

大口径桩基施工监控与预警综合系统研究

周柳湘¹, 刘铁标^{1,2}, 陈义¹, 王文彬^{1,3*}, 吴斌^{1,2}, 刘珺^{1,3}

(1. 湖南省地球物理地球化学调查所, 湖南长沙 410114; 2. 长沙市地球物理地球化学大数据技术创新中心, 湖南长沙 410114; 3. 湖南省绿色智能勘探工程研究中心, 湖南长沙 410114)

摘要:针对大口径桩基施工存在参数控制依赖经验、监测数据分散、电磁干扰易产生野值,进而导致预警滞后及施工状态缺乏实时量化表征等问题,提出一种集状态监测、风险预警、基于模糊PID的参数自适应调节与超限紧急停机有限闭环控制于一体的综合系统。系统基于物联网分层架构构建,集成桩机姿态、动力、钻进、环境及泥浆液位、泥浆密度传感单元,配套基于红外测距与红外对射判定的非接触式孔深监测单元与智能监控平台,建立面向桩基施工场景的两级数据融合方法、基于综合风险指数 R 的分级预警模型(权重由层次分析法确定)和钻进参数自适应优化策略。现场试验表明:以人工测绳为对照,孔深监测平均误差为 ± 6.2 mm;泥浆液位报警响应时间 < 2.1 s;以实际风险事件为对照,预警准确率达到92.3%;相比人工经验操作,平均单桩成孔时间缩短约18%。研究成果可为复杂地层条件下大口径桩基施工的智能化决策、精细化操作与安全施工提供技术支撑。

关键词:大口径桩基;状态监测;智能预警;数据融合;物联网;模糊PID;智能监控;闭环控制

中图分类号:TU473.1;TP277 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2026)S1-0213-09

Research on integrated monitoring and early warning system for large-diameter pile foundation construction

ZHOU Liuxiang¹, LIU Tiebiao^{1,2}, CHEN Yi¹, WANG Wenbin^{1,3*}, WU Bin^{1,2}, LIU Jun^{1,3}

(1. *Geophysical and Geochemical Survey Institute of Hunan Province, Changsha Hunan 410114, China*; 2. *Changsha Geophysical and Geochemical Big Data Technology Innovation Center, Changsha Hunan 410114, China*; 3. *Hunan Green Intelligent Exploration Engineering Technology Research Center, Changsha Hunan 410114, China*)

Abstract: To address the problems in large-diameter pile foundation construction, such as experience-dependent parameter control, scattered monitoring data, and outliers easily caused by electromagnetic interference, which further lead to delayed early warning and lack of real-time quantitative characterization of construction status, an integrated system is proposed. This system combines condition monitoring, risk warning, fuzzy PID-based parameter adaptive regulation, and limited closed-loop control for over-limit emergency shutdown. Constructed upon a layered Internet of Things (IoT) architecture, the system integrates sensing units for rig attitude, power systems, drilling parameters, environmental conditions, mud level, and mud density. It is equipped with a non-contact hole depth monitoring unit based on infrared ranging and infrared mutual beam detection, along with an intelligent monitoring platform. A two-level data fusion method, a graded early warning model based on a comprehensive risk index R (with weights determined by the analytic hierarchy process), and an adaptive optimization strategy for drilling parameters are established for pile foundation construction scenarios. Field test results indicate that, compared with manual sounding rope measurements, the average error of hole depth monitoring is ± 6.2 mm; the response time for mud level alarms is

收稿日期:2026-04-09; 修回日期:2026-06-08 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.S1.025

基金项目:湖南省地质院科研项目(编号:HNGSTP202513)

第一作者:周柳湘,男,汉族,1973年生,正高级工程师,建筑工程专业,研究方向为地基与基础和房屋建筑施工,湖南省长沙市天心区万家丽南路二段898号,zhouliuxiang1@hnwhs.work。

通信作者:王文彬,男,汉族,1987年生,高级工程师,地质工程专业,长期从事钻探技术研究及施工管理工作,湖南省长沙市天心区万家丽南路二段898号,574937489@qq.com。

引用格式:周柳湘,刘铁标,陈义,等.大口径桩基施工监控与预警综合系统研究[J].钻探工程,2026,53(S1):213-221.

ZHOU Liuxiang, LIU Tiebiao, CHEN Yi, et al. Research on integrated monitoring and early warning system for large-diameter pile foundation construction[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1):213-221.

less than 2.1 s; the early warning accuracy reaches 92.3% when validated against actual risk events; and the average hole completion time per pile is reduced by approximately 18% compared to manual empirical operation. The research results can provide technical support for intelligent decision-making, refined operation, and safe construction of large-diameter pile foundations under complex geological conditions.

