

人工智能驱动抽油机故障智能预警

韩建军

中国石化集团胜利油田东胜精攻石油开发有限责任公司高青采油管理区, 山东 东营 257000

DOI:10.61369/ETQM.2026070014

摘 要 : 抽油机是油田原油开采的核心关键设备, 井下复杂多变的开采工况, 极易引发卡泵、泵漏、泵充不满等渐进式设备故障, 传统故障诊断方法过度依赖人工经验, 存在效率低下、易受外界干扰、无法实现多参数耦合分析等问题, 难以捕捉故障早期微弱异常信号, 完全不具备主动预警能力, 极易导致故障扩大化, 影响油田稳产。针对上述痛点, 本文依托人工智能技术优势, 构建了一套完善的抽油机故障智能预警技术体系, 重点围绕全维度多源数据采集与标准化预处理、深度学习故障深层特征自主提取、故障演化趋势预测与分级预警、预警模型动态自学习与实时优化四大核心技术展开研究。为推动石油开采行业数字化与智能化转型发展, 提供参考性建议, 具有重要的工程实践与应用价值。

关 键 词 : 人工智能; 抽油机故障; 智能预警

Artificial Intelligence-Driven Intelligent Early Warning for Pumping Unit Failures

Han Jianjun

Dongsheng Jinggong Petroleum Development Co., Ltd. Shengli Oilfield, Sinopec Group Gaoqing Oil Production Management Area, Dongying, Shandong 257000

Abstract : Pump units serve as critical infrastructure in oilfield crude oil extraction. The complex downhole operating conditions frequently trigger progressive equipment failures such as pump jamming, leakage, and suboptimal filling. Traditional fault diagnosis methods over-rely on manual experience, exhibiting low efficiency, susceptibility to external interference, and inability to perform multi-parameter coupling analysis. These limitations hinder early detection of subtle fault signals and lack proactive warning capabilities, often leading to fault escalation that compromises stable oilfield production. Addressing these challenges, this study leverages artificial intelligence technologies to establish a comprehensive intelligent fault prediction system for pump units. The research focuses on four core technologies: multi-source data acquisition with standardized preprocessing, deep learning-based autonomous fault feature extraction, predictive analysis of fault evolution trends with tiered warning mechanisms, and dynamic self-learning optimization of warning models. This work provides actionable recommendations for advancing digital and intelligent transformation in petroleum extraction industries, demonstrating significant practical engineering value.

Keywords : artificial intelligence; pumping unit failure; intelligent early warning

前言

抽油机是油田原油开采的关键设备, 井下工况复杂使其易出现卡泵、泵漏等渐进式故障, 传统诊断方法依赖人工、效率低且无预警能力。随着人工智能技术发展, 其在故障特征提取、趋势预测上的优势逐渐凸显, 构建智能预警体系成为油田高效稳产的重要方向, 具有重要的工程实践价值。

一、抽油机运行特性与故障演化的预警基础

抽油机由动力电机、减速器、四杆机构等核心部分构成, 通过运动转换带动井下抽油泵完成原油举升, 其运行状态可通过地面参数、示功图等体现, 为故障预警提供物理基础。抽油机故障

呈渐进式演化, 如卡泵、泵漏、充不满等均有渐变过程, 具备预警价值。当前油田主要采用地面功图十字诊断法、声波判断法、参数量化分析法诊断故障, 但传统方法依赖经验、易受干扰、无法多参数耦合分析、阈值固定且效率低, 难以捕捉早期异常, 无法满足智能预警需求, 易导致故障扩大^[1]。

