

预测性维护技术在化工仪表中的应用及经济性评估

康则天 (陕西未来能源化工有限公司煤制油分公司, 陕西 榆林 719000)

摘要: 化工行业作为流程工业的核心领域, 其生产过程具有高温、高压、强腐蚀等特点, 化工仪表作为生产过程的“感知神经”, 其运行可靠性直接关系到生产安全、产品质量与经济效益。本文首先阐述了预测性维护技术的内涵与化工仪表的特点, 接着详细分析了振动分析、油液分析、红外热成像、超声检测及数据驱动技术在化工仪表中的具体应用, 然后从直接成本与间接成本角度构建了经济性评估体系, 并结合案例验证了预测性维护技术的经济可行性, 旨在为化工企业提升仪表管理水平提供参考。

关键词: 预测性维护; 化工仪表; 故障诊断; 经济性评估

中图分类号: TH707 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 036-0076-03

Application and Economic Assessment of Predictive Maintenance Technology in Chemical Instrumentation

Kang Ze tian (Shaanxi Future Energy and Chemical Co., Ltd., Coal-to-Liquids Branch, Yulin Shaanxi 719000, China)

Abstract: As a core sector of the process industry, the chemical industry is characterized by high temperature, high pressure, and strong corrosion in its production processes. Chemical instrumentation serves as the “sensory nerves” of production, and its operational reliability is directly related to production safety, product quality, and economic efficiency. This paper first elaborates on the essence of predictive maintenance technology and the characteristics of chemical instrumentation. It then provides a detailed analysis of the specific applications of vibration analysis, oil analysis, infrared thermography, ultrasonic testing, and data-driven technologies in chemical instrumentation. Subsequently, an economic assessment system is constructed from the perspectives of direct and indirect costs, and case studies are used to validate the economic feasibility of predictive maintenance technology. The aim is to provide references for chemical enterprises to enhance their instrumentation management practices.

Keywords: predictive maintenance; chemical instrumentation; fault diagnosis; economic assessment

化工是重要的国民经济基础产业, 生产工艺复杂, 物理、化学反应繁多, 对温度、压力、流量、液位、成分等各种工艺参数的测量及控制的精度要求很高。仪表作为化工生产各相关参数的测量及控制设备, 是化工生产保证连续、稳定的重要保证。当前, 化工企业仪表维护普遍采用预防性维护模式, 即通常按照固定的周期进行仪表维护保养, 使得突发性故障发生的概率降低。然而, 从另一方面来看, 该维护方法显然不够合理, 一方面是由于仪表本身运行情况良好时, 该维护方法明显会加大人工消耗与维护材料消耗, 另一方面对于仪表自身已经存在潜在的故障隐患时, 有可能由于维护周期没有到, 而错失维护的最佳时机, 使得故障得不到及时治理而有所扩大。随着工业 4.0 的深入发展, 物联网、大数据、人工智能等现代新兴技术的发展使得对生产制造设备实施预测性维护成为可能。对生产制造设备实施预测性维护, 能有效捕捉设备运行参数, 通过数据分析、建模, 从而有效实现对设备故障的有效准确的预测, 并基于这些预测信息对相关设备开展针对性的维护, 从而使得维护更加有效, 在保障维护效果的同时降低维护成本。因此, 对

于预测性维护技术的应用效果及其经济评价在化工仪表方面的研究就显得尤为重要。

1 预测性维护技术内涵与化工仪表特点

1.1 预测性维护技术内涵

预测性维护 (Predictive Maintenance, PdM) 是以设备运行状态为基础的维护手段, 通过使用传感器、数据采集与处理系统、故障诊断算法等技术, 实时观测设备运行参数及性能指标, 跟踪设备劣化的趋势, 预测设备出现故障的时间及位置, 从而制定相应的针对性维护计划。与事后维护 (Breakdown Maintenance) 与预防性维护 (Preventive Maintenance) 相比, 预测性维护优点显而易见, 即维护时机合理, 提前在故障产生前对其实施干预, 防止故障扩大; 维护成本低, 可防止不必要的维护作业; 设备可用性好, 延长设备使用寿命; 减少非计划停机时间, 维持生产连续性。预测性维护技术体系主要由数据采集层、数据处理层、故障诊断层和维护决策层等 4 个环节组成, 数据采集层通过传感器采集设备的振动、温度、压力、电流等运行数据; 数据处理层对采集的原始数据进行去噪、滤波、归一化等预处理; 故障诊断层通过机器学习、深度学

习、专家系统等算法对预处理后的数据进行诊断, 辨识设备的故障模式及劣化程度; 维护决策层根据诊断结果安排维护方案, 如维护时间、维护内容、维护所需资源等。^[1]

