

基于简化活性污泥数学模型的污水处理仿真研究

于广平^{1,2}, 苑明哲¹, 王 宏¹

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)



摘 要: 现有的活性污泥数学模型结构复杂、参数众多, 直接用于污水处理的系统仿真有一定的困难。针对这一问题, 对活性污泥 1 号模型 ASM1 面向应用进行合理的简化, 得到适合描述活性污泥推流式工艺碳去除过程的模型 ASP-CR。该模型的组分、反应过程和参数的数量都大大减少, 并对溶解氧组分进行了特殊处理—用现场的测量值代替预测值。基于该模型建立了污水处理仿真系统, 解决了数据转换和参数校正的问题。通过对海城污水处理厂处理过程的实时模拟, 验证了系统的正确性和实用性。

关键词: 简化; 活性污泥; 数学模型; 污水处理; ASM1; 仿真

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2007) 23-5366-04

Research on Simulation of Wastewater Treatment Based on Simplified Mathematical Model for Activated Sludge Process

YU Guang-ping^{1,2}, YUAN Ming-zhe¹, WANG Hong¹

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang Liaoning 110016, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Because of the complex structure and too many parameters of existing mathematical models for activated sludge process, it is difficult to directly apply the models in the simulation systems of wastewater treatment. In order to solve the problem, the model of Activated Sludge Model No.1 (ASM1) was reasonably simplified for application. The model ASM-CR (Activated Sludge Model-Carbon Removal) was developed which is suitable for describing the process of carbon removal in the plug-flow activated sludge process. The numbers of the components, the biological processes and the parameters considered in ASP-CR were greatly reduced. The component of dissolved oxygen was specially treated—the predicted concentration was replaced by the measured concentration. Based on the model, the simulation system of wastewater treatment was developed. And the issues of data converting and parameters calibrating were settled. The simulation of the wastewater treatment in Haicheng Wastewater Treatment Plant proves the feasibility and validity of the system.

Key words: simplify; activated sludge; mathematical model; wastewater treatment; ASM1; simulation

引 言

基于简化活性污泥数学模型的污水处理仿真研究一直是污水生化处理领域研究的热点之一。活性污泥数学模型是从表示基质消耗与微生物生长关系的 Monod^[1]方程出发, 结合化工领域的反应器理论与微生物学理论, 对基质降解、微生物生长等各参数之间的数学关系做定量描述。从上世纪 50 年代开始, 经过不断的发展, 出现了很多优秀的活性污泥数学模型。在众多数学模型中, 国际水协会 (International Water Association, 简称 IWA) 推出的活性污泥 1 号、2 号、3 号模型 (Activated Sludge Model NO.1, NO.2, NO.3, 简称 ASM1, ASM2, ASM3) 发展最成熟。尤其是 ASM1^[2]模型, 自发表以来受到国内外环境工程界的广泛关注, 目前已成为活性污泥过程仿真和控制的重要理论基础, 是影响最

大、应用最广的模型。

ASM1 包括了碳氧化、硝化和反硝化过程, 描述了污水中好氧和缺氧条件下所发生的有机碳水解、微生物生长和衰减等 8 个反应过程, 模型还包含 13 种组分和 19 个参数。复杂的模型结构和众多的参数在一定程度上限制了模型的应用。限于污水处理厂的设计、运行水平和现场仪器仪表的水质检测能力, 直接应用整套模型进行污水处理过程的系统仿真具有一定的困难。因此在实践中研究者往往基于一些合理化的假设, 对 ASM 系列模型进行简化, 简化后的模型能够利用污水处理厂的历史数据, 对活性污泥工艺的主要反应过程进行离线模拟, 在工艺检测和控制方面取得了较好的成绩。如 1993 年 Jeppsson 推出的 ROM (Reduced order model) 模型^[3]、1997 年 Zhao 推出的 SPM (Simplified process model) 模型^[4-5]、2001 年 Kim 推出的 SLM (Simplified linear model) 模型^[6-7]、2001 年季民等推出的 ASP-CO (Activated Sludge Process Simulation-Carbon Oxidation) 模型^[8]。受限于污水处理厂现场仪器仪表的检测能力, 尤其是对国内的污水处理厂, 基于这些模型的仿真系统还不能对污水处理过程进行在线的实时模拟。本文根据国内污水处理厂的工艺和现场仪表

