

# 城镇建设中自来水厂净水流程优化策略研究

文 / 闫影 蚌埠中环水务有限公司

**摘要：**城镇建设中自来水厂原水 pH 较高时易导致出水铝超标，影响水质安全。以淮河为水源的某小型水厂为例，其原水 pH 随季节波动显著，高 pH 值时净水剂投加量增大且铝指标易超标。研究聚焦自来水厂净水流程优化，从工艺参数动态调控、药剂投加系统升级、处理单元技术创新及全过程水质管控四方面构建策略体系。具体通过在线 pH 监测联动盐酸投加，将 pH 调控至 7.5 左右，配合混凝工艺参数优化；升级数字计量泵实现精确投药，采用防腐材料保障系统稳定；增设预调节池与复合滤料提升处理效能；构建多维度监测网络实现全链条水质管控。以期中小型水厂解决类似水质问题提供技术参考。

**关键词：**自来水厂；净水流程优化；pH 调控；铝超标；动态优化

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.18.083

## 引言

《生活饮用水卫生标准》（GB5749-2022）实施后，城镇自来水厂面临原水水质波动与新标准强化的双重挑战。淮河沿线水源地的原水 pH 值随季节显著波动，高 pH 环境会改变铝盐净水剂的水解平衡，导致混凝效率下降且出水铝残留风险增加。现行常规工艺依赖人工经验调控，缺乏实时 pH 调节机制，尤其在枯水季等水质突变高发期，离线检测滞后与调控精度不足的短板直接影响出水铝含量与感官指标。本文聚焦此类水质难题，构建工艺参数动态优化、药剂投加系统升级、处理单元技术创新及全过程水质管控的四维策略体系。通过在线 pH 监测联动 PLC 控制系统，实时调整盐酸投加量与净水剂配比，将 pH 值稳定在 7.5 左右以保障铝盐充分水解；升级数字计量泵与防腐管路系统，实现药剂投加的精确闭环控制；通过增设 pH 预调节池、复配高分子絮凝剂及优化过滤反冲洗工艺，提升固液分离效能；构建覆盖原水采集到管网末梢的多维度监测网络，结合机器学习模型实现前瞻性调控。该方案为中小型水厂应对原水 pH 波动提供了可复制的技术路径，推动净水流程向智能化与精细化发展。

## 一、自来水厂净水流程现状分析

### （一）原水水质波动的处理挑战

自来水厂原水水质受自然环境与人类活动影响显著，尤其是水源地生态变化与季节性水文特征，常导致水质指标出现动态波动。以 pH 值为例，当原水 pH 升高时，水体碱度与暂时硬度同步上升，这直接影响净水剂的水解形态与混凝效率<sup>[1]</sup>。具体而言，高 pH 环境会促使铝盐类净水剂更快形成氢氧化物沉淀，不仅增加药剂投加量，还可能因混凝反应不充分导致出水铝离子残留超标。这种水质波动对处理系统的冲击具有连锁效应——从混凝阶段的絮体形成质量，到沉淀过滤环节的杂质截留效率，均会因原水基础指标变化而产生不确定性，进而对后续水质安全控制构成直接挑战。

### （二）常规处理工艺的适应性局限

现行常规净水工艺（药剂投加-混凝-沉淀-过滤-消毒）在设计上侧重应对稳定水质条件，对动态变化的适应性存在固有局限。一方面，传统混凝工艺依赖经验性投药控制，当原水 pH 超出中性范围时，净水剂的最佳投加量与反应条件会发生偏移，而常规工艺缺乏实时动态的 pH 调节机制，易导致混凝效果劣化。另一方面，沉淀与过滤环节的效能受制于前处理阶段的水质基础，若混凝形成的絮体粒径与密度因 pH 波动而改变，沉淀效率与滤层截污能力会相应下降，进而影响铝等指标的去除效果。此外，常规工艺中 pH 调节措施的缺失，使得水质处理过程对原水碱度变化的缓冲能力不足，难以在高 pH 条件下维持稳定的处理效果。

### （三）水质安全控制的薄弱环节

当前水质安全控制体系在应对原水 pH 波动时，存在检测反馈滞后与调控精度不足的问题。从检测层面看，部分水厂的水质监测频率无法匹配原水水质的快速变化，尤其在枯水季等水质突变高发期，离线检测数据的时间间隔可能导致 pH 异常升高时的处理延迟。在调控层面，传统投药系统多采用定时定量或简单联动控制，难以根据实时 pH 数据精确调整药剂投加量与调节药剂的投加比例<sup>[2]</sup>。这种控制链条的薄弱环节直接体现在：当原水 pH 从中性升至 8.0 以上时，若未能及时调整 pH 调节药剂与净水剂（见图一）的投加策略，易导致出水铝含量突破安全阈值，同时水的暂时硬度升高引发感官问题，暴露出现有安全控制体系在动态水质应对中的系统性短板。



