

## 基于氨氮/硝酸盐氮营养盐在线控制优化污水厂曝气过程

### 应用价值

曝气过程占污水处理过程总能耗的50%~75%，优化曝气过程控制、探索新的运行控制模式是节能降耗及改善出水水质的关键。

传统的污水处理生化曝气过程是以DO为基础的PID控制（Proportional - Integral - Derivative Control，实际上是三种反馈控制：比例控制，积分控制与微分控制的统称），实践证明这种控制模式受干扰大。

国内外近些年开始逐渐采用基于营养盐信号为基础的反馈或前馈/反馈闭环控制，在改善出水水质的同时，**运行能耗可以降低15%~30%**。

以在线 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3-\text{N}$ 控制信号为基础的曝气过程自动控制系统是一种实时控制系统（RTC，Real-Time Control），这种控制系统的应用是“工艺”与“控制”的融合，可通过采用侧流生物强化（ARP/SSH）技术耦合控制系统充分利用原有设施，在不增加生物池池容的情况下，可以大幅提高污水厂的水力负荷或有机负荷，同时有效改善了出水水质，实现出水 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{TN}$ 的高标准排放及稳定达标。

### 技术优势

以在线 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3-\text{N}$ 控制信号为基础的RTC曝气过程自动控制系统可以有效应对传统的基于DO控制系统性过程中的干扰因素，如峰值流量、污染物浓度波动、水温等，进而降低曝气能耗、获得较为稳定的出水目标值。基于在线 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3-\text{N}$ 曝气过程RTC控制的主要优势在于：

（1）可以有效控制出水 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3-\text{N}$ 、TN指标达到出水目标设定值，而不至于完全硝化，同时利用缺氧时间的控制强化反硝化并显著提高对TN的去除效率，进而也有利于出水TP的改善。实践证明，这种控制模式对于国内进水碳源不足情况下的曝气控制极具现实意义。

（2）水质参数与工艺参数耦合参与生化系统在线控制，可以实现能耗的有效控制，国外的实践表明，通过基于在线 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 的控制，可以将曝气能耗降低15%~25%。

### 在线监测仪表安装点位

目前国内污水处理过程主要在线仪表主要安装在进水和出水端，用于环保部门对水质的监管，虽然也安装了进出水的营养盐指标的仪表，但一般不直接参与工艺过程的在线优化控制，是“监而不控”。

传统生化过程控制仪表以pH/ORP、MLSS、DO为主，根据生物池不同功能分区而分别安装上述仪表，这些仪表通过间接的混合液微环境指标来控制生物系统的运行并间接控制出水水质，这是传统控制模式特点。

改进后的控制系统引入在线 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 水质参数作为生化系统的前馈/反馈控制信号，用于过程优化控制，节能降耗及改善出水水质，实现过程控制与出水水质的联锁耦合。

