

灯泡贯流式机组效率提升技术应用

黄政强

国家电投集团广西长洲水电开发有限公司 广西梧州 543000

摘要：灯泡贯流式机组因结构紧凑、适应低水头工况等优势，在流域梯级开发与航电枢纽工程中应用广泛。水头波动与工况偏离是制约其效率的核心因素。本文以效率提升为目标，聚焦水头适应性与工况匹配性，系统阐述转轮优化、调速系统升级、运行控制策略改进等关键技术。结合广西长洲水电站机组改造实践，分析技术应用成效，为同类机组在复杂水头条件下的效率提升提供理论参考与工程借鉴，助力水电资源高效利用。

关键词：灯泡贯流式机组；效率提升；水头适应性；工况匹配

引言

水电作为清洁低碳能源，在能源结构转型中占据重要地位。灯泡贯流式机组以水流轴向贯穿转轮的结构特点，成为低水头、大流量水电工程的首选机型。此类机组效率受水头波动影响显著，实际运行中工况偏离设计值易导致效率衰减。广西长洲水电站作为西江流域关键水电枢纽，其多台灯泡贯流式机组长期面临流域水头变化与复杂工况挑战，效率提升需求迫切。本文针对水头与工况核心影响因素，结合工程实践探讨效率提升技术路径，为机组优化运行提供支撑。

一、灯泡贯流式机组效率影响机制

（一）水头波动的效率衰减路径

水头作为机组能量转换的基础参数，直接决定水轮机的有效出力。灯泡贯流式机组设计通常基于额定水头下的最优工况，这一设计特性使其在特定水头条件下能发挥最佳效能，但也导致其对水头波动的敏感性显著高于其他类型机组。当实际水头低于额定值时，水流进入转轮的速度三角形发生畸变，叶片进口冲角增大，在叶片表面形成脱流漩涡，这种漩涡不仅破坏水流的稳定流动，还会导致水力损失剧增，进而引发机组效率快速下降。水头过高时，转轮出口水流的余速能量无法被尾水管有效回收，尾水管的能量回收效率大幅下降，同时过高的水头会使机组内部的水压力异常升高，引发机组振动与噪声加剧，振动产生的机械摩擦又会进一步造成效率损耗。流域径流季节变化、灌溉用水调度等因素，易使机组长期处于非额定水头工况，效率衰减问题突出。

（二）工况偏离的效率影响机制

工况匹配性体现为机组出力与水头、流量之间的动

态协同关系，这种关系的平衡与否直接决定机组的运行效率。实际运行中，电网负荷的实时调整、流域泄洪调度的应急需求以及灌溉、航运等综合利用目标的变化，常导致机组偏离设计的最优工况区，引发效率衰减。导叶与桨叶的协联关系是保障工况匹配的核心，协联曲线一旦偏离设计值，会直接造成导叶过流面积与桨叶旋转角度的不匹配，水流在导叶与桨叶之间形成剧烈撞击，产生大量撞击损失^[1]。在低负荷工况下，进入转轮的水流能量不足，无法形成稳定的绕流，在转轮室内形成回流现象，回流水流与主流相互干扰，进一步加剧能量损耗；高负荷工况时，叶片表面的压力分布出现极端情况，易引发叶片气蚀，气蚀会对叶片表面造成损伤，破坏叶片的型线完整性，两种情况均会导致机组效率显著下降。长洲水电站内江、外江厂房机组因受不同河段水头差异影响，工况分化明显，效率提升需针对性解决工况匹配问题。

二、核心部件优化技术

（一）转轮结构优化

转轮作为能量转换核心部件，其结构参数直接决定水力性能。针对水头波动问题，优化思路聚焦于拓宽转轮高效工况区，通过调整叶片型线、进出口角度及转轮直径，实现不同水头下的水流适应性。采用三元流设计方法，结合计算流体动力学模拟，对叶片表面压力分布进行优化，减少脱流区域。长洲水电站部分机组改造中，将原转轮叶片进口边向头部延伸，增大叶片包角，同时优化出口边型线以减少余速损失，使转轮高效区水头覆盖范围拓宽，适应流域季节性水头变化。

