

航电枢纽水力发电机组效率优化研究

钟文聪

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 330008

摘 要：航电枢纽水力发电机组效率优化是提高水能利用率和经济效益的关键，本文通过研究分析了水力发电机组工作原理及结构特点，提出直接测量法、模型试验法、数值模拟法以及综合指标评估法四种效率评估手段，并从设备选型设计、运行参数调整、维护管理优化、新技术应用等方面进一步探索建立完善的效率优化策略体系。随着数字孪生、人工智能算法、纳米涂层的相继出现可使综合效率得到有效提升，因此利用智能监测与多机组协同调度可以有效提升枢纽水能利用率，为航电枢纽高效运转提供理论支撑和实践依据。

关键词：航电枢纽；水力发电机组；效率优化

引言：航电枢纽是一类同时满足了航运和发电任务的综合性水利工程，除具备提供清洁能源以及内河运输需求等功能作用外，其水力发电机组的运行效率直接影响着水能资源的使用效益和项目经济效益。但由于受到水头波动、泥沙磨损、设备老化等原因限制，航电枢纽的实际运行效率较低甚至偏离了设计值，存在可观的能量损耗。对航电枢纽进一步研究其水力发电机组的效率评估与优化策略对航电枢纽整体运行水平的改善有重要意义。

1 航电枢纽水力发电机组概述

航电枢纽是指集航运和发电为一体的综合性水利设施。它是现代能源和交通等领域中重要的环节，而水力发电机组则是航电枢纽实现发电功能不可或缺的部分。从水力发电机组的工作原理上来看，航电枢纽水力发电机组主要是将水流带来的势能和动能转化成电能；当水流经过水轮机时，推动水轮机转轮旋转使得水能变成机械能，再把水轮机与发电机相连接，转子又会由于对线圈产生震荡运行使得发电机转子也随之运动，根据电磁感应原理，将机械能变成电能。虽然这个过程很简单，但是其中存在复杂的能量转换和精确的机械运动。整套水力发电机组结构包括：水轮机、发电机以及相关辅助设备等组成。其中，水轮机是进行能量转换的关键设备，根据水流的作用方式和结构特点，常见的有混流式、轴流式、贯流式等多种类型，每种类型都有适用的水头、流量等工况条件。而发电机主要是将机械能转化为电能，主要是由定子、转子、励磁系统等组成。辅助设备有调速器、油压装置、冷却系统等，也会影响机组的稳定运行。航电枢纽水力发电机组的工作会受到许多因素的影响，比如水轮机性能参数：效率、空化系数等对于机组能量转换效率都具有直接影响；发电机的效率

特性、功率因数等对于发电质量和效率也是十分重要的^[1]。同时，还会受到其他因素的影响（例如运行工况和环境条件），譬如水头变化、流量波动、水质情况等都会对运行效率和稳定性产生一定的影响），若水头过高或者过低都会导致水轮机不满足最优工况，降低其运行效率，还可能由于水质中泥沙等杂质可能磨损水轮机部件等，从而降低其性能。

2 航电枢纽水力发电机组效率评估方法

2.1 直接测量法

直接测量法是评估航电枢纽水力发电机组效率的基础方法，通过对各种关键参数进行直接测定来准确计算出机组的效率。（1）流量测量。利用合适的流量测量设备如电磁流量计、超声波流量计等正确测量进入水轮机内部的水流流量，这是计算水轮机输入能量最重要的信息。（2）水头测量。使用压力传感器等工具测量水轮机进出口的水头差。水头就是水流所具有的势能，它的准确测量影响着机组效率的高低。（3）功率测量。利用功率分析仪等测量出发电机输出的电功率，其反映了机组输出最终能量。（4）转速测量。借助于转速传感器对水轮机和发电机的转速进行实时测量，转速的稳定与否会影响到机组运行效率。（5）数据处理及分析。将由流量、水头、功率、转速等进行整合后根据相关的效率计算公式精确计算出机组的效率并对其数据波动情况进行分析以评价机组的运行状态。

2.2 模型试验法

模型试验法是评估航电枢纽水力发电机组效率的重要手段，在实际运行中通过构建模型来获得关键数据。（1）模型设计与制作。根据相似原理将实际的水力发电机组缩小并制作成各类模型。模型和模型之间应该保证其在水流运动、能量转换等方面具有一定程度的相似