Key words: large-diameter pile foundation; condition monitoring; intelligent early warning; data fusion; Internet of Things; fuzzy PID; intelligent monitoring; closed-loop control

0 引言

近年来,我国城镇化进程加快,超高层建筑、城市轨道交通、跨海通道等重大基础设施工程数量激增,大口径桩基作为基础工程的核心构件,承担传递上部结构荷载、稳定地基的任务,其施工质量直接关系到工程结构安全与使用寿命^[1]。大口径桩基施工通常面临复杂的地质条件(如软土层、砂层、岩溶地层),且施工工序涵盖钻孔、清孔、钢筋笼安装、混凝土浇筑等多个环节,每个环节的施工参数偏差或操作不当,都可能引发塌孔、缩孔^[2-5]、桩身断裂、钢筋笼偏移等质量事故,不仅会增加工程返工成本、延误工期,还可能产生重大安全隐患。

当前,大口径桩基施工仍以传统人工操作和分散式监测为主,存在诸多弊端:施工参数调节依赖操作人员经验,钻孔速度、泥浆密度等关键参数难以实现精准、连续调控,人为误差较大;监测方式较为单一,多采用人工巡检、单点监测,监测数据分散、实时性差,难以全面反映施工全过程的状态;预警机制不完善,施工现场多采用事后处置方式,缺乏对施工隐患的提前预判和分级处置,无法及时规避安全风险。针对上述问题,本文开展关键感知装置与智能监控平台研究,构建以状态监测与风险预警为核心、钻进参数自适应调节与超限紧急停机有限闭环控制相协同的综合系统,实现大口径桩基施工关键工序的可视化感知、量化预警与局部自动调控^[6-8]。

国外在桩基施工智能化领域起步较早,欧美、日本等发达经济体已形成较为成熟的施工管控技术体系^[9-11]。美国、德国等国家利用物联网技术,将传感器嵌入桩机设备和施工区域,实现施工参数的实时采集和远程监控,并结合智能算法对施工状态进行预判和预警;日本在大口径桩基施工中,采用高精度姿态传感器和自动控制技术,实现钻孔垂直度、钻孔深度的精准控制,结合超声波监测技术对孔壁完整性进行检测,有效降低塌孔风险。此外,

近年来相关研究开始由单纯信息采集向质量评价和智能决策延伸。这表明国外相关研究正由“可监测”向“可评价、可决策”发展。

国内近年来逐渐重视桩基施工的智能化管控,高校、科研院所及企业开展了大量研究与实践。在技术研发层面,部分机构针对大口径桩基施工特点,开发了基于物联网的监测系统,能够实时采集钻孔深度、泥浆密度、桩身垂直度等参数,并通过数据传输模块上传至云端平台,进行可视化展示。同时,部分企业已推出桩机自动控制系统,可自动调节钻孔速度、混凝土浇筑速度等工艺参数,提升了施工控制精度^[12-14]。

在工程应用层面,多个重大项目开展了智能监控的实践探索。杭州320国道项目在水泥搅拌桩施工中引入“桩基慧在线监控系统”,利用智能传感器对桩长、转速、水灰比等关键参数进行实时采集与远程监控。雄忻高铁项目采用高精度定位定向终端、电流传感器、倾角传感器及终端监测平台,实现了桩基长度、定位及垂直度等信息的实时查看与精准控制。中建八局东北公司研发的“云打桩系统”,通过云端数据平台集成高精度北斗定位、物联网传感器和智能算法,实时监测桩机姿态、下沉量及周边地质变化,动态调整打桩参数,确保每根桩的垂直度、坐标位置和标高符合设计要求。乍嘉苏改扩建工程应用“软基智控平台”,通过高精度传感器实时监测桩长、延米灰量、钻进速度、浆液密度等参数,累计完成60万米桩柱监测,覆盖率超90%,实现桩体水泥掺量均匀性提升15%^[15-18]。

尽管如此,当前相关研究仍存在明显不足:(1)多数系统侧重一般施工现场安全监测、单一桩型质量评价或局部工序数字化^[19-22],与大口径桩基复杂工况下对成孔质量、设备状态和施工风险协同管控的需求仍有差距;(2)多源监测数据融合处理能力薄弱,难以对多维参数进行综合分析并预判施工隐患;(3)“监测-预警-控制”之间尚未形成稳定闭环,

阈值设定与参数优化多依赖经验,系统的自适应能力和可推广性仍有待提升。

基于此,本文围绕大口径桩基施工全过程中的感知、识别、预警与关键参数调控需求,开展系统架构、关键装置、风险模型及现场验证研究。本文的主要工作体现在:(1)构建面向大口径桩基施工场景的“监测-预警-有限控制”协同体系;(2)提出两级数据融合与分级预警方法,实现异构参数的统一风险表征;(3)设计红外测距与红外对射判定结合的非接触式孔深连续监测方法,并引入模糊PID实现钻进参数自适应优化;(4)通过工程试验对系统精度、响应时间、预警准确率和施工效率提升效果进行量化验证。本文所述“控制”主要包括:基于模糊PID的给进压力/转速软调节;本地控制器对超限工况的快速响应;红色预警触发的紧急停机硬保

护,并非实现钻孔、清孔、混凝土浇筑全工序无人全自动运行,系统仅针对成孔工序提供辅助自动调控,全程保留人工操作权限。

1 系统总体设计

1.1 设计原则与架构

系统设计遵循四项原则:(1)实时性,关键参数统一归档频率为 1 Hz,报警延迟小于 3 s;(2)可靠性,传感器防护等级不低于 IP65,适应 -20~60 ℃ 野外环境;(3)可扩展性,支持多台桩机同时接入,预留第三方接口;(4)经济性,在满足功能前提下优先选用国产成熟器件。

