

计算机模拟在大型污水处理厂升级改造中的应用研究

李 伟¹ 乌 兰¹ 刘 剑² 张轶凡¹ 邓纪鹏¹ 卢 健¹ 季 民³

(1 天津创业环保集团股份有限公司,天津 300381; 2 上海市城市建设设计研究院天津分院,天津 300457; 3 天津大学环境学院,天津 300000)

摘要 以 ASM1 模型为理论基础,利用经参数校准后的 GPS-X 计算机模拟软件,结合天津市某污水处理厂工艺现状及新的污水排放标准要求,对悬浮填料生物膜 A/O 工艺、三级 A/O 工艺及两点进水三级 A/O 工艺等几种可能的升级改造方案进行模拟分析。基于计算机模拟结果,提出了能够达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级排放标准的改造方案。

关键词 ASM1 模型 参数校正 GPS-X 模型 升级改造方案

0 前言

在我国大约有 80% 以上的城市污水处理厂采用活性污泥法,应用活性污泥数学模型设计和管理污水处理厂是提高我国污水处理厂设计、运行和管理水平的必然需要。利用基于活性污泥数学模型的计算机模拟软件对污水处理工艺进行辅助设计,分析改扩建方案,辅助运行管理和事故诊断与评估,是提高污水处理厂设计、管理水平的重要手段^[1]。目前国外著名的计算机模拟软件 EFOR、BIOWIN、GPS-X 等均以国际水质协会于 1986 年推出的活性污泥 1 号模型(ASM1)^[2]为基础模拟 A/O 工艺。

本文所应用的加拿大 Hydromantis 公司的 GPS-X 计算机模拟软件是一种可应用于城市和工业(废)污水处理厂的一种模块化、多用途的模拟工具。采用了工艺模型、模拟技术、图形学和许多提高模拟速度方法的最新成果,从而简化模型创建、模拟过程和对结果的诠释。它可以让使用者交互式地、动态地检验你所设计的污水处理厂中不同单元处理工艺间复杂的相互作用。充分理解这些关系对于有效地设计、运行和控制污水处理厂是至关重要的^[3]。

利用经校准和验证的 GPS-X 计算机模型,对天津纪庄子污水处理厂几种可能的升级改造方案进行模拟分析。分析计算机模拟结果,提出了能够使该厂出水达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》

(GB 18918—2002)一级排放标准的改造方案。

1 拟模拟的污水处理厂工艺现状

该污水处理厂现有生物处理工艺为 A/O 工艺,A/O 脱氮池是由传统的活性污泥法改造而来的。该厂 A/O 脱氮工艺包括两组平行的处理系统,每组生物处理系统由 7 条廊道组成,前 3 个廊道为缺氧区和后 4 个廊道为好氧区。A/O 工艺前为辐流式初沉池,A/O 工艺后为辐流式二沉池。

该污水处理厂进水水质如表 1 所示,现状执行的排放标准为 GB 18918—2002 二级标准。目前的处理规模为 10 万 m³/d,生化池的总水力停留时间为 10.4 h。

表 1 污水处理厂进水水质

项目	水温 /℃	BOD /mg/L	COD _{Cr} /mg/L	TSS /mg/L	TN /mg/L	NH ₃ -N /mg/L
参数	15	169	388	120	58	44

改造后出水拟分别达到 GB 18918—2002 一级 B 和 GB 18918—2002 一级 A 标准。考虑三种改造方案:悬浮填料生物膜 A/O 工艺、三级 A/O 工艺和两点进水三级 A/O 工艺。

2 计算机模型参数的校准

ASM1 模型中涉及 8 个异养菌、好氧菌的生化反应过程,13 种组分、5 个化学计量系数和 14 个动力学参数等。

三种传统组分如硝酸态氮(S_{NO})、氨氮(S_{NH})、总碱度(S_{ALK})等,可直接采用常规化学方法进行测定;溶解氧(S_O)表征的是活性污泥系统中好氧生长

天津市建委科技项目(200704);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07314-2002)。

