

Integration and Application of Intelligent Sensors in Chemical Equipment Condition Monitoring

Jijie Pan Wanming Chen

1. Zhejiang Juhua Technology Center Co., Ltd., Quzhou, Zhejiang, 324001, China
2. Zhejiang Juhua Hanzheng New Materials Co., Ltd., Quzhou, Zhejiang, 324004, China

Abstract

Chemical equipment operating under high-temperature, high-pressure, and corrosive conditions is prone to risks such as leakage, wear, and fatigue. Traditional monitoring methods relying on manual inspections and single-point instruments suffer from data fragmentation and delayed responses, failing to meet safety production requirements. Intelligent sensors integrate data acquisition, signal processing, and communication functions to enable multi-parameter coordinated monitoring of pressure, flow, vibration, temperature, and corrosion. Combined with data fusion and intelligent diagnostic models, they perform trend analysis and fault prediction, establishing a closed-loop system of "monitoring-diagnosis-warning-maintenance". This application facilitates the transition from reactive maintenance to predictive maintenance in chemical equipment, enhancing operational safety resilience and efficiency. Future advancements through edge computing, digital twin technology, and industrial AI will further elevate system intelligence.

Keywords

intelligent sensor; chemical equipment; condition monitoring; data fusion; predictive maintenance

智能传感器在化工设备状态监测中的集成与应用

潘吉杰 陈万明

1. 浙江巨化技术中心有限公司, 中国·浙江衢州 324001
2. 浙江巨化汉正新材料有限公司, 中国·浙江衢州 324004

摘要

化工设备在高温、高压和腐蚀介质中长期运行, 容易出现泄漏、磨损和疲劳等风险, 传统依赖人工巡检和单点仪表的监测方式存在数据离散、响应滞后等不足, 难以满足安全生产需求。智能传感器集成数据采集、信号处理和通信功能, 可实现压力、流量、振动、温度和腐蚀等多参数联动监测, 并结合数据融合与智能诊断模型开展趋势分析和故障预判, 构建“监测—诊断—预警—维护”闭环体系。其应用有助于推动化工设备由被动检修向预测性维护转型, 提升装置安全韧性与运行效率。未来可通过边缘计算、数字孪生和工业AI进一步增强系统智能化水平。

关键词

智能传感器; 化工设备; 状态监测; 数据融合; 预测性维护

1 引言

化工行业在能源转化、材料制造与精细化工生产中具有基础支撑作用, 但化工装置普遍规模大、工况多变, 设备长期处于高温、高压、腐蚀及可燃介质环境中, 性能衰退具有隐匿性与突发性叠加特征。大量安全事故源于设备状态失控, 如换热器管束腐蚀导致泄漏、离心泵轴承振动恶化引起停机、反应釜温度失稳导致热失控等, 因此实现实时、连续的状态监测与健康评估至关重要^[1]。传统监测依赖人工巡检和分离式仪表记录, 数据离散、延迟性强, 难适应现代化

工连续化和本质安全化要求。智能传感器的应用使监测从简单参数测量转向运行状态认知, 通过本地信号处理、边缘分析与工业通信网络, 可实现趋势跟踪、异常识别和预测性维护。本文围绕监测需求与技术挑战, 探讨智能传感器的体系结构及其在典型设备上的集成模式, 并分析数据融合与智能诊断在复杂工况下的可行路径, 为构建智能化设备健康管理体提供理论与实践支持。