收稿日期: 2006-09-25

修回日期: 2006-12-01

作者简介: 于广平(1980-), 男, 山东青岛人, 博士生, 研究方向为先进控制, 系统建模、仿真与优化; 苑明哲(1971-), 男, 辽宁抚顺人, 博士, 副研究员, 研究方向为分布式控制系统, 先进控制, 系统仿真与优化; 王宏(1963-), 男, 河北省抚宁县人, 研究员, 博导, 研究方向为计算机网络, 工业通信, 嵌入式系统研究与开发, 集成电路设计。

的状况, 对 ASM1 模型进行了适当的简化, 建立了适合描述普通推流式活性污泥法碳去除过程的模型 ASM-CR (Activated Sludge Model-Carbon Removal), 并基于该模型建立了污水处理的仿真系统。该系统充分的利用了污水处理厂现场仪表的检测数据, 利用软测量技术实现了常规水质指标与模型组分浓度间的转换, 并对模型的参数进行了校正。同时对模型的组分溶解氧进行了特殊处理—用现场的测量值代替预测值, 即避免了溶解氧平衡方程中参数无法测量的问题, 又保证了数据的准确性。这样系统就能实现污水处理过程的在线实时模拟。应用该系统对辽宁海城污水处理厂的运行情况进行了在线模拟, 模拟的结果较为理想。

1 简化活性污泥数学模型的建立

1.1 模型建立的依据

ASP-CR 模型以 ASM1 模型为基础, 结合我国污水处理厂的实际情况进行合理化简, 主要是对模型的过程和组分进行简化。其简化的基本依据为: 在过程上, 主要考虑碳氧化过程而不考虑硝化和反硝化过程; 在组分上, 主要考虑对化学需氧量 COD (Chemical Oxygen demanded) 贡献大的组分, 对贡献小的组分浓度忽略不计。具体简化依据如下:

(1) 国内绝大多数污水处理厂采用活性污泥法处理工艺, 执行二级处理标准 (GB18918-2002), 主要考虑的是碳

的氧化过程, 对于氮磷的去除基本不作考虑, 主要参考出水的 COD 作为出水是否合格的依据。

(2) 模型主要针对传统推流式活性污泥法, 仅考虑异养菌好氧条件下的碳氧化过程和颗粒性有机物质的水解过程, 而对其它过程不予考虑。

(3) 根据 IWA 提供的 Benchmark 文件的数据, 对进出水的 COD 中含量都很小的组分浓度忽略不计。

(4) 不考虑溶解氧、氮磷和其他无机营养物质对有机物去除及细胞生长的影响。

(5) 假设异养微生物均一旦种属稳定。

由于这种简化只是结合我国国情对模型的过程和组分的一种简化, 模型的结构和原理并没有改动, 因此对模型整体仿真的影响很小, 简化后的模型完全可以用于污水处理系统的仿真。

1.2 简化模型的结构

根据上述依据, 经过合理的简化后, ASM-CR 模型只包含 7 种组分、3 个反应过程和 8 个参数, 表 1 给出了矩阵形式表达的模型。简化后的模型结构得到简化, 参数的数量也得到减少, 这就意味着在实际应用中减少了模型参数测定的工作量和模拟中的计算量, 从而提高了模型在城市污水处理厂中的实用性。

