

化工过程装备常见故障分析与智能监测控制优化研究

孙 泉

盛虹炼化（连云港）有限公司 江苏 连云港 222000

摘 要：化工过程装备是流程工业的核心载体，其运行可靠性直接关系到生产安全与经济效益。本文系统梳理了化工过程装备的常见故障类型及其成因机理，涵盖旋转机械、静设备、管道系统及流体输送设备等典型装备。在此基础上，剖析了传统故障诊断方法的技术局限，进而提出融合机理模型与数据驱动的智能监测控制优化策略框架，包括多层次传感器部署、基于深度学习的故障特征提取、数字孪生驱动的状态预测及自适应调控决策等关键技术路径。研究表明，构建“感知—分析—预测—调控”一体化的智能运维体系，是提升化工过程装备全生命周期可靠性的有效方向。

关键词：化工过程装备；故障诊断；智能监测；控制优化；数据驱动

引言

化工过程装备作为石油化工、煤化工、精细化工等领域的关键生产载体，其运行状态直接影响产品质量、能耗水平、环境排放及人员安全。典型的化工过程装备包括压缩机、泵、风机等旋转机械，塔器、反应器、换热器等静设备，以及连接各类设备的管道系统。这些装备长期处于高温、高压、强腐蚀、变负荷等苛刻工况下，故障频发且诱因复杂，已成为制约化工装置“安、稳、长、满、优”运行的突出瓶颈。近年来，随着物联网、大数据分析、人工智能等新一代信息技术的快速发展，化工过程装备的状态监测与故障诊断手段正经历从定期检修向预测性维护、从单参数阈值报警向多维信息融合智能决策的根本转变。

1 化工过程装备典型故障类型与机理分析

1.1 旋转机械故障

旋转机械是化工流程的动力核心，涵盖离心压缩机、泵及风机等。其常见故障主要归纳为三类：一是转子系统故障。转子不平衡最常见，由叶轮磨损、结垢或动平衡精度不足引起；转子弯曲多源于热变形或对中不良；转子裂纹则在疲劳与腐蚀作用下扩展，可能导致断轴。二是轴承与密封故障。滑动轴承表现为瓦温升高、油膜振荡及磨损，原因包括油品劣化及间隙不当；滚动轴承以点蚀、剥落为主，振动冲击脉冲为典型特征。密封失效易导致介质泄漏，构成安全隐患。三是动静摩擦与流体激励故障。高速机械因热膨胀偏差或间隙调整不当，易发生径向或轴向碰摩，引发剧烈振动噪声。此外，离心压缩机在小流量下易出现旋转失速和喘振，造

成气流低频振荡甚至叶片断裂。准确识别这些故障类型对保障设备安全运行至关重要。

1.2 静设备故障

静设备包括塔器（精馏塔、吸收塔）、反应器（固定床、流化床反应器）及换热器等，其故障特点在于破坏后果严重且修复周期较长。塔器故障。精馏塔的常见故障包括塔盘损坏或堵塞导致的气液分布恶化、浮阀卡涩、降液管泡沫层过厚引起的液泛，以及塔体壁厚因腐蚀冲刷而减薄。填料塔则面临填料破碎、壁流效应加剧和液体分布器堵塞等问题，直接影响分离效率。反应器故障。固定床反应器的热点偏移和床层压降骤增是典型故障模式，前者源于催化剂活性分布不均或进料分配不良，后者多为积碳或粉尘堵塞所致^[1]。流化床反应器的故障集中于分布板磨损、旋风分离器效率下降及催化剂跑损，这些故障不仅缩短运行周期，还可能导致飞温等失控风险。换热器故障。换热器管束的腐蚀穿孔、结垢堵塞和振动疲劳断裂是最常见的三类故障。壳程与管程的温差应力引起的管板接头开裂亦不容忽视，尤其是在频繁启停操作条件下。

1.3 管道系统故障

化工管道承担着物料输送和能量传递功能，其故障形式以内腐蚀减薄、应力腐蚀开裂、冲刷磨损和振动疲劳为主。弯头、三通和异径管等几何不连续部位因流场突变而成为冲刷腐蚀的重灾区。焊接接头的残余应力和热处理不当则显著增加了应力腐蚀开裂的敏感性。此外，管道系统中的积液段在低温环境下可能形成水合物堵塞，严重时导致管道完全阻塞。

