

# 水利发电设备的运行状态故障检修探讨

王兴当

贵州西源发电有限责任公司 贵州 六盘水 553000

**摘要:**水利发电设备是水电工程安全稳定运行的关键,其故障检修水平关乎供电可靠性与经济效益。传统定期检修模式盲目性强、成本高,还易遗漏隐性故障,难以满足现代水电设备运维需求。本文梳理水利发电设备组成与工作原理,分类分析机械、电气、液压及环境因素导致的故障类型与成因,构建“状态监测-故障诊断-预测性维护”的全流程状态检修技术体系。结合智能化技术趋势,探讨数字孪生等应用价值,并通过典型案例验证实用性,为水利发电设备运维提供精准高效方案,助力水电行业发展。

**关键词:**水利发电设备;状态检修;故障诊断;预测性维护

引言:水电是清洁可再生能源,在能源结构转型中地位重要,水利发电设备稳定运行是保障水电产能的核心。设备运行年限增长、工况变复杂后,机械磨损、电气老化、环境侵蚀等因素易引发各类故障,小则设备停机,大则引发安全事故。传统定期检修依赖经验,难精准捕捉设备实时状态,常出现“过度”或“不足”检修问题。当前状态检修推广中存在监测单一、诊断精度低、智能化不足等短板。本文探讨相关技术方法,构建检修体系,明确发展方向,为提升运维水平提供依据。

## 1 水利发电设备概述与故障类型分析

### 1.1 水利发电设备组成与工作原理

水利发电设备是一个复杂的集成系统,核心由水轮机、发电机、调速系统、励磁系统、输电系统及辅助设备组成。水轮机作为能量转换核心,通过引水机构接收水流,利用水流势能与动能推动转轮旋转,将水能转化为机械能;发电机与水轮机同轴连接,基于电磁感应原理,将转轮传递的机械能转化为电能;调速系统通过调节水轮机开度,精准控制转轮转速,保障发电频率稳定;励磁系统负责为发电机提供励磁电流,维持输出电压稳定;辅助设备包括冷却系统、润滑系统、制动系统等,为核心设备安全运行提供保障。整个系统运行的核心逻辑是实现水能-机械能-电能的高效转化,各设备协同工作,任何环节出现故障都会影响整体运行效率与稳定性。

### 1.2 常见故障类型及成因

#### 1.2.1 机械故障

机械故障是水利发电设备最常见的故障类型,主要集中在水轮机、发电机转子与轴承等部位。水轮机常见故障包括转轮裂纹、叶片气蚀磨损,成因多为水流冲击、泥沙磨损及材料疲劳;发电机转子故障以不平衡、弯曲为主,源于制造安装误差、长期高速旋转导致的形变;

轴承故障表现为磨损、过热、振动异常,核心成因是润滑不足、密封失效导致杂质侵入,或轴承自身材料老化。机械故障具有渐进性特征,初期故障信号微弱,若未及时发现,会逐步加剧并引发连锁故障,严重时导致设备停机<sup>[1]</sup>。

#### 1.2.2 电气故障

电气故障主要发生在发电机定子、励磁系统与输电线路中,直接影响电能输出质量与安全。定子绕组故障是发电机核心电气故障,包括绝缘老化、短路、接地等,成因包括长期高温运行、电压冲击、湿度超标导致绝缘层破损;励磁系统故障表现为励磁电流不稳定、励磁绕组过热,源于整流元件损坏、励磁调节器参数异常;输电线路故障以线路短路、接头过热为主,多由雷击、线路老化、异物搭接引发。电气故障具有突发性强的特点,若处置不及时,易引发设备损坏或电网波动。

#### 1.2.3 液压系统故障

液压系统是调速系统、闸门控制系统的核心动力源,故障多表现为液压阀卡涩、油管泄漏、油压不稳定。液压阀卡涩主要因液压油杂质过多、阀芯磨损或弹簧失效,导致阀门动作迟缓或卡死;油管泄漏源于管路老化、接头松动或振动导致的焊缝开裂;油压不稳定则与油泵故障、溢流阀失效、系统泄漏量过大相关。液压系统故障会直接影响设备调节精度,如调速系统液压故障会导致水轮机开度控制失准,进而引发转速波动,威胁设备安全运行。

#### 1.2.4 环境因素导致的故障

环境因素对水利发电设备运行影响显著,易引发各类隐性故障。高温高湿环境会加速电气设备绝缘老化、金属部件锈蚀,尤其在南方多雨季节,发电机内部湿度超标易导致定子绕组接地故障;严寒天气会导致液压油

粘度增加、管路结冰,影响液压系统正常工作;风沙大的地区,泥沙易侵入轴承、密封装置,加剧机械磨损;雷击等极端天气则可能直接损坏励磁系统、输电线路等电气设备。环境因素导致的故障具有区域性、季节性特征,需结合地域环境特点针对性防控。

