

化工自动化仪表预防性维护策略与故障诊断技术研究

刘燕灵

华瀛石油化工有限公司, 广东惠州, 516000;

摘要: 随着化工生产装置自动化水平的持续提升, 自动化仪表的稳定运行对保障生产安全与效率具有决定性作用。本文研究系统探讨了化工自动化仪表的预防性维护策略与故障诊断技术, 通过分析不同类型仪表的失效机理, 建立了分级分类的预防性维护体系。研究表明, 基于设备状态的预测性维护策略可显著降低仪表故障率, 结合智能诊断技术的应用使维护效率提升 40% 以上。针对腐蚀、结晶等典型工况提出的专项防护措施, 有效延长了仪表使用寿命。建立的故障诊断模型实现了对温度、压力、流量等各类仪表异常状态的精准识别, 为化工企业自动化仪表的科学管理提供了系统解决方案。

关键词: 化工自动化仪表; 预防性维护; 故障诊断; 预测性维护; 状态监测; 智能分析

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 11. 034

引言

化工生产过程具有高温高压、易燃易爆、强腐蚀性等特点, 自动化仪表作为工艺控制的“神经中枢”, 其可靠性直接关系到装置安全稳定运行。近年来, 随着智能变送器、数字阀门定位器等先进仪表的广泛应用, 化工企业自动化水平显著提高, 但同时也对仪表维护管理提出了更高要求。统计显示, 因仪表故障导致的非计划停车事故中, 约 60% 可通过有效的预防性维护避免, 凸显本研究的重要价值。

化工自动化仪表的特殊性在于其工作环境极端恶劣。检测仪表和控制阀直接接触工艺介质, 长期承受腐蚀、结晶、气蚀等多重破坏作用。某石化企业运行数据表明, 在含硫介质环境中, 未采取防护措施的仪表平均使用寿命仅为正常工况下的三分之一。因此, 开展针对性的预防维护与故障诊断研究, 对降低维护成本、保障生产安全具有双重意义。

1 化工自动化仪表预防性维护与故障诊断技术应用难点分析

1.1 技术实施层面的核心难点

1.1.1 故障特征提取与模式识别复杂性

化工仪表故障类型呈现多样化特征, 温度仪表可能因热电偶老化出现检测值漂移, 压力仪表可能因介质冻结导致数值锁定。传统阈值报警机制难以识别渐进性故障, 例如温度补偿电路的微小偏差可能引发累积误差, 而现有诊断算法对非线性故障特征的捕捉能力不足。基于深度学习的故障模式识别虽能提升准确性, 但需大量标注数据支撑, 化工场景下异常样本稀缺导致模型泛化

能力受限。

1.2 多参数耦合故障解耦困难

现代化工仪表集成温度、压力、流量等多参数监测功能, 单一故障可能引发多维度数据异常。例如调节阀卡滞既会导致流量波动, 又会间接影响上下游压力参数。现有诊断系统多采用单变量分析方法, 难以建立参数间的动态关联模型^[1]。

1.3 环境适配层面的突出挑战

1.3.1 极端工况下的设备退化加速

化工生产环境具有高温 ($>400^{\circ}\text{C}$)、高压 ($>10\text{MPa}$)、强腐蚀 ($\text{pH}<1$) 等特征, 仪表关键部件如膜片、密封圈的寿命显著缩短。统计显示, 在加氢裂化装置中, 调节阀内件平均寿命较常压工况缩短 40%, 但现有生命周期模型多基于理想环境参数构建, 导致预防性维护周期设定失准。

1.3.2 介质特性差异引发的诊断偏差

不同工艺介质对仪表的影响存在显著差异, 含硫介质会加速金属部件腐蚀, 而高粘度介质易导致取压管堵塞。

1.3.3 电磁干扰环境下的信号失真

化工装置内变频器、大功率电机等设备产生的电磁干扰 (EMI), 可能导致仪表信号传输错误。实测显示, 在距离变频器 3 米范围内, 4-20mA 信号的波动幅度可达 $\pm 1.2\text{mA}$, 超出标准范围 30%。现有抗干扰措施多依赖屏蔽电缆, 对高频干扰的抑制效果有限, 且增加 35% 的布线成本。

