

可逆式水泵水轮机运行效率提升与过渡过程优化

都可钦 仇岩峰 李育霖 高鹏程 马智超
山东文登抽水蓄能有限公司 山东 威海 264400

摘要: 可逆式水泵水轮机是抽水蓄能电站的核心设备, 兼顾抽水与发电两种工况, 运行效率与过渡过程稳定性直接影响电站整体效益与设备安全。本文围绕设备运行特性展开研究, 梳理工作原理与效率影响因素, 从水力设计、运行区间、部件处理、调度管理四方面, 提出运行效率提升技术。针对启停、工况切换等典型过渡过程, 分析参数变化规律与安全管控要点, 阐述瞬变抑制、仿真验证等优化手段。在此基础上构建效率与稳定性协同优化策略, 融入智能算法与数字孪生技术, 实现高效运行与安全稳定的双重目标, 为抽水蓄能机组优化设计与安全运行提供理论参考与技术支持。

关键词: 可逆式水泵水轮机; 运行效率; 过渡过程; 水力优化; 智能控制

引言: 随着新型电力系统建设推进, 抽水蓄能作为成熟的储能调节技术, 担负着调峰填谷、调频调相、应急备用的重要任务。可逆式水泵水轮机作为关键装备, 运行工况复杂多变, 高效运行与过渡过程稳定是行业研究重点。设备在不同工况切换时, 易出现水压波动、转速失衡、效率下降等问题, 轻则降低发电效益, 重则损伤机组部件、引发安全事故。当前, 机组朝着大容量、高水头、智能化方向发展, 对效率与稳定性要求愈发严苛。本文深入剖析设备运行机理, 梳理效率提升路径, 破解过渡过程管控难题, 搭建协同优化方案, 助力抽水蓄能机组提质增效, 保障电力系统安全稳定运行。

1 可逆式水泵水轮机运行特性与理论基础

1.1 可逆式水泵水轮机工作原理

可逆式水泵水轮机是双向运行的流体机械, 依靠转轮双向旋转实现抽水与发电功能, 核心部件包括转轮、蜗壳、导叶、尾水管等, 结构紧凑且工况转换灵活。发电工况下, 水流从高压侧蜗壳进入, 冲击转轮旋转, 带动发电机产生电能, 水历经尾水管排至下游水库, 完成水能到电能的转化。抽水工况时机组反转, 电动机驱动转轮转动, 将下游水库的水抽至上水库储存, 实现电能到势能的转换。两种工况水流方向相反, 流动规律差异显著, 对部件结构与运行控制要求极高。设备需兼顾双向流动适配性, 保证两种工况下均保持良好水力性能, 这也是其设计与运行管控的核心难点。

1.2 运行效率影响因素分析

可逆式水泵水轮机运行效率受水力、结构、运行、环境多重因素共同影响, 各类因素相互关联, 直接决定机组能量转化效果。水力因素是核心, 包括转轮型线、导叶开度、流道平顺度, 不合理的结构设计会引发水流脱流、

漩涡、撞击等现象, 加剧水力损失。运行因素主要为工况匹配度与负荷稳定性, 偏离设计工况、负荷频繁波动, 会使机组运行在低效区, 效率大幅下降^[1]。结构因素涵盖部件间隙、加工精度, 间隙过大易造成漏流损失, 表面粗糙会增大沿程阻力, 损耗有效能量。此外, 水质、泥沙磨损、运行老化等外部因素, 也会逐步降低设备性能, 扩大能量损耗, 拉低整体运行效率。想要提升效率, 需全方位排查管控各类影响因素, 实现全维度优化。

2 可逆式水泵水轮机运行效率提升技术

2.1 水力优化设计

水力优化设计是提升运行效率的根本手段, 聚焦通流部件结构改良, 减少水力损失, 提升能量转化效率。转轮作为核心部件, 采用三维流体力学仿真技术, 优化叶片数、叶片角度、进口安放角等参数, 改良型线轮廓, 贴合双向水流运动规律, 避免水流分离与涡流产生, 降低撞击损失与尾流损失。优化蜗壳与尾水管结构, 蜗壳保证水流均匀进入导水机构, 减少局部阻力; 尾水管优化扩散角度与形状, 提升水流回收效率, 减少出口动能损耗。合理设计导叶开度与分布规律, 实现导叶与转轮的精准匹配, 消除水流扰动。通过多轮仿真迭代与模型试验, 确定最优水力结构参数, 让机组在设计工况与偏工况下均能保持高效流动状态, 从源头提升运行效率。

2.2 高效运行区拓展

常规可逆式水泵水轮机高效运行区间狭窄, 偏离额定工况后效率急剧下降, 拓展高效运行区能适配负荷波动需求, 提升整体效益。通过优化叶片翼型与可调导叶结构, 采用双曲率、变厚度叶片设计, 拓宽高效工况范围, 让机组在低负荷、高负荷区间均能保持较高效率。引入变转速运行技术, 打破固定转速限制, 根据水