表 1 ASP-CR 模型的反应过程和组分矩阵表

过程 j	组分 i							工艺过程速率 ρ_j
	$1S_I$	$2S_S$	$3X_I$	$4X_S$	$5X_{BH}$	$6X_P$	$7S_O$	
1. 异养菌的好氧生长		$-\frac{1}{Y_H}$			1	特殊处理		$\mu_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) X_{B,H}$
2. 异养菌的衰减					$1-f_P$	-1	f_P	$b_H X_{B,H}$
3. 颗粒状有机物的水解		1			-1			$k_h \left(\frac{X_S / X_{B,H}}{K_X + X_S / X_{B,H}} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right)$
观察到的转化速率								$r_i = \sum_j v_{ij} \rho_j$

其中 S_I —可溶性惰性有机物质 (mg/l); S_S —易生物降解基质 (mg/l); X_I —颗粒状惰性有机物质 (mg/l); X_S —慢速可生物降解基质 (mg/l); $X_{B,H}$ —异养菌活性生物量 (mg/l); X_P —由微生物衰减而产生的颗粒状产物 (mg/l); S_O —溶解氧 (mg/l); Y_H —异养菌产率系数; f_P —生物体种可转化为颗粒状产物的比例; μ_H —异养菌最大比增长速率系数; K_S —异养菌半饱和系数; $K_{O,H}$ —异养菌的氧半饱和系数; b_H —异养菌的衰减系数; k_h —最大比水解速率; K_X —慢速可生物降解底物水解的半饱和系数。

ASM-CR 模型主要用于描述传统推流式工艺生活污水的处理过程, 其使用限制条件同 ASM1 模型一致, 限制条件为^[9]:

(1) 温度在 8—23°C 之间;

(2) pH 值在 6.5—7.5 的范围内;

(3) 曝气器中的混合强度不能超过 240/s;

(4) 反应器的曝气死区所占比例 $\leq 50\%$, 否则污泥沉降性能将会恶化;

(5) 不适用于超高负荷或泥龄 (SRT) 小的活性污泥系统, SRT 应为 3—30d;

(6) 污泥浓度一般应在 750—7500mg/L 之间。

1.3 溶解氧的特殊处理

溶解氧是模型中最为重要的一个组分, 是污水生化处理系统中一个非常重要的指示参数, 它能比较直观、迅速的反映整个系统的运行状况。目前污水处理厂大部分的控制和优化都是以对溶解氧的监控为基础的, 所以实际应用中溶解氧的精度要求较高。对溶解氧的控制可以直接影响到出水水

质和系统能耗。溶解氧浓度过低，出水质量不合格；溶解氧浓度过高，则会造成能源的浪费，因此溶解氧浓度直接关系到用户最关心的两个指标出水质量和经济效益^[10]。在 ASP-CR 模型中对溶解氧做了特殊的处理。

根据物料平衡关系：溶解氧的积累量=进入量+反应生成量+气液传递量-排出量。在 ASM1 模型中，生化池溶解氧浓度的数学表达式为：

$$\frac{dS_o}{dt} = [Q_{in}S_{o,in} + rV + k_{la}V(S_{o,sat} - S_o) - Q_{out}S_{o,out}] / V \quad (1)$$

其中， S_o —生化反应池中的溶解氧浓度 (mg/l)； Q_{in} —入水流量 (m³)； Q_{out} —出水流量 (m³)； $S_{o,in}$ —入水中的溶解氧含量 (mg/l)； $S_{o,out}$ —出水中的溶解氧含量 (mg/l)； r —生化反应池中溶解氧的反应速率； V —生化反应池的体积； k_{la} —氧传递系数 (d⁻¹)； $S_{o,sat}$ —溶解氧的饱和浓度 (mg/l)。

由于目前还没有可以直接测量氧传递系数 k_{la} 的仪器仪表或手段方法，所以应用公式有一定的困难。但是测量溶解氧浓度有专门的在线仪表，而且在污水厂的应用非常普遍。这种仪表测量迅速、结果准确、价格便宜。因此可以用直接测量的结果代替模型中生化池的溶解氧浓度。这样既可以避免氧传递系数无法测量的困难，又可以充分利用现场的仪表，保证测量的精度。

