

压裂装备智能化作业管理系统设计应用

周于杰 唐文强

中石化西南石油工程有限公司井下作业分公司 四川 德阳 618000

摘要：本文介绍了压裂装备智能化作业管理系统的设计与应用，该系统融合物联网、大数据、人工智能等技术，对压裂装备作业全流程进行智能化管理，旨在提升作业效率、安全性和精准度。文章详细阐述了系统架构、功能设计以及数据采集、通讯、智能决策和用户界面等关键模块的设计思路。通过在某大型油气田的应用验证，该系统显著提高作业效率、降低故障发生率，并提升整体管理水平。本研究为压裂装备的智能化管理提供了有效解决方案。

关键词：压裂装备；智能化作业；管理系统设计

引言：随着油气田开发的不断深入，压裂作业在油气开采中扮演着越来越重要的角色。然而，传统的人工管理方式存在数据记录滞后、参数调整不及时等问题，严重影响了作业效率和安全性。因此，研发一套压裂装备智能化作业管理系统显得尤为迫切。该系统通过集成先进的物联网、大数据和人工智能技术，能够实时监控压裂装备的运行状态，智能预警潜在故障，并提供精准的参数调控建议，从而全面提升压裂作业的管理水平。

1 压裂装备智能化作业管理系统概述

1.1 系统定义与功能

压裂装备智能化作业管理系统是融合物联网、大数据、人工智能等技术，针对压裂装备作业全流程实现智能化管理的综合系统。其核心目标是提升压裂作业的效率、安全性与精准度，通过实时采集、传输、分析和处理装备运行状态及作业参数等信息，为作业提供全方位管理支持。系统功能丰富且贴合实际需求。实时监控功能可对压裂泵压力、混砂车流量等关键参数持续监测，并以图表形式直观呈现，让工作人员实时掌握装备状态。智能预警功能通过数据分析，在装备参数异常或可能发生故障时自动报警，避免故障扩大。作业参数调控功能支持远程或自动调整参数，确保作业按计划推进。数据管理与分析功能对海量作业数据存储、整理和分析，为方案优化、设备保养及决策提供依据。人员管理功能对作业人员资质、出勤和操作记录进行管理，保障合规操作。应急预案管理功能存储各类突发事件预案，紧急情况下可快速查询调用，指导应急处理^[1]。

1.2 系统架构与组成

系统采用分层架构设计，包含感知层、传输层、数据层、应用层和用户层。感知层是数据源头，由各类传感器和智能仪表构成。传感器安装在压裂装备关键部位，如压裂泵缸体、混砂车砂罐等，可采集压力、流

量、温度等参数。智能仪表对传感器信号初步处理转换，形成可传输数字信号，为后续数据处理奠定基础；传输层负责数据传输，由通信设备和网络组成。通信设备包括无线网关、路由器等，通信网络采用5G、工业以太网、物联网等方式。5G满足实时大数据传输需求，工业以太网适用于近距离高可靠传输，物联网便于大量传感器接入，确保数据快速、准确、稳定传输至数据中心；数据层是数据存储与处理核心，由数据库服务器和数据处理软件组成。数据库服务器存储装备运行、作业、人员信息及应急预案等数据；数据处理软件对数据清洗、转换和整合，去除冗余与错误数据，提升数据质量，为应用层提供可靠支持；应用层实现核心功能，包含数据采集、通讯、智能决策、用户界面与交互等模块。各模块协同工作，数据采集模块处理感知层数据，通讯模块保障内外通信，智能决策模块提供决策建议，用户界面与交互模块方便操作查询；用户层涵盖操作人员、管理人员、技术人员等。操作人员通过系统监控装备和调整参数，管理人员借助数据统计分析进行决策，技术人员利用系统开展故障诊断和方案优化。

2 压裂装备智能化作业管理系统需求分析

2.1 业务需求

从作业全流程看，系统需满足多环节业务需求。作业准备阶段，要对压裂装备全面检查评估，确保其状态良好，同时录入和管理作业方案，为作业开展提供依据，如检测压裂泵性能参数是否符合作业要求，录入压裂液配方等信息；作业实施阶段，需实时监测装备运行和作业参数，当参数偏离方案时及时预警并支持调整，同时记录压裂液注入量等数据。还要协调各装备工作，保障压裂泵、混砂车等协同运作，提升作业效率；作业结束后，系统要汇总分析作业数据，生成报告评估作业效果，如判断压裂裂缝形成情况。同时总结装备运行状

态,为维护保养提供建议,如根据运行时间制定维护计划。另外,系统需满足数据共享与协同工作需求,实现施工、技术、管理等多团队数据共享,与油田生产管理、设备管理等系统数据交互,形成完整管理信息链^[2]。

