

某污水处理厂3#中压进水泵变频改造及节能优化

文/刘伟 张建强 王晓爽 杨自强 关鹏飞
北京城市排水集团有限责任公司

对水厂污水进水泵现有的4台中压10 kV工频进水泵的其中一台进行变频改造，以实现进水流量平滑调控，使得水量冲击对后端工艺的影响最小化。通过找到液位、泵速、流量、压力、频率以及能耗之间的关系，进行数据相关性分析，摸索基于稳定工艺调控下的最优控制，最大限度地降低能耗。

某水厂积极贯彻国家低碳绿色发展理念，紧跟国家碳中和工作部署，抓住“十四五”的发展机遇期，不断探索绿色低碳、节能降碳和生态固碳等多种途径，全力推动碳减排工作，助力水厂实现碳中和目标。本次对水厂污水进水泵现有的4台中压10 kV工频进水泵的其中一台进行变频改造，通过降压变压器将10 kV降为690 V，通过低压变频器实现变频输出，再通过升压变压器将690 V升为10 kV控制电动机转速，以实现进水流量平滑调控，使得水量冲击对后端工艺的影响最小化；继而根据水厂实际运行的栅前液位及管网前端的腾容量，进一步优化控制策略，依托于智能模块边缘计算，通过大数据建模，建立实时水泵特性曲线，最真实反映水泵状态。通过找到液位、泵速、流量、压力、频率及能耗之间的关系，进行数据相关性分析，摸索基于稳定工艺调控下的最优控制，最大限度地降低能耗。

某再生水厂设计每日处理水量是60万 m^3 /天，目前进水前端安装四台工频进水泵，两大两小，均是10 kV中压进水泵。前端储水池总体积约为4 000 m^3 。4台进水泵皆为工频运行，由于污水处理厂来水量不稳定，夜间和清晨进水量低，下午傍晚水量达到最高，如图1所示。由于储水池容积较

小，进水流量变化导致液位高于报警水位或低于停泵水位需频繁倒泵，倒泵后由于流量不连续可调对后续工艺也造成一定影响。由于10 kV中压起停泵繁琐，容易出现各种故障，使现场维护量增加，且存在起停泵时间长导致液位过高溢流或低液位停泵风险，同时起动电流过大容易造成设备起动瞬间损害，对水泵的寿命影响严重。

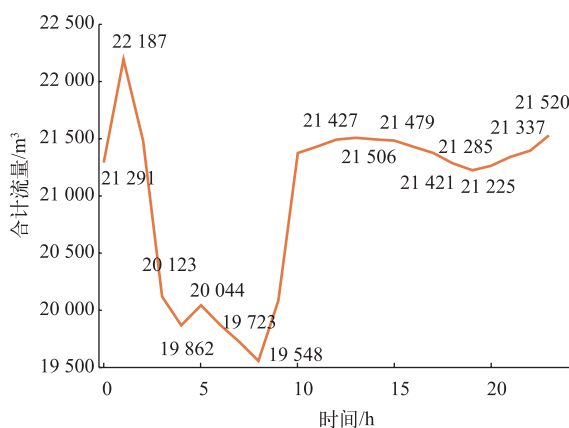


图1 水泵水量每日波动

变频改造

1. 进水泵中压变频改造分析

随着中压变频技术的发展成熟，采用拓扑高-高

结构，功率单元为串联式多电平中压变频器使其具备了更高的性价比。因此，采用中压变频控制技术进行进水泵的技术改造。

传统的中压变频控制技术是中压进线通过降压变压器将10 kV降为690 V，通过低压变频器实现变频输出，再通过升压变压器将690 V升为10 kV控制电动机转速。由于控制系统复杂，过程元器件多，故障率高，性能低，可靠性差。随着中压变频技术的成熟，平滑启动和过程控制带来更大的生产力和更快速启动，宽广的调速范围带来流量可调，通过简化电动机械和电动机的热负荷延长系统寿命，通过准确的速度和转矩控制使过程控制更平滑、快速的响应和更好稳定性、无浪涌电流、高可靠性和可利用性。

2. 中压水泵变频器工作原理

进水泵属平方转矩负载，其转速 n 与流量 Q ，压力 H 及轴功率 P 具有如下关系 $Q \propto n$ ， $H \propto n^2$ ， $P \propto n^3$ ；即流量与转速成正比，压力与转速的二次方成正比，轴功率与转速的三次方成正比。

$$\frac{P'}{P_{dn}} = \left(\frac{n'}{n_0}\right)^3 = \left(\frac{H'}{H_0}\right)^{\frac{3}{2}} = \left(\frac{Q'}{Q_0}\right)^3$$

