

复杂工况下大型水利泵站机组安全稳定运行技术探析

梁怀伟

临泉县城防管理所, 安徽 临泉 236400

[摘要]大型水利泵站作为农田灌溉、水资源调配、防洪排涝的关键性基础设施及运行状态,对区域水安全、经济社会的可持续发展有着直接的影响。在复杂多变的工况条件下,例如负荷出现大幅度的剧烈波动、极端的水文状况、恶劣环境的侵蚀等情况容易导致机组出现一系列问题,例如气蚀磨损现象比较严重,振动幅度超出标准范围等,对机组的安全稳定运行造成严重的影响,基于此我们首先对复杂工况下,对大型水利泵站机组造成的影响,并对保障机组安全稳定运行的关键技术进行深入的探讨,以此确保大型水利泵站机组在复杂工况环境下依旧能够实现安全稳定的运行,以供参考。

[关键词]复杂工况;大型水利泵站;机组运行;安全稳定;监测预警;智能化运维

DOI: 10.33142/hst.v9i4.19598

中图分类号: TV734.1

文献标识码: A

Exploration on Safe and Stable Operation Technology for Large Scale Water Conservancy Pumping Station Units under Complex Operating Conditions

LIANG Huaiwei

Linquan County Defense Management Office, Linquan, Anhui, 236400, China

Abstract: Large scale water conservancy pumping stations, as key infrastructure and operational status for farmland irrigation, water resource allocation, flood control and drainage, have a direct impact on regional water security and sustainable economic and social development. Under complex and changing working conditions, such as significant fluctuations in load, extreme hydrological conditions, and erosion from harsh environments, it is easy for the unit to encounter a series of problems, such as severe cavitation and wear, and vibration amplitudes exceeding the standard range, which have a serious impact on the safe and stable operation of the unit. Based on this, we first investigate the impact of complex working conditions on large water conservancy pump station units, and conduct in-depth discussions on key technologies to ensure the safe and stable operation of the unit, in order to ensure that large water conservancy station units can still achieve safe and stable operation in complex working conditions, for reference.

Keywords: complex working conditions; large scale water conservancy pumping station; unit operation; safe and stable; monitoring and early warning; intelligent operations and maintenance

引言

伴随着我国水利工程建设进程的持续加快,大型水利泵站已经成为保障国家用水安全、推动经济可持续发展的关键基础设施。目前我国现有的各类泵站覆盖多个领域,然而因大型水利泵站机组具有工况变化多样,结构复杂等特点,机械部件、复杂的管道系统、电气元件之间相互关联协同工作,任何一个环节出现问题,均会对整个机组的正常运行造成严重的影响。受设备状况、自然环境等多重因素的影响,大型水力泵机组常处于复杂工况环境下。极端的气候变化、高温环境、负荷波动频繁等均会对机组设备造成不同程度的损害,易引发水泵汽蚀、轴承磨损等安全隐患,不仅降低大型水力泵机组的运行效率,而且会增

加能源消耗,导致机组停机维修,造成经济损失以及社会影响。近年来,城市化进程的加速、极端天气事件频发、工业用水需求不断增长,均加剧了大型水力泵机组运行的复杂性。因此,对机组安全稳定运行的要求提出了更为严格的标准。因此为了确保泵站机组能够稳定运行提供充足的水源,保障工业生产正常运行,本文将深入探析复杂工况下机组安全稳定运行技术。

1 大型水利泵站复杂工况类型及对机组运行的影响

大型水利泵站机组的复杂工况是指运行环境恶劣,偏离设定额定工况,外部干扰因素多,参数波动剧烈的各类运行状态。结合泵站运行实际及相关标准规范,主要分为

水文极端工况、负荷波动工况、环境恶劣工况、设备衰减工况。复杂工况主要通过多途径作用于泵站机组，从而对机组的运行造成影响，导致机组运行异常，甚至发生停机，影响机制具有多源性、连锁性特点。

