

水利工程智能灌浆技术深度剖析与创新应用研究

赵曙繁，曹学锐

云南省水利水电工程有限公司，云南 昆明 650000

DOI:10.61369/WCEST.2025080011

摘 要： 水利工程智能灌浆作为水利数字化的关键一环，融合传感器、人工智能、大数据与自动控制，使灌浆过程得以实时监测并动态调整。本文梳理其理论、系统架构与核心算法，结合东庄水利枢纽、杨房沟水电站等案例，量化评估其在质量、效率与安全上的提升数据显示，为行业升级提供理论与工程参照。

关 键 词： 智能灌浆；水利工程；人工智能；自动化控制；数字孪生

In-depth Analysis and Innovative Application Research on Intelligent Grouting Technology in Water Conservancy Projects

Zhao Shufan, Cao Xuerui

Yunnan Water Resources and Hydropower Engineering Co., Ltd. Kunming, Yunnan 650000

Abstract： As a critical component of water conservancy digitalization, intelligent grouting in hydraulic engineering integrates sensors, artificial intelligence, big data, and automatic control, enabling real-time monitoring and dynamic adjustment of the grouting process. This paper reviews its theoretical foundations, system architecture, and core algorithms, while quantitatively evaluating improvements in quality, efficiency, and safety through case studies such as the Dongzhuang Water Conservancy Project and the Yangfanggou Hydropower Station. The data provides theoretical and engineering references for industry advancement.

Keywords： intelligent grouting; hydraulic engineering; artificial intelligence; automated control; digital twin

引言

灌浆技术的可靠性直接决定了大坝、隧洞等水工建筑物能否长期保持稳定，传统灌浆中约35%的质量缺陷源于人为操作；在岩溶发育、宽大裂隙等复杂地层，这一比例甚至超过一半。智能灌浆技术借助多参数传感器、物联网与人工智能算法，形成“感知-决策-执行”的闭环控制。

本文梳理近年国内外智能灌浆的研究与工程案例，围绕理论、系统、关键技术、应用及前景展开系统剖析，为行业升级提供参考。

一、智能灌浆技术的理论基础与体系架构

（一）技术原理与核心算法

智能灌浆技术把闭环控制作为理论支点：系统一边感知现场状态，一边即时分析并给出决策，再精确驱动执行端，形成循环。其关键原理可概括为以下几种方法：

1. 瑞士学者隆巴迪提出的GIN法，即灌浆强度值法，把控制目标锁定在压力P与注入体积V的乘积上：只要让这一乘积始终低于预设临界值，就能在浆液充分灌入岩体裂隙的同时，把因压力过高诱发岩体劈裂的风险压到最低，其关系式为：

$$GIN=P \times V \leq K$$

其中，K为根据岩体特性确定的常数。莱索托波哈利大坝工

程将该方法与智能灌浆系统联合部署，在复杂地质条件下实现了灌浆参数的精准控制。

2. 三峡建设管理有限公司等机构提出的三区五阶段P-Q-C-t联动智能控制模型，是整套系统的技术核心。它将灌浆全程拆成快速升压、稳定灌浆和灌浆风险三个区，再细分为A-E五个阶段，通过实时联动监测压力P、注入率Q、浆液密度C及历时t，实现一体化智能识别与调控各阶段典型特征见表1。

表1 三区五阶段灌浆控制模型特征

阶段	压力特征	注入率特征	控制目标	智能调控策略
A阶段（充填）	无压或低压	无回浆或低注入率	浆液填充钻孔管路	低压慢灌，确保充分填充
B阶段（升压）	0.1Pd以上（Pd为设计压力）	达到最大允许值Qmax	压力稳步上升	匀速升压，监测注入率变化