系统采用四层物联网架构,如图 1 所示,自下而上分为感知层、数据传输层、数据处理与控制层、应用层,各层协同实现施工参数的实时采集、可靠传输、智能处理与远程管控。

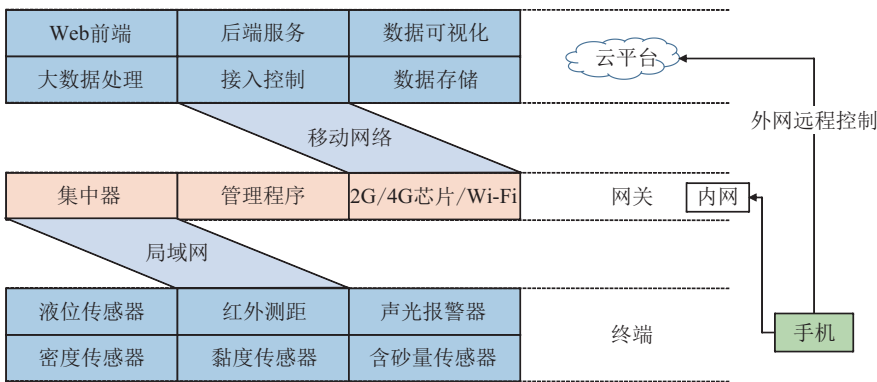


图 1 大口径桩基智能平台架构

1.2 感知层

感知层是大口径桩基施工监测与预警综合系统的数据基础层,其核心任务在于实现施工对象、设备工况与环境扰动信息的连续获取与统一描述。考虑到大口径桩基施工过程具有工序连续性强、工况变化快、地层响应复杂和风险演化隐蔽等特点,本文将感知对象划分为桩机姿态、动力系统、钻进过程、施工环境及关键工艺参数五类,并通过多类型传感器协同布设构建施工现场的多源感知网络。该层不仅承担原始数据采集功能,还为后续施工状态识别、异常判别和风险评估提供基础数据支撑。

其中,桩机姿态传感器布设于机身与钻杆关键位置,用于获取倾角、位移和振动等参数,以反映施工装备在复杂荷载和地层扰动条件下的稳定性特

征;动力系统传感器面向发动机与液压系统运行状态,采集油温、油压、转速及扭矩等信息,以表征设备能量输出与工作健康状态;钻进参数传感器主要获取钻压、转速、扭矩和孔深等过程变量,为地层变化识别和工艺参数优化提供依据;环境监测传感器则面向施工现场温度、湿度、风速、风向、噪声和粉尘等外部条件,用于分析环境因素对施工安全与设备运行的耦合影响。基于大口径桩基施工对泥浆稳定性与成孔质量控制的特殊需求,系统进一步设置泥浆液位、泥浆密度和孔深专用传感单元,从而形成对“设备-工艺-环境”三类信息的联合感知框架。该设计有助于突破传统人工巡检和单点采集模式下数据离散、时效性不足和隐患识别滞后的局限。

1.3 数据传输层

数据传输层承担感知层与控制决策层之间的信息耦合与可靠转发任务,其设计目标是在复杂施工环境下实现多源异构数据的稳定传输、时序同步与低时延共享。针对大口径桩基施工现场存在金属结构遮挡、电磁干扰强、作业区域分散及远程监管需求突出的特点,本文采用“有线主采集、无线远传输”的混合通信架构。有线链路主要服务于现场近端设备与本地控制器之间的数据采集,以保证关键监测数据传输的实时性与抗干扰性;无线链路则承担现场终端与监控中心之间的数据上送与远程交互任务,以满足跨区域协同管理和移动化监管的应用需求。

在具体实现上,系统以工业以太网和RS485总线构建现场数据采集网络,实现传感器、采集模块与本地控制系统之间的稳定通信;对于需要跨区域共享的监测信息,则通过4G/5G网络与Wi-Fi等无线方式上传至监控中心服务器。与传统单链路传输模式相比,该层设计更强调不同通信方式之间的功能分工和容错互补:前者保障关键数据采集的连续性与完整性,后者提升系统远程访问能力与部署灵活性。由此,数据传输层不仅是信息通道,更是实现施工现场“本地实时控制-远程集中监管”双重目标的重要支撑。

1.4 数据处理与控制层

数据处理与控制层是系统实现状态识别、风险判别和关键参数调控的核心层,其本质是将多源原始监测数据转化为可用于控制决策的有效信息。考虑到大口径桩基施工中监测参数种类多、数据源刷新周期不一致且受现场噪声干扰明显,本文将该层划分为本地控制子系统与监控中心服务器两个层级,以形成“边缘快速响应-云端综合分析”的协同处理模式。

其中,本地控制子系统以嵌入式控制器为核心,负责完成现场数据接收、初步清洗、异常筛查和阈值判别,并依据预设控制逻辑对动力系统、卷扬系统和加压系统进行快速响应调节,这是系统有限闭环控制的执行层。例如,橙色预警时向操作人员提示并建议降速,红色预警时下发紧急停机指令。此类处理机制能够在网络波动或远程通信延迟条件下保持桩机关键动作的基本稳定性与安全性。监控中心服务器则面向多台设备和多工点场景开

展集中化数据管理、历史数据归档与融合分析,并进一步结合趋势分析、规则推理或智能算法对施工效率、地层变化、设备故障征兆及施工风险进行综合研判。通过这种分层处理方式,系统实现了从原始数据采集到风险识别、从状态监测到控制反馈的闭环逻辑,使施工参数调控逐步转向数据驱动的决策模式。