### 1.3 故障影响与检修需求

水利发电设备故障会引发多重负面影响,经济层面,设备停机将直接导致发电量下降,同时检修成本、应急供电成本会显著增加;安全层面,严重故障可能引发设备损坏、人员伤亡,如转轮破裂可能导致水轮机爆炸,电气短路可能引发火灾;社会层面,若故障导致区域供电中断,会影响工业生产与居民生活,损害供电企业公信力。基于此,水利发电设备检修需满足三大核心需求:一是精准性,需精准定位故障位置、明确故障类型与严重程度;二是及时性,需快速响应故障预警,缩短停机时间;三是经济性,需避免过度检修,在保障安全的前提下降低运维成本,这也推动检修模式从传统定期检修向状态检修转型。

## 2 水利发电设备状态检修技术体系

### 2.1 状态监测技术

状态监测技术是状态检修体系的基础,核心是实时采集设备运行参数,为故障诊断提供数据支撑。监测内容覆盖机械、电气、液压等关键系统,机械系统采用振动传感器监测轴承、转子的振动幅值与频率,通过温度传感器监测轴承、定子的温度变化;电气系统利用电压、电流传感器监测发电机输出参数,通过局部放电检测仪监测定子绕组绝缘状态;液压系统通过压力传感器、流量传感器监测油压与油液流量,借助油液分析技术检测油液中杂质含量、金属磨粒浓度。监测方式采用在线实时监测与离线定期检测相结合,在线监测实现故障实时预警,离线检测补充关键参数细节,同时通过数据传输网络将监测数据汇聚至运维中心,构建设备状态数据库。

### 2.2 故障诊断方法

故障诊断方法基于监测数据实现故障的精准识别与定位,分为传统诊断方法与智能诊断方法。传统诊断方法包括阈值判断法、趋势分析法,通过对比监测参数与标准阈值的偏差,或分析参数变化趋势,初步判断设备状态,适用于简单故障识别;智能诊断方法是当前主流方向,结合机器学习、信号处理技术,如采用小波分析提取振动信号中的故障特征,通过支持向量机、神经网络等模型对故障类型进行分类识别,可实现隐性故障与复杂故障的精准诊断<sup>[2]</sup>。同时,构建故障知识库,整合历史故障数据与诊断经验,提升诊断效率与准确性,形成

“数据采集-特征提取-模型诊断-结果输出”的完整诊断流程。

### 2.3 预测性维护技术

预测性维护技术作为状态检修的核心目标,在提升设备运维水平方面发挥着至关重要的作用。它借助对设备运行状态数据的深度剖析,能够精准预测故障的发展趋势以及设备的剩余寿命,进而制定出极具针对性的个性化维护方案。其核心技术涵盖寿命预测模型与维护决策算法,寿命预测模型依据设备老化规律以及实时监测数据,运用时序分析、故障演化模型等先进方法,对关键部件的剩余使用寿命进行精准预估。维护决策算法则综合考量设备的重要程度、故障可能产生的影响程度以及维护成本等多方面因素,科学确定最优的维护时机与维护内容。

例如,在水利发电设备中,通过对轴承振动数据和温度变化的细致分析,能够准确预测轴承的剩余寿命。基于此预测结果,在故障尚未发生前就制定出合理的更换计划,有效避免因突发故障导致的设备停机,保障设备的稳定运行。预测性维护技术真正实现了“按需检修”,极大地提升了维护工作的针对性,有效降低运维成本,同时显著延长了设备的使用寿命。

## 3 智能化检修技术发展趋势

### 3.1 数字孪生技术在设备状态模拟中的应用

数字孪生技术作为智能化检修领域的关键核心技术,凭借构建物理设备的虚拟映射模型,实现了对设备运行状态的实时模拟以及故障的精准预判。其具体应用流程如下:首先,依据设备的设计图纸、过往运行数据等多源信息,精心构建一个包含几何模型、物理模型以及行为模型的数字孪生体,这个虚拟模型能够全方位、多层次地反映物理设备的特性。接着,借助物联网技术,将物理设备在运行过程中产生的实时数据,准确无误地传输至虚拟模型中,从而实现虚拟模型与物理设备的同步映射,确保两者状态的实时一致性。最后,利用这个虚拟模型,模拟设备在不同工况下的运行状态,深入分析潜在故障风险。例如,在水利发电设备中,模拟转轮在不同水流冲击力度、角度下的应力分布情况,提前精准识别出可能产生裂纹的风险点。数字孪生技术成功突破了物理设备监测的局限,能够提前发出故障预警,并模拟出合理的处置方案,为检修方案的制定提供了极为精准的支撑,极大地提升了检修工作的前瞻性与科学性<sup>[3]</sup>。

