

# 水利枢纽辅机系统常见故障检修及技术改造实践

左明明

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.v10i4.6933

**[摘要]** 水利枢纽作为国家水网体系的核心节点,其安全稳定运行直接关系到防洪安全、发电效益及水资源调配效率。辅机系统作为水电站的“血管”与“神经”,主要由液压油泵、工业水泵及各类控制阀门组成,承担着调速、润滑、冷却、压油及启闭等关键任务。然而,受长期高负荷运行、介质腐蚀、振动冲击及环境恶劣等因素影响,辅机系统极易发生机械磨损、电气故障及控制失灵等问题,成为制约枢纽整体可靠性的薄弱环节。本文系统综述了水利枢纽油泵、水泵及阀门系统的常见故障类型与机理,深入剖析了基于状态监测的故障诊断技术;详细阐述了针对老旧设备的系统性技术改造方案,包括变频驱动应用、液压系统智能化升级及阀门执行机构的现代化改造。

**[关键词]** 水利枢纽; 辅机系统; 油泵; 水泵; 阀门; 故障诊断; 技术改造; 状态监测; 智能运维  
**中图分类号:** TV **文献标识码:** A

## Practical Experience in Fault Diagnosis and Technical Upgrades for Auxiliary Machinery Systems in Water Conservancy Projects

Mingming Zuo

Uluwati Water Conservancy Hub Management Center, Tarim River Basin, Xinjiang Uygur Autonomous Region

**[Abstract]** As the core nodes of the national water network system, the safe and stable operation of water conservancy hubs directly impacts flood control safety, power generation efficiency, and water resource allocation effectiveness. The auxiliary machinery system, serving as the "blood vessels" and "nerves" of hydropower stations, primarily consists of hydraulic oil pumps, industrial water pumps, and various control valves, undertaking critical functions such as speed regulation, lubrication, cooling, oil pressurization, and valve operation. However, due to prolonged high-load operation, medium corrosion, vibration impacts, and harsh environmental conditions, the auxiliary system is highly susceptible to mechanical wear, electrical failures, and control malfunctions, becoming a critical vulnerability that compromises the overall reliability of the hub. This paper provides a systematic review of common fault types and mechanisms in oil pump, water pump, and valve systems at water conservancy hubs; conducts an in-depth analysis of condition-based monitoring-driven fault diagnosis technologies; and details comprehensive technical retrofit solutions for aging equipment, including frequency conversion drive applications, intelligent upgrades of hydraulic systems, and modernization of valve actuators.

**[Key words]** Water conservancy hub; Auxiliary machinery system; Oil pump; Water pump; Valve; Fault diagnosis; Technical renovation; Condition monitoring; Intelligent operation and maintenance

### 引言

水利枢纽工程是调控水资源、抵御水旱灾害的重要基础设施,其核心在于水轮发电机组的稳定运行。然而,在大型水电机组的运行体系中,辅机系统虽不直接参与能量转换,却发挥着至关重要的辅助保障作用。液压油泵系统负责为调速器提供压力油以控制导叶开度,为制动系统提供动力,并为轴承提供润滑;工业水泵系统则承担着机组冷却、消防供水及排水任务;而各类

阀门(如球阀、蝶阀、闸阀及止回阀)则是水流通断与调节的关键执行机构。这三类设备构成了辅机系统的主体,其工作环境的复杂性决定了其故障的高发性。一旦油泵失效导致调速系统失压,可能引发机组飞车事故;水泵故障可能导致机组过热烧毁;阀门卡涩或泄漏则可能造成水淹厂房或水锤破坏。长期以来,许多老旧水电站辅机系统存在设计标准低、设备老化严重、自动化程度不高及检修手段落后等问题,导致非计划停机频发,严

