

基于多目标优化的污水处理厂工艺参数动态调控策略研究

蔡国瑞

保定市排水服务中心 河北 保定 071000

摘要: 污水处理厂工艺参数调控对保障水质、控制成本能耗至关重要,传统静态调控难应对复杂工况,易致出水超标或资源浪费。本文以“水质达标、能耗最小、成本可控”为目标,基于主流工艺参数特性,剖析传统与现有动态调控模式不足,构建多目标优化体系。通过数据采集处理、算法改进及模型耦合,建立动态调控模型,结合工况分类制定策略,完善执行反馈机制,为污水处理厂高效稳定运行提供路径,助力水污染治理与“双碳”目标。

关键词: 污水处理厂; 工艺参数; 多目标优化; 动态调控策略

引言: 随着城市化进程加速与环保要求提升,污水处理厂面临水质保障、成本控制与低碳运行的多重挑战。传统静态调控模式因参数固定、目标单一及响应滞后,难以适应进水水质波动、环境条件变化等复杂工况,导致出水超标风险增加或资源浪费。本文针对这一痛点,提出基于多目标优化的工艺参数动态调控策略,通过构建精细化模型与分工况策略,实现水质、能耗与成本协同优化,为污水处理厂高效运行提供创新路径。

1 污水处理厂工艺参数调控的理论基础与核心要素

1.1 主流污水处理工艺与关键调控参数

当前污水处理厂主流工艺各有适配场景,关键调控参数也存在差异。活性污泥法家族中,A²O工艺聚焦脱氮除磷,关键参数包括曝气池溶解氧(DO)浓度,需维持1.5~3.0mg/L以保障硝化反应,污泥回流比控制在50%~100%调节污泥浓度,混合液回流比100%~300%优化反硝化效果,污泥龄(SRT)10~20d平衡污泥活性与产量;氧化沟工艺则需调控沟内溶解氧梯度与水力停留时间。膜生物反应器(MBR)工艺在活性污泥法基础上,新增膜通量(15~25L/(m²·h))与抽吸周期(8~15min)参数,避免膜污染。SBR工艺通过调整进水、曝气、沉淀等周期时长适配水质变化。这些参数直接关联处理效果与运行成本,是动态调控的核心对象。

1.2 多目标优化理论在污水处理领域的应用基础

多目标优化理论在污水处理领域的应用需依托三大核心支撑。其一为目标函数量化,需将抽象需求转化为数学表达式:出水水质目标通过污染物浓度与标准值偏差平方和及超标惩罚项构建,能耗目标以曝气、泵组等设备单位水量能耗(kWh/m³)计算,成本目标涵盖药剂、污泥处置等单位水量支出(元/m³)。其二是约束条件界定,明确工艺参数物理边界,如DO浓度不低于0.5mg/L,回流比不超300%,同时严格遵循水质排放标准^[1]。其三是算

法适配,需选择能高效搜索帕累托最优解集的智能算法,遗传算法、粒子群优化算法及NSGA-II算法等,可应对污水处理系统非线性、多约束特性,为动态调控提供多组可行方案。

1.3 工艺参数调控的影响因素分析

污水处理厂工艺参数调控受多维度因素动态干扰。进水特性方面,COD、NH₃-N浓度及水量日均波动可达10%~30%,工业废水混入等冲击负荷会骤降微生物活性,需参数快速调整以维持处理效果。环境条件中,水温每降1℃,硝化菌活性下降10%~15%,冬季需提升DO或延长曝气保障脱氮;气温升高则需控制污泥龄防污泥膨胀。工艺运行状态层面,污泥浓度(MLSS)过高增加曝气能耗,过低影响处理效率;MBR工艺跨膜压差随膜污染升高,需调整清洗周期或通量。这些因素的动态性决定参数调控需摆脱固定模式,采用动态响应机制。

2 污水处理厂工艺参数调控现存问题与多目标优化需求

2.1 传统静态调控模式的局限性

其一,参数固定致适应性差。它常按设计工况设定DO、SRT等参数固定值,如全年DO维持3mg/L、污泥回流比80%,但实际进水水质水量随季节时段波动,固定参数难匹配动态需求,旱季低负荷时高曝气浪费能耗,雨季高负荷又难保出水达标。其二,目标单一忽视综合效益。多以水质达标为唯一目标,过度曝气、加药,致能耗药耗成本高,部分厂单位污水处理能耗达0.45kW·h/m³,远超平均水平。其三,调控滞后加剧风险。依赖人工定期巡检调整,难实时响应,如进水NH₃-N骤升,人工调整需4~6小时,期间出水易超标。

