

智能安全监控系统在工业生产中的应用与优化研究

赵 炎

江西万铜环保材料有限公司 江西九江 332000

【摘要】智能安全监控系统在工业生产中的应用日益广泛，通过对某化工企业乙烯装置的实践研究表明，该系统能有效预防安全事故、提升生产效率。研究针对乙烯装置的重点监控需求，采用深度学习算法对关键设备运行状态进行实时监测，建立了基于多源数据融合的预警模型。在实际应用中，系统显著提高了裂解炉故障预测准确率，大幅缩短了压缩机组安全事故预警响应时间，有效降低了年度设备维护成本。优化后的智能监控系统在关键参数预警、设备异常识别等方面表现突出，为乙烯生产提供了可靠的技术支撑。

【关键词】智能安全监控；乙烯装置；深度学习；多源数据融合；预警模型

1 乙烯装置安全监控需求分析

1.1 生产工艺及安全风险分析

乙烯生产工艺主要包含原料预处理、高温裂解、急冷分离、压缩和精馏等工序。裂解炉作为核心装置，在800–850℃高温下进行裂解反应，存在结焦、管道泄漏和温度失控等风险。压缩机组在气体增压过程中易发生振动异常和密封失效。精馏塔存在超温、超压及分离异常隐患，低温储罐区则面临制冷系统故障、压力波动等风险。尾气处理单元涉及废气焚烧，存在火灾爆炸危险。各单元之间通过管廊输送物料，管道系统压力大、温度高，且输送介质易燃易爆，对安全监控提出较高要求。原料储运区域存在泄漏、溢出和罐区火灾风险。工艺参数波动、设备故障和人员误操作都可能引发连锁性安全事故，需建立全面的安全监控体系^[1]。

1.2 典型安全事故案例分析

某大型乙烯装置在2023年发生裂解炉爆管事故，起因是进料温度控制异常导致管壁结焦，局部温度持续升高引发管道破裂。事故造成装置紧急停车15天，直接经济损失超过千万元。事故调查显示，传统的单点测温和定期检测方式无法及时发现结焦趋势，人工巡检难以实现连续监测。在压缩机组运行过程中，曾因轴承温度异常和振动超标引发跳机事故，导致上下游装置连锁停车。精馏系统出现过塔顶压力失控，造成安全阀频繁启跳。储罐区制冷系统故障引发压力波动，导致火炬系统负荷突增。

这些事故暴露出传统监控手段在预警能力、实时性和准确性方面的不足，凸显智能化安全监控的重要性。

2 面向乙烯装置的智能监控系统设计

2.1 裂解炉运行状态监测方案

针对裂解炉运行监测需求，设计了多层级监控系统架构。在现场层，沿裂解炉管线布设红外热像仪和声发射传感器阵列，实现管壁温度场分布实时监测。在炉管关键位置增设激光扫描测厚仪，构建管壁结焦三维状态模型。监测系统采用工业级光纤网络，将采集数据实时传输至边缘计算单元。边缘计算单元对温度场数据进行降噪和特征提取，结合流量、压力等工艺参数，构建炉管健康状态评估模型。系统通过分布式光纤测温实现炉管全程温度监测，精度达到±0.5℃。在控制室配置大屏可视化监控终端，显示炉管三维温度分布、结焦状态和预警信息^[2]。当检测到异



图1 压缩机组智能预警系统

常时，系统自动输出精确定位信息和处置建议，为运行人员提供决策支持。

2.2 压缩机组智能预警系统

压缩机组智能预警系统采用多源数据融合架构，构建了设备状态实时监测和故障预警平台。系统布设轴承温度、振动、位移等传感器，配置油品分析仪和声学检测装置，形成全方位监测网络（如图1所示）。监测数据经工业以太网传输至边缘服务器，通过深度学习算法进行特征提取和故障诊断。系统建立了设备状态评估模型，将振动频谱分析、温度趋势和油液分析数据相结合，实现故障类型识别和剩余寿命预测。在安全联锁方面，系统设置了三级报警阈值，当设备状态达到预警值时自动发出告警信号，并联动DCS系统执行应急处置。监控中心大屏实时显示设备运行状态、趋势曲线和预警信息，移动终端推送异常告警，实现无人值守条件下的智能预警。

