

给排水系统中水泵能效提升与节能改造技术研究

梁 晔 邓卓方

广西珠委南宁勘测设计院有限公司 广西 南宁 530007

摘 要：水泵是给排水系统的核心耗能设备，其节能改造对实现“双碳”目标、降低运营成本至关重要。本文提出涵盖“精准评估诊断—设备更新—管路优化—智能管控”四层次的全生命周期节能技术体系。首先剖析水泵水力效率、电机传动效率、管路匹配度及控制策略四大能效影响因素；继而提出高效水泵替换、永磁同步电机、变频调速、叶轮切削与表面修复等设备级措施；再通过高精度水力建模、压力分区管理（PMA）、管网重构与多级协同加压实现系统优化；最后融合物联网、大数据与AI技术，构建智能监控、预测维护与全局调度平台。研究表明，唯有系统性整合硬件升级、软件优化与管理创新，实施多维协同改造，方能充分释放节能潜力，支撑水务行业绿色高质量发展。

关键词：给排水系统；水泵；能效提升；节能改造

引言

水泵是给排水系统的“心脏”，其能耗占系统总电耗的70%–90%，是节能降碳的关键。当前，在国家“双碳”战略和高质量发展要求下，水务行业亟需提升水泵能效，以降低运营成本、减少碳排放。传统“单点替换”式节能手段效果有限，因水泵效率受设备性能、管路阻力及运行策略等多因素动态耦合影响，属系统性问题。因此，必须采用全生命周期、数据驱动的系统思维：首先通过精准诊断识别能效损失根源；其次统筹设备更新（如高效泵、永磁电机、变频技术）、管路优化（如压力分区、拓扑重构）与智能管控（如IoT、AI调度）等多维措施；最终构建“感知-分析-决策-执行”闭环，实现长期高效运行。本文旨在构建一套逻辑清晰、协同性强、可落地的水泵节能技术体系，为水务行业绿色转型提供理论支撑与实践指引。

1 水泵系统能效损失的根源与机理分析

1.1 水泵本体效率低下

水泵的本体效率（ η_{pump} ）是指其将输入的机械能转化为流体有效能量（扬程与流量的乘积）的能力。造成水泵本体效率低下的原因主要有：（1）设备老化与磨损：长期运行导致水泵内部过流部件（如叶轮、导叶、泵壳）发生汽蚀、冲刷、结垢和腐蚀，表面粗糙度增加，流道形状改变，从而增大了水力损失和容积损失。（2）设计选型不当：在项目初期，由于对实际运行工况预估不足或出于安全冗余考虑，常常会选额定流量和扬程远大于实际需求的“大马拉小车”型水泵。这类水泵在其高效区之外的低效区长期运行，效率极低。（3）制造工艺与材料落后：早期制造的水泵，其水力模型未经CFD（计算流体动力学）优化，流道设计不合理，且

使用的材料耐磨、耐蚀性能较差，先天效率就低于现代高效水泵。

1.2 管路系统与水泵匹配失衡

即使是一台全新的高效水泵，如果与之相连的管路系统（包括管道、阀门、弯头、三通等）设计不合理或运行状态不佳，也会导致整个系统的效率大幅下降。这种失衡主要体现在：（1）系统阻力特性曲线偏移：管路系统的阻力（ H_{loss} ）与流量（ Q ）的平方成正比（ $H_{\text{loss}} \propto Q^2$ ）。当系统因阀门节流、管道堵塞、管径过小等原因导致阻力过大时，系统阻力特性曲线会变得异常陡峭。此时，水泵的工作点会严重偏离其最佳效率点（BEP），被迫在低流量、高扬程的低效区运行。（2）阀门节流损失：为了调节流量或压力，传统系统常采用关小出口阀门的方式。这种做法虽然简单，但本质上是人为增加局部阻力来消耗掉多余的扬程，这部分被消耗的能量完全转化为热能而浪费掉，是能效损失的最大来源之一^[1]。（3）并联/串联泵组配置不合理：在多台泵并联系统中，若各泵的性能曲线差异较大或管道布置不对称，会导致流量分配不均，部分水泵可能在极低效甚至不稳定区域运行。同样，串联泵组若选型不当，也可能出现效率叠加不佳的问题。

1.3 运行控制策略粗放

水泵的运行方式直接决定了其瞬时效率和累积能耗。传统的运行控制策略存在明显缺陷：（1）恒速运行：采用工频（50Hz）直接启动和运行的水泵，其转速固定不变。面对全天候波动的用水需求，只能通过启停泵或阀门节流来调节，无法实现连续、平滑的流量调节，导致在大部分时间里处于非经济运行状态。（2）缺乏实时反馈与优化：运行调度往往依赖于固定的时刻

