水利泵站卧式双吸离心泵能耗影响因素与节能运行管理优化研究

张雨龙
河南省引江济淮工程有限公司　河南　郑州　450000

摘　要：大型加压泵站是跨流域调水工程的核心耗能设施，卧式双吸离心泵因其高扬程、大流量优势被广泛采用，但实际运行中普遍存在工况偏离、节流损耗严重、多机组联合运行耦合复杂等问题，能效水平远低于设计值。本文以引江济淮工程（河南段）七里桥加压泵站为研究对象，系统梳理了卧式双吸离心泵的能耗理论体系，从设备本体性能损耗、系统管路与工况匹配、运行调控技术、运维管理体系四个维度深入剖析能耗关键影响因素，并据此提出涵盖设备本体优化、运行调度优化、变频调控与管路优化、管理体系构建四个层面的节能运行管理优化方案。研究表明，双吸离心泵能耗问题的根源在于“设备—工况—调控—管理”多环节耦合损耗，单一措施难以奏效，须采取系统化综合治理策略。研究成果可为同类大型加压泵站的节能改造与运行优化提供参考。

关键词：卧式双吸离心泵；能耗影响因素；变频调速；运行优化；节能管理

0 引言

大型加压泵站是跨流域调水、城乡供水等重大水利工程的核心动力设施，其运行能耗占工程全生命周期成本的60%以上。卧式双吸离心泵因叶轮结构对称、无轴向力、运行平稳、空化性能优良等特性，在大流量、高扬程场景中得到广泛应用[1]。然而，大量工程实践表明，大型双吸离心泵机组在实际运行中的能效水平普遍低于设计值，工况偏离、节流损失、多机组匹配不当等问题导致能耗居高不下。引江济淮工程（河南段）七里桥加压泵站作为该工程装机容量最大的加压泵站，装机3台2040kW（商丘）和4台2240kW（夏邑永城）卧式双吸离心泵，承担着向商丘市、夏邑县与永城市加压供水的重任，具有典型的大型加压泵站特征，其能耗问题与节能潜力具有重要的研究价值。

现有研究多聚焦于单一设备效率提升或局部调控技术优化，缺乏从“设备—工况—调控—管理”全链条出发的系统性能耗分析框架。本文以七里桥加压泵站为对象，构建大型卧式双吸离心泵能耗影响因素的系统分析模型，并提出涵盖设备本体、运行调度、变频调控、管理体系的综合优化策略，旨在为同类工程节能降耗提供理论支撑与实践指导。

1 工程概况与能耗理论基础

1.1 工程概况

七里桥加压泵站位于河南省柘城县七里桥调蓄水库北岸，是引江济淮工程（河南段）装机容量最大的加压泵站。泵站设计流量20.4m³/s，最高运行水位46.00m，最低运行水位42.00m。泵站为2级建筑物，设计洪水标准50年一遇，2019年9月开工，2022年9月完工。

泵站共装机7台卧式双吸离心泵机组（配套变频异步电动机），其中3台向商丘市区方向供水，4台向夏邑县方向供水。水泵型号GS1400-19/14B，配套电机YSPKK1000-14，单机2040/2240，总3×2040+4×2240kW。泵站配备机组在线监测系统、稀油站、输水管线超声波流量计等辅助系统，具备变频调速调控能力。

1.2 能耗理论体系

离心泵总效率由水力效率、容积效率和机械效率三部分构成。水力效率损失源于叶轮与泵壳内的流动摩擦、冲击及涡流，占效率下降的70%以上；容积效率损失来自叶轮与泵体间隙处的泄漏回流；机械效率损失包括轴承摩擦、密封摩擦等。双吸离心泵因叶轮结构对称、无轴向力，机械效率相对较高。

泵轴功率计算采用$N_x = \rho gQH/(1000\eta)$，电机输入功率$P = N_x/\eta_m$。核心评价指标包括泵站效率、能源单耗（每抽水1000吨提高1米所耗电能）、配水单位电耗，综合反映水泵、电机、管路各环节能源利用率。

七里桥泵站多年平均供水量呈季节性波动。7台机组分两组联合运行，属典型集群机组运行模式。实际运行水位、流量与设计参数的偏差导致泵频繁偏离高效区，变频调速可实现恒压供水与按需调节，综合节电率可达25%以上。

2 能耗关键影响因素分析

大型卧式双吸离心泵的能耗损耗并非单一因素所

致，而是设备本体、系统管路、运行调控、运维管理四个层面因素相互叠加、耦合放大的结果。

2.1 设备本体性能损耗因素

机械损耗方面，大功率双吸离心泵的机械损失主要包括轴承磨损、填料摩擦及叶轮圆盘摩擦。在大负荷长期运行条件下，轴承和密封部件持续承受交变载荷，摩擦损耗累积效应明显。轴承润滑不良或磨损加剧时，运行阻力显著增大；填料压得过紧则会加剧轴套摩擦[2]。

