

电厂金属设备的疲劳寿命评估与可靠性分析

杨宏伟

华电新疆发电有限公司乌鲁木齐分公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要：电厂金属设备的疲劳寿命评估与可靠性分析涉及多学科交叉技术，需结合理论模型、监测数据和工程实践。火电站金属设备管理：通过大数据平台整合监督检验报告、运行参数及仪器数据，聚类分析关键参数对设备性能的影响，实现故障预警与寿命预测。电力变压器评估：结合油色谱分析、振动监测和历史故障数据，采用机器学习模型预测绝缘老化趋势，优化维护周期。

关键词：电厂金属设备；疲劳寿命评估；可靠性

利用支持向量机、神经网络等算法，通过历史故障数据训练预测模型，提升复杂工况下的寿命预测准确性。整合设备运行参数、环境数据及维护记录，构建大数据平台实现寿命动态评估。

1 电厂金属设备疲劳寿命评估方法

(1) 经典疲劳寿命评估方法。应力-寿命法(S-N曲线法)。建立材料应力幅值与疲劳寿命的幂指数关系，通过Goodman等寿命曲线修正平均应力影响，适用于高周疲劳评估。名义应力法以弹性范围内应力为基准，结合雨流统计法提取独立应力循环，但难以处理局部塑性变形场景。应变-寿命法(局部应变法)。通过局部塑性应变分析预测裂纹萌生寿命，适用于低周疲劳场景(如高温高压部件)，弥补名义应力法缺口敏感性问题。

(2) 载荷谱与裂纹扩展分析。动态载荷建模。整合SCADA历史数据与高频载荷仿真，利用雨流统计法构建疲劳载荷谱，量化应力循环特征。结合有限元仿真分析应力集中区域的动态响应，优化应力谱精度。断裂力学方法。结合线弹性断裂力学(LEFM)评估裂纹稳定扩展阶段寿命。对焊接接头等复杂结构，依据BS 7910等标准划分质量等级，保守估算剩余寿命。

(3) 多因素耦合与实验验证。环境因素耦合建模。建立温度-应力-腐蚀多场耦合模型，模拟高温、腐蚀介质等对疲劳寿命的协同影响。通过加速寿命试验(ALT)验证多物理场下的理论预测结果。实验验证技术。高频振动试验：模拟1000Hz以上交变载荷，评估高频低幅循环下的疲劳损伤。升降法试验：精确测定金属材料疲劳极限，支撑长寿命区可靠性设计。红外热像技术：量化疲劳过程中能量耗散规律，实时监测温度场变化预测损伤演化。

(4) 结构寿命评估优化。残余应力控制。通过消除焊接、锻造残余应力，提升结构抗疲劳性能，降低应力

集中风险。质量等级法。按焊接质量、几何特征分级评估寿命，结合标准(如WES 2805)制定差异化维护策略。

2 如何结合电厂金属设备工作特性进行疲劳寿命预测

(1) 动态载荷分析与建模。载荷谱构建。通过SCADA历史运行数据提取设备工况参数(如压力、温度、振动频率)，结合高频载荷仿真技术模拟动态应力分布，利用雨流统计法量化应力循环次数与幅值分布。针对典型工况(如启停冲击、调峰运行)，采用有限元法(FEM)识别应力集中区域(如焊缝、螺栓连接处)，构建设备专属载荷谱。多源数据融合。整合运行日志、腐蚀监测数据及环境参数(如湿度、腐蚀介质浓度)，建立多维度数据库，支撑载荷谱的实时动态修正。

(2) 疲劳寿命预测方法。经典理论与断裂力学结合。高周疲劳场景：采用S-N曲线法，结合Goodman平均应力修正公式进行寿命估算，适用于稳态运行的锅炉管道、汽轮机叶片。低周疲劳场景(如启停频繁的阀门)：应用局部应变法，通过Coffin-Manson公式计算塑性应变累积导致的裂纹萌生寿命。量化裂纹扩展速率，结合临界裂纹尺寸确定剩余寿命。多物理场耦合建模。开发温度-应力-腐蚀协同作用模型，模拟高温蠕变与腐蚀损伤对疲劳寿命的加速效应。例如，构建焊接接头在高温高压下的疲劳退化方程。通过加速寿命试验(ALT)验证多场耦合模型的预测精度，优化材料选型和防护涂层设计。

(3) 数据驱动的智能预测技术。机器学习模型构建。利用神经网络、支持向量机(SVM)等算法，输入载荷谱、材料参数及环境数据，直接输出剩余寿命预测值，降低传统模型对领域知识的依赖。采用特征工程方法(如时频域信号分解、主成分分析)提取SCADA数据中的隐含特征，提升模型泛化能力。在线监测与自适应校正。部署振动传感器与红外热像仪，实时监测裂纹萌