表或简单的压力/液位开关控制,无法根据管网的实际需求、电价时段、水库蓄水量等多重因素进行动态、全局的优化决策。(3)忽视多泵协同:在拥有多台水泵的泵站中,未能根据总负荷的变化,智能地选择最优的泵组组合(即开启哪几台泵),使得泵站整体效率未能达到最高。

2 水泵能效提升与节能改造的综合性技术体系

2.1 设备级改造:全面提升能量转换核心单元效率

2.1.1 高效水泵的选型与替换

改造前,必须通过详细的流量、压力监测,精确绘制出水泵的实际运行工况范围(即一年中8760小时的运行点分布图)。依据实际工况,选择其高效区(通常指效率不低于最高效率90%的区域)能够完全覆盖实际运行范围的新型高效水泵。优先选用符合国家一级能效标准或国际先进水平(如IE4、IE5超高效)的产品。新选水泵应采用经过CFD仿真优化的先进水力模型,确保流道光滑、流态稳定,最大限度地减少水力损失。

2.1.2 变频调速技术的应用

根据水泵相似定律,流量(Q)与转速(n)成正比,扬程(H)与转速的平方成正比,轴功率(P)与转速的立方成正比($Q \propto n$, $H \propto n^2$, $P \propto n^3$)。这意味着,通过降低转速来调节流量,可以带来功率的立方级下降,节能效果极为显著。特别适用于流量变化幅度大、需要连续调节的场合,如供水主泵、循环水泵、污水提升泵^[2]等。通过安装变频器,水泵可以根据管网压力、水池液位或流量信号,自动调整转速,使其始终在接近最佳效率点的区域运行,彻底消除阀门节流损失。

2.1.3 叶轮切削与水力部件修复

对于因选型偏大而导致长期在小流量下运行的水泵,可以在保证必需汽蚀余量(NPSHr)的前提下,按照相似定律对叶轮外径进行适度切削。这可以降低水泵的扬程和流量,使其性能曲线向左下方移动,从而更贴近实际运行工况,提高运行效率。对因磨损、腐蚀导致效率下降的旧水泵,可采用先进的表面工程技术(如激光熔覆、超音速火焰喷涂HVOF)对叶轮、泵壳等关键过流部件进行修复,并涂覆高硬度、低摩擦系数的耐磨防腐涂层,恢复其原始水力性能并延长使用寿命。

2.2 系统级优化:重构高效、和谐的运行环境

2.2.1 高保真管网水力建模与仿真优化

利用EPANET、InfoWorks WS Pro、WaterGEMS等专业软件,整合GIS地理信息、管材管龄数据库、节点用水量数据、实测压力流量数据等,构建整个供水或压力污水管网的高保真数字孪生模型。通过模型进行稳态和瞬

态模拟,精准识别系统中的高阻力瓶颈管段、无效循环回路、水力死区、不合理管径配置以及压力过高/过低区域。基于仿真结果,提出针对性的改造方案,如更换老旧小口径管道、增设旁通管以均衡流量、优化阀门类型与位置(用调节阀替代普通闸阀)、拆除不必要的盲端管等,以系统性地降低管网总阻力,使系统阻力特性曲线更加平缓,从而拓宽水泵的高效运行区间。

2.2.2 主动式压力管理(Pressure Management, PM):

(1)DMA基础上的压力分区:在已实施DMA(District Metered Area)分区计量的基础上,进一步实施主动式压力管理。将管网划分为若干个独立的压力管理区。(2)智能减压阀(PRV)的动态调控:在每个压力区的入口处安装带有远程通信和自动控制功能的智能PRV。该阀门不再设定一个固定的压力值,而是根据预设的算法(如基于时间、基于流量或基于最不利点压力反馈),动态调整其下游的目标压力^[3]。(3)“压力随需而变”策略:在夜间用水低谷期,系统性地降低全网服务压力,这不仅能直接减少背景漏损(漏损量与压力的N次方成正比,N通常为1.0-1.5),还能显著降低爆管风险。这种策略实现了从“满足最高需求压力”到“提供最低必需压力”的理念转变,节能与降漏效果兼得。