的反应条件,一般好氧系统中浓度较高,无需测定进水中此项指标,而由于 ASM1 假定惰性物质 S_i 和 X_i 不参与生化反应,前者在系统出水排出,浓度不发生变化,后者在实际处理过程中被沉淀池去除或污泥絮体吸附,不参与到系列生化反应中,在进行模型设计的时候并不需要考虑这 2 个组分。污水自身并不包含 X_e ,它是由系统中的活性污泥衰减产生的,可认为是惰性颗粒物,可由二沉池除去,因此无需对它进行测定。对于另外 6 种组分,很多学者提出 OUR 呼吸计量法、混凝过滤物化法、间歇活性污泥法等生化或物化方法进行测定^[4~6],具体测定方法如表 2 所示。试验测定结果如表 3 所示。

表 2 污水水质特性组分测定方法

序号	组分符号	定义	测定方法
1	S_i	可溶性惰性有机物,mg/L	混凝-过滤法 ^[4]
2	S_s	易生物降解有机物,mg/L	混凝沉淀过滤物化法 ^[6]
3	X_s	慢速生物降解有机物,mg/L	物料平衡法
4	S_{NO}	硝酸盐与亚硝酸盐氮,mg/L	比色法
5	S_{NH}	$NH_4^+ + NH_3$ 氮,mg/L	蒸馏滴定法
6	S_{ND}	溶解性可生物降解有机氮,mg/L	间歇活性污泥法 ^[8]
7	X_{ND}	颗粒性可生物降解有机氮,mg/L	物料平衡法
8	S_{ALK}	碱度	酸碱电位滴定法

表 3 污水组分测定结果

项目	测定结果	项目	测定结果
$S_{NH}/\text{mg/L}$	35.4	$TP/\text{mg/L}$	4.27
$S_{ND}/\text{mg/L}$	6.7	$TN/\text{mg/L}$	42.1
$S_i/\text{mg/L}$	21	$SS/\text{mg/L}$	28
$X_{ND}/\text{mg/L}$	1.27	总 COD/mg/L	210
$S_s/\text{mg/L}$	120	可溶性总磷/mg/L	3.23
$X_s/\text{mg/L}$	60	溶解性正磷酸盐/mg/L	2.91
$S_{NO}/\text{mg/L}$	—		
$S_{ALK}/\text{mg/L}$	128.3		

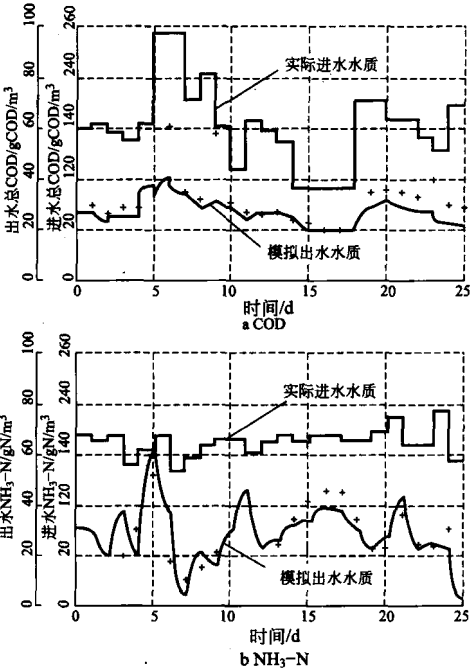
化学计量学和动力学参数大部分采用模型中所提供的默认值,而对于模型中的敏感性参数则需要进行试验测定和参数校准及验证。敏感性参数包括异养菌产率系数 Y_H 、异养菌衰减系数 b_H 、异养菌最

大比增长速率 μ_H 和自养菌最大比增长速率 μ_A 等,试验测定方法分别为呼吸计量法^[4,7,8]和硝酸盐浓度测定法^[9]等(见表 4)。

表 4 模型中化学计量学系数和动力学参数测定方法

化学计量学系数/动力学参数	意义/单位	测定方法
Y_H	异养菌产率系数(g 细胞 COD/g 氧化 COD)	呼吸计量法 ^[4,7]
b_H	异养菌衰减系数(d^{-1})	呼吸计量法 ^[7]
μ_H	异养菌最大比增长速率(d^{-1})	呼吸计量法 ^[8]
μ_A	自养菌最大比增长速率(d^{-1})	硝酸盐浓度测定法 ^[5,9]

