◆设备、控制与安全生产◆

基于磁性浮球液位控制系统的生活污水回用优化改造

焦德丰，苏春霞

（湖北大峪口化工有限责任公司，湖北 钟祥 431910）

［摘 要］针对某化工装置生活污水回收系统中存在的液位监测缺失、水泵运行不稳定及资源回用效率低等问题，开展以液位自动控制为核心的系统改造。通过对现场运行数据的调研与故障分析，明确液位控制失效为导致泵频繁抽空、外溢及损坏的主要原因。在综合分析多种液位控制技术方案的基础上，提出并实施基于磁性浮球、干簧管和电磁继电器的非接触式液位自动控制系统。项目实施后，系统实现了水泵启停的自动化控制，回收泵连续运行5个月无故障，生活污水回用率由60%提升至95%以上，累计节约工艺水费用约2.8万元。该系统结构简单、成本低廉、适应性强，适用于空间受限、运行环境恶劣的工业场景，具有良好的推广应用前景。

［关键词］液位自动控制；污水回收；工艺节水；故障率控制

［中图分类号］TU991 ［文献标志码］B ［文章编号］2097-4566（2025）09-0123-06

Optimization and transformation of domestic wastewater reuse based on magnetic float level control system

JIAO Defeng, SU Chunxia

(*Hubei Dayukou Chemical Co., Ltd., Zhongxiang* 431910, *China*)

Abstract: Aiming at the lack of liquid level monitoring, unstable pump operation and low efficiency of resource reuse in the domestic wastewater recycling system of a chemical plant, a system transformation study centered on automatic liquid level control is carried out. Through the research and fault analysis of the field operation data, it is clear that the failure of liquid level control is the main reason leading to frequent pumping, overflow and damage to the pump. On the basis of comprehensive analysis of a variety of level control technology solutions, a non-contact level automatic control system based on magnetic float, reed switch and electromagnetic relay is proposed and implemented. After the implementation of the project, the system realizes the automatic control of pump starting and stopping, the recycling pump runs continuously for 5 months without failure, the reuse rate of domestic sewage is increased from 60% to more than 95%, and the cumulative saving of process water costs is about 28 000 RMB Yuan. The system has simple structure, low cost, strong adaptability and is suitable for industrial scenarios with limited space and harsh operating environment, and has good prospects for popularization and application.

Key words: automatic level control; wastewater recycling; process water saving; failure rate control

水资源是工业生产的重要支撑要素之一，在化工、电力、冶金等流程型企业中具有不可替代的作用[1]。随着工业化水平不断提升，单位产品水耗指标虽逐年下降，但总用水量依然处于高位，水资源紧缺问题日益突出。为此，国家陆续出台多项政策文件，推动工业节水体系建设，如《“十四五”节水型社会建设规划》《工业水效提升行动计划》等，均强调推进企业内部非常规水源（如中水、雨水、生活污水等）开发利用，构建循环利用体系，优化用水结构，提升用水效率[2]。

湖北大峪口化工有限责任公司（以下简称公司）在水资源使用结构中表现出显著的集中性特征。其中，硫酸生产部（以下简称部门）作为重点生产部门之一，年均一次水用量占公司总用水量的20%以上，是公司用水量最大的单元。由于受现有

［收稿日期］2023-12-05； ［修回日期］2025-05-10

［作者简介］焦德丰(1977-)，男，湖北钟祥人，工程师，主要从事化工自动化及仪表技术管理工作。

装置工艺路径、设备布局和产品结构限制，总体用水规模难以在短期内实现压缩，传统的“节流”手段效果有限。基于此背景，从“开源”角度出发，挖掘非常规水源的替代潜力，成为提高资源利用率、减少运行成本的可行路径。

通过对装置内多个工艺用水点的技术指标分析可知，各工段对水质的要求存在较大差异。部分非关键性工序，如设备冲洗、非接触冷却等环节，其对水中化学需氧量（COD）、固含量、电导率等参数容忍度较高，具备使用预处理后生活污水的技术基础[3-4]。第三方检测机构对现场取样化验结果表明，生活污水经二级处理后主要水质指标普遍优于回用循环水，并在一定程度上接近工艺补水的最低控制要求，具备作为非关键工序补水来源的可行性。