对于水力系统，当进水的水位骤变时，水泵进口的流速分布也会变得不均匀，容易产生水力冲击、漩涡的现象，进一步增加机组的振动与噪声，对机组的稳定运行造成严重的影响。在水泵运行过程中水位过低，会对水泵的过流部件造成损害，从而降低水泵的效率，缩短其使用寿命；河流中的含沙量超标也会导致部件表面磨损变薄，甚至还会发生穿孔的情况，因水质腐蚀会对水泵的密封性能造成严重的破坏，在一定程度上增加漏水漏气的风险，影响机组的稳定运行。负荷波动工况也会缩短设备的使用寿命，因负荷波动时水力系统的参数也极不稳定，容易发生水力脉动的情况，加速部件的疲劳损坏。非额定负荷运行也会使水利的损失增大，在一定程度上提高机组运行的能耗水平，加剧气蚀和振动现象，对机组的性能造成影响。

对机械系统，轴承的润滑性能会随着高温高湿环境逐渐下降，加剧磨损；管路阀门等部件在严寒冰冻的天气会发生结冰堵塞的情况，甚至会导致部件膨胀变形。粉尘污染物会导致金属部件发生锈蚀，对部件的运转灵活性造成严重的影响，在一定程度上提高机械故障的发生概率。设备衰减时，轴承、密封件、叶轮、电机转子定子等磨损，不仅影响机组的密封性能，而且会引发震动、漏泄等问题；负荷波动频繁启停致机械部件疲劳。对电气系统，负荷波动使电机电流、电压波动，加剧绕组绝缘老化，引发故障；非额定负荷运行使电机功率因数下降、发热加剧。环境恶劣和设备衰减工况，如盐雾腐蚀、高温高湿，均会降低电气设备的绝缘性能，也会导致电气设备接触不良，电子部件也可能出现磨损的问题，增加电气故障风险，影响机组运行。基于此，为了确保泵站机组可以高效稳定地运行，需要及时采取有效的监测、控制、维护技术。

2 复杂工况下大型水利泵站机组安全稳定运行关键技术

2.1 机组状态监测与故障预警技术

通过实时精准地采集机组的运行数据，提前预警故障，可以有效确保机组的安全、稳定运行。鉴于泵站机组类型多样且运行特点复杂，核心是通过监测参数，如机械参数、水力参数，电气参数，实现“早发现、早诊断、早处理”，避免故障扩大。

采用分层分布式结构，构建“传感器单元—数据采集单元—上位机单元”三级监测系统：（1）传感器单元：选

用高精度、抗干扰、适应恶劣环境的传感器，包括电涡流传感器、加速度传感器、压力传感器、温度传感器、局放电容耦合器等；（2）数据采集单元：集中组屏，具备现地监测、分析和试验功能，可实现对各类监测参数的实时采集、预处理和初步分析；（3）上位机单元：包括数据服务器、工程师工作站及网络设备，实现异常数据报警。

表 1 大型水利泵站机组核心监测参数及测点布置表

监测类别	核心监测参数	测点布置要求	监测目的
水力参数	水位、流量、扬程、压力脉动	水泵进口、出口、叶轮与导叶间、顶盖下	识别汽蚀、水力冲击、水流紊乱
机械参数	振动、摆度、轴向位移、轴承温度、噪声	电机机架、水泵顶盖、轴承座、主轴	识别部件磨损、疲劳、不平衡、卡涩
电气参数	电流、电压、功率、绝缘电阻、局部放电	电机绕组、接线端子、变电站	识别短路、绝缘老化、接触不良

基于监测数据，结合故障机理，构建多维度故障预警与诊断模型：（1）预警阈值设定：根据机组设计参数、运行经验及相关标准，分工况设定各监测参数的安全阈值、预警阈值和报警阈值，针对复杂工况动态调整阈值；（2）诊断模型构建：融合信号处理技术、数据驱动技术和专家系统，建立故障诊断模型，可识别汽蚀、轴承磨损、绝缘老化等常见故障；（3）预警响应机制：系统当监测参数超出预警阈值时自动发出声光报警，当参数超出报警阈值时，自动触发应急联动，避免故障扩大。

