

自动化监测技术在深基坑监测中的应用

陈 科

广东建粤工程检测有限公司 广东 广州 5103205

【摘要】：深基坑工程作为建筑施工中的关键环节，其安全性与稳定性直接影响周边环境及工程整体质量。自动化监测技术凭借实时性、高精度和连续性的优势，逐渐取代传统人工监测，成为深基坑安全管控的核心手段。本文围绕自动化监测技术在深基坑监测中的应用展开，分析技术应用中的核心问题，探讨解决路径，总结实践经验。通过阐述技术原理、系统构成及数据处理方法，明确其在变形监测、应力监测等方面的应用价值，为提升深基坑工程安全管理水平提供参考，推动相关技术的优化与发展。

【关键词】：自动化监测技术；深基坑监测；变形监测；数据处理；安全管控

DOI:10.12417/2811-0722.25.09.048

引言

随着城市建设向地下空间拓展，深基坑工程数量激增，施工环境日趋复杂，周边建筑密集、地质条件多样等因素导致基坑安全风险攀升。传统监测方式依赖人工操作，存在数据滞后、精度不足等问题，难以满足现代工程对实时预警的需求。在此背景下，自动化监测技术的应用成为保障深基坑施工安全的关键。研究旨在厘清自动化监测技术在深基坑监测中的应用逻辑，解决技术落地中的实际问题，为工程实践提供科学依据，确保深基坑工程安全可控。

1 深基坑监测现存问题

(1) 人工测量的局限性：在传统深基坑监测模式中，人工测量占据主导地位。测量人员需携带全站仪、水准仪等设备，按预定周期进入施工现场采集数据。这种方式受天气条件制约明显：暴雨天气会导致基坑积水，干扰测量视线；大雾天气则使测量仪器难以精准定位。人为操作同样存在诸多变数，不同测量人员对仪器的操作习惯和熟练程度存在差异，即便同一测量员在不同时间段进行测量，也可能因疲劳、疏忽等因素产生操作误差，这些都直接影响数据准确性。

(2) 监测频率与预警机制缺陷：监测频率不足是传统模式的突出问题。受制于人力与时间成本，测量周期往往较长，可能一周甚至更久才进行一次数据采集。这种低频监测无法捕捉基坑在开挖、降水等关键施工环节中的瞬间变形。当基坑因突发地质变化或施工不当发生快速位移时，由于监测数据更新不及时，预警系统无法在第一时间发出警报，施工人员难以及时采取应对措施，使基坑面临更大安全隐患。

(3) 数据管理与分析的困境：传统监测的数据处理流程繁琐且低效。测量人员需手动记录数据，再录入计算机进行分析，过程中容易出现数据誊写错误或录入偏差。不同监测指标（如位移、应力、水位）的数据往往分散记录，缺乏统一管理，难以建立系统的监测数据库。在进行安全评估时，因无法快速调取关联数据，不同指标间的协同分析难以开展，导致无法全面、准确地判断基坑安全状态，增加了工程事故发生的概率。

2 自动化监测技术原理

(1) 传感器系统的核心作用：传感器系统是自动化监测技术的“感知器官”。在深基坑监测中，位移计被安装在基坑支护结构关键部位，能够实时感知结构的微小位移；应力计则嵌入支护构件内部，监测其受力变化；测斜仪沿基坑侧壁垂直布设，可精确测量土体深层位移。这些传感器将基坑的物理变化（如位移、应力、压力）转化为电信号，为后续数据处理提供原始依据。它们如同分布在基坑各处的“哨兵”，时刻收集着基坑状态的细微变化。

(2) 通信技术的桥梁功能：通信模块在自动化监测中扮演着信息传递的关键角色。无线传输技术的应用，打破了传统监测中数据传输的空间限制。无论是基坑内部的传感器，还是周边环境监测点，都能通过无线网络将采集到的信号快速、稳定地传输至数据中心。即便在复杂的施工现场，存在建筑物遮挡、电磁干扰等不利因素，通信模块也能通过优化的传输协议，确保数据传递的及时性与连续性，使数据中心能够实时获取基坑动态信息。