目前，公司内生活污水由各主装置统一排入污水处理站，经过初沉、生化、二沉、消毒、过滤等工序处理后，部分被回用于生产系统。然而，调研发现其回用效率偏低，远未达到设计能力，实际回送量不足额定负荷的60%。初步判断其瓶颈环节集中在“生活污水回收泵运行不稳定”方面，主要表现为泵频繁出现抽空、外溢、空转甚至烧毁等现象，导致污水不能稳定回送，影响整体系统运行。因此，开展以“生活污水回收泵液位自动控制系统改造”为核心的技术优化工作，对于提升非常规水源利用率、推动装置节水型管理具有重要的工程实践意义和推广价值。

1　问题描述

污水处理系统作为连接“废水处理”与“资源回用”的桥梁，其稳定运行直接关系非常规水源的有效利用[5]。在当前运行模式下，厂区生活污水由各主装置排入集中污水处理站，经预处理后进入回用调节池，再通过污水回收泵输送至系统工艺补水段。根据工艺设计，生活污水最大回送能力为4.8 t/h。然而，实际运行数据显示，该系统近年回送量仅为2.86 t/h，回收利用率不足60%，系统运行效率远低于设计预期。

为查明问题根源，对污水回收系统进行了为期两周的连续跟踪与现场调查，分析发现其主要障碍并非出现在污水处理能力不足，而在于生活污水回收泵频繁异常停机。据统计，2020年11月至2021年1月期间，回收泵累计发生异常停机10次，其中因抽空或外溢造成的非计划停机占比高达90%。

经分析，该类故障普遍由液位监测缺失导致。由于污水回收槽位于地下，现场操作人员无法直接观察液位变化，且原系统未配置液位检测装置，水泵启停完全依赖人工判断。当液位低于泵吸入口时启动水泵，将引发泵体抽空空转，若液位过高而未及时启动水泵，则可能导致槽体溢流，均会造成设备损伤与运行异常。此外，原有控制系统采用简单继电器联动结构，缺乏对水位动态变化的感知能力，亦无报警或保护逻辑配置，无法适应液位波动频繁的应用场景。设备本体运行电流亦无监测手段，导致操作人员无法有效预判泵运行状态，进一步加剧设备损耗与维修频率。综上所述，提升污水回收泵运行稳定性的关键，在于构建一套响应灵敏、结构简单、运行可靠的液位自动控制系统，弥补液位监测盲区，进而实现水泵启停智能化控制。

2　方法提出

针对现有系统存在的液位监测缺失、水泵启停失控等问题，笔者在调研相关液位控制技术基础上，结合装置实际运行环境，提出3套技术可行、经济适用的改造方案。各方案的核心目标是实现水泵启停与液位变化的联动控制，提升控制精度，降低设备故障率。

2.1　基于导电探针与液位继电器的液位控制系统

张福学[6]提出了一种基于36 V交流电源配合导电探针的液位控制方案。该方案通过设置高、低水位导电探针，借助水体导电性实现继电器触发控制，从而启停潜水泵，系统结构简单、响应速度快，适合低成本快速部署场景。

方案1借鉴其思路，原理如图1所示，将高位探针（A）和低位探针（B）固定于排水槽壁内侧，构成一个自动排水控制回路。当液位升高接触高位探针（A）时，形成电导通路，为液位继电器提供信号，继电器吸合，水泵通电开始排水；当液位降低至低位探针位置（B）时，电路断开，继电器断开，水泵停止工作。该系统利用低压控制电路

