

# 矿井水处理系统水泵变频节能控制技术研究

杨 辉

国家能源集团宁夏煤业有限责任公司水务分公司 宁夏 银川 750001

**摘要:** 本文聚焦于地面矿井水处理全系统中的各类水泵, 深入研究变频节能控制技术的理论基础、系统架构与控制策略。重点分析了预处理系统中原水提升泵及深度处理系统中各类增压、循环水泵的能耗特性与运行工况。首先, 系统阐述了水泵相似定律及其在变频调速中的节能机理; 其次, 详细设计了以可编程逻辑控制器(PLC)为核心, 集成变频器、传感器与人机界面的自动化控制系统硬件与软件架构; 在此基础上, 重点探讨了适用于不同处理单元的多种先进控制策略, 包括恒压供水、多泵协同优化以及基于水质水量预测的前馈-反馈复合控制。研究表明, 科学合理地应用变频节能控制技术, 不仅能显著降低全系统水泵的运行能耗, 还能有效延长设备寿命、提升系统稳定性和自动化水平, 为构建绿色、高效、智能的现代化矿井水处理体系提供坚实的技术支撑。

**关键词:** 矿井水处理; 全系统水泵; 原水提升泵; 深度处理水泵; 变频调速

## 引言

随着环保要求趋严, 矿井水处理已成为矿山企业的重要任务。未经处理的矿井水含悬浮物、重金属和酸性物质, 易污染环境, 而高效处理系统可实现达标排放或回用, 兼具环保与经济效益。在整个矿井水处理流程中, 各类水泵是贯穿始终的核心动力设备, 其总能耗占全厂电耗的绝大部分。其中, 预处理系统的原水提升泵作为系统“心脏”, 负责将矿井水从集水池提升至后续处理单元, 能耗尤为突出; 同时, 深度处理系统中的反渗透高压泵、超滤循环泵等设备也因工艺要求高而成为重要的能耗单元。传统工频运行依赖阀门节流调节流量, 造成严重能源浪费, 并影响系统稳定。变频调速技术通过调节电机转速按需供能, 消除节流损失, 兼具软启动、减冲击、延寿命等优势。然而, 针对矿井水处理全系统中不同类型水泵的复杂工况, 如何构建安全、可靠、高效的变频控制系统并优化控制策略, 仍需深入研究。

## 1 水泵变频调速的节能机理与理论基础

### 1.1 离心泵的工作特性与管路系统匹配

离心泵是矿井水处理中最常用的泵型, 其工作性能通常由一组特性曲线来描述, 主要包括流量-扬程(Q-H)曲线、流量-轴功率(Q-P)曲线和流量-效率(Q- $\eta$ )曲线。Q-H曲线表明, 在转速恒定时, 泵的扬程随流量的增加而减小; Q-P曲线则显示, 即使在零流量(闭阀)状态下, 泵仍需消耗一定的轴功率。管路系统也有其自身的特性, 即管路所需扬程( $H_c$ )与流量(Q)的平方成正比, 表现为一条过原点的二次抛物线。水泵的实际工作点, 就是其Q-H曲线与管路特性曲线的交点。在传统的阀门调节模式下, 当需要减小流量时, 关小阀门

会使管路阻力增大, 管路特性曲线变陡, 工作点沿水泵的Q-H曲线向左上方移动<sup>[1]</sup>。此时, 虽然流量减小了, 但水泵提供的扬程却增加了, 多余的能量全部消耗在阀门上。这种运行方式使得水泵长期偏离其最高效率点(BEP), 运行效率低下。

### 1.2 水泵相似定律与变频节能原理

变频调速技术的核心理论依据是水泵的相似定律(或称比例定律)。该定律指出, 对于同一台几何相似的水泵, 当其转速发生变化时, 其流量、扬程和功率与转速之间存在如下关系:

流量与转速成正比:  $Q_2 / Q_1 = n_2 / n_1$

扬程与转速的平方成正比:  $H_2 / H_1 = (n_2 / n_1)^2$

轴功率与转速的立方成正比:  $P_2 / P_1 = (n_2 / n_1)^3$

这一立方关系揭示了变频调速的巨大节能潜力。假设某工况下, 通过变频将水泵转速降低至额定转速的80%, 则其流量将降至80%, 扬程降至64%, 而轴功率将大幅降至51.2%。相比之下, 若采用阀门调节至相同流量, 由于扬程基本不变, 轴功率的下降幅度远小于变频方式。由此可见, 变频调速是从源头上减少了能量需求, 而非简单地增加损耗, 其节能效果是阀门调节无法比拟的。

