

# 市政给排水设计中的污水处理关键技术分析

文 / 陈浩楠 安徽省城乡规划设计研究院有限公司

**摘要：**随着城镇化进程加速，污水处理技术正经历从传统物理化学法向高效生物处理、智能控制的转型。基于此，本文系统探讨市政给排水设计中的污水处理技术体系。文章聚焦沉淀池革新工艺，分析旋流式沉淀技术对传统静态沉降模式的突破；阐述快速水质检测技术通过微流控芯片与光谱分析实现的效率跃升；剖析变频水泵控制在能耗优化方面的工程价值；阐释生物膜处理技术对高浓度有机废水的独特优势；论证曝气沉砂技术在无机颗粒分离中的创新应用。进一步探讨 AAO 工艺的微生物调控机制，活性污泥法的环境适应性优化，以及深度处理中新型消毒技术的协同效应。

**关键词：**市政工程；给排水设计；污水处理

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.22.105

## 引言

在现代城市基础设施建设中，污水处理系统的科学设计与高效运行直接关系到水生态安全与公共卫生健康。2025 年国家发展和改革委员会发布的《城镇污水处理提质增效三年行动方案》特别强调技术创新在管网改造与终端处理中的核心作用。当前市政给排水设计正面临水质标准提升与处理规模扩大的双重挑战，需要通过生化反应优化、膜分离技术集成以及智慧化运维等关键技术的协同应用，构建起兼顾经济性与可持续性的污水处理体系。这种技术整合既符合新型城镇化建设需求，也为实现碳减排目标提供了重要支撑。

### 一、基于市政给排水设计分析污水处理关键技术

#### （一）沉淀池技术

传统沉淀池通过延长水力停留时间促使悬浮物自然沉降，其机理在于利用重力作用使水流速度降至  $0.3 \sim 0.7\text{mm/s}$ ，此时污水中的颗粒物因斯托克斯定律作用逐渐沉积于池底。然而实践表明，此类静态沉降模式存在显著缺陷：其一是沉降效率受水温、pH 值等环境因素制约，冬季低温环境下沉降周期将延长；其二是池体结构设计缺陷易导致短流现象，部分悬浮物会因水流扰动重返主流区<sup>[1]</sup>。

针对上述技术瓶颈，旋流式沉淀工艺通过流体动力学优化实现了突破性进展。该技术将切向进水装置与锥形池体结合，形成强度可控的旋流场，通常维持角速度在  $3 \sim 5\text{rad/s}$ ，使颗粒物在离心力作用下加速分离。工程案例证实，某日处理量 10 万吨的污水处理厂改造后，表面负荷率从传统工艺的  $1.2\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  提升至  $2.8\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ，污泥浓缩时间缩短 62%。值得注意的是，该工艺同步集成智能排泥系统，通过浊度在线监测动态调节排泥频率，较传统定时排泥模式减少能耗约 23%。但需警惕过度依赖机械动力可能引发的设备磨损问题，某沿海城市项目运行三年后，叶轮更换频率达常规工艺的 2.7 倍，这提示材料耐腐蚀性研究仍是未来改进方向。

#### （二）快速水质检测技术

在市政给排水系统设计中，水质监测环节需经历采样、运输、预处理、仪器分析等 6~8 道工序，以 COD（化学需氧量）检测为例，依据《水和废水监测分析方法（第四版）》标准流程，仅消解环节就需耗时 2 小时以上。更严峻的是，当检测重金属指标时，原子吸收光谱法的单样本分析成本高达 80~120 元，且数据滞后性常导致工艺调节延误。

现阶段，快速检测技术的突破性十分显著。具体体现为：一是微流控芯片技术的应用，将传统实验室功能集成于邮票大小的芯片上，如某型号便携式检测仪可实现氨氮、总磷等 12 项指标的同步测定，检测周期压缩至 15 分钟以内；二是以表面增强拉曼光谱（SERS）为代表的原位检测手段，其检出限较传统方法提升 2~3 个数量级，特别适用于突发性污染事件的应急监测；三是物联网技术的深度整合，某智慧水务平台的实践表明，搭载 LoRa 传输模块的在线监测终端可使数据更新频率从人工采样的 4 小时/次提升至 15 分钟/次。然而，快速检测设备在浊度  $> 50\text{NTU}$  的高悬浮物水体中可能出现 20%~30% 的读数偏差，这要求运维人员定期进行跨方法比对校准<sup>[2]</sup>。