头、负荷变化实时调整转速，匹配最优运行状态，避开低效死区。优化工况切换逻辑，减少非稳定工况停留时长，尽量让机组维持在高效区间运行。结合电站运行数据，绘制全工况效率特性曲线，划定高效运行范围，制定负荷分配方案，最大限度利用高效区间，减少能量损耗，提升机组综合运行效率。

2.3 通流部件表面处理与材料改进

通流部件表面质量与材料性能，直接影响水流阻力与设备使用寿命，改良处理工艺能有效降低损耗、延缓性能衰减。对转轮、导叶、蜗壳等通流部件进行精细化打磨，降低表面粗糙度，减小沿程摩擦阻力，减少水流能量损耗。采用涂层防护技术，在部件表面喷涂耐磨、耐腐蚀、光滑涂层，隔绝泥沙冲刷与水质腐蚀，保持表面光洁度，延长高效运行周期。选用高强度、抗磨损、抗气蚀的新型合金材料，提升部件结构强度，减少气蚀破坏与泥沙磨损，避免因部件损伤导致效率下降。优化部件间隙设计，选用密封性能优良的密封件，缩小转轮间隙、导叶间隙，降低漏流损失，提升水流利用率。通过材料与工艺升级，维持机组性能稳定，长期保持高效运行状态^[2]。

2.4 运行调度优化

科学的运行调度能让机组始终处于高效工况，减少无效损耗，实现效率最大化。结合电力系统负荷需求、上下游水位变化，建立智能调度模型，合理安排机组启停、负荷分配与工况切换，避免频繁启停与大幅度变负荷。根据水头波动情况，实时调整导叶开度、转速参数，匹配最优运行工况，避开低效区与振动区。建立机组运行状态监测体系，实时采集效率、流量、水头等参数，动态评估运行效能，及时调整调度策略。推行集约化运行模式，多机组联合调度时，优先启用高效机组，分配最优负荷，减少低效率机组空载损耗。同时，规范操作流程，杜绝违规运行，减少人为失误造成的效率损失，通过精细化调度管控，实现设备高效与经济运行。

3 可逆式水泵水轮机过渡过程特性分析与优化

3.1 过渡过程典型工况分析

过渡过程是机组工况转换的动态过程，工况复杂、参数变化剧烈，是设备安全运行的关键管控环节。典型过渡过程包括正常启停、事故停机、工况切换、甩负荷、抽水断电等，各类工况水流状态变化极速，易引发剧烈水力波动。发电工况甩负荷时，机组转速骤升，水压急剧攀升，产生巨大水锤效应；抽水工况断电时，水流倒流，转轮转速快速下降，易出现反向飞逸；启停与工况切换过程中，导叶快速启闭，水流扰动剧烈，易形成漩涡与气蚀。过渡过程中，机组易出现转速超标、水压超限、振动加

剧等问题，不仅降低运行效率，还会损伤转轮、导叶等核心部件，甚至引发设备故障，必须精准把控其变化规律。

3.2 过渡过程关键参数与安全边界

过渡过程管控需紧盯关键参数，划定安全边界，防止参数超标引发安全事故。核心参数包括机组转速、蜗壳水压、尾水管真空度、导叶开度、轴向推力等，各项参数均有严格安全阈值。转速超标会引发机械共振，损坏轴承与转动部件；水压过高会冲破管道、蜗壳结构，造成漏水爆裂事故；真空度过大易引发空化空蚀，损伤通流部件。结合设备设计参数与运行经验，确定各项参数安全边界，建立预警阈值^[3]。正常运行时，转速控制在额定转速1.5倍以内，蜗壳水压不超过设计值1.2倍，尾水管真空度维持在合理范围。通过实时监测参数变化，判断机组运行状态，一旦接近临界值，立即采取调控措施，守住安全运行底线。

3.3 水力瞬变抑制技术

水力瞬变是过渡过程波动剧烈的主要原因，采用专业抑制技术，能减缓参数变化速率，平稳过渡过程。优化导叶启闭规律，采用分段启闭、延时关闭策略，避免导叶快速启闭造成水流急剧突变，削弱水锤效应。安装调压井、气压罐、旁通阀等辅助设备，吸收水压波动能量，平衡管道压力，防止水压骤升骤降。设置逆止阀与防倒流装置，避免抽水断电时水流倒流，稳定机组转速。合理设计尾水管结构，加装导流板、补气装置，破坏漩涡形成，抑制真空度过高，减少气蚀危害。通过机械结构改良与运行控制结合，弱化水力瞬变影响，平缓水流变化，降低机组振动与冲击，保障过渡过程平稳顺畅，减少设备损耗。