### 1.3 变频器的基本工作原理

变频器是实现电机调速的核心电力电子装置。其内部主要由整流单元、直流滤波单元和逆变单元三部分组成。整流单元将输入的工频交流电转换为直流电; 直流滤波单元(通常由电容组成)对直流电进行平滑滤波; 逆变单元则利用IGBT(绝缘栅双极型晶体管)等功率开关器件, 通过脉宽调制(PWM)技术, 将稳定的直流电

重新逆变为频率和电压均可调的三相交流电，供给水泵电机。通过精确控制逆变单元输出的交流电频率，即可实现对电机转速的无级平滑调节。

## 2 矿井水处理全系统水泵变频控制系统的总体架构设计

### 2.1 系统硬件架构

一个完整的矿井水处理全系统水泵变频控制系统，应是一个集成了感知、决策、执行与交互功能的有机整体。其硬件架构通常采用分层分布式设计，主要包括以下几个层次：

#### 2.1.1 现场设备层

这是系统的感知与执行终端。感知设备主要包括安装在各关键水泵（如预处理原水提升泵、深度处理高压泵、循环泵等）进出口的压力变送器、流量计以及位于各工艺水池内的液位计。这些传感器实时采集管网压力、瞬时流量和水池液位等关键过程参数<sup>[2]</sup>。执行设备则主要是分布于全厂各处的变频器及其驱动的水泵电机。对于多泵并联系统，每台水泵都应配备独立的变频器或采用“一拖多”的配置方案。

#### 2.1.2 控制层

此层是系统的大脑，通常由一台或多台可编程逻辑控制器（PLC）构成。PLC通过模拟量输入（AI）模块接收来自现场传感器的4-20mA或0-10V信号，并通过数字量输入（DI）模块读取各水泵的状态信号（如运行、停止、故障）。经过内部预设的控制程序运算后，PLC通过模拟量输出（AO）模块向各对应变频器发送0-10V或4-20mA的频率给定信号，或通过通信接口（如RS485、Modbus）直接下发频率指令。同时，PLC通过数字量输出（DO）模块控制各水泵的启停、工频/变频切换等操作。

#### 2.1.3 监控与管理层

该层为人机交互界面，通常由工业计算机（IPC）或触摸屏（HMI）构成，并运行组态软件（如WinCC, iFIX, KingView等）。操作人员可以通过HMI直观地监视全厂所有水泵的运行状态，包括各泵的运行频率、电流、电压、功率，以及各工艺段的管网压力、流量、水池液位等实时数据和历史趋势。同时，可以在HMI上进行远程启停、参数设定、模式切换等操作，并接收和确认系统发出的报警信息。

### 2.2 系统软件架构与功能模块

系统的软件功能主要嵌入在PLC和HMI中，共同协作完成各项任务。PLC程序通常采用结构化编程方法，划分为多个功能块（FB）或组织块（OB），主要包括：

（1）数据采集与处理模块：负责周期性地扫描所有AI/DI

信号，进行必要的滤波、线性化和单位换算，为控制算法提供准确可靠的输入数据。（2）分区控制算法模块：这是软件的核心，针对预处理、深度处理等不同区域的水泵群，分别设定控制目标（如原水提升泵恒液位、深度处理高压泵恒压），执行相应的控制逻辑。该模块的输出即为各变频器的频率给定值。（3）泵组管理与保护模块：负责全厂范围内多台水泵的轮询启停、故障自投、过载保护、缺相保护等功能。例如，当某区域主泵发生故障时，该模块能自动启动备用泵，并发出声光报警。（4）通信与数据记录模块：负责与HMI、上级DCS系统或其他智能设备进行数据交换，并将全系统关键运行参数和事件记录到内部存储器或外部数据库中，用于后续的分析与追溯。HMI软件则侧重于提供友好的用户界面，其功能模块包括实时数据显示、历史数据查询、报警管理、用户权限管理和系统配置等<sup>[2]</sup>。

### 3 面向矿井水处理全系统工况的变频控制策略

#### 3.1 预处理系统原水提升泵的恒液位控制策略

对于预处理系统的原水提升泵，其核心任务是维持调节池液位稳定，防止溢流或抽空。因此，最适用的控制策略是恒液位控制。PLC将液位计测得的实际液位值（PV）与操作员设定的目标液位值（SP）进行比较，得到液位偏差（e）。该偏差信号送入PID（比例-积分-微分）控制器进行运算。PID控制器的输出即为变频器的频率给定值<sup>[3]</sup>。当来水量增加导致液位上升时，PID控制器会增大输出频率，提高水泵转速，从而增加排水量，使液位回落至设定值；反之亦然。通过合理整定PID参数（ $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ ），可以实现快速、平稳、无超调的液位控制。

