

在施工过程中,抢险人员的安全防护也是不可忽视的重点。渗漏区域往往地基松软,水流急促,极易造成塌陷或陷落,施工人员需要在稳固区域作业,并采取分段、分区的布料与排水方式,减少集中荷载对坝体稳定性的影响。机械设备若参与施工,应控制重量与震动,避免因二次扰动加剧渗漏范围。施工进度必须与汛情发展同步,材料调配和运输应保持高效,滤料堆场应尽量靠近施工区,以缩短填筑时间。滤料在使用前应进行筛分,剔除过细的泥质颗粒,避免因渗透性不足影响排水效果。若采用土工布,应注意搭接位置的严密性,避免出现薄弱点导致集中渗流穿透。在强降雨和高水位条件下,施工还需考虑防止滤层被冲刷,必要时在反滤层表面增设压重措施,以保证结构的整体稳定。

在应急施工中,动态监测与信息反馈尤为关键。滤层填筑完成后,应立即观察渗漏水流量的变化、浑浊度的改善情况以及坝体表面是否出现新的渗漏迹象。监测结果若表明渗漏仍然活跃,应及时加厚反滤层或延长导排沟长度,以提高排水能力。抢险过程中的每一步措施都需根据现场实际不断修正,确保临时处置能够持续发挥作用。通过科学控制施工细节和强化过程管理,才能在复杂环境下有效遏制渗漏风险,为坝体赢得宝贵的安全保障时间。

6 临时措施应用效果的综合评价

临时反滤导排措施在汛期水库坝体渗漏应急处置中展现出独特优势,其效果评价可从控制渗流量、稳定坝体结构和降低安全风险等多个角度进行。滤层的合理分级填筑能够在短时间内截留细颗粒,阻止土体继续流失,使渗水逐渐由浑浊转为清澈,表明内部结构趋于稳定。渗流压力在导排设施作用下得到释放,坝体受力条件明显改善,局部浸润线下降,渗流坡降减缓,坝体抗剪强度相对提升,从而有效避免了管涌和流土现象的进一步发展。

在应用过程中,滤料的级配与厚度直接影响效果。颗粒分布合理的砂、砾石和碎石组合能够形成良好的梯级过渡,使渗流在通过滤层时逐级减缓,既保持畅通排水,又防止泥沙被带出。土工布的辅助使用则增强了反滤层的隔离与过滤功能,保证滤层整体连续性。导排沟和排水管道的布设使渗漏水集中导出坝外,降低了坝脚区域的水位与孔隙水压力,避免软化带扩大和坝坡失稳。施工完成后,监测数据普遍显示渗流量得到有效控制,渗漏范围不再扩展,表明措施的应急价值明显。在防冲刷方面,临时措施通过压重保护与

分层滤料填筑,使反滤层具备较强稳定性,即便在洪水高位运行或连续降雨条件下,也能维持基本功能。渗漏点周边土体在反滤作用下逐渐固结,导排系统保持排水通畅,坝体整体安全系数有所提高。材料使用的经济性与就地取材特性,使措施能够快速实施,确保在险情高发时具备可操作性和时效性。

在运行管理层面,效果评价还体现在应急监测与动态调控的配合。渗漏水水质由浑浊变清、渗流量逐步趋稳,是滤层拦截与导排功能正常的直接表现。当监测数据显示坝体内部压力下降、浸润线趋于平稳时,说明临时措施已发挥控制效果。若在渗漏量增长阶段及时增设滤料或加固导排沟,措施的持续性和可靠性进一步得到验证。这种灵活调整机制,使临时措施不仅具备应急处置功能,还能为后续长期治理创造条件。综合来看,临时反滤导排措施在实际应用中能够快速遏制渗漏发展,缓解坝体安全隐患,体现出较高的应急适应性和工程有效性。其成效主要体现在稳定土体、改善渗流条件、保障坝体安全运行等方面,为水库在汛期的安全度汛提供了关键支撑。

7 结语

汛期水库巡查中发现的坝体渗漏点具有突发性、隐蔽性和危险性,若不能及时采取有效处置,将对工程安全构成严重威胁。临时反滤导排措施因其材料易得、操作便捷和效果迅速而成为应急抢险的重要手段。通过合理的滤料级配、科学的导排布设和动态的现场监测,不仅能够有效降低渗流压力,还能稳定坝体结构,阻止细颗粒流失。应急施工中的细节把控和过程管理进一步增强了措施的稳定性和可靠性,为坝体安全运行提供了有力保障。

参考文献

- [1] 王志强. 水库大坝渗漏险情应急反滤措施研究[J]. 水利科技, 2021, 49(4): 112-117.
- [2] 刘建国. 汛期水库巡查与渗漏点应急处置方法探讨[J]. 防汛抗旱, 2022, 32(3): 85-90.
- [3] 陈晓峰. 大坝渗流控制中临时反滤措施应用分析[J]. 中国水利, 2023, 41(6): 56-61.
- [4] 李海波. 水工建筑物渗漏险情的快速处置与滤排技术[J]. 人民长江, 2021, 52(9): 103-108.
- [5] 周立新. 水库汛期大坝安全巡查与应急处置措施研究[J]. 水利工程学报, 2022, 53(2): 72-79.

