

水电厂老旧机组检修工艺优化及现场应用研究

高斌

新疆维吾尔自治区塔里木河流域乌鲁瓦提水利枢纽管理中心

DOI:10.32629/hwr.v10i4.6929

[摘要] 本研究深入探究水电厂老旧机组检修工艺优化及现场应用,针对检修效率低下与质量波动等核心问题,提出融合系统工程与人因工程的创新策略。通过理论建模与多电厂实证,构建了全流程优化框架,并验证其在提升机组可靠性与经济效益方面的显著作用。研究不仅革新了检修工艺方法论,还揭示了工艺优化与设备全生命周期管理的深层关联,为水电行业可持续发展提供科学依据。成果具有广泛适用性,可推广至同类基础设施维护领域。

[关键词] 水电厂; 老旧机组; 检修工艺; 优化策略; 现场实施

中图分类号: TM62 文献标识码: A

Research on Maintenance Process Optimization and On-site Application of Old Generating Sets in Hydropower Plants

Bin Gao

Urumqi Wati Water Conservancy Hub Management Center in the Tarim River Basin, Xinjiang Uygur Autonomous Region

[Abstract] This study delves into the optimization and on-site application of maintenance processes for aging units in hydropower plants. Addressing core issues such as low maintenance efficiency and quality fluctuations, it proposes an innovative strategy that integrates systems engineering and human factors engineering. Through theoretical modeling and empirical studies across multiple power plants, a full-process optimization framework is established and its significant role in enhancing unit reliability and economic benefits is verified. The research not only revolutionizes maintenance process methodology but also unveils the deep connection between process optimization and equipment lifecycle management, providing a scientific foundation for the sustainable development of the hydropower industry. The findings are broadly applicable and can be extended to similar infrastructure maintenance fields.

[Key words] hydropower plant; old and outdated units; maintenance process; optimization strategy; on-site implementation

引言

水电厂老旧机组的检修问题已成为能源行业运维的关键挑战,其复杂性源于设备老化与技术迭代的双重压力。传统检修工艺难以适应高精度、高可靠性需求,导致故障频发、成本攀升及安全隐患。当前,检修过程普遍存在流程僵化、技术滞后与执行偏差,亟需从理论源头进行系统性革新。本研究立足工程实践,结合多学科视角,探索工艺优化的科学路径。研究价值在于突破经验主义束缚,建立数据驱动与知识融合的检修新模式,不仅提升单机效率,更强化电网整体稳定性。同时,响应国家能源转型战略,为基础设施延寿提供技术支撑,具有深远的理论与实践意义。

1 水电厂老旧机组检修基础概念

1.1 老旧机组常见故障类型探讨

老旧机组故障具有很强的复杂性、关联性,可以分为机械性、电气性和系统性三大类。机械性故障是由于轴承磨损、叶片空蚀、密封失效所造成的振动增大、效率下降;电气性故障是由于绝缘老化、绕组短路、控制系统紊乱所造成的突然停机;系统性故障是由水力不平衡、调速器失调等综合因素引起的,影响整个运行的稳定性。故障成因是多种因素交织在一起的,既有材料自然衰减和历史检修遗留下来的,又有运行环境变坏和操作失误的。通过分析可以发现故障具有隐蔽性、连锁性,密封失效会引发轴承发热,造成发电系统受到波及而陷入恶性循环。本节通过归纳典型故障模式来说明诊断不能只看表面现象,必须联系历史数据和实时监测一起进行系统的分析。对故障

本质进行剖析可知,故障本质就是设备和环境之间相互作用的过程,要从系统动力学的角度去认识它的非线性发展规律。振动分析忽略材料的记忆效应会造成误判,这是技术问题,也是对设备退化哲学的忽视,故障就是系统适应能力丧失的表现,而不是孤立事件。该认知给精准诊断提供思想基础^[1]。

1.2 检修工艺核心要素解析

检修工艺由诊断精度、操作规范、资源调配、质量检验这四个主要部分组成,各个部分之间存在着很强的耦合关系以及动态平衡。诊断精度依靠先进的传感技术和智能分析来保证故障定位的准确性,操作规范包括工具标准化、步骤逻辑性、安全防护体系,这是工艺可靠的保障,资源调配是人力、物料、时间三者的最优配置,影响检修效率和成本,质量验证采用多维测试标准、闭环反馈,保证修复效果可持续^[2]。解析中突出工艺的动态适应性,认为老旧机组检修要打破固定的模板,按照设备的状态来灵活地调节要素的权重。高龄机组重视诊断的准确性、质量检验,中期老化机组可以改善资源分配。关键之处在于揭示工艺本质是知识传递和经验转化的过程,要融合工程师的直觉和技术理性的思维。经验丰富的技术人员可以感觉到仪器所不能察觉的细微异常,这是由于隐性知识的积累所导致的。防止因为过分依赖自动化而忽略掉人为判断的不可替代性,这是工艺改进的基本准则。解析为之后的优化提供要素级指导。

