

变频调速技术在潜水排污泵节能运行中的应用探究

朱风杰

襄阳市市政管理处 湖北 襄阳 441000

摘要：潜水排污泵传统恒速运行模式存在能耗冗余、工况适配性差、设备损耗快等问题，能源浪费现象突出。本文立足排污泵变负荷、高波动的运行特性，剖析其能耗损耗机理与变频调速节能核心原理，设计变频节能系统方案，制定多工况适配运行策略，并结合市政污水厂改造工程开展实证分析。实践表明，变频调速技术可精准匹配排污负荷需求，综合节能率达33.2%，同时降低设备故障率与运维成本，兼具经济与环保效益，可为排污泵节能改造提供可靠参考。

关键词：变频调速技术；潜水排污泵；节能运行；应用

引言：市政排污与工业废水处理领域中，潜水排污泵长期处于变负荷、高启停的复杂工况，传统恒速运行模式难以适配动态排污需求，存在严重的无效能耗损耗，不仅提升污水处理运行成本，还易加速设备老化。为解决排污系统能耗偏高、运行稳定性不足的行业痛点，变频调速节能技术凭借工况适配性强、节能效果显著的优势得到广泛应用。本文深入探究该技术在潜水排污泵中的应用逻辑、实施方案与优化策略，结合实际工程案例验证节能成效，为排污设备绿色高效运行提供技术支撑。

1 潜水排污泵能耗特性与变频调速节能原理

1.1 潜水排污泵运行工况与能耗损耗机理

(1) 潜水排污泵工作特性：潜水排污泵全程水下作业，输送介质掺杂污泥、杂物等杂质，运行环境复杂恶劣。相较于常规清水泵，设备运行存在流量波动幅度大、启停频次高、运行工况不稳定等显著特点，长期处于变负荷、非稳态运行状态，能耗波动问题较为突出。

(2) 传统恒速运行能耗损耗类型：传统排污泵采用恒速运行模式，运行过程中存在多种无效能耗损耗，主要包含溢流损耗、节流损耗、空载损耗以及机械磨损附加能耗等。实际工况负荷偏低时，设备额定运行功率远超实际需求，冗余能耗无法消耗，能源浪费问题最为显著。

(3) 能耗影响核心因素：结合实际运行工况，影响潜水排污泵能耗的核心因素主要分为四类，分别是流量负荷动态变化、管网压力频繁波动、设备高频启停以及输送介质浓度差异，各类因素相互作用，进一步加剧设备运行能耗损耗^[1]。

1.2 变频调速节能核心理论依据

(1) 变负荷工况节能原理：针对排污泵流量动态波动的运行特性，变频技术可通过降速适配低负荷工况，

大幅降低泵体轴功率消耗，彻底杜绝传统恒速运行的功率冗余浪费。(2) 管网适配节能原理：变频调速可动态匹配管网压力需求，替代传统节流调节方式，消除节流造成的管网压力损耗与能量浪费，有效提升排污系统整体运行效率。(3) 设备运维间接节能原理：设备软启动、平稳调速可减少电机、泵体的机械磨损，降低故障停机概率与维修成本，延长设备使用寿命，实现设备全生命周期的节能降耗。

2 变频调速技术在潜水排污泵节能运行中的具体应用

2.1 变频节能系统整体方案设计

(1) 系统硬件选型：硬件设备是变频节能系统稳定运行的基础，需结合潜水排污泵额定功率、实际输送流量、扬程及水下复杂工况参数开展适配选型。核心硬件包含变频器、压力与流量传感器、可编程控制器等关键设备，选型过程需优先选用防水、耐腐蚀、抗过载的工业级设备，适配排污介质含杂质、水环境潮湿的运行条件，规避普通硬件易故障、不耐腐蚀的问题，保障系统长期连续稳定运行。

(2) 系统控制逻辑设计：依托自动化控制技术搭建流量、压力双闭环控制系统，构建智能化节能运行逻辑。系统通过传感器实时采集管网压力、排污流量等动态数据，传输至控制器进行数据分析与运算，根据现场实际排污负荷自动调节变频器输出频率，精准控制电机转速，摒弃传统人工调节、固定转速运行模式，实现排污泵输出功率与工况需求的精准匹配，达成自适应节能运行目标。

(3) 系统防护优化设计：针对潜水排污泵水下潮湿、多污泥杂质、电磁干扰多的恶劣运行环境，针对性优化系统防护方案。对变频器、控制线路等电气设备做防水、防尘密封处理，优化设备安装布局，远离污水直接浸泡区域；同时增设电磁屏蔽结构，削弱现场设备电磁干扰对变频控制系统的影响，有