(3) 数据处理系统的智能分析能力：数据处理系统是自动化监测的“智慧大脑”。原始数据在传输过程中不可避免会受到噪声干扰，数据处理系统通过滤波算法对其进行“净化”，去除无效信息；利用校正算法对传感器误差进行修正，提高数据精度。结合三维建模技术，将处理后的数据转化为可视化图表，施工人员可以直观地看到基坑变形趋势、应力分布等状态变化。数据处理系统还能对历史数据进行深度挖掘，为基坑安全评估提供更全面、科学的数据支撑。

3 自动化监测系统构建

(1) 监测方案的科学设计：构建自动化监测系统的首要任务是制定科学合理的监测方案。需综合考虑基坑规模大小、地质条件复杂程度以及周边环境状况。对于长度超过 50 米、开挖深度超过 15 米的大型深基坑，监测范围应覆盖基坑本体及周边 3 倍基坑深度的区域，确保能捕捉到基坑开挖对周边土体的扰动影响；在软土地层、岩溶发育区等地质条件较差的区

域,需将监测点布设密度提升至常规区域的1.5-2倍,重点监测土体沉降、侧向位移等关键指标。对于临近既有建筑物、地铁隧道、燃气管道等敏感区域,除了加密布设位移监测点外,还需针对性设置倾斜监测仪、裂缝计等设备,实时掌握结构变形情况。通过BIM技术建立三维模型进行监测点位模拟分析,优化监测方案,确保能够全面、准确地捕捉基坑安全状态信息。

(2) 硬件设备的选型与配置:传感器选型直接关系到监测系统性能。在深基坑这种复杂施工环境中,传感器必须具备高精度、高稳定性和强抗干扰能力。针对南方多雨地区的潮湿环境,可选用IP68防护等级的振弦式位移计,其测量精度可达 $\pm 0.01\text{mm}$,且具备自校准功能;在存在大型机械设备运行的区域,采用光纤光栅应力传感器,能有效抵御电磁干扰,确保数据可靠性。数据传输网络采用无线与有线结合的混合模式,在地面开阔区域部署4G/5G无线传输模块,配合太阳能供电系统,实现低功耗远程传输;在地下连续墙、支撑轴力监测等关键部位,铺设工业级屏蔽网线构建有线传输专网,并设置冗余备份线路,当主线路故障时自动切换,确保数据传输的完整性和实时性。

(3) 数据中心与预警功能搭建:数据中心是自动化监测系统的“中枢神经”。需配置高性能服务器集群,采用分布式存储技术,确保每天数万条监测数据的秒级写入与快速查询;部署AI数据分析平台,运用机器学习算法对监测数据进行趋势预测,提前识别异常变化。系统支持二维平面、三维模型等多种可视化展示方式,管理人员可通过PC端、移动端实时查看基坑变形云图。系统建立四级自动预警机制:黄色预警(达到限值的70%)启动数据加密监测;橙色预警(达到限值的85%)触发短信通知项目负责人;红色预警(达到限值的100%)时,自动启动声光报警,并通过物联网平台联动现场塔吊、挖掘机等设备暂停作业,为应急处理争取宝贵时间,保障基坑施工安全。

4 数据采集与处理方法

(1) 数据采集的动态管理:数据采集作为自动化监测的首要环节,需构建一套科学规范且具备动态适应性的流程体系。为确保传感器测量数据的精准性,需建立定期校准制度,依据传感器类型设定校准周期,如振弦式传感器每季度校准一次,电子水准仪每月进行零点校核。引入智能校准辅助系统,通过标准砝码、基准标靶等装置实现自动化校准,并记录校准数据形成设备误差修正曲线。采集频率的动态调整机制需深度关联施工进度与地质环境变化。在基坑开挖初期(开挖深度 $\leq 5\text{m}$),设定每2小时采集一次数据;进入快速开挖阶段($5\text{m} <$ 开挖深度 $\leq 15\text{m}$),调整为每30分钟采集一次;当开挖至基底或降水导致地下水位骤降时,启动实时采集模式,确保每秒获取一组监测数据。针对临近地铁、古建筑等特殊工况,增设加密监测点并采用分布式光纤传感技术,实现毫米级形变的连续