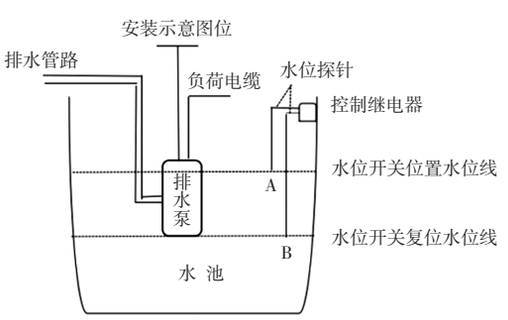

图1　方案1装置原理

Fig. 1　Schematic diagram of option 1 device

确保基础安全，具备一定应用基础。

然而，由于导电探针须长期浸泡于污水介质中，极易受到腐蚀、污物覆盖影响，导致检测精度下降，且探针固定后难以灵活调整控制点。此外，电极系统对液体电导率要求较高，实际水质波动可能影响控制稳定性。

2.2　基于液位传感器与电磁阀的闭环控制系统

殷国友等[7]设计了一种液位监测与控制一体化系统，通过布设液位传感器Ⅰ、Ⅱ及电磁阀Ⅰ、Ⅱ，配合电子点火器与交流接触器，实现对液位信息的实时采集与水泵、电磁阀联动控制。该系统结构较为复杂，但具备较高的精度和自适应性。

方案2将该设计思路进行简化，原理见图2，在排水槽中布设2组液位传感器作为高、低报警点，将其输出信号输入控制逻辑电路，通过交流接触器控制水泵启停，达到自动化控制目的。必要时可引入PLC（可编程逻辑控制器）或定制控制器提升系统灵活性。

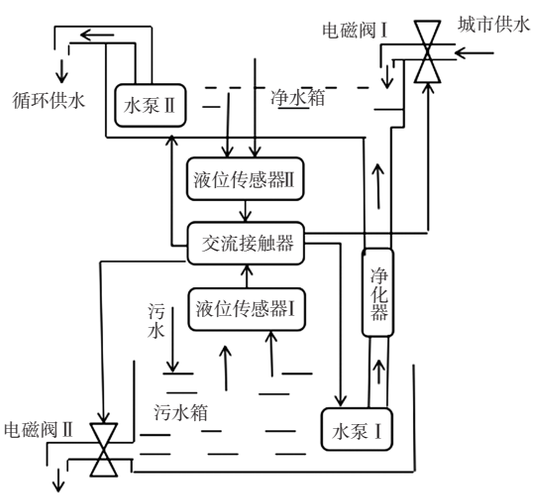

图2　方案2装置原理

Fig. 2　Schematic diagram of option 2 device

该方案的优点在于测量精度高，水质适应范围广，可集成至工业自动化平台中。然而，其劣势同样明显：控制元件（如电磁阀）功率较高，动作频繁将导致可靠性下降；系统维护工作量大，现场施工布线复杂，成本高。因此，虽在技术性能上较为优越，但在简化改造目标下不具优势。

2.3　基于磁性浮球与干簧管的非接触式液位控制系统

在调研多个生产单元液位控制系统的基础上，结合装置结构、运行环境及维护条件，自主设计并提出一种基于磁性浮球与干簧管的非接触式液位自动控制系统。该方案在吸收工业现场通用液位报警原理的基础上[8-9]，面向本系统需求进行优化构型与材料选型，具有结构紧凑、响应灵敏、适应性强、成本低廉等特点。

方案3装置原理见图3。该系统利用磁性浮球随液位升降带动内置永磁体移动，从而在特定位置触发设置于无缝钢管内的干簧管，实现对液位高限与低限的精准识别。控制信号经由电磁继电器进行逻辑判断，驱动回收泵启停，从而实现全自动运行控制。

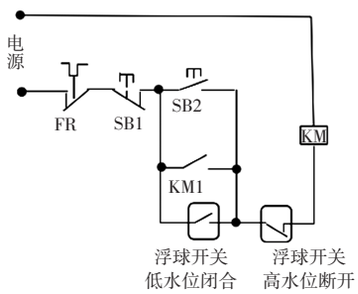

图3　方案3装置原理

Fig. 3　Schematic diagram of option 3 device

系统结构包括：304无缝不锈钢钢管导向体、两个干簧管（高限/低限）、磁性浮球、电磁继电器及控制箱等。干簧管分别焊接于导线上，绝缘封装后固定于导管内部；磁性浮球安装于导管外部，可随液位浮动，触发相应的干簧管通断信号。

