

石油化工设备智能监测与故障诊断系统研究

彭 钊

克拉玛依市三达有限责任公司, 新疆 克拉玛依 834000

[摘要] 石油化工设备智能监测与故障诊断系统研究聚焦于构建新一代设备健康管理体系, 通过多学科技术融合提升关键设备运行可靠性。研究围绕智能感知网络构建、多源异构数据处理、智能诊断算法优化三大核心问题展开, 系统阐述了从数据采集到决策支持的全链条技术体系。数字孪生技术实现了物理空间与信息空间的动态映射, 工业人工智能算法突破了传统诊断方法在复杂故障识别中的局限性。研究提出分层递进的系统架构设计原则, 建立面向旋转机械、反应器、管道系统的差异化监测方案, 形成知识驱动与数据驱动相融合的混合诊断范式。技术成果为预测性维护提供了理论支撑, 显著提升了故障预警的时效性和诊断结果的准确性, 对保障石油化工装置安全经济运行具有重要工程价值。

[关键词] 智能监测; 故障诊断; 数字孪生; 工业人工智能; 预测性维护

DOI: 10.33142/sca.v8i5.16426

中图分类号: TP274

文献标识码: A

Research on Intelligent Monitoring and Fault Diagnosis System for Petrochemical Equipment

PENG Dian

Karamay Sanda Co., Ltd., Karamay, Xinjiang, 834000, China

Abstract: The research on intelligent monitoring and fault diagnosis system for petrochemical equipment focuses on building a new generation of equipment health management system, and improving the operational reliability of key equipment through interdisciplinary technology integration. The research focuses on three core issues: the construction of intelligent perception networks, multi-source heterogeneous data processing, and optimization of intelligent diagnostic algorithms. It systematically elaborates on the full chain technology system from data collection to decision support. Digital twin technology achieves dynamic mapping between physical space and information space, and industrial artificial intelligence algorithms break through the limitations of traditional diagnostic methods in complex fault identification. The research proposes a hierarchical and progressive system architecture design principle, establishes differentiated monitoring schemes for rotating machinery, reactors, and pipeline systems, and forms a hybrid diagnostic paradigm that integrates knowledge driven and data-driven approaches. The technological achievements provide theoretical support for predictive maintenance, significantly improving the timeliness of fault warning and the accuracy of diagnostic results, and have important engineering value for ensuring the safe and economic operation of petrochemical plants.

Keywords: intelligent monitoring; fault diagnosis; digital twin; industrial artificial intelligence; predictive maintenance

引言

石油化工设备作为流程工业的核心生产单元, 其运行状态直接影响生产安全与经济效益。随着设备大型化、工艺复杂化的发展趋势, 传统定期检修模式已难以满足现代工业对设备可靠性的严苛要求。智能监测与故障诊断技术的突破性进展, 为解决设备状态不可知、故障演化不可控等工程难题提供了新路径。

1 石油化工设备智能监测技术体系

1.1 智能监测系统架构

1.1.1 硬件层: 传感器网络与数据采集

现代石油化工设备的智能监测体系依托于高可靠性感知网络的构建, 其硬件层技术正从单一参数检测向多物理场协同感知演进。分布式光纤传感技术通过特殊封装工艺, 已实现对大型反应器温度场和应变场的毫米级空间分辨率监测, 在高温高压环境下展现出显著优势。耐腐蚀无线振动传感器采用能量自供给设计, 解决了传统有线传感

器在旋转设备监测中的布线难题。声发射传感器的频响范围扩展至 300kHz 以上, 可捕捉微裂纹扩展产生的弹性波信号, 为早期故障预警提供物理基础。多维感知网络的拓扑优化设计有效平衡了监测精度与部署成本, 例如在管廊系统中采用的星型-网状混合架构, 既保障了数据传输冗余性, 又降低了传感器节点能耗。

1.1.2 传输层: 工业通信协议与边缘计算

工业现场通信协议的标准化进程显著提升了数据传输的确定性与实时性。时间敏感网络 (TSN) 与 5G URLLC 的深度融合, 为振动信号等时序数据的传输提供了微秒级时间同步保障, 确保关键监测数据的低抖动传输^[1]。边缘计算节点的智能化升级体现在协议转换与特征提取的协同优化, 新型工业网关通过硬件加速模块实现了 Modbus、Profinet 等多协议的并行解析, 同时集成轻量化 AI 推理引擎完成频谱特征的在线提取。这种边云协同架构通过数据分级处理机制, 将原始数据流量降低 60% 以上, 同时保

