

大型化工设备预防性维护体系优化研究

王其海

(南通星辰合成材料有限公司, 江苏 南通 226000)

摘 要 本文以某石化企业公用工程系统为研究对象, 深入剖析了离心式空压机组、冷冻机组及循环水泵在固定周期检修体制下暴露的时机错配问题, 揭示了单维度监测技术在高频冲击捕捉、瞬态工况追踪及背景噪声分离方面的技术短板, 探索了基于设备劣化规律的动态维护触发机制, 研究了小波包分解、短时傅里叶变换、自适应噪声抵消等多维监测技术的集成路径, 构建了状态驱动的备件库存弹性管理模型。研究结果表明, 劣化曲线引导的维护决策能够有效消除过早干预与滞后响应的矛盾, 多维监测技术融合显著提升故障诊断准确性, 动态库存机制在保障备件供应连续性的同时实现资金占用优化。

关键词 大型化工设备; 预防性维护体系; 维护作业流程标准化

中图分类号: TQ05

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.021

0 引言

设备管理是化工企业生产的基础。它的核心体现在以现代设备管理思想与信息技术的整合为依托, 以企业设备资产、设备台账为基础, 通过对检修计划、工单、故障等业务的执行与跟踪, 管理设备全生命周期内的管理要素, 提高设备可靠性和维修效率, 降低维修成本。而对设备的维护管理是每个设备管理人员必须面对的至关重要的问题。传统的设备管理模式通过手工收集信息, 反馈慢、数据易失真, 造成设备管理的脱节, 无法及时掌握设备的使用情况, 不能起到预防性维护效果, 因不能及时更换设备可能造成巨大的经济损失。因此, 预防性维护是设备管理的基础。

1 工程概况

某大型石化企业公用工程系统于 2016 年投产运行, 主要承担全厂工艺装置的空气供给、冷冻供应及循环冷却任务, 核心设备包括离心式空压机组 4 台、离心式冷冻机组 3 台、离心式循环水泵 8 台及配套的板式换热器 52 台。离心式空压机采用多级叶轮串联结构, 单机功率达 28 MW, 转速稳定在 6 500 rpm 运行区间, 叶轮在高速旋转状态下承受交变应力作用, 轴承振动值、轴位移、油温、出口压力等关键参数需持续监控以防止突发性故障导致全厂供气中断。冷冻机组配置离心式压缩机作为制冷核心部件, 蒸发器内制冷剂在负压环境下沸腾吸热, 冷凝器侧冷却水结垢导致换热效率每运行 90 d 衰减约 12%, 压缩机负荷率被动升高

加剧轴承磨损速率。循环水泵叶轮在含悬浮物的冷却水介质中长期运转, 泵壳内壁冲刷磨损使叶轮与壳体间隙从设计值 0.8 mm 扩大至 1.5 mm 后扬程下降 8%, 影响换热器侧冷却水流量分配。现行维护体系以固定周期检修为主导模式, 大修周期设定为 18 个月, 中修周期为 9 个月, 日常点检频次为每班次 1 次, 维护计划编制主要依赖历史经验数据, 缺乏设备实时状态反馈支撑。备件库存管理采用安全库存法设置储备定额, 关键备件如空压机叶轮、冷冻机组轴承因采购周期长达 5 个月常出现库存积压占用资金约 950 万元, 亟需优化既有维护体系, 提升设备可靠性, 降低维护成本。

2 大型化工设备预防性维护体系现状分析

2.1 设备维护周期设定偏差分析

该公用工程系统现行 18 个月大修周期源自行业通用标准, 未充分考量离心式空压机组实际运行工况差异。空压机在 6 500 rpm 额定转速下连续运行时, 轴承承受径向载荷达 35 kN, 润滑油膜厚度随温度升高从初始 18 μm 逐步减薄至 12 μm , 金属接触摩擦使磨损速率在运行 8 000 h 后呈指数级增长, 固定周期检修模式难以捕捉轴承性能衰退的临界时点^[1]。在冷冻机组方面, 蒸发器内制冷剂蒸发温度每降低 1 $^{\circ}\text{C}$ 会使压缩机吸气压力下降 0.03 MPa, 压力比增大导致压缩功率上升 4% 至 6%, 但 9 个月中修周期采用统一时间节点安排清洗作业, 导致部分运行周期内换热效率已严重衰减, 却仍需等待计划检修窗口; 另有部分周期设备

作者简介: 王其海 (1986-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 化工设备技改施工安装。

状态良好,却被动停机造成冷量供应中断。循环水泵日常点检每班次 1 次的频次设定参照常规设备标准,对于 28 MW 级大功率空压机组而言检测间隔过长,8 h 的点检周期内轴承振动值可能已从预警阈值 3.2 mm/s 演变为故障状态 5.8 mm/s,点检频次与设备风险等级匹配度存在明显缺陷,叶轮叶片疲劳裂纹在萌生阶段无法被及时发现,最终演变为断裂事故。