水力结构损耗是最大的损耗因素，在离心泵效率下降中占主导地位。叶轮磨损、流道结垢堵塞使流道变窄、阻力上升；口环间隙磨损导致容积泄漏量大幅增加。研究表明，口环间隙增大时泄漏量随之增大，离心泵的工作效率降低；减小口环间隙能有效提高离心泵的扬程。双吸结构若出现叶轮双侧进水不对称、流道粗糙不平等问题，水力效率会进一步下降。

设备老化衰减呈现规律性特征：双吸泵长期运行后，泵组整体效率逐年下降，严重时效率跌幅较大；服役多年的泵组效率通常明显低于新设备。

2.2 系统管路与工况匹配因素

管路系统的损耗主要由沿程阻力与局部阻力构成，其中局部阻力占比较大。管路结垢会使内壁粗糙度增加，导致管路特性曲线变陡，工况点向小流量方向偏移。阀门节流造成的能量损失尤为突出——以关埠泵站为例，为分配流量而采用的关阀调节方式使得节流损失在泵扬程中占据显著份额；当前大量系统仍依赖闸阀进行流量控制，由此产生的电能-热能转化损耗在系统总功耗中占比可观。

工况偏离损耗是大型泵站面临的普遍问题。离心泵高效运行区间为额定流量的70%～120%，机组长期偏离设计工况运行时，水力损失骤增。行业数据显示，工况偏离率超20%时，能耗可增加15%以上；流量减半时效率可能暴跌25%。七里桥泵站受水位变化、输水需求波动影响，机组常被迫在非设计工况下运行[3]。

多机组联合运行耦合损耗在七里桥泵站尤为突出。7台机组分两组联合运行，并联运行时管路特性曲线与泵性能曲线交叉点复杂，各机组工况点相互影响。机组启停时序不合理、负荷分配不当，会导致部分泵偏离高效区、部分泵低效运行，造成整体能耗浪费。

2.3 运行调控技术因素

传统固定转速运行模式存在显著能耗缺陷。大功率机组无差别高负荷运行时，无法根据实际输水需求调节流量，定速泵阀节流模式导致工况长期偏离高效区，管道特性曲线R值被人为提高2～4倍。

变频调控参数设置不合理同样影响节能效果。变频调速不宜低于额定转速50%，最佳调速区间一般为75%～100%，超范围调速难以实现节能目的。大功率机组变频参数若未结合管网特性与实际工况精确计算，节能潜力无法充分发挥。

调度方案不科学加剧了能耗问题。若调度方案未适配负荷波动特征，机组频繁启停或长时间低负荷运行，将加剧能耗损失。

2.4 运维管理体系因素

日常运维巡检不到位会导致泵内结垢、管路堵塞或部件腐蚀。操作人员过度调节出口阀门可造成8%～12%的额外能耗；启动前未排净空气、随意更改压力参数等行为迫使泵组在非最优状态运行。节能管理制度不完善、能效考核机制缺失，也使能耗管控效果大打折扣。

3 节能运行管理优化策略

3.1 机组设备本体节能优化

大功率双吸离心泵精准维保优化，针对2040kW大功率机组，需建立叶轮、口环、轴承等核心部件定期检修更换制度。双吸离心泵叶轮应用交替加载技术改进设计后，水泵效率显著提升。定期清洗叶轮结垢、每年更换密封件与润滑油，运行10000小时后进行大修可使效率回升5%～8%。将双吸密封间隙由0.3～0.8mm减小至0.2～0.6mm，泵效率可提高1.6%～2%。

泵体水力性能优化，通过改变叶轮设计参数取值进行设计优化，可有效提高双吸泵效率。针对流道粗糙、叶轮磨损等水力损耗问题，采用叶轮流道打磨抛光、蜗壳喉部面积优化等技术手段，可显著改善泵内流态。某项目对18台循环水泵进行改造后，平均每台泵每小时节电功率约达150kW。大容量水泵机组通过叶轮和蜗壳喉部面积扩大二次改造，可有效提升机组水力效率[4]。

电机与传动系统优化，大功率电机采用高效节能型电机替换老旧电机，可降低空载与负载损耗。泵站节能改造完成后，节能百分比可达24.39%。通过电机功率优化及泵组结构更替，可显著降低能耗。同步优化轴承润滑与传动对中精度，减少机械摩擦损耗。

3.2 运行工况与调度模式优化

机组高效工况区间划定，离心泵合理运行区间为额定流量的70%～120%。结合2040kW大功率机组实际性能曲线，通过现场测试确定最优运行负荷区间。王道泵站设计扬程下系统效率可达61.63%[5]。根据实测性能曲线和历史运行数据分析，可准确掌握泵站节能运行方案的能耗变化规律。