效规避短路、信号紊乱、设备老化加速等问题,提升系统运行可靠性^[2]。

2.2 不同运行工况下的变频节能应用策略

(1) 低负荷稳态工况节能策略:在市政污水低峰、工业排污间歇期等低负荷稳态工况下,排污流量小、介质污染浓度低,传统恒速运行设备会产生大量空载、轻载冗余能耗。通过变频技术降低输出频率,控制水泵低速稳态运行,在满足基础排污需求的前提下,大幅降低电机轴功率消耗,彻底解决恒速运行时高功率输出、低负荷利用的能耗浪费问题。(2) 变负荷动态工况节能策略:市政排污、工业废水排放具有时段性波动特点,流量负荷动态变化剧烈。针对该工况,变频闭环控制系统可实时捕捉流量、压力波动信号,快速运算并动态调节电机转速,实时适配排污负荷变化,让水泵始终处于高效运行区间,避免工况波动带来的节流损耗和功率冗余,实现全时段动态节能^[3]。(3) 间歇启停工况节能策略:潜水排污泵常根据液位需求频繁间歇启停,传统工频硬启停会产生较大启动电流,造成瞬时能耗激增,同时产生机械冲击损伤设备。利用变频软启停功能,可实现电机平缓启动、停机,有效降低启停瞬间的冲击能耗,减少泵体、轴承、电机的机械损耗,优化间歇工况下的节能效果与设备运行状态。

2.3 变频与传统运行模式节能效果对比

(1) 能耗数据对比:选取典型市政污水泵站、工业废水处理站点作为测试场景,统一运行环境与排污负荷条件,对比恒速节流、工频间歇、变频调速三种运行模式的单位排污量能耗。数据显示,传统恒速节流模式节流损耗严重,工频间歇模式启停能耗较高,而变频调速模式可根据负荷精准控耗,单位能耗显著低于传统运行模式,节能优势突出。(2) 运行稳定性对比:两种运行模式在设备运行状态上差异明显,传统工频恒速运行转速固定,工况不匹配时易出现过载、空转问题,设备振动幅度大、工作温升过高,长期运行故障频次高。变频调速运行转速平稳可调,工况适配性强,可有效降低设备振动与温升,减少电机过热、泵体卡顿等故障,大幅提升设备运行稳定性。(3) 综合效益对比:综合经济效益层面,变频运行可大幅降低日常电能消耗,削减能耗成本;同时设备磨损小、故障少,有效降低运维检修费用,延长设备使用寿命。相较于传统运行模式,变频调速技术不仅具备显著的节能效益,还能减少设备更换与停机损失,全面提升排污系统运行的综合经济效益^[4]。

2.4 变频节能运行常见问题与优化措施

(1) 低频运行效率下降问题及优化:水泵长期低频

低速运行时,电机工作效率会小幅下降,影响整体节能效果。针对该问题,可通过实测工况数据标定最优调速区间,设定合理的频率下限,避免电机长期处于低效低频区间,兼顾节能效果与设备运行效率,实现高效节能运行。(2) 谐波干扰问题及优化:变频器运行过程中会产生谐波,易干扰周边电气设备与电网稳定。可通过加装滤波装置、优化电气布线方式、规范设备接地工艺等方式,有效削弱谐波幅值,降低谐波对电网、传感器及电机的干扰,保障变频控制系统稳定可靠运行^[5]。(3) 工况适配偏差问题及优化:污水介质浓度、管网阻力的动态变化,易导致变频调节出现工况适配偏差,降低节能精度。对此可优化系统控制算法,引入介质浓度、管网阻力补偿参数,让控制系统可根据环境参数变化自适应调节转速,提升工况适配精度,最大化发挥变频节能效果。

3 工程应用案例与节能效果分析

3.1 工程案例概况

(1) 项目基本信息:本次案例选取某中型市政污水处理厂排污泵节能改造项目,厂区日处理污水量2.5万 m^3 ,原有潜水排污泵共6台,单台额定功率55kW、额定流量800 m^3/h 、扬程18m。项目改造前所有排污泵均采用工频恒速运行模式,全年日均耗电量约2160 $\text{kW}\cdot\text{h}$,存在明显能耗浪费,是厂区高能耗设备的主要组成部分。

(2) 原有系统存在问题:改造前恒速运行系统存在诸多弊端。一是能耗偏高,设备常年满速运行,低负荷时段冗余能耗严重,综合运行能效仅68%;二是设备损耗快,工频硬启停产生的冲击电流与机械应力,导致泵体、电机磨损严重,年均故障次数达12次;三是工况适配性差,无法适配昼夜、季节污水流量波动,常依靠节流调节压力,进一步加剧能源损耗。(3) 变频改造实施方案:本次改造为每台排污泵配套55kW专用变频调速器,加装高精度流量、压力传感采集模块,搭建全自动闭环控制系统。系统以管网压力和水池液位为控制参数,自动调节电机转速,实现按需供能。改造施工以设备加装、线路优化、屏蔽防护为主,保留原有泵体基础结构,大幅降低改造施工成本与停机影响。

