

述评与讨论

活性污泥系统仿真软件的研究进展

周 振¹, 吴志超², 顾国维²

(1 上海电力学院 能源与环境工程学院, 上海 200090 2 同济大学 环境科学与工程
工程学院, 上海 200092)

摘 要: 近年来, 基于活性污泥数学模型的系统仿真软件在国内外许多污水处理厂的模拟仿真、升级评估、运行优化和故障诊断等方面得到了广泛应用。介绍了活性污泥系统中常用的通用仿真软件和污水处理专业仿真软件, 对仿真软件在城市污水处理厂中的应用经验进行总结, 并提出了仿真软件今后的发展方向。

关键词: 活性污泥; 仿真软件; 污水处理; 数学模型

中图分类号: X703 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2010)04-0001-05

Research Progress in Simulators for Activated Sludge System

ZHOU Zhen¹, WU Zhichao², GU Guo-wei²

(1 School of Energy and Environmental Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2 College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract In recent years, the system simulators based on activated sludge models have been widely applied in simulation, upgrade evaluation, operational optimization and fault diagnosis of municipal wastewater treatment plants at home and abroad. The most frequently used simulators for activated sludge system, including general-purpose simulators and professional simulators for wastewater treatment are introduced. The application experience of simulators in municipal wastewater treatment plants is summarized, and the future development trend of simulators is indicated.

Key words activated sludge; simulator; wastewater treatment; mathematical model

活性污泥数学模型 (ASM)^[1]自 1987 年国际水协首次推出后, 已成为污水处理领域中教学科研、设计评估、运行优化和自动控制的重要工具, 在国内外许多大型污水处理厂中都得到了广泛应用。随着 ASM 的开发和应用, 近年来污水处理领域出现了越来越多的模拟程序和软件包^[2,3], 许多咨询公司已将

这些模拟软件作为研究或实际应用的有力工具。然而, 目前多集中于对 ASM 及仿真软件的介绍^[3,4], 针对软件在污水处理厂中实际应用的经验总结则鲜有报道。为此, 介绍了国内外仿真软件的发展情况, 进而详细介绍了仿真软件在实际污水处理厂中的应用及发展趋势。

1 活性污泥系统仿真软件概述

活性污泥系统仿真软件是指描述活性污泥系统

基金项目: 上海市地方能力建设资助项目 (08160512600); 上海城投公司“十一五”项目; 上海电力学院科研基金资助项目

的动力学模型在软件平台上的打包集成。仿真软件一般由动力学模型、模型表达、参数校正、数值分析、数据表达和用户界面等模块组成^[2]。在污水处理领域,能用于数学模拟的软件可分为四个层次^[5]: ①电子数据表,可进行稳态计算,实现针对普通微分方程的简单数字程序; ②低端通用型编程语言(如 C、Fortran、Basic 等),创建模型的灵活性最高,但耗时费力; ③通用仿真软件(如 Matlab Mathematica 等),能够执行模型运算,可以从网上下载; ④专业仿真软件(如 Biowin、EFOR、WEST 等),主要由预定义的工艺模型单元库构成。

1.1 通用仿真软件

通用仿真软件通常具有很高的灵活性,但用户需根据污水处理厂工艺流程提供模拟所需的模型^[3]。在通用仿真软件中建模耗时很长,但其工作量要远低于采用低端通用型编程语言编程。通用仿真软件又可分为模块图形化和公式化仿真软件两种。

模块图形化仿真软件一般采用图形符号或框图来描述过程,这是对系统结构最自然的描述。当前主流仿真软件均提供模块图形化编辑器作为引擎图形端。最早的模块图形化仿真软件是 Easy-5 目前常用的则是 Simulink 和 SystemBuild。图形化仿真软件都能进行连续时间(微分方程)和离散时间(差

分方程)建模以及混合建模,这大大增强了仿真软件的实用性。图形化编辑器的主要缺点是与文字化微分方程结合困难,且易受到模型库的限制^[2]。

公式化仿真软件一般是利用公式导向系统的文字描述来定义模型,以命令驱动的软件。早期的公式化仿真软件(如 Simnon 和 ACSL)并不具备图形界面,这限制了其功能拓展和应用范围。后期的公式化仿真软件则通过图形化提升其功能,实现了模块与语言的结合(如 SPEEDUP 和 NMBUS)。这类仿真软件在通用仿真语言的基础上提供易于使用的图形模块界面,大大提升了仿真软件的竞争力。