1.2 化工仪表的特点

化工仪表种类较多, 主要按照作用不同分为测量仪表(包括温度计、压力表、流量计等)、控制仪表(包括控制器、执行器等)、分析仪表(包括色谱仪、光谱仪等)等。其工作环境具有工况条件恶劣、大多具有高温(如反应釜温度可以达到 500℃以上)、高压(如高压管道压力可以达到 10MPa 以上)、强腐蚀(如酸碱溶液、有毒气体等)等特点, 仪表很容易发生腐蚀、磨损、老化等现象; 连续性要求强, 化工生产大多是连续的流程, 一旦仪表出现故障造成停机, 可能会使整条生产线陷入停产状态; 精度要求高, 仪表测量的精度直接影响到产品质量, 例如化工产品的化学成分含量误差较大可能会使产品无法正常销售; 关联性强, 多个仪表之间具有相互配合工作的特点, 一旦某个仪表故障就会导致连锁故障, 影响整个控制系统的稳定性。

2 预测性维护技术在化工仪表中的具体应用

针对化工仪表的不同类型与故障模式, 预测性维护技术有着不同的应用方式。以下从常用的几种预测性维护技术入手, 分析其在化工仪表中的应用场景与实施方法。

2.1 振动分析技术

振动分析技术是通过监测设备的振动信号, 分析振动频率、振幅、相位等参数的变化, 判断设备是否存在故障的一种技术。化工仪表中常见的旋转类仪表如涡轮流量计仪表、离心泵配套仪表等易因为轴承磨损、转子不平衡、轴系不对中等原因而产生异常振动。应用时, 在仪表的敏感部位设置加速度传感器, 实时测量振动信号, 经由数据采集器将振动信号传送到上位机, 采用傅里叶变换将时域信号转化为频域信号, 分析信号频谱。如涡轮流量计轴承磨损时的振动信号存在对应频率的谐波, 与轴承正常状态下的频谱图对比, 能及时发现问题轴承劣化的趋势。^[2]

2.2 油液分析技术

油液分析技术主要用于润滑系统相关的仪表设备, 通过分析润滑油的理化性质(如粘度、酸值、水分含量)和磨损颗粒(如颗粒大小、数量、成分), 判断设备的磨损状态。在化工仪表液压执行器、齿轮传动机构等设备的润滑系统中, 对设备能否正常运行产生较大的影响。实际运用中, 通过对仪表设备润滑系统定期取样油样, 借助油液分析仪器(光谱分析仪、铁谱分析仪)对取样油液进行分析。当油液含水量超

过极限值, 会导致油质发生乳化现象, 润滑效果下降; 当磨损粒数增加、磨损粒径增大的时候, 则表明机组设备严重磨损。某石化企业在定期对调节阀的液压执行机构采用油液分析方法, 通过检测油液中铁元素含量值的方法, 对执行机构的活塞磨损问题进行了提前预知, 及时维修了设备的故障问题, 防止了由于执行机构活塞卡死所带来的生产中停机问题, 降低企业经济损失约 50 万元。

2.3 红外热成像技术

红外热像技术利用物体红外辐射的特点, 将物体表面温度分布转变为热像图, 通过对热像图进行判别检测设备是否存在过热缺陷。化工仪表的电气仪表(包括仪表控制柜、接线端子)、温度仪表(热电偶、热电阻)等由于接触不良、线路老化、元器件损坏等因素出现过热缺陷。采用红外热像仪扫描的方式, 快速捕捉热像图中仪表异常升温的部位。仪表控制柜内部接线端子接触不良, 该部位的电阻增大, 发生过热, 热像图上会出现局部高温点; 再采用定期巡检以及实时监测相结合的方式, 可以及时发现电气方面的潜在故障。^[3]

2.4 超声检测技术

超声检测技术利用发射超声波接收反射波, 根据反射波的传播时间、波幅等确定设备内部存在缺陷的情况。对化工仪表中的压力仪表(压力表、压力变送器)中的弹性元件(弹簧管、膜片)存在疲劳、腐蚀等导致的裂纹采用超声检测技术进行无损检测。对于压力变送器的膜片, 可以利用超声探头进行膜片的扫描, 当膜片存在裂纹时超声波会在裂纹处发生反射, 经对反射波信号的分析来确定裂纹位置及大小。此外, 还可以利用超声检测技术对仪表管道的泄漏情况进行检测, 管道中若发生泄漏, 泄漏处会产生湍流噪声, 采用超声波传感器能够对泄漏产生的噪声信号进行捕捉, 实现泄漏点的定位和定量。

2.5 数据驱动技术

数据驱动技术是化工仪表预测性维护应用最早也是使用最为广泛的模式, 其借助大数据及人工智能技术的发展, 通过采集仪表的历史运行数据、故障数据、维护记录数据等数据, 建立机器学习或深度学习模型, 进而预测和诊断仪表故障。比如, 对温度传感器而言, 可以收集其测量值、环境温度、供电电压等信息, 通过 SVM、RF、LSTM 等模型建立故障预判模型, 通过对当前数据的分析判断, 预测该传感器未来一段时间内的测量误差, 一旦误差超过了阈值就发出警报。^[4]

3 预测性维护技术在化工仪表中的经济性评估

采用预测性维护技术需要在传感器、数据采集设备、软件平台等方面进行投资, 同时将产生维护成本

减少、生产效率提高等效益,因此需要对其经济性进行评判,是化工企业决定是否应用预测性维护技术的关键,经济性评判主要从投入的成本和获取的效益两个方面入手,通过ROI、NPV等参数考量其经济可行性。