2 智能传感器在化工设备监测中的技术基础

2.1 智能传感器的结构与功能体

智能传感器由敏感元件、信号调理、嵌入式处理、通信与供电五部分协同构成。敏感元件完成物理/化学量到电信号的转换; 调理模块进行放大、滤波、线性化与温漂补偿,

【作者简介】潘吉杰(1985-), 男, 中国湖南人, 本科, 工程师, 从事化工机械研究。

提升信噪比与量程稳定性；微控制器或 SoC 在边缘侧执行标定、特征提取、异常检测与自检容错，并依据阈值与模型生成本地诊断结论；通信单元兼容现场总线、工业以太网与低功耗无线，实现多协议适配与数据加密；供电体系结合本安电源、能量采集与电源管理以保障长期连续运行。由此，传感器实现从“采样—上传”的被动节点，演进为具备自治学习与近端决策能力的智能终端，显著降低网络依赖与时延，提高在化工工况下的鲁棒性与可靠性。

2.2 化工设备监测的工况特点

化工装置普遍存在高温高压、强腐蚀介质、可燃有毒气体与长周期连续运行等特征，工况扰动频繁且跨尺度耦合明显^[2]。现场粉尘、油污、盐雾与冷凝水易引发探头污染与绝缘退化，强振动与电磁噪声造成信号漂移与间歇失真，管道脉动与阀门开闭诱发的瞬态冲击进一步增加测量不确定性。设备劣化往往表现为微弱、缓变与间歇性复现的前兆模式，需高分辨率与高动态范围的采样体系，以及具备温度补偿、抗腐封装与抗爆本安设计的器件可靠性保障。监测策略应兼顾快速瞬态捕获与长期趋势识别，并与工艺约束、联锁保护和 SIL 等级要求协同，以实现安全与效率的综合最优。

2.3 智能传感器网络与系统架构

化工设备状态监测宜采用“传感器层—边缘网关层—平台层”的分层分布式架构。传感器层以多源节点形成异构采集网，完成原位测量与初级特征计算；边缘网关负责协议转换、时间同步、数据质控与流式推理，实现就地降噪、异常筛选与事件触发，减轻上行带宽与延时压力；平台层基于时序数据库与资产模型开展跨设备的健康评估、剩余寿命预测与风险分级预警，并将诊断结果回写到边缘侧形成闭环控制^[3]。通过冗余布点、时空关联与数字孪生映射，可实现设备与工艺的协同感知；借助零信任接入、端到端加密与可观性指标，保障数据可信与系统可运维，最终支撑全生命周期的预测性维护与安全治理。

3 智能传感器在主要化工设备中的集成应用

3.1 流体输送设备状态监测

离心泵、压缩机及管道阀门在化工流程中承担物料输送与流量调控关键功能，其运行稳定性直接关系工艺连续性和能耗水平。由于叶轮磨损、轴承疲劳、轴系不对中、密封老化及气蚀等问题具有渐进性特征，状态监测需覆盖压力、流量、温度、振动及声发射等多维参数。智能压力传感器与流量传感器可实现运行点与效率偏移的实时识别；温度传感器可监控轴承及润滑油温升，捕捉摩擦恶化的早期迹象；振动与声发射传感器可对高速旋转部件开展模态特征分析，提取不平衡、偏心与微裂纹引起的特征频率。结合故障特征库、包络谱分析及机器学习振动模式识别模型，可实现对气蚀、轴承剥落与叶轮偏磨等故障的早期诊断。通过状态趋势分析与预测性维护策略，可提前安排检修，避免突发停机造成工

艺中断和能源浪费，提高输送系统运行可靠性与设备全生命周期效益。

3.2 传热设备与反应设备状态监测

换热器与反应设备在化工生产中对能量转移、反应速率与物料转化具有核心调节作用，其内部状态变化往往隐蔽但影响重大。换热器易发生结垢、腐蚀穿孔及管束泄漏，导致换热效率下降和介质交叉污染。智能热阻传感器可实时追踪传热系数变化，电化学腐蚀传感器可监测腐蚀电位与极化电流，用以评估腐蚀速率和结垢进程，从而实现提前清洗或更换策略^[4]。反应釜和塔器中温度、压力、液位及物料浓度波动直接影响反应稳定性和安全性，智能温压传感器与光谱传感器可实现反应进程动态反馈，气体泄漏传感器可对可燃、有毒气体进行定量报警。通过闭环控制系统与边缘计算节点实现参数异常趋势识别，有助于避免“热失控—压力急升”导致的爆裂事故，提升反应系统安全裕度。