2.3 储罐区安全监控策略

储罐区智能监控系统采用分区域、多层级的立体监控架构。在罐区周界部署高清红外热成像仪和可燃气体探测器，实现24小时全天候监测。系统在每个储罐设置带HART协议的智能液位计和温度传感器阵列，对液位、压力、温度等关键参数进行在线监测^[3]。制冷系统配备制冷剂泄漏检测装置和冷凝器效率监测单元，实现制冷系统运行状态实时监控。在罐区重点区域安装防爆摄像机，通过视频分析算法识别人员违规行为和异常活动。监控系统对储罐液位变化趋势进行智能分析，当发现异常波动时及时预警。压力监测系统与安全阀和火炬系统联动，在压力异常时自动进行泄压处理。制冷系统监控模块可预测制冷效率下降趋势，提前发出维护预警。现场监测数据通过防爆型就地控制柜传输至中控室，实现罐区安全状态可视化。

2.4 控制系统集成方案

面向乙烯装置全流程安全监控需求，构建了多层次分布式控制系统架构。在底层设备层，采用具有本质安全防爆功能的现场总线技术，将各类传感器和执行器接入系统。控制层采用冗余配置的DCS系统作为核心，整合SIS安全仪表系统和ESD紧急停车系统，实现装置安全联锁控制。管理层部署实时数据库服务器和应用服务器，搭建基于OPC UA协议的数据通信平台。系统将裂解炉监测、压缩机预警和储罐监控等子系统数据统一接入集成平台，实现数据共享和联动控制。在控制策略上，采用分层递进的控制机制，将工艺参数监控、设备状态监测和安全联锁保护有机结合。系统配置双机热备份和UPS不间断电源，确保监控系统持续

稳定运行。在网络安全方面，采用物理隔离和防火墙等多重防护措施，保障系统信息安全。

3 关键设备智能监控算法研究

3.1 裂解炉结焦预测模型

裂解炉结焦预测模型基于深度学习架构，融合多源监测数据构建预测引擎。模型将管壁温度分布、辐射段压降、进料流量等工艺参数作为输入变量，建立结焦趋势预测模型。算法采用改进的长短时记忆网络（LSTM）结构，引入注意力机制提取温度场时空特征。模型通过滑动时间窗口方法，对历史数据进行动态分析，捕捉结焦发展规律。在特征工程环节，利用小波变换对温度信号进行降噪和特征提取，将压降变化趋势、COT温度和TMT温度等关键指标纳入建模范围。预测引擎设置了三级预警阈值，在结焦程度达到预警值时自动发出检修建议。模型集成了自适应参数调整机制，能够根据实际运行数据动态优化预测参数，提高预测精度。预测结果以三维热力图形式展示，直观反映管壁结焦状态分布。

3.2 压缩机振动异常识别

压缩机振动异常识别算法采用深度卷积神经网络框架，构建了基于时频特征的故障诊断模型。算法对轴承温度、径向位移和轴向位移等监测数据进行预处理，利用快速傅里叶变换提取振动信号频谱特征。在特征提取层面，设计了多尺度卷积核结构，提取振动信号在不同频带的特征表示^[4]。模型引入残差学习机制，建立振动特征与故障类型之间的映射关系。算法设置了轴承故障、转子不平衡、机械松动等多个故障诊断模块，实现精确的故障类型识别。在异常检测方面，采用基于马氏距离的多维异常检测方法，识别振动特征的异常变化。模型配置了自学习模块，通过在线学习方式不断优化故障特征库，提高诊断准确率。系统将识别结果以故障概率分布形式输出，为设备维护决策提供量化依据。

3.3 储罐液位监测预警

储罐液位监测预警系统基于模式识别算法构建智能预警平台。系统采集储罐液位、温度、压力和周边可燃气体浓度等多维数据，通过高精度雷达液位计实现液位实时监测。数据处理模块采用卡尔曼滤波算法对液位数据进行平滑处理，消除测量噪声影响。预警系统建立了基于支持向量机的液位异常检测模型，结合温度、压力变化趋势进行综合研判。在液位突变检测方面，引入了改进的突变检测算法，能够快速识别溢出和泄漏等异常情况。系统针对不同工况设置了差异化报警阈值，实现分级预警^[5]。液位预警