2.2.3 系统拓扑重构与多级协同加压

(1)摒弃“一泵到底”模式:对于地形起伏剧烈、高差悬殊的供水区域,彻底放弃由单一水源地泵站向全域高压供水的传统模式。(2)多级泵站与中途加压:科学规划,在中途合适高程设置二级或三级加压泵站。通过合理分配各级泵站的扬程,可以使每一级水泵都在其设计的高效比转速范围内工作,避免单级泵因扬程过高而导致的效率低下。(3)结合调蓄设施的优化运行:在各级泵站附近或管网关键节点设置高位水池、地下水池或压力罐等调蓄设施。利用电网的峰谷电价差,在夜间低谷电价时段,一级泵站满负荷向调蓄池蓄水;在日间高峰电价时段,则主要依靠调蓄池的重力流或小功率泵站向用户供水。这种“以空间换时间、以蓄水换电费”的策略,能有效实现削峰填谷,大幅降低整体用电成本。

2.3 智能管控升级:赋能精细化、自主化运行

2.3.1 基于物联网(IoT)的全景式能效监控平台

(1)泛在感知网络:在所有关键水泵机组上部署智能传感器,实时采集电压、电流、有功/无功功率、频率、效率(通过电参和水力参计算得出)、流量、进出口压力、轴承温度、机壳振动(三轴)等全方位运行数据。(2)边缘计算与云边协同:在泵站本地部署边缘计算网关,对原始数据进行初步清洗、压缩和特征提取,

再通过4G/5G或光纤网络上传至云端能效管理平台^[4]。平台可实时计算并可视化展示每台泵的瞬时效率、单位电耗(kWh/km^3)、累计节能量,并生成日报、月报、年报。(3)数字孪生体映射:将物理水泵的实时数据与其在数字孪生模型中的虚拟映射进行同步,实现虚实互动,为深度分析和预测提供基础。

2.3.2 人工智能驱动的全局优化调度

(1)多源数据融合:平台融合来自SCADA、气象API、水务营收系统(预测用水模式)、电力市场(实时电价)等多源异构数据。(2)智能优化引擎:运用遗传算法(GA)、粒子群优化(PSO)或深度强化学习(DRL)等先进算法,以“最小化日/月总电费”或“最小化单位供水能耗”为目标函数,以满足各时段供水量、各区域最低服务压力、各水池安全水位等为约束条件,求解出未来24小时或更长时间尺度的全局最优泵组调度方案。(3)方案自动下发与执行:优化结果(包括启停哪些泵、各泵的转速设定值、各PRV的压力设定值)可自动生成控制指令,并通过平台下发至现场的PLC或智能变频器,实现无人干预的自主优化运行。

2.3.3 预测性维护(Predictive Maintenance, PdM)体系

(1)设备健康画像:利用机器学习(如支持向量机SVM、随机森林RF)或深度学习(如长短时记忆网络LSTM、卷积神经网络CNN)算法,对水泵的历史与实时运行数据(特别是振动频谱、电流谐波、温度趋势)进行深度挖掘,建立设备的健康状态评估模型。(2)早期故障预警:模型能够识别出人耳无法察觉、常规阈值报警无法捕捉的微弱早期故障特征,如滚动轴承的内圈/外圈/滚动体/保持架的初期损伤、转子的轻微不平衡或不对中、叶片的初期汽蚀等,并提前数天甚至数周发出分

级预警。(3)维护决策支持:系统不仅能预警,还能结合设备档案、备件库存、维修人员排班等信息,自动生成包含故障部位、严重程度、建议措施和最优维修窗口的智能工单,将传统的被动维修或定期维修转变为精准、高效的预测性维护,从根本上保障水泵始终处于高效、可靠的运行状态。

3 结语

给排水系统水泵的节能改造是一项涵盖技术、经济与管理之系统性工程,需摒弃单一设备更换思维。本文提出的“精准评估诊断—设备更新—管路优化—智能管控”四层次全生命周期技术体系,强调唯有融合硬件升级、系统重构与智能运行,才能充分释放节能潜力。展望未来,随着数字孪生、人工智能、5G/6G及边缘智能等技术成熟,水泵系统将迈向自主感知、预测与优化的新阶段,不仅能实现节能降耗,更可参与能源调度与价值创造。这不仅提升水务企业效益与效率,更将在国家“双碳”战略、水资源可持续利用和现代化城市基础设施建设中发挥关键作用。

参考文献

- [1]张源.水泵性能优化及能效改进研究[J].今日制造与升级,2024,(05):147-149.
- [2]赵阳,乔凤兰.水泵变频改造节能与经济性探讨[J].中国金属通报,2026,(03):22-24.
- [3]刘诚飞.基于水泵智能调控的二次供水系统节能和水质提升研究[D].燕山大学,2025.DOI:10.27440/d.cnki.gysdu.2025.002862.
- [4]周艳,陆培,于林铃,等.循环水泵节能方式的应用与对比[J].冶金动力,2024,(05):60-62.