图一：净水剂（PAC）

## 二、自来水厂净水流程优化策略体系构建

### (一) 工艺参数动态优化策略

工艺参数的动态优化以原水 pH 值为核心调控变量, 构建与混凝反应进程的协同调节机制。当原水 pH 值攀升至 8.0-8.5 区间时, 水体碱度升高会改变铝盐净水剂的水解平衡, 促使其生成聚合度较低的氢氧化物胶体, 导致混凝效率下降且出水铝残留风险增加。此时需通过在线 pH 监测仪表实时捕获水质波动信号, 将数据接入 PLC 控制系统后, 同步调整盐酸投加量与净水剂投加比例: 当 pH 值超过 8.0 时, 系统自动启动 31% 浓度盐酸投加程序, 按千吨水 1.2 升的基准量逐步调控, 将 pH 值稳定在 7.5 左右。该 pH 区间既能保障铝盐充分水解为高聚合态羟基络合物, 强化絮体凝聚能力, 又能避免因 pH 过低导致铝离子溶出。混凝阶段的搅拌强度与反应时间需根据 pH 调控后的水质特性动态适配: pH 降至 7.5 后, 絮体形成速率加快, 可将混合阶段搅拌强度由 200rpm 降至 150-180rpm, 絮凝反应时间延长至 20-25 分钟, 使絮体粒径增长至  $D_{50} \geq 50 \mu\text{m}$ , 优化沉降性能。针对枯水季原水碱度与暂时硬度同步升高的特性, 需同步监测碱度变化, 通过 pH 调控将碱度控制在适宜范围, 每千吨水投加 1.2 升 31% 盐酸可降低碱度 1mg/L 左右, 减少开水中漂浮物生成<sup>[3]</sup>。此外, 丰水季与枯水季需采用差异化调控策略: 枯水季 pH 波动剧烈时, 按 pH 值 8.0-8.5 分档调节投加量, 丰水季则维持基础投加量, 确保全季节工艺参数与水质特征精准匹配。

### (二) 药剂投加系统升级策略

药剂投加系统的升级需解决精确计量与设备防腐的双重技术挑战, 构建数字化闭环控制体系。将传统容积式计量泵替换为格兰富数字计量泵, 其电磁驱动隔膜技术可实现  $\pm 1\%$  的计量精度, PVDF 泵头材质能耐受 31% 盐酸的长期腐蚀。投加系统集成原水 pH 信号采集、净水剂投加量反馈、出水铝含量监测三通道, 通过工业以太网实现数据交互: 当原水 pH 达 8.0 时, 系统自动触发盐酸投加程序, 初始量设为 12L/H(对应 1000t/H 处理量), 每 15 分钟根据出水铝含量(阈值  $\leq 0.2\text{mg/L}$ )按 0.5L/H 梯度调整投加量, 形成“监测-反馈-调节”的闭环控制。管路系统采用 UPVC 防腐管材, 设置脉冲阻尼器消除流量波动, 关键节点安装压力传感器(预警阈值 0.3MPa)监测堵塞风险。储存环节采用“玻璃钢内胆+碳钢外壳”复合结构, 内胆厚度  $\geq 5\text{mm}$  并内衬耐酸橡胶, 外壳设置阴极保护装置(电位控制在 -0.85V 至 -1.2V 之间), 呼吸口配置 10% 浓度 NaOH 碱液喷淋装置, 中和挥发酸雾。投加系统还需配备冲程频率自动调节功能, 根据原水流量变化实时修正投加量, 确保千吨水投加误差  $\leq \pm 1\%$ 。为应对突发情况, 设置手动 override 控制模块, 当自动

