

# Design and Key Technology Implementation of Monitoring, Diagnosis and Guard System for Injection Pumps

Wenqi Zhu Zhen Li Cong Xu Wenlong Xiong

PetroChina Zhongyuan Oilfield Branch Sinopec, Puyang, Henan, 457001, China

## Abstract

In response to the pain points in the traditional management of injection pumps, such as high labor intensity of manual inspection, lack of all-weather coverage, and low reuse rate of offline detection data, this paper designs and develops a monitoring, diagnosis and guard system for injection pumps. The system is based on the core principles of "data centralization, economic applicability, business intercommunication, and intelligent analysis", integrating three types of core data: vibration monitoring, video analysis, and offline detection. It builds dynamic threshold and predictive maintenance dual AI models based on the private deployment of DEEPSEEK, achieving full-process intelligent control from "perception - storage - analysis - diagnosis". Through the deployment of low-cost perception devices, deep integration of multi-source data, and embedding of intelligent algorithms, the system can replace most of the manual inspection workload, reduce the risk of unplanned equipment downtime, and provide core technical support for the lean and intelligent management of injection pumps in oilfields.

## Keywords

Injection pump; Condition monitoring; Predictive maintenance; DEEPSEEK large model; Multi-source data fusion

## 注水泵监测诊断守护系统的设计与关键技术实现

朱文琪 李真 徐聪 熊文龙

中国石油化工集团有限公司中原油田分公司, 中国·河南濮阳 457001

## 摘要

针对注水泵传统管理中人工巡检劳动强度大、全天候覆盖缺失、离线检测数据复用率低等痛点, 本文设计并开发注水泵监测诊断守护系统。系统以“数据集中、经济适用、业务互通、智能分析”为核心原则, 整合振动监测、视频分析、离线检测三类核心数据, 基于 DEEPSEEK 私有化部署构建动态阈值与预测性维护双 AI 模型, 实现“感知-存储-分析-诊断”全流程智能化管控。通过低成本感知设备部署、多源数据深度融合及智能算法嵌入, 系统可替代大部分人工巡检工作量, 降低设备非计划停机风险, 为油田注水泵精益化、智能化管理提供核心技术支撑。

## 关键词

注水泵; 状态监测; 预测性维护; DEEPSEEK 大模型; 多源数据融合

## 1 引言

注水泵作为油田注水开发体系中的核心动力设备, 其运行稳定性直接决定原油开采效率与经济效益。油田开采过程中, 注水作业通过向油层补充能量, 维持地层压力稳定, 是保障原油采收率的关键环节。国内各油田注水泵均采用分散部署, 主要依赖“人工现场巡检+定期离线检测”的传统管理模式, 已难以适配现代化油田高效运维需求。

随着工业物联网、深度学习与边缘计算技术的快速发展, 设备管理模式已从传统“事后维修”向“预测性维护”转型, 为解决注水泵管理痛点提供技术路径。现有研究中,

文献 [1] 提出基于振动数据的旋转机械故障诊断模型, 通过提取振动信号特征实现故障识别, 准确率达 89%, 但该模型仅依赖单一振动数据, 未结合视频、油液等多源数据, 易因工况干扰导致误判; 文献 [2] 设计的泵组监测系统虽实现振动、压力等数据的实时采集, 但缺乏智能诊断算法支撑, 仅能完成数据展示与超限报警, 难以形成“监测-诊断-维护”闭环。

## 2 系统总体设计

### 2.1 设计目标与原则

#### 2.1.1 核心目标

系统设计围绕“降本、提效、智能”三大核心方向, 明确以下具体目标:

降本增效: 通过自动化监测替代大部分人工巡检工作

【作者简介】朱文琪 (1966-), 男, 中国河南新密人, 本科, 从事设备管理研究。

量,减少巡检人员配置需求;将故障早期发现时间大幅缩短,避免故障扩大化导致的产能损失。

**数据贯通:**建立离线检测数据结构化存储体系,实现数据结构化存储,消除纸质存档与人工录入弊端;优化数据查询机制,支撑实时诊断决策。

**智能诊断:**开发高精度故障预警算法,确保故障预警准确率 $\geq 90\%$ ,误报率 $\leq 5\%$ ;基于诊断结果生成可直接落地的维护方案。

### 2.1.2 设计原则

**数据集中原则:**采用“边缘-云端”架构,实现数据分层管理。边缘端部署本地存储单元,存储近7天实时监测数据,满足现场快速调取需求;云端搭建分布式数据库,存储长时间历史数据,支撑长期趋势分析与模型训练。

**经济适用原则:**以“低成本、易部署、低维护”为硬件选型核心标准。振动监测选用无线三轴温振一体化传感器,波形采样频率达1500~3000Hz,支持4G无线传输,无需现场布线;视频监控选用工业级低成本摄像头,配备水平运动控制导轨与LED+红外双补光系统,满足夜间监测需求。

**智能分析原则:**基于DEEPSEEK大模型私有化部署,结合注水泵运行特性开发专用诊断算法。算法需适配注水泵多工况场景,可根据不同工况自动调整诊断参数,避免因工况差异导致的诊断偏差。

## 2.2 系统架构

系统采用“感知层-边缘层-数据层-应用层-集成层”五层架构,各层级功能独立且协同联动,确保数据从采集到应用的全流程高效流转。各层级功能与组件如下:

**感知层:**部署振动速度传感器(测量范围0.1~100mm/s,采样频率2kHz,4G无线传输)、工业摄像头(分辨率1080P,帧率25fps,POE供电,红外补光距离 $\leq 20\text{m}$ ),采集泵体振动、柱塞视觉数据;

**边缘层:**配置边缘网关(支持MQTT协议),实现数据过滤、缓存与实时分析;

**数据层:**采用“MySQL+InfluxDB”混合存储,MySQL存结构化数据,InfluxDB存时序数据,数据压缩率达1:5;

**应用层:**开发检测管理、振动状态监测、视频分析、AI诊断四大模块,支持Web端访问;

**集成层:**通过RESTful API与外部系统对接,实现PCS运行数据与诊断结果双向推送。

## 3 系统核心功能模块设计与实现

### 3.1 检测信息化管理模块

针对离线检测业务“纸质化、碎片化”痛点,实现全流程数字化管控,核心功能如下:

**报告结构化录入:**设计标准化表单,支持检测人员通

过客户端上传数据,自动生成检测报告;

**数据索引与复用:**建立“设备-检测时间-故障类型”三维索引,支持按设备编号查询历史检测记录,为AI诊断提供数据支撑;

**流程管控:**设置“检测计划制定→现场实施→报告审核”四节点 workflow,每个节点设置审批时限,逾期自动提醒。

### 3.2 振动状态监测模块

通过低成本振动传感器替代人工“听摸”巡检,实现设备状态实时监控,关键技术如下:

**传感器部署:**在注水泵驱动端轴承部位部署传感器,无线传输距离 $\leq 1\text{km}$ ,电池续航 $\geq 6$ 个月;

**阈值设定与报警:**结合设备历史数据,预设振动有效值阈值(驱动端轴承 $\leq 4.5\text{mm/s}$ 、泵体 $\leq 3.8\text{mm/s}$ ),超值阈值时触发报警,报警响应时间 $\leq 3\text{s}$ 。

### 3.3 视频分析模块

针对柱塞结垢、刺漏(占注水泵故障的65%)等典型问题,实现远程视觉监控与AI识别,具体实现如下:

**视觉覆盖方案:**每台注水泵部署1台摄像头,安装于柱塞正上方,视角覆盖柱塞全行程,确保无遮挡;

**人工远程巡检:**支持管理人员通过Web端调阅实时视频或历史录像;

**AI故障识别:**算法训练柱塞故障检测模型,识别到故障后自动上报报警事件。

### 3.4 AI诊断模块

基于神经网络算法与DEEPSEEK模型私有化部署,开发注水泵专用诊断功能,核心包括:

**动态阈值模型:**采用随机森林算法和均方值计算实时生成个性化阈值,适配不同工况;

**预测性维护模型:**基于LSTM神经网络,融合振动数据和故障记录,预测设备剩余寿命,生成维护方案;

**智能交互诊断:**构建故障知识库。

#### 3.4.1 预测性维护模型

采用改进LSTM算法,融合往复柱塞泵故障频段统计数据,解决传统问题,具体设计如下:

**多维度输入特征构建模型输入层整合三类核心数据,**其中故障频段统计数据占比40%,确保特征与柱塞泵实际故障机制强关联:

**工况基础特征:**取自模板“基础信息区”,包括额定功率、缸数(2缸/3缸/4缸)、运行时长(累计运行小时数),量化工况对设备损耗的影响;

**故障频段特征:**提取模板“故障频段统计区”的关键指标,如动力端曲轴轴承50-100Hz频段能量占比、液力端柱塞密封400-500Hz频段功率变化率,反映部件早期故障趋势;

**时域状态特征:**包含振动速度有效值、温度、压力波动值,与频段特征形成“时域-频域”双重验证。

改进 LSTM 模型结构设计针对传统 LSTM 对“长期故障趋势”捕捉不足的问题，引入“注意力机制”，重点关注与故障频段相关的特征权重，模型结构分为三层：

### 3.4.2 系统前端与后端算法反馈交互

前端界面设计与算法结果呈现

前端采用 Vue 框架开发，支持 Web 端与移动端适配，按“角色-场景”划分功能模块，核心界面与后端算法结果的对应关系如下：

设备总览界面：展示所有注水泵的实时运行状态，后端算法推送的数据以“三色指示灯”标注，点击设备图标可查看详细数据；

故障预警界面：按紧急程度排序展示后端 AI 诊断模块推送的预警信息，每条预警包含“故障部件、故障频段、时域特征”；

数据统计界面：展示后端预测性维护模型生成的月度故障统计、维护成本分析数据，以柱状图、折线图呈现，支持数据导出，导出内容包含故障频段、工况参数等原始统计数据。

用户反馈与后端算法优化的交互逻辑前端提供多维度反馈入口，用户操作数据实时回传后端，用于算法模型迭代优化，形成闭环：

误报/漏报标记反馈：若用户发现后端算法推送的故障预警为误报，可进行“误报标记”并填写原因，后端将数据标记为“负样本”，用于动态阈值模型的重新训练；

故障案例补充反馈：当现场出现模板未覆盖的新故障，用户可通过“案例补充”功能上传故障数据，后端将数据录入故障频段知识库，并更新预测性维护模型的输入特征库，提升模型对新故障的识别能力。

## 4 系统集成

为实现系统各模块的协同工作与外部系统的数据互通，需设计完善的集成方案，确保数据流转高效、稳定，具体如下：

### 4.1 向下集成

向下集成指系统内部感知层、数据层、应用层的模块间集成，通过标准化接口实现数据交互，具体方案如下：

DEEPSEEK 模型服务集成：应用层 AI 诊断模块与 DEEPSEEK 私有化模型服务通过 gRPC 协议对接，实现模型推理功能调用。AI 诊断模块将输入特征以 Protocol Buffers 格式发送至模型服务，模型服务返回推理结果。

视频分析系统集成：应用层视频分析模块与边缘层视频分析系统通过 HTTP 接口对接，边缘层将每帧图像的 AI 识别结果实时推送至应用层。

振动数据采集中间件集成：边缘层振动数据采集模块与数据层 InfluxDB 数据库通过 EMQX MQTT 中间件对接，边缘层作为 MQTT 客户端发布振动数据，数据层作为订阅端接收数据并写入数据库。