1.2 污水处理专业仿真软件

自从 1988 年美国 Clemson 大学推出第一个活性污泥系统专业仿真软件 SSSP 以来,近年来欧美许多研究机构都开发了自己的专业仿真软件。专业仿真软件通常包括一个预定义的工艺单元模型库,比较典型的例子是基于 ASM 的完全混合式反应器和沉淀池一维分层模型。专业软件又可细分为环境工程通用仿真软件和封闭模型结构程序两大类。其中,前者的模型结构开放,用户在执行模型时具有较大的自由度;而后者则为用户提供事先限定的可用于执行特定处理工艺的构建模块,用户自由度较小^[5]。

常用的活性污泥系统专业仿真软件见表 1。

表 1 活性污泥系统的专业仿真软件

Tah 1 Specific simulation softwares for activated sludge system

仿真软件		特 点	开发机构
环境工程通用仿真软件	AQUASM	水体和水处理系统的交互式仿真软件,界面友好,但通用性较差,也没有在线功能	瑞士国家环境科学与技术研究院
	ASM	能够进行不同的生物处理系统模拟,能定义控制回路,允许用户进行二次开发	
	GPS-X	面向对象、模型独立的交互式商业软件包,包括大部分污水处理单元过程模型。能下载 SCADA 在线数据,利用呼吸仪自动识别参数,可使用 Matlab 强大的数据分析功能	加拿大 Hydramatic 公司
	SMBA	基于 Simulink 能针对污水处理厂和排水管网整体仿真,能够与 SCADA 系统在线连接	德国 IFAK 研究所
	WEST	污水处理厂的交互式动态仿真软件,界面友好,允许用户二次开发,但参数输入较麻烦	比利时 Hammis 公司
封闭模型结构程序	Biowin	以生物处理过程模型为基础的软件,包括稳态仿真软件和动态仿真软件两个模块	加拿大 EnviroSim Associates 公司
	EFOR	基于 ASM 的污水处理仿真程序,沉淀池模型包含多种水力学模型(目前已停用)	丹麦水动力研究所
	SSSP	第一个活性污泥工艺软件,基于 ASM 1 只能在 DOS 环境下运行	美国 Clemson 大学
	STOAT	支持 SCADA 的污水处理系统整体仿真软件,可与排水管网和水体模型软件结合使用	英国水研究中心

由于污水处理系统的复杂性,目前专业仿真软件仍处于不断发展的阶段。研究开发的新模型会不断被纳入仿真软件中,而高度复杂化的模型也需要仿真软件的验证。通用仿真软件的发展也推动了专业软件的开发,特别是在模型描述、数值算法开发和

优化工具等方面^[2]。在动态变化的专业仿真软件市场中,落后的仿真软件会逐渐被淘汰,而新开发的仿真软件又会逐渐进入市场。目前针对 SSSP 的应用报道已经很少,丹麦水动力研究所也停止了 EFOR 软件的开发,转而与 Hammis 公司合作推广

WEST 软件。也有一些软件正在逐渐进入市场, 例如西班牙 CALAGUA 研究小组推出的活性污泥系统设计、模拟和优化仿真软件 DESASS^[6]。

2 仿真软件在污水处理厂的应用

作为 ASM 的应用平台, 专业仿真软件的开发推动了数学模型的实际应用。在专业仿真软件中, 通过连接单元模块可非常方便地构建污水处理工艺, 模型参数可通过弹出的窗口进行校正, 用户无需完全深入了解模型结构就能进行工艺模拟, 这大大降低了模型的应用难度, 有助于用户将主要精力用于数据的前期收集和后期分析。当然, 在使用仿真软件时用户必须注意模型的基本假定和限制条件。

在仿真软件的辅助下, ASM 充分发挥了其在数据服务、决策咨询和数据分析等方面的作用^[3]。著

名的环境咨询公司 CH 2M、DH I 和 EnviroSin 均采用专业仿真软件作为其主力软件。随着模型的发展和专业软件的成熟, 许多污水处理厂在系统评估、运行管理及工艺优化中均采用了专业仿真软件。以荷兰为例, 1995 年—2002 年有超过 100 家污水处理厂采用基于 ASM 的软件进行模拟^[7]。表 2 统计了专业仿真软件在部分国外污水处理厂中的应用情况。在大量研究和实践的基础上, 欧美等国的研究和应用机构提出了四套针对模型应用的系统校正方案, 分别为北美的 WERE、荷兰的 STOWA、比利时的 BIOMATH 和德国/奥地利/瑞士的 HSG 方案^[8]。这些校正方案能够协助模型用户加快数据收集和参数校正的步骤, 进一步推动了数学模型在实际污水处理厂中的应用。

