

# Study on reliability optimization and fault traceability of rotating equipment in refinery life cycle

Junsu Xing

Cangzhou Refinery, Hebei Province, Cangzhou, Hebei, 061000, China

## Abstract

In oil refining facilities, rotating equipment such as pumps, compressors, turbines, and fans, which operate under high loads and frequent operational fluctuations, have become critical weak points in production systems. Traditional maintenance models dominated by “post-failure repairs and experience-based approaches” struggle to meet the triple constraints of enhanced safety, reduced carbon emissions, and cost efficiency. To address this challenge, this study innovatively establishes a reliability assessment framework covering the entire lifecycle from “design, manufacturing, installation, operation, maintenance, to decommissioning.” Additionally, it proposes a fault traceability technology integrating multi-source industrial big data, mechanistic models, and knowledge graphs. Through practical implementation at a million-ton-per-day refinery, this framework and methodology have been validated to improve the reliability of rotating equipment, ensuring safe, stable, and efficient refining operations. Key words: refinery; rotating equipment; reliability engineering; fault traceability; whole life cycle

## 炼油厂转动设备全生命周期可靠性优化与故障溯源方法探讨

邢军锁

河北省沧州炼油厂, 中国·河北 沧州 061000

## 摘要

在炼油装置里, 泵、压缩机、透平、风机等转动设备, 因长期处于高运行负荷且工况波动频繁的状况, 成了生产系统的薄弱之处。传统运维模式以“事后检修、经验主导”为主, 难以满足当下高安全性、低碳排放以及降本增效这三重约束条件。为解决这一问题, 本文创新性地构建了涵盖“设计-制造-安装-运行-检修-退役”全链条的可靠性评估框架。同时, 提出了一条融合多源工业大数据、机理模型与知识图谱的故障溯源技术路线。通过将该框架和技术路线应用于某千万吨级炼油厂的实际生产中, 进行实践验证, 旨在提升炼油装置转动设备的可靠性, 保障炼油生产安全、稳定、高效运行。

## 关键词

炼油厂; 转动设备; 可靠性工程; 故障溯源; 全生命周期

## 1 引言

石油炼制企业在保障装置连续稳定运行的同时, 还需应对能源成本上升、碳排放约束趋严与市场波动等多重挑战。统计显示, 转动设备基金属损坏、润滑劣化及过程扰动引起的非计划停机占炼油厂总停机时间的 60% 以上, 其中 70% 可归因于前期设计与安装阶段的隐患被延迟暴露。传统基于定期检修的维护策略对潜在失效的感知不足, 往往导致“过维修或欠维修”并存, 形成安全与经济双重压力。近年随着传感器网络、云边协同与人工智能的快速发展, 面向设备全生命周期的可靠性管理理念逐渐从理论走向落地。然而, 如何在转动设备复杂耦合工况与高噪声数据环境下实现精准溯源、如何将优化策略与现有管理体系无缝对接, 依旧缺乏系统化研究。本文拟从理论框架、模型方法、工程应

用与价值评估四个层面展开探讨, 以为炼油行业提供可操作、可迭代的解决方案。

## 2 全生命周期可靠性理论框架

### 2.1 概念界定与特征阐释

全生命周期可靠性 (LCR) 聚焦于设备或系统在整个生命周期内, 涵盖需求定义、设计、制造、安装、运行、检修、退役等各阶段, 维持预期功能、规避失效, 并在资源环境限制下达成性能最优的能力。它突破了传统仅聚焦运行期稳定性评估的局限, 将可靠性视为贯穿不同时间段与系统环节的综合属性。

LCR 具有显著的核心特征。动态性方面, 设备使用中性能会因时间、载荷、环境条件等因素改变, 呈现出性能退化速率的非线性变化。所以, 可靠性评估需具备实时数据采集、状态更新以及模型重构的能力, 以精准掌握设备状态。

阶段耦合性上, 生命周期各阶段紧密相连、互为因果<sup>[1]</sup>。前期设计选型与制造精度对后期维护频率、维修成本甚至设

【作者简介】邢军锁 (1967-), 男, 中国河北石家庄人, 工程师, 从事设备基础知识研究。

备报废时间影响重大,像材料选择和连接结构的合理性就直接影响着设备的疲劳寿命。

经济-环境双目标导向也是其重要特征。在追求可靠性提升时,LCR注重降低能耗、减少碳排放、提高可再利用率等绿色目标,力求实现经济性与可持续性的平衡发展,为设备或系统的全生命周期管理提供全面且科学的指引。