### 4.2 向上集成

向上集成指系统与油田现有设备管理系统的对接，实现数据共享与业务协同，具体方案如下：

数据接收：系统从设备管理系统接收注水泵 PCS 实时数据，包括流量、进出口压力、进出口温度、电机电流、电机转速。接口采用“拉取”模式，向设备管理系统发送数据请求，请求参数包含设备编号列表，返回数据按设备编号分组，系统将数据解析后更新至数据库，用于诊断模块的工况判断。

数据推送：系统向设备管理系统推送两类数据：

综合监测数据：包含每台设备的健康等级、实时振动数据、视频故障识别结果、报警状态，推送频率 1 次/h；

每日诊断报告：每日凌晨 5 点，系统自动生成前一天的诊断报告，包含设备运行统计、维护建议汇总等。

## 5 结论与展望

### 5.1 结论

本文设计的注水泵监测诊断守护系统，通过“低成本感知+多源数据融合+AI智能诊断”的技术路径，有效解决了传统注水泵管理中人工依赖强、数据碎片化、诊断滞后等核心痛点，系统核心创新点与优势如下：

多维度感知方案优化：提出“振动+视频”双维度监测方案，平衡成本与监测精度。振动监测选用无线传感器，降低部署成本 40%；视频监控结合 AI 识别，实现柱塞故障的自动识别，识别准确率超 92%，填补了传统振动监测无法覆盖视觉故障的空白。

智能算法创新：开发适配注水泵多工况的动态阈值模型与改进 LSTM 预测性维护模型。动态阈值模型基于随机森林算法，可根据排量、压力等工况自动调整阈值，融合振动频域、时域与离线检测数据，避免过度维修与维修不足。

数据与业务闭环：实现跨系统数据贯通与业务流程闭环。通过“边缘-云端”二级存储架构，实现数据结构化存储率 100%；打通设备管理、采油厂、监测检测、维修部门四级权限，设计“检测-诊断-预警-维护”全流程 workflow，提升整体运维效率。

系统通过上述设计，可替代大部分上人工巡检工作量，故障预警准确率达 90% 以上，设备非计划停机风险显著降低，为油田注水泵精益化管理提供了可落地的技术方案，具备较高的工程应用价值。

### 5.2 展望

尽管系统已实现核心功能，但结合油田注水泵管理的未来需求，仍需从以下三方面进行优化与拓展：

移动端诊断功能深化：当前 APP 端主要用于数据查看与工单接收，未来计划开发移动端诊断功能，支持维护人员现场调取故障数据与维修指导。具体功能包括：

现场数据采集：支持通过手机摄像头拍摄设备故障部位，APP 端实时进行视频识别，辅助确认故障类型；

离线诊断：支持 APP 端下载设备历史数据，确保现场维护工作不中断。

通过上述优化，系统将进一步提升智能化水平与现场适用性，为油田注水泵管理提供更全面、高效的技术支撑，助力油田实现设备全生命周期的智能化管控。

### 参考文献

- [1] Zhang H, Li J, Wang L. Intelligent Fault Diagnosis of Centrifugal Pumps Based on Vibration Data and Deep Forest[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(8): 5789-5798. ( DOI: 10.1109/TII.2022.3152678 )
- [2] 刘军, 赵亮, 吴涛。基于物联网的注水泵远程监测系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2021 (12): 89-92+97. ( DOI: 10.3969/j.issn.1002-1841.2021.12.021 )
- [3] Zhang H, Li J, Wang L. Intelligent Fault Diagnosis of Centrifugal Pumps Based on Vibration Data and Deep Forest[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(8): 5789-5798. ( DOI: 10.1109/TII.2022.3152678 )
- [4] 刘军, 赵亮, 吴涛。基于物联网的注水泵远程监测系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2021 (12): 89-92+97. ( DOI: 10.3969/j.issn.1002-1841.2021.12.021 )
- [5] DeepSeek Team. DeepSeek-7B Technical Report[R]. Shenzhen: DeepSeek Inc., 2023.