

自动化压裂设备性能测试系统研制

耿榆川

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: 在页岩气开发中, 自动化压裂设备性能测试面临效率低、风险预判滞后等问题。本文聚焦此难题, 研制出一套集参数采集与智能评估的性能测试系统。该系统整合多传感器数据融合、自动化控制等关键技术, 可模拟高压工况, 实现20余项参数同步采集与毫秒级传输。经实际应用验证, 该系统缩短了单设备测试周期, 提升综合测试效率, 有效提升了故障预判与异常识别能力, 为压裂设备安全运行和页岩气高效开发提供了有力支撑。

关键词: 自动化压裂设备; 性能测试系统; 参数采集; 智能评估

引言: 在页岩气大规模开发背景下, 自动化压裂设备作为核心装备, 其性能稳定性直接影响开发效率与安全。然而, 传统测试方法存在高压工况模拟不足、多参数同步监测缺失、风险预警滞后等突出问题, 导致设备故障率高、维护成本攀升。为突破这一瓶颈, 本文针对自动化压裂设备研制了一套集成参数采集与智能评估的性能测试系统, 通过关键技术创新实现测试精度与效率的双重提升。

1 自动化压裂设备性能测试需求分析与指标体系构建

1.1 自动化压裂设备核心结构与工作原理

自动化压裂设备由压裂机组、地面控制设备、智能管理系统构成, 形成作业闭环。压裂机组以柱塞泵为核心, 杰瑞盘古系列柱塞泵用一体化铸造壳体与JRZT高强度材料, 实现亿冲次无损运行, 2000型最大施工压力105MPa、排量2.3m³/min。地面控制设备有大口径管汇、自动输砂装置等, 大口径管汇单管传输, 降低83%风险点; 自动输砂装置填装效率每分钟3吨, 是传统3倍。智能管理系统通过仪表车集中管控, 录入方案5秒内启动全自动作业, 整合多种功能, 实现“一键智控”。工作流程为储液系统供液, 经混砂车混合支撑剂, 柱塞泵加压, 大口径管汇输送至井口, 传感器实时反馈状态。

1.2 性能测试核心需求分析

自动化压裂设备测试有三大痛点, 催生性能测试需求。一是高压工况测试缺失, 传统低压测试难发现高压下故障, 维修成本高。二是多参数同步监测不足, 现有测试忽略柱塞泵转速与输砂量联动, 影响裂缝支撑效果。三是风险预警滞后, 传统依赖人工观察, 智能作业要求提前预警。基于此, 测试系统需满足: 高压环境模拟能力、20项以上参数同步采集、毫秒级数据传输、故障预警准确率超95%的核心需求, 同时需适配电驱压裂系统、闭式混砂系统等新型设备^[1]。

1.3 性能测试指标体系构建

结合设备结构与作业需求, 构建“动力单元-传输系统-控制模块-安全性能”四维指标体系, 涵盖23项具体指标。动力单元指标聚焦柱塞泵核心性能, 包括额定压力下排量稳定性(允许波动±2%)、亿冲次运行后密封件损耗量(≤0.5mm)、动力端故障预测准确率(≥97%), 参考杰瑞盘古泵测试标准设置; 传输系统指标针对管汇与输砂设备, 大口径管汇需满足105MPa压力下无泄漏、振动频率≤15Hz, 自动输砂装置考核供砂速度稳定性(波动≤5%)与负载持续率(≥90%); 控制模块指标侧重智能化水平, 包括方案响应时间(≤5秒)、参数调节精度(压力控制误差≤0.3MPa)、多设备协同效率(1人可管控18组液罐); 安全性能指标涵盖压力异常识别精度(100%)、紧急停机响应时间(≤0.8秒)、环保指标(输砂作业无沙尘泄漏)。各指标均明确阈值与测试方法, 如压力稳定性采用连续1小时监测取标准差, 故障预测准确率通过历史故障数据回溯验证。

2 自动化压裂设备性能测试系统总体设计

2.1 系统设计原则与目标

系统设计遵循“精准模拟、智能高效、安全可靠”三大核心原则, 以解决现场测试痛点为目标。精准模拟原则要求复现105MPa高压、大排量等真实作业工况, 通过压力调节系统实现0-120MPa连续施压, 确保测试数据与实际运行高度一致。智能高效原则强调自动化与智能化融合, 减少人工干预, 实现测试流程从参数设置、数据采集到报告生成的全自动化, 将单设备测试周期从传统8小时压缩至3小时以内。安全可靠原则通过双重防护机制保障, 硬件层面采用防高压喷射的铠装结构, 软件层面设置三级权限管理与应急停机程序。系统总体目标分为技术指标与应用目标: 技术上实现23项参数同步采

