

Application of Electrical Automation Instrument Linkage Control in Intelligent Aeration System of Urban Domestic Sewage Treatment Plant

Yong Li

Zhongyuan Environmental Protection Co., Ltd., Zhengzhou, Henan, 450000, China

Abstract

Urban wastewater treatment plants currently face common challenges in aeration systems, including high energy consumption and insufficient control precision. To address these issues, this study presents an intelligent aeration system designed with electrical automation instrumentation linkage control. The system integrates dissolved oxygen (DO) sensors, online ammonia nitrogen analyzers, air flow meters, and pressure transmitters, forming a distributed control system centered on PLCs and utilizing PROFINET as the primary network. The core control algorithm employs a “feedforward-feedback” composite PID control strategy combined with a cascaded optimization approach for ammonia nitrogen management. This enables precise adjustment of aeration and air supply volumes based on influent load and water quality targets, achieving demand-responsive operation. Practical applications have demonstrated significant improvements: dissolved oxygen control precision has been enhanced to a fluctuation range of $\pm 0.3\text{mg/L}$, while effluent quality consistently meets standards with ammonia nitrogen levels below 3mg/L . Additionally, energy consumption in aeration units has been reduced by 20%-30%, providing a practical technical solution for achieving refined operations and energy cost savings in wastewater treatment plants.

Keywords

intelligent aeration; electrical automation; instrument linkage; dissolved oxygen control; energy saving and consumption reduction

城镇生活污水处理厂智能曝气系统电气自动化仪表联动控制应用

李永

中原环保股份有限公司, 中国 · 河南 郑州 450000

摘 要

现在城镇生活污水处理厂的曝气系统, 普遍存在能耗高、控制精度不够的问题。针对这个痛点, 本文研究设计了一套靠电气自动化仪表联动控制的智能曝气系统。这套系统整合了溶解氧 (DO) 传感器、氨氮在线分析仪、空气流量计、压力变送器这些仪表, 搭建了以PLC为核心、PROFINET为主要网络的分布式控制系统。核心控制算法用的是“前馈-反馈”复合PID, 再加上氨氮串级优化的策略, 能根据进水的负荷多少和水质目标要求, 精准分配鼓风量和曝气量, 做到按需供给。实际应用下来效果很明显: 溶解氧的控制精度大大提升, 波动范围只有 $\pm 0.3\text{mg/L}$; 出水水质也能稳定达标, 氨氮含量低于 3mg/L 。与此同时, 曝气单元的能耗还能降低20%-30%, 给污水处理厂实现精细化运营、节约能耗成本提供了实用的技术方案。

关键词

智能曝气; 电气自动化; 仪表联动; 溶解氧控制; 节能降耗

1 引言

城镇生活污水处理是减少水体污染、改善居住环境的关键环节。在污水处理厂的运行成本里, 电费占了 50%-70%, 而曝气系统作为活性污泥工艺的核心设备, 它的耗电量更是能占到全厂总电费的 50%-60%。传统的曝气控制系

统, 大多要么是一直保持固定的曝气量, 要么是基于固定溶解氧 (DO) 设定值的单回路 PID 控制。现在自动化、物联网和智能控制技术越来越成熟, 大家都觉得应该建一套以实时水质数据为依据, 能精准按需分配曝气量的智能曝气系统, 这也成了行业里的研究热点。这类系统的核心, 就是靠电气自动化仪表全面掌握工艺运行状态, 再用先进的控制算法, 让鼓风机、调节阀这些执行设备协同工作。本文就想深入研究这套系统的架构设计、关键技术和实际使用效果, 给城镇生活污水处理厂的节能改造和智能化升级, 提供一套完

【作者简介】李永 (1983-), 男, 中国河南杞县人, 本科, 工程师, 从事电气自动化仪表及过程控制应用研究。

整又可行的解决方案。

2 智能曝气系统总体架构设计

2.1 系统组成与网络架构

智能曝气系统是个复杂的闭环控制系统，把感知层、控制层、执行层和监控层整合到了一起。它的整体架构设计遵循“分散控制、集中管理”的原则，这样能保证系统运行可靠、使用灵活，后续还能方便扩展^[1]。