水泵变频调速后，其压力流量曲线为平行下移曲线；根据现场水泵设备测试报告数据，得出水泵工频50 Hz及40 Hz运行曲线如图2所示。

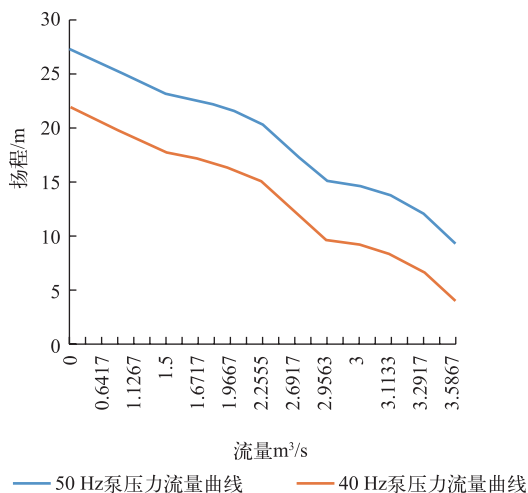


图2 不同频率下泵压力流量曲线

水泵变频调速后，其扬程及流量均会发生变化，考虑到变频调速为下调水泵输出转速，故其输出扬程及流量均会变小；水泵稳定运行的基本条件

是保证水泵在运行时能输出流量，保证流量输出的条件是水泵输出压力大于系统压力和管路损耗的总压力值。在本次变频改造中，池前后液位差不大于11 m，考虑一定的裕量，提升泵变频调速后，其最大输出扬程大于11.5 m即可满足水泵安全调速要求。

$$\left(\frac{n'}{n_0}\right)^2 = \left(\frac{H'}{H_0}\right) = \left(\frac{Q'}{Q_0}\right)^2$$

按照此公式，结合某实际改造的水泵来进行核算，最小频率是35 Hz，最小水量5 000 m³/h。

3. 中压水泵变频器工频旁路

为防止变频器损坏后，不能投入水泵，变频改造采用一拖一手动旁路方式。具体旁路方案如图3所示。基本原理是由4个中压隔离开关QS1、QS2、QS3和QS4组成，如图3所示。

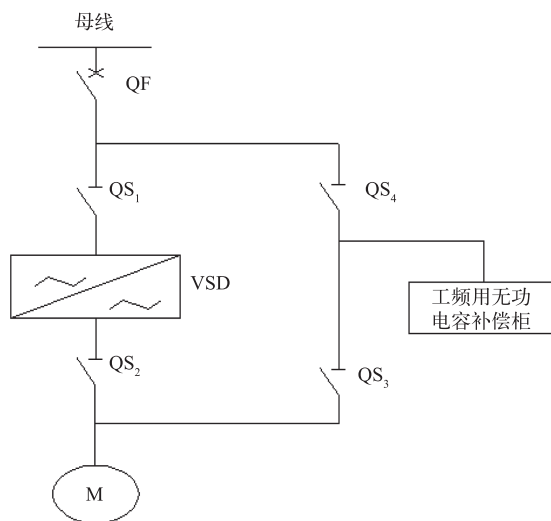


图3 工频旁路设计方案

要求QS₁和QS₄、QS₂和QS₃不能同时闭合，在机械或电气上实现互锁。变频运行时，QS₁和QS₂闭合，QS₃、QS₄断开；工频运行时，QS₃、QS₄闭合，QS₁和QS₂断开；水泵电动机工频运行时带无功补偿电容运行，变频运行时输入侧功率因数能达到0.95以上，不需要无功补偿装置。

特点：在检修变频器时，有明显断电点，能够保证人身安全，同时也可手动使负载投入工频电网运行；造价低等。上级开关柜（QF）、工频用无功电容补偿柜以及电动机（M）为现场原有设备。

进水泵变频改造后节能控制组合的摸索

传统控制技术的瓶颈是目前PID控制仍然是工业控制的主流，当控制从单回路升级到整个系统之后，缺乏变量间耦合信息的单回路控制就很难保证良好的全局性能。现代控制理论应用实时控制的神经网络非线性模型技术，针对污水泵控制环节多变量、大滞后的特征，基于模型预测控制技术MPC先进智能系统。

1. 优化控制技术节能模块

泵房机组优化运行的实质是根据相应的工况，在现有水泵机组及管路系统（水力模型）条件下，

确定一种最优的机组组合运行方案，使泵房管路系统的总能耗最小（即单位配水电耗最低）。基本原理是在一定范围内，根据当前的工况，让所有参与的泵组都尽量运行在其高效的特性曲线上。