2.2 状态监测技术应用局限性分析

离心式空压机组现有监测系统仅采集轴承振动值、轴位移、油温三类基础参数,监测维度单一严重制约故障诊断准确率。空压机轴承在高速旋转工况下承受的载荷呈现周期性脉动特征,滚动体与内外圈接触区产生的冲击脉冲信号频率范围覆盖 500 Hz 至 8 000 Hz 宽频带,现有振动传感器采样频率设定为 1 kHz 明显不足,奈奎斯特定律要求采样频率至少达到信号最高频率的 2 倍才能避免频谱混叠,监测系统未能捕捉高频冲击成分,导致轴承外圈剥落等早期故障特征被淹没在背景噪声中,误判率高达 32%,使约四分之一的非计划停机属于过度维护范畴。频谱分析技术应用层面存在更深层次缺陷,振动信号经快速傅里叶变换得到的频谱图仅反映稳态工况下的频率成分分布,空压机在启停过程中转速从 0 rpm 升至 6 500 rpm 的瞬态阶段,轴系固有频率与激振频率发生共振时振幅会出现突变峰值,传统频谱分析无法追踪时变特征,导致共振风险识别能力缺失^[2]。

冷冻机组压缩机轴承故障诊断面临类似困境,轴承内圈缺陷产生的特征频率为 117 Hz,外圈缺陷频率为 83 Hz,滚动体缺陷频率为 156 Hz,但制冷剂在蒸发器内沸腾产生的气泡溃灭噪声频率分布恰好集中在 80 Hz 至 200 Hz 区间,背景干扰信号与故障特征频率发生频谱重叠现象,仅依赖频域分析方法难以实现有效分离,诊断准确率仅为 58%,远低于工业应用要求的 90% 基准线。循环水泵叶轮动平衡状态监测同样受制于技术手段局限,泵在输送含砂量 3 g/L 的冷却水介质时,固体颗粒对叶片的非对称冲蚀使质量分布持续偏移,不平衡量每运行 1 000 h 增加约 15 g·cm,现有监测系统仅在停机后采用便携式测振仪进行离线检测,运行期间不平衡量演变过程完全处于监控盲区,预防性维护决策缺少动态劣化趋势数据支撑,监测盲区直接削弱维护体系主动预防能力。

2.3 备件库存管理缺陷分析

安全库存法设置储备定额的管理模式未建立备件消耗与设备状态的动态关联机制。空压机叶轮、冷冻

机组轴承等关键备件采购周期长达 5 个月,库存管理人员为规避缺货风险倾向于提高安全库存水平,950 万元库存资金占用中约 38% 属于超期储备件。备件需求预测仅依据历史消耗统计数据线性外推,未考虑设备在不同寿命阶段的故障率变化规律,投产初期浴盆曲线早期故障阶段备件需求波动剧烈时预测偏差尤为突出。库存周转分析显示部分型号机械密封件库龄超过 36 个月,橡胶材质老化使密封性能下降,实际使用时故障率反而高于新件,库存积压造成备件质量隐性劣化问题长期被忽视,库存管理与设备状态管理、采购周期管理之间的协同效应未能有效发挥^[3]。

3 大型化工设备预防性维护体系优化措施

3.1 基于设备劣化规律的维护周期优化

针对现行固定周期维护模式的局限性,首先建立设备劣化状态实时监测系统,在离心式空压机组轴承位置安装振动传感器与轴位移探头,采样频率设定为 1 次/min,连续采集 3 个完整运行周期的振动烈度、轴向位移、径向跳动等特征参数,同时记录对应时刻的转速、负荷率、进气温度等工况变量。数据分析显示,空压机在 6 500 rpm 额定转速区间运行时长累计达 7 200 h 后,轴承振动值从初始的 2.4 mm/s 升至 4.1 mm/s,衰退速率明显加快,据此确定该转速区间下轴承寿命约为 8 800 h,而非原定 18 个月对应的 12 960 h 运行时长,维护周期需缩短至 11 个月执行。在冷冻机组方面,技术团队在蒸发器进出口、冷凝器进出口分别布设温度变送器与压力变送器,每 6 h 自动记录温差、压差数值,累积 150 d 监测数据后建立换热效率—运行时长劣化曲线,曲线拟合结果表明,蒸发器换热效率降至设计值 0.88 倍时制冷量下降 7%,冷却水结垢速率每升高 0.5 mm 会使效率衰减拐点提前 12 d 出现。基于劣化曲线斜率变化特征,装置将冷冻机组检修触发条件从固定 9 个月调整为换热效率降至 90%、设计值或运行天数满 240 d 两项指标先达到先执行,避免设备状态良好时提前停机或性能劣化后延迟干预的矛盾。循环水泵叶轮间隙监测采用超声波测距传感器,探头安装在泵壳外侧对准叶轮外缘,每小时测量一次间隙值,间隙从 0.8 mm 扩大至 1.2 mm 时判定叶轮磨损进入加速阶段,需启动检修准备流程^[4]。

3.2 多维度状态监测技术集成应用

装置针对监测维度单一缺陷,在离心式空压机组增设高频加速度传感器,采样频率提升至 25.6 kHz,传感器安装于轴承座三个正交方向以确保信号采集完整性。振动信号处理引入小波包分解技术,将原始信号