1.5 应用层

应用层是系统功能输出与人机交互的直接载体,其作用在于将底层监测与分析结果转化为可理解、可追踪、可干预的管理信息,从而支撑施工现场的精细化组织与风险管控。面向大口径桩基施工中管理主体多、作业时空跨度大和隐蔽工程质量难追溯等问题,本文构建了由Web监控平台和移动端APP组成的双终端应用体系,以满足不同场景下的信息访问与控制需求。

其中,Web平台主要服务于项目管理人员和技术人员,提供设备状态总览、实时参数展示、历史数据追溯、报警管理和权限控制等功能,使多台设备、多类参数和多时段数据能够在统一界面内完成集中表达;移动端APP则面向现场值守与流动管理需求,支持关键参数快速查看、预警信息实时推送及必要的远程干预操作,以提升异常工况下的响应效率。与一般监测系统只强调“显示”不同,本文应用层更强调数据可视化、事件可追溯和处置可闭环:一方面实现施工过程信息的透明化表达,另一方面将异常事件、阈值告警和控制反馈纳入统一管理链条,从而提高施工管理的实时性与决策针对性。

2 关键感知装置与监控平台

2.1 桩机姿态与钻进过程参数采集

(1)桩机姿态监测:在桩机机身和钻杆顶部各安装1套三轴倾角传感器(量程 $\pm 30^\circ$,精度 0.05° ,RS485输出,内部刷新率5 Hz),用于实时监测机身倾斜和钻杆偏斜。倾角超过表1黄色预警阈值时,平台推送姿态异常提醒,提示操作人员检查钻机就位与垂直度。

(2)钻进过程参数监测:通过桩机自带的液压压力传感器和转速编码器接入本地控制器(4~20 mA/脉冲信号),采集钻压、转速、扭矩等参数。钻压量程0~400 kN,转速量程0~60 r/min,经RS485变送模块统一接入采集总线,经1 Hz归档后上传。

表 1 主要参数预警阈值			
参 数	正常范围	黄色预警	红色预警
桩机倾斜角度/(°)	≤1.5	1.5~3.0	≥3.0
泥浆液位偏差/cm	≤5	5~15	≥15
泥浆密度/(g·cm ⁻³)	1.05~1.25	超出±0.1	超出±0.2
钻压/kN	依设备而定	超出额定 15%	超出额定 30%
油温/℃	≤85	85~95	≥95

上述参数既用于 3.3 节钻进参数自适应优化(控制输入与反馈),也参与 3.1 节综合风险指数计算。

2.2 动力系统状态监测

在液压油箱、发动机冷却回路分别安装温度传感器(PT100, -20~150℃)和压力传感器(0~35 MPa, 4~20 mA),内部测量周期约 2 s。油温、油压超限分别触发黄色/红色预警,红色油温预警时,本地控制器可联动降低发动机负荷,避免设备过热损坏,属于设备保护类控制动作。

2.3 施工环境监测

施工现场布设温湿度传感器(RS485,内部刷新率 1 Hz)和噪声传感器(1 Hz),用于记录环境条件并分析其与泥浆性能、传感器读数异常(如强降雨干扰)之间的关联。环境参数不直接参与紧急停机,但可作为预警模型的辅助修正因子。

2.4 泥浆液面实时监控报警系统

针对泥浆液面过高导致环境污染、过低引发塌孔的问题,研制超声波液位监控装置。传感器主要参数:测量范围 5~25 m(可调),盲区 0.25~0.6 m,测距精度 0.25%~0.5%,分辨率 1 mm,输出 RS485/Modbus 及 4~20 mA,防护等级 IP65/IP68。

本地嵌入式控制器通过 RS485 总线采集传感器数据,经滤波处理后上传至上位监控平台,采用滑动平均滤波(窗口长度 5)抑制瞬时干扰。当液位偏差超过预设阈值(如 15 cm)时,触发声光报警(30 W, 12 V)并向平台推送信息。

2.5 泥浆密度实时检测装置

在渣箱出浆口安装泥浆密度传感器(神开,量程 0~3.0 g/cm³,输出 4~20 mA,三线制,内部测量周期约 2 s)。采用 24 V DC 供电,通过 RS485 变送模块将模拟量转换为数字信号。考虑到泥浆黏附对传感器的非线性影响,在数据处理中引入温度补偿模型。

$$\rho_c = \rho_m + k(T_m - T_0)$$
(1)

式中: ρ_c ——补偿后密度; ρ_m ——原始密度读数; T_m ——实测温度; T_0 ——参考温度,取 25℃; k ——经验补偿系数,通过标定实验确定,本文取 $k=0.0012\text{ g}/(\text{cm}^3\cdot\text{℃})$ 。