表 2 仿真软件在国外部分城市污水处理厂的应用

Tah 2 Application of simulation softwares in foreign municipal wastewater treatment plants

仿真软件	污水处理厂名称	国 家	规模/(m ³ ·d ⁻¹)	工 艺	主体模型	研究内容	参考文献
AQUASM	Parada	葡萄牙	25 920	传统活性污泥法	ASM 1	模拟仿真	[9]
	Zürich W endbö lzli	瑞 士	19 800	脱氮 A/O	ASM 3	模拟仿真	[10]
	Hardenberg	荷 兰	6 600	A ₂ N/U CT	TUD P	工艺对比	[11]
ASM	M au H in Road	美 国	20 500	A ² /O	ASM 2	模拟仿真	[12]
	Zurich	瑞 士	397 440	脱氮 A/O	ASM 3	低温运行评估	[13]
BioWin	G roos	挪 威	6 500	A ² /O	—	低温运行评估	[14]
	Tyson Foods	土耳其	6 500	传统活性污泥法	ASM 1	升级评估	[15]
EFOR	Brønna	瑞 典	160 000	传统活性污泥法	二沉池	模拟仿真	[16]
GPS-X	W schod/Debogorze	波 兰	85 000(66 000)	UCT(A ² /O)	ASM 2	模拟仿真	[17]
	E z incan City	土耳其	15 163	Carrouse l 氧化沟	ASM 1	模拟仿真	[18]
SMB A	H olten	荷 兰	5 500	BCFS	TUD P	参数校正和模拟仿真	[19]
	H amburg	德 国	1 036 800	传统活性污泥法	ASM 1	运行优化	[20]
	Katwoude	荷 兰	13 252	Carrouse l 氧化沟	TUD P	故障诊断和数据校核	[21]
		瑞 典	18 240	U CT	ASM 2	模拟仿真	[22]
WEST	T ielt	比利时	12 925	B io-Den ipho	ASM 2d	模拟仿真	[23]
	Tougas	法 国	518 400	氧化沟	ASM 1	模拟仿真	[24]

我国在 ASM 方面的研究起步较晚, 早期研究主要集中于模型介绍、组分和参数测定, 但近年来我国研究者已逐渐认识到模型在污水处理厂运行管理和工艺优化方面的巨大潜力, 有关研究工作正在逐渐展开。

表 3 综述了文献报道的仿真软件在我国的应用情况。可见, 专业软件在国内应用较少, 国内许多研究倾向于采用通用仿真软件甚至是低端通用型编程语言, 这导致大量时间用于软件的基础开发, 研究相对滞后。究其原因主要有三方面: ①国外专业仿真

软件进入中国较晚, 软件通常没有中文界面或提示, 市场正在拓展中; ②专业软件价格昂贵, 全套价格通常为 10~ 20 万元; ③市场驱动力不足。近几年国内城市污水处理厂大多执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 的二级排放标准, 对运行优化要求不高。

总体而言, 随着国内仿真软件市场的发展和国家对污水处理厂出水水质要求的日益严格(出水水质达一级 A 标准), 专业仿真软件在城市污水处理厂中的应用将会大大增加。

表 3 仿真软件在国内城市污水处理厂的应用概况

Tab 3 Application of simulation softwares in domestic municipal wastewater treatment plants

仿真软件	污水处理厂	规模 / ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	工 艺	主体模型	内 容	参考文献
AQUASIM	太原市杨家堡污水处理厂	16.64	CAS与 UCT	TUD	CAS升级为 UCT 评估	[25]
	北京某大型污水处理厂	25	倒置 A^2/O		模拟仿真	[26]
	北京某大型污水处理厂	—	倒置 A^2/O		运行诊断与优化	[27]
EFOR	某城市污水处理厂	—	氧化沟	ASM 1	温度、流量和负荷波动模拟	[28]
	深圳市盐田污水处理厂	12	MSBR		模拟仿真	[29]
	上海某城市污水处理厂	5.5	AB法		模拟仿真	[30]
GPS-X	北京市高碑店污水处理厂	100	倒置 A^2/O	ASM 2d	改善和优化脱氮除磷	[31]
Matlab/ Simulink	重庆市唐家桥污水处理厂	6	传统活性污泥法与 A^2/O	ASM 1	升级改造	[32]
	浙江省德清县狮山污水处理厂	3	A^2/O	ASM 2	模拟预测、工艺条件优化	[33]
	上海石洞口污水处理厂	40	Unitank	ASM 2d	工艺分析	[34]
SSSP	北京北小河污水处理厂	4	传统活性污泥法	ASM 1	模拟仿真	[35]
WEST	无锡城北污水处理厂	10	氧化沟	ASM 1	模拟仿真	[36]