3.4 过渡过程仿真与试验验证

过渡过程优化需依托仿真分析与试验验证，精准预判风险，验证优化效果。采用专业流体仿真软件，搭建机组三维模型，模拟各类过渡过程工况，分析水流流动规律、参数变化曲线，定位风险点与优化方向。通过数值仿真，对比不同导叶启闭规律、辅助设备配置下的运行状态，筛选最优调控方案。开展模型试验与真机试验，还原真实运行环境，测试过渡过程参数变化，校验仿真结果准确性。对比优化前后机组振动、水压、转速变化，验证优化措施的有效性。针对仿真与试验发现的问题，迭代改进设计方案与控制策略，确保优化措施贴合实际工况，全面提升过渡过程稳定性。

4 效率提升与过渡过程优化的协同策略

4.1 效率与稳定性的矛盾与统一

可逆式水泵水轮机运行效率提升与过渡过程稳定性

存在一定矛盾,单一追求高效易降低稳定性,过度保障稳定则会牺牲效率。片面优化水力结构提升效率,可能会缩小稳定运行区间,加剧过渡过程波动;为保证平稳过渡限制运行参数,又会使机组偏离高效工况。二者并非完全对立,可通过科学设计实现协同统一。效率提升为稳定运行奠定基础,高效运行能减少能量损耗与部件冲击;良好的稳定性保障机组持续运行在高效区间,避免因故障停机、参数波动拉低整体效率。优化过程中,兼顾双向需求,平衡水力设计、运行控制、结构改良各项措施,消除矛盾冲突,实现效率与稳定性同步提升。

4.2 基于智能算法的多目标优化

引入智能算法,构建多目标优化模型,破解效率与稳定平衡难题,实现全局最优。选用遗传算法、粒子群算法、神经网络算法等智能手段,以运行效率最大化、过渡过程波动最小化为目标,整合转轮参数、导叶开度、转速、启闭时间等优化变量。依托海量运行数据与仿真结果,训练优化模型,自动筛选最优参数组合,打破人工优化局限性。通过算法迭代计算,找到兼顾高效与稳定的最优设计方案与运行策略,精准匹配工况需求^[4]。相比传统单一目标优化,智能多目标优化能兼顾各项指标,规避短板,最大限度提升机组综合性能,实现效率与稳定性的协同最优。

4.3 数字孪生与智能控制

数字孪生与智能控制技术为可逆式水泵水轮机效率与过渡过程的协同优化提供了强大的数字化支撑,实现了全流程的智能化管控。首先,搭建机组的数字孪生模型,该模型能够1:1还原设备的结构与运行状态,并且可以实时同步真机的运行数据。通过数字孪生模型,能够动态模拟工况变化以及过渡过程,提前预判运行过程中可能出现的风险,如压力异常、转速波动等。同时,还可以模拟不同优化方案的效果,为制定最优调控策略提供

依据。结合智能控制系统,实时采集机组的运行参数,如流量、压力、温度等,根据这些参数自动调整导叶开度、转速、负荷等关键参数,使机组能够自适应匹配不同的工况需求,始终维持在高效运行状态。在过渡过程中,智能系统能够快速响应,自动执行预设的调控方案,平稳抑制水力瞬变,保障各项参数的稳定。数字孪生与智能控制的有机结合,实现了远程监控、自动调控以及预判运维,让机组始终保持在高效、稳定的运行状态,提高了机组的运行可靠性和经济性。

结束语

综上所述,可逆式水泵水轮机效率提升与过渡过程优化,是抽水蓄能电站高效安全运行的核心工作。设备运行效率受水力、结构、运行等多因素影响,需从水力设计、区间拓展、部件改良、调度优化多方面发力,全面提升能量转化效率。过渡过程工况复杂、风险突出,要精准把控典型工况特性,严控关键参数,采用瞬变抑制、仿真验证等手段保障平稳运行。效率与稳定性相辅相成,通过智能算法、数字孪生、智能控制技术,可实现二者协同优化。未来,随着技术不断升级,机组将朝着更高效、更稳定、更智能方向发展,为抽水蓄能行业高质量发展筑牢装备基础,助力新型电力系统建设。

参考文献

- [1]李列,卢佳乐,朱文祥.可逆式水泵水轮机导叶轴套磨损漏水问题处理[J].水电与新能源,2024,38(7):72-74.
- [2]毛秀丽,苟文涛,屈波,等.兼顾水力性能与磨蚀性能的水泵水轮机设计[J].农业工程学报,2025,41(9):44-54.
- [3]赵贵前,张永杰,冯东磊,等.可逆式水泵水轮机蜗壳分瓣合缝面过渡板缺陷处理[J].水电与抽水蓄能,2022,8(2):59-61.
- [4]高峻泽,孙勇,马哲,等.抽蓄电站水泵水轮机转轮模态分析方法研究[J].人民长江,2026,57(1):197-202,221.