3.3 储运设备状态监测

储罐、油库与管廊系统承担介质储存与输送功能，其泄漏、变形和沉降风险直接影响环境安全与人员健康。光纤拉曼、布拉格光栅等分布式光纤传感技术可对温度与应变场进行连续监测，构建储罐壁厚减薄、底板变形及管道局部应力的可视化风险分布图；磁致伸缩传感器可用于监控罐壁腐蚀与裂纹扩展；射流泄漏探测模块和气敏阵列可识别微量挥发性有机物泄漏，实现“早期泄漏—源头定位—动态报警”一体化监测^[5]。结合区域阈值管理、联动报警策略及远程运维平台，可对储运系统进行 7×24 小时连续监测与应急联动，减少突发性泄漏事故和隐患积累，为化工储运系统提供高可靠安全防护体系支撑。

4 智能数据融合与故障诊断模型构建

4.1 多源传感信号融合机制

化工设备在运行过程中会产生振动、温度、压力、流速、化学腐蚀电位等多维状态信息，各参数之间存在明显的耦合与动态关联，因此单一信号往往难以准确反映设备劣化过程。多源传感信号融合的核心在于对不同物理量进行统一建模与特征协同描述。具体而言，可从时域、频域、包络谱、时频域（如小波、希尔伯特-黄变换）中提取特征向量，并基于主成分分析（PCA）、独立成分分析（ICA）、稀疏编码或深度特征嵌入模型进行降维，以消除冗余与噪声，实现信息压缩与关键特征突出。在融合策略上，可采用特征级融合实现多参量联动诊断，或采用决策级融合实现模型投票判决。同时通过构建跨传感器时间同步机制与数据置信度评估策略，解决不同传感来源异步、漂移与稳定性差的问题，使融合结果更具可靠性与解释性，提高状态诊断能力与故障识别的精确度。

4.2 基于机器学习的故障识别

智能故障诊断模型可利用运行数据自动学习正常状态

与异常状态之间的差异,从而实现设备劣化的早期识别与分类判断。在传统方法中,支持向量机、决策树、KNN与随机森林等适用于特征清晰、样本维度较低的场景;在复杂工况与耦合信号环境下,卷积神经网络(CNN)、长短时记忆网络(LSTM)和图神经网络(GNN)等深度学习方法可直接从原始信号中提取深层特征,具有更强的表征能力。此外,化工设备故障类型具有多样性与演化性,模型需要具备自适应更新能力,可通过在线增量学习、迁移学习及领域自适应等策略实现模型在不同装置、不同工况与不同介质环境下的泛化应用,使其能够识别新型故障模式并保持较高诊断准确度。通过模型可视化与决策逻辑解释,可进一步提升工程人员对模型输出结果的信任度与应用意愿。

4.3 预测性维护与健康策略

传统维护模式多依赖定期检修或故障停机后维修,其资源利用效率低且存在较大安全风险。预测性维护策略则基于设备状态趋势、退化曲线与故障发生概率预测,通过构建剩余寿命评估模型(RUL),在设备性能即将降至工作阈值前进行计划维护,以实现“提前干预、避免停机”。RUL模型可基于统计退化模型、状态空间模型或深度时间序列模型构建,并结合实时传感数据不断更新,确保预测结果有效反映实际退化水平。在系统层面,通过引入健康指数(HI)评价体系,可对不同设备、部件与系统级运行风险进行量化排名,支撑资源分配与维护优先级决策。预测性维护的实施不仅能够减少突发停机次数与备件库存成本,还能提高设备可用率与全生命周期管理效率,是推动化工行业由被动维护向主动安全管理转型的重要途径。

