

水轮机状态监测与故障诊断技术研究

段旭

贵州金元股份有限公司安顺水力发电总厂

DOI:10.12238/pe.v3i5.16602

[摘要] 水轮机是水力发电的核心,其运作状况直接影响电站安危与效益,本文针对水轮机状态监测与故障诊断技术体系展开研究,重点放在状态监测的技术根基、典型故障机理及其特征,以及智能诊断办法和系统集成策略上。通过分析监测参数选择、传感器优化布置与数据融合办法,搭建起分层监测系统架构;关于机械、电气以及水力振动这些故障情况,阐述它们产生的原因及其信号特点;联系信号处理和智能算法来形成诊断模型流程图;然后谈及系统实行途径,技术难题以及智能维护。研究为建立智能化的运维系统,实现预测性维护提供理论基础。

[关键词] 水轮机; 状态监测; 故障诊断; 信号处理; 智能算法

中图分类号: TP306+.3 **文献标识码:** A

Research on hydro turbine condition monitoring and fault diagnosis

Xu Duan

Guizhou Jinyuan Co., Ltd. Anshun Hydroelectric Power Plant, Anshun City

[Abstract] As the core component of hydropower generation, the operational status of water turbines directly impacts the safety and efficiency of power plants. This study investigates the technical framework for turbine condition monitoring and fault diagnosis, focusing on three key aspects: the technical foundations of condition monitoring, mechanisms and characteristics of typical faults, and intelligent diagnostic approaches with system integration strategies. By analyzing parameter selection, sensor optimization layouts, and data fusion methods, a hierarchical monitoring system architecture is established. The research elucidates the causes and signal characteristics of mechanical, electrical, and hydraulic vibration faults. Through signal processing and intelligent algorithms, a diagnostic model flowchart is developed. The paper further discusses implementation pathways, technical challenges, and intelligent maintenance solutions. This study provides a theoretical foundation for establishing intelligent operation and maintenance systems and achieving predictive maintenance.

[Key words] turbine; condition monitoring; fault diagnosis; signal processing; intelligent algorithm

引言

水轮机长时间在复杂水力环境下工作,部件容易发生磨损、裂纹以及空蚀等故障情况,从而影响到机组的使用寿命及供电可靠性。传统定期维修模式存在过度维修或维修滞后问题,不符合现代化电站智能化运维需求^[1]。所以发展以实时状态监测和智能诊断为基础的预知维护技术十分必要,通过状态监测对能体现设备健康水平的相关参数进行实时采集,并且把收集来的数据作为故障预警的基础条件;再者,故障诊断则是通过分析这些数据的特点来识别不同类型的故障问题,找到引发该类故障的原因,并估计出其严重程度。本文将围绕监测系统构建、故障特征分析、诊断方法实现及系统应用等关键环节展开论述,旨在为提升水轮机运维智能化水平提供理论参考。

1 水轮机状态监测技术基础研究

1.1 监测参数与信号类型

水轮机的状态监测依赖于对关键物理量的准确捕捉,其监测参数必须能反映设备的机械、电气和水力运行状态。机械参数主要包括振动,如摆度、轴向位移等,振动信号直接反映了转子动态平衡状态以及轴承磨损、结构连接松动等问题。而摆度监测则是用来检测主轴运行轨迹是否稳定。电气参数包含定子绕组温度、转子电流以及电压谐波等,出现温度异常往往表明存在绝缘老化或者冷却系统失效的情况,电流电压谐波成分的改变可能反映出电气不平衡或者绕组短路的风险^[2]。水力参数包括压力脉动、空化噪声、流量、效率等,压力脉动属于水力振动的关键激起源,它的特性分析对于识别涡带、叶道涡等水力现象颇为关键。多参数协同监测为综合状态评估提供了数据基础。

1.2 传感器布置与数据采集

传感器的合理选择与布置是保证数据准确性的第一步。振动加速度传感器一般安装在轴承座、机架等主要支撑部件上,来采集径向和轴向振动。利用涡流位移传感器来准确测定主轴相对振动及摆度。传感器布置需贴近振源且路径最短,避免信号传输过程中出现衰减及畸变,对于大型水轮机而言,须采用分布式测点布局,从而获取空间模态信息。数据采集系统应具有多个通道的同时采样能力以及较高精度与较强的抗干扰性,采样的频率需要满足奈奎斯特采样定理,以保证能够捕获到故障的特征频率。而且要能够及时传输和存储数据,为后续分析提供完整的数据链。