重影响电站的经济效益与社会效益。随着“智慧水利”建设的推进,如何有效识别并消除辅机系统隐患,通过科学检修与技术看新实现设备状态的主动管控,已成为当前水利行业亟待解决的重大课题。本文旨在全面梳理辅机系统的故障规律,总结检修经验,探讨技术改造的新路径,以期构建安全、高效、智能的水利枢纽运维体系提供参考。

### 1 水利枢纽辅机系统常见故障类型与成因分析

辅机系统的故障形式多样,通常表现为机械部件损坏、流体性能下降及控制系统失灵。深入分析其故障机理,是制定有效检修策略的前提。

#### 1.1 液压油泵系统的典型故障与机理

液压油泵作为辅机系统的动力源,犹如整个系统的“心脏”,其稳定运行对于整个液压回路而言至关重要。一旦液压油泵出现故障,就如同心脏供血出现问题,会直接影响整个液压回路的稳定性,进而影响整个设备或系统的正常运转。

常见的液压油泵故障类型多样。泵体磨损是较为常见且影响较大的故障之一。当液压油中混入杂质,或者油品因长期使用而氧化变质时,泵内的摩擦副,如柱塞与缸孔、齿轮啮合面等,就会遭受磨粒磨损或粘着磨损。这种磨损会使泵的容积效率大幅下降,导致系统压力建立缓慢或者不稳定,设备运行时会出现动力不足、动作迟缓等现象<sup>[1]</sup>。

吸油不畅也是不容忽视的故障。吸油管路密封不良,空气就会趁机混入油液,或者滤油器被杂质堵塞,都会引发气蚀现象。气蚀不仅会产生高频噪声,干扰工作环境,还会加速零件的剥落,进一步损坏油泵,缩短其使用寿命。

异响振动同样会给液压油泵带来严重危害。电机与泵的联轴器对中不良,或者基础松动,会使油泵在运行过程中产生周期性振动。这种振动会导致轴承过早疲劳失效,影响油泵的精度和性能。

在极端工况下,若溢流阀设定压力过高或者动作卡滞,系统压力会急剧升高,甚至引发系统超压爆管,造成严重的安全事故和经济损失。

这些故障往往具有突发性强、隐蔽性高的特点,很多时候在初期难以察觉。若不能及时发现并处理,极易引发连锁反应,导致调速系统拒动或误动,使整个设备或系统陷入瘫痪状态,影响生产的正常进行。

#### 1.2 工业水泵系统的运行缺陷与失效模式

水泵系统主要承担冷却与消防功能,其故障多集中在叶轮汽蚀、轴承过热、轴封泄漏及电机过载等方面。汽蚀是水泵最常见且危害最大的故障,当泵入口压力低于液体饱和蒸汽压时,气泡破裂产生的微射流会冲刷叶轮表面,导致材料剥落和性能曲线下降,严重时造成叶轮断裂。轴承过热通常源于润滑脂干涸、油脂污染或安装间隙不当,长期高温运行会加速轴承保持架变形甚至抱死。轴封泄漏不仅造成水资源浪费,还可能引发电机进水短路事故。此外,在频繁启停或电网电压波动较大的情况下,电机易出现绝缘老化、匝间短路或转子断条,导致启动困难或运

行电流异常。对于长距离输水管道,水锤效应引发的压力冲击也是导致管道破裂和阀门损坏的重要原因<sup>[2]</sup>。

#### 1.3 控制阀门的卡涩、泄漏与执行机构故障

阀门作为流路控制的关键部件,其可靠性直接关系到机组的安全启停。主要故障形式包括阀板卡涩、密封面泄漏、阀杆锈蚀及电动/液动执行机构失灵。在长期静置或频繁操作后,阀板与阀座之间易因异物沉积、结垢或腐蚀产物堆积而发生卡涩,导致阀门无法全开或全关,甚至在水锤作用下损坏密封面。密封面泄漏分为内漏和外漏,内漏导致介质流失,外漏则污染环境并可能引发火灾。特别是在高压环境下,阀杆填料函处的密封件易老化失效,造成高压水喷射。执行机构方面,电动机的减速箱齿轮磨损、限位开关失灵、力矩保护误动作以及液压推杆漏油等问题较为普遍,导致阀门动作不到位或响应滞后,严重影响机组的调节性能和安全保护功能。

