

水电站机械常见故障检修技术的应用研究

李 磊 田景霞

湖南澧水流域水利水电开发有限责任公司江垭水电站 湖南 张家界 427221

摘 要：水电站机械设备的可靠运行是保障电力生产安全与效率的关键。本文系统分析了水轮机、发电机、调速器及油水气系统等核心设备的常见故障类型与机理，阐述了基于状态监测与智能诊断的现代故障诊断技术。在此基础上，构建了集预防性检修与纠正性检修于一体的技术体系，并介绍了关键部件的修复工艺与专用工具。进一步从检修流程标准化、质量控制精细化、效率提升模块化及人员能力专业化四个维度，提出检修技术应用的优化策略，形成一套科学、高效的水电站机械故障检修方案，为提升设备可靠性与运维水平提供理论参考和实践指导。

关键词：水电站机械；故障诊断；预防性检修；模块化设计；智能诊断

引言：水电站作为清洁能源重要来源，其机械系统稳定运行至关重要。然而，受水力冲击、机械磨损、电气故障等多因素影响，水轮机、发电机等核心设备易出现各类故障，影响发电效率与安全。传统检修方式存在滞后性、精准性不足等问题，难以满足现代水电站运维需求。因此，深入研究水电站机械常见故障检修技术，构建科学检修体系，提升故障处理效率与质量，成为保障水电站稳定运行的关键课题。

1 水电站机械常见故障类型与机理分析

1.1 水轮机故障

水轮机作为水电站能量转换的核心设备，其故障类型可分为水力故障与机械故障两类。水力故障中，空蚀现象多发生于转轮叶片表面，因水流局部低压区产生气泡溃灭形成冲击波，长期作用导致材料剥落，其剥蚀速率在含沙量高的水域可达每年2-3毫米；泥沙磨损则因水流携带的固体颗粒对过流部件表面持续冲刷，造成金属表面磨蚀减薄；振动过大问题常由水力因素引发，如涡带诱发压力脉动、止漏环间隙分布不均导致水流紊乱，进而引发整机振动加剧，当振动幅值超过ISO7919标准规定的80 μ m预警值时，需立即干预^[1]。机械故障方面，轴承瓦温异常通常源于润滑油膜失效，可能因供油量不足、油质劣化或轴瓦间隙调整不当引发，瓦温通常需控制在65 $^{\circ}$ C以下，超过75 $^{\circ}$ C将触发保护停机；剪断销剪断现象多因机组过载或导叶卡阻导致连杆受力超过设计极限；顶盖水位升高往往与密封失效相关，当主轴密封或顶盖排水装置故障时，渗漏水无法及时排出，形成积水威胁设备安全。上述故障机理可归纳为水力冲击导致的动态载荷、机械部件间的摩擦磨损、金属材料的疲劳损伤，以及设计阶段对工况适应性考虑不足或运行操作偏离规范要求。

1.2 发电机故障

发电机故障分为电气故障与机械故障两大类。电气故障中，绝缘损坏问题多因长期运行于潮湿环境或绝缘材料老化，导致绕组对地绝缘性能下降，当绝缘电阻值低于1M Ω 时存在击穿风险；三相电压不平衡现象常与励磁系统故障相关，如励磁变压器匝间短路或自动调节装置参数失配，引发磁场分布不均，不平衡度若持续超过2%将影响稳定运行。机械故障方面，轴承过热主要因润滑油系统故障，如润滑油供油量不足、油路堵塞或冷却器效率降低，导致摩擦副温升过高；机组剧烈振动则与转子动不平衡或轴线不正密切相关，转子质量分布偏差或安装时轴线未对中，均会引发周期性离心力作用，造成整机振动超标，根据GB/T11348.5标准，振动烈度需控制在2.8mm/s以内。此类故障的根源在于电磁力与机械力的复合作用、部件间的摩擦损耗、温度场分布不均引发的热应力，以及金属材料在长期交变载荷下的性能退化。

1.3 调速器故障

调速器故障可划分为液压故障与控制故障。液压故障中，主配压阀发卡现象多因液压油污染导致阀芯运动受阻，或调节参数设置不当引发阀芯卡滞；接力器跑油问题常与阀门密封失效相关，如密封圈老化破损或安装间隙超差，导致压力油泄漏，泄漏量若大于5L/min将影响调节响应速度。控制故障方面，反馈钢绳断裂会直接中断调节信号传输，使调速器无法感知导叶实际开度；抽动现象则多因管路进气形成气阻，或调节参数与机组特性不匹配，引发控制指令频繁波动，导叶开度波动范围若超过 $\pm 0.5\%$ 即视为异常。此类故障的成因包括液压系统清洁度不足导致的污染磨损、机械部件的配合精度下降，以及控制算法对工况变化的适应性不足。

