

智能监测技术在房建深基坑变形管控中的应用研究

肖佳琛

新疆银通建设监理有限公司 新疆 奎屯 833200

【摘要】：随着现代城市化进程的不断推进，高层及超高层建筑在新疆地区的建设规模日益扩大，房建工程中深基坑的开挖深度与面积也随之显著增加。由于新疆地区具有独特的地质构造特点与极端多变的气候环境，深基坑工程在开挖与支护过程中面临着更为严峻的变形管控挑战。传统的人工监测手段存在数据采集滞后、容易受极端天气干扰以及预警机制不完善等局限性，已难以满足现代深基坑工程对高精度与高时效性的安全需求。本文系统研究了智能监测技术在深基坑变形管控中的应用，通过对支护结构内力、三维空间位移、周边环境沉降及地下水位波动的全天候、自动化数据采集与云端解算，智能监测技术能够实现对基坑变形演化过程的动态追踪。本研究为新疆及类似地质气候条件下的深基坑工程安全管控提供了翔实有力的理论依据与技术支持。

【关键词】：智能监测；深基坑工程；变形管控；物联网技术

DOI:10.12417/2811-0528.26.18.085

1 引言

近些年来，城市地下空间开发速度加快，新疆核心城市出现了很多深基坑工程。由于新疆广泛分布有湿陷性黄土等特殊岩土，再加上极端温差、大风沙、严寒等恶劣气候的交替出现，使得基坑变形机理更加复杂，突发性也大大增加^[1]。在恶劣的环境下，传统的依靠人工巡测的数据获取方式存在着数据获取滞后、容易受到极端天气的影响、数据处理效率低、缺少动态预警等致命的不足。因此依靠全天候、全自动、高精度的智能监测技术来克服控制的瓶颈，就成为必然趋势^[2]。

智能监测技术是把先进的传感设备、无线通信以及云端大数据平台结合在一起，对基坑的安全指标进行实时在线监测，使安全管理由“事后补救”向“事前预防”转变^[3]。本文将对本技术的体系结构进行详细的分析，并论述它在深基坑变形控制中所具有的主要应用价值以及预警优化机制。

2 智能监测技术在深基坑变形管控中的核心应用

2.1 支护结构内力与三维空间位移的动态追踪

(1) 锚索拉力与支撑轴力的光纤及振弦式传感监测：在深基坑支护体系中，预应力锚索和内支撑构件是抵抗外部土压力、保持基坑整体稳定的绝对主力，内力状态的微小变化往往是基坑出现宏观变形的最早信号^[4]。智能监测技术在锚索台座处安装高精度振弦式锚索计，在混凝土支撑或钢支撑表面或者内部埋设光纤光栅应变计或表面应变计，对支护体系受力状态进行精确控制。振弦式传感技术是利用钢弦自振频率和所受张力之间的物理转换关系，具有很高的分辨率，并且信号传输不容易受到电磁干扰，非常适合在深基坑复杂电磁环境下使用^[5]。为了消除新疆地区大温差造成的热胀冷缩误差，现代智能

传感器内部都装有高精度的热敏电阻元件，在数据解算过程中同时完成严格的温度补偿计算，还原构件真实的受力状态。通过全天候动态监测锚索拉力的松弛情况和支撑轴力的峰值波动，工程技术人员可以清楚地看出支护结构处在弹性安全的工作范围之内，在某一根支撑轴力突然增大或者减小时，立刻找到薄弱环节，防患于未然。

(2) 测斜机器人与北斗高精度定位的位移解算：支护结构水平、竖直位移是反映基坑安全状态最直接、最核心的控制指标。水平位移监测中传统的测斜管人工读数方式耗时费力，智能监测使用了阵列式位移计（柔性测斜仪）或者孔内测斜机器人。柔性测斜仪是由多个三轴 MEMS 加速度计节点串联起来的，与测斜管一起埋入地下深处，可以实时得到基坑全深度范围内连续的位移曲线，准确地反映滑动面出现的位置和变化趋势。在坡顶和冠梁的绝对三维位移监测当中，系统全方位地采用北斗卫星导航系统（BDS）加连续运行参考站网络（CORS）的高精度定位手段。利用在基坑冠梁关键节点处安装一体化北斗接收机天线，采用实时动态载波相位差分（RTK）和静态后处理解算相结合的方式，在没有通视的情况下，可以实现毫米级精度的三维空间坐标自动更新。北斗监测系统克服了传统全站仪视距受限制、受大气折射率影响大的缺点，特别适合于超大规模深基坑的长距离同步位移监测，给基坑三维变形场重构打下了最坚实的数据基础。