### 2 基于状态监测的故障诊断与预防性检修策略

传统的事后维修模式已无法满足现代水利枢纽对高可靠性的要求,建立基于状态监测的预防性检修体系是实现精准运维的关键。

#### 2.1 多源信号融合的智能诊断技术应用

针对辅机系统复杂的故障特征,单一监测手段往往难以准确判断。现代诊断技术强调多源信号的融合分析,即同时采集振动、温度、压力、流量及声音等多维数据。利用高频振动传感器捕捉早期轴承损伤和齿轮啮合异常,通过频谱分析识别故障频率成分;采用红外热成像仪实时监测电机绕组、轴承座及液压油箱的温度分布,及时发现过热隐患;引入在线油液分析系统,监测液压油中的金属磨粒含量、粘度变化及水分指标,评估泵体磨损程度。结合大数据分析与人工智能算法(如支持向量机、神经网络),可以构建故障特征库,实现对故障类型的自动分类与严重程度分级。例如,通过分析液压泵振动信号的峭度值变化趋势,可提前数周预测柱塞磨损故障,从而将被动抢修转变为主动干预。

#### 2.2 全生命周期管理与预测性维护体系构建

预防性检修不仅仅是定期更换备件,更应贯穿设备的全生命周期管理。通过建立设备电子档案,记录从安装调试、历次检修到日常运行的所有数据,形成完整的设备健康画像。利用数字孪生技术,在虚拟空间中构建辅机系统的仿真模型,模拟不同工况下的运行状态与劣化过程,预测剩余使用寿命(RUL)。在此基础上,制定动态检修计划:对于健康状态良好的设备,适当延长巡检周期;对于存在轻微缺陷的设备,安排计划性消缺;对于高风险设备,立即停机检修。这种基于状态的维护(CBM)模式,能够显著减少不必要的停机时间,降低备件库存成本,并最大限度地避免灾难性事故的发生。同时,建立检修质量追溯机制,确保每一次检修作业都有据可查,持续提升运维团队的技术水平。

### 3 辅机系统关键技术改造与实践应用

针对老旧设备存在的固有缺陷,实施针对性的技术改造是提升系统性能、延长服役寿命的有效途径。

### 3.1 液压系统与水泵系统的变频节能及智能化升级

针对传统定速运行能耗高、调节精度差的问题,广泛采用变频调速技术进行改造。在冷却水泵系统中,安装变频器根据机组负荷和油温变化自动调节水泵转速,实现按需供冷,节电率可达20%~30%,同时消除了软启动冲击,延长了设备寿命。在液压系统中,引入变量泵与恒压控制回路,替代传统的定量泵加溢流阀模式,大幅降低系统发热与能量损失<sup>[3]</sup>。此外,对老旧液压站进行智能化改造,加装PLC控制器与触摸屏人机界面,实现压力、流量、温度的自动监控与报警,并具备远程通讯功能,可将数据上传至集控中心。对于关键阀门执行机构,将传统的电磁换向阀升级为比例伺服阀,配合高精度位移传感器,实现阀门开度的无级调节与快速响应,显著提升机组的调频调压性能。

### 3.2 阀门执行机构与密封结构的优化改造

针对阀门卡涩与泄漏难题,重点实施执行机构与密封结构的双重优化。一方面,将老式电动头更换为智能型电动执行机构,内置自诊断模块、多重限位保护及力矩自适应功能,具备现场总线通讯能力,可实现远程精确控制与状态反馈。另一方面,对阀体密封结构进行革新,采用硬质合金堆焊或陶瓷涂层技术增强密封面耐磨性,改用柔性石墨或聚四氟乙烯复合材料制作阀杆填料,提高耐腐蚀与自润滑性能。对于大口径球阀与蝶阀,增设液压缓冲装置与快关逻辑,有效抑制水锤压力冲击。在部分高磨损区域,引入自润滑轴承与迷宫式密封结构,减少对外部润滑的依赖,降低维护频次。通过这些改造,阀门的开关时间缩短50%以上,泄漏率降至零,卡涩故障基本杜绝。