1.4 油水气系统故障

油水气系统作为辅助设备运行的基础支撑,其故障类型具有介质相关性。油系统故障中,油位异常可能由油箱渗漏或油泵输油能力下降引发;油质劣化则因水分侵入或高温氧化导致黏度变化及杂质增多,当油液中水分含量超过500ppm或颗粒污染度高于NAS10级时需进行净化处理。水系统故障方面,冷却水管路堵塞常因水质硬度高形成水垢沉积,或杂质在管路弯头处堆积;离心泵不上水问题多与气蚀现象相关,当泵入口压力低于饱和蒸汽压时,水流汽化形成气泡溃灭,冲击叶轮表面造成磨损。气系统故障中,储气罐压力异常可能因安全阀误动作或压缩机排气量不足,工作压力低于额定值0.6MPa的90%时将影响操作用气;气动元件失灵则与压缩空气含水量超标或固体颗粒污染相关,导致阀芯卡涩或密封失效^[2]。此类故障的机理可归结为介质污染引发的物理化学变化、部件材料的老化失效,以及设计流量与实际需求的不匹配。

2 水电站机械故障检修技术体系

2.1 故障诊断技术

状态监测技术通过多维度参数采集实现设备健康评估。振动分析利用加速度传感器捕捉机械振动信号,结合频谱分析识别转子不平衡、轴系不对中等故障特征,轴心轨迹图则可直观呈现轴系运动状态;油液分析通过铁谱技术检测金属磨损颗粒的形态与浓度,光谱分析量化油液中元素含量,从而判断部件磨损程度,例如铁元素浓度月增长率超过50ppm提示存在异常磨损;温度监测采用红外热成像技术对设备表面温度场进行非接触式扫描,快速定位局部过热区域。智能诊断技术融合数据驱动与知识推理方法,基于机器学习的故障预测模型通过历史数据训练,可对设备劣化趋势进行提前预警,支持向量机适用于小样本故障分类,神经网络则擅长处理非线性映射关系;专家系统将领域知识编码为规则库,通过逻辑推理辅助检修人员制定决策方案,提升故障诊断的准确性与效率。

2.2 检修策略制定

预防性检修策略以降低故障发生概率为目标。定期检修依据设备制造商推荐周期或行业经验设定检修间隔,例如水轮机转轮的大修周期通常为3-5年,发电机轴承更换周期为8-10万运行小时,通过计划性停机完成易损件更换与常规检查;状态检修则依托在线监测系统实时采集设备运行数据,通过数据分析模型评估剩余寿命,动态调整检修周期与项目,实现从“定时检修”向“按需检修”转变。纠正性检修聚焦故障发生后的快速响应,通过标准化故障隔离流程定位故障点,采用模块化更换

技术缩短修复时间,例如水轮机导叶剪断销断裂时,可快速更换备用销并复核调节系统参数,通常可将故障处理时间从传统的8小时缩短至2小时以内,最大限度减少停机损失。

2.3 关键检修技术

水轮机检修中,密封技术通过空心围带加压修复实现主轴密封动态补偿,消除渗漏水隐患;转轮修复采用堆焊工艺恢复汽蚀区域几何尺寸,喷涂技术形成耐磨涂层延长使用寿命;振动平衡调整通过在转轮叶片配重块实现质量再分布,降低不平衡力矩。发电机检修环节,绝缘处理采用真空浸渍工艺提升绕组绝缘性能,局部修复技术针对绝缘薄弱点进行针对性处理;轴承更换需严格控制间隙调整精度,配合润滑优化方案降低摩擦损耗。调速器检修涵盖液压系统深度清洗,通过多级过滤去除油液中杂质,参数优化针对PID调节器进行整定试验,确保调节响应速度与稳定性;机械部件更换聚焦主配压阀阀芯修复与反馈钢绳整体更换^[3]。油水气系统检修中,管路清洗采用高压水射流技术清除内壁附着物,密封件更换选用耐介质腐蚀材料,过滤器维护通过反冲洗或更换滤芯恢复过滤性能。

2.4 检修工具与设备

专用工具设计针对特定检修场景,液压扳手提供高精度扭矩控制,激光对中仪实现轴系精准对齐,内窥镜可深入设备内部进行可视化检查,振动分析仪支持多通道信号同步采集。智能化设备推动检修模式升级,机器人巡检搭载多类型传感器完成设备表面缺陷检测,无人机检测适用于高空管路与大型结构巡查,远程诊断平台通过物联网技术实现数据实时传输与专家协同会诊,构建“现场-远程”联动检修体系。

