

基于仿真模拟的准Ⅳ类水达标 工艺优化及运行控制

王剑乔

(苏州水星环保工业系统有限公司, 江苏 苏州 215021)

摘 要 针对江苏某污水处理厂工艺进行数学建模, 运用历史数据对模型进行了校核验证, 使模型达到预测出水指标的功能。利用建立的仿真模型对出水目标从一级 A 提升至地表准Ⅳ类水质的要求进行仿真模拟实验研究: 对一期 AAO 工艺 DO 进行 PI 控制, 好氧各段的 DO 设定为 1 mg/L 时, 曝气能耗最低, 同时出水水质最优; 对原曝气池进行曝气布局的优化模拟, 得出 AAO+ 两级 AO 工艺出水各项指标最优, 以期为题标改造方案设计提供有益参考。

关键词 数学建模; Bardenpho 工艺; 优化模拟; 准Ⅳ类

中图分类号: X703

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.026

0 引言

近年来, 太湖流域污水处理厂普遍面临着准Ⅳ类水提标的巨大挑战, 不论是工艺设计方案还是生产运营管理, 都带来了比较严峻的考验。在新标准的严格要求下, 新工艺的运行控制策略的研究必不可少, 在此过程中, 如何发挥数学模型的预测功能, 既能筛选出最佳的设计方案, 又能在运行过程中承担水质预警功能, 以便提前对系统做出准确的干预, 以保证达标的稳定性, 是今后应该关注的重点研究方向^[1-3]。

1 项目背景

江苏某污水处理厂一期工程设计规模 15 万 m³/d, 其中工业废水量占比约 49%。采用传统 AAO 工艺设计, 总 HRT 19.35 h, 其中厌氧 1.73 h、缺氧 5.18 h、好氧 12.44 h。目前出水达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002) 的一级 A 标准, 为进一步提升出水水质标准, 扩建二期工程, 规模 15 万 m³/d, 二级处理采用改良型 Bardenpho 工艺, AAOAO 各段 HRT 分别为: 2 h、6 h、8 h、3 h、3 h, 二期目前处于调试阶段, 扩建后 30 万 m³/d 处理量, 后接高效沉淀池+V 型滤池深度处理, 尾水排放执行地表准Ⅳ类水质标准。

2 AAO 建模与工艺优化

2.1 工艺建模与校正

运用 WEST 软件作为建模工具, 对一期 AAO 工艺进行建模, 采用 2019 年 11 月-2020 年 12 月之间的进水水质水量数据输入模型进行参数校核, 分别对二沉池

模型参数、进水水质组分转换参数和影响较大的部分动力学及化学计量参数进行调整, 使得模拟值与实测值相吻合^[4], 校正结果见表 1, n_{NO_PAO} 反硝化除磷的修正系数, 由 0.6 校正至 1, 说明系统中反硝化除磷菌在聚磷菌总量中占比较高, 系统的反硝化除磷效果很好。 F_{TSS_COD} 由 0.75 降至 0.7, 说明进水中颗粒性有机物占比较高, f_{S_A} 和 f_{S_F} 校正结果分别为 0.2、0.75, 说明溶解性 COD 中可发酵的有机物占主要成份。

利用已经建立好的工艺现状模型对 2020 年 1 月至 2020 年 8 月的数据进行模拟预测, 验证模拟值与实测值的匹配度。模拟的工艺运行条件与实际运行条件基本一致, 工艺参数设定如下: (1) 好氧区沿程 DO 分别为 1 mg/L、2 mg/L、0.8 mg/L、3 mg/L; (2) 排泥量 $Q_2=3\ 200\ m^3/d$; (3) MLSS 控制在 3 500 mg/L 左右。结果显示的 COD、NH₃-N、TN 模型模拟值与实测值拟合度高, 由此表示该模型具备了预测出水水质的功能。另外, TP 的出水模拟值高于出水实测值, 这是由于实际生产中采用的是同步脱氮除磷工艺, 因此实测出水 T 数据 P 是经过加药后的结果, 与模型未加药模拟结果相比较低。

2.2 工艺控制与优化

2.2.1 DO 的精细化控制模拟

为了研究 PI 控制策略对出水水质的影响, 将对好氧分段进行恒定 DO 值的控制, 来提升出水氨氮、总氮的稳定性, 同时达到降低鼓风机能耗的目的。将 AAO 工艺的好氧区分为四段, 分别对各段的 DO 进行 PI