1.4 流体输送设备故障

除离心泵外,容积式泵(如计量泵、螺杆泵)和各类阀门(调节阀、安全阀、切断阀)亦属于重要的流体输送与调控设备。容积式泵的故障主要表现为流量脉动增大、容积效率下降及内部泄漏,其根源在于转子与定子间隙因磨损而扩大。调节阀的常见故障包括阀芯与阀座冲蚀、定位器响应迟滞及填料泄漏,这些故障直接削弱了过程控制品质。安全阀起跳压力漂移和回座不严则构成超压保护的薄弱环节。

2 传统故障诊断方法评述与技术局限

传统的化工装备故障诊断方法大致可划分为基于机理模型的方法和基于规则与信号处理的方法两大类。基于机理模型的方法以数学物理方程描述装备的动态行为,通过状态观测器或参数估计来识别异常。卡尔曼滤波、龙伯格观测器及非线性状态估计等在该领域均有应用。然而,化工装备结构复杂且运行工况大幅波动,精确机理模型的建立往往面临巨大困难,模型失配导致的误报和漏报问题十分突出。基于规则的方法以专家系统和故障树分析为代表,将领域知识编码为逻辑规则进行推理诊断。该类方法的优势在于可解释性强,但知识获取的完备性和一致性难以保证,且对于未曾记录的复合故障缺乏泛化能力^[2]。基于信号处理的方法以傅里叶变换、小波分析、希尔伯特-黄变换等为核心工具,从振动、压力、温度等信号中提取故障特征频率和边频带信息。该类方法在旋转机械故障诊断中应用成熟,但在信噪比低和变转速工况下,特征提取的稳定性显著下降,且难以处理多源故障特征耦合的情况。综上,传统诊断方法在以下方面存在根本性局限:其一,依赖人工经验设定阈值和特征参数,缺乏自适应能力;其二,难以融合多维度异构信息(振动、温度、工艺变量、维修记录等);其三,诊断结论多为事后判定,无法实现故障演化的超前预测。这些局限迫切呼唤新的技术路径。

3 智能监测控制优化策略

3.1 多层次智能传感网络与数据融合策略

可靠的监测数据是智能诊断的基础。本文提出构建“设备级—单元级—系统级”三层递进的智能传感网络架构。设备级以本体关键测点(轴承振动、轴位移、壳体温度、润滑油金属颗粒浓度等)为核心,采用无线智能传感器实现高密度数据采集。单元级增补工艺关联测点(流量、压力、差压、组分等),反映设备与过程的耦合关系。系统级引入全流程数据采集与集散控制系统对接,实现运行工况的全景感知。在多源异构数据融

合层面,建议采用特征层融合与决策层融合相结合的策略。特征层融合对振动频谱特征、温度变化率和压力脉动特征进行归一化与主成分提取,降低信息冗余;决策层融合基于贝叶斯推理或证据理论,对不同诊断子模型的输出进行加权集成,有效提高诊断结论的可信度和鲁棒性。

3.2 基于深度学习与数据驱动的故障特征提取与识别

深度学习方法凭借其强大的非线性映射能力和自动特征提取优势,为化工装备故障诊断开辟了新途径。针对振动信号,卷积神经网络可自动学习时频谱图中的故障相关模式,避免人工选取特征的主观性和片面性。针对时间序列监测数据,长短期记忆网络和门控循环单元能够捕捉故障演化的时序依赖关系,适用于轴承磨损、转子热变形等渐进性故障的趋势预测。对于多变量耦合的复杂故障模式,图神经网络通过构建设备部件间的拓扑关系图,可有效表征故障在关联节点间的传播路径^[3]。值得注意的是,化工装备故障样本往往稀缺且正负样本严重不平衡。针对这一问题,迁移学习可将实验室或历史设备上积累的故障知识迁移至目标设备,生成对抗网络则可合成高质量的故障样本以扩充训练集,从而提升模型在小样本条件下的诊断精度。

3.3 数字孪生驱动的装备状态预测与健康管理

数字孪生技术通过在虚拟空间构建与物理装备高保真映射的数字化镜像,实现运行状态的实时同步、仿真推演和未来预测。对于关键化工装备,建立包含结构动力学模型、热力学模型和退化模型的混合数字孪生体,可利用实时数据驱动模型在线校正,使虚拟模型与物理设备的偏差始终控制在允许范围内。在健康管理层面,建议构建装备剩余寿命预测与维修决策的一体化框架。以隐马尔可夫模型或深度循环神经网络对装备退化过程进行随机建模,结合粒子滤波算法在线更新退化状态的后验分布,从而输出剩余寿命的概率分布函数。在此基础上,以最小化全生命周期成本为目标,动态优化预防性维修时机,取代传统的定时维修策略。