生与扩展行为,结合边缘计算动态调整预测模型参数。基于贝叶斯更新算法,融合新监测数据修正初始寿命预测结果,实现逐步收敛的真实寿命估算。

(4) 工程实施与优化。标准化分级评估。依据BS 7910、WES 2805等标准划分焊缝质量等级,匹配不同寿命预测模型(如保守型、风险容忍型)。制定差异化维护策略:对高风险区域(如高温高压管道)采用基于状态的监测(CBM),低风险区域采用定期检修。全生命周期管理。建立设备寿命档案库,记录运行历史、维修记录与预测结果,支撑下一代电厂设备的设计优化。

3 电厂金属设备可靠性分析方法

(1) 核心分析方法。故障模式与影响分析(FMEA/FTA)。通过FMEA识别设备潜在故障模式(如焊缝开裂、高温蠕变),评估其对系统安全性和经济性的影响,并依据严重程度划分优先级。结合故障树分析(FTA)构建逻辑因果关系图谱,定位关键失效路径并量化基本事件的故障概率。可靠性量化指标。采用MTBF(平均无故障时间)、MTTR(平均修复时间)等指标评估设备稳定性,指导维护周期优化。结合威布尔分布、加速寿命试验(ALT)数据预测设备在极端工况下的耐久性。

(2) 数据驱动的可靠性评估。多源数据融合。整合SCADA运行参数、振动监测数据及腐蚀传感器信息,通过时序状态变化曲线识别早期异常特征(如温度骤升、电流波动)。构建动态可靠性数据库,基于机器学习算法(如随机森林、LSTM)预测剩余寿命并生成风险预警。系统仿真建模。应用MBSE(基于模型的系统工程)方法建立电厂层级化物理架构,通过比例组合法分配可靠性指标至设备部件层。利用有限元仿真模拟应力-强度分布,识别薄弱区域并优化防护设计。

(3) 环境适应性分析。环境应力评估。分析高温、腐蚀介质、振动等环境因素对金属材料的协同损伤效应,建立三防(防潮、防盐雾、防霉)设计准则。通过加速老化试验验证涂层、焊接工艺的耐久性,降低环境因素导致的意外失效风险。动态适应性优化。根据实时监测数据动态调整设备运行参数(如负载分配、冷却效率),提升复杂环境下的可靠性。

(4) 全生命周期管理。分级维护策略。依据BS 7910等标准划分设备质量等级,高风险部件(如高压管道)采用状态监测(CBM),低风险部件采用定期检修。制定备件库存优化方案,结合维修性分析降低停机损失。可靠性迭代提升。

4 电厂设备可靠性管理标准概述

(1) 管理框架与政策法规。政策依据。依据《电力

可靠性管理办法(暂行)》,明确电力企业主体责任,要求建立覆盖发电、输变电、供电的全链条可靠性管理体系,并通过数据监测与动态优化保障电力供应安全。遵循行业标准(如DL/T 793《发电设备可靠性评价规程》),以设备实际运行参数为基础,量化可靠性指标(如MTBF、等效可用系数)。标准化体系。企业标准(如华能济宁电厂《发电设备可靠性管理标准》)细化实施流程,明确组织架构、职责分工及数据统计规范。国际标准(如BS 7910)与国内规范结合,制定差异化维护策略,覆盖设备全生命周期管理。

(2) 核心标准与评价规范。可靠性定义与评价。依据《发电设备可靠性评价规程》,可靠性定义为“设备在规定条件下、规定时间内完成规定功能的能力”,需通过实时监测、故障统计及历史数据分析实现客观评价。采用统一的事件编码与统计程序(如“发电设备可靠性信息管理系统”),确保数据真实性、完整性与可比性。关键指标要求。发电侧:主设备等等效可用系数 $\geq 94\%$,非计划停运次数 ≤ 2 次/年。输变电侧:设施强迫停运率 $\leq 0.5\%$,检修周期按风险等级动态调整。

(3) 实施方法与技术支撑。数据驱动管理。整合SCADA、振动监测及腐蚀传感器数据,构建动态数据库,支持故障预测与寿命评估。基于机器学习(如LSTM、随机森林)开发智能预警系统,降低设备突发故障风险。技术工具与手段。状态监测:红外热成像、超声波探伤等技术实时识别设备异常(如焊缝裂纹、高温蠕变)。仿真验证:有限元分析模拟极端工况下的应力分布,优化设备设计与防护方案。