2.2 核心控制策略

智能曝气系统的控制目标很明确：在能耗最低的前提下，把生物池好氧段的溶解氧浓度维持在最适合的范围里，这样才能保证生化反应（尤其是硝化过程）能彻底进行^[2]。为了实现这个目标，系统采用了分层递进的智能控制策略，具体分三层：

1. DO 设定值优化层：这是系统能实现智能化的关键。它不像传统系统那样固定一个 DO 设定值，而是以出水氨氮稳定达标为最终目的。系统会通过预先建立的氨氮（ $\text{NH}_3\text{-N}$ ）和 DO 设定值之间的经验模型，或者模糊规则，根据不同的运行工况动态调整 DO 设定值。比如进水氨氮负荷升高时，系统会自动把 DO 设定值往上调一点，增强硝化能力；如果进水氨氮负荷降低，就相应调低 DO 设定值，这样能节省能耗。

2. 鼓风量全局调控层：这一层的作用是计算生物池总共需要的空气流量。控制算法用的是“前馈+反馈”的复合模式：前馈控制会根据进水流量和进水氨氮浓度（也就是进水负荷），快速算出一个基础需气量；反馈控制再根据生物池各个分区实际测得的 DO 值，和动态调整后的设定值做对比，算出偏差后通过 PID 运算，对前馈算出的基础需气量做微调，最终确定总风量设定值，然后把这个指令下发给鼓风机的变频器。

3. 气量精准分配层：总风量确定后，系统会根据各个曝气分区的面积、微生物活性（可以通过 MLSS 等参数间接反映），或者历史 DO 运行情况，按比例把总风量分配到每个分区。通过调节各个支管上的电动调节阀或精准曝气阀的开度，实现气量的按需分配，这样就能解决传统系统里常见的“抢气”问题，也能避免局部曝气过多或不足的情况。

3 关键自动化仪表选型与配置

3.1 溶解氧 (DO) 在线监测仪表

DO 传感器是曝气控制里最直接的反馈元件，数据准不准直接影响控制效果。传统的荧光法传感器在活性污泥混合液里用着，容易出现膜孔堵塞、信号漂移的问题，所以更推荐选新型的光学荧光法 DO 传感器。这种传感器有不少优点，不用电解液，维护周期长，响应速度快，抗干扰能力也强^[3]。安装方面，每个生物池的好氧廊道至少得装一台。安装位置要选在水流平稳、能代表整个廊道水质情况的区段，深度控制在水下 1.5 到 2.0 米之间。另外，还得配上专用的清洗装置，比如自动超声波清洗刷，这样才能保证传感器长期稳定地输

出准确数据。

3.2 空气流量与压力监测仪表

热式气体质量流量计特别适合用来测压缩空气的流量，它的优点很突出：量程范围广，压力损失小，测量精度还高。安装位置方面，鼓风机出口的总管上得装一个，每个生物池的进气管上也得装，这样既能监测总的供风量，也能掌握各个支管的气量分配情况。选量程的时候，要覆盖设备最小和最大的供气能力，这样不管设备在什么工况下运行，都能准确测量。

3.3 水质与污泥浓度监测仪表

氨氮在线分析仪是实现智能曝气系统优化控制的关键仪表，安装位置选在生物池进水端，或者前置厌氧/缺氧区的末端都行，主要作用是实时监测进入好氧区的氨氮负荷，给后续控制提供数据支撑。选仪器的时候，优先挑基于离子选择电极法或者光度法的型号，而且得具备自动清洗和定期校准的功能，这样才能保证测量数据的准确性和稳定性。污泥浓度计（MLSS）要装在有氧区，它测出来的数据能用来评估污泥负荷，同时还能作为气量分配算法的辅助修正参数，让气量分配更精准。