与传统接触式液位控制装置相比，该方案具有以下显著优势：（1）控制点可通过浮球与干簧管的位置自由设定，调整灵活；（2）系统完全封闭，检测部件不直接接触介质，耐腐蚀、抗污染；（3）控制元件动作次数少，结构简单，维护工作量小；（4）成本低廉，适合规模化推广。

3　方案讨论及确定

为确定最适合本装置现场条件的液位自动控制方案，基于前述3种方案的结构特征、控制原理及运行特性，进一步从安全性、可靠性、控制精度、施工可行性、经济性等多个维度进行系统比较与评估，明确最终推荐实施方案。

3.1　技术性能与适应性对比

结合污水回收泵的运行特点与液位控制系统需求，3种方案的技术性能对比见表1。

由表1可知，方案2在控制精度方面具有显著优势，适用于液位变化频繁、波动范围大的动态系统；但其系统构成复杂、布线工作量大，且电磁阀长期高频启停可能引发疲劳失效，不适宜在回水量波动较小、空间受限的地下排水槽环境中部署。方案1因结构简单，理论上具备一定实用性，但其显著劣势在于对液体电导率的依赖，且探针在污水等

表1　不同液位控制方案性能对比

Table 1　Performance comparison of different level control schemes

项目	方案1	方案2	方案3
检测方式	接触导电检测	电信号反馈	磁场感应非接触
控制响应速度	中等	快速	快速
精度及稳定性	易受水质影响	精度高,稳定性好	稳定性好
电气安全性	中等(36 V电源)	高(弱电控制)	高(弱电控制)
安装与调试难度	探针固定复杂	系统布线复杂	安装简便
防腐蚀性能	探针易腐蚀	良好	极佳
成本估算	约500元	约6 000元	约400元
适应性与通用性	较差	一般	良好

高污染介质中极易因结垢与腐蚀，导致误触发率高。再者，探针固定点不可调节，使得液位控制阈值缺乏灵活性，工程适应性较差。相较而言，方案3综合性能优越，其核心元件（干簧管、磁性浮球、继电器）均可在室温下长期稳定运行，受外界干扰因素较少，控制逻辑明确，且维护简便，特别适合地埋式结构、操作空间有限、设备布设密集的应用场景，具备高度可推广性。

3.2　安全性与维护性分析

从电气安全角度考虑，方案1虽采用36 V交流电源，但在潮湿腐蚀性强的地下环境中仍存在电击与电弧风险。方案2涉及多路强弱电混合，施工规范与防护要求更高，不适宜在非密闭电控室中长期运行。方案3则通过磁性浮球与干簧管的非接触式感应设计，整个控制过程不依赖于液体导电性，也无须与水体直接接触，避免了腐蚀、污染、电击等隐患；配套的电磁继电器为弱电系统，控制电流仅需数十毫安，可有效隔离控制与负载电路，提升安全性与可靠性。从维护角度来看，方案3维护周期长、元件通用性强，可在不更换管道或泵体的前提下完成系统升级，运维人员只需通过控制箱即可完成检测元件的替换与调试，极大减少停机时间。

3.3　实施可行性与现场适配性评估

本项目控制对象——生活污水回收泵，位于地下排水槽内，空间狭小、湿度大、检修困难，原控制系统未预留远程控制与自动检测接口，仅保留基本启停接触器。考虑到改造过程中须尽量降低对现有系统运行的干扰，控制系统必须满足“结构紧凑、接线简洁、施工周期短”的要求。方案1与方案2均需对排水槽本体或电气系统进行较大改动，且导线多，接口复杂，不利于在有限时间内完成无扰动施工。而方案3系统由4个主要模块组成：磁性液位计、控制继电器、供电电源及控制箱体，其中磁性液位计仅需通过两个固定卡箍即完成安装；控制线少，可通过现有线槽铺设，调试完成后即可投入运行。综上，从施工便利性、接口兼容性与环境适应能力方面考虑，方案3明显优于其他两种设计，具备立即投入应用的工程条件。