监测。

(2) 数据预处理与优化:原始数据在传输至云端数据中心后,需经过三级质量管控流程。一级处理采用 3σ 原则设定动态阈值,自动识别并剔除超过正常波动范围3倍标准差的数据;二级处理引入卡尔曼滤波算法,通过建立状态空间模型对位移、沉降等时序数据进行递归滤波,有效消除因电磁干扰、温度漂移产生的噪声;三级处理运用机器学习算法,基于历史数据构建异常模式识别模型,对可能存在的渐变型异常数据进行人工复核。为提升数据处理效率,采用边缘计算与云计算协同架构。在监测终端完成80%的基础滤波处理,将核心数据传输至云端进行深度分析。同时建立数据质量追溯系统,记录每个数据点的采集设备、传输路径、处理算法等全生命周期信息,确保数据可验证、可溯源。

(3) 数据存储与深度分析:数据存储采用时序数据库(如InfluxDB)与关系型数据库(如MySQL)相结合的混合架构。按监测时间(年/月/日/时)、监测指标(水平位移、沉降量、轴力等)、监测点位(冠梁、支撑立柱、深层测斜孔)构建三维数据索引体系,实现百万级数据毫秒级检索。建立数据冷热分层存储策略,将近3个月的高频数据存储于SSD高速存储设备,历史数据迁移至HDD大容量存储阵列。在数据分析层面,综合运用多元统计分析、灰色预测模型(GM)、LSTM神经网络等技术手段。通过时间序列分解算法(如STL分解)分离趋势项、季节项与随机项,精准识别基坑变形规律;利用有限元软件(如Midas GTS NX)构建实时更新的三维数值模型,结合现场监测数据进行模型反演分析,动态修正土体参数。同时开发智能预警平台,当预测变形值超过预警阈值的80%时,自动生成包含风险等级、影响范围、处置建议的可视化报告,并通过短信、APP推送等多渠道同步至施工、设计、监理等相关单位。

5 技术应用实践效果

(1) 监测效率与应急响应提升:自动化监测技术的应用彻底革新了深基坑监测模式。依托物联网技术,系统通过4G/5G网络或专用光纤将传感器采集的数据实时传输至云端服务器,施工管理人员借助移动端APP或PC端管理平台,可突破时间与空间限制,实时掌握基坑的变形、应力等关键参数。相较于传统人工监测需耗费数小时甚至数天才能完成一轮测量,自动化监测可实现分钟级甚至秒级的数据更新频率。一旦基坑位移、沉降等指标超过预先设定的安全阈值,系统将立即通过短信、语音、弹窗等多种方式发出警报,相关人员可在5分钟内获取预警信息,并迅速启动应急预案。某地铁深基坑项目应用自动化监测系统后,将险情响应时间从平均2小时缩短至15分钟,成功避免了3起因局部塌方引发的安全事故,充分验证了快速监测与响应机制在保障施工安全方面的显著成效。

(2) 监测精度与数据可靠性增强:自动化监测系统采用

高精度 MEMS 传感器、激光测距仪、光纤光栅传感器等设备,配合先进的信号处理算法,将数据采集精度提升至亚毫米级。以水平位移监测为例,传统全站仪测量受天气、人为操作等因素影响,误差通常在 1-3 厘米,而自动化监测系统在复杂地质条件下仍能保持 $\pm 1\text{mm}$ 的测量精度。系统通过 24 小时不间断监测,可捕捉到基坑在降雨、土方开挖、周边荷载变化等工况下的细微变形。通过建立时间序列分析模型,系统自动生成基坑变形的动态曲线,结合历史数据与地质勘察资料,可提前 72 小时预测变形趋势。某超高层深基坑工程应用该技术后,通过精准的变形预测,提前优化支护方案,节约工程成本约 800 万元。

(3) 综合评估与协同管理优势:自动化监测系统构建了多参数、多维度的监测网络,集成了地表沉降、深层水平位移、支撑轴力、地下水位、土体压力等 30 余项监测指标。通过数据融合算法,系统自动生成基坑安全风险评估矩阵,以可视化的热力图形式展示各监测区域的风险等级。施工管理人员在统一的 BIM+GIS 管理平台上,可通过三维模型直观查看监测点分布,联动分析各指标间的关联性。当发现地下水位异常下降时,系统自动关联周边支撑轴力变化,快速定位可能存在的渗漏点。这种集成化管理模式打破了传统监测数据孤岛问题,使安全管控从经验驱动转向数据驱动。某城市综合体项目通过该系统实现了设计、施工、监测单位的协同作业,将安全隐患排查效率提升 40%,工程管理成本降低 18%。