2.2 基坑周边环境与地下水文变化的协同感知

(1) 邻近建筑沉降与管线变形的非接触式自动化扫描：在密集的城市建筑群落中进行深基坑开挖，不可避免地会引起周边地层内应力的变化，从而引起邻近既有建筑物沉降倾斜、地下市政管线破裂泄漏等，这是房建基坑工程中遇到的最大外

部风险。智能监测技术不单是对于基坑自身安全的考虑,也把周边环境一起纳入协同监控的范围里。紧邻基坑的重点保护建筑物用全自动测量机器人(ATS)做非接触式周期性自动扫描。测量机器人被固定安装在稳定的基准观测墩上,依靠内置的伺服马达和智能目标识别算法,系统可以按照事先设定的时间表自动找到并准确对准粘贴在周围建筑物和管线地表投影点上的微型棱镜。利用极坐标测量原理连续得到目标点的三维坐标变化,可以自动求出建筑物的差异沉降量和倾斜率。由于实现了高频次的全自动观测,管理人员可以清楚地分离出由于周边重型机械振动产生的瞬态噪声,准确地提取出由于基坑开挖引起的真积累沉降趋势,在周边建筑物结构达到容许变形极限之前及时采取注浆加固或者反压回填措施。

(2) 孔隙水压力与地下水位波动的实时遥测:地下水是诱发深基坑工程事故的“隐形杀手”,在新疆部分地区(有丰富潜水或者承压水盆地的绿洲城市带),地下水位的控制成了基坑成败的决定因素。降水工程控制不严,容易造成坑底管涌、流砂,也会因为过度抽水而引起基坑周边土体大面积固结沉降。智能监测系统在基坑内、外各布置了多点阵列式的自动化渗压计(水压计)和地下水位计。这些传感器可以对土层内部孔隙水压力消散过程和降水井群抽水水位标高下降进行实时遥测。实时获取地下水位数据同基坑开挖深度和周边沉降数据展开多维时间序列比较时,可对止水帷幕隔水效果及降水方案是否合理加以评判。当坑外水位下降速度明显加快时,系统就会立刻判断出止水帷幕有局部渗漏的可能,或者承压水顶板面临被击穿的危险。

3 监测数据深度挖掘与智能化预警决策机制

3.1 变形趋势预测算法与多维数据融合分析

(1) 基于时间序列与机器学习的沉降演化预测:获得大量的自动化监测数据之后,深层次的价值就是用数据挖掘和人工智能算法来对基坑未来变形趋势进行前瞻性预测。深基坑变形数据是受开挖进度、降雨、温差等多种非线性因素影响的复杂时间序列,传统的线性回归方法很难拟合出它的时变特性。现代智能预警系统用到了长短期记忆人工神经网络(LSTM)、

自回归积分滑动平均模型(ARIMA)这些先进的算法。LSTM依靠门控机制可以很好地学习变形历史数据里长期的依赖关系以及动态的变化规律。利用历史位移数据、同期开挖标高、支撑施工状态、气象参数等多维输入特征对神经网络进行训练,可得到较好的未来几小时乃至几天的累计沉降量及位移速率预测结果。提前知道“未来状态”,管理者可以有条不紊地安排下阶段土方开挖工序,把隐患消灭在萌芽之中。

(2) 监测数据异常剔除与真实变形特征提取:深基坑施工现场环境十分恶劣,传感器长时间处于高负荷工作状态,不可避免地会受到重型机械振动、电磁干扰和硬件短时间故障的影响,在数据序列中会出现毛刺状的离群异常值。如果不经处理就直接用作预警决策,很容易引起频繁误报,造成“狼来了”的现象,使预警机制失去公信力。智能监测云平台把卡尔曼滤波、小波变换去噪、滑动平均滤波这些处理模块嵌入到数据融合层里。系统用拉依达准则(3 σ 准则)和箱线图分析法自动找出并剔除孤立粗大的误差,然后用卡尔曼滤波根据基坑力学状态方程对含有白噪声的监测数据做最优的状态估计,有效地去除了高频的随机波动。经过严格的清洗和提取特征的过程,系统可以去掉虚假干扰信号,保留反映土体真实流变特性和支护结构受力变化的主要趋势线,保证后面的安全评价和预警判据的绝对可靠。