3.4　推荐方案结构设计说明

基于上述综合分析，确定选用方案3——“磁性浮球+干簧管+电磁继电器”液位自动控制系统作为本次技术改造的实施路径。系统设计结构见图4。

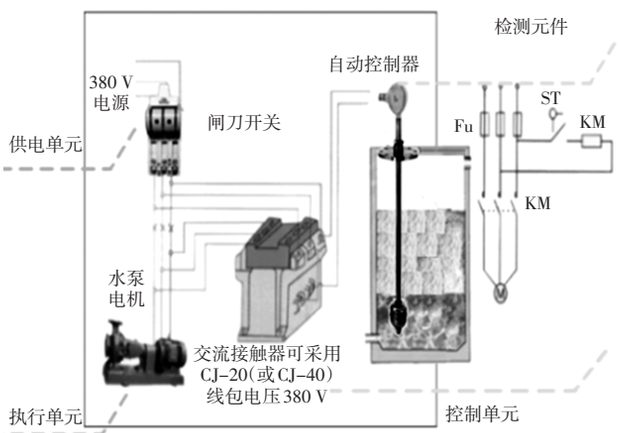

图4　高低液位自动控制装置系统组成

Fig. 4　Composition diagram of high and low liquid level automatic control device system

系统由供电单元、检测元件、控制单元与执行单元构成。供电单元，提供稳定的直流控制电压，保证控制回路可靠运行；检测元件，由304无缝不锈钢钢管、磁性浮球与高低限干簧管构成，完成液位感应与信号输出；控制单元，通过电磁继电器响应干簧管通断状态，实现信号逻辑判断；执行单元，控制水泵电源通断，实现自动启停动作。

该系统在运行过程中，液位上升带动浮球上移，当接近设定的高位报警点时触发干簧管接通，控制单元响应后启动水泵；当液位下降至低位报警点时，另一路干簧管被触发，控制系统立即关闭水泵，防止抽空运行。系统各关键点参数可根据实际运行液位波动范围调整，最大限度适配排水槽容积与泵吸口高度。经初步安装调试，确定理想液位控制阈值为：高报警点对应液位高度为排水槽满水位的95%，低报警点为25%。

3.5　成本评估与经济性分析

方案3主要部件成本构成见表2。

合计成本约410元，相较于传统液位传感器系统（成本约6 000元），该方案成本仅为其1/15，且在功能满足、适应性与运维便捷性方面更具优势，

表2　方案3主要部件成本

Table 2　Cost of main components in plan three

部件	个数	成本/元
控制箱及内部配件(旧件改装)	1	250
11A干簧管	2	40
304磁性浮球	1	50
电磁继电器	2	20
电缆线材及安装辅材		50

具有极高的性价比和现场实施价值。

4　结果分析

为验证液位自动控制系统改造的实际运行效果，对改造完成后的系统运行情况进行了为期5个月的跟踪测试。通过对生活污水回收泵运行状态、故障频率、工艺补水流量及回用效率等关键指标进行系统性采集与统计分析，量化评估项目实施的有效性与稳定性。

4.1　装置运行状态对比

改造完成后，污水回收泵启停控制全面实现自动化，液位变化控制点稳定可靠，系统响应时间平均为3.6 s，远小于人工判断平均响应时间(约90 s)。同时，因液位控制精准，泵启动后始终处于满液工作状态，避免了抽空空转现象。改造完成后（7月至11月）系统连续5个月运行稳定，未发生任何形式的泵体异常、停机、报警事件，基本消除了因液位控制不当而引发的运行中断风险。