3 水电站机械故障检修技术应用优化

3.1 检修流程优化

标准化作业通过建立统一的检修规程与操作规范,确保检修过程可控在控。依据国际标准ISO55000资产管理框架,制定覆盖设备全生命周期的管理文件,明确检修前准备、实施过程及验收环节的技术要求;操作票制度将复杂检修任务分解为可执行的步骤序列,每项操作均需确认签字,避免人为疏漏。并行作业模式打破传统线性检修逻辑,通过任务分解与资源调配实现多工序协同推进。例如在机组大修期间,可安排一组人员对油系统进行循环过滤处理,另一组同步开展水系统管路清洗,两组作业互不干扰且共享部分起重设备,显著缩短整体检修工期。通过引入网络计划技术,运用关键路径法精准识别制约工期的核心工序,实现资源的优化配置。建

立跨专业日协调会机制，重点解决工序接口问题，有效消除专业壁垒。实施动态进度管理，设置里程碑节点进行全过程跟踪，确保大修计划按时完成率稳定保持在较高水平。推行标准化作业流程，将典型检修工序固化形成作业指导书，大幅提升作业规范性。

3.2 检修质量控制

过程监控聚焦关键工序的质量卡控，采用第三方见证机制确保操作合规性。轴承间隙测量需使用专用塞尺与千分表，测量数据实时记录并由质检员复核；焊接修复部位需进行渗透检测与超声波探伤，确认无裂纹等缺陷后方可进入下一工序。验收标准构建量化指标体系，振动值需低于机组设计值的80%，油质指标中颗粒物需达到NAS6级以下；功能测试环节模拟实际工况，调速器需在空载与负载两种状态下完成阶跃响应试验，记录调节时间与超调量，确保动态性能满足运行要求^[4]。建立完整的质量追溯体系，实现从部件更换到整机调试的全过程质量可追溯。推行质量责任制，将关键工序质量与个人绩效挂钩。引入质量预警机制，对常见质量问题进行统计分析，制定针对性预防措施。定期开展质量回头看活动，持续改进质量管理体系。

3.3 检修效率提升

模块化设计理念推动检修单元标准化，预装配的轴承座模块集成定位销与密封组件，现场更换时仅需调整对中精度即可快速安装；密封模块采用快速连接结构，缩短密封件更换时间。数字化管理工具实现检修信息全流程追溯，电子化台账系统自动记录检修时间、更换部件型号及质检数据，支持按设备树结构进行多维查询；备件库存管理引入物联网技术，通过RFID标签实时监控库存数量，设置安全库存阈值自动触发采购申请，避免因备件短缺导致检修延误。开发移动检修管理平台，实现技术资料实时查询、工序报验在线提交、问题反馈及时处理。引进智能液压拉伸器、自动盘车装置等专用工装，将传统人工操作转化为标准化机械作业。优化现场物料管理，实行定置定位摆放，建立工具清单制度，显著减少非作业时间消耗。

3.4 检修人员能力提升

技能培训体系融合虚拟现实技术，构建三维仿真检修场景，受训人员可在虚拟环境中完成设备拆解、故障诊断与修复操作，系统自动评分并生成改进建议；故障案例库收集典型检修事件，通过图文视频形式还原故障现象与处理过程，辅助新员工快速积累经验。团队协作机制打破专业壁垒，组建包含机械、电气、自动化人员的联合检修组，针对复杂故障开展联合诊断，例如处理调速器抽动问题时，机械人员检查主配压阀卡涩情况，电气人员分析控制回路信号干扰，自动化人员优化调节参数，通过多专业协同提升问题解决效率^[5]。建立完善的技能等级认证体系，将员工技能水平与职业发展通道有机结合。定期组织技术比武和应急演练，通过实战化培训提升员工技能。实施检修项目负责人制度，培养既懂技术又懂管理的复合型人才。开展师徒结对活动，发挥技术骨干传帮带作用，促进员工快速成长。

结束语

水电站机械常见故障检修技术的研究与应用，对提升水电站运行稳定性与经济性意义重大。通过系统分析故障类型与机理，构建全面检修技术体系，并从流程、质量、效率及人员能力等多维度优化检修工作，可有效降低故障发生率，缩短检修工期，提高设备可靠性。未来，随着智能化、数字化技术发展，检修技术将不断升级，为水电站安全高效运行提供更坚实保障，推动水电行业可持续发展。

参考文献

- [1] 鱼光伟. 水电站机械常见故障检修技术的应用分析[J]. 大众科学, 2025, 46(10): 182-184.
- [2] 赵文欢. 水电站机械常见故障检修技术的应用分析[J]. 科海故事博览, 2022(12): 46-48.
- [3] 王国刚. 水电站水轮发电机组常见故障技术处理[J]. 中国科技纵横, 2023(23): 92-94.
- [4] 刘谦. 水电站机械常见故障检修技术的应用分析[J]. 建筑工程技术与设计, 2021(29): 399-400.
- [5] 吴忠崇, 李浩. 水电站机械常见故障检修技术的应用分析[J]. 电脑高手, 2021(4): 333-334.