由于试验结果是在实验室理想状态下的测定结果,而污水处理厂实际运行过程中对生物动力学过程的影响因素较多,因此试验所得结果能否真实代表实际污水处理厂的生物动力学特征,这还需要根据污水处理厂实际运行监测数据对试验所得参数进行校准即数据拟合,以求更真实可靠地模拟实际污水处理厂的运行状况。本文应用该厂 2007 年的实际进出水监测数据对模拟出水水质进行了拟数据拟合结果如图 1 所示。校准之后的动力学参数见表 5。



散点代表实际监测出水水质、曲线分别代表实际进水水质和模拟出水水质

图 1 数据拟合

表 5 校正后的动力学参数

动力学参数	春季	夏季	秋季	冬季
自养菌最大比增长速率 μ_A/d^{-1}	0.35~0.44	0.5~0.55	0.4~0.47	0.21~0.35
异养菌最大比增长速率 d^{-1}	—	—	—	4.7

应用该厂 2008 年进出水监测数据对校准过的模型进行验证,二沉池出水 COD、氨氮及反应器中 MLSS 的验证结果如图 2 所示。从图 2 可以看出,预测结果和实测结果吻合得相当好。

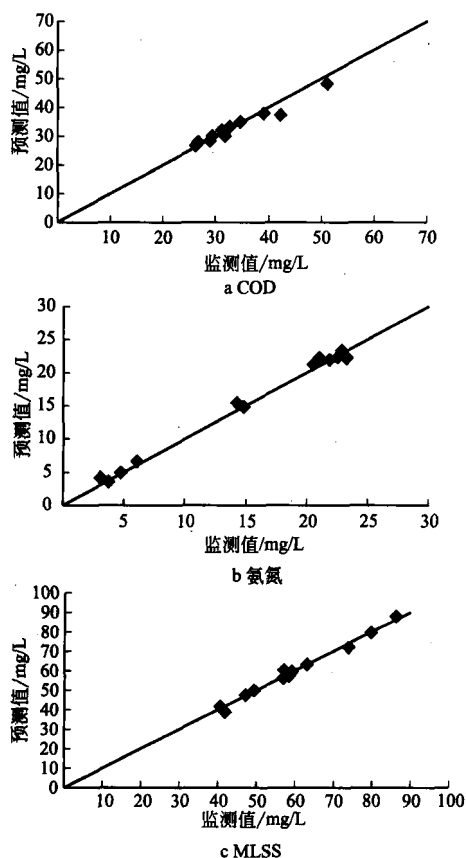


图 2 模型验证结果

3 应用计算机模型制定污水处理厂升级改造方案

3.1 改造成悬浮填料生物膜 A/O 工艺

悬浮填料生物膜工艺又称移动床生物膜反应器,由挪威 Kaldnes Mijecpteknologi 公司与 SINTEF 研究所共同开发^[10~12]。本方案为悬浮填料生物膜 A/O 工艺,是在原 A/O 工艺基础上,在好氧段投加一定比例的悬浮填料,形成生物膜法与活性污泥法结合的复合处理工艺,通过增加生化池内微生物量来提高处理效能^[13]。

应用 GPS-X 计算机模拟软件,模拟该工艺时,建模过程中各个模块所应用的数学模型如表 6 所示。悬浮填料生物膜 A/O 工艺的计算机模型界面如图 3 所示。

表 6 建模过程中各模块所应用的数学模型

进水模型	活性污泥数学模型	二沉池模型
TssCOD	Mantis(以 ASM1 为基础)	Simple1D

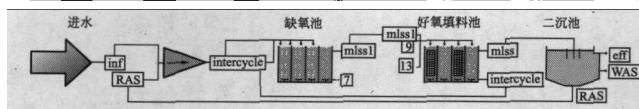


图 3 悬浮填料生物膜 A/O 工艺计算机模型界面

将由实验测定确定的该厂进水水质特性组分及经校准之后的化学计量学和动力学参数(见表 7 和表 8)等输入模型中。经过工艺模拟、条件优化及结果分析等,得到以下改造方案:

(1) 出水达到 GB 18918—2002 一级 B 方案。主要工艺参数为:生物处理段的水力停留时间 8 h,其中缺氧池的水力停留时间为 2.45 h,好氧填料池的水力停留时间为 5.55 h;污泥龄控制为 10 d;污泥回流比为 100%;内循环比为 130%。满足上述工艺运行条件时,出水能够达到 GB 18918—2002 一级 B 标准。

(2) 出水达到 GB 18918—2002 一级 A 方案。主要工艺参数为:生物处理段的水力停留时间 10.45 h(等于现有水力停留时间,即该方案既能保障处理水水质标准提高,又不用增加池容),其中缺氧池的水力停留时间为 4.48 h,好氧填料池的水力停留时间为 5.97 h;污泥龄控制为 12 d;污泥回流比为 100%;内循环比为 250%。满足上述工艺运行条件时,出水能够达到 GB 18918—2002 一级 A 标准。

表 7 模型中化学计量学系数

符号	单位	名称	参数值
Y_A	g 细胞 COD/g 氧化 N	自养菌产率系数	0.24
Y_H	g 细胞 COD/g 氧化 COD	异养菌产率系数	0.82
f_P	量纲为 1	生物体中可转化为颗粒性产物的比例	0.08
i_{XB}	gN/g 生物量 COD	生物体 COD 中的含氮比例	0.086
i_{XP}	gN/g 内源代谢产物 COD	生物体产物 COD 中的含氮比例	0.06

表 8 模型中动力学参数^[3]

符号	单位	名称	参数值
μ_{mH}	d^{-1}	异养菌最大比增长速率系数	4.7
K_S	$gCOD/m^3$	异养菌半饱和系数	20.0
$K_{O,H}$	gO_2/m^3	异养菌的氧半饱和系数	0.20
K_{NO}	$gNO_3^- - N/m^3$	反硝化菌的硝酸盐半饱和系数	0.50
b_H	d^{-1}	异养菌的衰减系数	0.282
η_a	量纲为 1	缺氧条件下 $\hat{\mu}_H$ 的校正因子	0.8
η_h	量纲为 1	缺氧条件下水解校正因子	0.4
k_h	$g \text{ 慢速可生物降解 COD}/(g \text{ 细胞 COD} \cdot d)$	最大比水解速率	1.2
K_X	$g \text{ 慢速可生物降解 COD}/(g \text{ 细胞 COD})$	慢速可生物降解底物水解的半饱和系数	0.012
μ_A	d^{-1}	自养菌的最大比增长速率	0.21~0.35
K_{NH}	$gNH_3 - N/m^3$	自养菌的氨半饱和系数	1.0
$K_{O,A}$	gO_2/m^3	自养菌的氧半饱和系数	0.4
k_a	$mgN/(kg \cdot min)$	氨化速率	0.046

上述两种方案中所投加的填料性能参数如表 9 所示。

表 9 填料的性能参数

填料参数	类型	密度/ kg/m^3	比表面积/ m^2/m^3	直径/mm	长度/mm	填充率/%
数值	K3 型	950	500	25	12	50

3.2 改造成三级 A/O 工艺(出水达到 GB 18918—2002 一级 B 标准)

多级 A/O 工艺是在曝气池中设置多个 A/O 段,使污水能够经过多次缺氧与好氧过程,强化了污泥的活性并兼有脱氮效果,具有预处理和污泥处理系统简单,污泥负荷低、处理效果好且稳定等特点^[14]。