1.3 监测系统框架设计

水轮机状态监测系统一般采用“感知层+传输层+数据层+应用层”这种分层结构。感知层包含各类传感器网络,主要用来采集原始信号^[3]。传输层是将现场的数据可靠的传送到服务器上,通常采用工业以太网或者是无线通信的技术来进行数据的实时、稳定传输。数据层将大量的监测数据进行存储、管理并预处理,创建历史数据库。应用层属于核心部分,它整合了状态显示、报警管理、趋势分析以及诊断模块,在此框架下完成数据从采集到智能化应用的闭合过程,进而为设备的状态可视化和智能化管理提供平台支撑。

2 常见故障与特征分析

2.1 机械故障类型与机理

水轮机机械故障主要包括转子不平衡、不对中、轴承缺陷和部件松动等。转子不平衡主要是由于质量分布不均或者转轮叶片空蚀损坏,振动特征是工频成分占主导。不对中故障出现在联轴器接合处,由安装误差或者基础下沉造成,其振动信号中常常包含二倍频成分并且伴随着轴向振动的增大^[4]。滚动轴承的故障是局部性的,比如滚道剥落、滚动体损伤等,振动信号中就会出现相应的特征频率。部件松动会造成连接刚度下降,振动信号中会出现丰富的高频谐波成分,理解这些故障的物理机理是准确识别其特征的前提。

2.2 电气故障特征提取

常见电气故障有定子绕组短路、转子匝间短路、气隙不均匀等。对于绕组短路来说,它会引起三相电流不平衡现象,还会引发负序电流的产生,此外该问题还会使得绕组出现局部过热的情况,这一情况能够通过温度监测参数得到体现。转子匝间短路,励磁电流会变得过大,磁场分布发生扭曲,于是振动被诱发,气隙不均等状况存在,无论静态还是动态的,都会造成不平衡磁拉力,在振动频谱中表现为围绕旋转频率进行调制的边频带。要从复杂的电信号中找到这些细小的特征,这是电气故障诊断的关键。

2.3 水力振动特性分析

水力振动是水轮机特有的振动现象,其原因主要是涡带、叶道涡、卡门涡街以及尾水管涡带等。当部分负荷运行时,在转轮出口形成螺旋形涡带,涡带频率一般为转速频率的几分之一,引起强烈的压力脉动^[5]。叶道涡产生于叶片头部的脱流,频率同叶

片通过频率相联系,卡门涡街脱落频率由水流速度及叶片尾缘形状决定,如果该频率与叶片固有频率接近,则会激发共振现象。这种水力振动的特征频率与机械振动有着明显的差异,分析其特点有利于找出故障来源。

3 故障诊断方法与模型

3.1 信号处理与特征提取

原始监测信号存在噪声与干扰,要借助信号处理技术来提取有效的故障特征,时域分析可算出信号的有效值、峰值、峭度等统计指标,从而大致判断状态是否正常。频域分析把信号通过快速傅里叶变换转化成频率域,可以清楚地显示各个频率成分的幅值,这是识别和旋转频率有关的故障成分的基础^[6]。对非平稳信号来说,时频分析技术,比如短时傅里叶变换、小波变换等,可以同时呈现频率成分随时间变动的规律。特征提取是从处理过的信号中,通过降维凝练出敏感、稳定的特征向量,为后续诊断模型输入数据。这些特征应该能够最大程度地描述出不同的故障模式。

3.2 智能诊断算法

基于信号处理获得的特征,智能诊断算法可自动进行故障模式识别分类。专家系统则是依靠领域专家知识所建立起来的知识库,它适用于对机理清楚的一般性故障诊断问题。

像支持向量机、随机森林这样的机器学习算法可以从历史数据中学会故障特征和类别的复杂对应关系。卷积神经网络、长短期记忆网络这样的深度学习模型,有着较强的端到端的特征学习能力,能够直接从原始的振动信号或者时频图像里面自动地提炼出比较深层的特征,进而达成更为精确的诊断。

3.3 诊断模型构建流程

建立一个可靠的故障诊断模型要按照系统的步骤来开展工作,先搞清楚诊断的目的,在于诊断哪种类型的故障。然后是数据的准备过程,包括历史数据的搜集以及数据清洗和标注。接着进行特征工程,选择与故障敏感的相关特征。根据诊断需求和数据的特性选取合适的智能算法进行模型训练^[7]。模型的性能要经由测试集来检验并加以改进,超参数调节、防止过拟合之类的事项也要包含在内。最终把训练好的模型整合进诊断系统当中,做到在线自动诊断,模型的表现必须得一直被考察并更新,才能跟上设备状态的变化。