4.2　工艺补水耗量与回用效率提升

选取2021年7月至11月（改造后）为观测期，对比分析该期间系统工艺补水总量、生活污水回用量与平均用水强度，并据此计算生活污水回收利用率。回用率按式（1）计算，监测结果见表3。

$$回用率=\frac{生活污水回收量}{生活污水回收量+工艺补水量}\times 100\%。\qquad(1)$$

表3　系统工艺补水及生活污水回用数据

Table 3　Data for system process water replenishment and domestic sewage reuse

月份	工艺补水量/t	用水强度/(t·h^{-1})	污水回用率/%
7月	142.5	0.198	98.9
8月	140.4	0.195	97.5
9月	126.1	0.175	87.5
10月	138.1	0.191	95.8
11月	139.5	0.193	96.8

生活污水平均回用率达到95.3%，较改造前提升超过35百分点，且系统平均补水强度明显下降。改造后系统运行状态平稳，未受高温、设备维护等因素干扰，说明液位自动控制系统具备良好的环境适应性与运行鲁棒性。

4.3　控制性能与响应测试

为验证系统响应灵敏度与控制点准确性，工程技术人员在调试阶段分别设置不同高、低液位报警点进行实验，结果见表4。

表4　不同液位设定点控制性能实验结果

Table 4　Experimental results of control performance at different liquid level set points

高位报警点/%	低位报警点/%	启停循环耗时/min	启动电流是否稳定
85	50	40	是
90	45	52	是
95	40	68	是
95	30	84	是
95	25	100	是

实验表明，当高限报警设定为95%、低限为25%时，液位调节范围最大，单次启停循环持续时间最长，水泵运行效率最高，系统响应稳定，控制电流波动小，无异常电流跳变，最适合作为最终设定参数。

5　效益分析

液位自动控制系统改造完成后，生活污水回收泵运行稳定性显著提升，污水回用效率达到预期目标，有效缓解了工艺补水用水压力，减少了清水资源消耗，优化了污水处理流程。为全面评估项目的实施效益，从直接经济效益、间接管理收益、持续发展与推广应用价值4个维度进行综合分析。

5.1　直接经济效益

根据实际运行数据，系统在回收泵故障率为零的前提下，生活污水回用能力由原来的约2.86 t/h提高至4.80 t/h，回收利用率由不足60%提升至95%以上。以工艺补水1.65元/t计，按照24 h满负荷运行、月运行30 d、持续5个月的稳定运行周期计算，改造项目共节约工艺补水费用：(1.65 × 4.8 × 24 × 30 × 5)元 = 28 512元。

该节水效益为直接经济收益，投资回收周期远低于半年，经济性显著优于同类系统控制优化项目。此外，由于水泵抽空和空转现象被完全消除，设备使用寿命大幅度延长，泵体故障维修频次由原每季度1次下降为零次，节省的人工、材料与维护成本亦不可忽视。以每次维护耗费工时约6 h、人工与材料费用约600元计，年节省维修支出约2 400元。

5.2 间接运行效益

本项目改造除带来显性经济收益外，还在系统运行可靠性与管理效率方面产生了显著的间接效益，具体包括：（1）系统稳定性显著提升。控制系统启停逻辑明确，泵运行状态可控，杜绝因液位失控引发的设备故障，保障了污水处理站与回用系统的连续运行。（2）操作效率提升。系统由原本依赖人工值守转换为自动启停，降低了现场操作人员劳动强度，释放了人力资源。（3）管理透明度增强。控制系统具备可视化状态反馈接口，便于运行班组对泵运行周期与液位变化趋势进行监控与记录，为后续系统优化提供数据支撑。

5.3 可持续发展与绿色制造助力

在国家“双碳”目标与节水优先政策引导下，工业企业需构建资源节约与循环利用体系。本项目以低成本方式实现了生活污水的高比例回收再利用，显著降低单位产品水耗，具有明显的环保与社会效益[10]：水资源消耗强度下降，清水消耗量由改造前约0.45 t/h下降至不足0.20 t/h；碳排放间接减少，水处理过程中所需能耗间接减少，符合企业绿色制造导向；示范推广作用大，本项目所采用装置结构简单、选材通用、安装便捷，具备在其他装置系统及企业推广应用的现实基础。

