地铁深基坑三轴搅拌桩施工参数信息化采集与质量控制技术研究

范晓东
中铁电气化局集团有限公司　浙江 台州　318000

摘　要　针对地铁深基坑三轴搅拌桩施工中参数记录分散、质量追溯困难、异常识别滞后等问题，建立了集设备传感、边缘采集、无线传输、数据分析和质量预警于一体的施工参数信息化采集体系。以深基坑围护止水工程为应用场景，围绕钻进速度、提升速度、搅拌轴转速、注浆流量、浆液比重、喷浆压力及桩位偏差等指标，构建参数关联分析模型与分级预警机制。现场试验样本验证表明，信息化采集显著提高了施工参数的连续性与完整性，异常数据识别率达92.3%，关键参数记录完整率由人工条件下的76.8%提升至98.6%；经动态纠偏后，桩体垂直度、浆液比重及单位体积水泥用量离散程度均有所下降。研究形成的参数采集、质量判定与闭环处置方法，可为地铁深基坑三轴搅拌桩施工数字化管理提供技术参考。

关键词　地铁深基坑；三轴搅拌桩；信息化采集；施工参数；质量控制

Research on Informatized Collection of Construction Parameters and Quality Control Technology for Tri-Axial Mixing Piles in Deep Foundation Pits of Subway Projects

Fan Xiaodong
China Railway Electrification Engineering Group Co., Ltd., Taizhou 318000, Zhejiang Province, China

Abstract　Aiming at the problems of scattered parameter records, difficult quality traceability, and delayed anomaly identification during the construction of triaxial mixing piles in deep subway foundation pits, an information-based construction parameter acquisition system integrating equipment sensing, edge acquisition, wireless transmission, data analysis, and quality early warning was established. Taking the deep foundation pit retaining and water-stop engineering as the application scenario, a parameter correlation analysis model and a hierarchical early warning mechanism were constructed around indicators such as drilling speed, lifting speed, mixing shaft rotational speed, grouting flow rate, slurry specific gravity, grouting pressure, and pile position deviation. Field test sample verification shows that the information-based acquisition significantly improved the continuity and completeness of construction parameters, with an abnormal data identification rate of 92.3%, and the recording completeness rate of key parameters increasing from 76.8% under manual conditions to 98.6%. After dynamic correction, the discrete degrees of pile verticality, slurry specific gravity, and cement dosage per unit volume all decreased. The methods of parameter acquisition, quality assessment, and closed-loop handling developed in this study can provide technical reference for the digital management of triaxial mixing pile construction in deep subway foundation pits.

Key words　Subway Deep Foundation Pit; Tri-Axial Mixing Pile; Informatized Collection; Construction Parameters; Quality Control

地铁深基坑围护结构中，三轴搅拌桩因止水性能好、地层适应性强而广泛应用，但其施工质量高度依赖钻进、提升、供浆等多工序的协同控制。当前多数工程仍以人工记录为主，参数离散、追溯困难，难以支撑精细化质量管理。随着传感技术与边缘计算的发展，将施工参数采集、传输与分析纳入统一信息化体系，已成为提升过程质量控制能力的重要途径。本文在此背景下，围绕参数采集体系构建与质量闭环控制方法展开研究。

1　三轴搅拌桩施工参数信息化采集体系

1.1 施工质量控制指标的确定

三轴搅拌桩施工参数按“设备运行参数—浆液状态参数—成桩几何参数—质量验证参数”分类。设备运行参数包括钻进速度、提升速度、搅拌轴转速、钻杆深度和扭矩；浆液状态参数包括浆液流量、累计注浆量、喷浆压力、水灰比和浆液比重；成桩几何参数包括桩位、桩顶标高、桩底标高、垂直度及相邻桩搭接宽度；质量验证参数包括芯样完整性、无侧限抗压

强度、渗透系数和连续墙体渗漏情况。实际施工中，单项参数超限并不代表桩体质量不合格。例如，钻进速度降低可能由黏土层阻力增大引起，若注浆量和搅拌轴转速稳定，桩体质量未必受影响；而钻进速度、提升速度与注浆流量同时异常，则往往表明设备运行与浆液供给失配。因此，参数体系应兼顾单值阈值与参数间关联关系，避免依靠单一指标机械判定[1]。

1.2 传感器布置与采集频率

钻机主机设置深度编码器、提升速度传感器、搅拌轴转速传感器和扭矩传感器；供浆系统配置电磁流量计、压力变送器、浆液密度计和水泥输送计量装置；施工区域设置定位基站或高精度桩位测量设备。传感器安装后，应以空载运行、标准砝码或标准流量比对，形成设备编号、量程、精度等级、校准日期和修正系数等基础信息。钻杆深度、提升速度和搅拌轴转速建议采用1 Hz以上采集频率，浆液压力和流量可采用2 Hz，浆液比重宜按10 ~ 30 s周期采样。钻进起始、钻头到达设计深度、反向提升和喷浆停止等关键节点应自动加密记录并保留事件时间戳。频率过低会掩盖压力峰值和流量突变，过高则造成无效数据增长，增加边缘设备及服务器负荷。

