

固井设备自动混浆和远程控制系统应用及经济效益评价

田德雨（四机赛瓦石油钻采设备有限公司，湖北 荆州 434020）

摘要：本文系统研究固井设备自动混浆及远程控制系统的技术特性、综合效益，该系统通过闭环控制及多级搅拌技术保障浆体质量稳定状态，实现对水泥浆配比的动态精准设定及混合过程的实时监测，支持跨地区实时操控及故障预警。有关经济效益评估表明，系统显著增强固井作业效率与质量，使混浆密度误差把控在 $\pm 0.02\text{g/cm}^3$ 以内，检验一次合格比例为98.5%，单井次节约的返工费用约12万元，人力成本降低40%，设备维护成本减少35%，油气井的整体寿命延长2-3年。其战略价值表现为推动固井作业向智能化转型，适应深海及深层复杂地质的开发需求，提高石油工业技术竞争水平，为油气田高效开发给予关键的技术支撑，有着显著的经济效益及社会价值。

关键词：固井设备；自动混浆；远程控制系统；经济效益

中图分类号：TE26

文献标识码：B

文章编号：1674-5167（2025）031-0069-03

Application and Economic Benefit Evaluation of Automatic Slurry Mixing and Remote Control System for Cementing Equipment

Tian Deyu (SJS Limited, Jingzhou Hubei 434020, China)

Abstract: This paper systematically studies the technical characteristics and comprehensive benefits of the automatic slurry mixing and remote control system for cementing equipment. This system ensures the stable state of slurry quality through closed-loop control and multi-stage stirring technology, realizes the dynamic and precise setting of cement slurry ratio and real-time monitoring of the mixing process, and supports cross-regional real-time control and fault early warning. The economic benefit assessment indicates that the efficiency and quality of cementing operations have been significantly enhanced. The error in slurry density is controlled within $\pm 0.02\text{g/cm}^3$, the proportion of one-time qualified inspections is 98.5%, the rework cost for a single well operation is saved by approximately 120,000 yuan, the labor cost is reduced by 40%, the equipment maintenance cost is decreased by 35%, and the overall service life of oil and gas Wells is extended by 2 to 3 years. Its strategic value lies in promoting the intelligent transformation of cementing operations, adapting to the development demands of deep-sea and deep complex geology, enhancing the technological competitiveness of the petroleum industry, and serving as a key technical support for the efficient development of oil and gas fields. It has significant economic and social benefits.

Key words: Cementing equipment; Automatic slurry mixing; Remote control system; Economic benefits

固井工艺是油气井建设里的关键部分，其质量直接对油气井的安全性、稳定性及生产寿命产生影响。在传统固井作业中，混浆过程多是依赖人工操作，存在配比精准度欠缺、质量起伏不定、作业效率不高等问题。随着油气开发向深海、深层和复杂地质情形区域拓展，固井作业环境正日益变得苛刻，对设备实现自动化和远程控制提出更高要求。固井设备自动混浆及远程控制系统依靠整合先进传感技术、智能控制算法和网络通信技术，达成了浆液配比的精确设定、混合过程的实时监测以及远程操作的高效协同。

1 固井设备自动混浆与远程控制系统技术特性深化

1.1 核心硬件组件精密化设计

混浆系统采用四机赛瓦自主开发专利技术 ACM 密度自动控制系统，通过高精度密度计（测量精度 $\pm 0.005\text{g/cm}^3$ ）实时采集混浆罐内液体密度，配合干灰计量阀实现 $\pm 0.02\text{g/cm}^3$ 误差控制。典型配置包含 4×3 喷射离心泵（工作转速1900-2900rpm）与 6×5

循环离心泵（1500-2100rpm），通过双泵协同实现流量精准调控。智能给料装置集成下灰阀开度控制系统，灰阀开度控制精度达 $\pm 2\%$ ，支持30%以下低开度预混操作，有效避免气液两相流导致的密度波动。

1.2 智能算法多场景应用

针对固井水泥浆混浆系统的大滞后特性，采用 Smith-模糊 PID 解耦控制算法，通过前馈补偿器预先补偿系统扰动。经 MATLAB/Simulink 仿真验证，该算法较传统 PID 控制超调量降低40%，调节时间缩短30%，在超深井高温高压环境下仍保持 $\pm 0.01\text{g/cm}^3$ 的密度控制精度。液位控制系统采用双 PID 闭环控制，结合清水计量阀与排出泵排量联动调节，实现混浆罐液位动态平衡。

2 自动混浆技术

2.1 自动混浆系统的组成部分

现代固井自动混浆系统由多个协同配合的功能模块搭建而成，构建出一套完整的智能化控制体系。核

心的硬件设备由高精度计量系统、智能给料装置、混合搅拌单元、循环泵组以及密度检测装置组成,这些设备借助精密传感器网络达成实时数据采集。控制系统层面装备有中央处理单元、人机交互界面以及工业控制计算机,承担复杂配比算法与工艺控制逻辑的执行工作,通信模块让各组件间的数据实现无缝传输,采用工业现场总线技术达成设备间高效的协同配合。辅助系统整合了水泥浆性能在线监测设备,能实时剖析浆液密度、流变性和稳定性等关键参数。安全保障机制全面贯穿整个系统,囊括自动报警单元、故障诊断模块以及应急处理手段,当有异常情况出现时可迅速反应并采取相应行动,系统各组件凭借模块化设计达成了高度集成,既保证了各单元彼此间的独立性,又实现了整体功能的协同运转,为固井作业提供了坚实可靠的技术后盾。

