高效集成起来就能精准感知施工全过程,动态管控施工,为施工安全保障、工程决策优化提供坚实技术支撑。

1 深基坑施工智能化监测的技术现状与发展需求

深基坑工程技术复杂且施工环境多变,急需更高效、安全的监测手段,智能化监测技术因此产生,在工程实践里它潜力巨大且发展前景广阔。

1.1 传统监测方式的局限性

传统深基坑监测大多靠人工巡查、全站仪测量、水准仪读数之类的方式,这些方式在早期工程里用得广泛,但在响应速度、空间分布精度和数据连续性上有明显不足,人工监测频率有限导致施工全过程的实时掌控实现不了,单一传感器采集的数据维度也有限难以全面反映结构变形、土体变化、环境干扰等多重因素的综合影响,而且数据记录方式分散且没有统一的处理与分析平台,信息孤岛严重,基于数据驱动的科学决策难以得到支撑,工程界被

这些问题促使着积极寻找新型、集成化的监测手段以更好适应深基坑施工的动态、复杂需求。

1.2 智能监测技术的发展路径

物联网、传感器技术和通信技术迅猛发展,使深基坑施工中智能化监测渐渐成为主流,现在 GNSS 定位系统、倾斜仪、测斜仪、光纤光栅、激光扫描和视频监控等技术已被广泛应用,无线网络能让这些设备将现场实时数据高效传至后台系统,达成自动采集、远程控制和智能预警,并且数据处理手段也开始朝着云计算和边缘计算拓展,使监测数据的分析更有时效性和深度,部分工程项目还试着引入人工智能算法分析监测数据的趋势、识别风险,从“被动响应”迈向“主动预判”,这一转变意味着深基坑智能监测进入以数据融合和智能决策为核心的新阶段。

1.3 多源融合驱动未来发展

深基坑施工中信息来源广且监测数据有高频、多维、异构特性,全过程综合评估单靠一种技术难以支撑,多源数据融合是智能监测发展的关键走向,其融合技术既包含数据层面的格式兼容与清洗处理也涉及信息层面的异构数据关联建模与综合解读,将 GNSS、位移传感器、激光雷达、视频图像以及环境监测数据融合起来能构建多维度、多尺度的感知体系使监测系统的鲁棒性和精准度显著提高,融合平台往

往配有统一的数据管理与可视化接口方便施工单位、设计人员和管理机构共享信息协同决策,以后基于多源数据融合的智能化监测系统会在算法优化、平台集成和工程适应性等方面不断突破以进一步保障深基坑施工安全高效进行。

2 全过程监测体系的构建与关键参数选取

深基坑施工过程复杂多变,保障工程安全的关键在于构建科学系统的全过程监测体系,合理选取监测参数优化体系架构便能对关键风险源动态管控。

2.1 监测体系构建原则

构建全过程监测体系要遵循系统性、阶段性、针对性和可扩展性原则,要系统性地全面覆盖基坑本体、支护结构、周边环境以及地下水等多个监测对象,根据施工进度动态调整监测重点以体现阶段性,开挖前主要监测原状土体与地下水,开挖过程中重点关注支护变形与周边结构响应,监测内容要与潜在风险因素对应起来以保证针对性,从而保证监测目标明确、手段有效,还要为突发情况和数据处理需求提供灵活支撑以体现可扩展性,让监测体系有良好的升级与集成能力,全过程监测体系的科学布局就靠这些原则打基础。

2.2 核心监测内容设置

深基坑施工时,主要结构响应和外部环境干扰这两大类应被监测内容覆盖,围护墙体的水平与竖向位移、支撑轴力、冠梁应变、基坑底部隆起等属于结构响应类,周边建筑物沉降、道路变形、地下管线位移及地下水位变化等涵盖在环境干扰类之中,施工扰动引发的土体应力变化、降水引起的地下水动力场调整也需关注。设置监测点位时,测点密度和深度要结合场地地质条件、支护形式、周边敏感目标分布合理布设以保证数据采集有代表性和敏感性。监测频率应根据施工阶段和风险等级灵活调整,高风险或者变形速率有显著变化的时候要提高监测频次,这样预警才能前移。

2.3 关键参数选取方法

多维度分析和实践经验积累是选取关键参数的依据,一方面能根据设计模型和历史工程数据确定像墙体位移量、支撑轴力变化率、周边沉降速率这种与变形、稳定性直接相关的参数,另一方面将数据敏感性和信噪比结合起来筛选出响应快、容易量化的特征指标以提高预警准确性,并且还得引入信息熵分析、主成分分析这种数据驱动方法挖掘各类监测数据内在联系找出有很强预测价值的变量,有智能化系统支持时参数选取过程就从人工经验判断变成数据驱动决策了,这不但让参数设定更科学还为后面的数据融合和风险识别打了基础,构建合理的关键参数体系能让全过程监测既高效又实用。

