

基于物联网的水泥搅拌桩质量控制研究

毛理华¹ 毛德华²

1 浙江数智交院科技股份有限公司

2 浙江交工金筑交通建设有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i2.18947

[摘要] 本文基于物联网技术架构,从感知层、网络层、应用层三个维度,构建水泥搅拌桩质量控制系统,重点研究桩长、桩径、注浆量、搅拌转速等关键质量参数的实时监测与精准调控方法。通过工程实例验证表明,该系统可有效提升施工参数监测精度,降低人为干预误差,实现质量问题的提前预警与及时处置,显著提高水泥搅拌桩施工质量合格率。

[关键词] 物联网; 水泥搅拌桩; 质量控制; 实时监测; 精准调控

中图分类号: U469.6+5 文献标识码: A

Research on Quality Control of Cement Mixing Piles Based on Internet of Things

Lihua Mao¹ Dehua Mao²

1 Zhejiang Digital Intelligent Transportation Engineering Co., Ltd.

2 Zhejiang Jiaogong Jinzhu Transportation Construction Co., Ltd.

[Abstract] This paper, based on the Internet of Things (IoT) technology architecture, constructs a quality control system for cement mixing piles from three dimensions: perception layer, network layer, and application layer. It focuses on the real-time monitoring and precise regulation methods of key quality parameters such as pile length, pile diameter, grouting volume, and stirring speed. Through the verification of engineering examples, it is shown that this system can effectively improve the monitoring accuracy of construction parameters, reduce human intervention errors, achieve early warning and timely handling of quality issues, and significantly increase the qualified rate of cement mixing pile construction quality.

[Key words] Internet of Things; Cement Mixing Piles; Quality Control; Real-time Monitoring; Precise Regulation

引言

随着我国交通、市政、水利等基础设施建设的快速发展,软土地基处理工程日益增多。水泥搅拌桩通过将水泥与软土强制搅拌形成复合地基,有效改善软土的物理力学性能,提高地基承载力,因其施工便捷、成本可控、适用性广等特点,被广泛应用于软土地基处理工程中。然而,水泥搅拌桩施工过程具有隐蔽性强、影响因素多的特点,施工过程中的桩长不足、桩径偏差、注浆量不均匀、搅拌不充分等问题,易导致桩体强度不足、承载力不达标,进而引发工程沉降、结构失稳等安全隐患。

1 基于物联网的水泥搅拌桩质量控制原理与系统架构

1.1 质量控制核心原理

水泥搅拌桩的质量主要取决于桩体的完整性、均匀性与强度,其核心影响因素包括桩长、桩径、注浆量、搅拌转速、钻进与提升速度等施工参数^[1]。基于物联网的水泥搅拌桩质量控制

核心原理是:通过各类传感器实时感知施工过程中的关键参数,利用无线通信技术将参数数据传输至管控平台,平台通过数据处理与分析,判断施工参数是否符合设计要求;若出现参数异常,及时发出预警信号,并通过控制模块调节施工设备参数,实现施工过程的闭环管控,确保桩体质量符合设计标准。

与传统质量控制模式相比,物联网技术实现了三个核心转变:一是从“人工感知”向“智能感知”转变,通过传感器实现参数的自动化、高精度采集;二是从“离线记录”向“实时传输”转变,确保数据的时效性,为及时调控提供支撑;三是从“经验决策”向“数据驱动决策”转变,通过大数据分析实现参数异常的精准识别与智能调控^[2]。