2 仿真系统的建立

2.1 仿真工艺介绍

ASP-CR 模型主要针对传统推流式活性污泥法工艺，图 1 给出了传统活性污泥法 A/O 工艺的流程。A/O 工艺是目前应用最为广泛、最具代表性的活性污泥工艺，其配置主要由厌氧池、好氧池和二沉池组成，其中厌氧池中的溶解氧浓度为 0。厌氧池和好氧池共同组成生化池，其生化反应过程采用表 1 中的 ASP-CR 模型来描述，二沉池部分采用基于固体通量的 Takacs 模型^[11]描述。

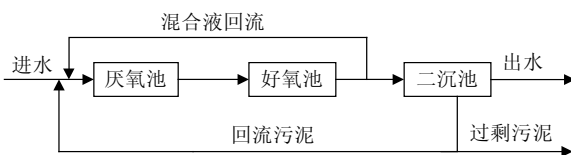


图 1 传统 A/O 工艺的流程

2.2 数据转换的软测量模型

目前大多数污水处理厂的仪器仪表和测量手段还不能完成模型组分浓度的测量工作。尤其是国内的污水处理厂，基本上只能够测量化学需氧量 COD、固体悬浮物浓度 SS、5 日生化需氧量 BOD₅ 等常规水质分析指标。针对这种情况，引入软测量技术，建立联系可测量的常规水质分析指标和难以测量的组分浓度的软测量模型，实现二者的实时转换^[12]。

首先考虑入水的常规水质分析指标和模型组分浓度之间转换的软测量模型。入水 COD 中的 X_p 含量很小，其浓度

可以忽略为 0。其余 5 种组分浓度的计算参见式(3)-(7)。

$$f_{sol} = \frac{S_s + S_I}{COD_{in}} \quad (2)$$

$$S_s = (COD_{in} - \frac{SS_{in}}{0.75}) \times rand1 \quad (3)$$

$$S_I = (COD_{in} - \frac{SS_{in}}{0.75}) - S_s \quad (4)$$

$$X_I = rand2 \times (1 - f_{sol}) \times COD_{in} \quad (5)$$

$$X_s = rand3 \times (1 - f_{sol}) \times COD_{in} \quad (6)$$

$$X_{B,H} = \frac{SS_{in}}{0.75} - X_I - X_s \quad (7)$$

其中 COD_{in} 和 SS_{in} 分别表示入水的 COD 和 SS 的浓度， f_{sol} 表示入水 COD 中可溶性组分 (S_s 和 S_I) 所占的比例， $rand1$ 、 $rand2$ 和 $rand3$ 均是调节系数，其值由入水水质和温度等环境条件决定（以下调节系数值的决定因素均为入水水质和温度等环境条件），满足 $0 < rand1 < 1$ ， $0.15 < rand2 < 0.25$ ， $0.45 < rand3 < 0.55$ 。