3 多源异构数据的采集技术与融合机制

深基坑施工环境复杂且监测数据有多源、异构、高频等特征,完善的数据采集技术与融合机制可实现信息高效整合与智能分析从而提升工程安全监控能力。

3.1 数据采集设备配置

多种高精度传感设备协同运行,多源异构数据采集才有下落,其中包括点位式、线性和面状感知方式,GNSS

接收机、全站仪、水准仪、测斜仪、倾斜仪、光纤光栅、激光雷达、结构健康监测传感器等都是常用设备,这些设备在采集方式、数据格式、时空精度、适用环境方面各有特点,能够分别承担位移监测、变形识别、地下水位测量、支护结构受力分析等不同任务,若要提升数据采集效率和连续性,一般要用无线数据采集模块和远程通信单元,从而使监测数据能够自动上传并可远程访问,而且要根据工程规模和风险等级制定分级布设方案,让数据采集空间覆盖良好且响应灵敏度不错,为后续融合分析打好基础。

3.2 异构数据处理流程

采集设备类型多样,产生的数据在格式、精度、采样频率和单位规范等方面有很大差异,得通过标准化处理来统一管理,在数据预处理阶段得先完成格式转换、单位归一、填补缺失值、剔除异常值,让各类数据有可比性和完整性,接着按空间和时间坐标把数据对齐同步,将不同设备的监测数据映射到统一时空框架里,再构建数据库或者数据湖来存结构化和非结构化信息,方便以后调用和交叉分析,这过程中要重视数据质量控制,引入动态校准机制和实时误差分析模型来提高数据可信度和分析精度,这一流程给多源异构数据深度融合和建模运算提供了有力支撑,是智能化监测系统运作的关键环节。

3.3 数据融合机制设计

实现多源监测价值最大化的关键环节是数据融合,其目标为把多维信息有机整合起来以达成对工程状态的全面认知。融合机制通常有感知层融合、特征层融合和决策层融合这三个层次,感知层融合靠传感器网络协调来实现原始数据协同采集和初步判别,特征层融合通过主成分分析(PCA)、小波变换和卷积神经网络(CNN)等特征提取与转换方法识别多维数据里的关键信息模式,决策层融合重点是结合多个信息源的判断结果进行风险等级评估和预警决策,融合时引入贝叶斯推理、模糊逻辑、D-S证据理论等算法模型可提高处理复杂性与不确定性的能力。构建多源数据融合平台不仅能实现监测信息可视化和动态展示,还能支持实时风险感知和智能决策调度,从而助力深基坑施工全过程的智能管控。

4 基于融合模型的风险识别与动态预警方法

深基坑施工时,保障工程安全的核心在于及时准确识别潜在风险,构建融合模型就能协同分析多源数据并建立高效动态预警机制以有效防范工程事故发生。

4.1 融合模型构建方式

构建融合模型需结合工程特点、监测数据属性和分析目标并采用多层次、多方法的建模策略,常见的模型有基于统计学的贝叶斯网络、机器学习里的支持向量机(SVM)、随机森林、深度神经网络(DNN)等,多源监测数据输入这些模型后就能对基坑变形趋势、结构受力状态和环境扰动进行预测以及风险判定,为让模型适应性更强一般会结合数据驱动和机理模型的双重优势即融合监测数据时把基坑力学行为规律和历史案例经验嵌入其中

以增强模型在不同施工情境下的泛化能力,训练和优化时得充分考虑数据的不平衡性和时序性才能保证模型输出稳定且实时从而可靠地支撑后续预警系统。

4.2 风险指标体系建立

要让融合模型有效运行,得先有科学合理的多维度风险指标体系,涵盖地层变形、支护结构响应、地下水变化、外部扰动等方面,其指标类型有实时监测量(像支护位移)、变化率(像日沉降速率)、稳定性系数(像安全储备系数)之类的,从历史数据归纳分析、事故案例回溯当中找出关键指标的临界阈值和联合触发机制,构建指标评价矩阵,引入像层次分析法(AHP)或者熵权法这样的权重分配策略以协调不同指标重要性,还能用模糊综合评判法或者灰色关联分析方法把多项指标融合评估来生成综合风险等级,给动态预警提供量化依据。