未来发展趋势显示，基于机器学习算法的智能传感系统正成为研究热点，某试点项目通过卷积神经网络建立的浊度预测模型，已将检测误差控制在  $\pm 3\%$  以内，这预示着水质监测即将进入实时化、智能化新阶段。

#### （三）变频水泵控制技术

变频水泵控制技术的核心价值在于其动态响应机制——通过实时监测管道压力、浊度等十余项工况参数，自动调节电机转速，调节精度  $\pm 0.5\text{Hz}$ ，使处理系统始终工作在最佳工况点。以某日处理量 20 万吨的 AAO 工艺污水处理项目为例，改造后较传统方式节能 31.7%，年减少碳排放量达 428 吨。变频技术的优势集中体现在三方面：其一，针对进水流量波动采用模糊 PID 算法可实

现流量调节响应时间 < 3 秒，确保生化池溶解氧浓度稳定在  $2 \pm 0.2 \text{mg/L}$  的工艺窗口；其二，通过压力闭环控制有效缓解水锤效应，某管网压力实测数据显示，爆管事故率同比下降 62%；其三，与 SCADA 系统的深度集成，使得泵组效率 MAP 图可实时可视化，运维人员能精准识别 70% ~ 110% 负荷区间的高效工作带。但需注意，当处理含砂量 > 50mg/L 的初沉池出水时，叶轮磨损会导致效率曲线偏移，建议配套安装在线振动监测装置。

从变频水泵控制技术发展现状来看，正探索着数字孪生技术的融合应用。某试点项目通过建立水泵三维仿真模型，已实现故障预警准确率 91.3%，这标志着污水处理装备控制正式迈入预测性维护阶段。

**(四) 生物膜处理技术**

在市政污水处理领域，生物膜处理技术因其独特的微生物固定化特征，已成为应对高浓度有机废水的主流解决方案。此项技术通过构建多孔载体表面微环境使硝化菌、反硝化菌等功能微生物形成厚度约 50 ~ 200  $\mu\text{m}$  的活性生物膜层。与活性污泥法相比，其污泥龄 (SRT) 可延长至 20 ~ 30 天，特别适用于碳氮比 (C/N) < 3 的低碳源污水脱氮处理。

技术应用过程中，膜分离单元采用孔径 0.1 ~ 0.4  $\mu\text{m}$  的聚偏氟乙烯 (PVDF) 中空纤维膜组件，跨膜压差 (TMP) 稳定在 -25 至 -35kPa 区间；空气单元通过旋流曝气装置维持溶解氧 (DO) 在 4 ~ 6mg/L，将气泡直径控制在 2 ~ 3mm；萃取反应单元则利用生物膜内的浓度梯度，使  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的传质速率提升至传统工艺的 1.8 倍。某工业园区应用案例表明，组合工艺对  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  去除率稳定在 92% ~ 95%，膜通量衰减率控制在每月 3% 以下，同步开展膜污染控制策略，使用气水双洗模式延长化学清洗周期<sup>[3]</sup>。

**(五) 曝气沉砂技术**

曝气沉砂技术是现代市政污水预处理环节的核心单元，主要通过气水旋流作用实现密度 > 2.65g/cm<sup>3</sup> 的无机颗粒高效分离，较传统平流沉砂池除砂率提升 40% 以上。关键技术参数包括：水平流速控制在 0.06 ~ 0.12m/s 的流体力学窗口，曝气强度维持在 5 ~ 10m<sup>3</sup>/(m·h) 的

优化区间，可确保粒径 > 0.2mm 砂粒的截留效率达 95% 以上。

设计应用这一污水处理技术时，要确定设备维护周期，根据《城镇污水处理厂运行标准》(CJJ/T 54-2019) 规定，吸砂机应执行“3+1”运维制度，即每日 3 次间歇运行，每周 1 次全面检修，某 10 万吨/日处理规模的实测数据显示，该模式可使设备故障率降低 67%。与此同时，腐蚀防护体系，针对污水  $\text{Cl}^-$  浓度 > 300mg/L 的工况，优选厚度  $\geq 2\text{mm}$  的玻璃鳞片胶泥涂层，并配合阴极保护技术，使池体使用寿命延长至 15 年。最后是工艺适配性优化，当处理含油量 > 50mg/L 的合流制污水时，需增设表面撇油装置以避免气浮效应干扰。智能控制构成了这一技术的最新发展进展，某示范项目通过植入多参数传感阵列，结合 BP 神经网络算法，实现了沉砂效率的实时动态调控，系统响应时间缩短至传统方法的 1/5。值得注意的是，雨季进水 SS 突变工况下，建议启动应急模式将曝气量提升 20% ~ 30% 以保障处理效果。