2.2 用户需求

不同用户需求各有侧重。操作人员注重实时监控和操作便捷性,需要清晰查看装备运行参数和状态,界面应简洁明了、操作简单,支持快速调整参数和下达指令,如通过界面按钮调整压裂泵转速。管理人员重视数据统计分析及作业进度、成本管理,需要系统提供作业进度、设备利用率、成本消耗等报表,实时监控和分析作业成本,助力成本控制与决策,如对比预算与实际支出发现成本问题;技术人员需要强大的数据分析和故障诊断功能,系统要提供数据查询、筛选、对比等工具,准确识别装备故障类型和原因并给出解决建议,如分析压裂泵振动数据判断轴承磨损情况。

2.3 性能需求

系统性能需满足多方面要求。响应速度上,用户操作和数据查询响应时间不超过2秒,实时监控数据更新频率高,保障用户操作体验和作业及时性。数据处理能力方面,要快速处理海量作业数据,进行存储、分析和展示,如短时间内分析压力、流量数据生成趋势图表并识别异常,同时具备良好扩展性应对数据增长;稳定性是系统可靠运行的关键,需在复杂工业环境中稳定工作,硬件选用高质量设备,软件经过充分测试优化,平均无故障运行时间不低于1000小时,满足作业连续进行需求;安全性上,采用加密技术保障数据传输安全,建立访问控制机制确保数据存储安全,定期备份数据防止丢失,保护作业方案等敏感信息;兼容性方面,能与不同品牌型号压裂装备及油田其他系统对接,降低集成难度;可维护性上,系统结构清晰、模块耦合度低,便于故障排查和功能升级。

3 压裂装备智能化作业管理系统设计

3.1 数据采集模块设计

数据采集模块采用分布式架构,可同时采集多台装备多种参数,其设计直接影响数据准确性和完整性。传感器选型依据参数和环境要求,压力传感器选用高精度型号,测量范围覆盖作业可能压力值,精度误差不超 $\pm 0.5\%$;流量传感器需线性度和稳定性好,适应不同粘度压裂液;温度传感器能在高温环境工作且响应迅速,同时所有传感器具备抗干扰能力以适应复杂电磁环境;硬件电路包含信号调理、A/D转换和微处理器。信号调理电路对传感器微弱信号放大、滤波,提升信号质量;A/

D转换电路将模拟信号转为数字信号,转换精度达16位以上,保证数据准确;微处理器对数据初步处理,通过通信接口传输至传输层;软件采用模块化设计,初始化模块设置微处理器、传感器等;数据采集模块按设定频率控制采集,关键参数采样频率100Hz,温度等慢变参数10Hz;数据处理模块校验和剔除异常数据;数据传输模块按规定格式发送数据。

3.2 通讯模块设计

通讯模块保障数据传输的实时性、可靠性和安全性,支持有线和无线通信。有线通信采用工业以太网,通过双绞线或光纤传输,速率高、抗干扰强,适用于现场固定设备数据传输;无线通信采用5G和物联网技术,5G传输实时性要求高的大量数据,物联网连接大量传感器实现低速率、低功耗传输;通信协议采用MQTT和Modbus协议。MQTT适用于物联网设备,开销小、效率高,满足传感器数据传输;Modbus用于系统与装备控制器通信,实现控制和参数读取;为保障安全,模块采用数据加密和身份认证技术,传输前加密数据,设备接入时进行身份认证^[3]。同时具备数据缓存和重传机制,网络故障时缓存数据,恢复后重传,还能实时监测网络状态,调整传输速率或切换通信方式,保证传输稳定。

3.3 智能决策模块设计

智能决策模块基于大数据和人工智能技术,是系统智能化核心,包含数据预处理、模型训练和决策生成三部分。数据预处理对原始数据清洗、转换和特征提取,去除噪声和异常数据,转换为适合模型训练的格式,提取压力波动系数等特征参数;模型训练采用神经网络、支持向量机等算法,建立故障诊断和作业参数优化模型。故障诊断模型通过学习装备正常和故障状态数据,识别故障类型和位置;作业参数优化模型结合地质条件和作业目标,优化压裂液排量等参数。训练中采用交叉验证优化模型,提升准确性和泛化能力;决策生成部分根据模型分析结果和作业需求生成建议,故障时提供处理方案,调整参数时给出合理方案,同时考虑安全和成本约束。模块具备自学习能力,不断接收新数据更新优化模型,提高决策准确性和适应性。