#### 3.2 深度处理系统水泵的恒压与协同优化控制策略

深度处理系统（如膜处理单元）对进水压力有严格且稳定的要求。因此，该区域的水泵（如高压泵、循环泵）通常采用恒压供水控制策略，其原理与前述类似，但控制目标为压力。此外，在大型系统中，深度处理单元也可能存在多台同类型水泵并联运行的情况。此时，可引入多泵协同优化控制策略。系统根据实时的总流量或压力需求，智能地决定投入运行的水泵数量及其各自的运行频率，以追求整个泵组的综合效率最高、能耗最低。一种常见的策略是“变频泵+工频泵”组合模式。系统始终保证至少有一台泵处于变频状态，作为“调节泵”负责精细的压力调节。其余泵则作为“工频泵”，根据总需求量的大小，由PLC逻辑判断是否需要启动或停止。

#### 3.3 基于前馈-反馈的全系统复合控制策略

矿井水的来水量往往具有较大的随机性和波动性，尤其是在暴雨季节或井下生产活动剧烈变化时。单纯的

反馈控制（如PID）对于这种大滞后、强扰动的系统，可能存在响应滞后、超调过大等问题。为此，可以引入前馈控制，构成复合控制系统。在这种策略中，预处理调节池的液位信号可以作为重要的前馈信号，用于提前调节原水提升泵的频率。PLC不仅根据各自工艺段的出口压力或液位进行反馈调节，还会综合考虑上游来水的变化趋势<sup>[4]</sup>。如果调节池液位快速下降，预示着即将有大流量原水涌入，系统可以提前适度提高原水提升泵频率，做好应对准备；反之，若液位持续上升，则可提前降低频率，防止水池溢流。这种“预见性”的控制，能够有效克服系统的纯滞后，使全系统的控制过程更加平稳、高效，更好地适应矿井水处理的复杂工况<sup>[3]</sup>。

#### 4 系统可靠性保障与关键技术考量

##### 4.1 系统可靠性与冗余设计

矿井水处理系统是矿山生产的保障设施，其连续、可靠运行至关重要。因此，在变频控制系统的设计中，必须充分考虑可靠性。除了前述的泵组冗余（N+1备用）外，关键的控制元件也应考虑冗余。例如，对于核心的PLC，可采用双机热备配置；对于关键的压力或液位测量点，可采用双传感器冗余，通过“三取二”或“二取一”逻辑提高测量的可靠性。

##### 4.2 谐波干扰的产生与抑制

变频器作为非线性负载，在工作过程中会产生大量的高次谐波电流，注入电网。这些谐波会污染电网质量，可能导致其他用电设备（如继电保护装置、精密仪器）误动作或损坏，同时也会增加线路损耗。因此，必须采取有效的谐波抑制措施。常见的方法包括：在变频器输入侧加装交流电抗器或直流电抗器，以平滑电流波形；对于谐波含量要求严格的场合，可加装专用的有源或无源滤波器（APF/HPF）。

##### 4.3 电机与电缆的特殊要求长期在变频器驱动下运

行的电机，会承受较高的 $dv/dt$ （电压变化率）和共模电压，这可能会对电机绕组的绝缘造成损害，并在电机轴上产生轴电流，导致电蚀。因此，建议选用专为变频应用设计的“变频电机”，其绝缘等级和轴承结构均有所加强。此外，变频器与电机之间的连接电缆长度也有限制，过长的电缆会加剧电压反射，形成过电压尖峰。若距离较远，应在变频器输出端加装正弦波滤波器或 $dV/dt$ 滤波器<sup>[4]</sup>。

#### 5 结语

水泵是贯穿矿井水处理全流程的核心耗能设备，其整体能效水平直接影响工厂的运营成本与碳排放。研究表明，基于水泵相似定律的变频调速技术，通过调节电机转速匹配动态水量需求，可从根本上消除传统阀门节流造成的能量浪费，实现显著节能。本文强调，节能优化不应局限于单一的原水提升泵，而应着眼于预处理、深度处理等全系统水泵的协同管理。围绕该技术，构建以PLC为核心，集成传感器、变频器和HMI的全厂级自动化系统，并针对不同工艺段采用恒液位、恒压控制、多泵协同优化及前馈-反馈复合控制等策略，可大幅提升系统智能化与稳定性。同时，需重视可靠性设计、谐波治理和设备选型等关键问题，保障长期安全运行。

#### 参考文献

- [1]李郁民.矿井主排水泵变频调速控制系统设计[J].机械管理开发,2026,41(03):294-296.
- [2]李连芳.矿井主排水泵采用变频前置泵提高运行效率的研究[J].机械管理开发,2023,38(07):39-41.
- [3]左彩彪.矿井主排水泵自动控制系统的设计[J].机械管理开发,2022,37(11):248-250.
- [4]贾艺栋.矿井主要水泵房水泵运行智能控制系统研究[J].机械管理开发,2021,36(12):272-273.