

# 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、安全性和精准度，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<sup>[1]</sup>。

### 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<sup>[2]</sup>。

## 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<sup>[3]</sup>。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<sup>[4]</sup>。

##### 4.3 应用效果评估

在应用效果评估环节，主要从作业效率、安全性和管理水平三个方面进行了深入分析。智能化管理系统的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工作原理、设计与实现、应用效果及展望等方面的研究，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管理支持。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.