泥浆密度检测仪采集终端如图 2 所示。

2.6 孔深实时监测系统

采用工业级红外测距模组(量程 0.05~80 m,精度±1 mm,内部刷新率 10 Hz)结合红外对射传感器

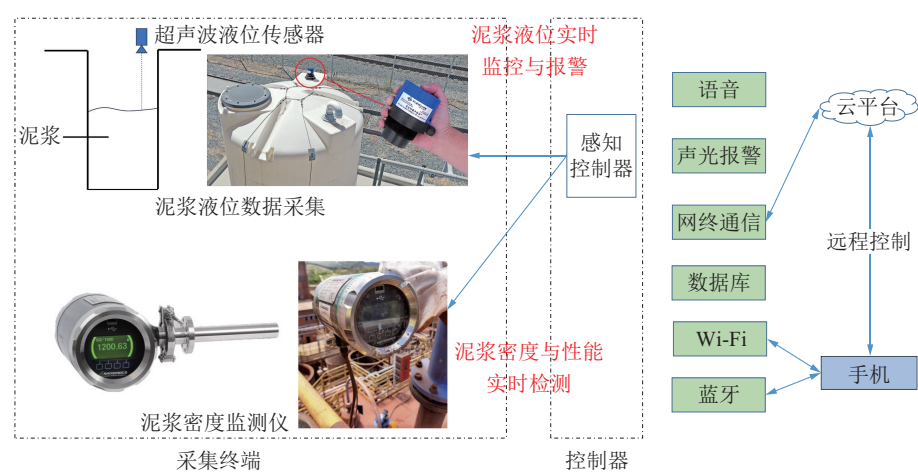


图 2 泥浆密度检测仪采集终端

实现非接触式孔深测量。测距模块安装于钻机顶架,红外对射传感器布置于钻杆加接工位,如图3所示。

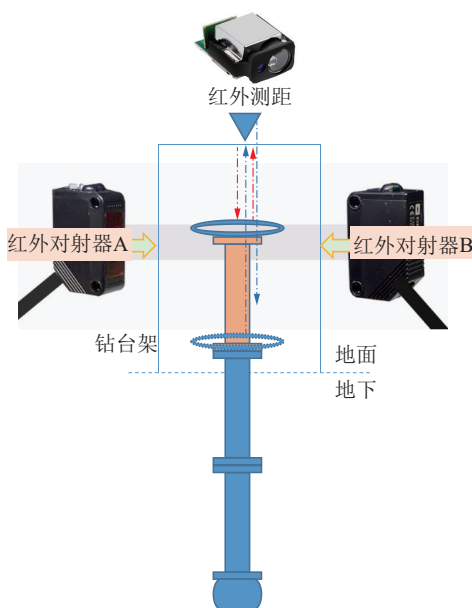


图3 实时钻孔深度监测装置结构示意图

2.6.1 孔深计算

起钻时测定初始距离 D_0 ,钻进过程中实时测定钻杆顶部至测距模块的距离 D_t ,累计有效钻杆根数为 n ,单根钻杆标准长度为 L ,则孔深 H :

$$H = D_0 - D_t + nL \quad (2)$$

该系统避免了传统人工测量需停机的弊端,实现了连续、实时孔深监测。

2.6.2 加杆与减杆动作判别

红外对射传感器仅能检测光束通断状态切换,无法单独区分加杆或减杆。本文结合卷扬运行方向与测距变化趋势进行联合判定,流程如下:

(1)获取运动方向标志 S :本地控制器读取卷扬系统状态字,下放/钻进时 $S=+1$,上提/卸杆时 $S=-1$ (由卷扬编码器或PLC工况信号给出)。

(2)检测对射通断事件:当光束由通→断→通(或断→通→断)完成一次完整切换,记为一次“杆节变更事件”。

(3)测距突变校验:事件前后测距差值 $\Delta D = |D_{t-} - D_{t+}|$ 。其中 D_{t-} 为对射通断事件发生前的测距值(事件前一刻采样), D_{t+} 为对射通断事件结束后的测距值(事件后一刻采样)。若 $\Delta D < 0.5L$,则确认为有效杆节变更,否则视为钻杆摆动或遮挡引起的

误触发,不予计数。

(4)加杆/减杆判定:若 $S=+1$ 且有效杆节变更,判定为加杆, $n=n+1$;若 $S=-1$ 且有效杆节变更,判定为减杆, $n=\max(n-1,0)$,仅校正当前段长度,不重复累加孔深。

(5)二次确认:钻进加杆时钻机通常保持旋转且扭矩维持高位,提钻减杆时扭矩明显回落。若方向标志与扭矩趋势矛盾,则延迟500 ms待信号稳定后再判定,降低误判率。

2.7 智能监控平台

平台采用B/S架构,前端Vue.js+ECharts,后端Spring Boot+MySQL。主要功能模块:设备管理(状态监控、列表)、数据展示(实时曲线、历史查询)、报警管理(阈值设置、记录追溯)、用户管理(权限、日志)。平台支持单机与云部署两种模式。

3 多源数据融合与预警模型

3.1 数据融合策略

系统采集的传感器数据维度多、量纲不同、数据源刷新周期各异,直接使用易产生误判。各通道数据经RS485轮询与1 Hz统一归档后,在融合层形成对齐时序。为此,设计了两级数据融合策略。

一级融合(本地):在嵌入式控制器内对归档后的同类型传感器数据进行滤波,以1 Hz时序信号为对象,采用中值滤波(窗口长度7)去除脉冲噪声,再以一阶低通滤波($\alpha=0.3$)平滑高频波动。

