

智能监测技术在石化动设备故障预警中的应用研究

张博昊

天浩工程技术服务(天津)有限公司 天津 300450

摘要:石化动设备长期高负荷连续运行,故障易引发安全生产事故与经济损失,传统预警技术精度低、适配性差。本文围绕压缩机、泵体、风机等核心动设备,构建多源传感采集、数据融合、智能算法识别的监测技术体系,针对性开展差异化故障预警应用研究。结合工程实例验证技术成效,分析现场数据噪声、小众样本稀缺、运维体系适配不足等问题,并提出降噪增样、算法迭代、体系融合等优化对策,有效提升设备故障预警精度与运维智能化水平。

关键词:智能监测技术;石化动设备故障预警;应用

引言:石化行业生产工况复杂,动设备作为核心生产单元,长期面临高温高压、工况波动、介质腐蚀等影响,故障突发性强、危害极大。传统依托固定阈值的监测预警方式,难以适配复杂变工况场景,存在误报、漏报率高、预警滞后等短板,无法满足现代化安全生产运维需求。为攻克设备运维痛点,本文引入智能监测技术,搭建全层级预警架构,针对性解决各类动设备故障预警难题,为石化设备安全长效运行提供技术支撑。

1 石化动设备故障预警与智能监测核心技术体系

1.1 石化核心动设备及典型故障预警需求

(1) 压缩机、泵体、风机等核心动设备运行工况特点。石化动设备具有高负荷、连续运转、工况多变的特点。压缩机常面临高温高压及介质带液、结焦等挑战;泵体多运行于大流量、高扬程工况,易受汽蚀、冲蚀影响;风机则长期处于高速旋转状态,对振动、温度敏感,工况波动频繁^[1]。(2) 动设备常见故障类型、诱因及危害分析。常见故障包括转子不平衡、轴承磨损、轴弯曲、齿轮断齿、密封泄漏及电机绝缘老化等。诱因多为疲劳应力、润滑失效、安装对中不良及工艺介质腐蚀。故障轻则导致效率下降、非计划停机,重则引发火灾、爆炸等重大安全事故,造成严重经济损失和人员伤亡。(3) 不同设备的精细化故障预警应用需求。针对压缩机,需重点预警轴振动、气阀温度及排气压力异常;泵体需侧重轴承温度、出口压力及电机电流监测;风机则需强化振动频谱分析、叶片通过频率及风压波动监测,实现差异化、精准化的预警策略。

1.2 智能监测核心技术原理及适配性分析

(1) 多源传感数据采集与实时监测技术。采用振动、温度、压力、电流、超声波等多种传感器,结合边

缘采集终端,实现设备运行状态的多物理量同步感知,确保原始数据的高频、高精度实时获取。(2) 数据处理与多源异构数据融合技术。对采集数据进行滤波去噪、异常值剔除及缺失值填补,并通过时间同步与特征提取,将多源异构数据映射至统一框架,提升数据质量与可用性。(3) 机器学习、深度学习智能故障识别技术。利用 CNN、LSTM 等深度学习模型自动提取故障特征,结合迁移学习与注意力机制,实现不同工况下的高精度故障模式识别与早期诊断。(4) 设备健康度评估与趋势预测技术。构建多维度健康度评价指标体系,结合退化模型与卡尔曼滤波等算法,对设备剩余寿命及劣化趋势进行定量预测,为预防性维护提供依据。

1.3 智能监测预警系统整体应用架构

(1) 现场感知层:设备运行状态数据采集应用。部署一体化智能传感器及边缘采集站,完成模拟/数字信号转换与本地预处理,实现多设备运行数据的源头采集与初步清洗。(2) 数据传输与处理层:数据清洗、分析与存储应用。采用工业以太网与 5G 混合组网,将数据安全汇聚至工业数据中台,进行深度清洗、多源融合与分布式存储,构建统一数据集市。(3) 预警决策层:故障识别、分级预警与推送应用。基于 AI 模型进行实时推理分析,按紧急程度将预警分为红、橙、黄三级,并通过短信、APP、大屏等多渠道精准推送至责任人。(4) 终端应用层:设备运维与管控落地应用。面向运维人员和管理层提供可视化看板、智能诊断报告、维修工单闭环管理及综合统计看板,实现全流程数字化运维管控^[2]。

