

水利水电工程智能灌浆控制技术与控制系统分析

刘金鹏

中国水利水电第十工程局有限公司 四川成都 611830

摘要: 水利水电工程是国家基础设施建设的关键,其施工质量与效率对国民经济稳定发展至关重要。灌浆施工技术作为防渗核心手段,传统方式却存在效率低、质量控制难和人为干扰多等问题。随着智能化技术发展,智能灌浆控制技术与控制系统出现。本研究深入剖析发现,该技术与系统由传感器技术、控制算法、执行机构和数据处理系统构成,具有自动化程度高、实时监测反馈快、施工质量可控性强等特点。实际应用表明,其能显著提升灌浆质量和施工效率,降低成本与风险。本文研究为水利水电工程灌浆施工技术创新提供理论支持,给出优化策略,助力推动该领域智能化发展。

关键词: 水利水电工程; 智能灌浆; 控制技术; 控制系统; 优化策略

引言

水利水电工程在国家发展中意义重大,于防洪、发电、灌溉、供水等领域作用关键。近年来,国家愈发重视水利水电工程建设,《“十四五”水安全保障规划》指明要加快重大水利工程建设,提升智能化水平,保障水利基础设施安全可靠,为行业智能化发展提供方向。在水利水电工程建设里,灌浆施工技术是防渗处理的核心,其质量关乎工程安全与耐久性。但传统灌浆技术存在效率低、质量难控等弊端,无法满足现代工程需求。智能化技术的发展带来转机,智能灌浆控制技术与控制系统实现了灌浆自动化、智能化控制。深入研究该技术与系统,对推动水利水电工程建设进步,有着重要的现实意义。

一、水利水电工程灌浆施工技术

1. 灌浆施工技术原理

(1) 浆液填充机制

灌浆施工技术的核心在于充分利用浆液的流动性,在外部压力作用下,将浆液注入地层的孔隙、裂隙或空洞之中^[1]。浆液凭借自身的流动性克服地层的阻力,填充这些空间,待浆液凝固后,便与周围的土体或岩体形成一个紧密的整体,从而有效提高地层的密实度和防渗性能。以土石坝的防渗处理为例,通过向坝体或坝基的孔隙注入水泥浆,能够形成一道坚实的防渗帷幕,有效阻止水分的渗透,为大坝的安全稳定运行提供可靠保障。

作者简介: 刘金鹏(1984-)男,汉族,籍贯:甘肃武威人,大学本科,高级职称,研究方向为水利水电施工管理。

(2) 化学作用与加固效果

浆液不仅具有物理填充作用,还会与地层中的物质发生复杂的化学反应。以化学灌浆为例,某些特殊的浆液在注入地层后,会与土颗粒表面的离子发生交换反应,进而形成新的化合物,显著增强土体的强度和稳定性。这种化学作用进一步提升了灌浆的加固效果,使灌浆后的地层能够更好地承受工程荷载,有效提高了工程的耐久性。

2. 传统灌浆施工技术的不足

(1) 浆液配比误差

在传统灌浆施工过程中,浆液配比主要依赖人工操作。操作人员依据经验和设计要求,将水泥、水、外加剂等按照一定比例进行混合。然而,由于人为因素的影响,很难保证每次配制的浆液配比完全一致。在搅拌过程中,搅拌时间和速度的细微差异,都可能导致浆液各成分混合不均匀,进而影响浆液的性能,如凝结时间、强度等,最终对灌浆质量产生不利影响^[2]。

(2) 灌浆压力控制难题

灌浆压力是影响灌浆效果的关键因素之一。在传统灌浆施工中,灌浆压力主要通过人工观察压力表来进行调节。但在实际施工中,地质条件复杂多变,地层的渗透性和阻力不断变化,人工调节压力往往无法及时适应这些动态变化。当地层条件突然发生改变时,人工调节压力的滞后性可能导致灌浆不足或过度,不仅影响工程质量,还会增加工程隐患,表1所示。

(3) 施工效率低下

传统灌浆施工各个环节,如浆液配制、输送、灌浆等,都需要大量的人工操作。人工操作不仅速度较慢,

表1 传统灌浆工艺关键参数波动范围

参数	波动范围	离散系数
灌浆压力	± 0.5MPa	18%
浆液水灰比	0.5: 1~1.2: 1	15.60%
渗透半径误差	± 30%	—

而且在施工过程中需要频繁进行参数调整和设备维护,这严重制约了施工进度。此外,人工操作的劳动强度较大,长时间作业容易使操作人员产生疲劳,进一步影响施工效率和质量,增加工程成本和工期风险。

