

水利工程泵站运行优化与节能降耗技术初探

朱景文

412825*****3337

摘要: 随着我国水资源配置需求的日益增长与“双碳”战略目标的深入推进,作为水利枢纽核心的动力单元,泵站的能耗问题日益凸显。本文旨在探讨水利工程泵站运行优化与节能降耗的关键技术路径。首先,通过典型案例分析,系统梳理了当前泵站普遍存在的如水泵效率低下、电机缺乏调速功能、管网布局不合理等主要能耗问题。其次,针对性地从设备更新、变频调速技术应用、管网优化设计及余能回收利用等方面,提出了一套综合性的节能改造方案。随后,借助虚拟仿真技术对改造方案的效果进行预测与评估。结果表明,通过系统性的优化与技术改造,泵站运行效率可得到显著提升,能耗水平大幅降低,经济效益与社会效益明显,为同类型泵站的节能改造与智能化升级提供了理论参考与实践借鉴。

关键词: 水利工程泵站; 运行优化; 节能降耗; 变频调速; 管网优化; 虚拟仿真

DOI: 10.69979/3060-8767.26.03.037

引言

泵站是水利工程中实现水体重力势能提升、进行跨区域调水、保障城乡供水、农田灌溉及防洪排涝的核心基础设施,堪称水利系统的“心脏”。据统计,我国泵站工程数量庞大,其总装机容量与年耗电量均占全国总用电量的相当比重,是名副其实的能耗大户。在能源紧张与环境保护的双重压力下,泵站的高效、低耗、安全运行已成为水利行业实现可持续发展的关键课题。

当前,许多已建泵站,特别是早期建设的泵站,受限于当时的技术水平、设计理念及资金条件,普遍存在设备老化、技术落后、运行管理粗放等问题,导致整体运行效率偏低,能源浪费严重。例如,水泵长期在非高效区运行、电机“大马拉小车”现象普遍、管网系统水力损失过大等,都是制约能效提升的瓶颈。因此,对现有泵站进行运行诊断与节能技术改造,挖掘其节能潜力,具有迫切的现实意义与巨大的经济价值。

1 案例背景

1.1 水利工程泵站概况

本文选取某中型区域调水泵站作为研究对象。该泵站建于21世纪初,设计扬程35m,设计流量 $8\text{m}^3/\text{s}$,安装有4台立式离心泵,配套电机额定功率为1000kW,总装机容量4000kW。泵站主要承担着从水源地向区域供水水库的输水任务,年运行时间约3000小时,是所在区域重要的水利枢纽。泵站自投运以来,为区域经济社会发展提供了可靠的水资源保障,但随着运行年限的增长和设备技术的迭代,其能耗问题逐渐显现^[1]。

1.2 泵站运行与能耗存在的问题

通过对该泵站近年运行数据的采集、现场勘查与性能测试,发现其运行效率与设计指标存在较大偏差,主要问题集中在以下几个方面:

1.2.1 水泵效率低

性能测试结果显示,现役水泵在多数工况下的运行效率不足75%,远低于当前先进水平(85%-90%)。原因在于:一是叶轮、导叶等过流部件因长期运行汽蚀、磨损导致型线变化,水力性能退化;二是水泵选型与当前实际运行扬程、流量需求匹配度下降。由于水源水位与供水需求的变化,泵站常需在扬程30-40m、流量 $6-9\text{m}^3/\text{s}$ 的宽泛范围内运行,原有定速水泵只能在额定点附近效率较高,偏离后效率急剧下降。

1.2.2 电机无变频功能

现有电机均为工频恒速运行,缺乏调速手段。为适应不同的供水量需求,主要依靠“阀门节流”和“启停台数”进行调节。阀门调节人为增加了管路阻力,大量能量消耗在阀门节流损失上;而频繁启停大功率电机不仅对电网造成冲击,也加剧了设备磨损。这种“以牺牲能耗换流量”的粗放控制方式,是导致泵站综合效率低下的直接原因之一^[2]。

1.2.3 管道布局不合理

泵站出水管路系统存在多处急弯和局部收缩扩张,管路布局不尽合理。水力计算与模拟分析表明,局部水力损失占总扬程的比例超过15%。特别是泵房外一段长约50米的管路,存在两个接近90度的急转弯,形成了较大的涡流区与阻力点。此外,部分管段内壁锈蚀、结