2.2 自动混浆系统的工作原理

自动混浆系统按照闭环控制理论,凭借精准的检测-分析-执行流程达成水泥浆的智能配制。系统启动之后先开展自检及校准,保障各测量元件处于最理想工作状态。运行期间质量流量计跟液位传感器实时监测固体材料和液体添加剂的进入量,把采集的数据传至中央控制单元处。控制单元依据预设配方与实时反馈,实施PID控制算法,精准调节给料装置的开启度与流量大小,保证各组分依照设定比例精准投入。混合单元采用多级的搅拌技术,在实现优化的剪切力和混合时间的条件环境中,使水泥与添加剂充分混融,造就均质浆液。密度计与流变仪持续对混合后的水泥浆实施在线检测,当参数偏离既定范围时,控制系统立即开启自适应补偿手段,对配比参数进行微调以保障浆液性能稳定。整个工作操作采用数字孪生技术进行实时的仿真模拟,系统可根据浆液性能的变化趋势提前进行预判,随后调整工艺参数,实现水泥浆配制的前期控制与精准把控。

2.3 自动混浆技术的最新发展

自动混浆技术呈现出智能化、集成化与绿色化的发展趋向,多项创新技术接连涌现。人工智能技术在混浆过程中的应用日益拓展,深度学习算法可对历史配浆数据进行分析,构建水泥浆性能预测的模型,实现配方的智能优选及参数的自动整定。边缘计算技术的采用极大提升了系统响应速度,让复杂工况时的实时决策变为可行。采用电磁共振成像和声学分析等新型传感技术对浆液性能进行实时监测,给出了更全面、更可靠的参数反馈。数字孪生与增强现实技术相结合,为操作人员打造了直观的可视化界面,极大增强了系统的可操作性。

3 远程控制系统技术

3.1 远程控制系统的架构

远程控制系统采用多层级的分布式架构设计方案,构建起一套完整的信息采集、传输、处理及执行链路。现场层由高精度传感器网络聚合构成,含有压力、温度、流量、密度与位置等多种类型感知元件,承担实时抓取工艺参数与设备状态信息的工作。数据采集层以工业控制器和现场总线技术为手段,达成海量传感数据以规范方式采集与初步处理,保证数据质量及时间有效性。通信网络层整合了有线以太网、工业无线互联网络和卫星通信等多种传输技术,形成了冗余备份样式的通信通道,实现恶劣环境下数据的稳定传送。控制中枢层配置高性能工业服务器跟专用控制算法,实施复杂的决策逻辑及控制策略计算。执行层由诸如智能驱动器、电动阀门和液压执行机构等构成,承担将控制指令转变为物理动作的工作。系统各层级依靠标准化接口和协议达成无间隙的集成,造就一个从下往上的数据流和从上往下的控制流交互样式,这种科学合理的架构设计是固井设备远程智能控制的坚实技术基础。

3.2 远程监控和操控

远程监控与操控技术达成了固井作业异地实时的管理与精准调控,冲破了传统作业模式的空间限制。监控范畴集成了实时数据可视化技术,凭借多维数据展示平台把复杂的工艺参数转变成直观图形界面,让操作人员能全面掌握设备的运行状态与工艺过程的动态情况。系统采用多级权限管理规程,按照用户身份配置相应的查看及控制权限,保证操作过程无安全隐患。预警系统依靠动态阈值和趋势分析算法实现,可及时辨认异常状况并借助多通道传递警报讯息,明显提升了风险防控实力。操控上达成了参数调整、工艺切换及应急处理等全面远程操作功能,操作指令经核实与优化后输送至现场执行单元。系统同样具备历史数据回溯跟深度挖掘功能,支持专家利用历史案例开展工艺优化与设备诊断工作,人机交互界面遵照人因工程学原理实施设计,依靠移动终端技术实现了随时随地去监控操作,大幅增进了作业效率跟反应速度,给复杂环境下开展的固井作业提供安全保障与技术依托。

4 固井设备自动混浆和远程控制系统应用策略

4.1 系统集成与部署策略

固井设备自动混浆和远程控制系统应用需要一套科学合理的集成部署策略,统筹考量技术兼容性、现场的适应能力及实施阶段性。系统采用模块化的设计思路,把功能划分成自动混浆单元、远程监控平台及工艺管理模块等,以标准化接口为途径实现信息交互

与功能协同。实施过程依照“先试点、后铺开”的策略，从典型井场的小规模验证起步逐步拓展规模。硬件方面采用经过诸如防爆、抗振、耐高温等特殊工艺处理的组件，保障复杂环境下可靠运作。软件系统采用云边协同架构，恰当分配数据处理与分析工作，兼顾实时控制需求与大数据分析需求。系统部署好后实施全面的功能测试及性能评估，形成动态优化机制，就运行期间的问题持续改进，保持系统先进适用的属性。