2 水电厂检修工艺现状及现场应用问题分析

2.1 现有工艺技术局限性

现有的技术缺陷主要表现在诊断工具简单、修复手段单一、数据的应用比较浅层。诊断主要依靠人工经验和基本仪器,不能发现微小的损伤和早期的故障;修复一般用传统的焊接或者整体更换,忽略了材料的相容性以及应力分布,从而产生二次损伤;数据只做记录,没有进行智能决策,使得历史的经验不能很好地传承和迭代^[3]。由于技术路径依赖、创新动力不足等原因,新的方法数字孪生因为实施成本高、人才缺乏等原因不能普及。更重要的是技术没有考虑到老旧机组非线性退化特性,比如振动分析中忽略了材料的记忆效应和环境耦合,导致误判率一直很高。深度剖析认为,局限性本质上就是技术哲学的缺失,把检修看成单纯的作业行为,而不是把工程学、材料科学和系统科学结合起来的综合活动。过分看重高精尖设备而轻视工艺适配性,造成技术应用同实际需求相脱离。该认知表明技术优化要回到本质上来,即技术应该服务于工艺目的,而不是主导工艺的设计。

2.2 现场应用问题识别

现场应用时,出现的突出问题有流程被中断的次数太多、跨部门合作效率低、环境干扰大。检修计划经常因为突发故障或者资源不足而被随意更改,造成工期拖延和费用超支;多部门协作没有统一的指挥中心和信息交流平台,信息传递出现错误从而引发操作上的矛盾;现场环境中的湿度、振动、温度等外部因素没有被考虑到工艺设计中,从而影响到修复精度以及耐久性。经过识别发现,人为因素所占比例最高,技术人员对于老旧

机组的特性认识不足,容易出现经验主义的错误^[4]。密封件更换时没有考虑到热膨胀系数的不同造成的二次泄漏,或者拆卸时没有考虑残余应力引起的部件变形。问题的根源是工艺同现场实际情况严重脱离,标准操作程序没有考虑到动态变量以及人为的不确定性。深度反思认为问题不单是执行层面的失误,也是工艺设计缺少人性化考虑,没有考虑到人在复杂系统中所起的核心作用以及认知局限。高压环境中技术人员的决策能力会降低,必须在工艺设计中加入缓冲措施。该识别给出改进的目标。

3 老旧机组检修工艺及现场应用的优化策略

3.1 工艺流程精细化设计

工艺流程精细化设计就是对传统的工序进行拆解,从而达到步骤的精确化、模块化和智能化的目的。设计把检修全过程分成预检评价、拆卸安排、修理实施、组装检验、测试改良这五个主要部分,每一个部分都有关键的控制点以及动态决策树。预检评价阶段使用多源数据融合技术,把历史维修记载、即时传感器信息和环境参数汇总起来,产出个性化的诊断报告,防止无谓的拆解工作,拆卸安排采取分级操作准则,根据各个老化程度的机组给出不同的步骤,高龄机组先做非破坏性检测,减小二次损伤,修复执行过程创建并行作业途径,缩减重要路径的时间窗^[5],组装检验阶段加入实时校准机制,保证部件匹配精确度,测试改良依靠模拟负载动态调节参数。精细化就是对冗余的消除和柔性的加强,用移动终端实时反馈来调整后续的流程。其核心就是将认知工程学的原理应用于流程的设计当中,考虑技术人员的工作负荷以及决策的心理因素,在设置了认知缓冲区的情况下去处理不确定性。重要修复部分转轮焊接等使用“暂停复核”节点,用专家远程指导减少人为失误。这不是技术上的改进,而是对人机交互本质的再认识,即流程要适应人的认知局限而不是强求完美操作,防止因为流程的机械化而丧失灵活性。经过现场实施,可以看出工艺适应性有明显改善,复杂的故障处理速度加快,检修周期也较之前短,为之后的环节打下了良好基础。因此精细化就成了工艺改良的关键突破口。

3.2 关键技术改进方案制定

关键技术改进主要从诊断精准化、修复高效化、验证科学化三个方面入手,形成协同增效的技术体系。诊断环节使用声发射技术和红外热成像技术,对微观损伤进行早期发现和量化评价,使用声波频谱分析来识别轴承隐性裂纹等,修复环节采用激光熔覆、纳米复合材料修补技术代替传统的焊接方式,提高材料的兼容性和耐久性,比如针对转轮空蚀区域使用梯度涂层来防止应力集中,验证阶段建立动态测试标准,将模拟负载和实际工况结合起来评价修复效果,引入多指标综合评价模型。方案制定强调技术选型的针对性、适配性,即对于绝缘老化问题首先采用局部放电监测,而不是通用方案。技术改进的哲学基础就是摒弃技术至上的思想,把技术看作是实现工艺目标的手段^[6]。激光熔覆参数的设定不单要考虑物理特性,还要把设备服役的历史数据加入进来,从而形成一个“技术-历史”双维度的决策模型。这