本方案中将该污水处理厂原 A/O 工艺改造成三级 A/O 工艺。所应用的活性污泥数学模型同样是以 ASM1 为基础的 Mantis 模型, GPS-X

计算机模型界面如图 4 所示。将上述进水水质特性组分及化学计量学系数和动力学参数输入模型中。其中主要工艺参数为:生物处理段的水力停留时间 7.5 h,整个曝气池均分为 7 个廊道,其中 1、3、5 廊道为缺氧段,2、4、6 和 7 廊道为好氧段;缺氧段的总水力停留时间为 3.2 h,好氧段的总水力停留时间为 4.3 h;污泥龄控制为 10 d;污泥回流比为 100%;无需内循环。满足上述工艺运行条件时,出水能够达到 GB 18918—2002 一级 B 标准。

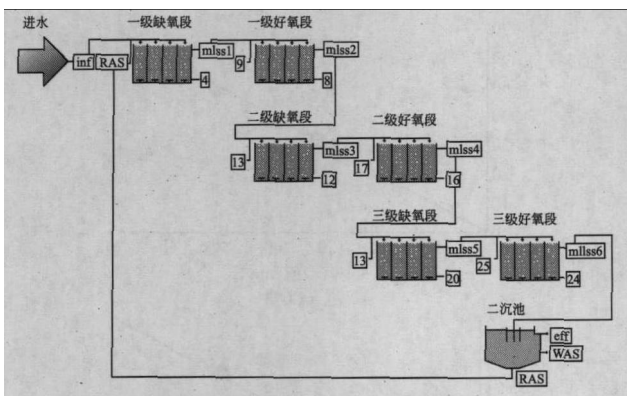


图 4 三级 A/O 工艺计算机模型界面

3.3 改造成两点进水三级 A/O 工艺(出水达到 GB 18918—2002 一级 A 标准)

多点进水多级 A/O 工艺是在多级 A/O 工艺的基础上,将进水以一定比例分配在不同的缺氧端,一定程度上缓解了后段缺氧段碳源不足所造成了脱氮效率较低的问题^[15]。本方案是将进水以 50% 的比例分配在初始进水端和二级缺氧端。该工艺的 GPS-X 计算机模型界面如图 5 所示。其中主要的工艺参数为:生物处理段的水力停留时间 8.5 h,整个曝气池均分为 7 个廊道,其中 1、3、5 廊道为缺氧段,2、4、6 和 7 廊道为好氧段;缺氧段的总水力停留时间为 3.64 h,好氧段的总水力停留时间为 4.86 h;缺氧区溶解氧保持在 0.3 mg/L,好氧

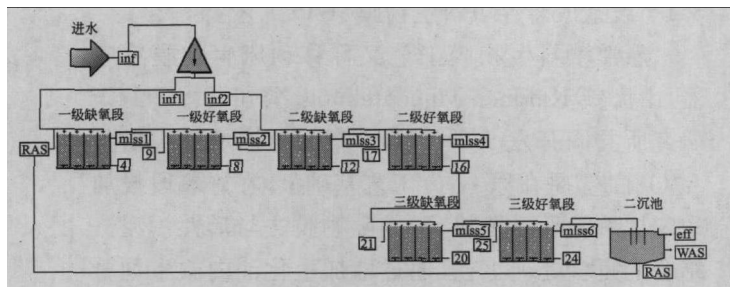


图 5 两点进水三级 A/O 工艺计算机模型界面

区溶解氧为2 mg/L;污泥龄控制为14 d;污泥回流比为100%;无需内循环。满足上述工艺运行条件时,出水能够达到GB 18918—2002 一级A标准。

3.4 改造方案对比分析

根据模拟结果,综合比较上述三种改造方案:改造成悬浮填料生物膜A/O工艺,在不改变池容的情况下系统出水可达到GB 18918—2002 一级A标准;生化池水力停留时间减少至8 h时,系统出水能够满足GB 18918—2002 一级B标准;改造成三级A/O工艺,系统不需要内回流,生化池水力停留时间为7.5 h即能够使出水满足GB 18918—2002 一级B标准;改造成两点进水三级A/O工艺,不需内回流,生化池水力停留时间为8.5 h,即能够使出水满足GB 18918—2002 一级A标准,该方案能够使该污水处理厂在原有基础上大大提高水力负荷,增强处理能力。