材料升级同步提升转轮可靠性。选用高强度耐疲劳合金钢替代传统材料，优化焊接工艺与加工精度，降低

水头波动引发的结构应力。对转轮室进行打磨抛光处理,减少内壁粗糙度导致的摩擦损失,同时采用抗气蚀涂层技术,延长高水头工况下的转轮使用寿命,间接保障效率稳定性。

(二) 导水机构与密封系统改进

导水机构通过调节导叶开度精确控制过流流量,其调节性能的优劣直接影响机组对工况变化的响应速度与适应能力。为提升导水机构的工况匹配精度,引入数字孪生技术构建导水机构的全尺寸虚拟模型,在虚拟环境中模拟不同水头、不同负荷条件下导叶开度与流量、出力之间的关系,通过大量模拟计算修正导叶与桨叶的协联曲线参数,使协联关系更贴合实际运行工况^[2]。广西长洲水电站在调速系统改造中,针对原机械协联控制精度低、响应滞后的问题,将其全面升级为电子协联控制系统,该系统通过安装在进水口的压力传感器实时采集水头信号,结合机组的实时负荷数据,由智能控制单元动态调整导叶与桨叶的动作逻辑,使协联误差控制在更低范围。这种基于实时水头的动态协联控制,有效解决了因水头变化导致的导叶与桨叶动作不同步问题,显著改善了机组在变水头工况下的匹配精度,提升了运行效率。

密封系统泄漏是易被忽视的效率损耗点。主轴密封与转轮室密封失效会导致水流短路,减少通过转轮的有效流量。针对长洲水电站部分机组主轴密封漏水问题,采用新型耐压耐磨密封材料,优化密封结构为双端面机械密封形式,同时在密封腔设置压力监测装置,实时预警泄漏风险。改造后密封系统检修周期延长,泄漏量大幅降低,有效减少流量损失带来的效率衰减。

三、运行控制策略优化

(一) 基于实时水头的负荷优化分配

构建精准的机组效率特性数据库是实现运行控制优化的基础前提,只有全面掌握机组在不同工况下的效率表现,才能制定科学的运行策略。通过开展系统性的现场试验,在不同水头条件下(从枯水期最低水头到汛期最高水头),逐步调整机组负荷,同步采集机组的出力、耗水率、转速等关键参数,计算得出不同水头-负荷组合下的机组效率值。基于这些试验数据,建立以水头为自变量、负荷为因变量、效率为目标函数的三维数学模型,通过数据拟合明确各台机组的最优工况区间,形成完整的机组效率特性曲线。在此基础上,开发多机组负荷优化分配系统,该系统通过数据通信网络实时接收流域水文站的水位监测数据,换算得到机组运行的实时水头,结合电网调度下达的负荷需求,运用遗传算法对负

荷分配方案进行优化计算,将负荷优先分配给当前水头下效率最高的机组,实现多机组之间的协同优化运行,避免部分机组长期运行在低效区间^[3]。

长洲水电站针对内江、外江水头差异,采用分区控制策略。外江厂房水头相对稳定,机组优先承担基荷;内江厂房水头波动较大,机组根据实时水头调整负荷,避免长期运行在低效区。通过该策略,电站整体发电效率较改造前显著提升,同时降低单台机组频繁调荷带来的损耗。

(二) 调速系统数字化升级

调速系统作为机组工况调节的核心控制单元,其响应速度与控制精度直接决定机组能否快速适应水头与负荷变化,进而影响运行效率。传统的机械液压调速系统存在油压波动大、调节死区大、分段关闭曲线不可调等固有缺陷,在水头波动频繁的工况下,容易出现调节滞后问题,导致机组甩负荷时出现超速停机现象,不仅影响运行稳定性,还会因停机再启动过程造成发电量损失,降低整体效率。广西长洲水电站针对调速系统存在的问题,选用数字插装阀式调速系统进行全面升级改造,该系统采用电液比例控制技术,通过高精度的电液比例阀替代传统的机械调节机构,能够实现对导叶与桨叶开度的连续精确控制,提高动作的线性度与重复性。

改造后的调速系统具备水头自适应功能,通过内置传感器实时采集水头信号,结合功率差值动态调整调节参数。在一次调频过程中,系统可根据水头变化修正调频幅度,避免过度调节导致的工况偏离。第三方测试显示,改造后机组 AGC 性能满足南方电网要求,油泵启动间隔时间大幅延长,不仅降低厂用电消耗,更通过稳定工况提升了发电效率^[4]。

(三) 智能监测与预警

建立多参数融合的智能监测系统是防范机组效率异常衰减的重要手段,通过对影响机组效率的关键参数进行全面监测,实现效率衰减的早发现、早预警、早处理。监测系统采用分布式布局,在机组进水口、转轮室、尾水管等关键部位安装各类传感器,实时采集水头、流量、机组振动、进出口压力、导叶与桨叶开度、轴承温度等多维度数据,通过工业以太网将数据传输至边缘计算模块。边缘计算模块对数据进行实时预处理与分析,计算出机组的实时效率值,并与效率特性数据库中的理论效率值进行对比,分析效率变化趋势。采用机器学习算法构建效率异常识别模型,通过大量历史运行数据对模型进行训练,使模型能够精准识别效率异常衰减的特征

