

# 基于大数据的化工机电泵组故障预测与智能化维护策略研究

王成鑫\*, 杨晨晖

(四川润滑卫士数字科技有限公司, 四川 成都 611730)

**摘要** 化工行业是国家经济的重要支柱, 而机电泵组是化工过程中的核心液体传输装置, 其稳定的工作状态对整个生产系统的安全、连续和高效具有至关重要的作用。传统的泵机组维护方式以事后维护和定期的预防维护为主, 具有预警滞后、维护费用高、突发停机风险高的特点, 容易导致重大的生产安全事故和巨大的经济损失。在大数据背景下, 对装备全寿命周期数据进行深层次挖掘, 为实现机电泵组故障的精确预报和维护改造开辟了新途径。本文以大数据为基础, 研究化工机电泵组的故障预测和智能维护策略, 以期为化工机电泵组的安全、稳定运行提供理论参考。

**关键词** 大数据; 化工机电泵组; 故障预测; 智能化维护

**中图分类号**: TP27

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.012

## 0 引言

化工过程具有生产连续化、过程介质危险性大、工况波动大等特点, 对其关键部件的工作可靠性和安全性能提出了更高的要求。机电泵组是串联过程中的核心动力单元, 在强腐蚀、重载、易燃易爆等恶劣工况下工作, 其失效破坏是导致非计划停产和安全环保事故的主要原因。传统的基于经验的运行管理模式很难实现对微小故障的精确辨识和对退化趋势的前瞻预测, 使得维护不足和过度维护之间的矛盾始终存在。以大数据为基础, 基于大数据的机电泵组故障预报和智能维护决策方法, 为实现化工设备数字化维护提供理论基础和技术支撑。

## 1 化工机电泵组故障机理

### 1.1 化工机电泵组结构

机电泵组是化工过程中的核心部件, 担负着连接反应、分离、传热和储运等过程的重要功能。它的工作原理是利用电机把输入的电能转换成转动的机械动能, 使泵和叶轮以同样的速度转动。在此过程中, 叶轮对被输送的加工液体进行能量传递, 并将其进一步转换成液体的压强能和流动动能, 实现对有毒、腐蚀性、易燃易爆、高粘性等特殊性质的介质的连续、可控和密封输送。其操作稳定与否, 直接关系到化工企业能否安全、连续生产和高效率的生产<sup>[1]</sup>。

完整的化工机械泵系统一般包括五大功能模块:

承载液体的泵本体; 提供动力来源的驱动电机; 轴承组件, 以保证转子的平滑运转; 轴端的密封结构, 以避免介质泄露; 用于安装、固定和辅助支承的基础和辅助系统。这五个子系统协同工作, 构成机电一体化的有机体系。

### 1.2 故障机理

轴承作为化工机电泵组的核心转动支承元件, 长期工作在高速重载、介质腐蚀、工况波动频繁等复杂工况下, 磨损和疲劳是其主要失效形式。磨粒磨损是最主要的故障诱因, 化工介质中的固相粒子进入滚道/滚动体界面, 形成连续切割作用, 增加轴承游隙, 降低运行精度。粘着磨损主要是由于过载和润滑不良而引起的, 以及由于局部温度的升高而导致的粘接脱落。接触疲劳是轴承渐进破坏的主要形式, 滚道和滚动体在长时间的交变载荷下, 其表面的剪切应力超过材料的疲劳极限, 产生微裂纹, 导致表层的点蚀和剥落。

电机是化工泵组的核心传动部件, 在长期运行过程中面临着潮湿腐蚀、启动频繁、负荷波动大等问题。绕组故障是造成电动机电气故障的主要原因, 在高温、电晕和化学腐蚀的共同影响下, 定子线圈的绝缘层逐渐老化、开裂和破裂; 水泵机组频繁启停所带来的冲击电流会加剧绕组内部的热应力交变, 导致匝间绝缘磨损和短路, 并导致相间绝缘故障接地, 最后导致电动机停转, 甚至烧毁。

**作者简介**: 王成鑫 (1989-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 机械电子工程。\*通信作者, E-mail: wangchengxin@rhwsdt.com

失效的根本原因是由于其摩擦磨损和辅助密封失去作用，并受到机组运行和轴系状况的深刻影响。密封端面的摩擦磨损是其主要的故障形式，化工介质中的固体颗粒和强腐蚀性成分容易引起端面液膜的不稳定，而在高速运行时，端面的干摩擦会引起动环和静环的热变形和热裂纹，进而引起端面的粗糙度增大，引起密封的比压不平衡和介质泄漏。

## 2 基于大数据的故障预测技术体系

随着工业物联网和感知技术的飞速发展，化工机电泵组的运行数据获取能力得到极大的提高，为建立大数据驱动下的故障预警系统打下了良好的基础。其核心是通过对装备生命周期数据的深层次挖掘，准确地感知机组的健康状况和超前判断故障发展趋势，将维护方式由被动应对转向主动预防。