1.2 系统整体架构设计

1.2.1 感知层

感知层作为系统的数据采集核心,承担着实时采集水泥搅拌桩施工关键质量参数的重任。根据施工质量控制需求,它部署

了多种传感器: 桩长与钻进深度传感器用激光位移传感器装在搅拌钻杆顶部, 监测位移换算相关数据; 桩径传感器以超声波传感器沿搅拌叶片周向部署, 测传播时间算桩径; 注浆量传感器靠电磁流量传感器装在注浆管道上, 累计计算注浆总量; 搅拌转速传感器采用霍尔传感器装在钻杆驱动电机轴, 间接获取转速; 垂直度传感器用倾角传感器装在钻杆顶部, 监测倾斜角度判断垂直度; 水泥浆浓度传感器以密度传感器装在水泥浆搅拌桶出口处, 确保胶结强度。为提升数据采集可靠性, 感知层采用“多传感器冗余部署+数据预处理”方案, 关键参数多传感器同采, 经数据融合消除误差, 还在传感器节点内置预处理模块, 减少无效数据传输与网络负载。

1.2.2网络层

网络层作为系统的通信枢纽, 承担着将感知层采集的参数数据实时、可靠传输至应用层的关键任务。鉴于水泥搅拌桩施工场地开阔、信号遮挡少且施工设备移动性强的特点, 网络层采用“LoRa+5G”双模通信方案。其中, LoRa无线通信技术用于短距离、低速率的传感器数据传输, 其传输距离远、功耗低、抗干扰能力强, 能满足施工场地内传感器节点与本地网关的通信需求; 5G通信技术则用于长距离、高速率的数据传输, 如实时视频监控、大量历史数据上传, 凭借高带宽、低时延特性实现本地网关与远程管控平台的数据交互。此外, 网络层部署本地边缘计算网关, 可进行数据本地缓存、实时分析与边缘决策, 远程网络中断时能独立完成数据存储与异常预警, 还能初步分析数据, 减少传输量, 提升系统响应速度。

1.2.3应用层

应用层作为系统的核心决策与管控平台, 基于云计算构建, 承担数据深度分析、质量评估等重任, 包含六大功能模块。数据管理模块采用分布式数据库, 能存储海量监测数据, 支持多维度查询。实时监测模块通过可视化界面展示施工参数动态变化曲线, 可实时追踪单桩参数。质量评估模块依据设计标准建立指标体系, 用模糊综合评价法动态评估桩体质量。异常预警模块设置多级预警阈值, 参数超限时会通过多种方式及时预警, 并明确位置与异常类型。精准调控模块根据评估和预警信息生成调控指令, 传输至施工设备控制系统, 实现参数自动调节, 严重异常时触发停机指令。报表生成模块可自动生成施工质量报告等, 为工程验收与质量追溯提供有力依据。

2 关键质量参数的监测与调控技术

2.1桩长与桩径的精准监测技术

桩长与桩径是决定水泥搅拌桩承载能力的核心几何参数, 其监测精度直接影响桩体质量。针对传统桩长测量依赖人工标记、误差大的问题, 本文采用激光位移传感器结合钻杆位移补偿算法实现桩长的精准监测^[4]。激光位移传感器实时采集钻杆钻进与提升的位移量, 由于钻杆在钻进过程中可能存在弹性变形, 需通过位移补偿算法消除变形误差。补偿算法基于钻杆材料的弹性模量与钻进压力, 建立位移变形模型, 对测量位移进行修正, 确保桩长测量精度误差控制在±5cm以内。

桩径监测采用多通道超声波传感器阵列技术。沿搅拌叶片周向均匀部署4个超声波传感器, 传感器发射的超声波经桩壁反射后被接收, 根据超声波传播速度与传播时间计算传感器与桩壁的距离, 进而得到桩径尺寸。为消除施工过程中泥浆、气泡对超声波传播的影响, 采用信号增强算法对超声波信号进行处理, 提升信号识别精度; 通过多传感器数据融合, 取4个传感器测量结果的平均值作为最终桩径数据, 降低单点测量误差, 确保桩径监测精度误差控制在±10mm以内。当监测到桩径小于设计值时, 系统自动发出预警, 并通过调控搅拌钻杆的旋转速度与提升速度, 扩大搅拌范围, 确保桩径符合设计要求。

2.2注浆量与搅拌转速的实时调控技术

注浆量不足或不均匀会导致桩体水泥含量不足, 强度降低; 搅拌转速过低则会导致水泥与软土搅拌不充分, 影响桩体均匀性。实现注浆量与搅拌转速的实时调控是保证桩体质量的关键。

