

中小型泵站工程规划设计中的节能技术选型探讨

周楠 严莹莹

盐城市水利勘测设计研究院有限公司 江苏盐城 224000

摘要：针对中小型泵站在规划设计阶段进行了节能技术的选择。对泵站全寿命周期能源效率进行系统分析和策略集成，实现泵站全寿命周期能源效率优化。本课题首先对变频调速系统的关键节能技术进行多维度解析，包括变频调速、变频调速和智能管控平台的集成。基于精确负荷的源头适应性设计、融合智能算法的运营过程调控和全寿命周期能源效率管理系统构建策略。研究成果可为中、小型泵站能源效率的提升提供技术选择和管理保障。

关键词：中小型泵站；工程规划设计；节能技术选型

根据水利部2021年发布的相关数据，我国泵站工程年用电量约占全国用电量的5%，部分中小泵站因设备老化和系统匹配不佳，运行效率一般在50%以下，节能潜力巨大。到2025年，随着《泵站更新改造与技术升级行动计划》的逐步实施，国家提出了更高的综合能源效率标准，明确提出从“十四五”末到现在，单位能耗至少要下降8%以上。这些硬性指标，在规划设计阶段设定了明确的技术门槛和发展方向^[1]。

一、节能技术多维解析：构建泵站高效运行的理论基石

（一）核心部件：水泵机组的能效升级路径

水泵机组能量效率是影响全系统能源消耗的关键因素，其提升途径应聚焦于水力模型优化、加工精度提高和工况调整。为减小旋涡阻力和阻力，将计算流体力学（CFD）应用于离心泵的3D紊流数值模拟和流道结构优化中。该流程主要针对某一特定工况，通过对叶片展开角、包角、进出口直径等多个环节的数值仿真，实现以某一特定工况下的最大水力效率为目的的优化设计。GB 19762的《清水离心泵能效限定值及节能评价值》将水泵的能源效率划分为三个等级，其能耗评估结果高于能源效率指标的2%~5%左右，为水泵的选择提供了一个清晰的参照。根据多年的野外观测数据，提出准确的水泵机组特征图，是进行工艺选择的第一步。在此基础上，将机组特征与备选机组的机组特性曲线叠加，保证机组的高效能区域（一般不小于机组的最大效能值92%）可实现全部机组正常工作状态。针对大排量水泵，提出一种新型的可调叶轮和可调导叶混合泵，通过调整叶轮和导流片的倾角，实现单一水泵在变水头条件下工作在高

水头范围内，显著提高其能源转化效率^[2]。

（二）驱动系统：电机与变频技术的协同赋能

电机是水泵的“心脏”，它的能量效率和速度控制对泵的效率起着决定性的作用。目前，YE4和YE5系列的UE4和YE5已经作为《中小型三相异步电机能效限定值及能效等级》（GB18613）的一级能效标准，已经作为一种新的节能技术指标。利用高磁导率低损耗硅钢片，优化定子缝间匹配及气隙设计，利用低损耗支承，将功率密度提高到96%，从根源上降低机电能转化损耗。但是，只有在更深层次的运用上，才能实现节能增效。该系统的工作中心是利用变频调速技术把高频供电转换成可调频率、可调的供电方式，从而达到平稳调速的目的。在水泵站的操作中，按照水力学中的相似原理，水泵的排量和速度是直接相关的。这就意味着，在负载量由100%降到80%时，电机的速度将会随之减小，其理论能耗可以减少到原来的51.2%，具有很大的节约空间。在工艺实现上，需要使用高性能的变频调速方法，如向量或直接扭矩，以保证电机在较低转速下仍然有较好的扭矩输出。为了有效地消除由变频电源引起的高阶谐波对电力系统及其它装置的影响，达到“清洁”调节的目的，设计了一种新型的无刷直流电机控制系统。通过与PC机检测系统的连接，实现了多台泵的启停、速度调节和循环操作，实现了传动级的协调节能^[3]。

（三）系统集成：智慧管控平台的中枢作用

单个装置的节能潜能终究是有限的，只有通过智能控制平台对其进行整合，才能使整个水泵站的能源效率达到最佳状态。本系统以物联网感知技术、大数据分析和预报控制技术为核心，作为水泵站的“智能大脑”。

