

基于物联网的油田设备运行状态监测与故障预警研究

白皓然 汪勇

长庆油田分公司第一采油厂，陕西延安，716000；

摘要：油田生产系统具有设备类型多、运行环境复杂、工况波动强和故障影响链条长等特点，传统依赖人工巡检和事后检修的管理模式已难以满足连续生产条件下设备安全、稳定与高效运行的要求。为提升油田设备运行管理的实时性、精准性与前瞻性，文章围绕抽油机、输油泵、加热炉、注水泵及井场电气设备等典型对象，构建基于物联网的运行状态监测与故障预警体系，系统分析感知层、传输层、平台层和应用层的协同机制，提出多源运行参数融合、设备健康指数评估及分级预警模型的实现方法，并结合现场应用场景对系统运行效果进行验证。研究表明，基于物联网的监测与预警系统能够显著增强设备异常识别能力，缩短故障响应时间，提升维修决策的针对性和油田生产组织效率，对推进油田设备管理由经验驱动向数据驱动、由被动维修向预测维护转型具有较强的工程应用价值。

关键词：物联网；油田设备；状态监测；故障预警；预测维护

DOI：10.69979/3060-8767.26.05.062

引言

油田生产过程具有点多、线长、面广的典型特征，井场设备长期处于高温、高寒、风沙、潮湿、振动和腐蚀等复杂工况中运行，设备运行状态不仅受机械磨损、电气老化和介质冲蚀等内部因素影响，还与负荷波动、工艺参数变化以及人员操作水平密切相关。传统设备管理主要依靠定期巡检、人工记录和经验判断，这种方式在设备数量较少、生产组织相对粗放条件下具有一定适用性，但面对当前油田规模化、连续化和数字化生产要求，已暴露出状态识别滞后、隐患发现不及时、故障机理分析不足和维修资源配置不合理等问题。文章基于这一背景，围绕油田设备物联网监测体系的总体架构、关键技术路径、预警模型和应用效果展开研究，以期为油田设备精细化管理与智能化运维提供技术支撑。

1 基于物联网的监测系统总体架构

基于物联网的油田设备运行状态监测系统通常由感知层、网络传输层、数据平台层和业务应用层构成。感知层负责部署在设备端的各类传感单元，包括振动传感器、温度传感器、电流电压传感器、压力传感器、流量传感器、液位传感器和视频采集终端等，用于对设备关键运行参数进行实时采集。网络传输层主要依托工业以太网、4G/5G、LoRa、NB-IoT等通信方式实现现场数据的远程稳定传输，并根据井场分布特征选择有线与无线融合组网方案。数据平台层承担海量运行数据的汇聚、存储、清洗、关联分析和模型计算功能，是实现设备健康评估与故障识别的核心。应用层则面向设备管理、生产调度、维修组织和安全监管等业务需求，形成状态

可视化展示、异常报警推送、趋势预测分析、工单联动和维保决策支持等功能模块。该体系的核心价值在于打通“感知—传输—分析—决策—执行”的完整链路，使设备状态数据真正转化为可执行的管理信息。

2 油田设备物联网状态监测关键技术

2.1 多源数据感知与边缘采集技术

油田设备运行数据具有来源多样、更新频率不同和数据质量不均衡等特点。为提高现场采集的准确性与连续性，监测系统应采用多源异构数据融合感知方式，在设备端布设结构化传感单元，并将视频图像、工艺报表、维修记录和环境参数纳入综合采集范围。由于井场环境复杂、设备运行点位分散，部分传感器易受粉尘、油污、电磁干扰和极端气温影响，因此在感知端设计中应优先选用耐腐蚀、防爆、防水和抗干扰性能较强的工业级设备，并通过边缘采集终端实现数据预处理。边缘终端可完成滤波、去噪、异常值剔除、时序对齐和本地缓存等操作，减少无效数据上送量，同时在网络暂时中断时保证关键数据不丢失。对于采样频率较高的振动信号和电气波形数据，边缘侧还可先行提取时域、频域特征后再上传平台，以兼顾传输效率与分析精度。

2.2 设备状态识别与特征融合分析技术

单一参数往往难以准确反映设备健康状态，油田设备的异常演化通常表现为多个参数的协同偏移。例如，输油泵密封磨损不仅会引起泵体振动增大，还可能伴随轴承温度上升、出口压力下降和单位能耗增加；抽油机传动系统失衡则可能表现为电流波动异常、减速箱振动