C阶段 (稳定灌浆)	逐渐上升至设计压力 Pd	小于 Qmax 但高于结束标准	维持设计压力稳定灌浆	压力-注入率联动控制
D阶段 (屏浆)	达到并保持设计压力 Pd	$Q_{end}-\beta$ 范围 (β 为调整系数)	确保密实填充	压力维稳, 持续时间优化
E阶段 (结束)	保持 Pd 直至结束	$\leq Q_{end}$ (结束注入率)	达到结束标准	自动判断并执行停灌

3. 人工智能预测算法是智能灌浆技术的前沿方向。借助随机森林等机器学习模型, 可对裂隙岩体的灌浆过程进行预测; 配合体素化技术, 将裂隙网络离散为体素单元, 把浆液扩散问题转化为单元灌注概率的估计。

(二) 系统架构与功能模块

智能灌浆系统采用分层架构, 由数据采集、传输、处理和应用四层组成, 其结构见图1。

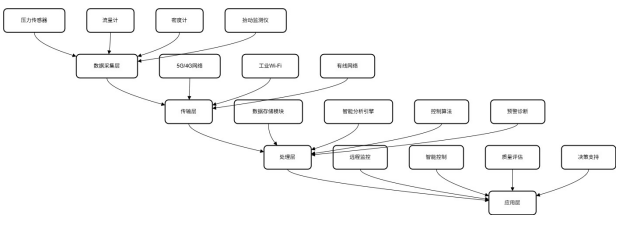


图1 智能灌浆系统架构示意图

1. 数据采集层由布设在灌浆设备、钻孔和岩体内的多类传感器构成, 涵盖压力、电磁流量、浆液密度及抬动监测等类型, 可对灌浆全过程的关键指标进行连续、实时记录。其中, 压力传感器量程0—10 MPa, 精度 $\pm 0.5\%$; 电磁流量计精度 $\pm 1.0\%$; 浆液密度计精度 $\pm 0.01\text{ g/cm}^3$ 。

2. 传输层把采集层的数据稳定、快速地送到处理中心。面对环境复杂、作业面分散的局面, 通常把有线与4G/5G、Wi-Fi等无线方式混用。东庄水利枢纽借助“云边端”协同, 在1000多个监测点同时处理数据, 传输成功率达到99.9%。

3. 处理层(云平台)作为智能灌浆系统的“大脑”, 云平台负责存储、分析数据并作出决策, 核心由数据存储与管理、智能分析引擎、预警与诊断三部分组成。杨房沟水电站的系统结合三维地质模型和施工大数据, 可提前对不同地层的灌浆方案进行预判与优化, 将参数匹配精度提高到90%以上。

4. 应用层直接面向用户, 整合了灌浆控制、质量评估与进度管理界面。借助智能灌浆管理系统 iGM 和智能灌浆单元机 iGC, 水泥灌浆实现一键闭环控制; 管理人员通过电脑或移动终端即可远程查看各作业面的进度、质量与设备状态, 管理效率随之提升。

二、智能灌浆系统架构与关键技术突破

(一) 系统硬件架构与传感技术

智能灌浆系统的硬件架构由制浆系统、输浆系统、灌浆泵站和监测网络四大部分组成, 形成了完整的灌浆作业闭环。

1. 制浆系统依托自动化控制, 水泥、水与外加剂的比例被实

时精准调节, 浆液质量因此保持长期稳定。东庄水利枢纽的实测数据显示, 密度波动被压缩在 $\pm 0.02\text{ g/cm}^3$ 以内, 密度计不间断采集浆液密度并与设定值比对, 水灰比随之自动修正, 确保浆液性能始终符合设计要求。

2. 输浆系统浆液经管网直达各灌浆面, 配有流量自动称重装置与压力调节机构, 一泵可同时向4—6个孔口供浆, 效率集中。

3. 灌浆泵站是系统的执行单元, 配有变频控制系统和参数传感器, 可按指令实时调整泵送压力与流量。智能灌浆单元机(iGC)作为现场控制终端, 将压力、流量、密度传感器与数据采集控制模块集成于一体, 实现灌浆过程的现场自动化。