集, 采样频率达100Hz, 数据传输延迟 $\leq 50\text{ms}$, 故障预警准确率 $\geq 97\%$; 应用上满足杰瑞AI·RFRAC系统、西南井下自动储供液系统等主流设备的测试需求, 支持“井工厂拉链式”压裂设备批量测试, 降低测试成本30%以上, 为设备出厂检验与在役维护提供标准化方案。

2.2 系统整体架构设计

系统采用“分层架构+模块化设计”模式, 自上而下分为感知层、传输层、数据层、应用层四层结构, 确保功能独立与协同高效。感知层作为数据采集终端, 部署振动传感器、压力变送器、流量传感器等28类设备, 柱塞泵关键部位安装高频振动传感器(采样率1kHz), 管汇系统采用耐高压压力变送器(量程0-120MPa), 输砂装置配备激光流量传感器; 传输层构建“5G+工业以太网”双链路, 井下作业区域依赖5G实现无线传输, 设备车间采用工业以太网保障稳定性, 通过边缘计算节点对数据进行预处理, 过滤噪声数据; 数据层采用“分布式数据库+时序数据库”组合存储, MySQL存储设备基础信息, InfluxDB存储时序性强的测试数据, 支持百万级数据高效查询; 应用层包含测试控制、数据评估、故障预警三大核心模块, 通过可视化平台集中展示, 支持测试方案自定义、实时曲线监控与历史数据追溯, 各层通过标准化接口通信, 确保架构扩展性, 可兼容未来新型压裂设备的测试需求^[2]。

2.3 核心功能模块方案设计

核心功能模块围绕“测试实施-数据处理-结果输出”全流程设计, 包含四大模块。测试控制模块实现工况模拟与流程管控, 通过高压动力系统调节压力至105MPa, 自动控制模块按预设方案启动泵车、调节输砂量, 支持“恒压模式”“恒排量模式”两种测试模式切换; 数据采集模块采用多通道同步采集技术, 23项参数通过传感器实时获取, 经信号调理电路转换为4-20mA标准信号, AD转换精度达16位, 确保数据准确性; 智能评估模块构建三级评估模型, 一级指标为设备整体性能, 二级分为动力、传输等维度, 三级对应具体参数, 采用加权评分法计算综合得分, 结合杰瑞故障诊断经验设置评估规则; 故障预警模块通过阈值判断与趋势分析双重机制, 当压力波动超 $\pm 5\%$ 或振动频率突增30%时立即触发预警, 推送故障位置与处理建议至管理人员终端, 同时支持预警历史查询与原因分析。各模块通过数据总线交互, 测试结束后自动生成包含指标达标情况、故障点分析的PDF报告。

2.4 系统接口与通信协议设计

系统接口与通信协议设计遵循“标准化、高兼容、

强实时”原则, 确保与自动化压裂设备及外部系统无缝对接。设备接口方面, 与压裂机组采用CAN总线接口通信, 支持SAEJ1939协议, 实现对柱塞泵转速、排量等参数的控制与采集; 与传感器采用485接口, 遵循Modbus-RTU协议, 简化接线与调试流程; 与外部管理系统设计RESTfulAPI接口, 支持测试数据向油田生产管理平台同步。通信协议采用分层设计, 物理层选用屏蔽双绞线降低干扰, 数据链路层采用CRC-16校验确保数据完整性, 网络层采用IPV4协议实现设备互联, 应用层针对不同场景优化: 实时控制指令采用UDP协议保障速度, 测试报告等大数据量传输采用TCP协议确保可靠。针对高压测试场景, 通信模块采用隔爆设计, 防护等级达IP67, 适应井场粉尘、潮湿环境; 同时预留5GNSA/SA双模适配能力, 支持未来网络升级, 确保在偏远井场等信号薄弱区域仍能稳定通信。

3 自动化压裂设备性能测试系统关键技术研究与应用

3.1 多传感器数据融合技术

多传感器数据融合技术作为提升测试精度的关键手段, 通过“三级融合”架构有效攻克了单一传感器数据偏差的难题。在数据级融合阶段, 针对同类型传感器采集的数据展开预处理。对于柱塞泵的振动数据, 运用卡尔曼滤波算法, 精准消除其中夹杂的噪声干扰, 让数据更加纯净; 压力数据则借助滑动平均法, 有效平滑波动, 保障原始数据的可靠性, 为后续分析奠定坚实基础; 特征级融合着重提取各传感器的关键特征, 像振动信号的频谱特征、压力信号的峰值特征等, 都被精准捕捉。采用D-S证据理论对这些特征信息进行融合处理, 巧妙解决不同传感器数据存在的不确定性问题^[3]。例如, 将振动频率与压力波动特征相结合, 综合判断密封件的磨损状态, 为设备健康评估提供有力依据; 决策级融合基于融合后的特征进行综合判断, 构建BP神经网络模型, 把融合的特征参数作为输入, 输出设备性能评估结果与故障类型。该模型经过杰瑞盘古泵500组故障数据的严格训练, 识别准确率高达97.8%。此技术应用后成效显著, 压力参数测量误差从传统单一传感器的 $\pm 1.2\text{MPa}$ 大幅降至 $\pm 0.3\text{MPa}$, 极大提升了测试数据的可信度与故障识别的精准度。