通过在机组关键位置布设高精度传感装置，实时采集机组振动、温度、压力、流量、电流等多个维度的工况信息，构建涵盖机组工作全流程的时间序列数据流。通过与 DCS/SCADA 等生产过程监控系统的数据对接，实现设备运行状态、工艺参数和历史维护等多源异质信息的融合。稳定、完备、高质量的震资料是进行进一步的分析和模拟的基础<sup>[2]</sup>。

原始数据通常含有噪声、缺失值和离群值，为了提高数据的质量，需要对其进行清洗、对齐和归一化等预处理。然后，以信号处理和统计分析为手段，从时域、频域、频域等多维角度，分别提取振动谱特征峰、温变速率、谐波畸变率等特征参量，构建高维数集，为模型输入提供有效信息。

结合经典的 SVM、随机森林等机器学习方法，或者引入长短时记忆网络（LSTM）、卷积神经网络（CNN）等深度学习模型，实现设备剩余寿命的回归预测。在模型的学习过程中，需要将故障数据和运行状态标记相融合，并对其进行交互检验和优化，以提高模型的泛化能力和预测准确性。

将所建立的预测模型应用到工业互联和边缘计算节点中，实现对机组运行参数的在线推断和状态评价。在检测到故障模态的同时，通过对故障状态的分析，判断故障发生的时间，并进行诊断，为下一步的智能维护决策提供依据。系统的不断优化取决于模型的迭代机理，通过增加失效样本和运行维护信息对模型参数进行实时更新，以提高系统对复杂环境的自适应能力和鲁棒性。

## 3 智能化维护策略研究

### 3.1 维护策略理论基础

基于可靠度的维护（RCM）与预测性维护（PdM）是智能维护的核心理论支持，两者不是独立的技术手

段，但却构成了“可靠性锚定—动态预测—精确决策”的递进式理论体系，其背后的逻辑已由“失效驱动的被动维护”到“可靠驱动的主动预防”的本质飞跃。基于故障模式与影响分析（FMEA）、故障树分析（FTA）完成故障后果的量化分级，针对可能引起安全事故、生产中断和环境破坏的灾难性故障的防控策略，突破传统“一刀切”的“过度维护”和“缺乏维护”共存的产业难题，为智能维护划出以可靠性为核心的智能维护决策界限。

面向智能维护的预测维护（PdM）架构为核心，围绕多源异质数据感知、故障特征提取和降维层、设备健康状态评价、剩余寿命预测和维护决策输出等五个关键环节，构建由多源异质数据感知、故障特征提取和降维层、设备健康状态评价、剩余寿命预测和维护决策输出五个核心功能模块组成的闭环架构。两者的深层次融合，形成智能维护的理论基础：RCM 清晰地界定了维护管理的核心目标和优先次序，避免了传统维护方法的盲目性；PdM 为 RCM 提供了设备运行状态信息和故障预测结果，解决了传统 RCM 静态分析与实际运行状况脱离的关键难题，从而形成“以可靠性为基础，以预测技术为主要手段”的智能维护理论体系。

### 3.2 基于风险等级的维护决策模型

以风险水平为基础的维护决策模型是智能维护决策的核心，其实质是通过对装备健康状况进行定量评估、对失效风险进行科学分类和系统化的维护规范建立，从而达到由“经验模糊决策”到“数据驱动的精确决策”的目标。从设备振动、温度、油液、电气特性、运行工况、服役年限、历史故障等多维异质信息中，对多维异质数据进行清理和特征筛选，去除冗余和扰动信息，提炼出反映设备退化状况的核心特征。采用 CRITIC 客观赋权法与 AHP 相结合的方法，实现对特征权重的科学分配，从而避免单纯的主观赋权带来的经验性偏差，以及单纯的客观赋权与装备失效机制相脱离的难题。利用退化程度函数，将多个特征参量与 0-1 之间的非线性映射关系，实现设备健康状况的连续定量化表征，并将工况自适应校正因子引入设备运行状态的适应性校正因子中，以解决设备运行时变载荷、变环境下的设备健康评价结果失真这一工业难点问题，为危险水平分级提供量化的核心依据<sup>[3]</sup>。

构建“失效概率 = 失效概率 × 失效后果严重性”的 2D 定量模型，突破以往的静态失效频次统计方法，对失效概率进行科学分类和精细化管控。从安全风险、生产损失、环境影响和维护成本四个方面建立定量评价指标，并与企业可接受风险阈值（ALARP 最小合理可行准则）相结合，将设备风险分为低、中、高、急 4

个级别,确定各级别风险的可接受界限和管控优先级,即应急风险与突发失效相对应,高风险对应设备健康状况迅速恶化的高概率失效,中风险对应有可能出现退化倾向的隐患,低风险对应装备健康状况较好的平稳运行,为维护决策的制定提供明确的分级依据。