垢严重,增大了沿程摩擦阻力。

2 运行优化与节能改造路径设计

针对上述问题,以“系统最优、经济可行、技术先进”为原则,制定如下综合节能改造方案。

2.1 改造目标

能效目标:泵站装置效率(系统总效率)从现状的不足60%提升至75%以上。

节能目标:在完成同等输水任务的前提下,实现年节电量不低于15%。

运行目标:实现水泵机组软启动、平滑调速,提高系统运行的自动化、智能化水平,减轻设备与管网的水锤冲击。

经济目标:改造投资静态回收期控制在5年以内。

2.2 改造方案

2.2.1 水泵与电机改造方案

高效水泵替换:对其中2台(视情况可分期实施)性能退化严重的水泵进行更新。新泵选型应基于泵站长期的扬程-流量需求图谱,选择高效区宽广的新型高效节能水泵,确保其在大部分运行工况下都能保持在高效区内。

叶轮修复或改型:对另外2台状态相对较好的水泵,可采用先进激光熔覆等技术对受损叶轮进行修复,或更换为符合当前常用工况的“变型叶轮”,以较低成本恢复和提升其性能^[3]。

电机效能提升:结合变频改造,对电机进行适应性评估。若原有电机绝缘及机械状态良好,可继续使用;若状态不佳或能效等级过低(如低于IE3),则考虑更换为高效永磁同步电机或超高效率异步电机,其本身效率可提升2-4个百分点。

2.2.2 变频功能的实现

为核心工作水泵机组(数量至少为三台)加装高压变频调速装置是一项重要的技术改进措施。在这个过程中,变频控制系统将与泵站监控系统(即SCADA系统)进行深度集成。通过这种集成,可以根据前池水位的高低变化、管网压力的实时数据或者目标流量的具体要求等关键参数,对水泵的转速进行实时且精准的调节,从而达成“按需供水”的高效运行目标。

在控制策略优化方面,可以采用“恒压供水”或者“流量-扬程复合优化”这类先进的控制模式,这样做能够有效避免通过阀门节流来控制水量的传统方式所带来的弊端。当多台水泵处于并联运行状态时,变频器能够发挥其独特的作用,它可以实现一台水泵进行变

频调速而其他多台水泵保持工频恒速运行的“一拖多”模式,或者是实现多台水泵相互协调进行调速的“多泵协调调速”模式。通过这些优化组合运行方式,能够在整个系统运行过程中寻找并确定全局效率的最优点,从而极大地提升整个水泵系统的运行效率。

从软启动效益的角度来看,变频软启动功能具有显著的优势。它能够大幅度地降低水泵启动时的电流强度,通常情况下可以将启动电流降低到额定电流的1.2-1.5倍这个范围之内。这一降低启动电流的效果可以大大减少水泵启动瞬间对电网产生的冲击负荷,同时也减轻了对机械设备本身的冲击力,进而有效地延长设备的使用寿命,保障整个水泵系统的稳定、可靠和长久运行。

2.2.3 管网改造

局部优化措施主要针对水力损失最为严重的两处急弯管路展开改造工作。这些急弯管路由于其结构特点,往往会导致流体在输送过程中产生较大的能量损耗。为改善这一问题,可以采用大曲率半径的弯头来替代原有的急弯设计,从而有效减少流体通过时的局部阻力。此外,还可以考虑将急弯管路改为斜接渐变管的形式,这种设计能够使流体在管道内的流动更加平稳,进而优化整体的流态,提升输送效率。

内壁修复的重点在于处理那些因长期使用而出现严重锈蚀的管段。对于这类管段,可以采用先进的非开挖内衬修复技术进行处理,例如通过喷涂高分子材料的方式,在管道内壁形成一层光滑且耐腐蚀的保护层。这种方法不仅能够恢复管道内壁的光滑度,还能够显著降低流体在输送过程中的沿程阻力系数,从而提高整个系统的运行效率,同时延长管道的使用寿命。

管路冗余消除的核心任务是对现有的管路系统进行全面检查,找出那些长期未被使用或已经失去功能的冗余管路支线。对于这些冗余管路,应采取关闭或隔离的措施,以避免它们对主系统造成不必要的分流影响。此外,这些冗余管路的存在还可能成为潜在的泄漏点,增加系统的安全隐患和维护成本。因此,及时对其进行处理,不仅可以优化管路布局,还能进一步提高系统的可靠性和经济性。

2.2.4 引进余能回收技术

对于该泵站而言,在部分特定工况之下,存在着需要借助阀门进行泄压操作以降低压力这样的状况。在这种情况下,我们有必要积极探索并引入水力透平发电技术这一新型的技术手段。具体而言,可以在泵站管路系统中经过精确筛选的合适位置之上,安装微型或者小型的水力透平机组设备。通过这样的方式,能够巧妙地将