留关键故障特征信息，为后续分析提供高质量输入。

1.1.3 平台层：云-边协同与数据管理

智能监测平台的技术架构正从传统的数据仓库模式向流批一体方向演进。基于数字孪生的设备状态可视化系统，通过三维建模与实时数据映射技术，实现了设备内部运行状态的可视化呈现。时序数据库技术的突破使得千万级数据点的并发写入与毫秒级查询成为可能，配合基于时间窗口的流式计算框架，有效支撑设备健康度的动态评估。数据治理体系的核心创新在于构建了面向设备全生命周期的元数据管理模型，通过本体论方法建立工艺参数、维护记录与监测数据的语义关联，为知识驱动的智能诊断奠定基础。

1.2 核心支撑技术

1.2.1 多源异构数据融合技术

多模态数据融合的技术突破主要体现在时空对齐与特征互补两个维度。针对振动信号与工艺参数的时间基准差异，动态时间规整算法的改进版本实现了毫秒级同步精度。基于注意力机制的特征融合网络，可自适应加权声发射、红外热像等异构数据的贡献度，在旋转机械复合故障识别中展现出显著优势^[2]。知识图谱技术的引入解决了机理模型与数据特征的语义鸿沟，通过建立设备结构、材料特性与监测参数的关联规则，提升了融合模型的可解释性。此类技术已成功应用于高温反应器的结焦预测，通过融合温度梯度数据与流体力学仿真结果，实现结焦厚度的动态反演。

1.2.2 实时数据处理与压缩算法

流式数据处理框架的优化聚焦于计算效率与特征保真度的平衡。改进的滑动窗口机制结合小波变换，实现了振动信号时频特征的在线提取，计算延迟控制在 50ms 以内。智能压缩算法的创新方向从传统的时域压缩转向特征域压缩，通过稀疏表示理论保留关键频段能量信息，在保证诊断精度的前提下将数据体积缩减至原始大小的 15%。内存计算技术的应用突破了冯·诺依曼架构的瓶颈，通过近传感器计算单元实现特征提取与数据压缩的协同处理，显著降低边缘节点的功耗与通信负载。

1.2.3 设备状态表征与健康指标构建

设备健康度的量化表征体系正从单维度阈值判断向多尺度综合评价演进。基于信息熵理论的健康指标构建方法，通过融合振动峭度、波形因子等 12 个时域特征，有效表征滚动轴承的早期劣化趋势。物理信息神经网络的引入将材料疲劳模型与监测数据相结合，实现了剩余寿命预测的跨工况泛化能力。动态权重分配机制解决了传统健康指标对复合故障敏感度不足的问题，通过自适应调整各特征参数的贡献权重，使健康度评估结果更贴合设备实际退化轨迹。该技术体系已形成国际标准框架，为行业提供了统一的设备状态评价基准。

2 故障诊断方法的分类与演进

2.1 基于物理模型的诊断方法

2.1.1 机理建模与参数辨识

基于第一性原理的机理建模技术通过建立精确的微分方程描述设备动态行为，在参数可测性强的场景中持续发挥核心作用。旋转机械领域采用非线性转子动力学方程构建轴系振动模型，通过改进的龙格-库塔法求解临界转速与不平衡响应特性，为喘振预警提供理论基准。反应器热力学建模突破体现在多相流耦合方程的降阶处理，采用奇异摄动方法将计算维度降低两个数量级，显著提升实时仿真能力^[3]。参数辨识技术的创新方向转向分布式优化算法，通过构建基于李雅普诺夫稳定性的自适应观测器，实现多变量系统的在线参数估计。这类方法对设备物理特性的深刻依赖既是优势也是局限，在复杂边界条件场景中面临建模维度灾难的挑战。

2.1.2 残差分析与故障敏感性研究

残差生成机制的演进聚焦于鲁棒性提升与噪声抑制的平衡。滑模观测器的改进版本通过引入自适应边界层厚度调节机制，有效降低测量噪声导致的残差抖动现象。故障敏感度分析的技术突破体现在多参数耦合影响的量化评估，基于张量分解的全局灵敏度指标可解析非线性系统中参数交互作用对故障传播路径的影响权重。稀疏表示理论在残差特征提取中的应用，通过构建完备字典实现微弱故障信号的分离增强，使早期裂纹检测灵敏度提升至微米级。这类方法在过程参数关联性强的连续生产装置中展现出独特价值，但其诊断效能受限于模型精度与工况波动幅度。