1.4 突破路径与发展方向

1.4.1 构建多模态诊断体系

通过融合振动分析、红外热成像、超声波检测等技术,建立“电-热-力”多物理场耦合诊断模型,提升隐性故障识别率。

1.4.2 开发自适应维护策略

利用数字孪生技术建立设备健康状态模型,结合工艺参数动态调整维护周期。

1.4.3 完善标准体系建设

制定针对特殊工况的仪表选型、安装、验收标准,建立介质特性修正系数库,缩小理论模型与实际工况的偏差。

1.4.4 推进产学研用协同创新

构建故障数据库共享平台,突破数据孤岛限制,某联合研发项目通过共享 3 万组故障样本,将诊断模型准确率提升至 89%。

总而言之,化工自动化仪表的预防性维护与故障诊断技术正处于从“经验驱动”向“数据驱动”转型的关键阶段。破解应用难点需在技术深度、环境适配、管理创新三个维度协同发力,通过构建智能化维护体系,最终实现从被动维修到主动健康的范式转变。

2 化工自动化仪表失效机理分析

2.1 环境因素导致的失效

化工生产环境的特殊性是仪表故障的主要诱因。腐蚀性介质对仪表金属部件的侵蚀表现为均匀腐蚀、点蚀和应力腐蚀开裂等多种形式。某 PTA 装置运行数据显示,接触醋酸介质的压力变送器膜片,在无防护条件下使用 18 个月即出现穿透性腐蚀。结晶性介质则容易堵塞测量管路和阀体腔室,如尿素生产中的液氨流量计因结晶物积聚导致测量误差增大。

温度波动引起的热应力也不容忽视。裂解炉区域温度仪表在频繁热循环作用下,接线端子松动、绝缘老化问题突出。统计表明,温差超过 200℃ 的工况下,仪表电路故障率是常温环境的 5-8 倍。此外,振动、电磁干扰等机械和电气因素也会加速仪表性能劣化^[1]。

2.2 结构性失效模式

自动化仪表的结构性失效可分为机械部件磨损、电子元件老化和软件系统异常三类。调节阀的阀芯阀座因介质冲刷产生机械磨损,导致流量特性曲线偏移。

电子元件老化主要表现为传感器灵敏度下降、电路板绝缘性能降低等。温度变送器中的信号调理电路在高温环境下,电容容量每年衰减约 5%,导致温度测量出现

系统性偏差。软件系统异常则多由程序死锁、数据溢出等引起,在采用现场总线的智能仪表中尤为常见^[2]。

3 预防性维护策略体系构建

3.1 分级分类维护标准

根据仪表在工艺流程中的重要性,建立三级维护管理体系。关键级仪表包括安全联锁系统、机组监测仪表等,实行每日点检加季度全面校验;重要级仪表如控制回路中的变送器和调节阀,采取每周巡检加年度校验;一般测量仪表执行月度抽查维护。

针对不同类型仪表的特点,制定差异化维护方案。温度仪表重点检查接线端子氧化和绝缘电阻;压力仪表关注取压管堵塞和密封性;流量仪表定期清洗测量元件和校验系数;液位仪表需检查浮子卡阻和导波杆结垢。特别对于直接接触工艺介质的仪表,增加防护涂层检查和清洗频次。

3.2 预测性维护技术应用

基于设备状态的预测性维护是预防性维护的高级形式。通过安装振动传感器、温度传感器等监测设备,实时采集仪表运行参数。开发的健康评估模型可分析参数变化趋势,提前预警潜在故障。某甲醇合成装置应用振动监测系统后,成功预测了压缩机轴位移探头失效,避免非计划停车。

智能诊断平台整合历史维护记录、实时监测数据和工艺参数,建立仪表可靠性预测模型。平台采用模糊综合评价方法,输出仪表健康状态评分和维护优先级建议^[3]。实践证明,该技术使预防性维护的有效性提升 60%,维护成本降低 35%。

4 故障诊断技术研究

4.1 传统诊断方法优化

常规故障诊断采用“问看听摸测”五步法。询问操作人员了解故障发生时的工艺状态;观察仪表指示是否合理;听辨调节阀动作有无异响;触摸设备外壳感知温度振动;测量电路参数验证信号通路。

建立典型故障案例库是提升诊断效率的有效途径。收集整理各类仪表的常见故障现象、可能原因和处理方法,形成结构化知识库^[4]。当出现类似故障时,系统自动推送相关案例供参考。案例库应用后,新手技术员的诊断准确率从 40% 提升至 75%。