增强和冲次变化失稳。因此,状态识别过程需建立多参数关联分析机制,将不同维度的实时监测数据映射为统一的设备运行特征集。常见做法是对采集信号进行归一化处理,提取均值、方差、峰值、偏度、频谱能量和变化率等特征指标,并通过时间窗口滑动计算运行趋势。设设备在某一时刻的状态特征向量为:

$$X(t) = \{x_1(t), x_2(t), x_3(t), \dots, x_n(t)\}$$

其中, $x_i(t)$ 表示第 i 个监测参数在 t 时刻的特征值。为消除不同量纲对分析结果的影响,可采用极差标准化方式处理各参数:

$$z_i(t) = \frac{x_i(t) - x_{i,\min}}{x_{i,\max} - x_{i,\min}}$$

在此基础上,将标准化特征输入状态识别模型,可有效增强对早期异常和弱故障的敏感性。该方法较传统阈值报警更能体现设备故障演化的连续过程。

2.3 监测数据平台与智能联动机制

监测平台是油田设备状态感知与业务闭环管理的核心载体,其技术关键不在于简单的数据展示,而在于对设备运行信息进行结构化组织与智能联动。平台应建立设备级、站点级和区块级多层数据模型,将设备基础档案、历史维修记录、运行工况参数和报警事件进行统一关联,使数据从离散信息转变为可追踪、可分析的设备健康档案。同时,平台应具备规则引擎和模型引擎双重分析能力。规则引擎适合处理超限类异常,如温度超阈值、压力异常波动和电流长期过载;模型引擎则适合处理复杂故障识别与趋势预测。系统在识别异常后,应自动触发消息推送、工单派发、备件建议和巡检路径优化等联动功能,使监测系统与实际设备管理流程形成闭环,而不是停留在“看得见数据、管不好设备”的信息孤岛状态。

3 油田设备故障预警模型构建与实现

3.1 基于健康指数的设备状态评估方法

为了将多源监测数据转化为直观、统一的运行状态表征,文章引入设备健康指数作为核心评估指标。健康指数本质上是对设备多项状态参数加权综合后的结果,能够反映设备运行状态偏离正常工况的程度。设设备健康指数为 H , 则可表示为:

$$H = \sum_{i=1}^n w_i z_i$$

其中, w_i 为第 i 个状态参数的权重, 满足

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1; z_i \text{ 为各参数标准化后的健康评价价值。}$$

权重可依据专家经验、历史故障样本和参数敏感性分析确定。对于抽油机系统,可提高振动、电流和减速箱温度的权重;对于注水泵系统,则应重点突出压力、流量和轴承温升的影响。健康指数越接近 1,表明设备运行状态越稳定;当健康指数持续下降或短时急剧波动时,说明设备已进入异常演化阶段。相较于单指标判断,健康指数方法能够综合反映设备运行质量,更适用于油田复杂工况下的状态评估。

3.2 分级预警阈值与故障判别逻辑

预警系统的有效性不仅取决于模型精度,还取决于报警策略是否科学。若预警阈值设置过严,容易造成频繁误报,干扰现场运行;若阈值设置过宽,又会延误故障处置时机。因此,文章采用“静态阈值+动态趋势”相结合的故障判别逻辑。首先,根据设备设计参数、运行规范和历史样本建立静态阈值区间;其次,通过连续时序数据分析识别参数变化趋势和耦合偏移特征。设设备综合预警指数为 RRR , 则可表示为:

$$R = \alpha H_t + \beta \Delta H_t + \gamma C_t$$

其中, H_t 为当前时刻健康指数, ΔH_t 为单位时间内健康指数变化率, C_t 为关键参数耦合异常系数, α 、 β 、 γ 为权重系数。当 R 处于较低区间时,设备处于正常运行状态;当 R 持续升高并超过预警阈值时,系统应进入关注或告警状态。依据工程管理需求,可将预警等级划分为正常、提示、预警和严重预警四级,不同等级分别对应巡检确认、计划检修、限载运行和紧急停机等管理措施,从而实现预警结果与处置流程的有效衔接。

3.3 典型故障预警过程分析

以某采油区块抽油机与输油泵联合监测场景为例,系统连续采集电机电流、减速箱温度、曲柄振动、泵出口压力和流量等参数。在正常运行阶段,各参数波动范围较小,健康指数稳定维持在较高水平。当抽油机传动部件出现早期磨损时,首先表现为曲柄振动频谱中高频成分增强,随后减速箱温度缓慢升高,电机负载波动加剧,系统通过边缘分析识别出异常特征并将其上送平台。平台结合历史样本比对后判断该异常属于“轻度机械磨损倾向”,触发提示级预警。当设备继续运行且未及时维护时,振动峰值与温升幅度进一步扩大,健康指数下降速率明显加快,综合预警指数上升至预警级区间,系统自动向维修班组推送检修工单,并建议开展轴承、齿轮及联轴器部位检查。实践表明,这种从趋势发现、异常识别到维修联动的全过程预警机制,能够在故障扩展