出水的组分浓度转化为出水常规水质指标的软测量模型为：

$$COD_{out} = S_s + S_I + X_s + X_I + X_{B,H} + X_p \quad (8)$$

$$SS_{out} = 0.75 \times (X_s + X_I + X_{B,H} + X_p) \quad (9)$$

$$BOD_{5,out} = 0.25 \times [S_s + X_s + (1 - f_p) \times X_{B,H}] \quad (10)$$

其中， COD_{out} 、 SS_{out} 和 $BOD_{5,out}$ 分别表示出水的常规水质分析指标 COD、SS 和 BOD₅。

2.3 参数估值

动力学参数的测定研究发现，温度（尤其是水温）对于反应速率有着非常重要的影响。因此需要根据水温的变化对模型的参数值进行适当的调整。这里参照季民的 ASPS-CO 系统^[8]的参数估值方法。根据水温变化的幅度，将模拟分为四个阶段：类似于四季的划分，4—5 月、6—8 月、9—10 月和 11—3 月分别代表“春夏秋冬”四个阶段（可以根据地域和气候适当调整）。对于“冬季”，其初始参数可采用 10℃ 的推荐值，“夏季”采用 20℃ 的推荐值，“春秋”水温变化范围较大，可以根据 Arrhenius 公式对参数值进行修正。其中 Y_H 、 f_p 、 K_s 和 $K_{O,H}$ 四个参数在水温 10℃—20℃ 时数值保持不变，因此只需考虑 μ_H 、 b_H 、 k_h 和 K_X 四个参数值的修正情况，具体的修正公式如式(11)所示：

$$\mu(t) = u(20) \times e^{k(t-20)} \quad (11)$$

式中 $\mu(t)$ 代表模型需要修正的参数在水温为 t 时的值， t 为当前的水温， k 为反应速率常数，这里 $k=0.1$ 。

3 仿真系统的应用

海城污水处理厂是一个日处理能力 3 万 m³ 的小型污水处理厂，采用 A/O 工艺。污水处理厂按照国家二级出水标准设计，即出水常规指标应满足 $COD < 100g \cdot m^{-3}$ ， $SS < 30g \cdot m^{-3}$ ， $BOD_5 < 30g \cdot m^{-3}$ ， TN 不作要求^[13]。

作者在对海城污水处理厂污水处理过程的仿真系统中应用了模型 ASP-CR，用来模拟生化反应池部分的处理过程，

实现了对出水水质指标的预测。由于软测量模型的主导变量都是污水厂现场可以直接测量的, 因此该仿真软件可以实现在线的实时仿真。软测量模型调节系数取值情况如下: $rand1=0.67$, $rand2=0.23$, $rand3=0.5$ 。

图 2 和图 3 给出了 2006.5.22—2006.6.21 一个月时间的海城污水处理厂的出水实际指标和用仿真系统得到的出水预测指标的对比情况(海城污水处理厂不具备测量 BOD_5 的能力)。从图中可以看出, 出水 SS 与 COD 的预测值和实际值较为接近, 仿真结果比较理想, 证明了仿真系统的正确性和实用性。

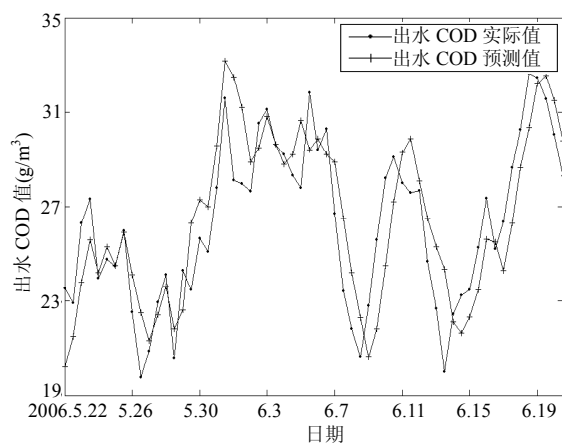


图 2 海城污水处理厂出水 COD 实际值和模拟值对比图

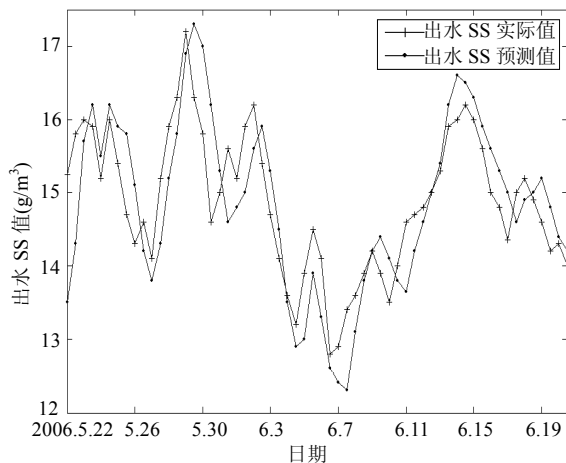


图 3 海城污水处理厂出水 SS 实际值和模拟值对比图

4 结论

以 ASM1 模型为基础, 通过合理简化建立的活性污泥数学模型 ASP-CR, 适合描述推流式活性污泥工艺的碳去除过程。模型的组分、反应过程以及模型参数的数量都大大的减