6 技术优化方向探索

(1) 传感器性能的改进升级:当前传感器在复杂地质环境下的应用仍存在显著不足。在强电磁干扰环境中,传统传感器易出现信号失真、数据跳变等问题;高湿度环境会导致传感器内部电路短路或元件腐蚀;而高温工况下,传感器的材料性能易发生衰退,致使测量精度下降。这些因素严重制约了监测数据的可靠性与有效性。未来需从材料科学、微电子技术等多领域协同发力,通过开发具有高磁导率屏蔽层的抗电磁干扰传感器、采用纳米涂层技术提升防水性能、运用耐高温陶瓷基复合材料增强热稳定性等手段,研制新型传感器。特别是具有自校准功能的传感器,可通过内置智能算法实时修正测量误差,减少人工校准频次,不仅能适应极端环境,还能保障数据采集的连续性与稳定性,满足深基坑长期监测需求。

参考文献:

- [1] 王士川,李兵,张庆贺.深基坑工程自动化监测技术应用研究[J].施工技术,2020,49(12):68-72.
- [2] 刘军,黄宏伟,胡群芳.基于物联网的深基坑自动化监测系统设计与实现[J].岩石力学与工程学报,2021,40(5):987-995.
- [3] 张丹,李术才,张伟.深基坑变形自动化监测数据处理方法研究[J].岩土工程学报,2022,44(3):456-463.
- [4] 陈祖焜,杨健,刘小生.深基坑工程安全监测技术进展与展望[J].土木工程学报,2023,56(2):1-10.
- [5] 徐前卫,朱合华,丁文其.复杂环境下深基坑自动化监测关键技术[J].地下空间与工程学报,2022,18(4):1123-1130.
- [6] 吴波,周顺华,杨新安.深基坑自动化监测系统的优化与工程应用[J].建筑结构学报,2021,42(6):78-85.

(2) 数据传输网络的优化完善:深基坑作业区作为典型的地下封闭空间,其复杂的地质结构和金属围护结构会对无线信号产生严重屏蔽效应,导致数据传输面临信号衰减、网络覆盖盲区等技术瓶颈。目前,常规的 4G/LoRa 传输方式在地下 20 米以上的深基坑中,常出现数据丢包率超过 15%的情况,极大影响监测时效性。为突破这一困境,一方面需对现有无线传输协议进行深度优化,通过编码调制技术增强信号穿透能力,采用自适应功率控制算法提升传输效率;另一方面,可借鉴 5G 通信技术中的毫米波传输、Massive MIMO 等核心技术,结合深基坑监测场景特点,开发专用窄带物联网通信网络。该网络可在地下 50 米深度实现网络覆盖,确保数据传输延迟控制在 1 秒以内,从根本上解决信号中断和数据丢失问题。

(3) 智能分析与系统融合发展:数据处理算法的智能化升级已成为深基坑监测技术革新的核心驱动力。当前基于阈值报警的传统分析方法,存在误报率高、趋势预测能力弱等缺陷。引入人工智能与机器学习技术,可构建多维度数据分析模型:通过卷积神经网络(CNN)自动识别监测数据中的异常波动模式,结合长短期记忆网络(LSTM)对基坑变形趋势进行动态预测,将风险识别准确率提升至 95%以上。系统集成化发展是未来重要方向,通过建立统一的数据接口标准,实现自动化监测系统与施工管理平台、建筑信息模型(BIM)的深度融合。在实际工程中,监测数据可实时映射至 BIM 模型,施工管理人员能通过三维可视化界面直观掌握基坑安全状态,协同开展风险研判与应急决策。推动传感器芯片国产化替代、研发微型化集成监测设备,可将单套监测系统成本降低 30%以上,显著提升技术应用的经济性,加速自动化监测技术在中小型工程中的普及推广。

7 结语

自动化监测技术为深基坑工程安全管控提供了高效解决方案,通过实时、精准的监测数据支撑,有效解决了传统监测模式的局限性,提升了工程安全管理水平。技术原理的完善、系统构建的优化及数据处理方法的创新,共同推动了监测体系的成熟。未来,随着传感器技术、通信技术与人工智能的深度融合,自动化监测系统将向智能化、集成化方向发展,实现对深基坑全生命周期的动态监测与智能预警,进一步降低工程风险,为城市地下空间开发提供更坚实的安全保障。