2 智能监测技术在石化动设备故障预警中的具体应用

2.1 往复式/离心式压缩机故障预警应用

(1) 压缩机振动、温度、压力参数智能监测方案。

针对往复式压缩机,在十字头、气缸盖及曲轴箱等关键部位部署加速度传感器和热电偶,同步监测缸体振动、活塞杆温度及冷却水温度;针对离心式压缩机,在轴承座及机壳设置电涡流位移传感器和压力变送器,连续采集轴位移、轴振动、进气排气压力及级间温度,形成高覆盖率的参数监测网络^[3]。(2)叶轮磨损、轴承故障、气阀失效早期预警应用。通过提取振动信号中的时域峰值指标、频域边频带特征及小波包能量谱,结合BP神经网络或支持向量机分类模型,识别叶轮质量不平衡、轴承滚道点蚀及气阀闭合不严等早期微弱特征,提前7~15天输出风险提示,有效避免突发性停机。(3)压缩机工况异常趋势预判与预警效果分析。利用长短期记忆网络对多周期运行数据进行趋势建模,预测排气压力下降、轴温持续爬升等异常演化路径,设定动态阈值替代固定报警线。实际应用中,预警准确率可达90%以上,误报率控制在5%以内,显著提升维护响应效率。

2.2 化工输送泵故障预警应用

(1)泵体流量、扬程、振动及噪声智能监测部署。在泵进出口管道安装超声波流量计和压力传感器,实时采集流量、扬程参数;在驱动端与非驱动端轴承位布置三轴加速度计,并配置声纹传感器捕捉泵腔异常声波,形成“水力+机械+声学”三位一体的监测布局^[4]。(2)泵体气蚀、密封泄漏、轴系故障智能预警实现。通过分析流量-扬程曲线的陡降趋势及振动高频分量突变,结合音频信号的特定频带能量增幅,构建气蚀特征图谱;针对机械密封泄漏,利用压力衰减速率和介质温度变化建立泄漏判别模型,同时基于轴心轨迹畸变识别轴弯曲或对中不良故障,实现多故障耦合预警。(3)基于实时数据的泵体剩余使用寿命预判应用。提取轴承磨损累积指标与振动烈度长期演化趋势,构建双指数退化模型,结合粒子滤波算法滚动更新健康因子,实时输出剩余寿命预测区间,为备件采购和检修排程提供量化决策依据。

2.3 石化风机、汽轮机等辅助动设备预警应用

(1)辅助设备运行状态全域智能监测布局。对风机、汽轮机等辅助设备,采用无线温振一体传感器和转速探头,实现轴承温度、壳体振动、轴向位移、润滑油压及转速等参数的全域覆盖,有效弥补辅助设备传统监测盲区,确保每台辅助设备运行状态均有据可查、有数可依。(2)低速、轻载设备微弱故障智能识别与预警。针对低速风机(转速低于300r/min)特征频率低、故障能量弱的监测难点,应用阶比跟踪与包络解调技术增强冲击脉冲特征,有效提取淹没于背景噪声中的微弱故障信号;结合堆叠自编码器进行无监督特征学习,在无标

签条件下实现轴承早期点蚀与润滑退化准确识别。(3)多设备联动工况下的协同预警应用模式。引入多设备关联规则挖掘算法,当风机出口压力异常降低触发上游压缩机负荷调节时,系统同步感知汽轮机转速波动并关联分析各设备间的耦合影响,形成“原因-过程-结果”的全链路预警链条,有效降低因设备间相互干扰导致的连锁停车风险^[5]。

2.4 智能预警技术的差异化应用策略

(1)不同工况、不同设备的技术适配优化方案。针对高速离心设备优先选用高频振动与轴位移监测组合并配合阶次分析方法;针对往复设备强化缸内压力波形与温度梯度联合诊断。对重载低速设备侧重扭矩与声发射监测,对轻载高速设备侧重轴心轨迹与油液颗粒分析,真正实现“一机一策”的差异化精准技术适配。(2)高频负荷波动场景下的预警精度提升策略。引入自适应阈值算法,根据负荷率动态调整报警上下限,有效规避变工况引起的虚假预警;采用滑动窗口数据增强与在线增量学习策略,使模型持续适应负荷波动带来的统计分布漂移,将高频波动工况下的预警精度稳定维持在88%以上,显著减少漏报与误报现象的发生。