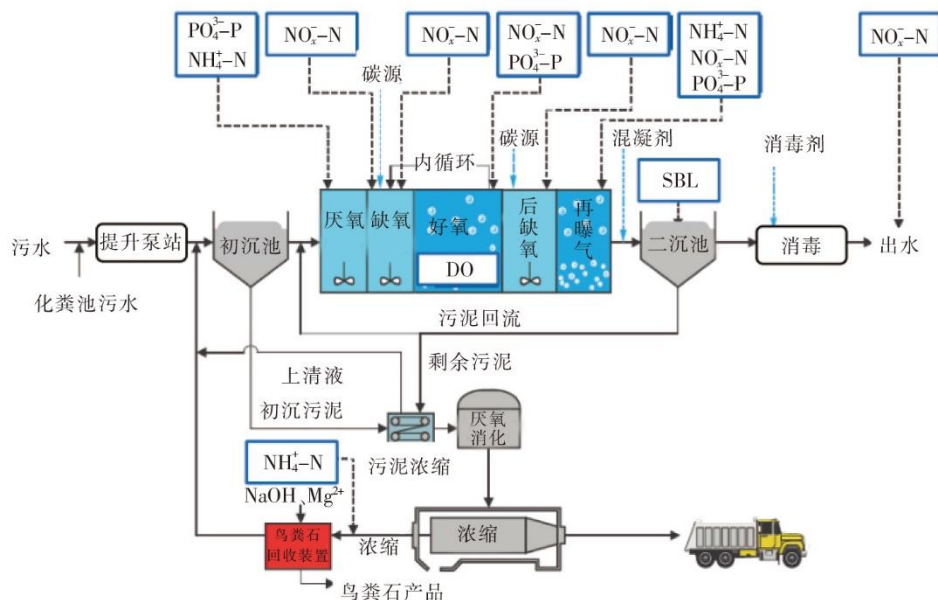


图1 基于在线营养盐控制的污水处理过程仪表安装点位

改进后的控制系统除了监测上述常规微环境表征指标外，主要改进之处是引入了营养盐仪表，这些仪表参与生化过程的实时控制。通常在生物反应池不同区段安装特征性水质监测传感器，如在前置反硝化区域安装 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 监测仪表、在硝化区或生物池出水端安装 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 监测仪表，通过水质参数传感器实时的监测，采用不同的控制逻辑和模式，可通过直接控制生物处理段获得理想的出水水质。如在好氧区末端安装在线 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 传感器作为后馈信号，生物池末端DO控制水平可以根据出水 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 目标值的高低进行相应的设定值调整。

## 方案实现的必备条件：SCAN营养盐在线监测设备

在线传感器一般包括在线（on-line）和离线（off-line）两种类型，在线类型又包括原位（In-situ）和异位（Ex-situ）分析两种，营养盐仪表多为异位分析模式。这些仪表的选择需要考虑采样及反应时间，根据取样、预处理及样品分析方法的差异，离线分析仪表一般有5~25min的滞后，而异位在线仪表也要考虑信号的滞后性。

作为全光谱在线分析仪器的发明人-奥地利Scan公司提供的 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 硝态氮分析仪和 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 氨氮分析仪是行业内鲜有的解决即时性问题的原位在线监测设备。

SCAN（是能）的NO<sub>3</sub>-N硝态氮分析仪采用全光谱扫描法，具有超低的检出极限（0.03mg/L），且最快10秒钟可完成一次测量；而SCAN（是能）的NH<sub>4</sub>-N氨氮分析仪采用离子选择电极法，分辨率低至0.01mg/L，响应时间≤60秒。除了检测方法的独特性以外，在可靠的基础上，这两款产品的检出限、分辨率、实时性远远优于市场上的其他国际品牌。这是基于氨氮/硝酸盐氮营养盐在线控制优化污水厂曝气过程的基础条件。

### 核心设备：Scan-NO<sub>3</sub>-N 硝态氮分析仪

#### 性能特点

- 超高的检测精度（重复性：<2%；分辨率：0.01mg/L）
- 超低的检出极限（0.03mg/L）
- 真正的全光谱测量，确保仪表具有极高的测量准确度
- 实现真正的原位实时测量，最快10秒钟可完成一次测量
- 具备浊度、悬浮物、有机物等干扰修正功能
- 无需化学药剂，无消耗品，运行成本低
- 安装方便，操作简单，便携使用时即插即测
- 配备蓝牙、WIFI等各种数据传输与通讯方式
- 资质证书：中国国家级计量器具型式认证

#### 技术指标

- 测量原理：紫外-可见光全光谱扫描测量法
- 波长范围：190nm-750nm
- 测量范围：0—6.4/16/26/45/100mg/L（1, 5, 35mm光程可选）
- 准确度：±2%+0.03mg/L（35mm光程）；±2%+0.2mg/L（5mm光程）；±2%+1mg/L（1mm光程）
- 重复性：<2%
- 检出极限：0.03mg/L
- 测量时间：最短10秒钟一次
- 零点漂移：<2%
- 量程漂移：<2%
- 分辨率：0.01mg/L
- 信号输出：RS485/MODBUS/蓝牙/WIFI
- 工作环境：温度 0-55℃
- 电源：12VDC, 3W
- 重量及尺寸（直径\*长）：3.3kg, 44mm\*547mm
- 防护等级：IP68
- 外壳材质：316L 不锈钢(钛合金可选)
- 光源：长寿命氙灯光源
- 检测器：256 像素、CCD 阵列检测器
- 校正：出厂前预校准，本地水样校准
- 自动修正：浊度/固体颗粒/有机物干扰自动修正



