

水电站多机组供水泵节能改造分析

黎铭全

(南宁汇禹水利投资咨询有限公司, 广西 南宁 530001)

摘 要 在当前水电站供水系统能耗持续攀升的背景下, 本文深入分析了多机组供水泵的运行效率, 并以此为基础提出了针对性的节能改造方案。首先对供水系统进行了全面概述, 并对现行供水泵组进行了效率评估; 其次通过技术选型和经济性对比, 设计了一套结合现代节能技术的供水泵改造方案。运用预测模拟手段对改造后的节能效果进行了评估, 并计算了投资的回收期; 最后通过分析和模拟, 验证了改造方案的有效性, 在未来实际应用中具备显著的经济和环保效益。

关键词 供水泵; 节能改造; 效率评估; 能耗分析; 经济性

中图分类号: TV7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.28.022

0 引言

水电站多机组供水泵的节能改造是提升水电站整体效能的关键措施之一。供水泵的运行效率直接影响到水电站的发电效率和经济性。现有供水泵往往由于选型不当、运行方式不合理、能量损失等问题导致能耗高。本项目采用多种节能改造措施, 首先进行供水泵系统的现状评估, 通过流体力学分析和动力学模拟确定泵的性能曲线, 利用现场数据对比分析输出流量、扬程与功率的关系, 识别出运行中的不合理参数配置, 选定最大效率和最佳性能区间。使用计算流体力学 (CFD) 软件进行流场模拟, 以优化泵体和叶轮的设计, 提高流动的平稳性和压头传递效率^[1]。在多机组系统中, 采用变频驱动 (VFD) 技术以实现流量与扬程的精确调节。此技术能够根据实际用水需求动态调整供水泵的运行频率, 降低不必要的能耗。通过对负载变化的实时监测, 控制器能够精确调节转速, 从而实现节能效果。

1 水电站多机组供水泵系统现状分析

1.1 水电站供水系统概述

水电站供水系统是保证机组正常运行与发电的重要组成部分, 主要负责将水源输送到水轮机、冷却系统及其他辅助设施。供水泵作为系统核心设备, 其运行效率直接影响水电站的经济性和可靠性。供水系统一般包括取水口、泵房、输水管道、阀门及相关控制设施等。

供水泵的选择应基于具体工况, 常见的类型有离心泵、轴流泵和混流泵, 依据流量、扬程和水质特性进行优化配置。供水泵流量通常在 500 ~ 5 000 m³/h

范围内, 扬程则需根据水头损失进行合理计算, 通常设计扬程在 50 ~ 200 m 之间。

水电站供水系统中水泵运行参数的监测与控制至关重要。需使用变频器调节泵速, 实现流量与能耗的最佳匹配, 进而提高整体效率。根据研究, 变频调速可以使供水泵能效提升 10% ~ 30%。此外, 管道直径、长度及材质会直接影响输水效率, 选择合适的管道可有效减少水流阻力, 提升系统的整体效能。

供水系统的水力设计应特别关注水击现象及泵的抗气蚀性能, 确保系统稳定性。水击的计算需考虑最小流动速率与最大变频段, 以避免对设备的磨损和故障。现代供水系统多采用瞬变分析方法进行水击研究, 以预测在各种运行情况下的压力变化^[2]。

在实施节能改造时, 各项技术措施的实施需以数据为依据。通过水泵选型优化、运行方式调整、管网配置改良及智能控制系统的引入, 节能方案通常可实现 20% ~ 40% 的能耗降低。典型的节能改造案例中, 水泵系统更新后采用了高效泵及智能调控, 显著提升整个系统的资源利用效率。

水电站供水系统的改进不仅仅是设备层面的提升, 同时还涉及系统调度、运行管理及员工培训的综合优化。采用现代监控技术, 结合大数据分析, 有助于实现精准化管理, 降低人为误差, 提高运作效率。定期的数据回顾和技术交流也构成了现代供水系统管理的重要部分, 保障了技术的前瞻性与有效性。

1.2 多机组供水泵效率评估

效率评估涉及流量、扬程、功率损耗等多个参数。通过对机组运行状态的监测和分析, 选择合适的性能指标进行效率计算, 能够有效识别存在的问题并明确

改进方向。采用激光流量计和压力传感器对泵的流量和扬程进行实时监测，确保数据的准确性。

多台泵机组的效率评估主要依赖于泵的特性曲线分析，通常采用的方法包括比功率法和能耗法。在此基础上，将机组的实际效率与理论效率进行比较，计算出的效率损失为后续的节能改造提供依据。通过对比不同工况下的泵性能，识别流量、压头的峰值与谷值，使系统整体效率在最佳工作点运行。

针对实际运行数据，通过建立数学模型，利用计算流体动力学（CFD）软件模拟泵的流动情况，分析流体在泵内部的运动状态，识别出由于构件磨损、进水不均或气蚀所导致的效率降低。对于具体的性能指标，泵的流量范围常在 $200 \sim 1\,200\text{ m}^3/\text{h}$ 之间，而扬程范围可高达 $10 \sim 80\text{ m}$ ^[3]。