作者简介: 韩建军 (1979.06-), 汉族, 山东省潍坊市人, 本科, 职称: 助理工程师, 研究方向: 石油工程。

二、人工智能驱动抽油机故障智能预警的核心技术体系

（一）全维度多源数据采集与标准化预处理技术

高质量的全维度数据是人工智能预警模型实现精准预警的基础，构建覆盖抽油机全运行流程的多源数据采集体系，是实现故障智能预警的首要环节。数据采集体系需要覆盖三大类核心数据，第一类是抽油机的动力运行数据，包括电机的三相电流、电压、功率、功率因数等实时监测数据，这类数据可直接反映抽油机的负载变化情况，是捕捉井下工况异常的核心依据。第二类是油井的生产运行数据，包括井口回压、井口温度、原油产量、含水率、沉没度等连续监测数据，这类数据可直接反映油井的生产状态与泵效变化，是判断井下工况的重要补充。第三类是工况诊断核心数据，也就是抽油机的地面示功图与井下示功图数据，示功图直接反映了抽油泵柱塞在整个冲程中的负载变化情况，是判断泵况的核心载体，也是人工智能模型提取故障特征的核心对象。实时采集到的原始数据需通过标准化预处理流程，初始阶段需完成数据异常值和缺失值的修正与填补，去除由设备异常和通信中断产生的无效数据，而后对量纲不统一的各维度数据执行标准化调整，消除数据幅值差异对建模的干扰，针对示功图数据开展格式转换、去噪优化及形态标准化工作，最终形成可供特征提取与模型训练直接使用的标准化优质数据集，采用全维度多源数据的获取与预处理，实现抽油机工作状态的完整时空维度数字建模，为 AI 故障预警机制识别初始阶段的微弱异常提供数据支撑^[2]。

（二）采用深度学习的故障深层特征自主提取方案故障起始阶段的异常迹象普遍较弱

并淹没在海量正常工况数据里，既有方法难以实现这类深层特征的可靠提取，深度学习展现出卓越的非线性处理与特征自动捕获性能，可有效检测故障进程里的精细特征波动，成为智能预警不可或缺的技术支柱，针对抽油机各类数据的差异特性，可采用分门别类的深度网络模型实现特征捕获，就示功图这类图形化数据而言，采用 CNN 网络框架，经过卷积与池化的多级迭代，实现示功图形状特征的自动捕获，如增载卸载线相对位移、功图面积伸缩以及特征拐点位置迁移等指标，与人工提取方式相比，通过卷积层可发现人工观察遗漏的细微结构差异，灵敏捕捉示功图早期故障的微弱信号。就电流、压力和温度这类时序信号而言，采用 LSTM 模型框架，此类网络擅长学习时序信号中的跨时段依赖模式，反映参数的时变发展模式，提取参数变化的速度指标、波动强度及偏移趋势等时序要素，揭示量化手段无法观测的早期偏离现象^[3]。也可采用多模态联合网络架构，建立示功图视觉模式与多元时序特征的跨模态耦合，深入挖掘多维数据间的关联特性，构建覆盖全维度的特征空间，弥补仅用单一数据特征时识别不准的短板，显著强化对初期故障细微异常的辨识灵敏度，采用深度学习实现故障特征智能提取，彻底无需人工经验介入，可对故障演化全程特征进行不间断跟踪，从而支撑后续的趋势预测与预警功能实现。

（三）故障演化趋势预测与分级预警模型构建

在完成故障特征提取的基础上，构建精准的故障演化趋势预

测模型与分级预警体系，是实现人工智能驱动故障智能预警的核心环节。趋势预测模型以深度学习提取的连续工况特征为输入，以历史故障案例的演化全周期数据为训练样本，采用时序预测网络架构，学习不同故障类型的演化规律，预测未来一段时间内抽油机工况的变化趋势，输出故障发生的概率与预计发生时间。针对卡泵、泵漏、充不满等不同类型的故障，分别构建专属的预测子模型，每个子模型都基于对应故障的大量历史演化数据进行训练，充分学习该类故障从早期异常到完全失效的全周期特征变化规律，确保预测结果的针对性与准确性。在趋势预测的基础上，构建分级预警体系，根据故障发生的概率、预计发生时间、对生产的影响程度，将预警划分为不同的等级，不同等级对应差异化的处置策略^[4]。低等级预警对应故障早期的微弱异常，此时故障发生概率较低，演化周期较长，预警系统可自动提示运维人员加强该井的工况跟踪，调整生产参数延缓故障发展；中等级预警对应故障特征已较为明显，故障发生概率较高，预计在数天内发生，系统可自动生成处置建议，提示运维人员提前安排热洗、碰泵等预防性作业；高等级预警对应故障即将发生，此时故障特征已非常显著，系统立即发出紧急预警，提示运维人员立即采取措施，避免非计划停机。通过趋势预测与分级预警的结合，实现了从被动故障诊断到主动提前防控的转变，完全颠覆了传统的事后处置模式，可最大限度降低故障带来的损失。