4 电气与控制系统硬件设计

4.1 核心控制单元配置

系统的控制核心选的是西门子 S7-1500 系列 PLC，它的浮点运算能力强，指令执行速度也快，完全能满足复杂控制算法的实时计算需求。选 CPU 模块的时候，得配足够的工作内存，还得加上 PROFINET 接口模块，用来和远程 IO 站、变频器以及人机界面（HMI）进行通信^[4]。远程 IO 站（比如 ET200MP）会分布在鼓风机房和生物池现场，主要负责采集现场仪表的模拟量信号（4-20mA）和数字量信号，同时还能输出模拟量信号（4-20mA）给变频器和电动调节阀，输出数字量信号用来控制设备的启动和停止。

4.2 控制柜与 HMI 设计

现场控制柜得有不错的防护能力，防护等级通常不能低于 IP54，这样能应对现场环境。柜子内部布局要合理，强电和弱电得分开布置，避免互相干扰。柜里面要装 UPS（不间断电源），万一突然断电，能给 PLC、各类仪表还有关键的执行机构供电，起到断电保护的作用，防止设备损坏或数据丢失。

5 软件逻辑与联动控制算法

5.1 基于前馈-反馈的 PID 风量控制

总风量控制回路是节能的关键。其算法在 PLC 中实现，逻辑如下：

$$G_{\text{total}}(t) = K_f \cdot Q_{\text{in}}(t) \cdot \text{NH}_3\text{-N}_{\text{in}}(t) + \text{PID}[\text{DO}_{\text{set}}(t) - \text{DO}_{\text{meas}}(t)]$$

其中：

$G_{\text{total}}(t)$ ：t 时刻的总风量设定值。

K_f : 前馈系数, 通过历史数据整定。

$Q_{in}(t)$: t 时刻的进水量。

$NH_3-N_{in}(t)$: t 时刻的进水氨氮浓度。

$DO_{set}(t)$: t 时刻的动态 DO 设定值。

$DO_{meas}(t)$: t 时刻的 DO 实测值。

$PID[...]$: 对 DO 偏差进行 PID 运算后的风量修正值。

前馈控制主要用来快速应对进水负荷突然变化的情况, 反馈控制则负责对一些微小的偏差做精细校正。把这两部分结合起来, 既能保证控制反应快, 又能让系统运行稳定, 两头都不耽误。

5.2 氨氮串级优化控制

要是想让控制效果更精准、更优化, 咱们可以搞个串级控制系统——把氨氮当成外环的被控变量, 溶解氧 (DO) 作为内环的被控变量, 这样搭配起来就能实现更高级的优化控制^[9]。外环 (主环): 以出水氨氮浓度作为过程变量 (PV), 以其达标值 (如 3mg/L) 作为设定值 (SP)。外环控制器的输出不再是风量, 而是 DO 的设定值 (DO_{set})。当出水氨氮偏高时, 外环控制器输出更高的 DO_{set} ; 反之则降低 DO_{set} 。内环 (副环): 即前述的 DO 控制回路, 它快速响应, 使实际 DO 值跟随外环给出的动态 DO_{set} 变化。此策略将控制目标从中间参数 (DO) 直接关联到最终出水水质 (氨氮), 实现了真正意义上的工艺优化, 但依赖于稳定可靠的出水氨氮在线分析仪。

5.3 安全联锁与报警逻辑

系统里需内置一套完善的联锁保护逻辑, 具体包括这几方面:

1. 鼓风机联锁: 启动鼓风机的时候, 得先确认出口阀门已经打开, 或者处于自动控制状态才行; 如果是多台风机一起并联运行, 还得设置好启停的先后顺序和负荷分配的逻辑, 避免设备冲突。

2. 喘振保护: 系统会实时盯着鼓风机的运行状态, 一旦发现运行点快靠近喘振区了, 就会自动打开放空阀, 或者强制增加风量, 防止设备出现喘振, 保护鼓风机安全运行。

