

基于物联网的市政深基坑施工安全智能管控研究

唐永林

四川港航建设工程有限公司 四川 成都 610000

摘要: 市政深基坑工程是城市地下空间开发的核心,但施工环境复杂、风险多,传统安全管理模式存在响应滞后、预警能力弱等缺陷。为提升施工安全水平,本文提出并研究了基于物联网(IoT)技术的市政深基坑施工安全智能管控体系。该体系构建了“感知-传输-分析-决策-反馈”闭环管理架构,利用高精度传感器全方位、全天候、实时化采集数据,依托5G/4G/NB-IoT等通信网络高效传输数据,并运用大数据分析、AI算法与数字孪生技术,深度挖掘、融合分析数据,实现对基坑变形等关键安全指标的精准监测、超前预警与智能诊断。研究还设计了系统整体架构、核心功能,并探讨了其应用价值与挑战。实践表明,该模式能显著提升安全监管水平,为城市地下空间建设安全提供技术支撑。

关键词: 物联网;市政深基坑;施工安全;智能管控;数字孪生;人工智能

引言

我国城镇化加速,城市土地资源紧张,向地下发展是重要战略。地铁、地下管廊等市政项目涌现,深基坑工程随之增多。深基坑施工复杂,与城市生命线工程相邻,易引发灾难性事故。尽管国家加强安全生产监管,但深基坑安全事故仍频发。传统安全管理模式存在信息孤岛、感知能力有限、预警响应滞后等痛点,难以有效应对风险。在此背景下,物联网、大数据、人工智能等新兴信息技术为破解深基坑安全管理难题提供了新思路。物联网技术能将物理世界要素数字化、网络化,构建全面感知系统。将其融入深基坑施工安全管理,有望实现从被动到主动、从事后到事前的转变,对保障人民生命财产安全、维护城市秩序、推动建筑业高质量发展意义重大。

1 基于物联网的深基坑安全智能管控体系架构

本文提出一个四层架构的智能管控体系,即“感知层-网络层-平台层-应用层”。

1.1 感知层:全域覆盖的智能感知网络

感知层作为整个深基坑安全监测体系的基石,承担着采集各类原始数据的重要任务。其部署遵循“点、线、面、体”结合原则,构建起立体化、多维度的智能感知网络。在基坑本体监测上,于围护桩(墙)、内支撑、锚索等关键受力部位布设应变计、钢筋计和轴力计,实时掌握支护结构内力变化;安装倾角计和裂缝计,监测结构整体稳定性与局部损伤。针对土体内部,埋设测斜仪捕捉不同深度土层水平位移轨迹,利用孔隙水压力计监控土体水压力动态,评估渗透破坏风险。周边环境监测方面,在基坑影响范围内的道路和邻近建筑

物周边布设静力水准仪或沉降板,精确量化地表沉降;在重要建筑物关键位置安装裂缝计与倾斜仪,跟踪其安全状况。对于邻近地下管线,通过非接触式传感器或接入其自有监测系统,获取位移与应力数据^[1]。施工活动监测上,给施工人员佩戴UWB或蓝牙信标手环,结合现场基站实现厘米级精确定位,并用视频AI分析识别违规行为;在大型设备上加装多种传感器,监控工作状态、位置及运行轨迹。此外,部署气象站及噪声、粉尘传感器,为施工决策提供环境参数依据。所有传感器具备低功耗、自组网和IP化等特性,可自主高效完成数据采集与上传。

1.2 网络层:高速可靠的异构融合网络

网络层肩负着将感知层产生的海量、异构数据高效、稳定地传输至平台层的重任。考虑到深基坑施工现场环境的复杂性,包括强电磁干扰和部分区域信号覆盖不佳等问题,采用多种通信技术融合的策略显得尤为必要。对于在现场密集部署的大量低功耗传感器节点,LoRa、ZigBee等低功耗广域网(LPWAN)技术是理想选择,它们能够组建自愈合的Mesh网络,在有效延长电池寿命的同时扩大无线覆盖范围。在现场管理办公室或数据中心附近,则可利用工业级Wi-Fi 6提供高速率、低时延的局域网连接,满足视频回传等高带宽需求。作为主干传输通道或用于远程访问,5G网络凭借其大带宽、低时延、高可靠(URLLC)的卓越特性,成为首选方案,尤其契合实时控制等严苛应用场景;在5G覆盖暂时不足的区域,4G或NB-IoT(窄带物联网)可作为有效的补充手段。为了进一步优化系统性能,边缘计算网关被部署在网络边缘,它能够在数据上传至云端之前,执行初步