3.4 自适应调控与故障自愈控制优化

智能监测的最终落脚点在于驱动控制策略的优化,实现从“发现故障后处理”向“抑制故障于萌芽”的转变。本文提出两层递进的自适应调控架构:上层为基于状态评估的设定值优化层,根据装备健康状态在线调整过程变量的安全操作区间和约束边界;下层为基于模型预测控制的快速回路响应层,在设定值调整后执行多变量协调控制,兼顾产品质量指标和装备应力约束。进一

步地,针对喘振、液泛、飞温等典型异常工况,可设计故障自愈控制策略^[4]。其核心思想是当监测系统识别出故障早期征兆时,自动触发主动容错控制动作,如调整防喘振阀开度、改变回流比或激活备用冷却系统,以避免工况持续恶化至触发联锁停车。该策略的实施依赖于准确的故障早期识别算法和充分的安全控制逻辑验证。

3.5 云边协同智能运维平台架构

面向工程实际部署,本文提出云边协同的智能运维平台架构,以解决计算资源与实时性之间的平衡问题。边缘计算层部署于装置现场,负责高频数据的实时预处理、本地报警和初步特征提取,响应时间控制在毫秒级,确保关键报警的及时性。云计算层承担大规模历史数据的深度挖掘、复杂深度学习模型的训练与迭代更新、数字孪生体的高精度仿真计算以及全厂级运维决策的优化求解。云边之间通过轻量级消息队列协议进行模型参数和特征结果的同步,在保证数据安全的前提下实现“边端敏捷响应、云端智力赋能”的协同运行模式,该架构已在同类流程工业的初步探索中展现出良好的实用前景。

4 智能监测控制体系的关键技术挑战与应对

尽管智能监测控制策略展现出显著优势,但在化工场景下的工程化落地仍面临诸多挑战。首先是数据质量与标注问题。化工现场数据常伴有噪声、缺失值和异常值,且故障样本的精确标注高度依赖专家经验,导致监督学习方法的性能受限。应对策略包括引入自监督学习和对比学习等弱监督范式,以及开发面向工业时序数据的自动清洗与修复算法^[5]。其次是模型的可解释性与可靠性问题。深度学习模型的黑箱特性与化工安全生产对决策可追溯性的要求存在根本矛盾。建议采用注意力机制可视化、梯度加权类激活映射等方法对模型决策进行解释,同时结合物理约束神经网络,将质量守恒、能量守恒等先验知识嵌入模型结构,使预测结果始终遵循物理规律。再次是模型漂移与自适应更新问题。化工装备

随运行时间增长其动态特性必然发生缓慢变化,固定参数的诊断模型将逐渐失效。需部署在线增量学习机制,当检测到数据分布发生概念漂移时,自动触发模型微调或重训练流程,确保诊断性能的长期稳定。

5 结语

化工过程装备的故障分析与智能监测控制优化是一项涉及多学科交叉的系统性工程。本文从典型故障机理出发,系统梳理了旋转机械、静设备、管道系统和流体输送设备的故障模式与成因,评述了传统诊断方法在精准性、自适应性和预测能力方面的不足。在此基础上,构建了包含多层次智能传感网络、深度学习驱动的故障识别、数字孪生状态预测、自适应调控及云边协同平台在内的全链条智能监测控制优化策略框架。该框架的核心逻辑在于实现从被动式故障响应到主动式健康管理的范式跃迁。面向未来,化工装备智能运维的研究将向更深层次的物理-数据融合建模、更强泛化能力的预训练大模型、以及人机协同的混合智能决策方向持续演进。随着工业互联网基础设施的日趋完善和人工智能技术的不断突破,构建覆盖装备全生命周期的“感知智能—分析智能—决策智能—执行智能”闭环体系,将成为化工过程装备安全保障领域的核心发展方向。

参考文献

- [1] 高金吉,王峰,张来斌. 化工过程装备故障诊断与预测性维护技术进展 [J]. 化工学报,2022,73(8):3321-3335.
- [2] 陈学东,范志超,关凯书. 石化装备承压设备损伤模式识别与寿命预测研究综述 [J]. 压力容器,2023,40(2):1-14.
- [3] 刘大同,彭宇,彭喜元. 数字孪生技术及其在装备健康管理中的应用 [J]. 机械工程学报,2021,57(15):156-171.
- [4] 钟秉林,黄仁. 基于深度学习的旋转机械智能故障诊断方法研究 [J]. 振动工程学报,2022,35(4):789-801.
- [5] 王华庆,宋浏阳,马超. 数据驱动与机理模型融合的化工设备状态评估方法 [J]. 化工自动化及仪表,2024,51(1):1-9.