### 核心设备：Scan-NH<sub>4</sub>-N 氨氮分析仪

#### 性能特点

- 测量原理：ISE(离子选择性电极)- 具有钾离子补偿
- 多参数探头（监测：NH<sub>4</sub>-N、pH 和温度）
- 长期稳定运行, 出厂前已实行预校准
- 使用压缩空气进行自动清洗
- 可浸没或在旁通(流通管道)中
- 响应时间：≤60 秒
- 离子选择性电极的翻新-使得维护更为简便
- 特性、技术上无可匹敌的、无孔/不泄露的参比电极，及其稳定的 pH 测量
- 可进行自动温度及钾离子补偿、pH 补偿
- 最小的维护量
- 离子膜的寿命：
  - 对于 <1mg/L NH<sub>4</sub>-N 的应用：通常为 6 个月
  - 对于 >1mg/L NH<sub>4</sub>-N 的应用：通常为 1 到 2 年
- 准确度:NH<sub>4</sub>-N：测量范围内的+/-3%或+/-0.1mg/L\*(取较大值)



## 技术指标

- 测量原理：ISE(离子选择性)
- 详细的测量原理：NH<sub>4</sub>-N: 离子载体膜
- K (钾)：离子载体膜
- pH 值：无孔参比电极
- 应用测量范围：NH<sub>4</sub>-N :0.1-1000 mg/L; pH:2-12
- 分辨率：NH<sub>4</sub>-N: 0.01mg/l, 0.02—19.99 mg/L ; NH<sub>4</sub>-N: 0.1mg/l, 20.0—99.9 mg/L; NH<sub>4</sub>-N: 1mg/l, 100—1000 mg/L ; pH:0.01; T: 0.1℃
- 准确度:NH<sub>4</sub>-N：测量范围内的+/-3%或+/-0.1mg/L\*(取较大值)； pH:0.1
- 独有的无孔/不泄露的参比电极，及其稳定的 pH 测量
- 交叉灵敏度自动补偿：pH、K、温度、K
- 出厂前进行预校准：所有参数
- 响应时间：≤60 秒
- 电缆长度：7.5 m 固定电缆
- 电缆类型：聚氨酯夹套
- 外壳材料：不锈钢 1.4571, POM-C
- 重量(最小值)：2.7 kg
- 尺寸(直径 x 长)：60 x 326mm
- 工作温度：0-60℃
- 安装/固定：浸没或在旁通(流通管道)中
- 防护等级：IP68