分解为 8 个频带子信号, 轴承故障产生的 2 400 Hz 至 5 600 Hz 频段冲击成分得到增强显示, 信噪比从 12 dB 提升至 28 dB。针对瞬态工况监测难题, 系统部署短时傅里叶变换模块实现时频联合分析, 生成的时频谱图清晰展现转速爬升过程中各阶固有频率激发时刻。当转速通过 2 100 rpm 临界区间时, 轴系一阶弯曲模态产生共振峰值达 8.2 mm/s, 持续 1.3 s, 监测系统据此设定 2 000 rpm 至 2 200 rpm 转速区间, 采用慢速爬升策略, 加速度限制在 150 rpm/s 以内, 将共振停留时间压缩至 0.67 s。

冷冻机组压缩机故障诊断采用自适应噪声抵消算法分离制冷剂沸腾干扰信号, 气泡溃灭噪声成分被抑制 35 dB, 轴承内圈缺陷 117 Hz、外圈缺陷 83 Hz、滚动体缺陷 156 Hz, 特征频率在净化后频谱图中呈现清晰峰值, 诊断准确率从 58% 跃升至 91%。循环水泵叶轮动平衡在线监测系统配置涡流位移传感器, 连续采集轴心轨迹信号, 当轴心轨迹椭圆度比值达到 1.8 时判定不平衡量超过允许值 20 g·cm, 系统自动触发动平衡校正预警, 见表 1。多维监测数据汇入中央诊断系统,

高频振动、时频特征、自适应降噪、轴心轨迹四类参数建立健康度评价模型, 劣化趋势曲线为维护决策提供量化依据。

3.3 建立备件库存动态管理机制

针对备件库存管理缺陷, 应建立基于设备劣化状态动态驱动的备件消耗量关联预测模型, 该模型将 4 台离心式空压机的振动烈度、轴位移实时监测数据作为轴承需求预测输入变量, 当 1 号机组振动值从初始 2.4 mm/s 升至 3.5 mm/s 进入劣化加速阶段时, 系统自动将该机组轴承库存定额从常规 2 套提升至 3 套, 同步触发采购周期 5 个月的新件订货流程, 确保设备劣化至 4.1 mm/s 更换时点前备件到货。冷冻机组轴承需求预测引入换热效率衰减速率参数, 效率每日降幅超过 0.8% 时判定轴承进入寿命末期, 库存系统据此调增储备量 1 套, 原有安全库存法固定定额模式被状态驱动的弹性定额替代, 见表 2。在库存周转优化方面, 装置设定机械密封件最大库龄 18 个月强制清理标准, 超期件退回供应商更新, 950 万元库存资金占用中的 360 万元超储部分在首个运行周期内释放, 橡胶材质老化导致的密封性

表 1 多维度状态监测技术配置方案

设备类型	新增监测参数	技术手段	预警阈值
离心式空压机	高频振动 / 时频特征	25.6 kHz 加速度传感器 / 短时傅里叶变换	8.2 mm/s / 共振持续 > 1 s
冷冻机组压缩机	净化后故障特征	自适应噪声抵消算法	特征频率幅值 > 基线 1.5 倍
循环水泵	轴心轨迹偏心率	涡流位移传感器	椭圆度比值 > 1.8

表 2 备件库存动态管理机制配置方案

备件类型	触发条件	库存调整策略	库龄上限
空压机轴承	振动值 3.5 mm/s	定额 2 套增至 3 套	24 个月
冷冻机组轴承	效率降幅 0.8%/d	增储 1 套	18 个月

能隐性劣化问题得到消除^[5]。采购计划编制从年度固定批次调整为月度滚动评估机制, 评估输入包含当月设备健康度变化趋势、备件消耗速率、供应商交货期波动三项要素, 计划精度较历史经验外推法提升 39%。

4 结束语

设备维护从经验主导转向数据驱动的演进揭示了管理范式的深层变革, 状态感知能力的提升将被动响应推向主动预防轨道, 劣化规律的精准刻画消解了固定周期与个体差异间的矛盾, 监测维度的拓展为故障捕捉开辟新路径, 库存策略与健康状态的耦合重塑了资源配置逻辑, 智能算法驱动的预测性维护将引领体系演进方向, 优化后的维护模式终将为装置安全筑牢坚实的基础。

参考文献:

- [1] 卢文. 故障预测下的化工机械设备安全保障技术[J]. 化工管理, 2025(30):106-109.
- [2] 王健男. 化工企业公共工程设备的预防性维护策略研究[J]. 化工设计通讯, 2025, 51(08):130-131, 134.
- [3] 王钦, 张吉卫, 何磊, 等. 预防性维护系统在化工设备管理中的应用研究[J]. 网络安全和信息化, 2023(12):95-98.
- [4] 陈正领. 化工仪表自动化设备的预防性维护[J]. 化工管理, 2022(32):120-122.
- [5] 董惠民. 预防性维护措施在化工自动化设备中的应用[J]. 化工设计通讯, 2020, 46(10):38, 40.