表 1 模型参数调整

参数	含义	默认值	校正值	单位
$v0$	最大理论沉降速率	474	800	m/d
$v00$	最大实际沉降速率	250	600	m/d
r_P	沉降系数	0.00 286	0.006	m ³ /g
F_{TSS_COD}	TSS 与 COD 间的转换系数	0.75	0.7	/
f_{S_A}	可溶性 COD 中乙酸占有比例	0.4	0.2	/
f_{S_F}	可溶性 COD 中除乙酸外的短链脂肪 酸占有比例	0.55	0.75	/
K_{NO}	硝酸盐半饱和常数	0.5	0.45	g/m ³
b_H	异养菌衰减系数	0.4	0.594	1/d
K_{O_AUT}	自养菌氧的半饱和常数	0.5	0.37	g/m ³
Y_{PO}	贮存单位 PHA 所释放的 PP	0.4	0.2	/
n_{NO_PAO}	聚磷菌的缺氧活性系数	0.6	1	/

控制，比较不同 DO 设定组合下的出水结果的变化。DO 分段控制的设定值组合见表 2，出水 NH₃-N、TN、TP 模拟结果见表 3 所示。

表 2 PI 控制器的好氧各段 DO 设定

组别	DO 设定值 (mg · L ⁻¹)			
	01 池	02 池	03 池	04 池
1	1	1	1	1
2	2	2	2	2
3	1	2	0.5	2
4	2	1.5	1	0.5

表 3 好氧段不同 DO 控制梯度下的出水模拟平均值对比

组别	01 池	02 池	03 池	04 池
NH ₃ -N (mg · L ⁻¹)	0.15	0.11	0.14	0.14
TN (mg · L ⁻¹)	11.38	12.63	11.65	11.92
TP (mg · L ⁻¹)	1.00	1.20	1.06	1.02

通过出水水质模拟结果可见，好氧区各段在不同 DO 设定值组合下出水氨氮、总氮均能达标，但从综合指标来看，在氨氮稳定达标的基础上，第二组总氮、总磷的浓度比第一、三、四组高，表明市政污水活性污泥处理系统传统的控制方法将全程 DO 浓度控制在 2 mg/L，一定意义上来说并不符合低碳、高效的标准，根据数值模拟结果来看，将沿程 DO 设定值控制在 1 mg/L 时，既能满足出水达标，也能降低风机能耗。

2.2.2 曝气系统的模拟优化

为探索在不增加生物池池容情况下，通过对现有池体的曝气系统改造，以求得总氮最佳去除效果，运用已建立的模型对一期曝气池进行了 Bardenpho、AAO+ 两级 AO、AAO+ 三级 AO 三种曝气改进方案的模拟试验^[5-6]。

表 4 曝气改进方案各段水力停留时间

参数	Bardenpho	AAO+ 两级	AAO+ 三级
		AO	AO
厌氧区	1.73	1.73	1.73
缺氧区 1	5.18	5.18	5.18
好氧区 1	6	4	4
缺氧区 2	2	1	1
好氧区 2	4.44	3	2
缺氧区 3		1	1
好氧区 3		3.44	2
缺氧区 4			1
好氧区 4			1.44

根据对三种试验方案的模拟结果表 5 分析，可以看出相比原 AAO 工艺，三种曝气改进方案的出水总氮的浓度平均下降 2 mg/L 以上，出水 COD_{Cr}、TSS 浓度平均下降 3 mg/L 以上。从单因子分析结果来看，Bardenpho 工艺的出水 TP 最低，AAO+ 三级 AO 的出水 NH₃-N、TN 最低，而综合出水结果最佳的是 AAO+ 两级 AO 工艺。

表 5 三种曝气改造方案模拟的出水平均值对比

工 艺	NH ₃ -N (mg/L)	CODcr (mg/L)	TP (mg/L)	TSS (mg/L)	TN (mg/L)
原 AAO	0.19	21.48	0.89	11.49	8.98
Bardenpho	0.40	17.76	0.65	8.77	6.40
AAO+ 两级 A0	0.24	17.68	0.81	8.66	6.45
AAO+ 三级 A0	0.13	17.60	0.94	8.57	6.17

3 Bardenpho 工艺调试运行的模拟优化

在一期模型建立完成的基础上,在 WEST 软件平台上构建了二期改良型 Bardenpho 工艺。运用模型对调控方案进行模拟优化,即利用参数多因子正交分析结果的择优,探索使出水水质达到地表准 IV 类水质标准的最佳运行方案,为二期新工艺调试运行达标提供参考。