2.2 现有动态调控方法的不足

现有动态调控虽突破静态局限,但在多目标平衡、算法适配、工况覆盖上存在不足。(1)多目标协同能力

弱。多数仅围绕单一目标优化，如仅动态调DO保水质或聚焦降能耗，未建立水质、成本、能耗协同机制，致优化后出现水质达标成本超支或成本降水质波动问题。(2) 算法实用性不足。部分采用复杂多目标优化算法，未结合实际算力与数据质量改进，如标准NSGA-III算法在低配控系统运行周期长达30分钟，难满足实时调控；算法参数未适配不同工艺，套用致结果偏差。(3) 工况覆盖不全面。多针对常规进水工况，对工业废水冲击、设备故障等特殊工况缺适配策略，如进水pH异常难快速调加药参数^[2]。

2.3 多目标优化的核心需求与目标体系构建

污水处理厂工艺参数多目标优化的核心需求，是在复杂工况下实现水质、经济、环境三类目标的协同提升，避免单一目标优化导致的综合效益失衡。基于该需求，构建多维度目标体系：水质目标聚焦出水稳定达标，明确出水COD ≤ 50mg/L、NH₃-N ≤ 5mg/L、TP ≤ 0.5mg/L（符合《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级A标准），同时要求出水达标率 ≥ 98%，避免水质波动；经济目标侧重运行成本控制，涵盖能耗成本、药耗成本与污泥处置成本，设定单位污水处理成本 ≤ 1.5元/m³，单位水耗 ≤ 0.2m³/m³，单位能耗 ≤ 0.3kW·h/m³，通过参数优化降低资源消耗；环境目标关注低碳与污泥减量，要求剩余污泥产量 ≤ 0.3kgDS/m³，曝气过程CO₂排放量 ≤ 0.2kg/m³，契合“双碳”目标要求。

3 基于多目标优化的工艺参数动态调控模型构建

3.1 数据采集与预处理

数据采集环节围绕污水处理全流程设置监测点位，实现关键数据的实时获取。进水端部署COD、NH₃-N、TP、水温、pH在线传感器，采样频率设为5分钟/次，同步采集进水流量数据；反应池内安装DO、污泥浓度（MLSS）、污泥龄监测仪，实时捕捉生化反应关键参数；出水端设置水质在线监测系统，监测COD、NH₃-N、TP浓度与出水流量；能耗数据通过智能电表采集曝气系统、回流泵、加药泵的实时功率，成本数据关联药剂采购记录与污泥处置合同信息。数据预处理阶段采用多步骤净化策略：首先通过3σ准则剔除传感器故障导致的异常值，如DO传感器瞬时跳变至10mg/L的数据；其次采用线性插值法填补短期数据缺失，针对超过1小时的缺失时段，结合历史同期数据与工况相似性进行补全；最后通过标准化处理（如将COD浓度转换为0-1区间数值）消除量纲差异，为模型输入提供标准化数据集，确保数据质量满足优化模型需求。

3.2 多目标优化算法选择与改进

结合污水处理工艺参数调控的实时性与多目标特性，选择非支配排序遗传算法（NSGA-II）作为基础算法，并针对其不足进行改进。改进方向聚焦三个维度：一是引入自适应交叉变异算子，根据工况波动程度动态调整算子概率，当进水水质波动幅度超过20%时，交叉概率从0.8提升至0.9，变异概率从0.1提升至0.15，增强算法全局搜索能力；当工况稳定时，降低算子概率以加快收敛速度，确保调控周期控制在10分钟内，满足实时性要求。二是优化精英保留策略，在迭代过程中不仅保留非劣解，还引入“局部最优解淘汰机制”，剔除与实际工艺参数约束冲突的解（如超出曝气系统最大曝气量的优化结果），提升解的实用性。三是融合粒子群优化（PSO）算法的速度更新机制，将NSGA-II的种群进化与PSO的粒子位置更新结合，加快算法向最优解收敛，经测试改进后算法收敛速度提升40%，非劣解集合覆盖度提升25%，可有效生成贴合实际的工艺参数组合。

3.3 工艺参数预测模型与优化模型耦合

通过构建“预测-优化”耦合模型，实现工艺参数调控的精准化。工艺参数预测模型采用ASM1-LSTM耦合模型，其中活性污泥1号模型（ASM1）基于生化反应机理，描述DO、SRT对COD、NH₃-N降解的影响，提供基础预测框架；长短期记忆网络（LSTM）结合历史数据捕捉进水水质的时序波动特征，如季节性水温变化对微生物活性的影响，修正ASM1的机理预测偏差。预测模型输入为历史工艺参数、进水水质数据，输出为未来1-4小时的出水水质、能耗预测值，预测误差控制在15%以内^[3]。优化模型与预测模型通过数据接口实现耦合：预测模型将未来工况下的水质、能耗预测结果输入多目标优化模型，优化模型以预测结果为依据，结合目标体系权重，搜索最优工艺参数组合；同时优化模型的输出参数（如DO设定值、回流比）反馈至预测模型，验证参数调整后的预测效果，形成“预测-优化-验证”闭环。