的过滤、压缩和格式转换等操作，这不仅减轻了云端服务器的处理负担，也显著提升了整个系统的响应速度和可靠性。

1.3 平台层：数据驱动的智能分析中枢

平台层是智能管控体系的核心，如同体系的大脑，关键在于构建“深基坑安全大数据中心”与“智能分析引擎”。首先，建立统一数据标准和接口规范，对来自感知层的多源异构数据，包括结构化传感器读数、半结构化日志文件、非结构化视频图像等，进行清洗、融合与存储，形成完整、一致且可追溯的数据资产池。接着，深度融合 BIM 与 GIS 技术，构建深基坑工程及其周边环境的高保真三维数字孪生模型。该模型不仅是静态可视化载体，更是数据融合、仿真推演和智能分析的虚拟空间底座。智能分析引擎是平台层灵魂。它运用卡尔曼滤波、D-S 证据理论等方法，对不同来源和精度的监测数据进行时空对齐与深度融合，生成更准确全面的状态估计。利用机器学习技术，如 LSTM、GRU 等模型，训练历史监测数据，学习基坑关键指标正常演化规律，实时数据异常时自动触发分级预警。引入深度学习模型，如卷积神经网络（CNN），智能识别裂缝图像、沉降云图，辅助专家判断风险成因。最后，结合地质勘察报告、施工进度计划等先验知识，在数字孪生模型中进行正演或反演计算，模拟不同工况下基坑响应，预测潜在风险点，为应急预案制定提供数据支撑。

1.4 应用层：协同高效的业务赋能终端

应用层直接面向最终用户，旨在提供直观、便捷、高效的交互界面和业务功能，将平台层的强大能力转化为实际生产力。全景可视化驾驶舱是管理者的核心工具，它通过大屏或 Web 端，以数字孪生模型为核心，动态、直观地展示基坑及周边环境的实时安全状态、预警信息、人员设备分布等关键要素，真正实现“一图尽览全局”的管理愿景。移动端 APP 则打通了安全管理的“最后一公里”，为现场管理人员、安全员和施工班组提供了一个移动办公入口，使他们能够随时随地查看告警推送、处理待办工单、上报安全隐患、完成签到打卡等日常操作，极大地提升了现场管理的灵活性和效率^[2]。在应急场景下，当系统检测到红色预警或突发险情时，能够自动启动预设的应急预案，一键通知所有相关责任人，并在数字孪生地图上智能规划最优疏散路径，同时调取相关区域的实时监控视频，为指挥中心提供全面的现场态势感知，从而实现快速、精准的应急响应。此外，系统在长期运行中积累的历史案例、专家规则和成功处置方案，可以沉淀为一个结构化的知识库，并通过自然语

言处理（NLP）技术，为用户提供智能问答和决策建议服务，持续赋能一线人员的专业能力。

2 核心智能安全监控技术与功能实现

2.1 钢支撑轴力的自适应智能调控

在软土地区深基坑工程中，钢支撑的轴力直接影响支护体系稳定性。传统方法依赖固定预加轴力和人工巡检，难以应对开挖过程中动态变化的土压力，易导致支撑欠载（引发过大变形）或过载（增加失稳风险）。为此，本文提出一种“监测-分析-决策-执行”闭环的自适应智能调控机制。系统通过高精度轴力计实时采集每根支撑的轴力，并融合开挖深度、土压力、围护墙变形等多源数据，构建能理解基坑力学行为的 AI 模型——可采用擅长时序建模的 LSTM，或刻画支撑间空间关联的图神经网络（GNN）。该模型不仅能实时评估支撑状态（安全/预警/危险），还可预测未来轴力演变趋势。当预测某区域因墙体变形加速将导致相邻支撑轴力降至安全阈值以下时，系统提前触发调控指令。决策模块结合预测结果与安全裕度，计算最优轴力调整量，并远程控制现场液压千斤顶或智能伺服油缸自动执行增减操作，同时反馈执行结果，形成无人干预的闭环控制。该机制实现轴力“按需供给”与“动态平衡”，显著提升支护体系的主动承载能力与整体安全性。

2.2 深井降水系统的全自动联动控制

地下水是深基坑施工的重大风险源，有效降水可防止管涌、流砂并增强土体强度，但过度降水易引发周边地面沉降，威胁邻近建筑与管线。因此，需实现“精准控水位”的智能化管理。本文设计了一套全自动联动控制策略：首先，在基坑内外关键位置布设水位观测井，构建全域水位监测网络；再结合地质资料（如渗透系数、含水层分布），建立融合物理机理与数据驱动的地下水渗流 AI 代理模型（如基于 FEFLOW/MODFLOW 简化），兼顾精度与实时性。该模型可快速模拟不同降水方案（如启停井组合、抽排流量）对未来水位时空分布的影响。系统以“基坑底部水位始终低于开挖面 1 米”为约束，以最小化总抽水量为目标，自动生成最优降水井运行计划，并通过 PLC 或智能水泵控制器下发指令。现场水泵依令自动启停，并通过变频器精准调节出水量^[3]。系统持续接收新水位数据，在线修正模型参数，滚动优化控制策略，形成动态闭环。此外，系统可接入气象预报，遇强降雨时提前加大降水强度，预留安全水位冗余，展现出强前瞻性与环境适应性。