注浆量调控采用“流量闭环控制”方案。电磁流量传感器实时监测注浆管道的瞬时流量, 将数据传输至应用层调控模块, 调控模块将实际流量与设计流量进行对比, 计算流量偏差; 基于PID控制算法, 生成注浆泵电机转速调节指令, 通过调节电机转速改变注浆流量, 确保实际注浆量与设计注浆量的偏差控制在±3%以内。系统根据桩长与桩径实时数据, 动态计算单桩所需的总注浆量, 当累计注浆量达到设计值时, 自动触发注浆泵停机指令, 避免注浆过量或不足。

搅拌转速调控采用“转速-负载自适应控制”方案。霍尔传感器实时监测搅拌钻杆的转速, 同时通过电机电流传感器监测钻杆驱动电机的负载电流(负载电流与搅拌阻力正相关)。当监测到搅拌阻力增大(电机电流升高)时, 系统自动提高搅拌转速, 增强搅拌力度, 确保水泥与软土充分混合; 当搅拌阻力减小(电机电流降低)时, 适当降低搅拌转速, 节约能耗。搅拌转速的调控范围根据软土的物理力学性质(如含水量、孔隙比)预设, 确保转速调节符合施工工艺要求。通过注浆量与搅拌转速的协同调控, 实现桩体水泥含量均匀、搅拌充分, 提升桩体强度。

2.3多参数协同控制策略

水泥搅拌桩施工过程中, 各质量参数并非独立存在, 而是相互影响、相互关联。例如, 桩长增加会导致注浆量需求增加, 搅拌转速需根据钻进深度与软土性质动态调整。因此, 需采用多参数协同控制策略, 实现各参数的整体优化^[3]。

本文基于模糊控制理论构建多参数协同控制模型。以桩长、桩径、注浆量、搅拌转速、垂直度为输入变量, 以桩体质量评估结果为输出变量, 建立模糊规则库。系统根据实时监测的各参数数据, 通过模糊推理判断当前施工状态, 生成协同调控指令。例如, 当监测到桩径偏小且注浆量不足时, 系统同时发出“提高注浆泵转速增加注浆量”与“降低钻杆提升速度、提高搅拌转速扩大桩径”的调控指令, 确保各参数协同优化, 提升桩体整体质量。

3 系统实现与工程应用验证

3.1系统开发与实现

基于上述架构设计与技术方案,开发基于物联网的水泥搅拌桩质量控制系统。硬件方面,选用激光位移传感器(测量范围0-50m,精度±0.1mm)、超声波传感器(测量范围0.5-5m,精度±1mm)、电磁流量传感器(测量范围0-100L/min,精度±0.5%)等核心传感器,采用LoRa网关(通信距离≤3km)与5G工业模组实现数据传输;软件方面,基于Python语言开发应用层管控平台,采用Django框架构建Web可视化界面,使用MySQL数据库存储监测数据,集成数据处理、实时监测、异常预警、精准调控等功能模块。系统支持电脑端、手机端多终端访问,方便管理人员实时掌握施工质量状况。

3.2 工程应用验证

为验证系统的实用性与有效性,将该系统应用于某高速公路项目的水泥搅拌桩施工质量管控中。该项目全长44.005公里,桥梁占比高,主线及联络线共设置桥梁约35.840公里/33座,其中主线桥梁占比约78.53%,联络线桥梁占比约85.11%,软土地基路段水泥搅拌桩用量大,对桩体施工质量要求严苛。项目主线采用双向六车道高速公路标准,设计速度120公里/小时,整体式路基宽度34.5米;联络线采用双向六车道高速公路标准,设计速度100公里/小时,整体式路基宽度33.5米,桥涵设计荷载等级为公路-I级。本次选取项目主线K12+700-K13+000段的水泥搅拌桩施工区域作为验证场地,该区域桩长设计值为10m,桩径设计值为500mm,设计值喷浆流量不少于30L/min,设计值水泥用量为55kg/m,搅拌转速设计值为55r/min。试验选取140根水泥搅拌桩采用本文开发的物联网质量控制系统进行施工管控(试验组),另外140根采用传统人工监测模式进行施工管控(对照组)。