## 方案的实现方式

基于氨氮/硝酸盐氮营养盐在线控制优化污水厂曝气过程的实现方式一般有两种：

- (1) 反馈控制模式

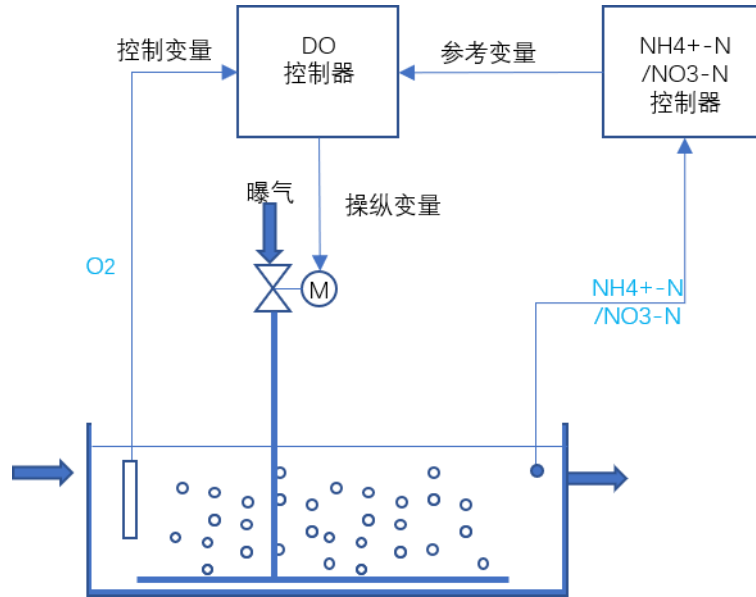


图2 “DO+NH4+-N/NO3-N”控制模式

(2) “前馈+反馈”闭环控制模式

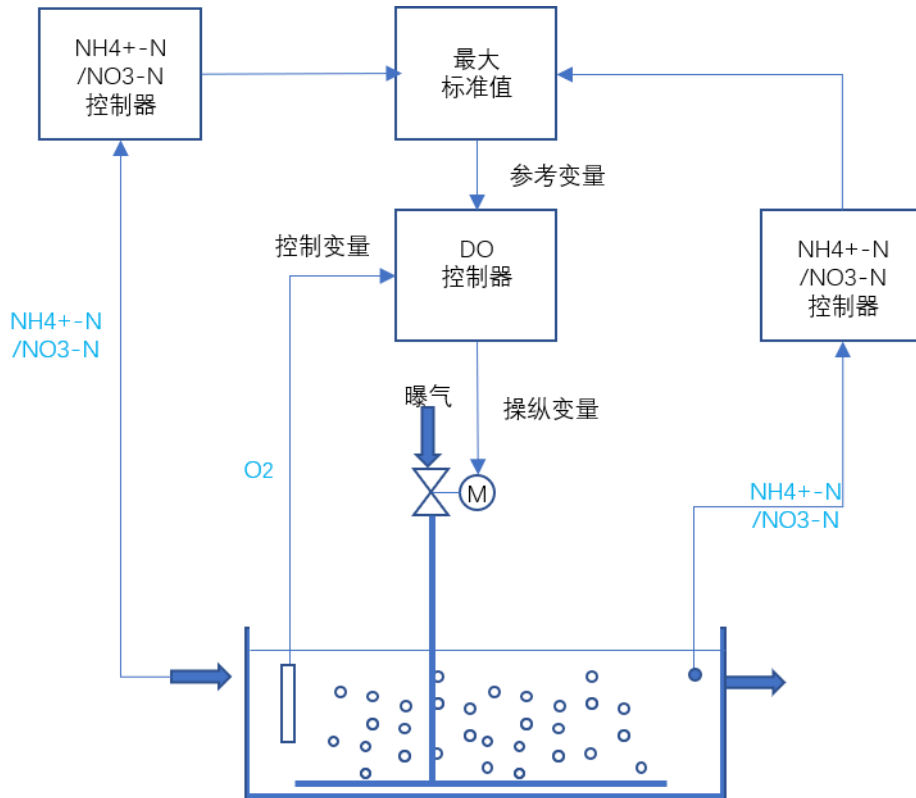


图3 “DO+NH4+-N/NO3-N”前馈/反馈控制模式

采用基于在线NH4+-N/NO3-N的前馈控制，通常考虑两种情况，一是在进水水量及污染物浓度波动较大的情况下，受生物池固有池容及硝化/反硝化能力的限制，不采取前馈控制措施容易导致出水指标的波动；其次，生化系统滞后响应时间过长，且对出水瞬时实时达标有严格要求的情况。但是，NH4+-N/NO3-N前馈控制模式一般很

少单独采用，采用基于 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 作为反馈信号对DO设定点进行调节的“串级控制”（见图2）和“前馈-反馈”闭环模式（见图3）对稳定出水及能耗控制较为可靠。

对于前馈控制模式，也有研究者提出，这种控制并不是所有的条件下都具有显性优势，实际上，对于前馈控制模式，主要特性是在于可以充分应对峰值冲击，但是由于前馈控制算法中考虑并安装了一定程度安全系数，因此，前馈控制模式对于考虑曝气节能并不是最好的选择。根据Rieger等人的研究结果，前馈控制优势体现在低水温季节对进水浓度峰值的控制，在反馈控制措施完善的情况下，前馈控制其对出水并没有显著的提升。这种情况下，结合反馈控制（FB）模式可以有效控制出水 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 指标在设定值附近；同时也可以看出，相对传统的DO控制，基于 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 的FB及FF+FB两种控制模式都可以有效控制出水指标值。

（说明：基于营养盐在线控制设备优化污水厂曝气过程的方案思路和实践成果来源于刘智晓博士；Scan硝态氮分析仪和氨氮分析仪技术资料来源于上海艾晟特环保科技股份有限公司）