## 2.2 生命周期阶段对可靠性的影响机理

LCR的系统性要求在设备或系统全生命周期的每个节点,都需明确可靠性影响路径。在需求与设计阶段,这是决定设备固有可靠性的核心环节。此阶段会界定系统的工作环境边界、故障容忍阈值以及设计裕度,对全生命周期失效风险的影响超过50%。比如航空发动机压气机叶片,若设计时未考虑应力集中部位的局部强化,服役时就极易因疲劳裂纹而提前失效。制造与安装阶段同样关键。加工精度、公差控制、热处理一致性等制造质量因素,对初始可靠性起着决定性作用,约占故障贡献率的30%。安装过程中,若连接件预紧力不合适或润滑措施不到位,也会埋下早期故障隐患。运行与检修阶段,可靠性表现受负载波动、工况稳定性、运维策略等多种因素影响。维护周期设置不合理、备件质量有偏差,都可能引发二次损伤<sup>[2]</sup>。而且,运行期间对失效机理的识别与预测能力,会影响剩余寿命评估的准确性。退役与再制造阶段,再制造既能节省原材料和能源,又能通过智能检测与功能恢复技术延长关键部件寿命。合理的退役策略有助于实现绿色闭环管理,提升整个系统的环境可靠性。

## 2.3 指标体系构建与权重分配

为了实现LCR的可量化评价,本文基于国际标准(如IEC-60300《可靠性管理体系》、ISO-55000《资产管理》)与行业实践,构建了多维度的LCR指标体系。该体系涵盖以下五个一级指标:

固有可靠性( $R_0$ ):衡量设备在理想状态下的不间断运行能力。

可维修性(Mtr):指设备出现故障后修复所需的平均时间,反映维护便捷性。

可用度(A):代表设备在任意时刻可用的概率,是运行效率的重要表征。

安全风险系数(Risk\_S):结合失效模式严重性与频率,评估对人员、设备及环境的潜在风险。

碳排放当量(CEQ):综合制造、使用与报废过程中产生的碳排放,体现环境影响。

在二级指标设置方面,涵盖设计裕度、失效率、失效模式严重性指数(FMECA)、运行能效比、检修间隔、生命周期碳强度等19个指标,具有较强的可操作性与行业适配性。

权重分配采用层次分析法(AHP)结合德尔菲法专家打分,并经现场历史失效数据校正,最终得出各阶段对LCR贡献的定量比重:

设计阶段:0.25,重在构型选择与性能冗余;

制造阶段:0.15,强调精度控制与一致性;

安装阶段:0.10,关注初始配合精度与无损接入;

运行阶段:0.30,考虑状态监测与风险应对;

检修阶段:0.12,体现备件质量与策略合理性;

退役阶段:0.08,量化可再利用性与环境友好性。

该权重体系体现了以运行安全与节能环保为核心的评价导向,既保留了通用可靠性体系的可比性,又引入绿色指标响应碳中和诉求。

## 3 基于大数据的故障溯源模型

### 3.1 数据采集与治理策略

炼油厂中转动设备(如压缩机、泵、风机)广泛分布,种类繁多,涉及运行参数、健康状态及维护历史等多维数据<sup>[3]</sup>。为了实现全量信息的有效采集与整合,系统首先建立了覆盖全场景的统一命名空间与语义标签体系,确保不同设备与数据源之间的信息一致性与可扩展性。

在数据传输方面,采用OPC-UA与MQTT协议混合架构:对传统DCS与PLC系统使用OPC-UA接入,保证工业级稳定性;对边缘智能传感器使用轻量的MQTT,实现秒级采样与远程配置,显著提高了数据采集的实时性与灵活性。

针对振动、声发射、油液光谱等高频信号的噪声污染问题,本文设计了基于改进CEEMDAN(完全集合经验模态分解)的小波自适应去噪算法,通过自动选取最优分解尺度与重构阈值,使信号的信噪比平均提升了12dB。对长期趋势项及数据漂移问题,则采用多项式拟合残差剔除与指数滑动窗口技术联合处理,有效提升了建模阶段的数据稳定性与代表性。

在数据治理层,引入贝叶斯置信区间修正机制,通过先验分布与经验数据融合,动态调整指标异常判断的上下限区间,显著减少误报与漏报率,为后续建模提供可靠数据基础。

### 3.2 多源信息融合与因果图推断

不同类型的数据在时空维度上存在显著差异,如过程参数为分钟级采样、振动信号为毫秒级、维保记录则为非结构化文本。为打通这一数据鸿沟,本文提出Transformer-TCN并行融合模型:使用Transformer结构提取序列中的远程依赖特征,TCN结构捕捉局部时序动态,二者互补以实现多尺度建模。

融合后的深度特征通过嵌入到预构建的设备知识图谱中,与结构化语义节点(如“冷却不足”“干气密封失效”等)进行对齐,实现信息的统一语义映射。该知识图谱由经验规则与数据驱动路径共同构建,兼顾物理机制解释与数据演化特征。