3.2.1 监测精度验证

依据《公路工程质量检验评定标准》,对两组桩体质量进行全面检测,检测指标严格对照项目设计要求(桩径500mm、桩长10m、28天无侧限抗压强度不小于1.0MPa、单桩竖向抗压承载力不小于190KN)。钻芯取样结果显示,试验组桩体桩径、桩长均符合设计尺寸,水泥土搅拌均匀、芯样完整连续,28天无侧限抗压强度平均值达1.8MPa,远超设计最小值1.0MPa;对照组有23根桩存在桩径偏差、搅拌不均等缺陷,28天无侧限抗压强度平均值为1.2MPa,虽满足设计最低要求,但整体质量稳定性较差。静载试验中,试验组单桩竖向抗压承载力平均值为260KN,远高于190KN的设计要求,合格率达97.1%;对照组单桩竖向抗压承载力平均值为200KN,仅略高于设计值,且有18根桩承载力未达到190KN的最低标准,合格率仅73.6%。低应变检测结果显示,试验组I类桩占比92%,对照组仅68%。综合各项检测指标,物联网质量控制系统在保障桩体尺寸精度、提升搅拌均匀性及满足强度、承载力设计要求方面效果显著,监测精度与质量管控能力优于

传统人工监测模式。

3.2.2 质量合格率验证

结合施工组织计划统计分析,试验组施工管控成效显著。平均每根桩施工管控时间较对照组缩短22%,280根桩累计节省约126小时,保障整体进度;现场管控人员减少35%,降低人工成本。异常处置上,试验组发出48次参数异常预警,3分钟内响应,未引发质量问题;对照组发现25起质量问题,16起致桩体报废,损失约18.6万元。且试验组桩体后续施工无返工整改,为高速公路水泥搅拌桩管控提供有效借鉴。

3.2.3 管控效率验证

对两组施工过程的管控效率进行统计分析。结果表明,试验组平均每根桩的施工管控时间较对照组缩短了20%,管理人员数量减少了30%;试验组共发出异常预警32次,均及时得到处置,未引发质量问题;对照组共发现质量问题18起,其中12起因发现不及时导致桩体报废,需重新施工。可见,基于物联网的质量控制系统提升了施工管控效率,降低了人工成本,减少了质量问题造成的经济损失。

4 结论

综上所述,基于物联网的水泥搅拌桩质量控制系统,通过感知层、网络层与应用层的协同运作,实现了对桩长、桩径、注浆量等关键参数的实时精准监测与调控。工程应用验证表明,该系统显著提升了施工质量合格率,缩短了施工管控时间,降低了人工成本与经济损失,有效保障了工程进度与结构安全。此研究成果不仅为软土地基处理工程提供了智能化管控新思路,也为类似工程的质量提升与技术创新提供了宝贵经验与参考。

【参考文献】

- [1]陈祎,王骁帆.水泥搅拌桩施工信息化管控技术研究[J].公路,2024,69(10):37-44.
- [2]杜峰,王一霏.物联网技术在水泥搅拌桩施工质量管控中的应用[J].公路,2019,64(7):68-73.
- [3]张振飞.水泥搅拌桩软基处理中的物联网智能监测与控制系统研究[J/OL].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025(7)[2025-06-27].
- [4]王雅宁,景泽涛,李保民.智能化水泥搅拌桩监测系统在软基处理中的应用实测[J].现代信息科技,2023,7(15):166-173.

作者简介:

毛理华(1981--),男,汉族,湖南省双峰县人,本科,高级工程师(副高),研究方向:高速公路建设管理。

毛德华(1985--),男,汉族,湖南省双峰县,本科,工程师(现有职称),研究方向:公路工程。