结果通过可视化界面展示，并自动生成应急处置指令，确保及时有效处置异常情况。

3.4 实验数据分析与验证

智能监控系统在某百万吨级乙烯装置应用过程中，针对关键设备运行数据进行系统性分析。数据分析聚焦于裂解炉结焦预测、压缩机振动诊断和储罐液位监测三个方面。通过对装置运行数据的挖掘分析，验证了深度学习模型在设备状态预测方面的应用效果。结焦预测模型对裂解炉管壁结焦趋势实现准确预测，振动异常识别算法成功捕捉压缩机早期故障特征。储罐液位监测系统实现了液位异常的精确识别和及时预警。系统优化后，设备故障预测准确率显著提升，安全预警时间明显提前，年度设备维护成本大幅降低。验证结果表明，智能监控系统在工业生产安全管理中具有显著的实用价值。

4 系统应用效果评估

4.1 装置安全性能提升分析

智能安全监控系统在乙烯装置应用后，整体安全管理水平显著提升。裂解炉安全运行周期由原来的6个月延长至9个月，管壁结焦预警时间提前至72小时，为检修准备预留充足时间。压缩机组振动异常预警准确率达到95%，避免了两次重大设备故障。储罐区实现了24小时无人值守智能监控，液位异常预警时间缩短至5分钟内，杜绝了溢罐风险。系统集成后，装置紧急停车次数从年均4次降至1次，设备完好率提升15%。安全连锁系统响应时间缩短至100毫秒以内，实现了对危险工况的快速处置，有效防范了重大安全事故。

4.2 预警准确率评估

针对乙烯装置各类安全预警事件进行统计分析，评估智能监控系统的预警准确性（如表1所示）。裂解炉结焦预测

表1 智能监控系统预警性能指标

监控对象	预警准确率/%	误报率/%	预警提前期/h	识别精度
裂解炉结焦	95.8	3.0	72	±0.5℃
压缩机振动	93.5	2.5	48	±0.01mm
储罐液位	96.2	1.0	0.5	±2mm
温度异常	94.7	2.8	24	±0.3℃
压力波动	92.8	3.2	12	±0.02MPa
系统整体	94.0	2.5	36	-

模型准确率达到95.8%，误报率降至3%以下。压缩机振动异常识别系统实现了对轴承故障、转子不平衡等典型故障的精确诊断，预警提前期达到48小时。储罐液位监测系统对微小液位波动的识别灵敏度提高到±2mm，误报率低于1%。系统整体预警准确率达到94%，较传统监控方式提升40%。关键设备异常预警平均提前期延长至36小时，为应急处置争取了充足时间。预警信息准确性和及时性的提升，显著增强了装置安全管理能力。

4.3 经济效益分析

智能安全监控系统在乙烯装置的应用产生了显著的经济效益。设备维护成本降低28.6%，年度检修费用减少约320万元。通过预测性维护，裂解炉运行周期延长3个月，减少了计划外停车损失，年创造效益约580万元。压缩机组故障预警系统避免了两次重大设备事故，挽回直接经济损失约450万元。储罐区智能化改造后，原人工巡检岗位优化4人，年节省人工成本32万元。系统集成后，装置年均停车次数减少3次，避免了约960万元的停产损失。设备完好率提升带来的产能释放创造年增效益约280万元。智能化改造投资回收期为1.8年，具有良好的经济性。

5 结语

通过在该化工企业乙烯装置的实践应用研究表明，优化后的智能安全监控系统显著提升了装置的安全管理水平。该系统在裂解炉结焦预测、压缩机故障诊断等方面取得了良好效果，实现了安全监控的智能化和精确化。研究成果不仅为乙烯装置提供了可靠的安全保障方案，也为智能监控技术在其他化工装置中的应用提供了有益参考。未来研究将进一步探索智能算法的优化和系统的泛化能力，推动智能安全监控技术在化工行业的持续发展。

参考文献:

- [1] 湾晓芳. 物联网+大数据技术下实验室建设前景[J]. 数字通信世界, 2023, (09): 155-157.
- [2] 裴慧华. 基于物联网架构的高校智慧实验室关键技术[J]. 电声技术, 2022, 46 (07): 62-64.
- [3] 张仲达, 张华磊, 鲁海文. 智能化“一通三防”与安全监控系统的工程应用[J]. 山东煤炭科技, 2023, 41 (11): 162-165.
- [4] 张茂富, 刘小兵, 赵勇坚. 智能化技术在石油化工企业安全管理中的应用[J]. 化工管理, 2023, (21): 84-87.
- [5] 王子牛, 汪进, 程凌, 等. 化工企业中控室环境智能监测控制系统设计[J]. 自动化仪表, 2023, 44 (12): 58-64.