原本富余的水压能量有效地转化为电能资源。而转化所得的电能,既可以回馈至泵站自身的用电电网之中以供泵站内部使用,也可以并入外部的大电网,从而实现一种从以往单纯的“节流损失”向如今具有积极意义的“发电收益”的重大转变。

然而需要注意的是,这项水力透平发电技术的应用并非简单的工程操作,而是有着诸多前提条件和要求的。在实际应用之前,必须针对泵站的具体水力条件展开全面且详细的评估工作。

3 水利工程泵站改造效果虚拟仿真

为科学预测上述改造方案的效果并优化细节,运用专业流体仿真软件(如CFD)与泵站系统仿真平台,建立了泵站水力机械系统与管网系统的“数字孪生”模型。

设备级仿真:对拟更换的新水泵进行全流道CFD数值模拟,验证其在不同转速、不同流量下的外特性(扬程、效率、轴功率),确保其高效区覆盖泵站主要运行范围^[4]。

系统级仿真:将新水泵性能曲线、变频调速特性、改造后的管网阻力特性等参数集成到系统仿真模型中。模拟泵站在一个典型水文年内的各种运行工况。

节能效果预测:

变频调速仿真:模拟在实现恒压供水目标下,变频调速与旧有阀门调节方式的能耗对比。仿真结果显示,在平均负荷率70%的工况下,变频调节比阀门调节节约22%-28%。

管网改造仿真:对比改造前后管网系统的水力损失。仿真表明,局部优化与内壁修复可使管路系统总阻力降低约12%,相当于同等流量下所需扬程降低,进而降低水泵轴功率。

综合效益分析:将设备更新、变频调速、管网优化等效果耦合仿真。模型预测,实施全部改造措施后,泵站平均装置效率可从58%提升至78%,在完成相同年输水量的前提下,年耗电量预计减少约18%-20%,折合节约标准煤数百吨,减排二氧化碳千余吨^[5]。

经济性预评估:基于仿真得出的节电数据,结合当地电价与改造投资估算,初步计算静态投资回收期约为4.2年,低于设定目标。

虚拟仿真不仅量化了节能潜力,也为改造方案的比选、变频器容量选定、控制参数整定等提供了精确的数

据支撑,降低了改造决策与技术实施的风险。

4 结论

水利工程泵站的节能降耗是一项涉及流体机械、电气自动化、系统工程及运行管理的综合性技术课题。本文结合具体案例,分析表明,导致泵站能耗高的原因往往是多方面的、系统性的,单一措施往往收效有限。

因此,有效的节能改造必须树立系统思维,从“泵-机-管-控”全系统进行诊断与优化:更新或修复高效水泵是提升源头效率的基础;加装变频调速装置是实现柔性化、精细化运行控制的核心手段,能从根本上克服阀门节流的巨大浪费;优化管网布局与状态是降低无效能耗损失的重要环节;探索余能回收技术则是进一步挖掘节能潜力的前瞻方向。

虚拟仿真技术的应用,为改造方案的可行性论证、效果预测和方案优化提供了强有力的科学工具,使节能改造从“经验驱动”转向“数据驱动与模型驱动”,提高了决策的科学性与投资的准确性。

实践证明,对现有泵站进行系统性的运行优化与节能技术改造,技术可行、经济合理、效益显著。它不仅是响应国家节能减排号召的必然要求,也是泵站运行管理单位降本增效、提升管理水平的内在需求。未来,随着物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术与泵站工程的深度融合,智能诊断、自适应优化调度、数字孪生运维等将成为泵站节能降耗与安全运行的新范式,推动水利工程向更加绿色、智能的方向持续发展。

参考文献

- [1]王璐,侯玉娟.水利工程泵站运行优化与节能降耗技术初探[J].科学技术创新,2026,(01):114-117.
- [2]杨文涛,戴阳.农田水利工程中高扬程提水泵站节能降耗方案研究[J].棉花科学,2025,47(04):110-112.
- [3]吴光有.生态水利工程中提水泵站运行管理问题及对策[J].大众标准化,2025,(04):88-90.
- [4]李迎辉.农田水利工程中泵站运行效率提高与节能降耗方法研究[J].农业科技创新,2025,(05):66-68.
- [5]李玉鹏.农业水利工程中高扬程泵站优化设计与运行管理策略研究[J].粮油与饲料科技,2024,(10):204-206.