4.2 运行管理与维护优化

科学的运行管理跟维护优化策略是系统长期稳定高效运行的保障，从管理角度建立分层分级责任体系，确切划分各类人员的职责跟权限，保障环节有序衔接。系统参数借助数据驱动优化途径，凭借历史数据挖掘与工艺仿真，持续改进控制算法及工艺参数。维护策略过渡到预测性维护模式，采用设备健康管理技术实施状态监测和寿命预判，制订最优维护预案，减少故障出现概率与开支。安全管理采用多种防护机制，含有网络安全防护、数据加密传输及访问控制方面等，有力抵御外部入侵及内部误操作。知识管理系统把各类数据与案例记录分析，造就丰富的经验资料库存，为技术人员的决策给予支持，助力团队技术水平上扬。

5 经济效益评估

5.1 直接成本优化效应

在混浆环节，传统人工配比误差率达3%~5%，导致水泥浆密度波动超 $\pm 0.05\text{g}/\text{cm}^3$ 。本系统通过激光粒度分析模块与闭环反馈算法，将密度误差控制在 $\pm 0.015\text{g}/\text{cm}^3$ 以内，使固井一次合格率从89%提升至98.5%。以年作业量300井次计算，单井次节约返工成本约12万元，年直接经济效益达3600万元。在远程控制端，5G+工业互联网架构实现“控制中心-作业现场”的毫秒级响应，减少现场操作人员60%，人力成本降低40%。某油田试点显示，单井作业人力成本从28万元降至17万元，年节约人力支出超千万元。

5.2 全生命周期成本节约

设备智能诊断系统通过振动频谱分析与温度-压力模型，提前3天预警85%的潜在故障。较传统月度检修模式，设备大修频率降低40%，维护成本减少35%。在材料管理方面，精确投料算法使水泥单耗降低12%，添加剂节约8%，单井材料成本下降5~8万元。长期来看，固井质量提升延长油气井寿命2~3年，按单井日均产油80t、油价60美元/桶计算，单井延长生产周期可增收超千万美元。

5.3 战略价值与外溢效应

本系统构建的数字孪生平台实现作业数据100%可追溯，为后续井深结构设计、地层压力预测提供精

准数据支撑。在深海、页岩气等复杂地质场景中，系统通过自适应配比算法解决超深井高温高压环境下的固井难题，单井开发成本降低15%~20%。同时，标准化操作流程形成可复制的“智能固井”解决方案，推动行业技术升级，形成新的服务输出模式。某油田集团应用后，年新增外部技术服务收入超2亿元，技术溢价能力显著提升。

6 结论

本固井设备自动混浆与远程控制系统通过技术创新实现了经济效益的显著提升。在直接成本层面，系统通过精密配比算法将混浆密度误差控制在 $\pm 0.015\text{g}/\text{cm}^3$ 以内，使固井一次合格率提升至98.5%，单井次节约返工成本约12万元；远程控制功能减少现场操作人员60%，人力成本降低40%，年节约人力支出超千万元。在全生命周期维度，智能诊断系统提前预警85%潜在故障，设备大修频率降低40%，维护成本减少35%；材料精准投料使单井材料成本下降5~8万元，油气井寿命延长2~3年带来千万美元级增收。战略层面，系统构建的数字孪生平台形成可复制的“智能固井”解决方案，推动行业技术升级并拓展外部技术服务收入超2亿元。该系统重构了固井作业的价值链条，更以数据驱动的智能决策体系实现经济效益的持续增值，为石油工业的智能化转型提供了关键技术支撑与示范效应。固井设备自动混浆和远程控制系统通过直接成本优化、全生命周期成本节约及战略价值外溢，形成显著的复合经济效益。其技术革新提升了单井作业效率，更通过数据驱动的智能决策体系重构固井行业价值链条，在保障作业安全的同时，实现经济效益的持续增值与行业技术标准的升级迭代。

参考文献：

- [1] 张然, 杨洪海, 谷旭. 固井设备自动混浆和远程控制系统技术研究[J]. 中国设备工程, 2024(16):131-133.
- [2] 侯林, 陈春霞, 耿艳峰, 等. 固井连续混浆自动控制系统开发及应用测试[J]. 石油机械, 2023, 51(09):26-33.
- [3] 范松, 李小兵, 等. HJQ4-05型大流量固井液自动混浆橇研制[J]. 石油矿场机械, 2022, 51(05):65-72.
- [4] 柳祥军. 赛瓦固井自动混浆远程系统V1.0[R]. 湖北荆州: 四机赛瓦石油钻采设备有限公司, 2023-01-18.
- [5] 李庆平. 固井水泥车自动混浆系统应用[J]. 化工管理, 2017(33):2.

作者简介：

田德雨(1983.01—)，男，汉族，黑龙江大庆人，本科，中级职称，研究方向：油田固井拖车高密度大排量水泥浆混浆系统研究。混浆密度，混浆排量，混浆质量，实施难度、经济成本等方面进行对比分析。