

航电枢纽水轮机关键部件磨损特性及寿命预测研究

徐于涛

江西省港航建设投资集团有限公司航电检修中心 江西 南昌 330000

摘要: 随着航电枢纽建设规模扩大,水轮机关键部件磨损问题愈发突出。本文围绕航电枢纽水轮机关键部件展开研究。先概述航电枢纽常见水轮机类型、关键部件组成及其在枢纽中的重要作用。深入剖析转轮叶片、导水机构、主轴与轴承磨损及尾水管及过流部件磨损特性,明确不同类型水轮机部件磨损的规律与特点。详细阐述基于物理模型、磨损机理、数据驱动、混合方法以及多物理场耦合等多种寿命预测方法。研究旨在精准把握部件磨损情况,科学预测其寿命,为航电枢纽水轮机的合理维护、高效运行及安全稳定提供有力理论支撑与技术保障。

关键词: 航电枢纽;水轮机;关键部件;磨损特性;寿命预测

引言:航电枢纽兼具航运与发电功能,对区域经济和能源格局意义重大。水轮机作为其发电核心设备,性能优劣直接关乎发电质量与稳定性。在长期运行中,水轮机关键部件因受水流冲击、泥沙磨损等因素影响,不可避免出现磨损,这不仅降低发电效率,还可能引发故障,威胁枢纽安全。因此,深入研究航电枢纽水轮机关键部件磨损特性,构建科学合理的寿命预测体系,成为保障航电枢纽可靠运行、降低运维成本、提升经济效益的关键所在。

1 航电枢纽水轮机类型及关键部件概述

1.1 航电枢纽常见水轮机类型

航电枢纽常见水轮机主要有混流式、轴流式、灯泡贯流式等类型。混流式水轮机适用水头范围30-700m,水流从径向流入、轴向流出,结构紧凑,运行稳定,高效区宽广;轴流式水轮机适用水头范围3-80m,水流沿轴向通过转轮,可通过调节叶片角度适应不同工况,适合水头、流量变化大的场景,高效区广;灯泡贯流式水轮机是近年来开发低水头、大流量水力资源的一种常见水轮机,适用水头范围1-25m,主轴为卧式结构,由于水流在流道内上沿轴向运动基本不拐弯,因此水轮机的水力损失较小,它的转轮与轴流式水轮机相似,叶片亦能随工况变化而转动,效率较高。

1.2 水轮机关键部件组成

水轮机关键部件按功能可分为多个系统。埋入部件包括管型座和尾水管等,管型座是机组的主要支撑部件,定子和导水机构分别安装在其上、下游两端法兰上面。尾水管则回收转轮出口水流动能并降低尾水水位。导水机构由导叶、控制环和传动机构组成,通过调节导叶开度控制进入转轮的水量和方向。转动部件中,转轮是能量转换核心,其叶片形状和数量直接影响水力性

能;主轴连接转轮与发电机,传递扭矩;轴承支撑主轴并减少摩擦。此外,还包括密封装置防止水流泄漏,以及调速器、油压装置等辅助系统,确保水轮机稳定运行。

1.3 关键部件在航电枢纽中的作用

水轮机关键部件在航电枢纽中承担着能量转换、水流调控和设备支撑等核心功能。转轮通过叶片与水流的相互作用,将水能高效转化为机械能,驱动发电机发电,其设计优化直接影响发电效率和稳定性。导水机构通过调节导叶开度,精确控制进入转轮的水量和方向,使水轮机在不同工况下保持高效运行,同时避免水流紊乱造成的能量损失。主轴与轴承系统可靠传递扭矩,并承担运行中的径向和轴向力,确保转动部分平稳旋转。埋入部件如蜗壳和尾水管则优化水流路径,减少水力损失,提升整体能量转换效率,为航电枢纽的稳定发电提供基础保障^[1]。

2 航电枢纽水轮机关键部件磨损特性分析

2.1 转轮叶片磨损特性

(1)从磨损机理来看,航电枢纽水轮机转轮叶片处于含沙水流环境中,泥沙颗粒随水流高速冲击叶片表面。叶片工作面在进水边区域,因水流方向改变,泥沙以较大角度撞击,产生微切削作用,使材料表面逐渐被剥离,形成密集的微小凹坑,导致叶片厚度减小,影响水力效率。(2)磨损分布存在显著差异。叶片工作面磨损程度通常大于背面,进水边磨损最为严重,这是由于此处水流速度高、泥沙浓度大且撞击角度大。而叶片背面因水流分离产生涡旋,泥沙滞留形成局部冲蚀沟槽,尤其在靠近轮毂区域,因水流旋转速度变化,磨损呈现不规则分布。(3)运行工况对磨损影响明显。当机组负荷变化时,水流速度和方向改变,导致泥沙颗粒撞击叶片的能量和频率变化。高负荷工况下,水流速度大,泥沙冲击

力强,磨损速率加快;低负荷工况时,水流速度降低,但泥沙可能因水流紊乱而在叶片表面停留时间延长,同样加剧磨损。此外,频繁启停机组会使叶片承受交变应力,加速材料疲劳,进一步促进磨损发展,缩短叶片使用寿命,增加运维成本。

