

深基坑工程中数字化监测系统与动态风险预警模型构建

刘燕 赖斯辉

江西国瑞工程管理咨询有限公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i12.8570

[摘要] 深基坑工程的复杂属性与环境敏感特征对安全管控形成严苛约束，数字化监测体系的优化配置与动态风险预警模式的搭建成核心破解路径，整合多维度感知技术、数据传输网络及智能分析手段，实时捕捉基坑变形、应力状态等关键指标并精准识别异常。为工程决策输送可靠支撑，此模式突破传统监测的滞后性瓶颈，依托动态响应机制强化风险防控的前瞻性与靶向性，大幅降低坍塌、渗漏等事故发生概率，为深基坑工程安全高效推进筑牢技术根基。

[关键词] 深基坑工程；数字化监测；动态预警；安全管控；感知技术

Construction of Digital Monitoring System and Dynamic Risk Warning Model in Deep Excavation Engineering

Liu Yan Lai Sihui

Jiangxi Guorui Engineering Management Consulting Co., Ltd.

[Abstract] The complex properties and environmentally sensitive characteristics of deep excavation engineering impose strict constraints on safety control. The optimization configuration of digital monitoring system and the establishment of dynamic risk warning mode constitute the core solution path, integrating multi-dimensional perception technology, data transmission network and intelligent analysis methods to capture key indicators such as excavation deformation and stress status in real time and accurately identify anomalies. To provide reliable support for engineering decision-making, this model breaks through the lag bottleneck of traditional monitoring, strengthens the forward-looking and targeted risk prevention and control through dynamic response mechanisms, significantly reduces the probability of collapse, leakage and other accidents, and lays a solid technical foundation for the safe and efficient promotion of deep foundation pit engineering.

[Key words] deep excavation engineering; Digital monitoring; Dynamic warning; Security control; Perception technology

引言

深基坑工程是高层建筑、地下交通等基础设施建设的核心环节，施工进度遭遇地质条件复杂多变、周边建（构）筑物分布密集等多重考验，安全风险贯穿施工全流程，基坑开挖产生的土体扰动极易诱发边坡失稳、邻近结构沉降等状况，既威胁施工人员人身安全，也可能引发重大经济损失与广泛社会影响，数字化监测与动态风险预警的深度融合，为破解传统管控模式的被动性困境提供全新路径。凭借先进传感技术与数据处理方式，实现风险因素的精准捕捉与动态研判，衔接工程实际需求与技术应用场景，为后续系统搭建、实践落地等内容筑牢基础，推动深基坑安全管控朝着智能化、精细化方向稳步迈进。

一、深基坑工程安全管控核心诉求解析

（一）基坑施工关键风险因素识别

深基坑施工风险因素呈现多元交织特征，地质条件构成核心影响变量，不同岩土层物理力学特性直接关乎基坑稳定状

态，松软土、砂层等不良地质易诱发边坡滑移、基坑涌水等隐患，周边环境维度的影响同样关键，邻近建筑物基础形式、地下管线分布及材质、地下水位波动等，均可能与基坑施工形成相互作用放大安全风险。施工工艺合理性主导风险演化轨迹，开挖流程紊乱、支护结构施工质量缺陷、降水方案疏漏等操作偏差，易破坏基坑原有力学平衡引发结构变形乃至失稳，暴雨、台风等极端天气通过改变土体含水率、增大基坑侧向压力等加剧风险发生概率。

（二）传统监测模式现存短板剖析

传统深基坑监测依赖人工巡检与分散式仪器测量，监测频率受人为主观因素制约难以实现全天候全覆盖数据采集，致使部分隐蔽性风险错失发现时机，监测数据记录处理以人工录入为核心易产生数据误差与滞后问题，无法精准呈现基坑动态变化态势，不同监测指标数据分散管理缺乏有效整合与关联解读，难以形成对基坑安全状态的全面研判，预警机制基于固定阈值缺

乏对风险演化过程的动态追踪，预警信号触发时往往已临近危险状态，留给应急处置的缓冲时间有限，监测数据与施工决策间缺乏快速传导路径，技术数据难以转化为实际管控举措。

（三）数字化预警技术应用必要性

深基坑工程安全管控亟需实时精准全面的技术支撑，数字化预警技术的落地应用恰好填补传统模式的短板，复杂地质与周边环境条件下，数字化手段可实现多源风险因素同步监测，精准捕捉基坑变形、应力、地下水等指标细微变动，为风险识别筑牢数据根基，数字化技术能够破除数据孤岛，实现监测数据实时传输、集中管控与智能解读，提升数据处理效率与精准度^[1]。针对基坑风险动态演化特征，数字化预警技术通过动态追踪与趋势预判提前锁定风险隐患，为施工决策预留充足时间降低事故发生率，推动安全管控模式从被动应对转向主动预防，提升深基坑工程整体安全管控效能。