性。(2)搭建试验环境。对于航电枢纽的实际情况进行模拟。可以通过试验进行真实工况的检测,比如模拟水流条件、水头变化等情况,为模型的研究提供接近于真实状态的环境。(3)参数测量与记录。在模型试验的过程中,使用高精度的测量仪器对试验过程中的流量、水头、功率、转速等进行实时测量和记录。(4)整理分析数据。对测量得到的数据进行整理和分析,通过跟理论值的对比,判断模型的效率,找出问题所在。(5)结果外推与验证。根据模型试验的结果按照相似准则把它外推到实际的水力发电机组上,并利用实际的运行数据,来进行验证,确保结果的可靠性。

2.3 数值模拟法

数值模拟法是航电枢纽水力发电机组效率评估的重要技术手段,通过计算机软件仿真机组内部复杂物理过程,从而实现精准、全面的效率分析,为机组优化设计和运行提供依据。该方法主要采用高精度数字模型搭建,根据水力发电机组的实际结构及运行原理对水轮机、发电机等关键设备进行建模,同时兼顾水流流动特性、机械能与电能转换等多个关键过程,保障模拟结果符合实际工况;在模拟分析中将先进的计算流体力学(CFD)技术应用于水轮机,精准仿真水轮机内部水流的流速、压力变化,清晰剖析出水力能量的转换规律,量化水轮机水力效率^[2]。灵活适配不同的运行工况下,可以利用数值模拟法对不同水头、不同流量条件下水力发电机组的运行状态进行模拟分析,从而获得机组全工况下效率变化规律,模拟完成后,针对海量的仿真信息可获取诸如效率曲线、能量损失分布等参数。相较传统的评价方式,数值模拟法具有成本低、周期短、可重复性强的显著优点,可弥补传统实测方式缺陷,大幅度提升了机组效率评估精准度与工作效率,是航电枢纽发电机性能优化的技术支撑。

2.4 综合指标评估法

综合指标评估法是全面、系统地对航电枢纽水力发电机组效率进行评价,它是由多个指标的综合得到较为完善的综合结果。该方法能够更加全面和准确反映机组实际情况,其中核心指标之一为发电效率,它体现了水能转换成电能的过程,通过计算发电机输出功率与水轮机输入功率的比值来进行衡量,两者之比越大则表明机组能量转换效率也就越高;水能利用率体现的是机组对于水资源的利用程度,包括了水头、流量等因素,若水能利用率高,意味着水资源可以充分利用;设备可靠性指标体现了机组在运行时的稳定性及耐久性,包括了设备故障率、维修次数等,可靠性高,机组停机时间少,

保证了机组发电的连续性;同时还要考虑运行成本指标,包括了机组购置、维护、能耗等费用,如果运行成本低则会提高机组的经济效益。在进行综合评估的时候给予各个指标相应的权重,并根据这些权重计算得出最终的结论^[3]。例如新建机组的综合指标中发电效率和水能利用率权重都适当提高,而老旧机组的综合指标中设备可靠性、运行成本指标显得更加重要。

3 航电枢纽水力发电机组效率优化策略

3.1 设备选型与设计优化

设备选型和设计优化是提高航电枢纽水力发电机组效率的基础。(1)确定水轮机类型,根据水轮机的水头和流量大小进行合理匹配,对于水头较大、流量较小的水轮机可以采用混流式,中低水头、流量比较大则适宜考虑灯泡贯流式,也就是说可取消蜗壳,节约土建投资10%~20%;(2)优化叶片参数。利用CFD数值模拟改造叶片翼型与安放角,最佳效率可达到0.91以上,比转速Ku值推荐最好取0.48~0.5为佳工况;(3)尽可能地与发电机实现有效匹配,应首先考虑永磁同步电机,通过智能励磁控制减少铜损与铁损,保证在变动情况下仍具备较高的输出性能;(4)合理的调速系统设置,兼顾调节范围与动态性质,尽量采用变频调速技术与变桨距调节技术,使其在负荷波动时依然保持高效稳定运行;(5)冷却及监测:空冷或水冷方案,选择纳米涂层,减少温升损失,并借助智能监测手段,预警密封磨损等隐患并实施报警操作,保障长期运行高效。