**(六) 生物处理工艺**

城市污水处理领域生物处理工艺直接关系到出水水质和运行成本。活性污泥系统通过维持混合液悬浮固体 (MLSS) 浓度在 3000 ~ 5000mg/L，利用微生物群落的代谢作用实现有机物降解，典型污泥负荷 (F/M) 控制在 0.1 ~ 0.4kgBOD<sub>5</sub>/(kgMLSS·d) 范围时，COD 去除率可达 85% ~ 90%。工艺优化重点在于曝气控制，采用氧利用率  $\geq 25\%$  的微孔曝气器配合 DO 在线监测可降低能耗。二沉池表面负荷宜保持 0.6-1.2m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)，污泥回流比 30% ~ 70% 可保障系统稳定性。同时，对活性污泥进行深度处理，以维持其较高的代谢活性，保证污水中有机物的完全降解。

**二、市政给排水设计中污水处理强化技术**

**(一) AAO 技术**

在市政污水处理领域，AAO 工艺通过厌氧-缺氧-好氧三阶段生物反应实现同步脱氮除磷，为有效提高污水处理效果，可将微生物群落调控与工况参数适配作为优化实践方向。技术流程如图 1 所示：

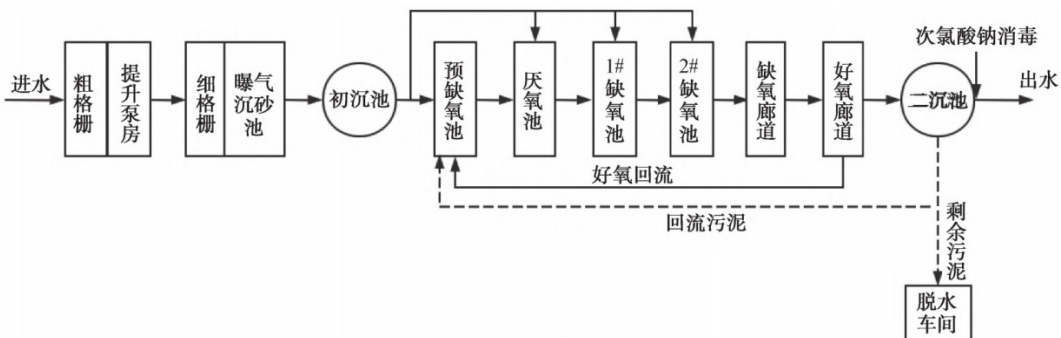


图 1 污水处理流程

以某地理式污水处理项目为例，其核心工艺为 AAO+MBR 组合技术，通过将污泥浓度提升至 7~10g/L 并延长污泥龄至 15~20 天，系统对 < 10℃ 的低温进水的氨氮去除率从冬季常规运行的 65% 提升至 82%。这种优化得益于缺氧区增设内回流装置，强化了反硝化菌群对碳源的利用率，使 TN 去除负荷从 0.08kgN/(kgMLSS·d) 增至 0.12kgN/(kgMLSS·d)。工艺控制方面，智慧化调控成为关键突破点。某项目采用重力流进水与变频曝气联动系统，通过实时监测 ORP（氧化还原电位）和 DO（溶解氧）参数，动态调整好氧区曝气强度，使单位水量电耗降至 0.48kW·h/t，较传统 AAO 工艺节能 23%。针对进水碳氮比失衡问题，前置水解酸化池对 COD 的分解率可达 40%，为后续反硝化提供优质碳源<sup>[4]</sup>。