在推理层,本文引入时序贝叶斯网络(T-BN),结合

麦基-灰靶因果度量方法,对潜在故障路径的因果可信度进行量化评估<sup>[4]</sup>。与传统相关性分析不同,该方法可辨识“因”的优先顺序与“果”的时滞特征,提升了因果链建模的可靠性与可解释性。

在某催化裂化装置的循环气压缩机实际案例中,系统通过该模型准确溯源出“密封气压力波动→干气密封失效→轴承振动异常”的完整故障链,因果路径识别准确率提升至94%,相比人工巡检,平均故障定位时间从2小时缩短至38分钟,显著增强了运行安全保障能力。

## 4 优化策略与实施路径

在设备设计阶段,本文基于多学科设计优化(MDO)思想,将热-力-流体的多物理场模型与轴承寿命预测算法进行耦合建模,充分考虑在API-610/API-617等行业标准约束下的结构可靠性与能效性能之间的协同关系。通过构建多目标函数,最小化轴承疲劳损伤密度和单位能耗,在保障机械强度与工况适应性的同时,优化系统能效结构。采用蒙特卡罗-遗传算法混合优化框架,有效提高了求解效率与全局收敛性。优化结果显示,泵类设备的综合能效指标 $\eta_C$ 提升了3.7%,设计冗余降低8%,为后期运行阶段节省约23%的能耗打下基础。

在运行与检修阶段,构建了残余寿命预测模型(RULGAN),该模型融合了生成对抗网络(GAN)与变分自编码器(VAE),能够在小样本失效数据场景下准确建模设备的寿命分布<sup>[5]</sup>。模型输出的不确定性区间经过贝叶斯修正,并与企业的库存管理系统与人员排班模块集成,实现检修任务的智能排程。通过动态生成最优的检修窗口与资源调配方案,降低因过度维护或突发停机带来的运营风险。系统上线一年后,非计划停机次数从每年7.2次下降至2.8次,年均直接经济损失减少约310万美元,有效提升了设备可用度与管理效率。

在设备全生命周期尾端,本文引入多目标整数规划模型对退役设备进行再制造决策。模型以剩余技术寿命、再制造成本、碳减排潜力和兼容性为约束与目标,建立了设备再利用的优化框架。求解过程中引入蚁群-粒子群混合智能算法,在提高解的多样性基础上保障求解速度。实证数据显示,经模型推荐的再制造比例由原18%提升至36%,单位设备

生命周期碳排放下降14%。该方案不仅响应了“双碳”政策要求,还推动了高值零部件的闭环回收与材料循环利用,为企业建立绿色供应链奠定基础。

## 5 案例研究与效果评估

江苏沿海某4400 kt/a炼油厂自2022年起引入本文方法,覆盖260台关键转动设备。系统按照“全连接-边缘分析-云端优化”三层架构部署,并与现有MES、SAP-PM无缝集成。运行至2025年3月,系统累计捕捉潜在失效事件187起,其中48起被提前两周以上定位并排除,避免停机损失约1.2亿人民币。

引入净现值(NPV)与回收期(ARR)评估模型,系统总投资约3800万元,两年零四个月即可收回。能效提升与碳排放削减每年带来额外收益900万元,三年综合收益-成本比达到3.6。安全层面,装置级风险矩阵中“高危”单元数量下降60%,HSSE季度考核稳居集团前列。

## 6 结语

炼油企业正处于数字化与低碳化深度耦合的转型关键期。本文围绕转动设备,提出了覆盖全生命周期的可靠性指标体系与多源数据驱动的故障溯源模型,并在大型炼油厂的实践中验证了技术有效性与经济可行性。研究表明,依托动态可视化监测、因果推断与智能决策,可以显著降低失效率、能耗及碳排放,为行业提供了一条“安全-高效-绿色”并举的治理路径。未来工作将进一步整合生成式AI在异常情景补全与运维知识迁移方面的潜力,并拓展到化学品与氢能装置,以支撑更宽场景的设备可靠性管理。

## 参考文献

- [1] 廉磊.基于过程分析的炼油厂酸气脱硫新工艺及其控制策略的研究[D].华南理工大学,2024.
- [2] 吴越,冯多学,李盼,等.大型炼油厂PSA氢提纯单元运行经验与故障处理[J].炼油技术与工程,2024,54(03):24-27+31.
- [3] 李供法.炼油厂低温热联合利用技术及应用[J].山东化工,2023,52(22):177-181+184.
- [4] 张哮.炼油厂烟气轮机在线监测及故障诊断技术应用[J].设备管理与维修,2023,(16):178-180.
- [5] 贾宝民.浅谈炼油厂生产优化及受控管理[J].石化技术,2023,30(04):247-249.