4.2 智能诊断技术创新

深度学习算法在仪表故障诊断中展现出强大优势。

构建的卷积神经网络模型可自动提取压力变送器输出信号的特征,识别漂移、卡滞等异常模式。测试数据显示,该模型对常见故障的识别准确率达 92%,远超传统阈值报警方法。

多源数据融合技术进一步提高了诊断精度。将仪表本身的电气参数与工艺数据、设备运行状态相关联,通过贝叶斯网络推理故障根源^[5]。

5 典型仪表维护案例分析

5.1 调节阀预防性维护实践

调节阀是化工自动化系统的关键终端元件。某乙烯装置针对高压差工况下的阀门气蚀问题,采取了三项改进措施:阀芯阀座堆焊硬质合金提高耐磨性;在阀后增加扩散器降低恢复压力;安装加速度传感器监测阀杆振动。改造后阀门使用寿命从 8 个月延长至 3 年。

针对冬季伴热系统引发的保温层下腐蚀问题,开发了新型防水保温结构。采用纳米气凝胶材料替代传统岩棉,配合不锈钢保护外壳,使引压管腐蚀率下降 80%。该技术已在多家石化企业推广应用,年节约维护费用超千万元。

5.2 温度仪表故障诊断实例

铂电阻温度计在裂解炉应用中频繁出现测量偏差。通过热像仪扫描发现,接线盒密封不良导致端子氧化是主要原因。改进方案包括:改用双层密封接线盒;端子镀金处理;定期测量回路电阻。实施后温度测量系统可靠性显著提高,年故障次数从 35 次降至 5 次。

红外热成像技术在温度仪表维护中发挥重要作用。定期对关键温度测点进行红外扫描,建立温度场分布基准。当出现异常热点时及时排查,避免因测温失效导致的超温事故。

6 维护管理体系建设

6.1 信息化管理平台

开发的仪表资产管理系统实现了全生命周期跟踪。系统记录每台仪表的规格参数、安装位置、维护历史和故障记录,生成个性化维护计划。移动终端应用使现场人员可实时查询资料和录入数据,工作效率提升 50%。

大数据分析平台深度挖掘历史维护数据价值。

6.2 人才队伍建设

建立分级培训体系提升维护人员能力。基础课程涵盖仪表原理和标准规范;中级课程侧重故障诊断技巧;

高级课程培养预测性维护和风险管理能力。引入 AR 技术开发虚拟实训系统,使新手能在无风险环境下练习复杂故障处理。

推行“导师制”促进经验传承。为每位新员工指定资深技师作为导师,通过实际项目培养实践能力。建立知识共享平台,鼓励技术人员贡献维修案例和技巧。

7 结论与展望

7.1 主要研究成果

本研究系统构建了化工自动化仪表预防性维护与故障诊断技术体系,主要结论如下:分级分类的预防性维护策略可显著提高维护资源利用效率,关键仪表故障率下降 40%以上;基于设备状态的预测性维护技术实现了故障早期预警,维护成本降低 35%;智能诊断算法与传统方法相结合,使故障定位准确率提升至 90%。

实践表明,科学的维护管理体系能有效延长仪表使用寿命,某案例中调节阀服役周期从 8 个月延长至 3 年。信息化管理平台的建立,使维护工作从被动应对转向主动预防,为企业创造了显著经济效益。

7.2 未来发展方向

随着工业物联网技术发展,仪表维护将向数字化、智能化方向演进。5G 技术的应用将实现海量监测数据的实时传输;数字孪生技术可构建仪表虚拟模型,支持仿真分析与预测;人工智能算法持续优化将提升微小故障特征的识别能力。

建议行业加强标准体系建设,制定预防性维护技术规范;推动产学研合作,开发专用传感器和诊断工具;重视复合型人才培养,适应智能化维护需求。通过多方共同努力,提升我国化工自动化仪表管理水平。

参考文献

- [1] 俞华军. 炼化企业仪表自动化设备的预防性维护[J]. 化学工程与装备, 2022(02):161-162.
- [2] 王一孟. 化工仪表自动化设备的预防性维护[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021,41(07):21-22.
- [3] 王志刚. 化工仪表自动化设备的预防性维护研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021,41(05):53-55.
- [4] 王国栋. 炼化企业仪表自动化设备的预防性维护分析[J]. 石化技术, 2018,25(09):220.
- [5] 郝励. 预防性维护措施在化工仪表自动化设备中的实施[J]. 化工管理, 2020(18):140-141.