二、水利水电工程智能灌浆控制技术分析

1. 智能灌浆控制技术的构成

(1) 传感器技术

传感器技术是智能灌浆控制技术的基础,主要包括压力传感器和流量传感器。压力传感器基于压阻或压电效应工作,是监测灌浆压力的关键设备。受压力时,传感器内部电阻或电荷变化,通过测量变化获取灌浆压力数据^[3]。实际应用中安装在灌浆管道上,实时监测并传输数据给控制算法,为精确控制压力提供依据。白鹤滩水电站采用高精度压力传感器,实现灌浆压力实时精准监测,保障了灌浆质量。流量传感器用于监测浆液流量,保证灌浆量准确。常见的电磁流量计利用电磁感应原理,通过测量感应电动势计算流量。涡轮流量计通过测量涡轮转速确定流量。它们实时准确测量流量,为控制算法提供关键数据,确保灌浆量符合设计要求。

(2) 控制算法

控制算法是智能灌浆控制的核心技术之一。PID控制算法是智能灌浆控制常用的经典算法,通过比例(P)、积分(I)、微分(D)环节计算和调整传感器反馈的灌浆参数。在压力控制中,实际压力与设定压力有偏差时,PID算法根据偏差大小和趋势调整灌浆泵转速或调节阀开度,使压力恢复设定值,保证压力稳定。某中型水库大坝灌浆工程应用该算法,有效控制压力波动,提高了灌浆质量。

随着人工智能发展,模糊控制、神经网络控制等智能算法也应用于智能灌浆控制。模糊控制算法处理不确定性和模糊性问题,根据地质条件、灌浆压力、流量等因素模糊推理得出控制策略,提高控制灵活性和适应性^[4]。神经网络控制算法有自学习和自适应能力,通过学习历史数据掌握灌浆规律,自动调整控制参数,实现更精准控制。小湾水电站应用神经网络控制算法,提升了灌浆施工智能化水平。

(3) 执行机构

执行机构负责将控制算法的指令转化为实际动作,

主要包括灌浆泵和调节阀。灌浆泵是主要灌浆设备,智能灌浆控制技术采用变频调速技术自动化控制灌浆泵,根据控制算法指令调整电机转速,改变输出流量和压力,快速准确响应指令,提高灌浆精度和效率。向家坝水电站采用自动化控制的灌浆泵,实现高效精准控制,缩短施工工期。调节阀安装在灌浆管道上,由电动或气动执行器驱动,根据控制算法指令精确调节阀门开度,控制浆液流量和压力。调节阀与灌浆泵配合,适应不同灌浆工况,保证施工顺利。锦屏一级水电站优化调节阀控制策略,提高了施工稳定性和可靠性。

(4) 数据处理系统

数据处理系统是智能灌浆控制技术的重要组成部分。该系统用数据库技术存储管理传感器采集的灌浆数据,便于查询、检索和分析,为施工质量评估和工艺改进提供数据支持。三峡水电站完善的数据存储与管理系统,有效管理大量灌浆数据,为工程长期运行维护提供依据。数据分析是数据处理系统重要功能,通过分析压力、流量等数据发现施工异常并调整。系统还能生成施工报告,包含灌浆参数统计、质量评估等内容,为工程管理提供决策依据。溪洛渡水电站利用该功能及时解决灌浆施工问题,提高工程管理水平。

2. 智能灌浆控制技术的特点

(1) 高度自动化

智能灌浆控制技术实现从浆液配制、输送到灌浆全自动化,操作人员在人机交互界面设置参数后,系统自动完成灌浆,减少人工干预,提高施工效率,避免人为因素影响质量,降低施工成本和工期风险。

(2) 实时监测与快速反馈

通过传感器实时监测关键参数,系统迅速获取数据并传输给控制算法,算法快速计算调整策略并发送指令给执行机构,能在短时间内纠正施工偏差,确保灌浆质量稳定可靠,提高工程安全性和可靠性。

(3) 质量可控性强

智能灌浆控制技术精确控制灌浆参数,保证浆液均匀密实。施工中实时监测质量并根据反馈调整参数,提高质量可控性。数据处理系统全程记录分析施工数据,为质量追溯和评估提供支持,有助于提升工程和管理水平。

3. 智能灌浆控制技术的实践应用

智能灌浆控制技术在工程实践中已得到广泛应用,并取得显著成效。以某大型水电站坝基防渗处理为例,施工前,技术人员依据地质勘察和工程设计要求,在人机交互界面精准设置灌浆参数。施工过程中,传感器实

时监测压力、流量等参数并传输给控制算法^[5]。一旦实际压力与设定压力出现偏差，算法立即调整灌浆泵转速和调节阀开度，使压力恢复设定值，如表2所示。

表2 某水电站灌浆质量对比

指标	传统工艺	智能工艺	提升幅度
合格率	83.50%	98.70%	15.20%
施工效率	100m/天	137m/天	37%
成本	220元/m	186元/m	-15.50%