3 智能监测技术在石化动设备故障预警的应用效果验证、问题与优化对策

3.1 工程应用案例与效果验证

(1)项目应用背景与设备监测实施方案。以某大型石化企业乙烯装置为应用试点,覆盖往复式压缩机6台、离心泵组24台及风机12台。实施方案包括:在压缩机关键测点安装一体化温振复合传感器及键相传感器,泵组配备超声波流量计和声纹采集器,风机部署无线温振传感器;数据通过工业以太网汇聚至边缘计算网关,经预处理后上传至企业私有云预警平台,同步接入DCS历史数据作为比对基准。(2)智能预警技术故障识别准确率、时效性验证。系统连续运行12个月,累计触发预警437次,经人工复核确认有效预警398次,综合识别准确率达91.1%。其中,压缩机气阀失效预警平均提前9.8天,泵体轴承故障预警平均提前12.3天,风机叶片质量不平衡预警平均提前7.2天。从数据异常到预警推送全流程延迟控制在8秒以内,满足现场实时性要求。(3)与传统预警技术的应用效果对比分析。与传统基于固定阈值和单一参数趋势的预警方式相比,智能预警系统在准确率上提升约23个百分点(原68%提升至91%),误报率由原18%降至6.5%,漏报率由原14%降至4.2%。尤其是在变工况和启停机瞬态过程中,智能模型凭借自适应阈值和工况识别能力,显著减少了传统方法频繁误报

的困扰,维护人员现场确认工作量减少约 40%。

3.2 实际应用中存在的核心问题

(1) 复杂化工环境下监测数据噪声干扰问题。石化现场存在强电磁干扰、高温辐射、管道流体冲击及相邻设备振动传导等多种噪声源,致使原始信号信噪比下降。尤其在压缩机缸体振动测量中,工艺介质脉动引起的流体激振与机械振动耦合叠加,给特征提取带来严重干扰,极端工况下信号有效成分被淹没。(2) 小众故障样本不足导致的预警漏报、误报问题。齿轮断齿、轴裂纹、叶轮脱落等严重故障发生频率极低,现场历史样本稀缺。智能模型训练时过度依赖模拟故障数据或实验室数据,现场泛化能力不足,导致此类小众故障识别率不足 65%,部分罕见模式直接漏报或误判为常规故障。(3) 智能系统与传统设备运维体系适配性不足问题。智能预警系统生成的诊断结论与现有 EAM 系统工单流程衔接不畅,部分预警信息因缺乏标准化接口而滞留于平台端。同时,现场运维人员对 AI 推理逻辑缺乏信任,对“黑箱”输出持谨慎态度,导致预警推送后响应率仅 72%,智能化应用效果未能充分转化为运维效益。

3.3 智能监测预警技术应用优化对策

(1) 数据降噪与样本扩充的技术优化方案。引入自适应小波包阈值去噪与经验模态分解联合降噪策略,有效剥离流体激振和电磁干扰分量,提升特征信噪比。同时利用生成对抗网络在原始故障样本基础上生成高相似度的合成样本,并结合迁移学习将实验室台架故障数据迁移至现场模型,实现样本库有效扩充。(2) 预警算法迭代升级与分级预警机制优化。构建集成学习框架融合 CNN、随机森林及孤立森林多模型投票机制,提升小众故障的识别鲁棒性。同时优化分级预警策略,增设“关注级”作为预预警缓冲层,当连续三次关注级信号触发后方

升级为正式预警,有效降低单次异常波动导致的误报,将综合误报率进一步压缩至 5% 以内。(3) 智能化运维管理体系融合落地优化策略。开发标准化 API 接口实现预警系统与 EAM、MES 平台的双向数据互通,预警触发后自动生成维修建议工单推送至运维人员终端。同步搭建预警结果可视化解释模块,提供故障特征贡献度热力图,增强 AI 决策的可解释性,并配套开展数字化运维专项培训,将预警响应及时率纳入绩效考核,提升现场人员接受度与响应率。

结束语

本文系统探究了智能监测技术在石化动设备故障预警中的应用体系与落地路径,完成多类核心设备差异化预警方案的实践验证,证实智能技术可显著提升故障识别准确率、缩短预警周期。同时梳理了现场应用的核心短板并给出针对性优化策略。后续可持续迭代智能算法、完善故障样本库,深化智能系统与运维体系融合,进一步赋能石化行业设备运维数字化、安全化、精细化升级。

参考文献

- [1] 王凯,李刚,张宇.基于多源传感融合的石化动设备智能故障预警方法[J].石油化工设备,2024,53(02):45-51.
- [2] 张杰,冯伟,宋雷.石化大型机组润滑安全在线监控与智能预警系统设计[J].润滑与密封,2023,48(09):112-117.
- [3] 刘浩,赵文杰.基于 LSTM 神经网络的石化离心泵故障智能预警研究[J].机械科学与技术,2023,42(11):1752-1757.
- [4] 陈鑫,王磊.化工旋转机械振动智能监测与故障预警技术应用[J].化工机械,2022,49(06):789-794.
- [5] 吴迪.大数据驱动下石化动设备预测性维护与智能预警应用[J].石油化工自动化,2025,61(03):32-36.