运行层次上，一是全方位的感知：将高精度的液位和压力传感器安装到水泵房的进水口和进水口，并将电能质量分析仪安装到变压器和电机的主电路中，对电网电压、电流、功率因数和谐波成分进行实时监测，为整个电网的能量效率评价提供了基础。在该系统中嵌入了水泵站的最优调度模型，是该系统的关键部分。分布式发电系统，该系统可根据上游来水、用水需求等短期负荷预报，并与各机组在用泵的效率—流量—水头特征图簇相融合，以“电站总出力最少”或“每千公里单位用水量最少”为目标，对各机组的运行状态进行实时在线优化求解。由电脑可自行产生最佳开泵组合、顺序及相应的最优运转速度命令。比如，在低压阶段，由于其在局部负荷条件下的整体效能更高，因此，在低压阶段，平台会命令大型水泵转到低速运转。将装备的健康状况监控和故障诊断相结合，通过对电机振动谱和轴承温升变化规律的研究，进行预防性维修，防止由于运行状况恶化而引起的能效下降，从而保证了系统级的节能效应的持续和稳定。

二、规划与设计协同：实现全周期能效最优的策略集成

（一）源头优化：基于精准负荷的适配设计

水泵站的能量消耗因子在其规划和设计时就已决定，所以从根源上进行优化是最有效的方法。该项目的关键是从“粗放式选择，经验设计”转变为以精确的负载预报和调整为基础的精细设计。在实际应用中，首先要解决的问题是建立多维的流域水文资料建模。各设计机构应搜集并整理10多年来的月平均供水水位、目标地区需水变化曲线和极端气候事件等资料。比如，在灌区中，要考虑到各生育期内的需水规律、土壤渗透系数和可利用降水等因素，而不仅仅是将最大灌溉区域乘上某一特定的灌溉指标。采用《泵站设计规范》（GB 50265-2010）中建议的时间周期或顺序分析方法，对今后的水泵机组运行状态进行准确的数值仿真，进而得到实际的动态运行负载频谱，为以后的机组选择提供理论依据^[4]。

在得到精确的负载频谱之后，将使泵组选择由“匹配”过渡到“优化”。在工程实践中，必须依据荷载频谱上各种工况下，采用多种方法对其进行技术、经济比较。在负载变动幅度很大的情况下，“大、小水泵匹配”和“叶片切割+变频控制”的联合方式已经得到了业界的一致认同。以某一日供水量变动范围在5000~15000 m³的给水泵站为例，选用两套设计流量5000 m³/h的泵和一套设计为

8000 m³/h的泵组，其节能效果明显优于三套8000 m³/h的泵组。由于该系统可以保证在大部分错峰用水量的情况下，水泵群可以在其有效区间内正常工作，从而解决了低效区一台大型水泵“大马拉小轮车”所带来的电力损耗问题。该选择流程要求各泵的工作状态点迭代进行精细的计算，以保证各泵在其大部分工作周期中均能保持在《清水离心泵能效限定值及节能评价值》（GB19762-2007）中指定的有效区域，也就是说，一般不会比其最有效点的92%更低。

（二）过程调控：融入智能算法的运行策略

在实现水源地的最优配置之后，利用智能调度方法实现水泵站的全流程控制，是充分发挥其潜力的重要途径。传统的水泵站依靠人工经验或者单纯的启停操作，很难适应多变的运行环境，而采用智能算法作为其“脑”的集中调度是当今高效水泵站发展的关键。本系统的主要功能是建立在整个变电站内的传感网，由设置在入水口的压力变送器、电磁流量计和电机前端的电能传感器组成，这些传感器能以一秒钟几次的速度实时采集压力，流量，电流，电压等运行参数。同时，将检测到的信息传输到PLC和SCADA中，作为智能化的计算方法。