4. 监测网络构成系统的感知层, 由多款高精度传感器组成, 其性能指标列于表2。

表2 智能灌浆系统核心传感器性能指标

传感器类型	测量范围	精度	抗干扰能力	特殊功能
压力传感器	0–10 MPa	$\pm 0.5\%$ FS	抗浆液腐蚀、防震	温度补偿、过载保护
电磁流量计	0–200 L/min	$\pm 1.0\%$ RD	抗磁干扰、防结垢	双向测量、自清洁
浆液密度计	1.0–2.5 g/cm ³	$\pm 0.01\text{ g/cm}^3$	耐磨损、防堵塞	在线校准、温度补偿
抬动监测仪	0–50 mm	$\pm 0.1\text{ mm}$	抗振动、防水	多点监测、趋势预警

(二) 系统软件平台与数据分析

智能灌浆系统的软件平台通常采用云架构设计, 云架构集成数据采集、存储、分析与可视化等功能模块。

数据采集模块系统以轮询方式采集数据, 面对现场复杂环境, 记录仪会反复向监控中心发送同一条数据, 直至收到确认回复才停止重发并转入下一条。

云存储模块依托可扩展的PC集群, 由主控服务器、存储服务器和客户端代理三部分构成。两台主控服务器以主备方式运行, 实现双机热备, 无需人工干预即可保障系统持续可用。

数据分析模块具备以下核心功能:

1. 系统持续跟踪灌浆参数, 压力突变或注入率异常时即刻报警并启动应对。

2. 质量评估系统提取P–Q–t曲线的关键特征, 再比对预设标准, 最后以量化分值反映灌浆效果。

3. 系统完整记录灌浆全过程, 可随时调取历史数据开展分析, 为质量事故追溯与工艺改进提供可靠依据。

4. 将专家知识与经验嵌入系统, 为异常工况提供决策支持。

可视化模块以图形、图表及三维模型等方式, 将灌浆过程与结果直观呈现。

(三) 关键技术创新与突破

智能灌浆技术在以下几个方面实现了重要创新与突破:

1. 智能止浆技术为水平钻孔灌浆带来关键突破。引江补汉工程首次把智能止浆塞系统用于水平孔, 解决浆液反渗和压力失稳等老问题, 使水平段密封效率显著提高。

2. 高压后退式灌浆技术该技术首次在水利工程中于12 MPa高压环境下完成水平段后退式精准灌浆。高压力与大注入量协同作

用，使浆液扩散更均匀，形成连续致密的加固帷幕。

3.数字孪生技术正被引入灌浆环节，用于可视化展示与提前预判。通过为灌浆工程建立数字孪生体，可在虚拟空间同步映射现场作业，并开展仿真与预测，进而支持更早阶段的优化决策。

三、智能灌浆技术的工程应用与实效分析

（一）东庄水利枢纽：大规模防渗工程的智能化管理

东庄水利枢纽库坝区防渗工程被誉为“国内单体防渗第一标”，设计灌浆总量约百万米，规模约为常规水电站的3—4倍。针对灰岩岩溶强烈发育、左岸岩层裂隙宽大等复杂地质，工程全程引入智能灌浆技术。

技术实施方案：

- 1.采用“网络记录+集中管控+远程指令”的灌浆管理新模式，搭建了覆盖整个工区的智能灌浆系统。
- 2.多参数传感器与人工智能模型协同工作，对灌浆压力、流量和浆液密度等关键指标进行实时监测与动态分析。
- 3.建立云端数据库，实现灌浆施工全过程智能化管理。