(4) 关键挑战与趋势。数据治理难题。需解决跨系统数据的异构性问题,建立统一接口规范和标准化数据模型。技术迭代需求。推动迁移学习算法在跨设备类型、跨工况场景的应用,提升预测模型泛化能力。政策协同升级。适应新型电力系统需求,完善新能源设备(如光伏逆变器、储能系统)可靠性评价标准。

5 提高电厂金属设备可靠性的方法

(1) 设计优化与材料升级。可靠性导向设计。通过仿真分析和应力分布模拟减少结构薄弱点,优化设备抗疲劳性能(如锅炉管道、汽轮机叶片)。采用标准化、高可靠性元件(如耐高温螺栓、抗蠕变合金),降低单点故障风险。耐腐蚀材料应用。优先选用不锈钢、镍基合金等耐腐蚀材料制造关键部件(如冷凝器管束、脱硫塔内衬)。表面处理工艺强化:喷涂防腐涂层(如环氧树脂)、镀锌或等离子渗氮,阻断环境介质侵蚀。

(2) 防护与维护策略。全生命周期防腐管理。建立

环境监测体系,动态跟踪湿度、酸碱度等腐蚀因子,针对性调整防护方案。定期开展超声波探伤、显微组织检测,识别焊缝裂纹或材料退化早期迹象。预防性维护体系。制定差异化维护周期(如高压管道每周检查、低压阀门每月检查),重点监控高频振动或高温区域。利用传感器实时采集温度、振动数据,结合LSTM算法预测剩余寿命并触发预警。

(3)冗余与容错机制。关键系统冗余配置。对高风险设备(如给水泵、变压器)设置并联备用系统,确保单点故障时无缝切换。建立应急制动开关和联锁保护装置,阻断故障扩散链。环境适应性强化。对高温区域设备增设散热结构(如翅片冷却管),对潮湿区域加装防潮隔离层。通过有限元分析优化载荷分布,降低极端工况下的应力集中效应。

(4)管理与技术协同。数据驱动决策。整合SCADA、腐蚀监测等多源数据,构建动态可靠性数据库,支持维护策略迭代优化。开发智能运维平台(CMMS),实现设备档案、维修记录和备件库存的数字化管理。标准化与培训。遵循BS 7910、DL/T 793等标准制定设备管理规范,明确防腐工艺和维护流程。定期开展腐蚀防护、故障诊断专项培训,提升技术人员风险识别能力。

6 提高电厂金属设备可靠性的方法

(1)设计与材料优化。可靠性导向设计。通过仿真分析优化设备结构,减少应力集中点(如高压管道弯曲段),结合有限元应力验证提升抗疲劳性能。优先选用耐腐蚀材料(如不锈钢、镍基合金)制造关键部件(冷凝器管束、脱硫塔内衬),降低环境介质侵蚀风险。表面强化技术。喷涂环氧树脂防腐涂层或采用等离子渗氮工艺,阻断高温氧化与化学腐蚀的协同作用。对焊接接

头等薄弱区域实施镀锌处理,抑制电化学腐蚀发生。

(2)防护与维护策略。全生命周期防腐管理。建立湿度、酸碱度等环境参数动态监测体系,实时调整防腐方案(如雨季增加涂层检查频次)。定期开展超声波探伤和显微组织检测,识别焊缝开裂、晶间腐蚀等早期缺陷。智能预防性维护。基于振动传感器和温度监测数据,利用LSTM算法预测设备剩余寿命并预警(如提前7天预警轴承失效)。制定差异化维护周期(如高压管道每周巡检、低压阀门月度保养),重点关注高频振动区域。

(3)冗余与容错机制。关键系统冗余配置。对给水泵、变压器等高危设备设置双电源并联系统,支持无缝切换(切换延时 <0.5 秒)。加装应急制动开关和联锁保护装置,阻断故障扩散路径(如过热触发自动停机)。极端工况应对。通过应力仿真优化高温区域的散热结构(如翅片式冷却管),降低蠕变损伤风险。对潮湿区域设备增设防潮隔离层,减少凝露引发的电化学腐蚀。

(4)智能化管理升级。数据驱动运维。整合SCADA、腐蚀监测等多源数据构建动态数据库,支持维护策略迭代优化(如基于历史数据调整检查周期)。部署智能运维平台(CMMS),实现设备档案、维修记录和备件库存的数字化管理。标准化与人员能力建设。

总之,可靠性评估和寿命技术是金属材料研究中非常重要的一部分,它们有助于了解金属材料在实际使用中的可靠性和使用寿命。

参考文献

- [1]杨义.电厂金属设备的疲劳寿命评估与可靠性措施.2022.
- [2]王华俊.浅谈电厂金属设备的疲劳寿命评估与可靠性分析.2023.