4 技术应用与趋势展望

4.1 状态监测系统实施

状态监测系统的工程实施属于一项系统性工程,前期要展开细致的需求分析,弄清监测目的以及性能指标。根据水轮机的具体型号、运行工况与常见故障模式,制定专门的监测方案。在现场实施阶段需要完成传感器的安装、电缆布设、采集站部署等工序,确保施工质量不影响机组安全运行。系统调试的时候,要检验各个通道的数据是否准确又可靠,设定恰当的报警数值范围。系统投入运行之后,还要对运维人员展开培训,并制订标准的操作规程。

4.2 诊断系统集成方法

故障诊断系统要同状态监测系统紧密融合起来,变成“监测-诊断-决策”这个闭环的一部分,这种融合存在松散耦合和紧密耦合两种情况。松散耦合时,诊断系统单独作为一个模块,由监测数据库读入数据,诊断后再写回数据库。紧耦合侧重数据流和功能的整合,诊断功能深入监测平台,做到即时诊断警报联动^[8]。系统集成也要考虑到跟电厂现存的电脑监视体系、维修管理系统的接口,做到信息互通有无、业务流程贯通,从而提升整个运维效率。

4.3 技术挑战与发展方向

当前水轮机状态监测及故障诊断技术仍存在有难点,复杂工况下信号的信噪比较小,提取特征较为困难。故障样本少,重大故障的样本更是少得可怜,这就使数据驱动模型的水平受到限制。诊断模型具有良好的普遍性和容易理解性,但是还需要提高^[9]。未来技术发展会更多注重多源信息融合,机理模型与数据驱动并行发展数字孪生,实现更为准确的状态预测和故障溯源。边缘计算+云计算的架构将成为主流,边缘侧做实时告警,云平台做深度分析和模型训练。人工智能技术的进一步应用会持续促使故障诊断朝智能化、自动化方向前进。

4.4 智能运维系统发展路径

智能运维系统是水轮机状态监测及故障诊断技术发展的高级形式,它的发展途径将从单机监测转向电站群集中监控,从事后诊断转变为预测性维护^[10]。系统架构会趋向于“云一边一端”并行发展,“云”即云端平台进行大数据分析及模型优化,“边”是边缘计算节点进行本地的实时监测、预警等,“端”则是终端感知层进行数据采集。这种架构既有实时性,又有很强的计算能力。未来发展将把数字孪生技术融入其中,创建起同物理机组一同更新的虚拟模型,依靠机理模型和数据驱动来达成故障预估,寿命判定以及维修决定辅助功能。智能运维系统会形成监测、诊断、预测和决策的完整技术体系,从而进一步提升水电站的运维水平。

5 结语

水轮机状态监测与故障诊断技术为水电机组安全、稳定、

高效运行提供重要支撑。本文系统梳理了从状态监测系统构建到故障特征机理及智能诊断方法和应用集成的技术体系。研究显示,一个有效的智能运维系统离不开精确的监测数据,深厚的故障机理认知,前沿的诊断算法及靠谱的系统整合。未来,传感技术,信号处理和人工智能持续改进的时候,水轮机故障诊断会朝着越发精确,聪明,前卫的方向前进,为实现电站的预测性维护和智能化管理奠定坚实基础。

[参考文献]

- [1]郑祥豪.可逆式水泵水轮机运行状态监测与智能故障诊断研究[D].华北电力大学(北京),2022.
- [2]王淋,林晨旭.水电站水轮机组状态监测与故障诊断技术研析[J].电力设备管理,2025,(14):192-194.
- [3]赵呈跃.大型水电站水轮机组状态监测与故障诊断技术研究[J].水上安全,2025,(05):79-81.
- [4]江斌.浅析水电机组状态监测与故障诊断技术[J].电子世界,2018,(17):170+172.
- [5]李美威.大型水轮机组推力轴承润滑状态监测与故障诊断研究[D].华南理工大学,2020.
- [6]齐兴鹏.基于云平台的水轮机调速系统故障诊断专家系统[D].华中科技大学,2023.
- [7]吴小龙.水轮机调速器在线监测与智能诊断平台的设计与实现[D].华中科技大学,2023.
- [8]李龙.水轮机组在线监测与故障诊断系统的研究与开发[D].兰州理工大学,2022.
- [9]张毅.云平台上水轮机接力器监测及故障诊断系统的研究[D].山东科技大学,2019.
- [10]杨伟,张青,黄渝凯,等.老小水轮机组数字化系统建设探索与应用[J].四川水利,2024,45(01):174-177.

作者简介:

段旭(1997--),男,汉族,云南富源人,大学本科,助理工程师,水力发电运行。