本文处理对象为一维时间序列,在1 Hz统一归档条件下,“窗口长度7”指取当前时刻及其前6个共7个连续采样点(时间窗约7 s)的中位数作为输出值。若某通道原始刷新率为2 Hz,则先降采样至1 Hz再参与中值滤波,此时窗口7对应约3.5 s。“脉冲噪声”指施工现场常见的孤立型野值干扰,主要包括:RS485通信偶发丢包/错帧导致的单点跳变,变频器、电机启停引起的电磁尖峰,钻机强烈振动导致的传感器瞬时异常读数。此类噪声呈少量大幅偏离、持续时间极短的特征,适合中值滤波抑制;对连续漂移或高斯随机噪声,中值滤波效果有限,故后续辅以低通滤波。

二级融合(云端):将多源异构数据在时间轴上对齐后,构建特征向量 $x=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$,其中 x_i 代表归一化后的第 i 类参数(如倾斜角、液位偏差、钻压波动等,取值0~1)。采用加权融合方法计算

综合风险指数 R 。

$$R = \sum w_i \mu_i(x_i) \quad (i=1 \rightarrow n) \quad (3)$$

式中: w_i ——权重系数; $\mu_i(x_i)$ ——各参数的梯形隶属度函数。

$R \in [0, 1]$, 值越大表示综合风险越高。权重系数计算过程: 采用层次分析法(AHP)确定 w_i , 并结合现场专家评议与历史预警案例回溯微调, 步骤:

(1) 构建层次结构: 目标层为综合风险指数 R ; 准则层包括姿态风险 C_1 、泥浆状态 C_2 、钻进参数 C_3 、动力状态 C_4 、环境干扰 C_5 。

(2) 构造判断矩阵: 邀请5名具有10年以上桩基施工经验的工程师, 对准则层两两比较, 采用1~9标度, 取几何平均得矩阵 A :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1/2 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 2 & 3 \\ 1/4 & 1/3 & 1/2 & 1 & 2 \\ 1/5 & 1/4 & 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

(3) 求权重向量: 按特征值法求得最大特征值 $\lambda_{\max} = 5.12$, 对应归一化特征向量 $W = [0.419, 0.263, 0.150, 0.103, 0.065]^T$, 即 $w_1 = 0.419$ (姿态)、 $w_2 = 0.263$ (泥浆)、 $w_3 = 0.150$ (钻进)、 $w_4 = 0.103$ (动力)、 $w_5 = 0.065$ (环境)。

(4) 一致性检验: $CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) = 0.03$; 查表得 $RI = 1.12$ ($n = 5$), $CR = CI / RI = 0.027 < 0.1$, 通过一致性检验。指标层各子参数权重可在准则层权重基础上按相同方法细分。

3.2 分级预警机制

依据综合风险指数 R 和单一参数超限情况, 设置三级预警。 R 阈值采用“专家经验初值+现场试验标定+误报/漏报反馈修正”的组合方式确定, 具体依据:

(1) 专家评议初值: 参照《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)及现场安全管理要求, 将综合风险划分为低(可接受)、中(需关注)、高(需干预)、极高(需停机)四档, 初步映射为 R 区间。

(2) 现场标定修正: 利用本工程32根桩、78次预警记录, 统计真实风险事件发生时 R 的分布: 72次有效预警中 R 均值0.71、最小0.58; 6次误报 R 均值0.42。据此将分界点调整为黄色0.30、橙色0.60、红色0.85, 使漏报率与误报率取得平衡。

(3) 独立阈值越级机制: 任一关键参数达到表1

红色预警阈值时, 不受 R 区间限制, 直接触发红色预警(如桩机倾角 $\geq 3.0^\circ$ 立即停机)。

分级规则: 黄色预警(注意, $0.30 \leq R < 0.60$)指参数接近阈值, 提示操作人员关注, 界面显示黄色标识; 橙色预警(警告, $0.60 \leq R < 0.85$)指参数超出阈值或综合风险显著升高, 建议采取预防措施(如调整钻进速度), 同时声光报警器间歇鸣响; 红色预警(危险, $R \geq 0.85$)指参数严重超限或多项同时恶化, 自动触发紧急停机指令, 声光报警持续鸣响, 并向所有管理人员推送应急信息。

需要说明的是, 上述 R 阈值为本工程(桩径1200 mm, 粉质黏土-风化岩地层)标定结果, 换用不同桩径或地层条件时应重新标定。各关键参数的独立阈值参考值见表1。实际使用时, 阈值可根据施工地层和设备状态动态调整。

3.3 钻进参数自适应优化

基于实时采集的钻压、转速、扭矩和泥浆密度, 结合地层识别规则(通过钻进速度与扭矩的比值变化判断软硬地层变化), 系统自动调整给进参数。采用模糊PID控制算法, 以转速偏差 e 和偏差变化率 e_c 为输入, 输出给进压力调节量 ΔP 。模糊规则库基于工程经验构建, 共49条规则。该优化策略可在硬岩地层自动降低转速、增加钻压, 在软土层反之, 从而在保证成孔质量的同时提高钻进效率。该策略构成系统最主要的连续闭环控制功能, 仅在钻进工序生效, 且保留人工干预权限。

4 系统实现与现场应用

4.1 硬件选型与集成

根据上述设计, 完成了硬件选型与集成。主要设备清单见表2。

表2 主要设备清单

设备名称	参数范围	数量
红外测距模块	0.05~80 m(精度1 mm)	1套
红外对射传感器	5~10 m 对射	1对
超声波液位传感器	5~25 m, RS485	1套
泥浆密度监测仪	0~3.0 g/cm ³ , 4~20 mA	1套
声光报警器	30 W, 12 V	1套