电力市场调节的关键是根据电力市场的动态变化规律，构建电力市场的最优调节方案。就拿最常用的变频控制系统来说，它比单纯的“恒压供水”更有效率。高层的能源管理体系将集成为一个预报模型，该模型可以将历史资料和外界因素（如天气预报、节假日信息等）相融合，实现对24小时甚至更久的用水量的滚动预报。采用遗传算法和粒子群算法等算法，实现以“能量消耗最小”或“能量消耗最小”为优化目标的实时或离线调度算法。同时，还对并联情况下的效率特性曲线、变频器本身效率以及可能出现的分时收费策略等因素进行了分析。比如，在晚间电力价格最低时，该运算法则可以命令水泵站适度提升出水的压力，将更多的水储存在较高的水位或管道中；而在日间电价高峰时段，系统将优先调度效率较高的水泵机组，并容许电网压力在可接受的限度之内进行微小的变动，从而达到“削峰填谷”的目的，从而显著减少用户用电成本。针对并联工况，本项目可实现水泵机组在最大负荷工况下的最佳启停组合及变频调速策略，主动规避并联工况下机组的振动及气蚀区，保证水泵机组整体工作在整体效率最佳的“甜蜜区”^[5]。

（三）管理赋能：建立全生命周期的能效管理体系

无论多么先进的工艺和战略，如果没有一个科学的运行机制做保证，那么，其节能效益将很难持续下去。构建一套涵盖整个水泵房寿命周期的能源效率管理系统，是实现将间歇式节能技术向常态化和制度化节能行为转变的重要途径。这一系统首先要做的就是制定能源效率的标准化监控和标准。根据GB 24789-2009《用水单位水计量器具配备和管理通则》及《泵站现场测试与安全检测规程》(SL548-2012)，对各水泵站进行能量测量，确定并追踪其最重要的能量效率，即“每千公吨水每公里所需电能”(kW.h/(kt.m))。该指数为不同规模、不同扬程的水泵提供了能源效率上的比较。项目组需要周期性地(如每个月)对此项指标进行测算，将其与同类泵站的设计值、历史最佳值和同类泵站的先进值进行对比，以便对本单位的能源效率状况进行较为全面的评价，并在此基础上实现对能源效率的快速检测。

基于对能源效率的监控，对能源效率的非正常运行进行闭环管理。在机组能量消耗或机组效能异常变化的情况下，启动故障诊断。这就要求运营者不再局限于对装备自身的检测，而要对水泵叶轮空蚀、密封环间隙增加、管道结垢造成的阻力特征改变，以及传感器标定偏差造成的控制畸变等问题进行全面、规范的诊断。在检测出问题之后，需要对维护和改善的行动进行文档化、追踪和验证，从而实现“监控—诊断—处置—确认”的闭环。要实现该制度的长期运行，就需要在岗位和业绩考评中引入能源效率指标，明确站长、技术员、操作人员等各个岗位的职能和目标，把能源效率工作由“软任务”转变为“硬指标”。将该系统扩展到前端和后端，实

现整个寿命周期的控制。在项目实施初期，我们将考虑到项目的能源效率指标以及后续的便于操作(测量点布局、设备可及性等)，并将其应用于项目评价中。在服役过程中，基于信息采集的装备工作信息，对轴承、叶轮等重要零部件的服役寿命进行预报，将失效后的检修转变为可预见的检修，从而有效地防止由于工况恶化而造成的能源效率下降。在此基础上，将技术、策略、人三者相融合，保证泵房系统的能量持续稳定地挖掘与维持，达到“规划、设计与运行”的“无缝协作”

结束语

综上所述，在中小型泵站的规划设计中，对节能技术进行前瞻性的整合和应用，其意义远远大于单纯的经济账。该研究将为水资源可持续管理和能源战略协同发展提供新的思路和方法。展望未来，随着高效率水力模型、新型复合材料叶轮、基于数字孪生的智能调度系统等创新技术的日趋成熟和成本降低，中小型泵站的规划设计蓝图将更深入地嵌入“节能基因”。

参考文献

- [1] 蔡文涛. 中小型提水泵站工程改造方案优选[J]. 水上安全, 2024, (06): 40-42.
- [2] 赵金宏. 中小型泵站改造工程水工混凝土施工技术探讨[J]. 水上安全, 2023, (05): 179-181.
- [3] 吕立群. 中小型泵站工程施工注意事项及施工技术[J]. 中国住宅设施, 2021, (12): 115-116.
- [4] 王海侠. 浅谈中小型排灌泵站更新改造技术措施[J]. 治淮, 2021, (07): 44-46.