4.3 动态预警机制设计

动态预警机制需具备“感知-识别-响应”闭环功能且能依据现场工况实时调整响应策略,要设定如蓝、黄、橙、红四级这样的多级预警等级,不同等级对应不同的风险水平和响应措施,当监测数据超阈值或者模型预测结果到达风险临界点时,系统就要自动触发预警并通过短信、APP或者控制平台给相关人员发送警报信息,还可进一步与GIS系统结合将空间分布可视化以直观反映风险位置和影响范围,预警系统要有自学习和迭代能力,通过反馈机制优化模型参数和阈值设置来增强系统适应性和长期稳定性,构建动态预警机制可使深基坑工程从“事后响应”转变为“事前干预”从而大幅提高安全管理水平。

5 智能化监测与数据融合在工程实践中的应用与成效分析

深基坑施工实践中应用智能化监测和多源数据融合技术,能显著提升工程信息感知能力与风险管控水平,实际案例分析可全面评估其应用成效和发展潜力。

5.1 工程应用场景概述

多个大型城市基础设施项目里,地铁车站、高层建筑地下室、城市综合管廊等深基坑工程现场已广泛部署智能化监测系统,其中集成了GNSS、倾斜仪、激光扫描仪、水位计、光纤光栅等多种类型传感器,以实时监测围护结构变形、周边建筑沉降、地下水位变化与支护应力等关键参数,数据中心平台统一管理各类数据,实现采集、存储、处理与可视化展示这些数据,工程管理人员借助平台能快速掌握施工动态,部分项目还把视频识别与无人机巡检引入其中,实现监测区域的图像感知与三维重建,提升监测系统的完整性与响应速度,为施工安全提供坚实的技术保障。

5.2 风险控制成果展示

智能化监测与融合分析技术撑着,多个工程项目的风

险识别从“滞后响应”转成“主动预测”,构建融合模型后,系统既能识别异常变形趋势还能提前预警,从而实现工况动态调整。就像某地铁基坑项目,支护结构刚有点变形,系统就捕捉到小异常,预警机制及时引导加固处理,使得结构失稳扩展和次生灾害没有发生。融合平台还能分析监测数据的趋势并和历史数据对比,快速找到风险源,评估干预措施的效果。施工期和运营初期,项目整体沉降和侧移量都在设计允许范围内,施工安全性和结构稳定性大大提高,这表明智能化手段在风险控制上确实有用且应用前景广阔。

5.3 管理效益与经验总结

技术手段因智能化监测与数据融合得到优化并极大推动了施工管理模式的转型,可视化平台让项目各方数据共享、远程协同、实时决策从而大幅提高管理效率和沟通透明度,监测结果作为质量验收与施工评估的重要依据使管理过程的可追溯性与科学性增强,实践发现系统稳不稳定、数据准不准确、人员协同能力强不强是决定成效的关键,根据工程应用反馈要加强设备维护、提升算法适应性、完善响应机制以让系统在复杂工况下的鲁棒性进一步增强,总结工程经验能给后续深基坑项目提供参考路径推动智能化监测与融合技术不断优化和大规模应用。

6 结束语

城市建设规模不断扩大使得深基坑施工的安全挑战愈发严峻,引入全过程智能化监测与多源数据融合技术可给工程提供全生命周期、全维度的信息支撑,从而有效提升风险识别的前瞻性与管理决策的科学性,构建完善的监测体系、集成先进的数据采集设备、设计合理的融合模型及动态预警机制已让多个工程实践取得显著成果,往后要继续强化技术集成能力与系统适应性以推动其在更广泛工程领域应用落地,进而给城市基础设施建设更安全、智能、高效的技术支撑。

[参考文献]

- [1]申文静.基于BIM与IoT的X地铁站深基坑施工安全监测及预警研究[D].北京:中国矿业大学,2022.
 - [2]吴红翠.基于BIM的地下有轨交通深基坑施工智能预警监测技术[J].湖北理工学院学报,2022,38(5):45-49.
 - [3]裴欣茹.深基坑施工复杂系统风险模型研究及其可靠性分析[D].武汉:武汉轻工大学,2024.
 - [4]邹明哲.低碳视域下深基坑支护选型及智能化监测技术研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2024.
 - [5]杨三建,王俊峰,杨明,等.超大深基坑逆作法施工智能监测技术应用研究[J].施工技术(中英文),2024,53(11):121-125.
- 作者简介:尹海勇(1975.11—),男,江苏启东人,汉族,本科学历,工程师,就职于浙江省二建建设集团有限公司,从事项目负责人工作。