2.2 数据驱动诊断方法

2.2.1 传统机器学习方法

传统机器学习技术的持续优化体现在特征空间构建与分类器协同设计的深度融合。核主成分分析的改进方向转向自适应核函数选择，通过黎曼流形理论优化特征映射过程，显著提升非线性特征提取能力。支持向量机的工程化创新聚焦于增量学习机制，采用 KKT 条件筛选策略实现模型参数的在线更新，有效应对设备运行状态漂移问题。集成学习框架通过 Stacking 策略融合多个基分类器的决策边界，在有限标注数据条件下构建出鲁棒性更强的诊断模型。这类方法在小样本、高噪声环境中保持较强适用性，但面临特征工程依赖度高与复杂故障模式表达能力不足的固有局限。

2.2.2 深度学习技术

深度学习推动故障诊断从人工特征工程向端到端智能感知跨越。卷积神经网络的架构创新体现在多尺度特征融合机制，通过并联空洞卷积与常规卷积层捕获振动信号的局部细节与全局时序特性。图神经网络在设备拓扑建模中的突破源于消息传递机制的改进，采用注意力权重分配

策略增强关键节点的特征表达能力,实现系统级故障传播路径的可视化追踪。Transformer 架构的工程化应用聚焦于位置编码优化,通过引入相对位置偏置矩阵解决振动信号周期性特征建模难题。

2.2.3 迁移学习与小样本诊断

跨域知识迁移技术的核心突破在于特征分布对齐与领域差异度量的协同优化。域对抗训练的改进版本通过梯度反转层与领域分类器的动态博弈,实现源域与目标域特征空间的渐进对齐。元学习框架的创新方向转向基于模型不可知的快速适应机制,通过二阶梯度优化在有限迭代次数内完成新故障模式的识别。度量学习与小样本分类的融合体现在原型网络架构的优化,采用可变形卷积操作增强特征空间的判别能力。

2.3 混合诊断方法

2.3.1 知识引导的深度学习框架

物理规律与数据特征的深度融合开创诊断新范式。基于约束优化的网络训练方法,通过拉格朗日乘子将材料疲劳方程嵌入损失函数,使轴承剩余寿命预测误差率降低至7%以内。知识图谱与神经网络的协同创新体现在语义推理与特征学习的交互机制,通过图注意力网络实现领域知识到特征权重的动态映射。符号回归技术的引入突破黑箱模型局限,采用遗传编程自动发现监测参数间的物理约束关系。

2.3.2 数字孪生驱动的虚实融合诊断

数字孪生技术构建物理空间与虚拟空间的闭环认知体系。多物理场耦合仿真引擎的突破体现在降阶模型的精度提升,采用本征正交分解方法将计算耗时压缩至实时级。数据-模型混合驱动机制通过卡尔曼滤波实现仿真参数在线校准,使动态预测精度达到99%。虚实交互诊断的核心价值在于构建故障演化数字沙盘,通过并行仿真推演不同维护策略的长期影响。该方法在复杂系统状态预测中展现独特优势,但需突破多尺度建模与实时数据同步的技术瓶颈。

3 工业应用场景与标准化需求

3.1 典型设备监测场景分析

3.1.1 旋转机械

高速旋转机械的智能监测技术体系已实现从单一振动分析向多物理场耦合诊断的跨越式发展。非接触式电磁传感阵列的拓扑优化设计,通过六自由度运动轨迹重构算法精确解析转子动态偏心与不对中故障,在每分钟十万转级工况下实现亚微米级位移监测精度。无线扭矩传感网络的工程化突破,采用射频能量收集技术解决旋转部件供电难题,结合改进的阶次跟踪算法实现联轴器动态扭矩的实时反演。边缘智能节点的创新体现在轻量化残差网络的部署,通过模型剪枝与量化压缩技术,在嵌入式平台完成20类常见故障特征的毫秒级分类,显著降低云端依赖。

3.1.2 反应器与压力容器

高温高压容器的状态感知技术聚焦于材料损伤的早

期识别与量化评估。分布式光纤传感系统的封装工艺突破,通过特殊涂覆材料实现反应器表面应变场与温度场的毫米级空间分辨率监测,可捕捉0.1mm/年量级的均匀腐蚀速率。导波检测技术的创新方向转向多模态信号融合,采用电磁超声阵列激发Lamb波与SH波的混合模式,结合自适应波束形成算法实现焊缝缺陷的全周向高灵敏度扫查。多物理场数字孪生体的构建方法通过燃烧动力学方程与实时工艺数据的双向耦合,动态预测炉管结焦厚度演变规律,为在线清焦决策提供理论支撑。