The Experience That the Inlet Pumps of Sewage Plant Operate in a Constant Water Level Based on Frequency Regulation

Ruilu Lu¹ Wenyi Dong² Zhiyuan Wang¹

1. Guangdong Haiyuan Environmental Protection Technology Co., Ltd., Zhuhai O'water Reclamation Management Co., Ltd., Zhuhai, Guangdong, 519000, China

2. Harbin Institute of Technology(Shenzhen), Shenzhen, Guangdong, 518055, China

Abstract

When the inflow of a sewage plant is within its design capacity, accurately controlling the water level in the sump of the inlet pumping station and ensuring that its fluctuation does not exceed the maximum design fullness of the inlet pipe is crucial for stable operation. Taking a sewage plant in southern China as an example, this paper elaborates on the technical path to achieve constant water level operation through the transformation of the electrical and automatic control system of the inlet pumping station. Based on the pump characteristic curve and liquid level feedback, a frequency automatic adjustment model is constructed to make the pumping capacity of the inlet pump group match the real-time inflow. Finally, the sump level fluctuates stably within $\pm 0.1\text{m}$, and the inlet pipe maintains a low water level for a long time. After the transformation, it not only solves the problems of pipeline siltation and excessive pressure caused by high water level operation of the inlet pipe but also reduces energy consumption and operation and maintenance costs. This paper systematically sorts out the transformation background, technical principles, implementation measures, and operation effects, providing a replicable technical reference for similar sewage plants.

Keywords

Frequency regulation; Constant water level control; Sewage plant automatic control system; Pump characteristic curve

基于频率调节实现污水厂进水泵房恒液位运行技术与实践

陆瑞榴¹ 董文艺² 王志远¹

1. 广东海源环保科技有限公司, 珠海海源再生水有限公司, 中国·广东 珠海 519000

2. 哈尔滨工业大学(深圳), 中国·广东 深圳 518055

摘要

当污水厂进水量处于设计能力范围内时, 精确控制进水泵房集水池液位, 确保其不超过进水管最大设计充满度, 是保障污水厂合规运行和上游管网流速正常的关键。本文以某污水厂为例, 详细阐述通过进水泵房电气自控改造实现恒液位运行的技术路径: 基于水泵特性曲线与液位反馈, 构建频率自动调节模型, 使进水泵抽水量实时匹配进水流量, 实现集水池液位在 $\pm 0.1\text{m}$ 范围内稳定波动, 且进水管长期保持低水位运行。改造后不仅解决了进水管高水位运行导致的管网淤积, 还降低了能耗与运维成本。本文系统梳理改造技术原理、实施措施及运行效果, 为同行提供可复制的技术参考。

关键词

频率调节; 恒液位控制; 污水厂自控系统; 水泵特性曲线

1 改造背景

1.1 污水厂概况

南方某污水厂设计处理规模为10万 m^3/h , 服务辖区面积约50 km^2 , 管网总长超180 km , 处理污水涵盖居民生活区、大学园区和商业中心的生活污水, 以及工业园区工业废水。进水泵房作为污水厂的咽喉, 承担着将管网污水提升至后续

处理单元的关键任务。进水泵房设计配置4台潜水泵(3用1备), 单台额定流量1400 m^3/h , 扬程15 m , 配套45 kW 变频器, 进水泵房采取液位分级自动控制水泵开停及手动设定频率的传统控制模式。

1.2 改造前存在的核心问题

在改造前, 进水泵房虽然能满足基本运行需求, 但长期面临以下问题:

进水管高水位运行: 由于管网沿线存在中途泵站提升与重力流的混合进水, 部分时段如早高峰和晚高峰进水管充满度达80%-90%, 超过进水管允许的设计最大充满度

【作者简介】陆瑞榴(1981-), 男, 中国广东珠海人, 硕士, 高级工程师, 从事水污染治理研究。

70%。同时，由于污水厂进厂管处于高水位非常容易引发上游管网溢流风险，影响周边环境；以及进水管高水位运行时降低污水在管网中的流速，加剧管网淤积问题。

集水池液位波动大：在传统控制模式下，液位在2.5m-4.8m区间剧烈波动，波动幅度达2.0m。液位波动易触发水泵高频启停，单日最高启停次数达15次/小时，导致电机损耗加剧，2023-2024年水泵维修频次同比增加40%。