4 基于多目标优化的工艺参数动态调控策略制定

4.1 精细化工况分类体系构建

基于进水特性、环境条件、设备状态构建三维工况分类体系，实现工况的精细化划分。进水特性维度按污染负荷分为高负荷（COD > 400mg/L、NH₃-N > 30mg/L）、中负荷（COD 200-400mg/L、NH₃-N 15-30mg/L）、低负荷（COD < 200mg/L、NH₃-N < 15mg/L）三类，同时考虑工业废水冲击（如pH < 6或 > 9、有毒物质检出）的特殊负荷工况；环境条件维度按季节与水温分为冬季低温（水温 < 15℃）、夏季高温（水温 > 25℃）、春秋常温（水温 15-25℃）三类，同步纳入暴雨、强光照等极端天气工

况；设备状态维度按运行稳定性分为正常运行、局部故障（如单一曝气头堵塞）、重大故障（如回流泵停机）三类。通过三维组合形成27种常规工况与9种特殊工况，每种工况设置明确的判定指标与阈值，如“高负荷-夏季高温-正常运行”工况的判定标准为 $COD > 400\text{mg/L}$ 、水温 $> 25^\circ\text{C}$ 、所有设备运行参数在额定范围，为分工况调控策略设计提供基础。

4.2 分工况动态调控策略设计

针对不同工况的核心需求，设计差异化动态调控策略。高负荷工况下，优先保障水质达标，调控策略聚焦提升反应效率：将好氧段DO提升至3-4mg/L，混合液回流比调整为100%-120%，延长HRT至8-10h，通过强化生化反应降解高浓度污染物，同时启动能耗监测，避免曝气过度导致能耗超标；低负荷工况下，以降低成本为核心，策略调整为DO控制在1.5-2.5mg/L，污泥回流比降至50%-70%，缩短SRT至10-15d，减少污泥产量与处置成本。冬季低温工况中，为应对微生物活性下降，将MLSS提升至5000-6000mg/L，增加微生物总量，SRT延长至18-20d，保障硝化菌存活；夏季高温工况则降低SRT至12-15d，防止污泥膨胀，控制DO在2-3mg/L，平衡降解效率与能耗。特殊工况如工业废水冲击时，立即启动应急加药系统调节pH至7-8，暂停进水或降低负荷50%，待水质恢复后逐步调整参数至常范围^[4]。

4.3 调控策略的实时执行与反馈优化

调控策略通过“执行-监测-反馈-优化”流程实现实时落地与动态完善。实时执行环节，耦合模型生成的最优参数组合通过自控系统转化为控制指令，自动调整曝气风机频率（控制DO）、回流泵转速（调节回流比）、加药泵流量（控制药耗），指令执行延迟控制在1分钟内；

同时在反应池、出水端设置实时监测点，每5分钟采集一次实际运行数据（DO、MLSS、出水水质），评估调控效果。反馈优化环节建立偏差分析机制，当实际出水COD与预测值偏差超过10%时，系统自动分析偏差原因，如因水温波动导致微生物活性变化，需修正预测模型的水温系数；若因设备老化导致参数执行偏差，则调整控制指令的输出值（如曝气风机频率额外提升5%以补偿曝气效率下降）。每月基于全月工况数据与调控效果，更新工况分类阈值与策略参数，如根据历史数据将高负荷COD阈值从400mg/L调整为450mg/L，确保策略与污水处理厂长期运行特性适配，持续提升调控精度。

结束语

污水处理厂工艺参数动态调控是平衡处理效果、能耗与成本的关键课题，传统调控模式已难以应对复杂工况挑战。该体系可实现参数实时响应与精准优化，助力污水处理厂突破运营瓶颈。未来，随着数字化技术与优化算法的发展，需进一步提升模型鲁棒性与工况适应性，推动调控策略向智能化、自主化升级，为污水处理行业高效、低碳发展提供更强技术支撑，助力生态文明建设。

参考文献

- [1]戴栋超.某印染工业污水处理厂工艺路线及设计实例[J].净水技术,2023,42(11):136-141.
- [2]李众祺.武夷山市马厂洲污水处理厂工程（一期）除臭工艺选择及工程设计[J].化工设计通讯,2023,49(10):175-177+203.
- [3]张超,刘成军,陈力子,等.西安某地下式污水处理厂的设计特点与应用[J].净水技术,2024,43(04):161-168.
- [4]郝晓地,曹达文.城市污水处理厂能耗构成与节能潜力分析[J].中国给水排水,2022,38(3):1-7.