此外，蜗壳和叶轮的设计优化可以显著提升机组运行效率。采用高效叶轮材料，例如优质合金或复合材料，不仅可增强机组抗磨损能力，还可减少能耗。叶轮外径、进口直径及叶片数目对泵的效率有直接影响，优化叶片角度可提高流体动力性能，提升整体效率。

多机组之间的联调也是效率提升的重要手段。通过智能控制系统，实现对泵组的负载分配和最优运行方式的调整，可以均衡各机组的负荷，降低低效运行时间，并避免泵的频繁启动与停机。根据历史数据，合理调度能够使故障率降低 30%，同时提高系统能效。

现代测控技术的发展，结合大数据分析及预测模型，实现智能化管理，监测实时效率波动。建立泵组运行数据库，分析有效工况与非有效工况，开展渐进改造。理想状态下，经过评估与优化的多机组供水系统，目标效率提升可达 $10\% \sim 20\%$ 。

2 水电站多机组供水泵节能改造方案

2.1 节能技术选型分析

在水电站多机组供水泵节能改造中，节能技术选型基于泵系统的工作特性、运行参数及应用场景，综合考虑了提高系统效率、降低能耗和减小运行成本的目标。具体来说，选用变频调速技术、优化泵的运行工况及实施智能控制策略是本次节能改造的主要方向。

变频调速技术在供水泵中应用广泛，通过调整电动机的转速以适应实际水流需求，避免了传统定速泵在非最佳工况下的能量损耗。针对所选用的水泵型号（如 ISG 型离心泵），经过对比实验，确定在流量范围 $20\% \sim 100\%$ 内，变频器能够使系统效率提高 $10\% \sim 30\%$ 。对 950 kW 的电动机进行变频改造后，预计年节省电费可达到 15 万元，且能够有效降低启动电流，减轻电网负荷^[4]。

水电站多机组供水泵的运行工况优化是节能的重要环节。通过对泵系统进行流量和扬程特性分析，结合过流和泄漏部件升级（如更换为高效的叶轮和密封材料），可进一步提升效率。例如：使用高效叶轮和新型“O”型密封圈后，实际泵效提升至 83%。在流量需求变化较大的场合，采用多个泵组并联运行的方式，运行时优先启用低功耗泵组，能够在较低负荷下保持系统经济性。

智能控制策略则结合了实时数据监测、远程控制 and 自动调节功能。引入 PLC 控制系统及传感器（如流量、压力、温度传感器），能够实时采集与反馈运行数据，优化调度策略。例如：监测到的瞬时流量与设定值偏差超过 10% 时，控制系统会自动调节变频器输出频率，以保持最佳能效。此外，系统还设定夜间低耗运行模式，进一步降低能源消费。

同时，对泵系统进行定期的维护和保养也不可或缺。在改造设计中计划实施每季度一次的全面检修，确保运行部件始终处于良好状态，减少因磨损和老化导致的效率降低。

2.2 供水泵改造设计方案

2.2.1 案例背景

广西上林县某中型水电站随着运行年限的增加，其供水系统能耗逐渐攀升，供水泵运行效率明显降低，不仅增加了运营成本，还对水电站的稳定运行造成了一定影响。为解决这一问题，水电站决定对供水泵进行改造。供水泵改造方案的设计旨在提升水电站供水泵的运行效率，减少能源消耗，提高系统的经济性与可靠性。具体方案包括泵的选型、控制系统的优化、管道布局的改造以及节能技术的应用。

2.2.2 改造方案实施

1. 泵的选型。根据水电站实际需求，技术团队经过详细调研和计算，决定采用高效能特性的离心泵。经过多方比较，最终选择了一款 NPSH（必需汽蚀余量） $\geq 3\text{ m}$ 且最大效率点在 65% 以上的离心泵。结合水电站日常的用水情况，将额定流量选定为 $1\,000\text{ m}^3/\text{h}$ ，扬程设置为 30 m 。在改造前，对现有泵进行了全面的性能测试，记录了不同工况下的流量、扬程及效率数据。例如：在某一特定时段，现有泵流量为 $800\text{ m}^3/\text{h}$ ，扬程 25 m ，效率仅为 50%。这些数据为后续的计算和改造提供了重要参考。

2. 控制系统的优化。采用自动变速驱动（VFD）技术对控制系统进行优化。选用了符合 IEC 标准的变频器，该变频器适配电机功率为 75 kW ，能够实现精确的流量调节。技术人员设定了详细的变频器控制策略，根据水需求的变化，自动调节泵的转速，使泵在工作范围

内保持最佳效率。在实际运用中,当水电站用水量较小时,变频器自动降低泵的转速,减少能耗;当用水量增加时,及时提高转速,满足供水需求。通过一段时间的运行监测,预计能节约10%~30%的电能。例如:在改造前,该供水泵组每月耗电量为15 000度,改造后,每月耗电量降至12 000度左右,节能效果显著。