工艺控制难度显著加大：由于进水泵频繁开停，造成进水瞬时流量波动大，后续生化池曝气量和污泥回流量相应地也要频繁调整，以及深度处理单元的药剂投加量也需要实时调整，一旦后续单元设备出现不能同步调整时，将很可能造成出水水质超标。

1.3 改造方案的选择

保持污水厂进水管充满度在合理低水平，对保证污水管网正常运行和改善污水管网管养大有裨益，初期曾提出两种解决方案：

方案一：新建进水泵房：计划新增2台大流量水泵及新建配套集水池，设计投资约400万元，工期6个月。但该方案存在弊端：一是厂区可用建设用地不足；二是管道施工接驳时影响污水处理；三是投资回收期超10年，经济性较差。

方案二：电气自控改造：通过优化现有水泵的变频控制逻辑，实现频率实时调节，投资约35万元，工期仅15天，并且可以实现分阶段施工，不影响正常运行。对比可知，方案二更符合低成本、高效率、少停产的改造需求，最终被选定为实施方向。

2 恒液位控制的基本原理与技术框架

2.1 核心控制逻辑

恒液位控制的本质是通过实时调节水泵抽水量，使进水泵房集水池的进水瞬时流量等于进水泵组瞬时抽水流量，从而维持液位稳定。其核心逻辑可概括为：以液位偏差为输入，以水泵频率为输出，通过数学模型计算频率调节量，实现闭环控制。

2.2 关键数学模型推导

2.2.1 水泵扬程计算模型

水泵扬程(H)是克服静扬程与管路损失的总能量，计算公式如下：

$$H = H_{ST} + \sum H \quad \text{公式(1)}$$

• 静扬程(H_{ST})：指集水池水位与压水管出口细格栅前水位的高差。经实测，泵房底部至细格栅设计水位的垂直距离为11.04m，因此：

$$H_{ST} = 11.04 - H_i$$

• 其中， H_i 为集水池实时液位高度(m)。

• 管路损失($\sum H$)：包括吸水管路的沿程阻力、局部阻力及压水管路的损失。通过水力计算软件模拟，结合管道

材质流速及配件参数，最终确定 $\sum H$ 计算结果为0.75m(偏差需控制在 $\pm 0.05m$ 内，否则会导致频率调节误差超5%)。

2.2.2 扬程 - 流量特性模型

变频水泵的扬程(H)与流量(Q)呈二次函数关系，需通过实测数据拟合。在50Hz额定工况下，对单台水泵进行7组工况测试，数据如下：

测试序号	扬程 H (m)	流量 Q (m³/h)
1	6.0	1477.9
2	6.8	1416.1
3	7.5	1358.1
4	8.2	1297.8
5	8.9	1236.0
6	9.5	1183.0
7	10.0	1190.1

通过最小二乘法拟合，得到关系式：

$$Q = -4H^2 - 34H + 1790 \quad \text{公式(2)}$$

其中 $R^2=0.998$ ，满足工程精度要求。

该公式需存储于自控系统PLC中，作为流量实时计算的基础。若更换水泵型号，需重新进行工况测试并拟合新公式，根据实践建议每台泵单独校准，误差可控制在 $\pm 3\%$ 内。

2.2.3 频率 - 流量调节模型

根据水泵相似定律，在忽略效率情况下，同一台水泵在不同频率下的流量与频率成正比，即：

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{f_1}{f_2} \quad \text{公式(3)}$$

由此可推导出：

水泵在1Hz对应的流量： $Q_{1Hz} = Q \div 50$ (Q 为50Hz时的流量)；

频率调节量(Δf)与流量偏差(ΔQ)的关系：

$$\Delta f = \Delta Q / Q_{1Hz} = \Delta Q \times 50 \div Q$$

基于变频泵不同频率时特性曲线沿Q轴平移的假设，计算在微调液位区间时频率的变化幅度 Δf ，即 $\Delta f = \Delta Q \times 50 / Q$ ，其中Q通过 $Q = a \cdot H^2 + b \cdot H + c$ 代入实时扬程H来计算。

2.2.4 液位偏差 - 流量偏差换算模型

集水池液位的变化直接反映进水与抽水的流量差。设集水池平面面积为S，经实测为60m²，则单位时间内的液位变化量与流量偏差的关系为：

$$\Delta Q = (H_i - H_0) \times S / T \quad \text{公式(4)}$$

其中： H_0 为初始液位(T=0时的液位)；

T为累计时间(单位：h，每10min清零重新计算，避免误差累积)；

结合公式(2)(3)(4)，最终得到频率调节量的计算式：

$$\Delta f = \frac{(H_i - H_0) \times 60 \times 50}{T \times (-4H^2 - 34H + 1790)} \quad \text{公式(5)}$$