3.2 自动化控制技术

自动化控制技术采用“PLC+边缘计算”架构, 实现测试流程的精准高效管控。核心控制器选用西门子S7-1500系列PLC, 具备高速运算与强抗干扰能力, 通过PROFINET总线连接执行机构, 控制高压阀组调节压力、变频电机调节泵车转速, 响应时间 $\leq 100\text{ms}$; 开发自

适应控制算法,根据设备类型自动匹配测试方案,如针对电驱压裂设备优化启停曲线,避免启动冲击对柱塞泵造成损伤;边缘计算节点部署在测试现场,实时处理传感器数据并生成控制指令,减少云端传输延迟,当检测到压力接近105MPa额定值时,自动启动PID调节实现压力平稳上升,避免超压风险;设计人机交互界面,支持测试参数可视化设置、流程状态实时显示与手动干预操作,当出现紧急情况时,操作人员可通过急停按钮中断测试,系统自动泄压至安全压力。该技术应用使测试流程自动化率达95%,压力控制精度提升至 $\pm 0.3\text{MPa}$,满足高精度测试需求。

3.3 通信技术

通信技术构建“双链路冗余+边缘计算预处理”方案,解决井场复杂环境下的通信难题。针对井场无无线网络覆盖的场景,采用5G工业模组实现无线通信,支持增强移动宽带(eMBB)与超高可靠低时延通信(uRLLC)双模,下行速率达1Gbps,端到端延迟 $\leq 20\text{ms}$,满足实时控制需求;设备车间等固定场景采用工业以太网通信,通过光纤传输提升抗干扰能力,构建环网拓扑保障链路冗余,某一条链路故障时自动切换,切换时间 $\leq 50\text{ms}$;边缘计算节点部署在通信链路中端,对采集的传感器数据进行滤波、格式转换等预处理,剔除无效数据,数据压缩比达10:1,降低传输带宽占用;采用数据加密技术,传输过程中采用AES-256加密算法,设备接入需通过密钥认证,防止数据被篡改或窃取;在西南井下永页8平台测试中,该通信方案实现了18组设备的稳定通信,连续72小时无数据丢包,保障了测试工作的连续性^[4]。

3.4 故障诊断与预警技术

故障诊断与预警技术采用“阈值判断+趋势预测”双重机制,实现从“故障后维修”到“预警式维护”的跨越。基于杰瑞集团故障数据库,建立包含12类典型故障的特征库,如凡尔体刺漏对应“压力骤降+振动频率突

增”特征,管汇泄漏对应“压力异常降低+流量不匹配”特征;实时诊断模块将采集数据与特征库比对,采用余弦相似度算法计算匹配度,匹配度 $\geq 85\%$ 时判定为对应故障;趋势预测模块构建LSTM神经网络模型,输入近10分钟的参数时序数据,预测未来5分钟参数变化趋势,当预测压力将超阈值时提前触发预警;预警等级分为三级,一级预警(参数轻微波动)仅系统提示,二级预警(接近阈值)推送至管理人员手机,三级预警(超阈值)自动启动紧急停机程序。该技术在柱塞泵测试中,成功提前8分钟预警3次凡尔体刺漏故障,故障预判准确率达97.5%,大幅降低了设备损伤风险。

结束语

本文围绕自动化压裂设备性能测试需求,成功研制出一套功能完备的性能测试系统。通过多传感器数据融合、自动化控制、高效通信及精准故障诊断预警等关键技术的创新应用,系统在测试精度、效率及安全性方面取得显著突破。实际应用证明,该系统能精准模拟复杂工况,高效完成测试任务,大幅降低设备故障风险。其推广应用不仅提升了压裂作业的智能化水平,更为页岩气开发行业的安全高效发展注入了新动力,具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1]张启伦,刘荣伟,武春松,等.自动化设备对油气井压裂工程技术支持及发展趋势[J].石油天然气学报,2025,47(1):118-126.
- [2]杨保良,毛建伟,冉建.压裂供水自动化装置的研究与应用[J].设备管理与维修,2022(11):145-147.
- [3]马闯.油田压裂设备管理与维护保养措施[J].设备管理与维修,2022(5):54-55.
- [4]邴艳炜.井下压裂作业过程监测技术探析[J].化学工程与装备,2024,(04):68-70.