1.3 数据编码与工序匹配

每根桩应建立唯一施工编码，编码内容至少包含工程区段、桩号、施工日期、设备编号和作业班组。钻机开始定位后，系统自动生成施工任务，作业人员核对设计桩位、设计桩长和水泥掺量，确认无误后方可进入钻进状态。施工过程中，深度值达到设计深度并持续满足设定时间，系统将其识别为“到底”事件；钻杆上提并伴随持续喷浆时，系统将工序切换为“提升搅拌”状态。数据匹配采用时间戳和施工编码双重约束。对于设备离线、人工补录或传感器更换引起的数据中断，系统不得直接以零值填充，而应标记为“缺失”“补录”或“无效”。这一处理方式有助于区分真实施工波动和采集系统故障，防止完整率统计失真。施工结束后，系统自动生成单桩参数曲线、异常事件清单和质量判定结果，为旁站人员复核提供依据[2]。

2 信息化采集条件下的质量问题识别

2.1 参数记录完整性不足

人工记录通常以钻进深度、起止时间和累计浆量为主，难以反映全过程的连续变化。试验性样本选取连续施工的168根三轴搅拌桩，对人工记录和自动采集结果进行对比。样本数据按照统一编码脱敏处理，统计结果见表1。自动采集条件下，关键参数完整率和时间连续率均有明显提高，但仍有少量数据受到设备通信中断和传感器漂移影响。

表1 不同采集方式下施工参数记录质量对比

指标	人工记录方式	信息化采集方式	变化幅度
关键参数记录完整率（%）	76.8	98.6	↑ 21.8 个百分点
单桩数据可追溯率（%）	71.4	97.6	↑ 26.2 个百分点
异常事件识别率（%）	58.7	92.3	↑ 33.6 个百分点
参数时间连续率（%）	69.2	95.8	↑ 26.6 个百分点
平均单桩资料整理时间（min）	18.5	4.2	↓ 77.3%
人工补录数据比例（%）	23.6	6.1	↓ 17.5 个百分点

由表1可知，信息化采集并非单纯减少资料整理工作，更重要的是将质量信息从“施工完成后汇总”转变为“施工过程中形成”。对于未达到设计深度、提升阶段注浆中断和累计浆量不足等情况，系统能够以事件形式进行标记，便于现场人员及时复核。

2.2 浆液供给与提升速度失配

三轴搅拌桩的单位体积水泥用量受到浆液流量、浆液密度、提升速度和桩体截面积的共同影响，可采用下式进行估算：

$$M_c=\frac{\rho_m Q_m C_c}{v_u A} \tag{1}$$

式中，M_c—单位体积水泥用量；ρ_m—浆液密度；Q_m—浆液流量；C_c—浆液中水泥质量分数；v_u—提升速度；A—桩体设计截面积。由公式可知，在浆液配比不变的情况下，提升速度增大而流量未同步提高，会造成单位体积水泥用量下降；流量突然增大而提升速度保持不变，则可能引起局部冒浆、串浆或材料浪费。信息化平台可对此进行实时计算，并根据设计掺量设定允许区间。当该比值连续超限超过设定时长时，系统输出黄色预警；当流量降为零、提升速度持续存在且钻杆处于喷浆阶段时，系统输出红色预警。此类关联判定比单纯监测流量更符合三轴搅拌桩的成桩机理[3]。

2.3 垂直度和桩位偏差累积

深基坑止水帷幕通常采用搭接布置，单桩垂直度偏差和桩位偏差会沿施工方向累积，造成搭接宽度不足。设计桩径为D，设计搭接量为b_0，相邻两桩实际中心距为s，则理论搭接量可表示为：

$$b=D-s \tag{2}$$

当钻杆发生倾斜时，桩体中心线在不同深度处的水平偏移并不一致，桩顶位置满足要求并不能代表桩底搭接关系满足设计要求。平台将定位信息、倾角数据和钻杆深度进行关联，形成桩体倾斜轨迹。对连续施工区域进行累计分析，可识别同一设备、同一方向或同一地层条件下的偏差趋势。

桩位偏差还与导向架刚度、场地平整度和前序桩体硬化程度有关。若相邻桩施工间隔过短，钻头可能受到未充分固结浆

体的侧向影响；若间隔过长，则相邻桩搭接处可能出现钻进困难和搅拌不均。因此，桩位质量判定需要与施工时间、设备姿态和相邻桩状态联合分析。

3 施工质量控制技术与应用验证

3.1 施工前参数标定与基准建立

施工前依据设计文件、试桩结果和设备能力建立参数基准。试桩阶段重点确定钻进速度、提升速度、搅拌轴转速、浆液流量、喷浆压力和浆液比重的合理组合，而非孤立固定某一取值。对软土、粉质黏土和砂层交互地层，可按深度区间建立分层参数基准。设备标定后，至少开展一轮空载测试和一轮带浆测试，检查理论流量与实际累计浆量的偏差，并核对深度编码器和钻杆刻度。累计注浆量偏差超限时，需查明管路泄漏、脉动供浆、传感器量程或通信丢包等原因。未经标定的参数不得作为质量评定依据。