2.2 导水机构磨损特性

(1)从磨损成因角度分析,航电枢纽水轮机导水机构处于含沙水流通道中,泥沙颗粒随水流运动,与导水机构各部件表面发生相互作用。当水流携带泥沙经过导叶时,泥沙颗粒以一定速度撞击导叶表面,对材料产生微切削和冲击破坏,这是导致导水机构磨损的主要因素。而且,水流在导水机构内的流动状态复杂,存在漩涡和湍流,使得泥沙分布不均匀,进一步加剧了局部磨损。(2)导水机构不同部件的磨损程度存在差异。导叶是磨损最为严重的部件之一,其头部因直接承受水流和泥沙的冲击,磨损速率较快,常出现材料剥落现象;导叶的出水边因水流分离产生涡旋,泥沙在此区域滞留,形成冲蚀沟槽。而导叶轴套的磨损则主要表现为与导叶轴颈之间的摩擦磨损,泥沙颗粒进入间隙后,会加剧这种磨损,导致轴套间隙增大,影响导叶的灵活转动。(3)运行工况对导水机构磨损影响显著。当机组负荷变化时,水流速度和含沙量会随之改变,高负荷时水流速度快、含沙量大,磨损加剧;低负荷时虽水流速度降低,但泥沙可能因水流紊乱而更易进入导叶间隙,同样会加重磨损。此外,频繁的启停操作也会使导水机构承受交变应力,加速材料疲劳,促进磨损发展。

2.3 主轴与轴承系统磨损特性

(1)从磨损机制来看,主轴与轴承系统在航电枢纽水轮机运行中,长期处于复杂的力学环境。主轴高速旋转时,与轴承内圈表面产生相对滑动摩擦,同时,水流中的泥沙颗粒可能侵入两者接触面。这些微小颗粒如同磨料,在相对运动中不断切削主轴和轴承表面材料,造成磨粒磨损。此外,润滑油在高温、高压及含沙环境下性能下降,无法形成有效的润滑油膜,导致金属直接接触,引发粘着磨损,使接触面材料转移、粘附。(2)磨损部位和程度存在差异。主轴轴颈处因承受较大载荷和频繁的相对运动,磨损较为明显,常出现轴颈直径减小、表面粗糙度增大等现象,影响主轴的旋转精度。轴承内圈与主轴接触区域,由于长期承受交变应力,容易出现疲劳磨损,产生微裂纹并逐步扩展,最终导致表面剥落。而轴承外圈与轴承座配合处,虽磨损相对较轻,但长期运行后也可能因松动产生微动磨损。(3)运行工况对磨损影响较大。机组负荷变化时,主轴所承载荷随之改

变,高负荷下磨损加剧;频繁启停会使主轴与轴承承受交变应力,加速疲劳磨损。同时,含沙量高的水流会使更多泥沙侵入系统,显著增加磨粒磨损速率,缩短主轴与轴承系统的使用寿命,增加设备故障风险和维护成本^[2]。

2.4 尾水管及过流部件磨损特性

(1)从磨损成因分析,航电枢纽水轮机尾水管及过流部件处于含沙水流环境中。水流携带泥沙高速流动,在尾水管内形成复杂的流场,存在漩涡、回流等区域。泥沙颗粒在这些不稳定流场中,会以不同角度和速度撞击部件表面,对材料产生强烈的切削和冲击作用,引发磨损。而且,水流中的泥沙成分复杂,硬度较高的颗粒对部件的破坏作用更为显著。(2)不同部位的磨损程度和特征各异。尾水管进口处,由于水流速度较高且方向改变剧烈,泥沙颗粒集中撞击,磨损较为严重,常出现局部的凹坑和沟槽。尾水管侧壁因水流旋转产生的离心力,使泥沙向外侧聚集,导致侧壁磨损呈环形分布。而尾水管出口附近,水流速度降低,泥沙颗粒沉降,磨损相对较轻,但长期运行后仍会出现表面粗糙度增加的情况。过流部件中的固定导叶,其头部因直接承受水流冲击,磨损速率较快,会出现材料剥落现象。(3)运行工况对磨损影响明显。机组高负荷运行时,水流速度和含沙量增大,磨损加剧;低负荷时,水流紊乱,泥沙易在部件表面停留,同样会加重磨损。此外,频繁的启停操作会使尾水管及过流部件承受交变应力,加速材料疲劳,促进磨损发展,影响设备的安全稳定运行和使用寿命。

3 航电枢纽水轮机关键部件寿命预测方法

3.1 基于物理模型的寿命预测方法

基于物理模型的寿命预测方法通过构建描述水轮机关键部件退化机理的数学模型,结合实测数据实现寿命预测。该方法以失效物理模型为核心,例如针对转轮叶片的疲劳失效,可引入Paris-Erdogan裂纹扩展模型,将应力强度因子范围与裂纹扩展速率关联,通过实时监测叶片应力分布和裂纹尺寸,预测剩余寿命。对于导水机构等部件,可结合材料蠕变模型,分析高温高压环境下材料的蠕变损伤累积过程。该方法优势在于利用退化机理和工程经验,即使数据量有限时仍能保持较高精度。例如,某航电枢纽通过建立转轮叶片的流固耦合模型,模拟含沙水流对叶片的冲蚀作用,结合材料磨损率公式,成功预测了叶片在特定工况下的磨损寿命。然而,其局限性在于对复杂工况的适应性较弱,需持续优化模型参数以提升预测可靠性。