工程实践表明，改良型 AAO 工艺通过增设化学除磷单元与膜分离强化，出水 TP 可稳定低于 0.3mg/L，SS < 5mg/L，全面达到地表 IV 类水标准。

## （二）活性污泥法和二级处理

经上述分析可知，活性污泥本质是通过微生物代谢作用降解有机物并去除营养盐，因此，提升处理效果的关键是动态平衡微生物生长与环境因子。< 12℃ 的低温条件下，通过投加低温适应性菌种可将硝化效率衰减幅度从常规的 35% 压缩至 15% 以内。而针对进水碳氮比失衡问题，前置水解酸化单元能将大分子有机物分解为 VFAs（挥发性脂肪酸），为反硝化提供优质碳源，使 C/N 比从 2.5:1 优化至 4:1。现代污水处理厂已开始应用 ASM（活性污泥模型）算法，通过实时监测 MLSS、SVI 等参数预测污泥膨胀风险，提前调整污泥回流比以避免沉淀池跑泥事故。技术创新方面，MBR（膜生物反应器）与活性污泥法的耦合成为突破点。某项目采用 0.1 μm 孔径的 PVDF 超滤膜替代二沉池，出水 SS 稳定低于 5mg/L，且膜通量通过 AI 控制的间歇曝气模式维持在 15~20LMH，较传统工艺节能 18%。这种深度处理组合使出水 COD ≤ 30mg/L、NH<sub>3</sub>-N ≤ 1.5mg/L，达到地表 III 类水回用标准，为水资源短缺地区提供了可持续解决方案。

## （三）深度处理和消毒技术

深度处理单元在市政污水处理流程中承担着去除微量污染物和病原体的关键任务。以某 20 万吨/日规模的污水处理厂为例，采用“磁混凝沉淀+臭氧催化氧化+紫外/次氯酸钠复合消毒”工艺链后，出水 COD 稳定在 15mg/L 以下，粪大肠菌群数 < 100 个/L，达到地表 III 类水标准。其中磁混凝系统通过投加 5~8mg/L 磁粉与 PAC 复合药剂，使 TP 去除率提升至 98%，显著优于传统混凝工艺的 85% 水平。臭氧催化氧化单元采用 TiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 载体催化剂，在接触时间 18 分钟、投加量 12mg/L 条件下，对磺胺类抗生素的降解率高达 92%，有效阻

断抗性基因传播风险。消毒环节的创新在于紫外（40mJ/cm<sup>2</sup>）与次氯酸钠（2mg/L）的时序组合，既避免单独紫外消毒的光复活现象，又控制了二氯甲烷生成量低于 0.08mg/L 的卫生限值<sup>[5]</sup>。

针对雨季进水 SS 波动大的特点，某项目在深度处理前端增设自适应滤布滤池，通过压差传感器实时调节反冲洗频率，将 SS 波动幅度从常规工艺的 ±15mg/L 压缩至 ±5mg/L，保障后续消毒单元效能稳定。能耗方面，新型 LED 紫外消毒系统较传统汞灯节能 37%，且寿命延长至 12000 小时，通过智能光强补偿模块可自动调节辐照剂量，使单位处理成本降至 0.03 元/吨。值得注意的是，再生水项目中将消毒尾水余氯控制在 0.3~0.5mg/L 区间，既能维持管网生物稳定性，又避免对水生生态系统造成二次污染。另外，深度处理技术的选择需匹配排放标准与回用场景。某工业园区的污水处理采用“反硝化滤池+电化学氧化”组合工艺，出水 TN < 5mg/L、重金属离子浓度低于饮用水标准，满足电子行业超纯水制备需求。

## 结语

综上所述，沉淀池动力学优化、生物膜定向驯化等关键技术突破，不仅重构了传统污水处理工艺的效率边界，更通过智能控制系统的深度融合，实现了能耗与水质标准的双重跃升。现阶段技术体系已呈现出多学科交叉特征：流体力学原理提升了固液分离效能，材料科学进步延缓了膜组件衰减，而物联网技术则赋予处理系统动态响应能力。未来发展方向应聚焦三个维度：工艺环节的低碳化改造、突发污染事件的生物预警机制建立以及再生水回用的生态安全性保障。

## 参考文献

- [1] 张韵, 王洋, 魏国, 等. 韧性市政给排水基础设施创新设计实践 [J]. 给水排水, 2024, 50(3): 59-64.
  - [2] 杨盛赞, 陈俊鸿, 陈菁, 等. 农村生活污水生物-生态组合处理技术研究——以桂林地区为例 [J]. 桂林理工大学学报, 2023, 43(4): 703-710.
  - [3] 杨晓峰, 庄彦华, 付云玲, 等. 水力停留时间对实际城镇污水处理中短程反硝化的影响 [J]. 净水技术, 2025, (1): 98-108.
  - [4] 王钦, 刘鹏亮, 邢帅, 等. 智慧城市背景下的智能给排水系统设计与应用 [J]. 工程建设与设计, 2023(18): 107-109.
  - [5] 杨美玲, 安国领. 市政工程给排水及污水处理施工方案分析 [J]. 中国厨卫, 2025, (2): 244-246.
- 作者简介：陈浩楠（1989 年-），男，汉族，安徽亳州人，硕士研究生，工程师，主要研究方向为水处理工艺研究及市政给排水设计。