### 3.2 物联网(IoT)与边缘计算在实时监测中的作用

物联网与边缘计算的融合应用,有效解决了传统监测技术中存在的数据传输延迟、云端算力不足等突出问

题,显著提升实时监测的可靠性与效率。物联网通过在设备上广泛部署大量的智能传感器以及无线传输模块,能够全面采集设备运行过程中的各类参数,并实现这些设备之间的互联互通,构建起一个全方位、无死角的监测网络。而边缘计算则将部分数据处理任务从云端迁移至靠近设备的边缘节点,在设备附近就完成数据过滤、特征提取、故障预警等关键操作。这一举措大幅降低了数据传输量,减少了数据传输延迟,确保故障预警信号能够实时反馈。例如,在监测轴承振动数据时,边缘节点可以实时对数据进行分析,一旦发现异常情况,立即触发预警机制,同时将关键数据上传至云端,以便进行更深入的深度分析。二者相互配合,实现“全面感知-实时处理-精准预警”的监测闭环,为智能化检修提供了坚实可靠的技术支撑。

#### 4 水利发电设备故障检修案例分析

##### 4.1 案例1:溪洛渡水电站水轮机转轮裂纹故障诊断与处理

溪洛渡水电站一台300MW混流式水轮机在运行过程中,监测系统显示转轮区域振动幅值异常升高,远超标准阈值。检修人员采用超声波检测技术对转轮进行全面检测,并结合振动信号小波分析结果,确诊转轮叶片存在长度约5cm的裂纹。经分析,裂纹成因是长期水流冲击与泥沙磨损导致材料疲劳。检修团队制定“停机修复+强化防护”方案:拆除转轮后,采用焊接技术修复裂纹,经无损检测确认修复质量;在叶片表面喷涂耐磨防腐涂层,增强叶片抗磨损能力;同时优化引水系统,减少水流冲击不均问题。检修后设备运行稳定,振动幅值恢复至正常范围,转轮使用寿命预计延长5年,验证了状态监测与精准诊断技术的实用性。

##### 4.2 案例2:向家坝水电站发电机定子绕组绝缘故障预测与预防

向家坝水电站的一台发电机在运行中,局部放电监测数据显示定子绕组局部放电量呈持续上升趋势,结合绝缘电阻测试结果,预测绕组绝缘层存在老化破损风险。进一步采用红外热成像技术定位故障区域,发现故障点位于定子绕组端部。经分析,成因是长期高温运行与湿度影响导致绝缘层老化。为避免绝缘击穿引发短路故障,采取预防性维护措施:对老化绝缘层进行局部更换,采用耐高温绝缘材料提升绝缘性能;优化冷却系统参数,降

低定子绕组运行温度;加装湿度控制系统,维持发电机内部干燥环境。后续监测数据显示,局部放电量恢复正常,绝缘电阻稳定,成功避免了绝缘故障的发生,体现了预测性维护的价值<sup>[4]</sup>。

##### 4.3 案例3:白鹤滩水电站调速系统液压阀卡涩故障的智能诊断

白鹤滩水电站调速系统出现调节迟缓问题,影响水轮机转速稳定性。检修人员通过液压系统压力、流量实时监测数据,结合智能诊断模型分析,发现液压阀动作信号异常,确诊为液压阀卡涩故障。经分析,成因是液压油中杂质过多导致阀芯磨损。检修团队采用智能检修方案:先通过油液过滤系统净化液压油,清除杂质;拆解液压阀,更换磨损阀芯与密封件;在液压系统中加装在线油液监测装置,实时监测油液清洁度。检修后调速系统调节精度恢复正常,响应速度提升30%,同时在线监测装置可提前预警油液污染问题,降低同类故障复发率,为液压系统智能化检修提供实践参考。

#### 结束语

水利发电设备运行状态故障检修是保障水电安全高效运行的关键环节,传统检修模式已难以适配现代设备的运维需求。本文构建的“监测-诊断-维护”全流程状态检修体系,结合智能化技术发展方向,为故障检修提供了系统化解决方案,典型案例验证了其可行性与实用性。未来,需进一步推动数字孪生、物联网等前沿技术与检修工作的深度融合,提升检修的智能化、精准化水平;加强故障知识库建设与技术推广,促进不同水电站间的经验共享。通过技术创新与实践深化,不断完善故障检修体系,降低设备故障风险,提升运维效益,为水电行业的绿色可持续发展提供更坚实的保障。

#### 参考文献

- [1]王白兰.水利发电设备的运行状态故障检修探讨[J].今日自动化,2023(9):120-121,155.
- [2]李新军.水利发电工程建设与管理的有效措施探讨[J].科技风,2022,(07):80-82.
- [3]章天际.基于振动分析的水利发电机组机械状态检测方法[J].实验室检测,2025,3(21):129-131.
- [4]田琦.水利发电机组设备维护与保养技术探讨[J].现代工程项目管理,2025,4(2).