2.2 水力系统优化与抗干扰技术

为了应对水利系统在复杂工况下的磨损、汽蚀、紊乱等一系列问题，需要从水泵过流部件优化、水流调控技术、抗气蚀和抗磨损措施等多个关键途径采取技术措施，以确保机组的运行稳定性，延长机组的使用寿命。

在水泵过流部件优化上，结合 CFD 仿真与模型试验，优化叶轮、流道、密封结构。采用高效的叶轮模型，通过采用先进的翼型设计，优化叶片型线，可以确保叶片表面流体的分布更加均匀，在一定程度上可以有效降低汽蚀发生的可能性；流道的尺寸与形状对水流在泵内的流动状态有着直接的影响，基于池对流道进行优化，在流道内加设导流设施，以此确保水流可以更加顺畅地通过流道，进一步提高装置效率。建议优先采用机械密封、迷宫密封等新型的密封结构，以此可以避免水泵的漏水漏气现象。通过合理调控水位与流量，可以减少负荷波动对水利系统造成的影响，确保机组在复杂工况下依旧可以稳定在高效区运行。以不同工况下的水位变化为依据设置溢流坝、水位调节阀等专门的调节装置，控制进水的水位。采用变速调节

技术,可以高效实现流量的精准控制,而且可以取得比较显著的节能效果。在多台机组并联运行的过程中,以不同机组的性能特点以及符合需求为依据,对机组的组合形式进行优化改进,通过合理分配流量可以减少机组的负荷波动,保障水力系统稳定运行。

为了避免因磨损气蚀等相关因素的影响而导致设备故障,采取有效的抗气蚀和抗磨损措施尤为关键。前置诱导轮可以在水泵进口前对水流进行预加速和预旋转,以此降低汽蚀风险。对水泵的扬程、流量、转速等运行参数进行合理的调整,根据水泵的转速,通过参数的调整,使其可以避开气蚀敏感区,降低气蚀发生的可能性。同时在水泵的关键部位如导叶、叶轮等表面涂抹抗汽蚀材料,在水泵部位表面采用表面喷涂、渗碳、镀层等表面处理技术提高部件的抗磨损能力。根据水体的含沙量、流速等因素在水泵进水口前设置沉砂池,可以有效地沉淀水中的泥沙等固体颗粒,从而降低水泵的磨损程度。水流调控技术上,针对不同工况,水位调控通过设置调节装置,稳定进水水位。

2.3 电气系统安全保障技术

电气系统作为机组运行的“动力核心”,电气系统在复杂多变的工况下面临着诸多的挑战,故障频发不仅对机组的正常稳定运行造成严重的影响,而且甚至会导致安全事故隐患,增加经济损失。因此需要采取多项技术手段,全方位保障电气系统的安全稳定运行。充分围绕大型泵站机组的特点,采用双电源的供电模式,确保一路故障时另一路快速切换,避免因单电源故障导致的机组停机事故,不会对机组的运行产生影响。电气设备的选型对系统的稳定性与可靠性有着直接的影响,因此建议优先采用兼容性良好的变频器,选用高防护等级的电机设备。设置无功补偿装置可以有效解决过多无功功率导致功率因数降低、电压波动等相关问题,以此确保电气系统的稳定运行,同时有助于提高电能的使用效率,减少线路损耗。为了减少外界环境因素对设备造成的影响,优化电气设备的安装环境,设置防尘防潮,防腐蚀装置。对设备的布局进行合理的规划,以此确保设备的散热效果。在设备安装区域设置空气过滤器,除湿机等设备,保证空气的干燥与清洁。对于容易受到腐蚀的设备优先安装防腐罩、涂刷防腐材料等防护措施,以此延长设备的使用寿命。电气故障防护技术中,安装多种保护装置,出现异常自动切断电源。采用智能电气监控系统,实时监测参数、识别故障并预警处置。优化电机控制逻辑,避免频繁启停,减少电机磨损和绝缘老化,延长其使用寿命。