3.4 用户界面与交互设计

用户界面与交互设计以友好、直观、便捷为目标,提升用户工作效率。界面采用分层设计,分为主界面、功能界面和详情界面。主界面展示装备运行总览、作业进度等关键信息,方便用户快速了解整体情况;功能界面按模块设计,如实时监控、参数调整界面,针对性布局;详情界面展示装备详细参数等信息;视觉设计以

蓝色和灰色为主色调,体现专业可靠与稳重高效。界面元素布局合理,重要信息突出显示,如红色闪烁字体展示预警信息。恰当使用折线图、柱状图等图表,使数据直观易懂。交互设计注重便捷灵活,支持鼠标、键盘操作,常用功能设快捷键。参数调整提供滑块、输入框等方式,系统具备智能提示功能,指导用户操作。界面支持个性化设置,用户可调整布局、颜色等,且响应迅速,及时反馈操作结果。

4 压裂装备智能化作业管理系统应用验证

4.1 应用案例选择

为验证系统有效性,选取某大型油气田压裂作业现场作为案例。该油气田是我国重要油气生产基地,压裂作业规模大、装备多、环境复杂,管理要求高,具有代表性。作业现场有10台压裂泵、5台混砂车、3台仪表车等装备,主要进行页岩气压裂。应用本系统前,采用人工管理方式,存在数据记录滞后、参数调整不及时、故障发现晚等问题,影响作业效率和安全,亟需智能化管理系统改善现状。

4.2 系统部署与调试

系统部署分硬件安装和软件部署。硬件方面,在压裂泵、混砂车等装备关键部位安装传感器,布置无线网关、路由器等通信设备,搭建数据库服务器等硬件设施,确保硬件安装牢固、连接可靠,适应现场环境。软件部署包括安装数据库软件、系统应用程序等,配置通信协议和参数,实现各模块协同工作。部署后进行全面调试,硬件调试检查传感器采集数据准确性、通信设备传输稳定性,软件调试测试各模块功能,如数据采集模块能否正常采集传输数据,智能决策模块能否生成合理建议。针对调试中发现的问题及时优化,如传感器数据偏差时校准,通信中断时调整网络参数,确保系统稳定可靠运行。经过多次调试,系统各项性能指标达标,满足作业需求^[4]。

4.3 应用效果评估

在应用效果评估环节,主要从作业效率、安全性以及管理水平三个方面进行了深入分析。智能化管理系统实时监控和参数调控功能发挥了巨大作用。系统能够

实时监测压裂液注入量、泵压、排量等关键参数,并根据作业需求进行精准调控。这不仅使得参数调整更加及时精准,还大幅减少了作业中断时间,从而显著提升了作业效率。据统计,与人工管理方式相比,采用智能化管理系统后,单井作业时间缩短了15%,设备利用率更是提高了20%;其智能预警功能能够实时监测装备运行状态,一旦发现异常或潜在故障隐患,系统便会立即发出预警信号,为操作人员提供充足的时间进行应急处理。例如,当压裂泵压力异常升高时,系统能够迅速预警,从而有效避免了设备损坏和安全事故的发生。据统计,在应用智能化管理系统期间,故障发生率降低了30%,且未发生重大安全事故;智能化管理系统同样发挥了不可替代的作用。其数据统计分析功能为管理人员提供了准确、全面的数据支持,使得作业成本核算更加精准,成本降低10%。同时,系统还实现了多团队之间的数据共享和协同工作,打破了信息孤岛现象,提升了整体管理效率。技术人员借助智能化管理系统能够快速诊断并排除故障,故障处理时间缩短40%。另外,系统还能够根据作业数据对作业方案进行优化调整,使得压裂效果得到显著提升。

结束语

本文通过对压裂装备智能化作业管理系统的设计与应用进行详细探讨,验证了该系统在提升作业效率、安全性和管理水平方面的显著效果。随着技术的不断进步和应用场景的拓展,该系统有望为更多油气田的压裂作业提供智能化支持。未来,将继续优化系统功能,提升系统性能,为推动油气田开发的智能化进程贡献力量。

参考文献

- [1]姚孔,苏文昌,魏杰,等.压裂装备智能化作业管理系统设计应用[J].机械研究与应用,2022,35(2):208-210.
- [2]张国友.页岩油全电动压裂装备配置与作业技术研究[J].石油机械,2024,52(3):102-107.
- [3]王俊玉,李彦志,王志喜,等.压裂装备发展现状及发展趋势探讨[J].机械研究与应用,2022,35(5):240-242,246.
- [4]曹秀义.压裂装备技术现状及发展方向探讨[J].石化技术,2021,28(7):119-120.