3.1 碳源投加点的选择

为确保出水总氮可稳定在 10 mg/L 以下,反硝化脱氮过程的控制尤为重要,其中如何选择碳源投加点位是保证反硝化脱氮效果的关键环节^[7]。根据模型模拟分析可知,投加位置不同,对出水水质影响也不尽相同。为筛选出最佳碳源投加点,在模型中分别模拟缺氧一、二段投加碳源后的出水各项水质情况。从模拟结果可以看出,与在一级缺氧段投加碳源相比,在二级缺氧段投加碳源出水总氮降低 1 mg/L,同时氨氮、总磷均更低。因此,在调试及后续运行过程中可以选择在缺氧二段投加碳源。

3.2 工艺参数的多因子调控预案分析

在碳源投加点位设定在二级缺氧段且投加量 $Q_A = 4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的情况下, 设定好氧区沿程 DO 为 1 mg/L , MLSS 为 $3\ 500 \text{ mg/L}$, 考量多参数正交模拟试验结果, 对比各项出水指标平均值^[8-9], 比较 9 组模拟试验可得, 当内回流比为 4, 外回流比 1.1, 剩余污泥流量 $2\ 800 \text{ m}^3/\text{d}$ 时, 综合出水各项指标属最佳, 可作为今后调试运行的参考。

根据以上多因子参数影响分析模拟结果, 当内回流比 $r=4$, 外回流比 $R=1.1$, 剩余污泥排放量 $Q_2=2\ 800\ \text{m}^3/\text{d}$ 时, 动态预测出水氨氮、总氮、总磷浓度变化。从模拟的两百多天数据变化可以看出, 氨氮可以控制在 $3\ \text{mg/L}$ 以下, 总氮均可控制在 $10\ \text{mg/L}$ 以下, 且生物池的总磷浓度基本保持稳定在 $0.6\ \text{mg/L}$ 左右, 生物脱氮除磷效果良好。

4 结论

根据污水厂 AAO 工艺及其运行参数, 利用 WEST 软件建立现状工艺仿真模型; 输入实际进出水数据, 通

过灵敏度分析,校核模型动力学和化学计量学参数,调整了二沉池参数 v_0 、 v_{00} 、 r_P ,进水水质参数 F_{TSS_COD} 、 f_{S_A} 、 f_{S_F} ,动力学参数 K_{NO} 、 b_H 、 K_{O_AUT} 、 Y_{PO} 、 n_{NO_PAO} 。结果显示,经过校验的模型能够较准确地模拟出实际出水水质。

对一期AAO工艺DO进行PI控制,各好氧段的DO设定为1 mg/L时,曝气能耗最低,同时出水水质最优。对原曝气池进行曝气布局的优化模拟,比较Bardenpho、AAO+两级AO、AAO+三级AO三种工艺改进方案,结果表明AAO+两级AO工艺出水各项指标最优。

参考文献:

- [1] 魏忠庆,上官海东,叶均磊,等.基于GPS-X模拟的污水处理厂提标工艺优化[J].中国给水排水,2018,34(19):81-84.
- [2] 曹特特,王林,李咏梅,等.AAO工艺低氧条件下的运行及其模拟[J].环境科学,2018,39(01):219-226.
- [3] 张舒,马小杰.活性污泥模型在准Ⅳ类水城镇污水处理厂设计中的应用研究[J].中国市政工程,2017(02):55-57.
- [4] 郝二成,王如意,胡志荣,等.大型污水处理厂工艺模拟应用实例[J].中国给水排水,2018,34(05):82-87.
- [5] 王延萍.Bardenpho工艺与多级AO工艺对比分析[J].天津建设科技,2019,29(06):41-43.
- [6] 方土,周家中,吴迪,等.长三角地区某污水处理厂准Ⅳ类水提标改造分析[J].中国给水排水,2018,34(17):94-99.
- [7] 崔洪升,刘世德.强化脱氮Bardenpho工艺碳源投加位置及内回流比的确定[J].中国给水排水,2015,31(12):22-24.
- [8] 孙月娣.Bardenpho工艺内回流与碳源投加耦合控制动态模拟[J].中国给水排水,2017,33(23):66-70.
- [9] 张辉,胡志荣,续蕾,等.基于工艺模拟的污水处理厂数字化实例研究[J].中国给水排水,2020,36(01):87-93.