应用成效：

- 1.智能灌浆系统曾创下单月钻进5.7万米的纪录，效率明显高于人工操作。
- 2.灌浆参数合格率超过95%，全部数据可回溯，为质量管控提供了可靠依据。

- 3.人工成本降低30%以上，材料浪费率从传统工艺的15%降至5%以下。

（二）杨房沟水电站：人工智能与5G融合应用

杨房沟水电站是我国首个采用EPC总承包模式的百万千瓦级水电工程。其智能灌浆系统融合了三维地质建模、人工智能和工业5G等先进技术。

技术特色：

- 1.一键智能灌浆：按下启动键后，制浆站自动配浆、输浆装置同步称重，单泵即可把浆液送往四至六个灌浆点，配浆与变浆全程无需人工干预。
- 2.智能抬动预警系统实时跟踪岩体变形，一旦位移超限立即报警并自动停灌，为灌浆作业和坝体结构提供双重安全保障。
- 3.专家智库支持：系统内置专家库，可在施工遇到难题时提供针对性建议。

应用效果：

- 1.灌浆效率提升25%，人力成本降低30%。
- 2.灌浆合格率达到98%，岩体抬动控制在0.2mm以内。
- 3.通过精准预判浆液需求量，材料浪费率从传统工艺的15%降至5%以下。

（三）技术经济性综合对比分析

为系统衡量智能灌浆技术的整体效益，本文汇总并比较了若干工程案例的数据，结果列于表3。

表3 智能灌浆与传统灌浆综合性能对比分析

评价指标	传统灌浆	智能灌浆	提升幅度	数据来源
人工成本占比	35%~40%	20%~25%	降低30%以上	东庄枢纽
单月进尺峰值	3.5万~4万米	5.5万~6万米	提升40%~50%	东庄枢纽
浆液浪费率	10%~15%	3%~5%	降低60%以上	杨房沟电站
质量合格率	85%~90%	95%~98%	提升10%以上	多个工程统计
压力控制精度	±10%~15%	±5%以内	精度提高2~3倍	实验数据
数据可追溯性	纸质记录，不完整	全流程电子化、云端存储	实现完全可追溯	系统功能说明
安全风险	较高，依赖人员经验	低，系统自动预警和干预	事故率降低80%	工程报告

表3显示，智能灌浆技术在所有性能指标上均优于传统方法，其中压力控制精度、施工效率和质量合格率的差距尤为突出。

根据工程数据统计，智能灌浆技术的投资回报率(ROI)分析如图2所示：

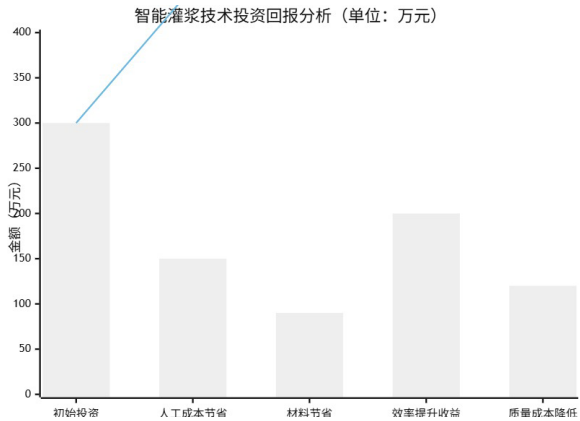


图2 智能灌浆技术投资回报分析

图2显示，智能灌浆系统的前期投入约300万元，但凭借人工费用压缩、材料损耗下降、作业效率提高以及质量成本节约，整体经济效益显著。投资预计在中期即可回收，项目全周期回报率超过187%。

四、智能灌浆技术面临的挑战与未来发展趋势

（一）当前面临的技术挑战

尽管智能灌浆技术取得了显著进展，但在广泛应用中仍面临多方面挑战：

- 1.地质适应性不足已成为最棘手的问题。在深层岩溶或巨厚覆盖层这类极端复杂地层里，智能模型的判断精度不足，一旦遭遇涌水，系统对浆液扩散路径的预测可能出现偏差。
- 2.传感器可靠性和耐久性问题。灌浆环境振动强、浆液腐蚀重、湿度高，长期运行下传感器精度极易漂移。
- 3.技术标准化缺失拖慢了推广脚步。设备接口、数据格式和