4.2 软件平台开发与数据采集机制

基于上述硬件, 开发了 Windows 上位机程序

(C#, .NET 6.0) 和 Web 监控平台 (Vue3+Spring Boot)。上位机通过 RS485 轮询各传感器 (波特率 9600 Bd, 8 数据位, 1 停止位, 无校验), 解析 Modbus RTU 协议, 数据经 4G 网络上传至云端。Web 平台实现了实时仪表盘、历史曲线、报警列表和远程参数设置功能。移动端 APP (Flutter 开发) 接收推送通知, 支持查看关键参数和确认报警。

RS485 轮询与各传感器采样频率关系:

(1) 传感器自身刷新率各异: 如红外测距 10 Hz、泥浆密度 0.5 Hz、液位 1 Hz、倾角 5 Hz 等, 指各设备内部 ADC/测量更新周期不同。

(2) 总线轮询机制: 上位机/本地控制器以固定轮询周期 $T_p=1$ s 按 Modbus RTU 协议依次访问各从站 (地址 1~N), 每访问 1 个从站读取其当前最新寄存器值并打统一时间戳。单轮访问 8 个从站耗时约 150~200 ms, 剩余时间用于滤波与存储; 通信超时则自动重试。

(3) 统一归档: 每个 T_p 周期结束时, 将各通道读数写入本地 1 Hz 时序缓存, 对慢速传感器 (如密度, 2 s 刷新) 可能连续两周期读数相同, 对快速传感器 (如测距 10 Hz) 则每周期取最后一次轮询值, 融合层有效采样率为 1 Hz。

(4) 云端上传: 1 Hz 缓存经 4G 网络批量上传。因此, 3.1 节融合处理的是经轮询对齐后的 1 Hz 统一时序, 而非各传感器原始异频率序列的直接混合。

4.3 现场试验与性能分析

系统在湖南某工地 (桩径 1200 mm, 设计孔深 65 m, 地层为粉质黏土-强风化砂岩-中风化花岗岩) 进行了为期 2 个月的现场试验, 共监测 32 根桩的施工过程。为保证评价结果的可比性, 选取孔深监测误差、液位报警响应时间、预警准确率和单桩平均成孔时间作为核心评价指标。其中, 孔深误差以人工测绳结果为对照, 预警准确率按实际风险识别次数与总预警次数之比计算, 施工效率以单桩平均成孔时间表征。

主要性能指标: 与人工测绳对比, 孔深监测最大绝对误差为 +12 mm, 平均误差 ± 6.2 mm, 满足施工规范要求 (≤ 50 mm)。

液位报警响应时间: 从液位超限到声光报警启动平均耗时 1.6 s, 最迟 2.1 s。

预警准确率: 共触发预警 78 次, 其中真实风险事件 72 次, 误报 6 次, 准确率 92.3%。6 次误报均发

生在强降雨天气 (传感器表面雨水干扰), 后续增加雨刷装置后改善。

钻进效率提升: 相比同期未安装系统的桩位 (采用人工经验控制), 平均单桩成孔时间缩短约 18% (从 42 h 降至 34.5 h), 主要得益于参数自适应优化减少了硬岩地层的蹩钻和提钻次数。

典型预警案例: 第 21 号桩钻进至 38 m 时, 泥浆密度从 1.18 g/cm^3 骤降至 1.06 g/cm^3 , 系统发出橙色预警。现场检查发现回浆管路堵塞导致劣质泥浆回流, 及时疏通后密度恢复, 避免了塌孔事故。

与传统方法的对比, 传统施工中, 孔深测量需每加一次杆人工测量一次, 每次停机约 5 min, 一根 65 m 桩约需停机 10 次, 累计 50 min。本系统实现了连续自动测量, 消除了停机时间, 同时避免了人工读数误差。泥浆密度传统检测为每 2 h 取样一次, 滞后性大, 本系统实现了秒级感知 (经 1 Hz 归档后参与预警), 为动态调控提供了可能。

本系统仍存不足: (1) 泥浆密度传感器在含砂量高的泥浆中易磨损, 需定期校准; (2) 4G 信号在偏远工地可能不稳定, 后期可增加 5G 或卫星通信备份; (3) 预警模型目前基于固定权重和本工程标定的 R 阈值, 尚未形成面向不同桩径、地层和设备工况的自学习机制。后续将结合历史监测数据和现场工况样本, 引入随机森林、LSTM 等方法对预警模型进行训练, 实现阈值和权重的自适应优化。

4.4 工程适用性与讨论

从现场应用结果看, 本系统在孔深连续测量、泥浆状态实时感知、异常联动预警及钻进参数软调节方面具有较强工程适用性。与近期研究中偏重单类桩型质量评价或一般施工现场质量监测的平台不同^[21-22], 本文系统更强调大口径桩基施工场景下“监测-预警-有限控制”的联动, 更适用于成孔质量受地层变化影响显著、现场反馈链条较长的复杂工况。

需要指出, 本文验证范围聚焦成孔阶段关键参数, 对混凝土浇筑等后续工序未纳入闭环控制, 推广时应明确系统边界。当前系统在规则驱动预警、关键参数在线感知和远程协同管理方面已具备较强工程应用基础, 但风险权重与 R 阈值仍主要依赖专家经验和现场标定, 尚未形成面向不同桩径、地层和设备工况的自学习模型。同时, 泥浆密度传感器耐磨性、复杂天气下传感可靠性及边远地区通信