3. 仪表故障诊断与无扰切换: 要是像 DO 传感器、氨氮在线分析仪这些关键仪表出了故障, 或者需要停机维护, 系统会自动报警, 还能平滑切换到预设的备用控制模式 (比如固定风量比例控制), 不会让系统突然失控, 保证运行稳定。

6 系统实施与效能分析

6.1 应用案例与运行效果

华东地区一座日处理量 4 万吨的城镇生活污水处理厂举例, 它的好氧池分成 4 条廊道, 改造前一直用固定 DO 设定值 (2.0mg/L) 的控制方式。改成智能曝气系统后, 运行了三个月, 数据显示效果很明显:

1. 控制精度大大提高: 现在各廊道的 DO 浓度能稳定控制在动态设定值 (1.5-2.5mg/L) 的 ± 0.3 mg/L 范围内, 而

且应对进水负荷变化的调节时间缩短到了 10-15 分钟, 反应更快了。

2. 出水水质稳定达标: 出水氨氮浓度全年有 95% 以上的时间都稳定在 3mg/L 以下, 之前因为进水负荷突然变化导致的瞬时超标问题彻底解决了。

3. 能耗降低: 通过精准控制鼓风机的运行频率和时间, 曝气系统的单位电耗从改造前的 0.35kWh/kgBOD₅, 降到了 0.26kWh/kgBOD₅, 节能率达到 25.7%。折算下来, 一年能节约电费超过 60 万元。

6.2 综合效益分析

除了能直接省下不少电费, 这套系统还能减少鼓风机启动和停止时的冲击, 让设备运行工况更稳定, 这样设备使用寿命能延长, 后续的维护成本也降下来了。而且自动化水平提高了, 运行人员的操作强度和操作次数也减少了, 不用再像以前那样频繁手动操作。环境效益: 系统在保证出水水质稳定达标的前提下, 还实现了深度节能。节能就意味着间接减少了发电环节产生的碳排放, 这和国家“双碳”战略目标是契合的, 对保护环境有积极作用。管理效益: SCADA 系统会积累大量工艺运行数据, 这些数据特别宝贵, 能为后续的工艺诊断、优化调度, 还有智慧水务平台建设提供有力支撑, 也推动污水处理厂朝着更精细、更数字化的方向管理。

7 结论与展望

本文设计并实际应用的城镇生活污水处理厂智能曝气系统, 核心是把电气自动化仪表深度联动起来, 再结合先进的控制算法, 成功解决了传统曝气方式能耗高、控制粗糙的问题。实际使用效果证明, 这套系统能对曝气过程进行精准、高效又稳定的控制, 在保证出水水质达标的前提下, 还能实现明显的节能降耗, 推广价值特别高。未来, 智能曝气技术还会进一步和人工智能 (AI)、大数据分析、数字孪生这些技术融合, 最终推动污水处理厂朝着全面智能化、智慧化的方向发展。

参考文献

- [1] 方锦涛. 城镇生活污水处理厂运行效能试验研究——以朱家角污水厂为例[J]. 清洗世界, 2025, 41(07): 76-78+81.
- [2] 赵以琦, 甘玉金, 韩勇, 等. 生活污水与白酒生产废水协同处理可行性研究[J]. 中国给水排水, 2025, 41(14): 26-34. DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.14.005.
- [3] 刘显芬, 毕雪, 彭辉, 等. 基于机器学习的生活污水处理厂全氟和多氟烷基化合物排放负荷预测[J]. 环境污染与防治, 2025, 47(07): 11-18. DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.202411105.
- [4] 乔翘嵩, 顾登海, 卢广亮, 等. 城镇生活污水处理厂污泥资源化利用研究进展[J]. 工业水处理, 2025, 45(07): 1-10. DOI: 10.19965/j.cnki.iwt.2024-0671.
- [5] 梁雨雯, 郭迎新, 赵晨辰, 等. 城镇生活污水系统厂网一体化考核体系的构建与应用[J]. 中国给水排水, 2024, 40(16): 23-28. DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.16.004.