就说明技术应用本质就是历史经验同现代科学对话的过程, 技术的选择要依据设备的退化轨迹, 而不是一味地追求先进性。高龄机组修复以兼容性为主而不是强度, 防止新材料引起新的问题。该认识来自工程哲学, 认为技术的价值在于解决问题而不是展示技术本身。方案经过多个电厂的试验应用, 修复效果较好, 返工次数明显减少, 为现场施工提供可靠的技术保证。技术改进证明科学选型比技术先进更重要。

3.3 现场应用质量控制措施

现场应用质量控制用三级监控体系保证工艺执行的精度和一致性, 体系有实时过程监督、阶段性专家评审、最终综合验收。实时过程监督依靠移动终端和物联网设备记载重要的步骤数据, 比如拆卸扭矩以及环境参数等, 从而达成操作的可追溯性, 阶段性的专家评审会在拆卸完毕之后及组装之前展开交叉检验, 由不同的专业团队来评判关键的节点, 最后的验收会用到多个指标的综合评价模型, 包含性能, 安全和经济等各个方面。措施以预防为主, 对密封装配前的环境参数进行校准, 消除湿度、温度的影响, 对人为操作波动设置标准化的动作模板和即时反馈机制, 用AR眼镜来指导复杂的步骤。深度内容是质量控制的新角度, 把质量看作一个动态的过程而不是静态的结果。以“质量韧性”为分析对象, 对操作偏差的累积影响进行分析, 从而事先设定补偿措施。源于复杂系统理论, 认为质量失控常常是由于一些微小变量的非线性放大造成的, 需要从系统上进行干预。以某电厂为例, 在轴承安装时由于对中误差只有0.1毫米, 但是在运行中却造成了比较大的振动, 经过不断的实时监测和微调, 成功地将误差链截断。该措施既是监督手段, 又是系统脆弱性主动管理的一种方式, 把质量控制由事后检验变为事前预防。经过实践检验, 在使用该方法以后, 返工率明显下降, 在高压部件修复上更具优势, 质量控制要系统思维加工程智慧才能做好。

3.4 综合效益提升机制构建

综合效益提升机制依靠多方面协作达成经济、安全和环境效益的和谐统一。从经济角度出发, 优化资源调度算法, 减少物料浪费和人工成本, 预测性维护可以减少紧急检修次数, 从安全角度出发, 建立风险预警模型, 及时发现并处理潜在的隐患, 比如用振动数据来预测轴承的失效, 从环境角度出发, 推广绿色修复技术, 减少废弃物的排放, 使用可降解的清洗剂代替化学溶剂。机制核心就是效益关联分析, 把检修质量同机组寿命、电网稳定性联系起来, 量化工期收益。深度内容是机制构建的哲学突

破, 效益不单是量化的结果, 更是系统价值的再定义。以提出检修价值流的概念为例, 把工艺改进当作价值创造的过程, 技术改进产生效率的价值, 人员提升产生可靠性的价值, 环境友好产生社会认可的价值。这是由于价值工程理论所提出的, 认为效益的提高要冲破部门的限制, 创建起全链条的价值网络。以某电厂为例, 其检修成本降低的同时, 机组可用率提高, 间接减少了碳排放, 体现出综合价值。该机制可以防止只看重短期经济指标, 使行业重视长期的可持续性。

4 结语

本文对水电厂老旧机组检修工艺优化及现场应用的可行性、必要性进行了系统的论证, 用理论创新和实践检验的方法创建出全流程优化体系。研究成果不但可以解决效率低、质量不稳定等问题, 而且可以加深人们对设备全生命周期管理的认识。优化策略的采用大大提高了机组的可靠性以及经济效益, 给行业提供了一个可以借鉴的范例。未来要继续研究价值流管理同人工智能的融合, 但是目前的研究成果已经显示出工艺优化的战略意义。检修工艺持续改进是能源基础设施韧性之本, 需要行业共同努力, 从经验驱动转向科学驱动。该研究给水电行业的可持续发展提供新的动力, 具有持久的理论和实践意义。

参考文献

- [1] 杨向上. 安徽省老旧水电站增效扩容改造与成效[J]. 人民黄河, 2023, (S2): 92-94.
- [2] 肖康鹏, 史建宇, 李青洋. 老旧燃煤机组跨代升级与延寿改造的探索[J]. 中国电力企业管理, 2025, (13): 11.
- [3] 郭日阳, 李巍, 张欣刚, 等. 老旧风电场优化升级与退役处置[J]. 能源与节能, 2023, (2): 45-47.
- [4] 李琰, 胡昌雄, 李祥, 等. 基于全面稳定性试验的老旧水电站机组故障诊断与处理[J]. 电力设备管理, 2025, (16): 199-201.
- [5] 唐贤木. 老旧风电机组性能提升综合技术研究与实践[J]. 模型世界, 2025, (28): 74-76.
- [6] 陶星明, 陈太平. 新型电力系统中水力发电装备的发展趋势[J]. 新型电力系统, 2023, (003): 001.

作者简介:

高斌(1989—), 男, 汉族, 甘肃省金昌市人, 本科毕业于新疆大学电气工程及其自动化, 中级工程师, 研究方向运行发电, 检修维护工作。