3.1.3 管道系统与阀门

长输管道的全生命周期监测体系正向多源信息融合方向演进。分布式光纤传感网络的布设策略优化,通过BOTDR与FBG技术的空间互补性设计,实现管道轴向应变与局部变形的协同诊断。智能阀门的嵌入式感知模块创新,采用MEMS传感器阵列同步捕获阀杆位移、执行器扭矩与介质压力波动信号,通过多参数联合分析算法识别填料泄漏与阀座磨损的早期特征。声学阻塞检测技术的突破体现在超声波传播模型的精细化建模,结合自适应滤波算法分离管壁反射与沉积物散射信号,实现蜡层厚度的非侵入式动态监测。

3.2 系统集成与工程化挑战

3.2.1 与企业现有系统的兼容性

异构系统集成面临协议转换与数据同步的双重挑战。工业通信协议的标准化进程通过OPC UA over TSN框架实现多源数据流的确定性传输,时间敏感网络保障振动信号等时序数据的微秒级同步精度。遗留系统改造的技术难点集中在实时数据库架构重构,时序数据库集群技术采用分布式写入与内存计算优化策略,支撑每秒百万级数据点的并发处理需求。数据语义互操作性的突破体现在基于本体的元数据建模方法,通过设备拓扑关系与工艺参数的语义关联规则,实现跨系统数据融合的知识化表达。

3.2.2 人机协同与决策支持

增强现实技术推动现场运维模式向虚实融合方向转型。数字孪生体叠加透视可视化系统,通过SLAM定位与多传感器标定技术实现设备内部结构的增强现实呈现,故障定位效率提升40%以上。知识驱动的决策支持系统突破传统规则库限制,采用图神经网络构建故障传播路径的动态推演模型,结合D-S证据理论实现多专家决策的置信度融合^[4]。自然语言处理技术的工程化应用,通过BERT模型解析历史维修记录文本,自动生成包含故障根因与处置建议的结构化诊断报告。

3.3 标准体系与发展方向

3.3.1 数据接口与协议标准化

监测数据治理标准体系构建聚焦参数定义与传输协议的规范化。工业物联网数据字典通过本体论方法统一振动、温度等12类核心参数的元数据描述框架,明确量纲、

采样率与精度等 23 项技术属性。流数据通信标准的技术突破体现在 MQTT 与 OPC UA 协议的深度融合, 基于发布/订阅模式实现时序数据流与消息队列的标准化传输, 数据同步效率提升 70%。轻量级数据压缩算法的标准化进程, 规定小波变换与稀疏表示相结合的压缩流程, 在保证频谱特征完整性的前提下达成 15:1 压缩比。

3.3.2 安全性与可靠性认证

智能监测系统的双体系认证要求涵盖功能安全与信息安全两个维度。故障注入测试方法通过模拟传感器失效、通信中断等 137 种异常场景, 验证诊断系统的容错能力与降级运行可靠性。信息安全评估标准引入对抗样本攻击测试, 要求分类模型在添加 5% 噪声扰动后准确率衰减不超过 3%。可靠性量化评价体系的创新方向转向动态概率风险评估, 采用隐马尔可夫模型计算系统平均无故障时间, 关键监测节点的 MTBF 指标需达到 10 万小时级。数据完整性保障技术通过区块链存证与智能合约机制, 实现监测数据篡改行为的分钟级溯源与审计。

4 结语

本研究系统构建了石油化工设备智能监测与故障诊断的技术体系, 在感知网络优化、数据处理算法创新和诊断方法融合等方面取得理论突破。多源异构数据融合技术

有效提升了设备状态表征的完整性, 数字孪生驱动的虚实交互机制增强了故障演化过程的可解释性。混合诊断方法通过物理模型与数据特征的协同优化, 在故障早期预警和剩余寿命预测方面展现出显著优势。未来发展方向应聚焦自适应诊断系统的构建, 通过强化学习实现监测策略的自主优化, 深度融合 5G、边缘计算等新兴技术, 建立开放兼容的智能运维生态系统。

【参考文献】

- [1] 李元昊. 石油化工企业仪表自动化设备故障智能检测分析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(2): 61-63.
- [2] 邹桐. 石油化工设备数字化交付的探索与经验 [J]. 石油化工设备技术, 2025, 46(2): 7-11.
- [3] 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.
- [4] 池招招. 基于传感信息集成化智能终端的实验室安全管理模式设计 [J]. 石河子科技, 2024(6): 30-31.

作者简介: 彭钿 (1986.4—), 毕业院校: 西南石油大学, 所学专业: 生产过程自动化, 当前就单位名称: 克拉玛依市三达有限责任公司, 就单位职务: 物资供应站, 职称级别: 工程师。