首先是泵单泵高效特征曲线。依托于智能模块边缘计算，通过大数据建模，基于实际水利模型的机器学习，建立实时水泵特性曲线，最真实反映水泵状态。通过找到液位、泵速、流量、压力、频率和能耗之间的关系。进行相关性数据分析。如图4所示。

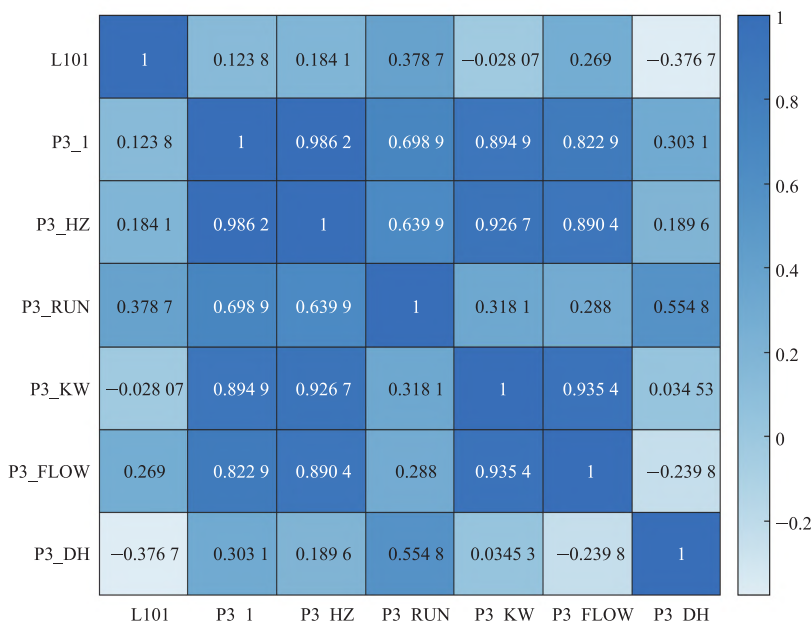


图4 Pearson相关性系数分析

智能模块采集实时运行数据，积累了泵房在不同条件下的大量数据。智能模块每天从PLC系统中采集数据，每5 s采样一次。每天产生上百万条记录。对于这样的海量数据首先进行数量清洗。通过去除无效数据，0值去除非工作状态点，去除离群值。

智能根据实际工况的变化进行实时数据校验和更新水泵的高效区间，有效避免了传统模型的弊端，传统模型无法根据设备磨损或工况变化进行模型更新。而采用智能机器学习，智能系统应用算法，从经验中学习。如图5所示。