该水电站应用智能灌浆控制技术后，坝基防渗取得良好效果。浆液配比准确性得到极大提升，压力和流量波动得到有效控制，灌浆质量显著提高。施工效率大幅提升，原本较长的灌浆工期缩短了20%。通过对施工数据的深入分析，还总结出不同地质条件下的最佳灌浆参数，为后续工程提供了宝贵经验，充分体现了智能灌浆控制技术在实际应用中的优势。

三、水利水电工程智能灌浆控制系统分析

1. 控制系统的架构与功能

数据采集模块由多种传感器组成，负责实时监测浆液流量、压力、密度、温度等参数，将物理量转化为电信号，经信号调理电路处理后传输给控制模块，其准确性和可靠性是智能灌浆控制的基础。控制模块是系统核心，常用微处理器或PLC实现，根据预设策略和采集数据运行控制算法，计算控制指令并发送给执行模块，能快速处理数据，实现复杂控制逻辑，确保灌浆精确控制。执行模块由灌浆泵、调节阀、搅拌机等设备组成，执行控制模块指令，调整灌浆泵输出、调节阀开度和保证浆液均匀性，其响应速度和控制精度影响灌浆施工质量和效率。人机交互界面为用户提供直观操作和数据分析功能，可设置参数、监控施工、查看历史数据，界面图形化设计，以图表、曲线展示参数变化，还提供报警功能，提高系统易用性和安全性。

2. 控制系统的优化策略

为提高数据采集准确性和可靠性，应加强传感器技术研发，采用新型材料和工艺，减少误差和漂移，研发高精度压力传感器，精度可达 $\pm 0.1\%$ ，为智能灌浆控制提供可靠数据。拓展传感器应用范围，增加对浆液黏度、含气量等参数监测，实现对灌浆过程全面监测，提供更丰富数据^[6]。融合多种控制算法可提高系统自适应和鲁棒性，将PID控制与模糊控制结合，根据工况自动切换算法，实现更精准控制，在地质复杂区域采用模糊控制算法能更好适应地层变化，提高灌浆质量。利用机器学习技术分析学习灌浆施工数据，挖掘规律特征，建立模型预测灌浆参数，优化控制算法，提高系统控制性能，

实现更智能化灌浆控制。

制定执行机构定期维护计划，包括检查、清洁、润滑、调试等工作，定期检查灌浆泵密封、调节阀磨损等情况，及时更换损坏零部件，建立维护档案，为设备管理提供依据。引入故障诊断、预测性维护等智能维护技术，实时监测分析执行机构运行数据，提前预测故障隐患，快速定位故障原因，提高维修效率，降低设备故障率。根据用户习惯和需求优化人机交互界面设计，简化操作流程，采用人性化设计理念和触摸式交互设计，提高可读性和可操作性，减少操作失误。增加数据分析功能，提供3D模型展示、数据对比分析等可视化方式，深入分析施工数据，为用户提供有价值信息，帮助科学决策。

结论

智能灌浆控制技术与控制系统在水利水电工程中成效显著，有力弥补了传统灌浆技术的缺陷。凭借实时监测和智能调控，保障了灌浆质量，大幅提升施工效率，降低成本与安全风险，筑牢工程长期安全运行的根基。本文深入剖析其构成、特点和应用，提出加强传感器研发、优化控制算法、完善执行机构维护、改进人机交互界面等优化策略。随着智能化技术不断发展，该技术与系统将在水利水电工程中发挥更关键的作用。持续推进技术研究创新，优化系统性能，提升其复杂环境适应性与可靠性，对水利水电工程高质量发展意义非凡。推进标准化、规范化建设，有助于其广泛应用，为水利水电事业发展增添新动力。

参考文献

- [1] 张蕾. 水利水电工程智能灌浆控制技术与控制系统分析[J]. 科学技术创新, 2024(15): 123-126
- [2] 闫占伟. 水利水电工程智能灌浆控制分析[J]. 中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2024(11): 101-104
- [3] 丁健睿. 水利水电工程智能化控制技术研究[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2024(2): 0069-0072
- [4] 于春宇. 智能监控技术在水利水电工程施工安全控制中的应用研究[J]. 中国科技期刊数据库 工业A, 2024(10): 0140-0143
- [5] 刘全. 水利水电工程智能灌浆控制技术与控制系统研究[J]. 工程技术研究, 2022, 7(17): 60-62
- [6] 何际宇. 试析水利水电工程智能灌浆控制技术与控制系统[J]. 中国科技期刊数据库 工业A, 2023(3): 42-45