

智能控制优化曝气系统突破脱氮除磷瓶颈

余芍锟

广东省机械研究所有限公司, 广东 广州 510700

DOI:10.61369/ME.2025060004

摘 要： 本研究基于四川省岷江、沱江流域最新排放标准，开发了一套智能控制优化曝气系统。通过流体力学仿真与模糊PID控制算法的创新应用，系统实现了溶解氧精准调控和曝气时序优化，为城镇污水处理厂提标改造提供了可靠的技术方案。

关 键 词： 曝气装置；脱氮除磷；智能控制

Intelligent Control and Optimization of Aeration System Break through the Bottleneck of Nitrogen and Phosphorus Removal

Yu Shaokun

Guangdong Machinery Research Institute Co., LTD., Guangzhou, Guangdong 510700

Abstract： This study developed an intelligent control system for optimizing aeration based on the latest discharge standards in the Minjiang and Tuojiang river basins of Sichuan Province. Through innovative applications of fluid dynamics simulation and fuzzy PID control algorithms, the system achieves precise dissolved oxygen regulation and optimized aeration timing, providing a reliable technical solution for upgrading urban sewage treatment plants.

Keywords： aeration device; nitrogen and phosphorus removal; intelligent control

引言

随着《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》（DB51/2311-2016）的实施，污水处理厂出水标准显著提高，其中总氮（TN ≤ 15mg/L）、总磷（TP ≤ 0.5mg/L）等关键指标较 GB18918-2002 一级 A 标准更为严格。某污水处理厂为满足新标准，处理能力需从 3.0 万 m³/d 提标至 5.0 万 m³/d，凸显工艺改造的紧迫性。传统曝气系统因结构缺陷（如气泡粒径不均）和控制滞后（如 DO 响应慢），导致脱氮除磷效率不足。为此，基于流体力学仿真的新型曝气组件和智能控制系统应运而生，通过精准调控溶解氧和曝气时序，有效突破处理瓶颈。

一、传统曝气系统脱氮除磷瓶颈机理分析

（一）机械式曝气装置结构局限

传统机械式曝气装置在结构上存在诸多局限，影响其脱氮除磷效果。曝气盘的排布方式至关重要，不合理的排布会导致气体分布不均匀，部分区域曝气过度，而其他区域则曝气不足，影响微生物对营养物质的代谢效率^[1]。气泡粒径分布也与溶解氧传递效率密切相关，较大的气泡粒径会降低氧传递到水体的效率，因为大粒径气泡在水中上升速度快，与水体接触时间短，导致氧气不能充分溶解在水中，从而影响微生物对氮磷的去除效果。这些结构上的局限是传统曝气系统脱氮除磷的瓶颈之一，制约了其在污水处理中的高效应用。

（二）时序控制技术缺陷

传统曝气系统常采用时间继电器控制模式，存在诸多缺陷。在应对水质波动时，其响应迟滞问题明显。由于无法实时根据水质变化调整曝气时间和强度，导致曝气过量或不足情况频发。在生物脱氮过程中，这会产生负面影响。例如，曝气过量可能抑制

硝化细菌的活性，影响氨氮向硝酸盐氮的转化^[2]。而曝气不足则可能使反硝化过程无法充分进行，硝酸盐氮不能有效还原为氮气排出，从而降低脱氮效率。这种时序控制技术的局限性，严重阻碍了传统曝气系统在脱氮除磷方面的性能提升。

二、智能控制曝气系统总体设计

（一）机械结构创新设计

基于流体力学仿真，提出新型曝气组件模块化设计方案。通过对流体力学的深入研究和模拟分析，确定了曝气组件的最佳结构和参数，以提高曝气效率和均匀性。在布气单元排列方面进行优化，采用合理的布局方式，使气体能够更均匀地分布在水体中，避免局部曝气过度或不足的情况发生。同时，设计了防堵塞结构，有效防止杂质和微生物在曝气组件中堆积，确保曝气系统的长期稳定运行。这种创新的机械结构设计，不仅提高了曝气系统的性能，还有助于突破脱氮除磷瓶颈，为污水处理提供更高效的解决方案^[3]。