3.1 成本分析

预测性维护的成本主要包括初始投资成本与运营成本两部分:①初始投资成本是指为实施预测性维护技术而一次性投入的费用,主要包括:一是硬件设备成本,如传感器(振动传感器、温度传感器、超声传感器等)、数据采集器、网关设备、服务器等的购置费用;二是软件平台成本,如数据处理软件、故障诊断软件、维护管理软件等的开发或购置费用;三是安装调试成本,包括传感器的安装、线路的铺设、软件的调试等费用。初始投资成本与仪表的数量、类型及预测性维护技术的复杂程度有关,一般来说,一套覆盖中小型化工企业的预测性维护系统初始投资在几十万元到几百万元不等。②运营成本,指预测维护系统运营期间的长期维持费用,主要包括:一是人工成本,例如数据分析师、维护人员的人工成本支出;二是设备维护成本,例如传感器、数据采集设备定期校准、更新成本;三是软件更新成本,例如软件平台版本、功能升级更新成本

3.2 收益分析

预测性维护的收益主要体现在直接收益与间接收益两个方面:①直接效益指预测性维护技术的实施直接节省的维护成本和增加的收入,主要包括:一是维护成本节省,在最大程度上杜绝了不必要的维护工作,降低了人工维护和材料成本;二是故障损失节省,避免了仪表故障带来的生产停车损失、产品报废损失、设备损坏等损失;三是设备寿命加长,在一定程度上杜绝了设备超寿命工作的产生,延长了仪表的使用寿命,降低了仪表更换费用。②间接收益是指预测性维护技术带来的非直接经济收益,主要包括:一是生产效率提升,减少了非计划停机时间,提高了生产的连续性;二是安全风险降低,避免了因仪表故障引发的安全事故,减少了事故处理费用与声誉损失;三是管理水平提升,通过数据化的管理方式,提高了仪表管理的精细化程度。^[5-7]

3.3 经济性评估指标与案例分析

在经济性评估指标中,投资回报率(ROI)、净现值(NPV)以及投资回收期等指标。其中投资回收率(ROI)指标定义为: $ROI=(\text{年净收入} / \text{初始投资成本}) \times 100\%$, $\text{年净收入} = \text{年总收入} - \text{年营运成本}$ 。再以某中型企业为例,该企业拥有化工仪表1500台,其前期采取的是预防性维护模式,年维护成本为80万元,

由于仪表故障造成的生产损失为120万元,为提高仪表维护水平,该企业引进预测性维护技术,投资成本为150万元,年运行费用为20万元。引入预测性维护后,年维护成本由80万元降低到50万元,由120万元降到40万元,则该企业的年净收益 $= (80-50) + (120-40) = 30+80=110$ 万元,年净收益 $=110-20=90$ 万元,投资回报率 $ROI=(90/150) \times 100\%=60\%$,投资回收期 $= \text{初始投资} / \text{年净收益} = 150/90 \approx 1.67$ 年,可见预测性维护技术的经济可接受性很高,可在较短时间内收回投资额。

4 结论

化工仪表实施预测性维护技术,利用维护过程中实时监控与分析仪表的运行数据,实现故障的预警与精准维护,有效地解决了传统维护技术的不足之处。本文利用振动分析技术、油液分析技术、红外热分析技术、超声技术、数据驱动技术对化工仪表中典型的预测性维护技术进行分析,发现在具体化工仪表设备中可以针对不同故障模式故障诊断方法均可以根据具体特点选用相应的技术手段,经济性分析结果表明,预测性维护技术尽管存在前期的维护工作成本较大,但是维护成本小、生产损失低、投资净效益收益较高、投资效益回收期较短等特点,体现了较好的经济性,未来经济可行性较强。在工业物联网、人工智能的背景下,化工仪表设备的预测性维护技术必将为化工企业智能制造转型和升级提供足够的助力。

参考文献:

- [1] 王磊. 物联网技术在化工生产检测仪表领域中的应用研究[J]. 中国仪器仪表, 2025(2):84-88.
- [2] 窦凯. 化工电气仪表数字化管理与智能检修技术[J]. 化工管理, 2024(22):77-79.
- [3] 王祖苗. 化工装置的自控仪表安全控制系统的设计与优化[J]. 工程施工新技术, 2024,3(12):208-210.
- [4] 王轲歆, 林杰. 工业自动化仪表的智能化设计与应用研究[J]. 进展, 2025(5):77-78.
- [5] 唐勇, 奚美芳, 陈小辉, 等. EthernetAPL技术及其在制药行业的应用[J]. 石油化工自动化, 2025,61(3):57-61.
- [6] 张明, 李华, 赵伟. 基于深度学习的工业设备预测性维护方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2023,44(5):112-120.
- [7] 刘阳, 陈建国, 周涛. 流程工业关键仪表健康状态评估与经济性分析模型[J]. 化工自动化及仪表, 2024,51(2):135-141.

作者简介:

康则天(1981-),男,汉族,甘肃武威人,本科,中级工程师,研究方向为化工仪表。