## 4 典型案例与改造成效分析

以某大型混合式抽水蓄能电站为例,该电站辅机系统投运二十余年,长期面临油泵振动大、水泵汽蚀严重及阀门卡涩频发等问题。通过实施全面的技改项目,取得了显著成效。

### 4.1 改造实施过程与关键技术措施

该项目首先对全厂液压系统进行深度清洗与滤芯升级,更换了高性能轴向柱塞变量泵,并加装了在线油质监测装置。针对冷却水泵,实施了叶轮水力模型优化与变频改造,解决了长期存在的汽蚀噪音问题。在阀门方面,对所有主进水阀与尾水阀的执行机构进行了国产化智能替换,并重新设计了阀座密封结构。施工过程中,严格遵循标准化作业程序,采用激光对中仪校正泵轴同心度,利用超声波探伤检测关键焊缝质量,确保了改造工程的施工质量<sup>[4]</sup>。

### 4.2 运行效果评估与经济效益分析

改造完成后,经为期一年的试运行验证,各项指标均达到预期目标。油泵系统振动值由原来的8mm/s降至3mm/s以内,油温平均下降10℃,年节油量达20吨;水泵系统不再发生汽蚀现象,噪音降低15分贝,年节电量约15万度;阀门操作成功率提升至100%,彻底消除了卡涩隐患。从经济效益看,虽然初期投入较大,但通过减少非计划停机损失、降低备件消耗及节约电费,预计3年内即可收回改造成本。更重要的是,电站的整体供电可靠性大幅提升,为区域电网的安全稳定运行提供了坚实保障<sup>[5]</sup>。

## 5 结语

水利枢纽辅机系统作为保障机组安全运行的“生命线”,其技术水平直接关系到电站的生存与发展。面对日益严峻的设备老化与运行挑战,单纯依靠传统的定期检修已难以满足需求。本文通过对油泵、水泵及阀门系统的故障机理分析,揭示了多源故障的耦合特征;提出了基于状态监测与大数据分析的预防性检修策略,为实现精准运维奠定了理论基础;并结合工程实践,论证了变频节能、智能化升级及结构优化等技术改造措施的显著成效。未来,随着物联网、云计算及人工智能技术的深度融合,水利枢纽辅机系统将向“无人值守、少人巡视、智能诊断、自主决策”的方向加速演进。我们应持续加强新技术的研发与应用,完善标准规范体系,培养高素质运维人才,推动水利装备制造制造业的转型升级,为建设智慧水利、保障国家水安全贡献更大力量。

## [参考文献]

- [1]尚海龙.PCCP管道工作性态的高性能仿真研究[J].中国水利水电科学研究院学报(中英文),2023,21(4):384-395+402.
- [2]冯宛露.泵站数据平台和机组振动故障分析模型研究与开发[D].扬州大学,2023.
- [3]陈肇南.平圩电厂高压电机调速技术的研究[D].安徽理工大学,2021.
- [4]盖世聪.基于增强现实的灌浆协同决策研究[D].天津大学,2021.
- [5]全风云,张坤.白莲河抽水蓄能电站闸门控制电源系统改造[C]//中国水力发电工程学会电网调峰与抽水蓄能专业委员会.抽水蓄能电站工程建设文集2017.湖北白莲河抽水蓄能有限公司;国网新能源控股有限公司,2017:429-433.

## 作者简介:

左明明(1990--),男,汉族,湖南省岳阳市湘阴县人,大学本科,当前职称:水利工程师,研究方向:水电站的防腐防控制方向。