3.2 基于磨损机理的寿命预测方法

基于磨损机理的寿命预测方法聚焦于水轮机关键部

件在含沙水流等复杂工况下的磨损过程,通过构建磨损量与运行参数的定量关系实现寿命评估。该方法以磨损理论为基础,针对转轮叶片、导水机构等部件,分析沙粒冲击、空蚀、滑动摩擦等复合磨损机制,建立如Archard磨损模型或修正的冲蚀磨损模型,将沙粒浓度、流速、材料硬度等参数与磨损率关联。例如,通过实测不同工况下的沙粒冲击角和速度分布,结合材料磨损系数,可计算部件单位时间的体积损失量,进而推导剩余寿命。其优势在于直接反映物理磨损过程,预测结果具有明确工程意义。

3.3 基于数据驱动的使用寿命预测方法

基于数据驱动的使用寿命预测方法依托机器学习与大数据分析技术,通过挖掘历史运行数据中的潜在规律实现部件寿命预测。该方法无需依赖精确的物理模型,而是利用传感器采集的振动、温度、压力、磨损量等多源数据,构建如长短期记忆网络(LSTM)、支持向量机(SVM)或随机森林等预测模型。例如,通过分析转轮叶片在不同工况下的振动频谱与磨损趋势的关联性,模型可自动学习数据特征并预测未来磨损发展路径。其优势在于适应复杂非线性关系,尤其适合航电枢纽多变量耦合、工况频繁变化的场景。但该方法依赖高质量数据,需解决数据缺失、噪声干扰等问题,且模型可解释性较弱。实际应用中,常采用集成学习或迁移学习技术提升泛化能力,并结合领域知识优化特征选择,以增强对极端工况下部件寿命的预测可靠性。

3.4 基于混合方法的使用寿命预测方法

基于混合方法的使用寿命预测方法整合物理模型与数据驱动技术的优势,通过多尺度融合提升预测精度与鲁棒性。该方法通常结合物理机理模型(如磨损理论、疲劳裂纹扩展模型)与机器学习算法,利用物理模型提供退化过程的先验知识,再通过数据驱动模型(如神经网络、贝叶斯优化)修正参数偏差并捕捉复杂非线性关系。例如,针对水轮机转轮叶片,可先基于Archard磨损模型计算理论磨损量,再利用LSTM网络学习实际运行中振动、温度等数据对磨损的修正系数,实现动态寿命预测。其优势在于兼顾可解释性与适应性,尤其适合航电

枢纽工况多变、数据不完备的场景。但混合方法需解决模型耦合与计算效率的平衡问题,且依赖高质量的多源数据融合。

3.5 多物理场耦合的使用寿命预测方法

多物理场耦合的使用寿命预测方法通过综合考虑水轮机关键部件在流场、应力场、温度场及磨损场等多场作用下的交互影响,构建更贴近实际工况的退化模型。该方法基于流固耦合、热力耦合等理论,分析高速水流冲击、机械振动、温度梯度及沙粒磨损等复合作用对部件材料性能的协同损伤机制。例如,转轮叶片在含沙水流中同时承受流体动压力、离心应力与磨粒冲蚀,其疲劳寿命需通过流场-应力场-磨损场耦合模型综合评估;导水机构则需考虑热应力与空蚀磨损的联合作用。其优势在于能揭示多因素耦合下的非线性退化规律,提升预测精度,尤其适用于航电枢纽复杂运行环境。但该方法计算复杂度高,需依赖高性能计算与多物理场仿真平台^[3]。

结束语

航电枢纽水轮机关键部件的磨损特性研究,让我们深入了解了不同类型水轮机关键部件在复杂工况下的磨损机理与表现形式,明确了影响磨损的关键因素。而对其寿命预测方法的探索,从物理模型到数据驱动,再到多方法融合与多物理场耦合,为精准预测部件寿命提供了多元途径。这些研究成果有助于提前规划维护策略,降低设备故障风险,保障航电枢纽稳定发电与航运畅通。后续将持续跟进技术发展,不断优化研究方法,提升对关键部件磨损与寿命预测的准确性,为航电枢纽长期可靠运行筑牢根基。

参加文献

- [1]杨伟.基于大数据的水轮机关键部件磨损预测模型研究[J].水力发电学报,2022(4):96-102.
- [2]王丽.水轮机磨损状态监测与智能检修周期优化[J].中国电机工程学报,2021(11):155-160.
- [3]张磊,陈小明,吴燕明,周夏凉,赵坚,伏利,毛鹏展,刘伟.水轮机过流部件抗磨蚀涂层技术研究进展[J].材料导报,2021,31(17):75-83.