为停机事故前完成主动干预,显著降低设备故障损失。

4 基于物联网的油田设备监测预警系统应用成效与优化方向

4.1 现场应用成效分析

在油田设备管理实践中,物联网监测预警系统的推广应用首先体现为设备可视化水平的提升。通过对井场关键设备运行状态进行在线采集与集中展示,管理人员能够实时掌握设备负荷分布、异常报警位置和重点风险设备清单,减少传统依赖纸质报表和电话反馈的管理滞后。其次,系统通过对早期异常的连续识别,有效缩短了故障发现时间,使维修组织从被动响应转向主动干预,避免小故障演化为停机事故。再次,状态监测数据与维修工单、备件记录和故障台账实现关联后,设备检修的针对性明显增强,减少了“过度维修”与“无效拆检”现象。更重要的是,系统沉淀的大量运行数据为油田设备寿命预测、能耗分析和工况优化提供了基础,使设备管理逐步从经验判断走向数据决策。总体来看,物联网监测预警技术不仅提升了设备本体可靠性,也改善了采油生产系统的组织效率与运行稳定性。

4.2 当前应用中存在的主要问题

尽管物联网监测预警系统在油田设备管理中已展现出较高应用价值,但在实际推进过程中仍存在若干制约因素。其一,不同厂家设备的通信协议、接口标准和数据格式差异较大,导致监测系统在接入整合阶段面临较高技术成本,部分老旧设备难以直接实现在线化改造。其二,现场监测点位布设质量和传感器稳定性直接影响数据可靠性,若传感器安装位置不合理、标定维护不到位或长期处于恶劣环境中,容易造成误报和漏报。其三,部分油田单位虽然建立了监测平台,但对数据分析的深度利用不足,仍停留在实时显示和阈值告警层面,尚未形成针对故障机理和寿命演化的高水平分析能力。其四,设备管理制度与数字平台之间衔接不够紧密,报警信息未能及时转化为现场维保行动,导致系统“有监测、少闭环”的问题仍然存在。因此,物联网技术的应用不能仅理解为硬件铺设和平台建设,更需要与标准体系、管理流程和专业人才能力同步提升。

4.3 监测预警系统的优化路径

未来油田设备物联网监测预警系统的优化,应从技术、管理与应用三个层面协同推进。在技术层面,应加

快统一设备接入标准和数据编码规则,提升异构设备兼容能力,并加强边缘智能部署,使更多状态识别和故障初判功能在现场侧完成,以降低传输压力和平台延迟。在模型层面,应结合油田不同设备类型、不同工况区域和不同故障模式建立更具针对性的机理—数据融合模型,提高对复杂工况下弱故障、间歇性故障和复合故障的识别能力。在管理层面,应推动监测平台与设备台账、点检制度、备件管理和检修考核机制深度融合,建立从报警识别、任务下发、现场处置到结果反馈的闭环流程,确保数据真正转化为管理成效。在应用层面,则应以重点设备、关键站点和高风险区块为切入点,逐步形成可复制、可推广的智能运维模式,并通过历史数据积累实现设备寿命预测、能效优化和区域设备健康画像,最终推动油田设备管理向全生命周期智能化演进。

5 结语

油田设备运行状态监测与故障预警是保障油田连续生产、安全运行和降本增效的重要技术支撑。文章从油田设备运行需求出发,构建了基于物联网的状态监测与故障预警研究框架,分析了系统总体架构、关键监测技术、健康指数评估方法和分级预警机制,并结合典型应用场景论证了其工程适用性。研究表明,物联网技术能够显著提升油田设备运行信息的实时获取能力与故障识别能力,使设备管理模式由经验型、被动型向数据型、预测型转变。今后,随着边缘计算、智能算法和油田数字化平台的进一步融合,油田设备监测预警系统将在故障预测精度、运维闭环能力和全生命周期管理水平方面持续提升,为智能油田建设提供更加坚实的技术支撑。

参考文献

- [1] 夏菁. 新时期化工机械设备管理及维护保养技术探究[J]. 中国设备工程, 2025, (15): 57-59.
- [2] 孙晶东, 杨中一. 浅析炼铁高炉机械设备管理过程中存在的问题及优化措施[J]. 中国金属通报, 2023, (16): 86-88.
- [3] 刘世彦. 水利水电工程大型机械设备管理措施[J]. 石油化工建设, 2022, 44(7): 136-138.
- [4] 彭安辉. 化工机械设备管理方法探索[J]. 世界有色金属, 2022, 47(5): 19-21.
- [5] 韦贤. 高速公路工程中起重机械设备管理措施分析[J]. 奥秘, 2022, (23): 43-45.