（四）阶段预警模型的动态自学习与实时优化体系

采油井的工况参数呈现持续变化特征，各油井的储层条件、原油组分、设备性能与开采制度存在明显不同，同一油井的生产状况随开发时间推移呈现动态变化，既定预训练模型对油田全域油井的动态特性缺乏适应能力，因而必须设计可在线迭代的预警模型自我优化方案，保持模型持续应用时的预测精准性。该机制通过油井运行监测数据与运维响应联动采集，实时补充模型的案例数据库，当运维人员完成预警处置且判定故障种类后，该异常数据及其处置记录被系统自动纳入训练样本库，送入模型实现增量学习，实现模型对故障特征与演变规律的持续迭代，同步油井工况实时变化^[5-6]。针对油井的个体差异性，采用模型迁移技术，依托全油田标准化预警模型进行权重初始化，结合该井历史工况数据与故障案例进行训练，生成符合单井运行参数的个性化预警模型，应对油井间工况差异造成的模型迁移能力局限，该模型能够依据油井生产参数变动、地层产能波动及设备维护情况，实时调校警报阈值同关键因子权值，实现预警阈值的自适应优化，降低静态预警标准引起的误报漏报风险，采用在线自主学习及动态优化方法，伴随运行时间累积，系统预警性能呈现渐进式提升，可稳定适应油田作业环境的动态复杂性，实现预警系统长期平稳运行的技术支持。

三、抽油机典型故障的智能预警技术应用分析

（一）卡泵故障的人工智能提前预警

卡泵问题在抽油机运行故障中占据较大比重，主要触发因素有井筒蜡堵、杂质滞留及杆管几何畸变，在各类卡泵诱因中蜡堵占比居冠，此类故障呈现出明显的渐进发展特性，通过 AI 建模可实现精准的早期预警，按照既往操作惯例，卡泵故障的判定主要

依赖电流突变或示功图明显偏差，常规热洗等处理手段这时往往难以解决问题，只能采取检泵手段，导致开采作业长时间停顿及产量下滑。采用多源数据融合的 AI 预警系统，发现卡泵故障初始阶段的微弱异常迹象，实现故障前数日到数十日的早期预警，采用 LSTM 技术，系统实时分析电机电流的连续变化趋势，获取电流的缓变上升模式与振幅波动演化规律，利用卷积神经网络捕捉示功图因摩擦阻力增大而产生的细微形貌变化，结合井口温度及回压等参数的协同演变，评估井筒内结蜡或杂质沉积的进展状况，评估卡泵故障的生成几率及时间轨迹。系统捕捉到结蜡趋势升至预警水平之际，可实时推送预警警报，指导现场团队执行热洗清堵作业，实施预防性热洗处理以消除井筒蜡质沉积，切实阻断卡泵故障链，实测数据佐证，基于 AI 的预警技术将卡泵故障发生率削减了 80% 以上，非预期停产时长与设备检修频次明显下降，大幅优化了油井的生产时效。

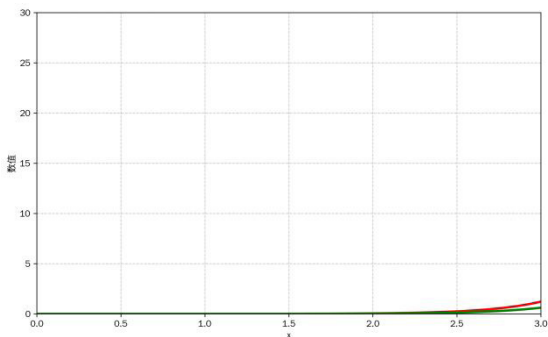


图1 发生卡泵后的功图

（二）泵漏故障的人工智能早期识别与预警

泵漏故障主要分为游动凡尔漏失与固定凡尔漏失两类，是引发抽油机泵效下降的主要原因，传统模式下只能通过示功图的显著异常、产量的明显下降判断已经发生的泵漏故障，此时漏失已经较为严重，往往需要检泵作业才能修复，造成了大量的产量损失^[7]。人工智能预警系统可实现泵漏故障的早期识别与提前预警，在凡尔出现轻微磨损、漏失量较小时就捕捉到异常信号，为预防性处置争取充足的时间。系统通过多模态融合网络，综合分析示功图的形态变化、井口压力与温度的变化趋势、电机运行电流的波动特征、产量的小幅变化等多维度数据，提取泵漏故障早期的深层特征。针对游动凡尔漏失与固定凡尔漏失的不同特征，系统可通过训练好的分类模型，精准区分两类漏失的早期信号，同时预测漏失的发展趋势^[8]。当系统识别到轻微漏失的异常信号时，会发出低等级预警，提示现场人员进行憋压验证，确认漏失情况后，可通过热洗、碰泵等常规措施修复轻微漏失，避免漏失程度的进一步加剧，无需进行检泵作业。对于无法通过常规措施