综合考虑各种因素后认为,针对该污水处理厂运行现状,两点进水三级A/O工艺较悬浮填料生物膜A/O工艺运行简单、投资费用低,不存在因填料清洗或更换所带来的一些问题,且不需要内回流,节省能源消耗,处理效果较好,因此推荐该污水处理厂采用两点进水三级A/O升级改造方案。

4 结论

利用参数校准和验证后的基于ASM1的GPS-X模拟软件进行模拟分析,提出将原设计为二级排放标准的典型A/O工艺,升级为出水达到GB 18918—2002 一级A或一级B标准的改造方案。根据计算机模拟结果,对悬浮填料生物膜A/O工艺、三级A/O工艺和两点进水三级A/O工艺三种方案进行综合比较,发现不需要设置内回流的两点进水三级A/O工艺,在生物段水力停留时间8.5 h条件下,能够使出水满足GB 18918—2002 一级A标准。

利用GPS-X计算机模拟软件辅助设计污水处理厂升级改造方案能够提高设计效率、保证出水质量,通过多种方案对比分析,筛选出处理效果较好、工艺运行简单且处理效果稳定、耗能较低的最优方案,是进行污水处理厂方案设计的高效辅助工具。

参考文献

- 1 万建波. 活性污泥法数学模型的发展与展望. 四川环境, 2008, 27(4): 79~83
- 2 Henze M. Activated Sludge Model No. 1. Scientific and Technical Report No. 1. London: IAWPRC, 1987
- 3 Hydromantis. GPS-X (Version 5.0) User's Guide. Hydromantis, Inc. 2005
- 4 Ekama G A, Dold P L, Marais V R. Procedures for determining influent COD fractions and the maximum specific growth rate of heterotrophs in activated sludge systems. Wat Sci Tech, 1986, 18(8): 91~114
- 5 Kristensen G H, Jorgensen P E, Henze M. Characterization of functional microorganism groups and substrate in activated sludge and wastewater by AUR, NUR and OUR. Wat Sci Tech, 1997, 25(6): 43~57
- 6 Wentzel M C, Mbewe A, Ekama G A. Batch test for measurement of SS and active organisms concentrations in municipal wastewaters. Water SA, 1995, 21(2): 117~124
- 7 于静洁, 马超, 李莉, 等. ASM1中化学计量学系数与动力学参数的测定. 环境污染与防治, 2006, 28(5): 334~336
- 8 Kappeler J, Gujer W. Estimation of kinetic parameters of heterotrophic biomass under aerobic conditions and characterization of wastewater for activated sludge modelling. Wat Sci Tech, 1992, 25(6): 125~129
- 9 刘芳. 城市污水厂活性污泥数学模型的参数测定及模拟研究. [学位论文]. 上海: 同济大学, 2004
- 10 Ødegaard H, Rusten B, Westrum T. A new moving bed biofilm reactor applications and results. Wat Sci Tech, 1994, 29(1): 157~165
- 11 Ødegaard H, Ødegaard H, Rusten B, Badin H. Small wastewater treatment plant based on moving bed biofilm reactors. Wat Sci Technol, 1993, 28(10): 351~359
- 12 Hem L J. Nitrification in a moving bed biofilm reactor. Wat Res, 1994, 28(6): 1425~1433
- 13 陈洪斌, 屈计宁, 何群彪. 悬浮填料生物膜工艺的研究进展. 应用与环境生物学报, 2005, 11(4): 514~520
- 14 王涛, 楼上游. 多级A/O工艺理论的探讨. 中国机械工程, 2001, 12(3): 339~342
- 15 黄开, 于春洲, 魏飞, 等. 多级A/O工艺在国内的应用现状. 环境科学与管理, 2007, 32(2): 73~76

电话: 13820265807

E-mail: lwb4345@126.com

收稿日期: 2010-03-09