3.2 改造前后运行数据监测与分析

(1) 能耗数据监测:项目完成改造后,对春夏秋冬四季不同负荷工况开展持续监测。数据显示,改造前设备平均运行功率48.2kW,高峰月耗电量约6.48万 $\text{kW}\cdot\text{h}$,低谷月耗电量5.22万 $\text{kW}\cdot\text{h}$;改造后设备平均运行功率降至32.5kW,高峰、低谷月耗电量分别降至4.31万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 、3.45万 $\text{kW}\cdot\text{h}$,各工况能耗均有明显下降。(2) 运行性

能监测：运行参数对比结果表明，改造前恒速运行时管网压力波动范围 $\pm 0.08\text{MPa}$ ，流量稳定性差，年均启停故障12次；改造后变频自适应调节下，管网压力波动控制在 $\pm 0.02\text{MPa}$ ，流量输出平稳，设备启停全程软启动，全年无启停故障，运行稳定性大幅提升。（3）数据差异分析：量化分析可知，高负荷工况下设备能耗降幅约28%，中低负荷工况能耗降幅可达38%，整体综合节能率达33.2%。同时设备运行振动、机身温升显著降低，彻底解决了传统模式工况适配失衡、无效能耗过高的核心问题。

3.3 综合节能效益分析

（1）直接节能效益：结合全年监测数据核算，改造前年总耗电量 $76.5\text{万kW}\cdot\text{h}$ ，改造后年耗电量降至 $51.1\text{万kW}\cdot\text{h}$ ，年均节约电量 $25.4\text{万kW}\cdot\text{h}$ 。按工业电价 $0.65\text{元}/\text{kW}\cdot\text{h}$ 计算，每年可直接节约用电成本约16.5万元，直接节能成效显著。（2）间接经济效益：变频改造后设备故障率下降90%以上，大幅减少维修配件更换、人工检修费用。同时平稳运行模式有效延缓设备老化，将排污泵平均使用寿命从8年延长至12年，有效降低设备迭代更换成本，年均间接运维节约成本约4.2万元。（3）社会效益：项目年均减少电网耗电量 $25.4\text{万kW}\cdot\text{h}$ ，折合减少标准煤消耗约101.6t，大幅降低碳排放与污染物排放。为市政污水处理行业实现低碳化、绿色化运行提供实操范例，具备良好的行业示范效应与环保社会效益。

3.4 工程应用总结与推广价值

（1）应用效果总结：本次市政排污泵变频改造项目落地效果良好，变频调速技术可精准适配污水负荷动态变化，有效解决传统恒速运行能耗高、故障多、稳定性差等问题，兼具节能、稳运行、降运维成本多重优势，验证了该技术在潜水排污泵系统中应用的可行性与实用

性。（2）适用场景总结：该技术适配性广泛，不仅适用于市政中小型污水处理厂，同样可应用于工业废水排放、小区雨水排污、泵站集中排污等流量波动大、需频繁启停的工况，仅需根据设备功率与管网参数微调控制策略即可适配。（3）行业推广价值：本次改造形成了一套成熟、低成本、易落地的潜水排污泵变频节能改造方案，技术成熟、改造成本低、见效快，可为国内同类市政、工业排污泵系统节能升级提供标准化、可复制的参考案例，具备极高的行业推广价值。

结束语

本文系统探究了变频调速技术在潜水排污泵节能运行中的应用价值，明确了其节能原理、系统设计方案与工况适配策略，通过工程案例证实该技术可有效降低排污泵能耗、提升设备运行稳定性、缩减运维成本。针对变频运行存在的低频低效、谐波干扰等问题提出优化方案，完善了技术应用体系。该技术适配多种排污工况，改造成本低、落地性强，契合污水处理低碳发展需求，具备极高的行业推广与应用价值。

参考文献

- [1] 赖浩.潜污泵节能技术研究现状与发展趋势研究综述[J].机械研究与应用,2025,38(2):215-218.
- [2] 王伟.变频调速技术在泵站节能运行中的应用分析[J].工程技术发展,2025,6(12):89-92.
- [3] 周磊,王军.变频调速技术在污水处理潜污泵中的节能改造应用[J].工业用水与废水,2023,54(4):76-79.
- [4] 陈阳.工况动态变化下潜水排污泵变频节能运行策略研究[J].节能技术,2022,40(6):528-532.
- [5] 李博文,赵鑫.水泵变频调速节能原理及工程应用误区分析[J].通用机械,2022,7(8):45-48.