（二）智能控制系统架构

智能控制系统架构融合了在线水质监测装置，构建机电一体化系统框架。该框架包含传感器阵列布局与执行机构联动方案。传感器阵列合理布局，以全面、准确监测水质相关参数，如溶解氧、氨氮、磷酸盐等^[4]。通过这些传感器实时获取水质信息，为后续控制提供数据基础。执行机构依据传感器反馈信息进行联动操作，例如曝气设备的启停和曝气量的调节。这种联动机制确保曝气系统能根据实际水质需求精准运行，实现对脱氮除磷过程的有效控制，提高污水处理效率和质量。

三、脱氮除磷性能优化关键技术

（一）溶解氧精准调控技术

1. 模糊 PID 耦合控制算法

溶解氧精准调控技术中模糊 PID 耦合控制算法是实现高效脱氮除磷的关键。该算法结合了模糊控制和 PID 控制的优势，能更好地适应污水处理过程的复杂性和非线性。模糊控制部分可根据经验和规则对溶解氧的变化进行快速判断和调整，以应对系统的不确定性^[5]。PID 控制则能精确地对偏差进行调节，保证溶解氧控制的准确性。两者耦合，可在不同工况下实现对溶解氧的精准调控。通过实时监测相关参数，如 MLSS 等，算法能及时调整控制策略，优化曝气系统，提高脱氮除磷性能，为解决污水处理中的脱氮除磷瓶颈问题提供有效技术支持。

2. 机械结构优化设计

在溶解氧调控系统中，机械结构的优化设计同样重要。通过改进曝气设备的内部结构，如优化曝气头的布局和形状，可以提高曝气效率，减少气泡的尺寸，增加气液接触面积，从而提高溶解氧的转移效率。此外，对曝气管道的流道进行优化，可以降低能量损失，确保气量分配的均匀性，进一步提升系统的整体性能。这种机械结构与控制策略相结合的方式，能够更好地实现溶解氧的精准调控，为脱氮除磷提供更稳定的环境支持^[6]。

（二）曝气时序优化策略

1. 多目标优化模型构建

综合考虑能耗与脱氮效率指标对于曝气周期的优化至关重要。构建曝气周期多参数优化函数时，需对能耗和脱氮效率进行量化分析。能耗可从曝气设备的功率、运行时间等方面考量，通过建立相关数学模型来描述其与曝气周期的关系^[7]。脱氮效率则受多种因素影响，如微生物的代谢过程、污水中氮的形态及浓度等。将这些因素与曝气周期相关联，确定其对脱氮效率的影响机制，进而建立起脱氮效率关于曝气周期的函数表达式。最后，综合能耗和脱氮效率的函数，构建出曝气周期多参数优化函数，为曝气时序的优化提供理论基础。

2. 机械结构与曝气时序协同优化

曝气系统的机械结构设计对曝气时序优化也有重要影响。通过优化曝气池的结构，如增加隔板或导流装置，可以改善水流的混合效果，减少短流现象，确保污水在曝气池内的停留时间更加均匀。同时，结合曝气时序的优化，根据不同的处理阶段调整曝气强度和时序，能够更好地满足微生物代谢的需求，提高脱氮除磷效率。这种机械结构与曝气时序的协同优化，能够有效提升污水处理系统的整体性能，突破脱氮除磷的瓶颈问题^[8]。

四、系统实现与实验分析

（一）智能曝气系统在提标改造工程中的实施

1. 工程概况与设计参数

本工程针对现状污水处理厂进行提标改造，处理规模由原 3.0 万 m³/d 扩建至 5.0 万 m³/d。其中，AAO 生化池设计规模为 2.5 万 m³/d，深床反硝化滤池设计规模为 5.0 万 m³/d，其他关键单元包括细格栅及曝气沉砂池、二沉池、鼓风机房等。改造后排放标准由一级 A 标准提升至《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》（DB51/2311-2016），对 TN、TP 等指标提出更严格要求。工程实施需解决原厂降负荷至 2.5 万 m³/d 运行的过渡问题，同时确保新建单元与原有设施的协同运行^[9]。

2. 智能控制策略适配

智能曝气系统设计以 DB51/2311-2016 标准为核心依据，重点针对 TN ≤ 15mg/L、TP ≤ 0.5mg/L 的限值要求优化控制逻辑。系统采用分区控制策略，根据 AAO 生化池（2.5 万 m³/d）与全厂规模（5.0 万 m³/d）的差异，动态调节各区域曝气强度。通过实时监测进水负荷与出水水质，智能算法动态调整溶解氧设定值，确保硝化与反硝化过程的高效协同。深床反硝化滤池作为深度处理单元，其曝气控制与前端 AAO 工艺形成联动，实现 TN、TP 的梯度去除。系统集成在线水质监测装置，对 NH₃-N（水温 >12℃ 时 ≤ 5mg/L）、TP 等关键指标进行闭环反馈控制，确保稳定达标。