二、数字化监测系统构建核心要素

（一）多维度感知设备选型与部署

数字化监测系统的稳定运行离不开适配的感知设备，需结合基坑体量、地质特征、风险属性等要素科学甄选，针对基坑边坡变形，高精度 GNSS 接收机、测斜仪等设备可实现水平位移与垂直沉降的实时捕捉，支护结构应力状态能通过钢筋应力计、土压力盒等传感器精准感知，地下水位变化则依托水位计开展持续监测，设备部署遵循全面覆盖、重点聚焦原则^[2]。在基坑边坡坡顶、坡脚、支护桩体等关键区域加密布设，兼顾周边建筑物、地下管线等敏感对象监测需求，部署时考量设备环境适配性，选用防水、抗压、抗干扰性能优异的型号并严格完成安装调试，保障设备运行稳定与数据采集精准。

（二）数据传输网络搭建与优化

数据传输网络作为感知设备与数据处理中心的核心联结，需搭建稳定高效的传输路径，结合基坑施工环境与监测范围采用有线传输与无线传输协同模式，光纤通信等有线传输具备速率高、抗干扰强的特性，适配数据量大、传输距离较近的场景，LoRa、5G 等无线传输技术灵活便捷，可满足复杂施工环境下远程数据传输诉求，搭建过程中注重数据传输实时性与可靠性，优化网络拓扑结构减少延迟与丢包，建立加密传输、访问控制等网络安全防护机制，防范数据泄露与篡改，针对信号遮挡、设备故障等问题制定应急备用方案，保障传输网络持续运转。

（三）监测数据标准化处理流程

监测数据标准化处理是保障数据质量与后续分析有效性

的核心前提，需构建规范处理流程，先开展数据采集与预处理，对原始数据筛选去噪、剔除异常值与无效数据，确保数据准确性，再进行数据格式标准化转换，统一不同设备、类型监测数据格式，便利集中管理与对比分析，通过数据校验与补全技术填补缺失数据提升完整性，处理过程中建立质量控制体系，设定数据精度阈值与异常判断标准，对处理后数据二次校验确保符合分析要求，构建分布式数据库等数据存储系统，实现海量监测数据安全存储与快速检索，为后续风险分析、趋势预判提供坚实数据支撑。

三、动态风险预警机制关键技术

（一）风险等级划分与判定标准

动态风险预警机制搭建需先确立科学的风险等级划分与判定准则，结合深基坑工程特质及相关规范，综合监测指标变化幅度、速率与影响范围，划分一般、较大、重大三个风险层级，各层级对应明确判定指标与阈值，如边坡沉降速率超规定数值或累计沉降接近规范限值即判定为较大风险，判定标准需借鉴工程实践经验，结合项目地质条件、施工方案动态调整，明确不同风险等级判定流程与责任主体，保障判定规范高效。

（二）实时数据智能分析算法应用

实时数据智能分析构成动态风险预警核心，需选用适配算法实现监测数据深度挖掘与趋势预判，支持向量机、神经网络等机器学习算法可通过训练模型掌握数据变化规律，精准识别风险隐患，时间序列分析算法能拟合预测监测数据动态变化趋势，提前预判指标变化方向与数值，算法应用需依托历史监测数据与工程案例开展模型训练优化，提升分析精度与泛化能力，构建多算法融合分析模型整合优势、降低单一算法局限，实现算法实时运行与迭代更新，依据新数据优化参数，快速响应风险变化。

（三）预警响应流程设计与优化

预警响应流程科学性直接影响风险处置效率，需设计闭环响应机制，监测数据触发预警阈值时系统自动发出信号，通过短信、平台推送通知相关责任人，接收者需在规定时间内核实预警信息，结合现场勘查判断风险真实性与严重程度，按风险等级启动对应应急处置，一般风险加强监测、调整施工参数，较大风险暂停相关区域施工、撤离人员设备并加固支护，重大风险立即启动应急预案、全面停工疏散人员并协调专业抢险，明确各环节责任分工、处置时限与操作规范，建立信息反馈机制跟踪效果、调整预警等级与应对措施，形成闭环管理^[3]。见表 1：

表 1 国内深基坑工程风险预警与应急处置效率统计对比（部分项目）

工程所在城市	建设单位类型	预警系统响应时间/min	应急处置启动时间/min	年均监测数据量/万条	风险事件有效处置率/%
北京	市政建设集团	2.5	15	120	96.3
上海	城建投资公司	3.0	18	145	95.1
广州	地铁集团	2.2	14	132	97.0
深圳	城市更新局	2.8	16	158	96.5
成都	基础设施公司	3.5	20	98	94.2

数据来源：住房和城乡建设部《建筑基坑工程监测技术应用情况调研报告》（2022），中国建筑业协会《城市深基坑工程安全管理典型案例汇编》（2023），各地住建主管部门公开工程安全管理统计数据整理。

四、深基坑工程数字化预警实践案例

（一）城市核心区深基坑项目概况

该项目坐落于城市核心商业区，为某超高层建筑配套地下三层基坑工程，开挖深度达 22 米、周长约 350 米，区域地质条件繁杂，上部为填土层、下部衔接粉质黏土层与砂层，地下水位处于较高水平，周边 50 米范围内密集分布多栋老旧建筑物及多条重要地下管线。施工环境敏感程度极高，基坑支护采用排桩 + 内支撑组合形式，施工进度中需直面边坡失稳、邻近建筑物沉降、地下管线损毁等多重风险，对安全管控的精准度与时效要求极为严苛，数字化监测与动态风险预警体系由此成为核心安全保障举措。