3.2 运行参数调整策略

机组投运后,需要对每个参数进行细致调整。充分挖掘设备的潜能、保持良好的工作状态是最重要的手段,结合实际情况不断优化设备;导叶开度和桨叶角度同样也影响水轮机的出力特性,建立水头-流量-开度三维映射模型可以在不同来水条件下快速寻优,使得机组始终运行于最高效率区附近,综合效率提高2%~4%左右;转速控制上航电枢纽受航运水位约束,水头变化较为频繁,通过改善转速选用变频调速取代定速运行有利于拓宽高效运行带宽,避免因偏离设计工况而造成短时间内降低效率^[4]。励磁电流动态优化方面也应加强控制,过励磁会增大定子铜损,欠励磁则无功支撑能力差,故适宜采用自适应励磁控制策略,根据负荷变化实时调节磁场强度,将功率因数保持在0.95以上,减少无功损耗;尾水位也值得关注,通过调整下游闸门开度进而减小尾水管真空度,降低转轮出口动能损失,单台机组一年仅消耗几十万千瓦时;多台机组之间的负荷安排应基于等微增率原则进行在线优化,避免某些机组长期处于高效区,

达到枢纽发电效率的最大化。

3.3 维护管理优化措施

高效的维护管理体系是保证航电枢纽水力发电机组长期稳定运行、不降低其效率水平的重要保障。(1) 状态监测设备建设。部署振动, 温度分析、油液分析等在线检测装置, 构建机组健康状态数据库, 结合大数据算法识别故障点, 可提升3%~5%的设备可用率;(2) 水轮机过流部件养护。经常性地对转轮叶片进行空蚀和泥沙磨损的检查, 做好轻微损伤处补焊修复工作, 严重磨损的及时更换, 防止因为过流通道形变而使水力损失增大;(3) 发电机绝缘与轴承管理。周期性利用红外热像仪扫描定子绕组温升分布情况, 同步跟踪各轴承振动频谱演化趋势, 提前预防绝缘劣化和机械松动隐患, 减少非计划停机风险;(4) 调速和励磁系统校准。每个季度都对调速器响应特性和励磁调节器精度进行校验, 修正控制参数漂移, 确保调节品质与实时工况相符合, 避免控制偏差带来的影响效率问题;(5) 冷却和密封系统维护。定期清洗冷却器换热面, 更新老旧密封件, 保持冷却介质干净、密封完整, 有效限制温升损耗, 延长核心零件寿命, 推动机组高效输出。

3.4 新技术应用与创新

技术的不断发展为航电枢纽机组效率提升创造了全新路径, 各种数字化、智能化手段正在改变着传统的运维模式。其中数字孪生通过构建机组全物理场虚拟映射模型可以使得机组在虚拟空间中自动匹配不同工况下的运行情况, 提前预知效率瓶颈并从而做出最优控制方案, 实测结果表明, 该方法对综合效率将起到1.5%~3%的提升作用; 人工智能算法的引入也让航电枢纽机组实现自适应调整成为可能, 基于深度强化学习的控制策略能够在水头大幅波动的航电场景下自主找寻全局最佳运

行点, 远超靠经验来判定的响应速度和精准性^[5]。利用新型纳米涂层材料覆盖转轮叶片表面后, 空蚀开始时间可延迟40%以上, 长期保持过流面光滑且有效地维持设计效率。超导发电虽然仍处于工程落实阶段, 但零电阻特性理论上可以使得发电机损耗降低60%, 一旦成熟则会彻底打破机组效率上限; 此外利用物联网平台完成多个机组协同调度及远程集中管理, 加之边缘计算节点的高质量数据传输和处理, 使得整个枢纽的水能利用率得以进一步提升。

结语

未来, 随着数字孪生、人工智能与物联网等技术的深度融合, 航电枢纽水力发电机组将向全面智能化演进。自适应控制和无人值守运维将成为常态; 超导发电、新型纳米材料等前沿技术一旦得到工程实施, 机组效率上限也将被大幅刷新; 多能互补、水风光一体化调度模式推广后, 航电枢纽将从单一的发电枢纽向区域能源枢纽跨越, 水能利用率以及综合效益必然会提高更多, 为绿色低碳发展贡献更强动力。

参考文献

- [1]唐滢琨.水力发电机的检修与维护分析[J].集成电路应用, 2020,37(06):60-61.
- [2]姜春,姜建勋.水轮发电机组常见故障及维护措施研究[J].价值工程, 2020,39(02):254-256.
- [3]王鹏飞,张京京,陈帝伊.水力发电机组轴系哈密顿建模与动力学特性分析[J].排灌机械工程学报,2020,38(08):794-800.
- [4]章天际.基于振动分析的水力发电机组优化设计研究[J].模具制造,2025,25(11):231-233.
- [5]郑伟兵.水力发电机组检修所存在的问题及解决措施[J].电子乐园,2021(4):324-324.