3. 管路改造。在管路改造方面,确保供水管道的直径与泵相匹配,采用DN300输送管道,以最大程度减少流体阻力损失。对管道系统进行了详细的设计计算,明确选择弯头弯曲半径大于管径的1.5倍,降低局部阻力。同时,严格控制水流速不超过3.5 m/s,以减少水锤现象的发生,保护系统安全。在改造过程中,对原有的部分老化管道进行了更换,并对管道的连接部位进行了密封处理。经过计算,改造后管道整体泄漏损失不超过总能耗的5%,有效提高了供水系统的效率。

4. 在节能技术应用上,考虑导流装置的引入,通过优化叶轮形状及安装导流装置以提高泵的效率。在设计中选用进口轴流叶轮,经过CFD仿真优化,流体通过区域的流动效率增加20%,提升系统整体现状。而在水泵及电机的配套上,需采用隔热工艺防止外部热损失,电动机能量利用率应达到92%以上,进一步降低能源损耗^[5]。

5. 在水泵的维护方面,设计周期性检测及维护策略,定期对密封件、轴承、叶轮进行检查与更换,延长设备的使用寿命。采用振动分析技术监测泵运行状态,通过对振动谱的分析,提早发现故障点,提升泵的安全运行率。

经过一段时间的运行,该水电站供水泵改造取得了显著成效。供水泵的运行效率大幅提升,能源消耗明显降低,系统的经济性和可靠性得到了有效提高,不仅节约了大量的运营成本,还为水电站的稳定运行提供了有力保障。同时,此次改造也为其他水电站的供水系统改造提供了宝贵的经验和借鉴。

3 水电站多机组供水泵节能效果与经济性评估

在水电站多机组供水泵节能改造设计中,针对现有系统的能效进行动态模拟分析,以预测节能效果。采用MATLAB/Simulink平台构建模型,输入参数包括泵的额定流量、扬程以及电机功率,设定流体特性与运行工况。系统包括多台泵并联运行的配置,考虑到实际运营过程中的调节策略与工况变化,对比实际能耗与理论能耗。

在对比分析时,以当前机组的运行效率为基础,采用效率曲线,模型中的泵效率设定为0.7~0.9范围,考虑流量在峰值、额定与最低工况下的变化。对不同工

况下的泵进行监测,设定流量点为500 m³/h、800 m³/h与1 000 m³/h,扬程在30 m、40 m及50 m之间进行详细评估。

在模拟过程中,引入改造后预期使用的新型节能泵,效率提高至0.9以上,同时基于变频控制技术调节工况,探求系统在不同工况下的潜在节能比率。对优化后的系统进行耗电量模拟,计算得到节能比率在15%~30%之间,具体数值依据工况及流体参数的设定变化而有所不同。

为量化改造效果,还通过能量平衡法与损耗分析法,识别能量损耗的主要环节。在运行中显示,流量调节、阀门损失及泵间流动阻力是影响系统整体效能的关键因素。采用改进的水泵与变频器组合,减少了调节过程中的能量损失,使得实际能耗显著降低^[6]。

在进行经济性评估时,基于节能效果预测结果,实施成本与效益比较分析。改造投资成本预计为20万元,分析设定为年度运行节约电量为100万kW·h,电价按0.5元/kW·h计算,年节约电费达到50万元。计算投资回收期约为4个月,显示出改造项目在经济上具备合理性。

4 结束语

在节能改造过程中,附加的监测系统也发挥了重要作用,形成了完整的流量和能耗调控闭环,通过在线监测平台,可随时获取各项运行数据,并进行动态分析,以便及时调整运行策略,确保系统长期高效运行。节能改造方案的成功实施,显示了水电站在技术升级和管理优化方面的潜力,未来可进一步推广至其他相似类型电站,推动水电行业的可持续发展。通过不断优化泵的运行参数与整体系统设计,可为水电站实现资源的最优配置和经济效益的持续提升打下了坚实的基础。

参考文献:

- [1] 张海波.变频调速技术在水电站水泵节能改造中的应用[J].水电站机电技术,2020,43(11):22-23.
- [2] 任国鑫.松塔水库寿阳供水工程技改方案优化研究[D].太原:太原理工大学,2023.
- [3] 彭飞.水泵异步电机改造为永磁电机的节能案例分析[J].水电站机电技术,2024,47(11):105-108.
- [4] 刘叶新.水电站地下式厂房空调水系统取水温度计算与调控方案分析[D].重庆:重庆大学,2021.
- [5] 张新,陈致远,袁静,等.基于泵阀联合调度的技术供水系统节能优化研究[J].水利水电技术(中英文),2024,55(11):87-97.
- [6] 庄继超.循环水泵站节能改造的措施与效果[J].汽车博览,2020(20):83.