3 结语与展望

① 近年来,基于 ASM 的活性污泥系统仿真软件在国内外许多污水处理厂的模拟仿真、升级改造、运行优化和故障诊断等方面得到了广泛应用。但与国外相比,国内对专业仿真软件的应用仍显不足,这主要是由于市场和软件价格两方面原因造成的。

② 当前活性污泥系统仿真软件的一个明显缺陷是局限于连续流活性污泥工艺,实际污水处理厂包括了许多其他工艺单元。例如污泥处置,其费用通常高于污水处理,在仿真软件中忽略污泥处置的优化会陷入局部最优化。因此,仿真软件开发的一个方向是纳入更多的单元过程模型,并考虑污水处理厂模型与水质模型和环境模型的整合。

③ 为了更好地描述实际过程,仿真软件还应结合实际情况考虑尽可能详细的模型过程,例如微生物接种、进水中毒性物质的存在及其影响、丝状菌引起的污泥膨胀对沉淀过程的影响以及水力学因素等。

④ 当前大多数仿真软件均缺乏“透明性”,用户对软件中数学模型及算法的了解是信任仿真结果进而改进软件的前提。此外,提供优良的低端通用型语言支持、高效的数值程序以及优化工具也是仿真软件开发中的重要方向。

参考文献:

[1] Henze M, Gujer W, Mino T, *et al*. Activated Sludge Models ASM 1, ASM 2, ASM 2d and ASM 3[M]. London

IWA Publishing 2000

[2] Olsson G, Newell B. Wastewater Treatment Systems Modelling Diagnosis and Control[M]. London: IWA Publishing 1999.

[3] Gemaey K V, van Loosdrecht M C M, Henze M, *et al*. Activated sludge wastewater treatment plant modelling and simulation: state of the art[J]. Environ Model Software, 2004, 19(9): 763–783.

[4] 孙德荣, 吴星五. 活性污泥法数学模型的发展及应用[J]. 中国给水排水, 2003, 19(2): 40–42.

[5] Morgenroth E, Arvin E, Vanrolleghem P. The use of mathematical models in teaching wastewater treatment engineering[J]. Water Sci Technol, 2002, 45(6): 229–233.

[6] Ferrer J, Seco A, Serralta J *et al*. DESASS: a software tool for designing, simulating and optimising WWTPs[J]. Environ Model Software, 2008, 23(1): 19–26.

[7] Hulsbeek J J W, Kruit J, Roelvel P J *et al*. A practical protocol for dynamic modelling of activated sludge systems[J]. Water Sci Technol, 2002, 45(6): 127–136.

[8] Sin G, van Hulle SW H, De Pauw D J W, *et al*. A critical comparison of systematic calibration protocols for activated sludge models: a SWOT analysis[J]. Water Res, 2004, 39(12): 2459–2474.

[9] Cheng C Y, Rbarova I. Activated sludge system modelling and simulations for improving the effluent water quality[J]. Water Sci Technol, 1999, 39(8): 93–98.

[10] Koch G, Kühn i M, Gujer W, *et al*. Calibration and validation of activated sludge model No. 3 for Swiss municipi-

