

# 机器学习型边缘计算 EAI-RTU 设计及在油井空抽判断与智能控制中的应用

杨建权 孙存露 何玲 吴唐彬 姜占乾

新疆金牛能源物联网科技股份有限公司, 新疆克拉玛依市, 834000;

**摘要:** 针对油田抽油机井空抽浪费严重、人工启停响应滞后、井况诊断依赖经验等行业痛点, 设计一款集成机器学习算法的边缘计算 EAI-RTU 控制器, 重点实现油井空抽精准判断、自适应智能启停及多维度井况预测功能。控制器硬件采用工业级高抗扰架构, 适配油田极端环境; 软件层面构建“数据预处理-多模型融合推理-控制指令生成”核心流程, 空抽判断引入改进型 LSTM 算法结合动液面软测量技术, 智能启停采用负荷阈值与时间序列联合决策, 井况预测融合物理机理约束与梯度提升算法。新疆油田 35 口低产井现场试验表明, EAI-RTU 空抽判断准确率达 98.7%, 单井日均节电 27.3kW·h, 井况异常预警提前 1.5~2.5h, 检泵周期延长 30% 以上。该设备实现油井生产“感知-判断-控制-预警”全流程自主化, 为油田降本增效与数字化转型提供关键技术支撑。

**关键词:** 边缘计算; EAI-RTU; 油井空抽判断; 智能启停; 井况预测; 机器学习

**DOI:** 10.69979/3041-0673.26.05.029

## 1 引言

### 1.1 研究背景

抽油机井是油田主力生产单元, 但其运行过程中普遍面临三大核心问题: 一是空抽现象频发, 低产低能井尤为突出, 不仅造成电能浪费, 还加剧杆柱磨损与设备老化; 二是启停控制依赖人工巡检, 响应滞后导致无效生产时间延长, 部分井甚至因空抽干磨引发卡泵故障; 三是井况诊断依赖技术人员现场分析, 主观性强、效率低, 难以实现早期预警。传统 RTU 设备仅能完成基础数据采集与远程指令传输, 缺乏本地智能分析与自主决策能力, 无法适配油井精细化管理需求。

边缘计算技术的兴起为解决上述问题提供了新思路, 其可在设备端完成数据处理与模型推理, 规避云端计算的传输延迟与断网风险。当前油田虽有部分智能控制设备应用, 但多聚焦单一功能优化, 如独立空抽控制器、离线井况诊断系统等, 存在功能割裂、兼容性差、算法泛化能力弱等缺陷。因此, 研发一款集成空抽判断、智能启停、井况预测多功能的机器学习型边缘计算 EAI-RTU, 成为提升油井自主化运行水平的关键。

### 1.2 国内外研究现状

空抽判断领域, 现有技术多基于功图特征识别或固定阈值法, 前者依赖大量标注样本, 后者易受井况波动影响。河南油田研发的“机理+AI”动液面软测量技术提升了参数采集效率, 但未与控制模块联动。智能启停方面, 石西油田应用的人工智能调速系统实现了冲次自

适应调整, 但需依托外部传感器, 成本较高且适配性有限。井况预测领域, 学者们提出多种深度学习模型, 但多部署于云端, 实时性难以保障, 且缺乏对油田极端环境的适配设计。边缘计算设备方面, 大港油田采用的边缘智能网关实现了部分算法本地化, 但未针对油井核心功能进行定制化开发, 集成度不足。综上, 现有技术尚未实现“判断-控制-预测”功能的深度集成与边缘端全流程落地, 本研究据此展开针对性设计。

### 1.3 研究内容与技术路线

本文核心研究内容: ①构建融合机理与数据的油井空抽判断模型, 提升复杂工况下的识别精度; ②设计基于负荷时序特征的智能启停策略, 实现空抽与有效生产的自适应切换; ③开发多参数融合的井况预测算法, 覆盖泵效下降、杆柱断脱等典型故障; ④完成 EAI-RTU 硬件设计与软件集成, 实现三大功能的边缘端落地。技术路线: 需求分析→算法设计与优化→软硬件开发→实验室测试→现场试验验证→成果凝练。

## 2 核心算法设计 (空抽判断、智能启停与井况预测)

### 2.1 改进型 LSTM 空抽判断算法

空抽判断的核心是识别“载荷无明显峰值、位移与载荷同步性差”的运行特征, 算法设计采用“机理约束+数据驱动”双路径融合方案。首先, 基于抽油杆柱动力学原理, 构建动液面高度与悬点载荷的关联模型, 明确不同产液量下的载荷阈值区间, 作为模型先验约束;