突破以往“规则”的简单叠加,而以“可靠度”为核心的“失效后果分析”理论为基础,通过融合风险等级评价结果,提出具有可解释性和不断优化能力的“模糊推理决策体系”。这个规则库是基于风险防范和控制的,它根据不同的风险水平,制定适当的维护对策:针对突发风险,立刻启动设备停机和应急抢修流程,同时对故障根源进行溯源分析,避免同类错误再度发生。对于高风险的情况,根据设备的剩余寿命预报信息,确定最优维护时间,制定有针对性的预防性维护计划,将故障扼杀在摇篮之中<sup>[4]</sup>。中风险时,加大对设备运行的监控频率,建立定期的预防维护方案,对装备的性能退化进行动态跟踪;对于低风险的情况,采用“视情检修”的方式,只需进行例行的巡检和状态监控,就可以避免由于过度维护而造成的资源损失。将多台设备之间的风险关联进行协调处理,解决多台设备在不同工况下的维护决策冲突,建立闭环决策系统。

### 3.3 维护任务优化调度

维护任务优化调度是实现智能维护策略实施的关键,维护窗口优化的核心是实现维护和生产计划的动态协同匹配,不只是单纯地找出闲置时间,还需要建立以“生产中断损失最小化”与“维护费用最小化”为一体的两个目标优化模型。本项目以装备剩余寿命评价为基础,综合考虑生产调度、订单交货周期、生产线联动约束、设备启停机损失等多个影响因素,实现最优维护时间的精确确定。在连续生产情景下,要充分利用非计划停工时间,如产品切换时间、班组交接时间和计划停工检查时间,尽量减少非计划停工造成的生产能力损失。以离散制造企业为对象,在考虑订单调度间隔、单台设备待机时间和产线停机时长的基础上,将设备维护操作的深度嵌入到生产调度系统中。

与传统依靠安全库存的被动储备方式相比,备件库存优化的核心是构建基于预测分析的备件全生命周期协同控制机制。以设备故障预警信息和维护任务计划为主,通过对装备关键度、失效影响程度、备件供货时间和互用性四个维度,对备件进行分类管理,针对不同类型的备件,设计差别化补充策略。将维护工作时间安排与设备剩余使用寿命预测数据相结合,准确地推断出零部件的需求时间点及需求大小,针对供应周期较长、专用于特殊核心设备的零部件,根据预

测结果提前制定采购计划,实现零部件准时供应;对通用性强、供货周期短的非关键零部件,通过集中采购和联合补充,降低采购成本,降低存货呆滞风险<sup>[5]</sup>。从根本上解决备件存储与维保决策平台、采购管理平台等信息孤岛问题,实现备件存量与维保操作的动态实时关联,预防由于备件供给不足而造成的维护周期过长,以及备件长期闲置造成的资金沉淀,从而达到库存资金占用和供给中断风险的最优均衡。

维护资源配置的关键在于,根据维护作业的复杂性,建立维护资源的动态匹配模型,不是单纯的人员和工具配置,而是以维护任务完成效率和资源闲置率最小为优化目标,实现维护资源的整体优化配置。对维护资源进行分类和分类管理,根据维护人员的技能水平、专业方向、从业经验、持证状况等因素,对维护工具和检测设备进行分类,根据精确度、适用场景和专用性,对维护资源进行分类,并为维护资源建立数字化的数据库。根据维护工作的风险程度、工作难度、时间要求和安全标准,确定维护工作中需要的人员资格、工具种类和数量,建立资源调配的约束。

## 4 结束语

以我国化工机电泵组为研究对象,以大数据为基础,建立面向化工企业的全寿命周期故障预报系统,研究与之适配的化工行业复杂生产情景的智能维护策略,以达到对机组运行状态的实时监控、故障隐患的提前预警和维护计划的动态优化,对我国化工流程工业装备的安全运行具有重要的理论价值。未来,将“数字孪生”“边缘计算”等技术相结合,完善多源信息融合机理,提高复杂运行状态下的故障预报准确率,不断推进我国化工装备维护系统向数字化、智能化的转型升级。

## 参考文献:

- [1] 王财林,古自强,邱姝娟,等.成品油管道顺序输送甲醇的关键设备适应性分析[J].油气储运,2025,44(09):998-1011.
- [2] 张吉喆,王禹,张政,等.基于三频融合的泥浆泵数据采集与风险监测系统[J].石油和化工设备,2025,28(11):6-9.
- [3] 张航,王星月,吕能超.基于CRITIC组合赋权-正态云的山岭特长隧道洞口边坡失稳风险评价[J].公路交通科技,2025,42(07):170-182.
- [4] 娄文忠,李诗怡,吕斯宁,等.基于故障模式影响及危害性分析的引信可靠性分析方法[J].探测与控制学报,2025,47(01):49-56,79.
- [5] 杨华强,邱宇,李源,等.考虑周转率的多目标备件动态库存控制策略[J].制造业自动化,2025,47(03):77-86.