参考文献

[1] 孙璐. 智能化抽油机系统对采油厂采油工工作模式转型的影响与对策 [A] 智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集（三）[C]. 重庆市大数据和人工智能产业协会、重庆建筑编辑部、重庆市建筑协会、重庆市大数据和人工智能产业协会, 2025: 4.
[2] 付小坤, 田磊. 抽油机人工智能提效技术的研究与应用 [J]. 石油化工自动化, 2024, 60(04): 7-10.
[3] 程艳楠, 马庆, 吴运驰, 汪鑫, 张琦. 浅析基于数字化抽油机井工况诊断模型的建立方法 [J]. 采油工程, 2023, (04): 39-43+73.
[4] 孙国楠. 自抗扰控制在智能抽油机中的应用研究 [J]. 中国设备工程, 2023, (18): 50-52.
[5] 余传谋, 史常平, 姜学明, 李金刚, 袁红霞, 聂辰. 浅析高效智能游梁式抽油机的研制与应用 [J]. 中国设备工程, 2021, (S1): 161-164.
[6] 祝大伟. 节能控制在游梁式抽油机中的应用 [J]. 石油石化节能与计量, 2026, 16(01): 12-17.
[7] 隋洋. 抽油机泵况诊断及异常泵况的处理研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(24): 7-9.
[8] 衣楠. 游梁式抽油机曲柄平衡装置的改进与能效提升 [J]. 化学工程与装备, 2025, (12): 96-98.
[9] 贾玉路. 抽油机事故分析流程及案例剖析 [J]. 设备管理与维修, 2025, (21): 67-70.
[10] 张洵齐. 基于深度学习的抽油机减速箱故障智能预警系统设计 [J]. 石化技术, 2025, 32(11): 82-84.

修复的漏失，系统可根据漏失的发展趋势，预测泵效下降到临界值的时间，提示现场人员提前安排检泵作业计划，在非生产窗口期完成作业，避免非计划停机造成的产量损失。通过人工智能预警技术，可实现泵漏故障的早发现、早处置，大幅提升泵效，减少无效生产时间，保障油井的稳产能力。

表1 泵漏情况四化数据变化趋势情况表

参数	变化趋势
井口回压	下降趋势
井口温度	下降趋势
功图面积	下降或上升
运行电流	下降趋势

（三）泵充不满故障的人工智能趋势预警

泵内液体充不满故障主要源于油层供液能力与抽油泵工作参数的不匹配，表现为泵腔无法在冲程内充满液体，导致泵效大幅下降，严重时甚至出现空抽现象，不仅造成大量的能源浪费，还会加剧杆管泵的磨损，引发更严重的设备故障。传统模式下，现场人员只能在泵效已经显著下降、示功图出现明显异常时，才能发现充不满的问题，此时已经造成了大量的能源浪费与设备磨损^[9]。人工智能预警系统可通过对油层供液能力与泵工作参数的持续跟踪分析，提前识别供液与参数不匹配的趋势，实现充不满故障的提前预警与主动防控。系统通过长短期记忆网络，持续跟踪油井的沉没度、含水率、产量、井口压力等参数的变化趋势，预测油层供液能力的变化方向，同时结合示功图中卸载线的偏移特征、增载线的变化规律，综合判断泵内液体的充满程度变化趋势。当系统识别到供液能力逐步下降、泵充满度持续降低，即将出现充不满故障时，会提前发出预警，提示现场人员调整抽油机的工作参数，通过降低冲次、减小冲程等方式降低泵的排量，使其与油层的供液能力相匹配，同时可通过调整泵挂高度、加大沉没深度的方式，提升泵的充满度，从根本上避免充不满故障的发生^[10]。通过人工智能趋势预警，可实现油井生产参数的自适应优化，始终保持泵工作参数与油层供液能力的最佳匹配状态，不仅有效避免了充不满故障的发生，还大幅提升了泵效，降低了抽油机的无功消耗，实现了油井的高效节能生产。

四、结语

人工智能技术有效突破了抽油机传统故障诊断的局限，通过多源数据处理、深层特征提取等核心技术，可精准捕捉故障早期异常。在典型故障中的应用验证了其预警有效性，能大幅降低故障发生率。未来需持续优化模型自学习能力，推动其在油田规模化落地，助力石油开采数字化、智能化发展。