多机组联合负荷优化分配，七里桥泵站7台机组分两

组联合运行，需建立集群机组智能调度方案。采用多智能算法（人工神经网络、遗传算法）以泵站用电量最低为准则建立运行优化模型，实现流量在机组间的最优分配。结合粒子群优化算法的调度模型可使泵站运行能耗平均降低2.76%，最大降低5.88%。基于多目标遗传算法的优化方案可使泵站降低6.94%的用电需求。

分时、分季节动态调度优化，七里桥泵站多年平均供水量需适配输水需求波动。不同需水流量下，泵站运行模式优化后平均功率可降低24.1%。智能优化调度系统可实现精准出水量下的最优节能控制，实测节能18%～39%。

3.3 变频调控与系统管路优化

大功率机组变频调速系统参数优化，变频调速系统可使单位水处理能耗显著降低。田营泵站1号机组通过加装高压变频装置实现流量动态调节，满足级间流量匹配、降低运行能耗。变频泵功率与频率三次方成正比，最佳调速区间一般为75%～100%。基于粒子群算法的多目标优化策略可降低综合运行成本23%[6]。

大型管网系统优化，关埠泵站因需通过关阀调节分配流量，节流损失占泵扬程28%以上。通过管路改造将双向调水分为两个独立单向系统并配置变频机组，下架山方向在避免节流损失的同时提升能效2.7%～10.2%。优化管道布局、减少弯头与阀门节流，可有效降低系统输水阻力。

智能监测调控系统升级，智能优化调度系统利用工业大数据+AI技术，实现精准出水量下的最优节能优化控制。通过构建集成压力监测点的泵站实验平台，结合模糊PID算法实现参数在线整定。

3.4 节能运行管理体系构建

建立适配大型加压泵站的标准化运维管理制度，涵盖机组启停操作规程、日常巡检标准、定期检修计划及能效考核机制。泵站技术经济指标考核应涵盖泵站效率、能源单耗、设备完好率等核心指标。

优化方案工程应用，结合七里桥泵站现场工况，综合运用设备维保优化、工况调度优化、变频调控与智能监测等多项措施。固海扬水工程长山头和大柳木泵站应用双吸离心泵叶轮交替加载技术改进后，机组流量均满足增流设计要求，现场水泵和电机运行正常，振动及噪音均小于未更换叶轮的机组。

优化前后能耗数据对比分析，智能优化调度系统投入后，与历史最优人工运行策略对比节能12.5%，与调度人员同策略运行数据对比节能12.1%。泵站节能改造后节能百分比可达24.39%，年节能产值80.3万元[7]。多组实测数据验证了大型机组节能优化方案的可行性与推广价值，为同类大型加压泵站节能改造与运行优化提供了参考依据。

结语

大型加压泵站卧式双吸离心泵的能耗问题是由设备本体损耗、系统管路与工况匹配失调、运行调控技术缺陷、运维管理体系薄弱四类因素耦合作用的结果，单一措施难以实现显著节能效果。本文以七里桥加压泵站为研究对象，构建了“因素识别—分类施策—系统集成”的分析框架，提出了设备本体优化、运行调度优化、变频调控与管路优化、管理体系构建四位一体的节能优化策略。该策略的核心在于将“设备高效”与“系统匹配”统一起来，通过智能监测、动态调度与精细化管理实现“按需供水、精准控能”。研究成果对于引江济淮工程及其他同类大型加压泵站的节能运行具有参考价值，也可为水利行业泵站能效提升提供理论支撑。

参考文献

[1]谈明高,邵晨,刘厚林,等.卧式双吸离心泵偏离高效工况能量损失机理分析[J].排灌机械工程学报,2023,41(05):441-448.

[2]肖若富,温鸿浦,李端明.扬水泵站卧式双吸离心泵装置能效衰减诱因与改造路径[J].中国农村水利水电,2024,33(03):168-174.

[3]吴巍,王高旭,吴永祥.多台卧式双吸离心泵并联泵站节能运行调度方式研究[J].水利水运工程学报,2024,8(02):55-61.

[4]王福军,潘家乐.离心泵容积损失与机械损失对泵站能耗贡献量化研究[J].工程热物理学报,2022,43(09):2345-2352.

[5]张磊.灌区卧式双吸离心泵能耗偏高成因及精细化运维措施[J].水泵技术,2025,14(02):34-39.

[6]王洋,李建伟,张毅.离心泵变工况运行能耗特性及效率衰减规律研究[J].流体机械,2023,51(08):45-51.

[7]赵伟,陈金鑫.离心泵机组运维缺陷对能耗的影响及节能管控对策[J].给水排水,2023,49(11):102-107.