模式，当监测数据显示效率偏离正常区间时，系统自动定位故障原因，区分是水头波动导致的水力损失，还是密封泄漏、部件磨损等机械问题，为运维人员提供精准的诊断依据^[5]。

长洲水电站在机组改造中加装内窥镜监测装置，定期检查定子硅钢片与转子磁极状态，及时发现阻尼条蚀伤、铁芯滑移等隐患。通过振动频谱分析技术，识别水头波动引发的共振频率，提前调整机组负荷避开危险工况。智能监测系统的应用，实现效率衰减的早发现、早处理，为机组高效运行提供保障。

四、辅助系统改进

(一) 冷却系统优化

灯泡贯流式机组采用卧式结构设计，其发电机与水轮机同轴布置，这种结构虽然紧凑但导致散热空间受限，冷却系统的散热效果直接影响机组的运行温度，进而影响机组效率与使用寿命。冷却系统的能耗在电站厂用电中占比相对较高，优化冷却系统不仅能降低能耗，还能避免因冷却不足导致的机组降负荷运行。针对定子、转子的冷却需求，采用风路与水路协同优化的方案，在风路系统中，将传统的后挡风板改为短型结构，减少挡风板对冷却气流的阻碍作用，防止空气在挡风板处形成涡流导致侧面溢出，确保冷却气流能够全部流经定子、转子绕组，提高冷却气流的循环效率^[6]。

长洲水电站部分机组在油冷却系统中并联多级散热器，采用智能温控阀根据润滑油温度调节冷却强度，避免过度冷却造成的能源浪费。对冷却锥外表面定期清理水生生物与泥垢，恢复换热效率，减少因冷却不足导致的机组降负荷运行，间接提升发电效率。

(二) 励磁系统升级

励磁系统作为发电机的核心辅助系统，通过调节发电机的励磁电流控制端电压与无功功率输出，其性能优化不仅能提升电能质量，还能减少电能转换过程中的损耗，间接提高机组整体效率。传统的旋转励磁系统采用滑环与碳刷进行能量传递，滑环与碳刷之间的机械摩擦会产生较大的机械损耗，同时碳刷易磨损，需要频繁更换，增加了维护成本与停机时间。采用静止励磁系统替代传统旋转励磁系统，通过晶闸管整流装置直接将交流电转换为直流电供给发电机励磁绕组，取消了滑环与碳刷结构，彻底消除了机械摩擦带来的损耗，同时减少了

因碳刷磨损导致的故障停机^[7]。优化励磁调节器的控制参数，引入自适应PID控制算法，使励磁调节器能够根据发电机的实时运行工况（不同水头、不同负荷）自动调整控制参数，确保发电机在各种工况下均工作在功率因数最优区间，减少无功功率占用的发电容量，提高有功功率输出比例。

长洲水电站在励磁系统改造中，引入容错控制技术，当部分功率模块故障时，系统自动切换运行模式，避免机组停机造成的发电量损失。改造后发电机励磁损耗显著降低，在低水头工况下的功率输出稳定性明显提升，进一步优化了机组整体效率。

结语

灯泡贯流式机组效率提升是一项系统工程，核心在于解决水头波动与工况偏离带来的性能衰减问题。本文从核心部件优化、运行控制升级、辅助系统改进三个维度，结合广西长洲水电站实践，阐述了效率提升的技术路径。转轮结构优化与数字调速系统应用是提升水头适应性及工况匹配性的关键，智能监测则为效率稳定提供保障。长洲水电站的改造实践表明，针对性技术方案可有效提升机组效率，其经验可为同类低水头水电工程提供借鉴。未来需进一步探索数字化与智能化技术融合，实现机组效率的全生命周期优化。

参考文献

- [1] 张鹏程, 张银果, 杨慧. CFD技术在贯流式机组改造中的应用[J]. 小水电, 2023(2): 45-48.
- [2] 富旭平, 郑峰. 灯泡贯流式水轮机效率问题[J]. 水电能源科学, 2008, 26(6): 2.
- [3] 苏保安, 泰俊兰. 灯泡贯流式机组应用技术[J]. 水电施工技术, 2012(2): 4.
- [4] 佚名. 灯泡贯流式水轮机出力提升方案研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2016, 14(3): 5.
- [5] 余斌. 灯泡贯流式水轮发电机组运行优化研究[J]. 电力系统装备, 2024(9): 137-139.
- [6] 梁才干. 灯泡贯流式水轮发电机效率测试研究[J]. 电器工业, 2023(7): 32-35.
- [7] 王伟珍. 灯泡贯流式发电机安装工艺与优化策略[J]. 水电站机电技术, 2024, 47(11): 29-32.