5.4 项目实施成本

项目实施过程中，充分利用原有控制箱外壳与线路接口，仅对检测与控制单元进行模块化替换与组装，极大降低了设备投入成本。项目总投入成本仅约400元，节水收益则远超成本投入数十倍，投资回报率极高，项目经济性与实施性兼顾，具备广泛应用推广前景。

6 结语

围绕某化工生产装置生活污水回用系统中存在的液位控制缺失、回收泵频繁故障、系统回用效率低等问题，开展了系统性技术分析与改造实践。通过现场调查与数据统计，明确了液位失控是导致回收效率偏低的根本原因，继而提出3种具备工程可行性的液位自动控制技术方案，并基于对比分析最终选定“磁性浮球+干簧管+电磁继电器”作为实施方案。该方案具有结构简单、成本低廉、响应灵敏、安装便捷等优势，特别适用于空间受限、设备陈旧、无监测能力的运行场景。项目实施后，生活污水回收泵实现自动启停控制，5个月内系统运行故障为零，生活污水回用率稳定在95%以上，工艺补水强度显著下降，改造成本仅约400元，经济效益显著。同时，项目在安全性、维护性、环境适应性等方面均表现良好，充分验证了非接触式液位感应装置在工业污水控制系统中的应用价值。

该项目技术路线成熟、材料选型通用、安装工艺简便，适用于空间受限、液位波动剧烈且缺乏自动化控制能力的老旧泵站场景，具备良好的可复制性与工程推广潜力。特别是在当前节能减排、绿色制造和水资源循环利用战略背景下，此类低成本、高效益的“微改造”项目将在企业节水转型过程中发挥积极作用。随着工业智能化水平不断提高，该液位控制系统仍具备进一步升级空间。可考虑引入无线液位传感单元、远程监控模块，与企业DCS（分散控制系统）或MES（制造执行）系统集成，实现液位实时远程监测与预警闭环；同时，通过数据采集与运行分析，可建立基于液位波动的泵运行优化模型，实现运行策略自适应调整，进一步提升系统运行效率与节能水平。

[参考文献]

[1] 潘文灿.对我国水资源开发利用与持续发展的认识和建议——纪念地球日51周年[J].今日国土,2020(11):27-30.

[2] 高永华.水资源节约保护及优化配置路径[J].河南水利与南水北调,2017,46(11):31-32.

[3] 佚名.城镇污水资源与能源回收利用技术规程[J].城镇供水,2025(1):3-4.

[4] 庞从章.热电厂废污水回收利用改造工程设计[J].安装,2024(S2):157-159.

[5] 徐兆棣,彭海生,吴佳,等.污水处理系统沉井式进水泵房利旧改造技术研究[J].建筑施工,2025,47(3):396-398.
XU Z Q, PENG H S, WU J, et al. Study on Technique of Reuse Transformation for Caisson-type Inlet PumpHouse in Sewage Treatment System [J].Building Construction, 2025, 47(3):396-398.

[6] 张福学.液位自动控制泵水装置的研制与应用[J].中国新技术新产品,2010(1):128.

[7] 殷国友,王海波,厉彦江.泵类设备的液位自动控制[J].黄金,2001,22(9):24-28.
YIN G Y, WANG H B, LI Y J. The automatic control of liquid-level of pumping equipment[J].Gold, 2001, 22(9): 24-28.

[8] 万维,方俊.无盲肠磁性液位计在球罐区的设计与应用[J].仪器仪表用户,2016,23(10):68-69.
WAN W, FANG J. The Design and Application of No Cecum Magnetic Level Gaugein the Spherical Tank Area [J]. Instrumentation Users,2016,23(10):68-69.

[9] 章天霈,张忠立,罗佳骏.磁性液位计(模拟法)检测方法[J].上海计量测试,2014,41(4):14-16.
ZHANG T P, ZHANG Z L, LUO J J. The discuss of the calibration for magnetic levelmeters by means of a dry approach [J].Shanghai Measurement and Testing,2014,41(4):14-16.

[10] 李鹏辉.低碳理念下绿色建筑经济效益的研究[J].商业观察,2022(10):29-31.