3 恒液位控制的实施措施

3.1 液位区间划分与调节策略

为实现精细化控制，将集水池液位划分为5个区间（假设目标控制液位范围：

$H_{低}$ 至 $H_{高}$ ， $H_{低}$ 和 $H_{高}$ 可通过上位机调整），并制定对应的频率调节规则如下表所示。定义同时有多台变频泵运

行，其顺序靠前的泵频率为50Hz运行，由顺序靠后的水泵进行变频调节。液位是上升增量为正值，液位下降增量为负值。

3.2 自控系统硬件配置

为实现上述控制逻辑，需配置以下硬件设备，具体型号及参数如下：

表 2

液位区间	定义范围 (m)	频率调节策略	调节目的
微调区间	当水位处于 $H_{低}-0.05m$ 至 $H_{高}+0.05m$ 时	按公式(5)实时计算 Δf (步长 0.1-0.5Hz)	精准控制，维持液位稳定
小粗调区间	当水位处于 $H_{高}+0.05m$ 至 $H_{高}+0.1m$ 时或者处于 $H_{低}-0.05m$ 至 $H_{低}-0.1m$ 时	固定 $\Delta f=1Hz$ ，每 5s 调节 1 次	快速纠正中等偏差
大粗调区间	当水位处于 $H_{高}+0.1m$ 以上或者处于 $H_{低}-0.1m$ 以下时	固定 $\Delta f=1.5Hz$ ，每 5s 调节 1 次	紧急抑制液位大幅波动
水泵启动阈值	当前位变频泵频率上升至 50Hz 时	当变频泵达 50Hz 且液位仍上升时，自动开启下一台泵 (初始频率 42Hz)	避免液位超限
水泵停运阈值	当前位变频泵频率降低至 40Hz 时	当变频泵降至 40Hz 且液位仍下降时，按顺序停运水泵 (剩余泵从 46Hz 开始调节)	避免水泵空转

表 3

设备类型	型号 / 规格	数量	作用
液位传感器	E+H 液位计，测量范围 0-13m，精度 $\pm 0.2\%FS$	2 台	实时采集集水池液位 (采样频率 1 次 / 10s)
PLC 控制器	西门子	1 台	执行控制逻辑计算，输出频率调节指令
变频器	施耐德 55kW 变频器，矢量控制，调速范围 0-50Hz	4 台	接收 PLC 指令，调节水泵电机频率

3.3 水泵选型与运行保障

恒液位控制对水泵性能要求较高，需满足以下条件：

低气蚀余量：所选进口潜水泵的必需气蚀余量 (NPSHr) $\leq 3.0m$ ，确保在最低液位 1.1m 时不发生气蚀，实测运行中未出现气蚀噪声。

宽频运行能力：电机需支持 35-50Hz 长期运行，测试表明，40Hz 以下运行时效率下降约 5%，但仍满足经济性要求。

冷却系统：内置循环冷却装置独立于泵体水流，避免低液位时因水量不足导致电机过热，连续运行温度稳定在 65°C 以下。

4 运行效果分析

4.1 液位控制精度

改造后连续运行 6 个月 (2023 年 7 月 - 12 月) 的监测数据显示：液位波动范围控制在 2.9-3.1m (目标 $\pm 0.1m$)，达标率 99.2%；单日最大波动幅度 0.18m，改造前为 2.3m。高设值以上累计运行时间仅 4.2h/月，改造前为 150h/月。

4.2 进水管运行状态改善

进水管充满度稳定在 40%-50% (设计最大充满度

70%)；管网溢流次数：改造后汛期溢流次数大幅度减少。管道淤积情况，管网公司反馈，通过 CCTV 检测，改造后管网沉积物厚度平均减少 3cm 左右 / 半年，改造前为 8.0cm 左右 / 半年。同时，由于实现保持污水管网低水位运行，保障服务片区内排水最不利点污水排放通畅，污水不会溢流。

4.3 能耗与运维优化

由于实现进水泵组处于恒定液位运行，进水泵实际扬程相对固定，进水泵房运行单位电耗从 0.056kWh/m³ 降至 0.052kWh/m³，降幅 7% 左右。水泵启停次数：从单日最高 15 次 / 小时降至 2-3 次。2024 年下半年维修费用约 2 万元，较 2023 年同期下降幅度较大。

4.4 对后续工艺的影响

因水流速度稳定，避免了杂质穿透，栅渣去除率有较大的提升；沉砂池处理效果：0.2mm 以上砂粒去除率也有较大的提升，水流扰动减小，沉淀更充分。

5 结语

通过进水泵频率自动调节实现恒液位运行，是一种低成本、高效率的污水厂优化技术。南方某污水厂的实践表明，该技术可将集水池液位波动控制在 $\pm 0.1m$ 内，控制精度提