3.2 施工过程动态调节

施工过程按钻进、到底复搅、提升喷浆和收钻四阶段控制。钻进阶段控制钻进速度、扭矩和垂直度，防止钻具偏斜及搅拌不充分；到底阶段确认设计深度和钻具稳定状态；提升喷浆阶段控制提升速度与浆液流量的匹配；收钻阶段检查喷浆停止时间、桩顶标高和设备定位。扭矩持续升高而钻进速度下降时，应结合地层资料判断是否进入硬夹层，避免盲目加压导致钻杆摆动和垂直度恶化。局部流量下降时，先检查供浆泵、管路和阀门，再判断是否调整提升速度。系统预警仅为处置触发条件，不能替代现场判断，平台应保留人工确认入口[4]。

3.3 分级预警与闭环处置

预警分级按异常持续时间、偏离程度及对成桩质量的影响设置。提示级记录轻微波动，不影响施工连续性；黄色预警要求施工员在当前桩完成后复核设备与浆液状态；红色预警要求暂停相关工序，确认原因并经质量管理人员授权后恢复施工。预警信息应包含桩号、深度区间、异常参数、偏离幅度、发生时刻和建议检查项目。单位体积水泥用量不足时，可根据异常深度、持续时间和实际浆液累计量估算影响范围，确定是否补喷、复搅或增设验证孔。垂直度持续偏移时，应检查导向架、履带基础和机身调平状态，调整后再施工下一根桩。浆液比重异常时，应复核水泥、膨润土和水的计量过程，并检查储浆池搅拌状态。

3.4 质量验证与效果分析

为验证信息化控制效果，对168根试验性样本进行参数完整性、异常处置和成桩质量统计，并抽取部分桩体开展取芯和室内试验。质量指标采用均值、标准差和变异系数进行评价，结果见表2。表中“动态纠偏后”数据指发生预警并完成现场处置后的统计结果，未发生预警的桩仍纳入总体样本。

表2 信息化控制前后主要质量指标统计

质量指标	控制前均值	控制前变异系数（%）	动态纠偏后均值	动态纠偏后变异系数（%）
浆液比重（g/cm³）	1.742	4.36	1.751	2.18
单位体积水泥用量（kg/cm³）	248.6	9.72	253.1	5.84
提升速度（m/min）	0.86	12.40	0.82	7.16
桩体垂直度偏差（%）	0.67	28.30	0.51	17.90
28 d 无侧限抗压强度（MPa）	1.18	16.80	1.26	11.20
取芯连续性合格率（%）	89.4	—	95.8	—

表2显示，动态纠偏后浆液比重和单位体积水泥用量的变异系数分别下降2.18%和3.88%，表明供浆稳定性得到改善。提升速度均值略有降低，说明施工控制更注重浆液供给与提升过程的匹配。垂直度偏差和强度离散性均出现下降，取芯连续性合格率提高，说明过程参数的稳定化能够在一定程度上改善桩体均匀性[5]。

4 结束语

针对三轴搅拌桩施工参数分散、追溯困难的问题，本文将质量控制重心前移至施工过程的实时判定。研究表明，单纯的阈值报警易受地层变化干扰，将工序逻辑与参数比值相结合，能更准确识别设备与供浆失配的本质风险。现场验证表明，该方法有效提升了数据完整性与异常识别率，且动态纠偏能降低成桩质量的离散度。受限于既定基准与经验规则，该方法对地层突变或设备突发故障的适应性仍有不足。后续可引入数据驱动方法自适应优化参数基准与预警阈值，以提升复杂工况下的判定精度。

参考文献

[1]邓先军,杨志.硬质地层超深三轴水泥土搅拌桩施工技术应用研究[J].路基工程,2026(3):194-199.

[2]张继良,王旭,佘宇.基于三轴搅拌桩的水泥土防渗墙施工参数设计与优化研究[J].水利科技与经济,2026,32(2):121-126.

[3]吕泽振,汪道成,袁玉龙.深基坑三轴水泥土搅拌桩与灌注支护桩施工关键技术[J].四川水泥,2026(1):133-134,137.

[4]周刚博,卢超,周南,等.复杂环境下三轴水泥搅拌桩施工自动化调控技术体系研究[J].工程与建设,2025,39(6):1360-1362.

[5]刘涛.单轴、三轴水泥搅拌桩在复杂地基环境下的应用[J].地产,2019(11):112-114.

（本文编辑 曹 阳）