5 智能传感技术应用的挑战与优化方向

5.1 复杂工况下传感精度稳定性问题

化工装置长期处于高温、高压、强酸碱、含硫含氯及颗粒冲刷等复合应力环境,易引发敏感元件漂移、绝缘退化与信号噪声放大。需在材料层面采用SiC/AlN压阻、蓝宝石光纤、哈氏合金与陶瓷钎封等耐蚀高温体系,并通过ALD致密涂层与金属-玻璃封接实现气密与抗渗。结构上引入隔热隔振、应力释放槽与电磁屏蔽,联合冗余测点与自校准参考源抑制零点漂移;算法上利用温度-压力耦合补偿、时变漂移建模与鲁棒滤波提升抗干扰能力;工程实施中配合本安/隔爆设计与在线比对标定,形成“材料-结构-算法-现场校准”一体化稳健链路,确保在复杂工况下量测准确与长期稳定。

5.2 传感网络安全与数据可信性

状态监测系统逐步接入工业互联网,链路从现场总线延展至边缘与云端,带来窃听、篡改、伪造与勒索等复合

威胁。应构建以IEC 62443为参照的纵深防御:通信侧启用TLS/IPsec与OPC UA安全模型,采用设备级PKI、硬件安全模块(HSM)与安全启动防止私钥泄露与固件仿冒;接入控制实施零信任与白名单策略,细化到资产、协议与端口的最小权限;数据侧进行端到端签名与时间戳哈希链以保障不可抵赖,边缘侧完成完整性校验与异常检测,及时识别“伪传感器”和重放流量;网络拓扑设置OT/IT隔离与工业DMZ,配合安全审计、补丁与密钥轮换、签名式OTA升级与灾备演练,形成“安全-可信-可追溯”的数据治理闭环。

5.3 智能诊断模型的可解释性与可移植性

黑箱模型难以支撑安全工艺决策与合规审查,需在机理与数据之间建立可解释的桥接层。方法上引入物理约束与先验边界的Physics-Informed模型,结合特征可解释技术(SHAP/LIME)、注意力热图与规则提取,面向故障征兆给出“因-果-阈值”的可视化证据;迁移与部署上,通过领域自适应与小样本增量学习应对装置差异与工况漂移,采用联邦学习在多装置间共享模型而不暴露原始数据,提高隐私与泛化;工程化方面以ONNX/TinyML实现边缘推理,利用模型蒸馏与剪枝满足本安功耗与实时性要求,并建立MLOps流程(数据版本、漂移监控、阈值回归测试与定期再训练),确保模型在多场景快速落地、稳定运行与透明可审计。

6 结语

智能传感器的集成应用推动化工设备监测由人工巡检和经验判断模式向实时感知、智能诊断和主动干预模式转变。智能传感体系可实现设备运行参数的连续监测与退化规律识别,为预测性维护提供数据基础,提升设备可靠性与生产安全水平。未来,随着边缘计算、数字孪生和工业人工智能进一步成熟,智能传感器将在化工设备全生命周期管理中发挥更为关键的核心作用,并将促进化工行业向绿色化、本质安全化和智能化方向持续演进。

参考文献

- [1] 刘书玉,张洪超,苑亮.数字孪生技术在化工设备运维管理中的应用研究[J].化工设计通讯,2025,51(09):132-134.
- [2] 顾燕君,沈燕,戴佳丽.智能化化工设备污染源识别与自动预警系统的构建研究[J].清洗世界,2025,41(08):76-77.
- [3] 许继远.化工设备故障智能诊断与预测维护技术研究[J].聚酯工业,2025,38(04):101-103.
- [4] 邴旭锋,杨浙辉,代文治.基于安全视角的化工设备智能安全监测与预警技术应用分析[J].品牌与标准化,2025,(04):155-157.
- [5] 刘刚.化工设备安全监测与智能预警技术在事故预防中的应用[J].当代化工研究,2025,(03):161-163.