2. 智能泵优化组合的系统原理

在此原理基础上结合实际工艺控制需要，最终

确定控制方式为时间+流量控制。如图6所示。

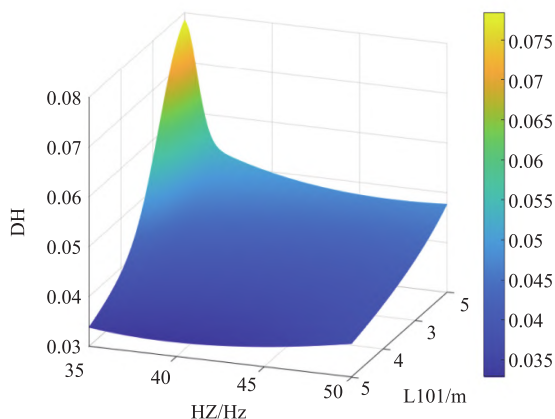


图5 3#进水泵运行的特征曲面

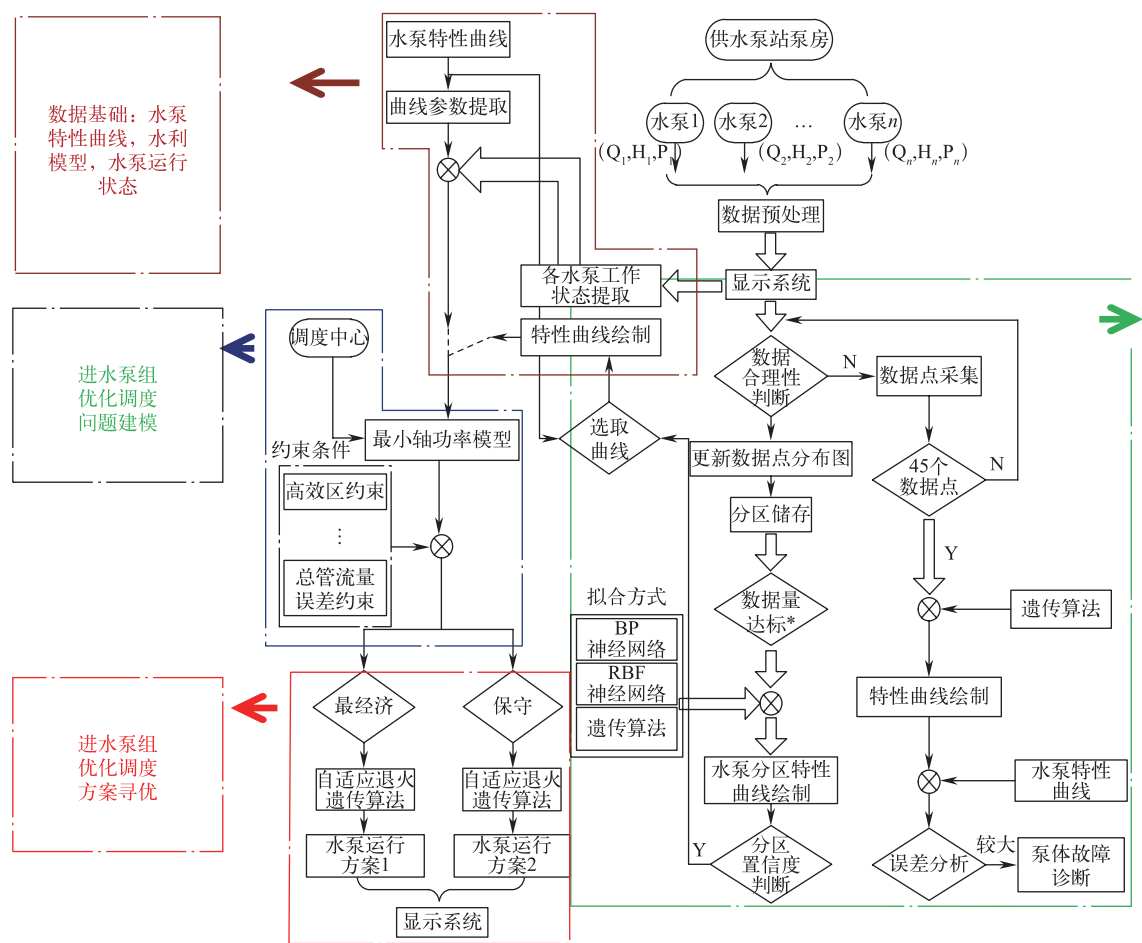


图6 泵优化组合系统原理

进水泵变频改造后节能效果

节能效果如图7所示。

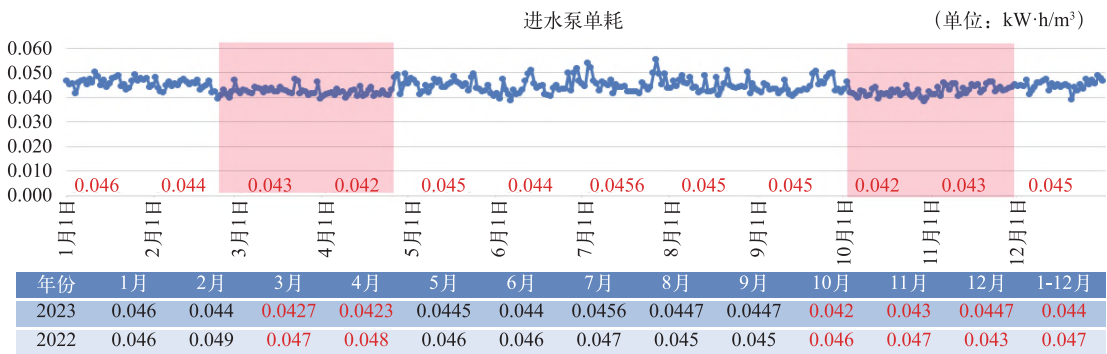


图7 优化控制两年数据对比

通过数据摸索，最终得出结论。

- 1) 通过进水泵优化调控，2023年进水泵单耗均值为0.044 kW·h/m³，较2022年同期降低6.4%，节电0.003 kW·h/m³；
- 2) 摸索最优栅前液位控制，同时优化进水泵组

合，3—4月、10—11月，处理水量48~62万t/天，进水泵单耗最低可达到0.042 kW·h/m³。

根据水厂工艺运行情况分析，采取智能流量控制方式，智能液位控制对后续工艺调控影响巨大，且综合能耗会更低。EA