备份能力仍需进一步优化。后续研究可结合机器学习、数字孪生和边云协同技术,推动预警模型由经验驱动向数据驱动演进。

5 结论

(1)针对大口径桩基施工中参数调节依赖经验、监测数据分散、预警滞后等问题,构建了基于物联网分层架构的状态监测、风险预警与关键参数有限闭环控制综合系统。系统集成姿态、动力、钻进、环境、泥浆液位、泥浆密度、孔深等感知模块及智能平台,实现了从感知、传输、处理到应用的分层管控。

(2)提出了两级数据融合与分级预警方法,通过AHP确定权重、梯形隶属度函数构建综合风险指数 R ,并给出了 R 阈值标定依据及独立参数越级机制。现场试验表明,系统预警准确率达到92.3%,报警响应时间小于2.1 s,能够有效提升施工安全保障能力。

(3)提出了基于红外测距、红外对射与卷扬方向联合判定的非接触式孔深连续监测方法,明确了加杆/减杆判别逻辑,并结合模糊PID实现钻压与转速的动态匹配。现场应用显示,平均单桩成孔时间缩短约18%,孔深监测平均误差为 ± 6.2 mm,显著提高了施工效率与成孔质量。

(4)研究表明,该系统在复杂地层大口径桩基成孔施工中具有较好的工程适用性和推广价值。后续仍需围绕传感器耐磨性、复杂天气下监测可靠性、通信冗余及不同工况下 R 阈值自适应和预警模型自学习能力开展进一步研究。

参考文献:

- [1] 周红军.我国旋挖钻进技术及应用的发展[J].探矿工程,2003,30(2):11-14,17.
- [2] 刘杰,马超,姚兆龙,等.倾角传感器在三轴搅拌桩垂直度控制中的应用[J].施工技术,2025,54(7):97-101.
- [3] 李嘉成,姬付全,饶为胜,等.钻孔灌注桩数字化施工技术及应用[J].中国港湾建设,2024,44(6):67-71.
- [4] 张建明,曹明,陈晓明.煤矿井下数字化钻进技术发展现状与趋势[J].煤炭科学技术,2017,45(5):47-51,70.
- [5] 马重刚,谢小飞,李建勇,等.多机成孔工艺在大直径超长桩施工中的应用[J].施工技术,2013,42(9):50-52.
- [6] 郭德宇,曲贝贝,赵建豪,等.智能化管控在钻孔灌注桩施工全过程中的应用[J].水运工程,2021(9):206-211,221.
- [7] 王逸鸣,韩庆忠,何兴玲,等.冲孔灌注桩数字化施工技术的研究与应用[J].施工技术,2018,47(12):220-222.
- [8] 陶兴文.上海地区钻孔灌注桩后压浆技术的设计与施工[J].探矿工程,2001,28(4):35-36,38.
- [9] Bucchiarone A, De Sanctis M, Hevesi P, et al. Smart construction: remote and adaptable management of construction sites through IoT[J]. IEEE Internet of Things Magazine, 2019, 2(3): 38-45.
- [10] Kanan R, Elhassan O, Bensalem R. An IoT-based autonomous system for workers' safety in construction sites with real-time alarming, monitoring, and positioning strategies[J]. Automation in Construction, 2018, 88: 73-86.
- [11] Rossi A, Vila Y, Lusiani F, et al. Embedded smart sensor device in construction site machinery[J]. Computers in Industry, 2019, 108: 12-20.
- [12] 黄伟钧.SMW工法桩在深厚淤泥质软土地层中的施工优化研究[J].钻探工程,2025,52(5):148-153.
- [13] 毛洁.禹城通裕阳光豪庭基坑工程施工工艺对周边建筑物的影响分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(10):62-65.
- [14] 王玉吉,刘珂,夏小兴,等.LGZ系列全液压多功能桩机及其在多种工法的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(11):88-94.
- [15] 侯庆国.LGZ-25型全液压螺杆桩钻机的研制与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(8):37-40.
- [16] 阮小峰,敢峰,孙俊志.长螺旋钻机在粘性坚硬地层中的应用探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(8):72-76.
- [17] 丁旭亭,苏华,虞利军.长螺旋钻孔压灌桩嵌岩技术的改进与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(11):62-65.
- [18] 湛霞,刘建涛.CFG桩复合地基在郑州逸泉国贸酒店高层建筑中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(9):89-92.
- [19] Xu M, Nie X, Li H, et al. Smart construction sites: A promising approach to improving on-site HSE management performance[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 49: 104007.
- [20] 杨涛,李强,孙东,等.硬质岩滑坡深大抗滑桩一体化旋挖成孔技术及应用[J].钻探工程,2024,51(4):135-144.
- [21] Wu R, Jiang Y, Zhao S, et al. Application and comparative analysis of intelligent monitoring technology for grouted pile construction based on ABAQUS[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 9253. DOI:10.1038/s41598-024-59653-9.
- [22] Wu K, Zhang P, Yuan J, et al. IoT monitoring and evaluating system for the construction quality of foundation pile[J]. Buildings, 2025, 15(15): 2660. DOI:10.3390/buildings15152660.

(编辑 王跃伟)