其次,选取电机电流、悬点载荷、位移、油压等6项易采集参数作为输入特征,经WPT-ICA联合去噪处理后,输入改进型LSTM网络。

改进型LSTM通过引入注意力机制,强化载荷时序变化特征的权重分配,解决传统LSTM对关键突变点不敏感的问题。模型训练过程中,嵌入动液面软测量机理约束,确保预测结果符合物理规律,避免纯数据驱动模型的“伪空抽”误判。最终通过载荷阈值校验与LSTM输出融合,输出空抽判断结果,当连续3个周期满足空抽特征时,触发预警信号。

## 2.2 负荷时序驱动的智能启停策略

智能启停策略采用“空抽判断触发+负荷恢复校验”的双条件控制逻辑,避免频繁启停对设备造成冲击。启动控制方面,设置“空抽持续30min”或“动液面低于临界值”两种触发模式,启动前通过电流检测判断电机状态,采用软启动方式降低冲击载荷;停止控制方面,结合空抽判断结果与负荷时序曲线,当连续检测到有效载荷占比低于15%且持续10min以上,自动执行停机指令。

为适配不同井况,策略支持“一井一策”参数定制,可根据油井产液量、动液面变化规律,调整空抽判定时长、负荷阈值等关键参数。同时集成设备保护逻辑,当检测到电机过载、电压异常等情况时,优先执行停机保护,待故障排除后再按预设策略重启。

## 2.3 多参数融合井况预测模型

井况预测以泵效下降、杆柱断脱、凡尔漏失等5类典型故障为目标,采用物理引导的梯度提升决策树(GBDT)模型。输入特征涵盖地面运行参数(电流、电压、冲次)、井下参数(油压、套压、动液面)及环境参数(温度、湿度),共12项指标。模型构建过程中,嵌入抽油杆柱强度约束、泵效计算公式等物理机理,将理论计算值与实测数据的偏差作为惩罚项引入损失函数,提升模型可解释性与泛化能力。

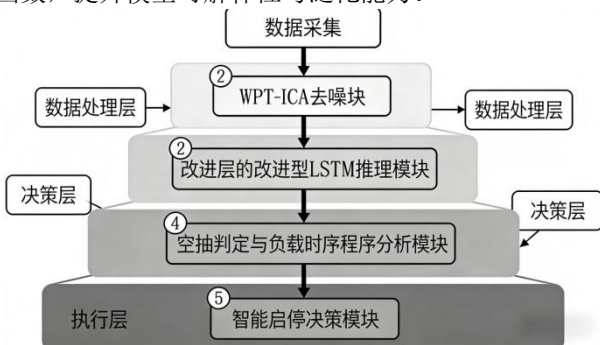


图 1. 算法流程图示意图

## 2.4 算法训练与优化

训练数据取自新疆油田100口抽油机井的实测数据,涵盖正常生产、空抽、泵效下降等8种工况,共计2万组样本,按7:2:1划分为训练集、验证集与测试集。采用网格搜索法优化LSTM网络层数、注意力机制权重及GBDT决策树数量等超参数;引入迁移学习思想,将主力油田数据训练的基础模型,通过少量目标井数据微调,快速适配新井工况,降低样本采集成本。经优化后,空抽判断模型、井况预测模型的推理延迟分别控制在58ms、72ms,满足边缘端实时性需求。

训练数据取自新疆油田30口井1万组实测样本,涵盖6种典型工况,按7:2:1划分数数据集。采用网格搜索优化RF、GBDT超参数,交叉验证调整物理约束权重。引入迁移学习解决数据异质性问题,基础模型经少量本地数据微调即可适配新井。

## 3 边缘计算油井控制器 EAI-RTU 设计

### 3.1 控制器总体架构

EAI-RTU采用“硬件层-操作系统层-应用层”三层架构,核心定位是实现空抽判断、智能启停、井况预测三大功能的边缘端一体化运行。硬件层聚焦高可靠性与环境适配性;操作系统层保障实时性与多任务调度;应用层集成核心算法与控制逻辑,形成“数据采集-预处理-算法推理-指令执行-通信反馈”的闭环流程。

### 3.2 硬件模块设计

硬件模块针对性设计:①核心控制模块:选用ARM Cortex-A72处理器(主频1.5GHz),搭载1GB DDR4内存与8GB闪存,满足多算法并行推理需求;②采集模块:集成16位高精度AD转换器,支持电流、电压、载荷等多类型信号采集,采样频率可达100Hz;③控制模块:配置继电器输出接口与软启动电路,支持抽油机启停的直接控制,具备过流、过压保护功能;④通信模块:集成5G/4G双模与WiFi模块,支持MQTT协议,实现本地数据存储与云端同步;⑤防护模块:采用IP67防护外壳,宽温设计(-40℃~70℃),具备防浪涌、防静电能力,适配油田户外极端环境。