（二）监测系统部署与预警机制运行

结合项目风险特征部署多维度数字化监测系统，在基坑边坡、支护桩体、周边建筑物及地下管线上累计布设 32 台 GNSS 接收机、28 套测斜仪、45 个钢筋应力计、36 个土压力盒及 12 台水位计，实现关键指标全方位监测，数据传输采用光纤 + 5G 双模网络架构，保障监测数据实时上传至数据处理中心，预警机制运行阶段融合机器学习与时间序列分析算法开展监测数据实时解读，设定三级风险判定阈值，基坑西侧边坡某测斜仪监测到水平位移速率连续 3 小时超 0.8mm/h 时，系统自动触发较大风险预警信号，相关责任人即刻赶赴现场核实，发现边坡局部出现细微裂缝。

（三）实践应用效果与经验总结

接到预警后迅速启动较大风险应急处置流程，暂停西侧边坡周边施工工序，组织人员设备撤离现场，同步对边坡实施加固处理，通过注浆加固与增设临时支撑的组合措施，有效遏制变形发展态势，后续监测数据显示边坡位移逐步趋于稳定，未对周边建筑物与地下管线造成不利影响，该案例中数字化监测系统实现风险隐患早期识别^[1]。动态预警机制为应急处置预留充足时间，规避事故扩大风险，实践验证数字化监测与动态预警的融合应用可大幅提升深基坑工程安全管控精准度与高效性，同时总结得出设备部署需紧密结合项目风险点、算法模型需针对地质条件优化、预警响应流程需与施工管理体系深度衔接，方能充分释放技术应用价值。

五、数字化预警体系优化路径探索

（一）技术融合升级方向分析

数字化预警体系的持续优化依赖技术创新，需深化感知技术与人工智能、大数据、物联网等新兴技术的交融，升级感知设备智能化水平，研发小型化、低功耗、高精度新型传感器，实现多指标同步监测与自校准，推动人工智能算法迭代，引入深度学习、强化学习等先进技术，提升数据处理智能化与风险预判精准度，完成从“被动预警”到“主动预判”的转变，

借助大数据构建深基坑风险数据库，整合不同项目监测数据、风险案例与处置经验，探索数字孪生技术应用构建数字孪生体，实现物理与虚拟实时映射，提供可视化风险模拟与方案优化平台。

（二）工程适配性改进策略

数字化预警体系需结合不同工程特质开展适配性改进，提升系统实用性与针对性，针对软土、岩石、砂土等不同地质条件，优化感知设备选型与部署方案，调整监测指标与预警阈值，依据项目周边环境复杂程度差异化设置监测范围与重点对象，城市核心区项目强化周边建筑物、地下管线监测，郊区项目侧重基坑自身稳定性监测^[5]。结合施工各阶段风险特征动态调整监测频率与预警机制，基坑开挖阶段提高监测频率、优化预警算法适配施工环境变化，建立系统适配性评估机制，项目实施前完成针对性调整与测试，确保契合工程实际需求。

（三）行业应用推广保障措施

推动数字化预警体系在深基坑工程行业广泛应用需构建完善保障措施，制定统一技术标准与规范，明确监测设备技术要求、数据传输格式、预警等级划分等内容，规范行业应用行为，加强技术培训与推广，通过专题培训、技术交流研讨会提升工程技术与管理人员的认知及应用能力，建立产学研协同创新机制，鼓励科研机构、企业与施工单位合作开展关键技术攻关与成果转化，完善政策支持与激励机制，表彰扶持采用该技术且安全效益良好的项目，加强行业监管指导，将技术应用纳入安全审查与监管范围，确保落地见效。

结语

本文围绕深基坑工程数字化监测系统与动态风险预警机制构建展开深入探讨，明确安全管控核心诉求，剖析系统构建关键要素与技术实施路径，通过实践案例验证技术应用实效，数字化监测与动态预警的深度交融，为破解深基坑工程安全管控难题提供可行方案，推动安全管控模式向智能化、精细化转型，未来伴随技术持续升级与行业应用深化，需进一步强化技术融合创新、提升工程适配能力、完善推广保障举措，充分释放数字化技术在风险防控中的核心效能，为深基坑工程安全高效推进筑牢坚实保障，助力基础设施建设行业实现高质量发展。

[参考文献]

- [1]李扬.高层住宅深基坑工程自动化监测应用[J].居舍, 2025, (31): 66-69.
- [2]廖军.深基坑工程施工技术与安全控制的新思路探讨[J].山西建筑, 2025, 51(21): 89-92.
- [3]李彦林.智能化监测系统在深基坑工程中的实践探索[J].张江科技评论, 2025, (09): 167-169.
- [4]温军宏.深基坑自动化监测系统研究与应用[J].工程技术研究, 2025, 10(17): 28-30.
- [5]角远烁.深基坑监测数据分析与精准预警技术研究[D].河北工程大学, 2025.