2.3 基坑变形的智能预测与分级预警

基坑变形涵盖围护结构水平位移、坑外地表沉降及

深层土体位移,是衡量深基坑安全的关键指标。传统变形监测多聚焦数据记录与超限报警,对变形趋势洞察不足,风险等级划分粗放,易出现误报或错失处置时机。为此,本文构建了基于多源数据融合与深度学习的基坑变形智能预测与分级预警体系。该体系先汇集测斜仪、静力水准仪等设备的高频高精度变形数据,并与支撑轴力、土压力、开挖工况、天气状况等多维度影响因子进行时空对齐与融合。接着,采用混合深度学习架构建模,结合卷积神经网络(CNN)提取空间特征,以及循环神经网络(RNN)或Transformer模型捕捉时间序列动态规律。此模型可精准预测关键点位未来变形量与发展速率,还能识别异常变形模式,如局部突变或整体加速。预警机制摒弃单一阈值模式,采用基于风险概率的动态分级预警策略。依据预测变形量、速率、与安全控制值的接近程度及周边环境敏感性权重,将风险划分为蓝、黄、橙、红四个等级,每个等级对应标准化响应预案,确保风险信息准确解读并触发恰当管理动作,提升风险响应的针对性与时效性,保障深基坑工程安全。

3 挑战与展望

3.1 挑战

尽管基于物联网的智能管控体系展现出巨大潜力,但在推广应用过程中仍面临一些挑战:(1)初期投入成本:高精度传感器、5G网络、软件平台的建设需要较大的前期投资,对于中小型项目可能存在经济压力。未来随着技术成熟和规模化应用,成本有望进一步降低。(2)数据安全和隐私:海量工程数据的集中存储和传输带来了新的网络安全风险。必须建立健全的数据安全防护体系,包括数据加密、访问控制、安全审计等。(3)标准与规范缺失:目前行业内尚缺乏统一的物联网设备接口、数据格式、预警分级等标准,导致不同系统之间难以互联互通。亟需相关主管部门牵头制定行业标准^[4]。(4)复合型人才短缺:系统的有效运维需要既懂土木工程又精通信息技术的复合型人才,这类人才的培养是当

前的短板。

3.2 展望

展望未来,该领域的研究与应用将朝着以下方向深化:(1)与BIM/CIM深度融合:将深基坑智能管控系统无缝嵌入到城市信息模型(CIM)平台中,实现从单个项目到城市级地下空间安全的统筹管理。(2)引入更先进的AI算法:探索图神经网络(GNN)等新型算法,更好地刻画基坑系统内部各要素间的复杂拓扑关系,实现更精准的风险溯源与传播路径分析。(3)发展自主式智能体:结合机器人技术,研发能够自主巡检、自主充电、甚至执行简单加固任务的智能机器人,进一步减少人工作业风险。

4 结语

市政深基坑施工安全关乎国计民生,容不得丝毫懈怠。本文提出的基于物联网的深基坑施工安全智能管控体系,通过构建“端-边-云-用”协同的闭环架构,有效整合了现代信息技术与传统岩土工程理论,实现了对深基坑安全状态的全面感知、深度认知、超前预知和精准处置。该体系不仅能够显著提升安全监管的时效性、准确性和前瞻性,还能优化施工组织,降本增效。虽然在成本、标准、人才等方面仍存挑战,但其代表了未来智慧工地和城市安全治理的发展方向。随着技术的不断迭代与生态的逐步完善,基于物联网的智能管控必将成为保障城市地下空间安全开发不可或缺的核心利器。

参考文献

- [1]居则嗣.物联网监测技术研究及其在基坑施工中的应用[J].城市建筑,2024,21(12):12-15.
- [2]赵琼,深基坑水平位移物联网无人监测施工技术.四川省,成都倍特建筑安装工程有限公司,2024-02-29.
- [3]梅家兴.深基坑自动化动态实时监测物联网技术[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(23):62-64.
- [4]梅家兴,李昕.深基坑自动化动态实时监测物联网技术的研究[J].广州建筑,2025,53(04):43-48.