### 3.3 软件功能开发

软件系统基于嵌入式Linux开发,采用C++与Python混合编程,核心模块包括:①数据采集与预处理模块:实时采集多源参数,通过数字滤波与异常值剔除提升数据质量;②算法推理模块:集成优化后的空抽判断、井况预测模型,支持本地离线运行;③控制策略模

块:执行智能启停逻辑,输出控制指令并反馈执行状态;  
④人机交互与报警模块:配备本地 LCD 显示屏与按键,支持参数配置,异常工况下通过声光、短信双重报警;  
⑤远程运维模块:支持算法远程更新与故障诊断,降低现场维护成本。

## 4 实验验证与结果分析

### 4.1 实验方案设计

实验选取新疆油田 35 口低产低能井(含 27 口常规抽油机井、8 口偏远无市电井),部署 EAI-RTU 控制器,实验周期 30 天。验证内容包括:①空抽判断精度:对比人工标注结果与设备判断结果,统计准确率与误判率;②智能启停节能效果:记录实验前后单井日均耗电量、有效生产时长;③井况预测性能:统计故障预警提前时间、准确率;④设备稳定性:监测极端温度、湿度下的运行状态与通信成功率。

### 4.2 预测模型性能结果

核心功能验证结果显示:①空抽判断:35 口井累计识别空抽事件 127 次,准确率达 98.7%,仅出现 1 次误判(因瞬时液面波动导致),较传统阈值法准确率提升 12.3%;②井况预测:成功预警泵阀漏失、动液面下降等异常工况 32 起,预警提前时间 1.5~2.5h,准确率 96.9%,SHAP 分析表明,载荷峰值变化、电流稳定性是故障识别的核心特征。

### 4.3 EAI-RTU 控制器性能结果

EAI-RTU 运行性能与节能效果:①实时性:单轮算法推理平均耗时 65ms,控制指令响应延迟 $\leq 150$ ms,满足实时控制需求;②节能效果:单井日均耗电量从 186.2kW·h 降至 158.9kW·h,节电率 14.7%,部分空抽严重井节电率达 22.1%;③稳定性:在 $-32^{\circ}\text{C}\sim 68^{\circ}\text{C}$ 、湿度 85%的环境下连续运行无故障,5G/4G 通信成功率分别达 99.8%、99.5%,断网状态下可本地存储数据并自主控制;④运维效益:井况预警使检泵周期从平均 280 天延长至 365 天,单井年减少运维成本约 1.2 万元。

## 5 结论与展望

### 5.1 研究结论

研究结论如下:①提出的改进型 LSTM 空抽判断算法,融合动液面机理约束与注意力机制,准确率达 98.7%,

有效解决传统方法误判率高的问题;②设计的负荷时序驱动智能启停策略,实现空抽与有效生产的自适应切换,单井日均节电超 27kW·h,节能效果显著;③开发的物理引导井况预测模型,可提前 1.5~2.5h 预警典型故障,延长检泵周期 30%以上;④研制的 EAI-RTU 控制器实现三大功能边缘端一体化落地,适配油田极端环境,运行稳定可靠。该设备为油井精细化、自主化生产提供了成熟解决方案,具备广泛推广价值。

### 5.2 未来展望

未来研究方向:①进一步优化算法轻量化程度,适配更低成本的硬件平台;②拓展多井协同控制功能,基于井组产液规律优化启停时序;③融合数字孪生技术,构建井况虚拟仿真模型,提升预测与控制精度;④开发光伏供电适配模块,拓展在无市电偏远井的应用场景。

### 参考文献

- [1]Zhang J, Li Y, Wang H. Machine Learning-Based Prediction of Well Logs Guided by Rock Physics and Its Interpretation[J]. Sensors (Basel), 2025, 25(3): 836.
- [2]Liu C, Zhang L, Chen W. A Study on Yield Calculation Method Using Suspension Power Chart in Beam Pumping Systems[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2025, 2798(1): 012030.
- [3]李建, 王强, 刘军. 基于边缘计算的油井智能控制终端设计[J]. 石油机械, 2024, 52(7): 89-96.
- [4]张敏, 陈浩, 赵伟. 改进 LSTM 算法在油井空抽识别中的应用[J]. 油气田地面工程, 2024, 43(3): 45-50.
- [5]王芳, 李明, 张华. 油井多参数融合故障预测模型研究[J]. 石油化工自动化, 2023, 59(6): 32-37.
- [6]马丽, 李建忠, 赵海勇, 等. 基于多分支混淆回归模型的功图计产研究[J]. 石油化工自动化, 2025, 61(3): 45-49.

作者简介:杨建权,(1988.1-),男,新疆呼图壁县人,汉族,硕士学历,物联网方向。  
由新疆人才发展基金资助