2.4 智能化运维与全生命周期管理技术

复杂工况下,传统机组运维模式力不从心,构建智能化运维体系迫在眉睫,以实现全生命周期管理,提升运维效率与质量。首先,构建智能化运维平台是关键。整合多类信息,平台具备实时监控、故障预警诊断、运维计划制定等多种功能,实现全流程管控;融合多源数据,借助大数据分析优化运维策略;具备远程运维功能,减少现场工作量,提高效率。其次,运用全生命周期管理技术。依据运行状态监测数据和运维记录构建模型,在运行阶段实时监测、优化参数;维护阶段制定个性化计划,采用预测性维护;报废阶段评估设备,及时更换,保障机组稳定。最后,注重运维人员技能提升。复杂工况对人员技能要求高,需开展针对性培训,重点教授故障识别处置技术和智能化设备操作方法;定期应急演练,模拟故障提升应急能力;建立考核机制,激励人员提升技能,确保运维工作规范高效开展。通过这些举措,可有效应对复杂工况下的运维难题,保障机组安全稳定运行。

3 技术应用效果

借助先进的传感器、网络以及智能算法,全方位实时监测机组的运行状态,通过水力优化与抗干扰控制、故障预警等关键技术可以有效确保大型水利泵站机组在复杂工况条件下依旧可以安全稳定地运行。在故障防控层面,通过实时监控以及故障预警,可以提前精准识别潜在的故障隐患,并及时干预,调节设备的运行参数,有效降低故障的发生率,减少非计划的停机时间。

在运行性能方面,机组的运行稳定性得到了有效的提高,振动的幅值也严格控制在标准范围之内,可以提高机组的运行效率以及水利工程的水资源调配能力。此外,智能化运维技术可以优化运维流程,在一定程度上提高运维效率,降低运维成本。通过抗干扰控制技术,水利优化的协同作用,可以增强泵站机组抗复杂工况的能力。可以在复杂工况条件下,依旧保持稳定的运行,保障水利工程功能。

4 结论

复杂工况对机组多系统有不利影响,影响机制复杂。通过状态监测与故障预警、水力系统优化与抗干扰、电气系统安全保障、智能化运维技术分别作为前提、核心、关键、支撑,有机结合可构建完善技术体系,能降故障率、提稳定性与运维效率,增强抗复杂工况能力,保障机组运行。结合技术发展趋势与泵站实际,未来技术优化方向明确。提升智能化水平,融合数字孪生等新技术构建数字孪生泵站;加强多技术融合应用,构建一体化安全保障体系;

融入节能技术实现绿色低碳运行；完善标准体系，明确各项要求，为技术应用提供规范指引。

[参考文献]

- [1]孟宪为.水利泵站机电设备运行管理与全寿命维护[J].智能建筑与智慧城市,2025(2):183-185.
- [2]秦国华.水利工程大型泵站的安全运行管理分析[J].水电站机电技术,2024,47(10):155-157.
- [3]魏利.简析泵站机电设备工程运行管理与维护措施[J].治淮,2022(12):46-47.
- [4]白学锋.水利泵站机电设备运行管理中存在的问题及措施[J].南方农机,2022,53(24):180-182.
- [5]甘维德.浅析水利泵站机电设备运行管理中存在的问题及措施[J].农业科技与信息,2020(15):92-93.
- [6]洪伟.大型水利泵站机电设备安装和检修的技术措施[J].低碳世界,2017,7(19):55-56.
- [7]张延山.水利水电工程机电设备运行异常原因及解决措施[J].数字农业与智能农机,2022(10):102-104.

作者简介：梁怀伟（1970.一），男，安徽省阜阳市临泉县人，现就职于临泉县水利局城防管理所，长期从事水利泵站工作。