系统异常时可切换至人工调节模式, 保障投加过程的连续性<sup>[4]</sup>。

### (三) 处理单元技术创新策略

处理单元的技术创新聚焦 pH 调控与传统工艺的深度融合, 从反应机理层面提升处理效能。在混凝单元前增设 pH 预调节池, 采用穿孔旋流混合器实现盐酸与原水的快速均匀混合, 池体按 15 分钟停留时间设计, 内部布设 pH 梯度监测点, 确保调节后水体 pH 均匀性误差  $\leq \pm 0.2$ 。针对高 pH 原水导致的絮体结构松散问题, 在混凝剂中复配 0.5-1.0mg/L 聚丙烯酰胺(PAM), 利用高分子链的架桥作用强化絮体团聚能力, 该措施在 pH 调控至 7.5 的条件下, 可使絮体沉降速度提升 20%-30%, 显著改善固液分离效果。过滤单元采用双层滤料结构优化: 上层填充 0.8-1.2mm 无烟煤, 下层铺设 0.5-0.8mm 石英砂, 滤层厚度增至 1.2m, 通过延长水流路径增强对微小絮体的截留能力。反冲洗工艺优化为气水联合模式: 气冲强度  $15\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  维持 3 分钟, 水冲强度  $8\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  维持 5 分钟, 配合滤层膨胀率 20%-25% 的精准控制, 确保污染物有效剥离。沉淀池出口增设斜管组件, 通过增加沉淀面积提升固液分离效率, 使浊度稳定控制在 1NTU 以下, 为后续过滤单元减轻负荷。此外, 在调节池与混凝池之间设置导流墙, 形成推流式反应流态, 避免短流现象, 保障 pH 调节与混凝反应的充分性。

### (四) 全过程水质管控策略

全过程水质管控需构建覆盖原水采集、工艺处理到管网输送的多维度监测网络与动态预警机制。原水端布设五参数在线监测仪(pH、浊度、碱度、电导率、水温), 监测频率设定为 15 分钟/次, 数据实时传输至中控系统生成趋势曲线, 当 pH 值连续两次监测超过 8.0 时, 系统自动发出一级预警, 并同步触发盐酸投加系统的预启动程序。工艺段设置三级关键控制点: 混凝池出口监测絮体粒径分布(要求  $D_{50} \geq 50 \mu\text{m}$ ), 沉淀池出口监测浊度(控制  $\leq 1\text{NTU}$ ), 滤池出口在线浊度(阈值  $\leq 0.5\text{NTU}$ )与 pH 值(目标  $7.5 \pm 0.3$ )。建立基于历史运行数据的机器学习预测模型, 以原水 pH、水温、浊度为输入变量, 输出未来 2-4 小时盐酸投加量修正系数, 实现前瞻性调控。针对枯水季水质波动特征制定分阶段管控方案: pH 值 8.0-8.2 时采用 12L/H 基础投加量, 8.2-8.5 时按 1.5 倍系数递增, 超过 8.5 时启动应急调控程序, 将盐酸投加量上限提升至 20L/H, 同时联动增加净水剂投加量 15%-20%, 确保全流程水质安全可控<sup>[5]</sup>。在管网末梢设置水质监测点, 定期检测 pH、铝含量与感官指标, 根据反馈数据优化出厂水调控策略。建立水质异常应急处理预案, 针对 pH 骤升等突发情况, 制定“15 分钟响应-1 小时调控-4 小时追踪”的处置流程, 确保从原水到用户龙头的

全链条水质安全。通过构建“实时监测-智能预测-动态调控-反馈优化”的闭环管控体系,实现净水流程的精细化管理与水质的持续稳定达标。

### 三、优化策略实施保障体系

#### (一) 技术支撑保障机制

优化策略的落地需要构建系统化的技术支撑体系,核心在于形成设备全生命周期管理与技术创新的联动机制。针对盐酸投加系统的特殊性,需建立专项技术档案,收录格兰富数字计量泵的电磁驱动参数、PVDF泵头的耐腐蚀性能曲线、UPVC管路的温度压力耐受阈值等关键数据,为设备维护提供精确技术依据。日常维护中,制定三级保养制度:日常巡检重点监测计量泵的冲程频率与管路压力(设定压力预警阈值为0.3MPa),每周拆解泵头检查隔膜磨损情况,每季度对盐酸储存罐进行防腐层厚度检测(要求 $\geq 2\text{mm}$ )。技术创新层面,可引入机器学习算法对历史运行数据进行挖掘,建立pH调控预测模型——以原水pH、水温、浊度为输入变量,输出盐酸投加量修正系数,实现投加策略的动态优化。同时,与高校合作开展混凝反应动力学研究,解析pH调控至7.5时铝盐水解产物的形态转化规律,为工艺参数优化提供理论支撑。此外,搭建模拟试验平台,针对不同季节原水水质特征进行周期性试验,验证技术方案的适应性,确保在枯水季与丰水季均能维持稳定的处理效果。