系统集成规范尚未统一，不同厂商的系统难以互通，形成信息孤岛。

4.复合型人才短缺智能灌浆技术推广受阻，系统运行需要既懂灌浆工艺又熟悉信息技术的跨界人员，而这类人才在行业内缺口巨大。

（二）未来发展趋势

智能灌浆技术正朝着更智能、更集成、更规范的方向演进，具体表现可从以下维度观察。

1.数字孪生技术深度融合将成为智能灌浆技术的重要演进方向。通过构建灌浆工程的数字孪生体，可以在虚拟空间中模拟和优化灌浆方案，实时映射和预测实际灌浆过程。

2.算法持续迭代将显著增强系统的自主决策水平。机器学习与深度学习模型将深度嵌入灌浆参数调优、异常识别及效果预测环节，使平台能够自我更新并随工况调整。

3.区块链为质量追溯提供支撑，可形成无法篡改的灌浆档案，为审计与问责留存可信数据。

4.绿色低碳材料与工艺智能灌浆技术要持续演进，离不开低能耗、低排放的灌浆材料。将这类绿色材料接入智能系统，可精准掌控资源用量。

表 4 智能灌浆技术未来发展趋势与预期效益

发展趋势	技术特征	预期效益	实现时间表
数字孪生融合	虚拟与现实交互映射	方案优化，质量预测	2026-2028年
人工智能深化	自主学习，智能决策	复杂地质适应性 强	2027-2030年
区块链质量追溯	数据不可篡改，可追溯	质量透明，责任明确	2025-2027年
机器人化装备	自动化，无人化操作	提高安全性，降低人工	2028-2030年
绿色材料应用	低碳，环保	减少碳足迹，可持续发展	2025-2028年

五、结论与展望

智能灌浆技术把现代信息系统嵌入传统灌浆流程，使整个过程由数据主导并精确可控，已成为水利工程地基处理的主流演进方向。本文通过对智能灌浆技术的系统分析，得出以下主要结论：

智能灌浆技术已构建起较为完备的理论框架与技术体系，GIN算法、三区五阶段模型等核心算法逐步成熟，足以覆盖大多数工程场景的需求。

借助多参数传感、实时监测与智能决策，灌浆系统可即时调节浆液压力与流量，把波动幅度压至 ± 5% 以内，工程各段强度差异随之缩小，整体一致性明显提升。

重大水利工程的实践显示，引入智能灌浆后，经济回报尤为突出。

数字孪生、人工智能与区块链等前沿技术交汇，使灌浆系统具备实时感知与学习能力，正朝着自适应调控、过程透明和绿色低碳的方向持续演进。

未来，智能灌浆技术带来的不仅是质量与速度的同步提升，更把行业推向更智能、更绿色、更可持续的未来。要加快智能灌浆技术的落地，行业需尽快出台统一的技术规范，系统培养既懂工程又懂算法的复合型人才，并搭建跨学科、跨企业的创新平台，让这项技术在我国水利高质量发展中释放更大潜能。

参考文献

[1]王志娟 尹建飞.智能灌浆控制系统设计与研究 [J]. 信息记录材料, 2025, 26(05):83-85.
[2]陕西东庄水利枢纽库坝区防渗工程智能灌浆进尺突破60万米 [R]. 中国水利报社, 2025-07-12.
[3]2025-2027年中国水工灌浆管理系统产业研究报告 [R]. 中国产业发展研究网, 2025.
[4]张帆 詹程远等.灌浆施工全过程智能监测数据云存储与深度分析系统研究 [J]. 长江技术经济, 2023,7 (01):93-97
[5]2025-2030年中国灌浆料市场前景调研及未来发展趋势预测报告 [R].2025.