3.2 动态分级预警指标体系与工程响应联动

(1) 预警阈值的动态调整与多级防控策略:科学地确定预警指标,就是深基坑安全控制的准则。传统的静态阈值不能反映基坑各个施工阶段受力情况和风险容忍度的不同。智能监测体系主张按照开挖工况动态调节阈值,依照设计计算和数值模拟的结果来确定累计变化量和变化速率两个控制指标,创建起“红、橙、黄、蓝”四级动态预警体系。基坑见底或者支撑拆除时,系统会自动触发收紧预警条件来提高安全裕度,在底板浇筑完毕、基坑趋于稳定之后再稍微放宽阈值。该种动态分级预警方式使得管控更符合工程实际情况,既可以避免出现误报而造成“狼来了”的情况,又能在真正危险来临的时候能够及时有效地进行干预,具体见表1。

表1 深基坑智能监测分级预警指标与响应联动控制表

预警级别	颜色标识	累计变形量占设计限值比例	连续三天变形速率控制条件	安全状态描述与系统判定	工程联动响应与控制措施
四级	蓝色(Blue)	$\leq 60\%$	$< 1.0 \text{ mm/d}$	数据平稳,结构处于完全弹性状态,无异常趋势	正常发送监测日报,保持当前施工节奏与开挖进度
三级	黄色(Yellow)	60%-70%	1.0-2.0 mm/d	变形加速但可控,达到设	系统推送短信提醒;加密监测频次;

				计控制预警初始线	现场加强巡视检查
二级	橙色(Orange)	70%-85%	2.0-3.0 mm/d	局部受力集中，逼近结构屈服点，风险显著增加	触发声光报警；暂停该区域开挖作业；专家介入评估，筹备加固材料
一级	红色(Red)	≥85%	>3.0 mm/d	形变剧烈，发生突发性滑移或结构破坏风险极高	自动停机锁死重型设备；启动应急预案；人员全员撤离；执行反压回填

(注：续表 1)

(2) 智能监测预警与现场施工作业的闭环控制：深基坑监测的主要目的是发现事故，而不是为了防止事故发生。因此智能监测系统要同施工现场的施工调度形成一个紧密的闭环控制联动。当云端平台检测到监测数据达到橙色或者红色预警级别时，系统就会立刻执行多维度的报警动作，报警信息会强制出现在监控大屏上，并且还会以微信企业号、短信、自动语音电话等多种方式第一时间发送给建设方、监理方和施工总承包方的管理人员。平台还可以通过物联网控制网关同施工现场的自动化控制设备进行硬件级联动。例如当系统检测到支撑轴力严重不足发出预警的时候，可以自动向智能液压伺服支撑系统的泵站发出增压指令，实现轴力的实时自动补偿，在基坑出现较大水平位移触发橙色预警的时候，可以直接控制现场的声光报警器发出鸣笛信号，切断开挖区域挖掘机智能电源控制

箱，强制停止作业。

4 结论

本文就房建深基坑规模变大、施工环境复杂化背景下传统监测手段不能满足安全控制的要求，对智能监测技术在深基坑变形控制中的应用进行系统的分析。以多源传感器融合、物联网高效传输、北斗高精定位为依托建立全天候自动化监测感知网，达到支护结构应力变形、周边建筑物沉降、地下水流程的高频次高精度跟踪目的。采用大数据分析和机器学习变形预测算法，创建起动态分级预警联动闭环体系，把监测系统由数据记载工具变成具有智能剖析才能的决策支撑中心。该技术大大提高了基坑安全风险识别的准确性、应急响应的及时性，给施工工序的改进、支护材料的节约提供科学的数据支持，在复杂的地质、气候条件下有较高的应用价值。

参考文献：

[1] 刘雄.土木工程房屋建设中深基坑支护技术的规范应用探究[J].城市建设理论研究(电子版),2024(21):214-216.

[2] 高敬胜.深基坑支护技术在房屋建筑施工中的实践[J].砖瓦世界,2026(4):10-12.

[3] 董剑峰.深基坑支护技术在房建施工中的应用研究[J].工程建设与设计,2024(13):58-60.

[4] 鹿健,万娇海,周子怡,等.房屋建筑深基坑开挖变形控制研究[J].中国建筑装饰装修,2025(19):123-125.

[5] 刁玉雷,方超,卢业宁,等.房屋建筑工程深基坑变形监测技术研究[J].砖瓦,2024(6):81-83.