#### (二) 组织管理优化措施

高效的组织管理体系是策略实施的关键保障,需从岗位权责重构与考核机制优化两方面入手。在岗位设置上,设立水质调控专员岗,明确其负责在线监测数据的实时分析(要求每小时记录原水pH、出水铝含量等关键指标)、药剂投加系统的参数调整(单次盐酸投加量调节幅度不超过1L/H)以及与中控室的信息联动<sup>[6]</sup>。建立三级责任体系:操作层负责设备日常运行(误差控制在 $\pm 5\%$ 以内),技术层负责工艺参数优化(每月提交pH调控效率分析报告),管理层负责资源调配与策略决策(设定出水铝达标率 $\geq 99.5\%$ 的考核目标)。考核机制中引入KPI与OKR双轨制:KPI指标涵盖药剂投加精度( $\pm 1\%$ )、设备故障率( $\leq 0.5$ 次/月)等硬性指标,OKR聚焦技术创新目标(如半年内将盐酸投加量误差缩小20%)。同时,建立跨部门协作会议制度,每周组织生产部、技术部、质检部召开工艺分析会,针对pH波动异常时段(如枯水季pH连续3天 $> 8.2$ )联合制定调控方案,确保管理指令与技术措施的协同落地。通过明确权责边界与强化目标导向,提升组织运行效率。

#### (三) 安全风险防控体系

盐酸投加系统的安全风险防控需构建全链条防护网络,重点解决腐蚀泄漏与操作安全问题。在设备安全层

面,储存罐采用“玻璃钢内胆+碳钢外壳”的复合结构,内胆厚度 $\geq 5\text{mm}$ 并内衬耐酸橡胶,外壳设置阴极保护装置(电位控制在 $-0.85\text{V}$ 至 $-1.2\text{V}$ 之间);管路系统安装爆破片(设定爆破压力0.6MPa)与酸雾吸收器,在储罐呼吸口处设置碱液喷淋装置(NaOH浓度10%),确保挥发酸雾被有效中和。操作安全管理中,制定“双人双锁”制度,盐酸储存区实行进出登记管理,操作人员需穿戴防化服(材质为PVC涂层聚酯纤维)、耐酸手套(氟橡胶材质)及护目镜,定期开展应急演练(每季度模拟管路泄漏处置流程:15分钟内完成泄漏点定位、管路关闭、中和剂投加)。风险评估方面,建立LEC评价矩阵,对盐酸储存(L=3,E=6,C=40,D=720)、投加操作(L=2,E=6,C=20,D=240)等环节进行动态风险分级,针对高风险项制定专项防控方案(如储存区增设可燃气体探测器,联动启动通风系统),确保安全风险始终处于可控范围。

#### 结语

综上所述,本文针对原水pH较高时出水铝超标的处理难题,形成了一套适用于中小型水厂的优化策略。实践表明,通过精准调控pH至7.5并配套工艺优化,可使净水剂效率提升,同步降低碱度与暂时硬度,改善饮水观感。技术支撑保障机制确保设备稳定运行,组织管理措施强化责任落实,安全防控体系规避盐酸投加风险。该方案在某小型水厂的应用验证了可行性,为同类水厂应对原水水质波动提供了可复制的技术路径。未来可结合智能化技术进一步提升调控精度,推动自来水厂净水流程的高效化与智能化发展。

#### 参考文献

- [1] 钟林,戴君,雷志娟,等.磷酸镁水泥固化自来水厂净水余泥试验研究[J].广州建筑,2024,52(07):97-102.
- [2] 段书乐,蒋才芳,董慧峪,等.滤池反冲洗水回用对自来水厂水质及净水效果的影响[J].中国给水排水,2024,40(15):1-8.
- [3] 李莉.北票市自来水厂净水工艺的比选研究[J].黑龙江水利科技,2022,50(09):81-83+128.
- [4] 青志鹏,张建文,彭一.新型一体化净水处理池在中型水厂中的应用[J].四川水力发电,2024,43(06):36-39+50.
- [5] 张同勇.小型水厂净水工艺存在的问题与技术改造[J].清洗世界,2024,40(07):28-30.
- [6] 徐敬,李学勤,陈余星.不锈钢净水装置在给水厂全流程工艺中的应用[J].中国给水排水,2021,37(06):138-142.

作者简介:闫影(1990.01-),女,汉族,安徽利辛人,工程师,本科学历,研究方向:给排水-水质监测。