少, 这就意味着可以减少模型组分和参数测定的工作量和模拟中的计算量, 从而提高了模型在城市污水处理中的实用性。

基于 ASP-CR 建立的污水处理仿真系统充分的利用了污水处理厂现场仪表的检测数据, 利用软测量技术实现了常规水质指标和模型组分浓度之间的互相转换, 并对模型的参数进行了校正。同时对模型的组分溶解氧进行了特殊处理—用现场的测量值代替预测值, 即避免了溶解氧平衡方程中参数无法测量的问题, 又保证了数据的准确性。这样系统就能对实现对污水处理过程进行在线的实时模拟。对海城污水处理厂的模拟结果验证了模型的正确性和实用性。

参考文献:

- [1] Monod J. The growth of bacterial cultures [J]. Annual Review of Microbiology (S0066-4227), 1949, 3(3): 371-374.
- [2] Henze M Grady. Activated Sludge Model No.1, IAWC Scientific and Technical Report No.1 [R]. London: IAWQ, 1987.
- [3] U Jeppsson. Reduced Order Models for On-line Parameter Identification of the Activated Sludge Process [J]. Wat. Sci.Tech. (S 0273-1223), 1993, 28(11): 173-183.
- [4] Hong Zhao. Modeling Nutrient Dynamics in Sequencing Batch Reactor [J]. Journal of Environmental Engineering(S0733-9372), 1997, 123(4): 311-319.
- [5] Hong Zhao. Approaches to Modeling Nutrient Dynamics: ASM2, Simplified Model and Neural Nets [J]. Wat. Sci.Tech. (S0273-1223), 1999, 39(1): 227-234.
- [6] Hyunook Kim. SBR System for Phosphorus Removal: ASM2 and Simplified Linear Model [J]. Journal of Environmental Engineering (S0733-9372), 2001, 127(2): 98-104.
- [7] Hyunook Kim. SBR System for Phosphorus Removal: Linear Model Based Optimization [J]. Journal of Environmental Engineering (S0733-9372), 2001, 127(2): 105-111.
- [8] 季民, 霍金胜, 胡振苓, 等. 活性污泥法数学模型的研究和应用 [J]. 中国给水排水, 2001, 17(8): 18-21.
- [9] 于广平, 苑明哲, 王宏. 活性污泥法污水处理数学模型的发展和应 用 [J]. 信息与控制, 2006, 35(5): 614-618.
- [10] 于广平, 张平, 魏松岩, 等. 仿人智能 PID 控制及在污水处理溶解氧控制中的应用 [J]. 微计算机应用, 2006, 26(2): 13-15.
- [11] Takacs I, Patry G, Nolasco D. Dynamic model of the clarification-thickening process [J]. Water Research (S0043-1354), 1991, 25(10): 1263-1271.
- [12] 于广平, 苑明哲, 王宏. 面向活性污泥 1 号模型应用的软测量技术 [J]. 仪器仪表学报(增刊), 2006, 27(6): 1058-1060.
- [13] 张平, 苑明哲, 王宏. 污水处理过程的奇异摄动模型仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(14): 3188-3192.(Zhang Ping, Yuan Ming-zhe, Wang Hong. Simulation Study on Singular Perturbation Model of Wastewater Treatment Process [J]. Journal System Simulation, 2007, 19(14): 3188-3192.)