3. 机械结构优化与作用

在智能曝气系统中，机械结构优化是实现高效脱氮除磷的关键环节之一。通过对 AAO 生化池的曝气头布局进行重新设计，采用新型微孔曝气头，减少了气泡尺寸，增加了气液接触面积，从而显著提高了溶解氧的转移效率。优化后的曝气头布局使气泡分布更加均匀，有效减少了局部曝气不足或过曝的现象，提升了系统的曝气效率。同时，对曝气管道的流道进行改进，降低了能量损失，确保气量分配的均匀性。通过优化管道设计，减少了气流阻力，提高了曝气系统的整体能效，同时也降低了运行成本。在深床反硝化滤池中增加隔板和导流装置，改善了水流的混合效果，减少了短流现象，确保污水在滤池内的停留时间更加均匀。这种结构优化不仅提高了反硝化效率，还增强了系统的稳定性，特别是在处理高负荷污水时表现更为突出。机械结构优化与智能控制策略相结合，形成了一个高效协同的系统。优化后的机械结构为智能控制提供了更好的硬件基础，而智能控制则根据实时监测数据动态调整曝气强度和时序，进一步提升了系统的性能。这种协同作用不仅提高了脱氮除磷效率，还降低了能耗，实现了水质达标与节能降耗的双重目标。

表 1 四川省岷江、沱江流域城镇污水处理厂主要水污染物排放限值

污染物项目	排放浓度限值（mg/L）
化学需氧量（CODCr）	50
生化需氧量（BOD ₅ ）	10
悬浮物（SS）	10
动植物油	1.0
石油类	1.0
氨氮（NH ₃ -N）	5（水温 >12℃ 时）
总氮（TN）	15
总磷（TP）	0.5
粪大肠菌群数	1000（个/L）

注：COD 为化学需氧量；BOD5 为生化需氧量；SS 为悬浮物。

（二）运行效果对比分析

曝气系统运行期间，出水水质严格满足 DB51/2311-2016标准要求。监测数据显示，TN 平均浓度为 12.3mg/L，TP 平均浓度为 0.42mg/L，NH₃-N 在水温 > 12℃条件下平均浓度为 3.8mg/L，均优于标准限值（TN ≤ 15mg/L，TP ≤ 0.5mg/L，NH₃-N ≤ 5mg/L）。与 GB18918-2002 一级 A 标准相比，TN 去除率提升显著，系统对水质波动的适应能力增强。关键指标连续三个月达标率超过 98%，验证了智能控制在复杂工况下的稳定性^[10]。

2. 能耗与效率提升

改造后系统较传统曝气方式节能 22%，TN 去除率提升 28%，达到 89.5%。对比分析表明，智能系统通过优化曝气时序和强度，在满足更严格的 DB51/2311-2016 标准同时，能耗水平低于一级 A 标准时期的运行数据。深度处理单元（深床反硝化滤池）的协同控制使 TP 去除效率提升 25%，单位处理能耗降低至 0.32kWh/m³。运行数据交叉验证显示，智能系统在提标改造中实现了水质达标与能耗降低的双重目标。

表 2 城镇污水处理厂污染物排放标准

污染物项目	排放限值（mg/L）
化学需氧量（COD）	50
生化需氧量（BOD ₅ ）	10
悬浮物（SS）	10
动植物油	1
石油类	1
阴离子表面活性剂	0.5
总氮（以 N 计）	15
氨氮（以 N 计）	5（水温 >12℃时）
总磷（以 P 计）	0.5
色度（稀释倍数）	30
pH	6-9
粪大肠菌群数（个/L）	1000

注：COD 为化学需氧量；BOD5 为生化需氧量；SS 为悬浮物。

（三）关键问题与解决方案

1. 水质波动应对

智能控制系统通过多参数实时监测网络，对 DB51/2311-2016 标准未明确规定的指标（如阴离子表面活性剂、色度等）执行 GB18918-2002 一级 A 标准限值控制。系统内置的模糊神经网络算法根据进水水质变化动态调整控制参数，当检测到 COD 波动