- palwastewater[J]. *Water Res* 2000, 34(14): 3580–3590
- [11] Hao X D, van Loosdrecht M C M, Meijer S C F, *et al* Model-based evaluation of two BNR processes – UCT and A₂N [J]. *Water Res*, 2001, 35(12): 2851–2860
- [12] Cinar O, Daigger G T, Graef S P. Evaluation of IAWQ activated sludge model No. 2 using steady-state data from four full-scale wastewater treatment plants [J]. *Water Environ Res* 1998, 70(6): 1216–1224
- [13] Wanner O, Panagiotis V, Clavadetscher P, *et al* Effect of heat recovery from raw wastewater on nitrification and nitrogen removal in activated sludge plants [J]. *Water Res* 2005, 39(19): 4725–4734
- [14] 胡锋平, 胡春燕, 李伟民, 等. Biorwin 工艺及其在挪威 Groos 污水处理厂中的应用 [J]. *给水排水*, 2002, 28(10): 1–4
- [15] Cokgor E U, Randall C W, Orhon D. Evaluation of the performance of the Tyson Foods wastewater treatment plant for nitrogen removal [J]. *Water Sci Technol* 2005, 51(11): 159–166
- [16] Gohle F, Finsson A, Hulman B. Dynamic simulation of sludge blanket movement in a full-scale rectangular sedimentation basin [J]. *Water Sci Technol* 1996, 33(1): 89–99
- [17] Makinia J, Swinarski M, Dobiegala E. Experiences with computer simulation at two large wastewater treatment plants in northern Poland [J]. *Water Sci Technol* 2002, 45(6): 209–218
- [18] Nuhoglu A, Keskinler B, Yildiz E. Mathematical modelling of the activated sludge process – the Erzincan case [J]. *Process Biochem*, 2005, 40(7): 2467–2473
- [19] van Veldhuizen H M, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Modelling biological phosphorus and nitrogen removal in a full-scale activated sludge process [J]. *Water Res* 1999, 33(16): 3459–3468
- [20] Ladiges G, Gunner C, Otterpohl R. Optimisation of the Hamburg wastewater treatment plants by dynamic simulation [J]. *Water Sci Technol* 1999, 39(4): 37–44
- [21] Meijer S C F, van der Spoel H, Susanti S, *et al* Error diagnostics and data reconciliation for activated sludge modelling using mass balance [J]. *Water Sci Technol* 2002, 45(6): 145–156
- [22] Dudley J, Buck G, Ashley R, *et al* Experience and extensions to the ASM2 family of models [J]. *Water Sci Technol* 2002, 45(6): 177–186
- [23] Carrette R, Bixio D, Thoeye C, *et al* Full-scale application of the IAWQ ASM No. 2d model [J]. *Water Sci Technol* 2001, 44(2–3): 17–24
- [24] Printemps C, Baudin A, Dormoy T, *et al* Optimisation of a large WWTP thanks to mathematical modelling [J]. *Water Sci Technol* 2004, 50(7): 113–122
- [25] 郝晓地, 仇付国, 张璐平, 等. 应用数学模拟技术升级改造二级污水处理工艺 [J]. *中国给水排水*, 2007, 23(16): 25–29
- [26] 郝晓地, 宋虹苇, 胡沅胜, 等. 采用 TUD 联合模型模拟倒置 A²/O 工艺的运行工况 [J]. *中国给水排水*, 2007, 23(5): 1–4
- [27] 郝晓地, 宋虹苇, 胡沅胜, 等. 数学模拟技术用于污水处理工艺的运行诊断与优化 [J]. *中国给水排水*, 2007, 23(14): 94–99
- [28] 陈立. EFOR 程序的仿真模拟功能应用研究 [J]. *中国给水排水*, 1998, 14(5): 15–18
- [29] 周雪飞, 顾国维, 刘建勇, 等. 城市污水厂生物处理工艺运行效果的数学模拟 [J]. *同济大学学报 (自然科学版)*, 2004, 32(6): 745–748
- [30] 刘芳, 陈秀华, 顾国维. 简化活性污泥数学模型在城市污水厂中的应用 [J]. *环境工程*, 2005, 23(2): 33–36
- [31] 朱向东, 郝二成, 周军, 等. ASM2d 模型在北京高碑店污水处理厂的应用 [J]. *给水排水*, 2007, 33(4): 101–104
- [32] 张代钧, 卢培利, 陈丹琴, 等. 传统活性污泥法 COD 去除与脱氮改造的模拟 [J]. *环境科学学报*, 2002, 22(4): 448–453
- [33] 陈昆柏, 宋英琦, 孙培德, 等. A²/O 工艺污水处理厂运行参数优化的数值模拟 [J]. *环境科学学报*, 2008, 28(4): 804–809
- [34] 董姗姗, 汪喜生, 王文佳, 等. Unitank 工艺流程磷酸盐浓度非稳态特征 [J]. *环境化学*, 2007, 26(1): 1–4
- [35] 汪慧贞, 曹秀芹. 活性污泥模型 NO. 1 及 “SSSP 程序” 在中国污水厂适用性的初步探讨 [J]. *北京建筑工程学院学报*, 1996, 12(3): 66–74
- [36] 揭大林, 操家顺, 花月, 等. WEST 仿真软件在污水处理中的应用研究 [J]. *环境工程学报*, 2007, 1(3): 138–141

电话: (021) 65430410×586

E-mail: zhouzhen09@yahoo.com.cn

收稿日期: 2009-07-15