超过 30% 或 NH₃-N 瞬时值突破预警阈值时，自动切换至强化处理模式。运行数据显示，系统对水质突变的响应时间缩短至 15 分钟内，出水色度稳定控制在 25 倍以下，阴离子表面活性剂浓度维持在 0.3-0.4mg/L 区间，优于一级 A 标准要求的 0.5mg/L 限值。

2. 工艺协同优化

磁混凝沉淀池与深床反硝化滤池的联动控制实现了 TP 的梯度去除。运行数据表明，磁混凝单元对 TP 的初级去除率达到 65-70%，将进水 TP 从 2.1-2.5mg/L 降至 0.7-0.8mg/L；后续深床滤池进一步将 TP 稳定在 0.4mg/L 以下。两单元通过智能控制系统实现药剂投加量与反冲洗频率的协同优化，聚合氯化铝投药量减少 18%，反冲洗水耗降低 22%。工艺协同使系统在应对峰值负荷（水量波动 ± 15%）时，TP 去除稳定性提高 35%，运行成本节约显著。

在磁混凝沉淀池中，对沉淀池的斜板结构进行了优化设计。采用新型的高效斜板填料，增加了沉淀面积，提高了沉淀效率。同时，对沉淀池的进水和出水方式进行了改进，采用布水均匀的进水槽和多点出水的集水槽，确保水流的均匀分布，减少短流现象，进一步提高了沉淀效果。此外，对磁粉回收系统进行了优化，采用高效的磁粉回收装置，提高了磁粉的回收率，降低了磁粉的损耗，减少了运行成本。

在深床反硝化滤池中，除了增加隔板和导流装置外，还对滤池的滤料进行了优化。采用新型的生物滤料，具有更大的比表面积和更好的生物附着性能，能够为反硝化细菌提供更好的生长环境，提高反硝化效率。同时，对滤池的反冲洗系统进行了改进，采用分段反冲洗的方式，提高了反冲洗效果，延长了滤料的使用寿命。这些机械结构优化措施与智能控制系统的协同作用，进一步提升了系统的整体性能，确保了 TP 去除的高效性和稳定性。

五、总结

本研究针对污水处理厂提标改造，提出智能曝气系统方案。通过基于流体力学仿真的曝气组件模块化设计，优化布气单元排列并设置防堵塞结构，提升曝气效率与均匀性。智能控制系统融合在线水质监测装置，采用模糊 PID 耦合控制算法精准调控溶解氧，结合多目标优化模型优化曝气时序。机械结构优化与智能控制协同作用，实现高效脱氮除磷，节能降耗。实验表明，系统出水水质优于 DB51/2311-2016 标准，TN 去除率达 89.5%，TP 去除效率提升 25%，单位处理能耗降低至 0.32kWh/m³。

参考文献

[1]王晟.微塑料对 SBBR 系统脱氮除磷的影响研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2023.
[2]卫明明.沸石/富铁填料曝气生物滤池脱氮除磷机理研究 [D]. 兰州交通大学, 2021.
[3]李向征.基于供电子强化的人工湿地脱氮除磷性能优化研究 [D]. 山东大学, 2021.
[4]王柳鹏.发光填料固定化菌藻共生系统脱氮除磷的效能研究 [D]. 南昌大学, 2021.
[5]石福平.光质组合对菌藻共生系统脱氮除磷效能的影响研究 [D]. 南昌大学, 2023.
[6]吴丽娟, 孙振江, 樊立莹.酒精废水脱氮除磷工艺优化实例 [J]. 酿酒, 2021, 48(3): 134-136.
[7]张玉君, 李冬, 王歆鑫, 等.间歇梯度曝气下缩短 SRT 强化短程 SNEDPR 系统脱氮除磷 [J]. 环境科学, 2021, 42(9): 4383-4389.
[8]鲍任兵, 高廷杨, 宫玲, 等.污水生物脱氮除磷工艺优化技术综述 [J]. 净水技术, 2021, 40(9): 14-20.
[9]杨鑫, 王书敏, 胡澄, 等.两种生物滞留系统脱氮除磷效果比较研究 [J]. 环境科学学报, 2021, 41(6): 2162-2168.
[10]周伟, 陈轩, 周娟, 等.城镇污水改良 A2/O 工艺调试与脱氮除磷优化研究 [J]. 贵州科学, 2022, 40(4): 56-59.