

Simulation Application of Activated Sludge Model 1 in the Papermaking Wastewater Activated Sludge Treatment

Wenhao SHEN, Zhou LONG, Xiaoquan CHEN

State Key Laboratory of Pulp and Paper Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, 510640, China

E-mail: ppwhshen@scut.edu.cn

Abstract: Basing on the activated sludge model 1, the activated sludge model which is applicable for papermaking wastewater was established by reasonably simplifying. The components, stoichiometric parameters and kinetic parameters in the model were measured, the simulated model of papermaking wastewater SBR (Sequencing Batch Reactor Activated Sludge Process) treatment process was built by MATLAB/SIMULINK, and the simulation results proved that the model was correct. Basing on the developed simulated model, the traditional PID controller and adaptive neural network PID controller were applied for the control of the dissolved oxygen concentration in activated sludge process, and achieved good results.

Key words: activated sludge model 1; papermaking wastewater; simulation

活性污泥 1 号模型在造纸污水活性污泥法处理中的仿真应用

沈文浩, 龙 周, 陈小泉

华南理工大学制浆造纸工程国家重点实验室, 广州, 中国, 510640

E-mail: ppwhshen@scut.edu.cn

摘 要: 在活性污泥 1 号模型的基础上, 进行合理的简化和修正, 获得了适用于造纸污水处理的活性污泥模型, 对模型组分、化学计量系数和动力学参数进行了测定, 基于 MATLAB/SIMULINK 工具建立了造纸污水 SBR 处理过程仿真模型, 并通过仿真模型证明了模型的正确性。在仿真模型的基础上研究了传统 PID 控制和自适应神经网络 PID 控制对 SBR 过程溶解氧浓度的控制, 并取得了良好的效果。

关键词: 活性污泥 1 号模型; 造纸污水; 仿真

1 引言

活性污泥法污水处理过程是一个强耦合、多输入多输出动态系统, 具有高度非线性、时变、不确定性和时滞等特点, 因此导致了活性污泥法处理过程研究的复杂和困难。随着活性污泥数学模型的成熟和计算机仿真技术的发展, 通过计算机模拟技术仿真活性污泥法污水处理过程, 研究活性污泥法污水处理工艺、过程控制算法和控制策略, 对活性污泥法污水处理系统进行改造等等, 已成为活性污泥法污水处理的研究热点^[1]。蒋卫刚, 顾国维等人^[2]应用 Delphi 编译软件, 在 Windows 平台上自行开发了污水处理模拟系统, 对

上海市某采用 A/O 工艺的污水处理厂的模拟, 并根据模拟结果对污水处理工艺提出了改建设计方案; 张园园^[3]在活性污泥 2 号模型的基础上编制了活性污泥系统模拟程序, 应用该程序对西安市某污水处理厂 A₂/O 系统进行了分析, 并提出提高系统脱氮效率的方案。R.C. Ky, Y. Comeau 等人^[4]在活性污泥 1 号模型的基础上, 开发出用于奶油厂活性污泥法污水处理过程的 A3DX 模型。

国际水质协会 (International Water Association, IWA) 提出的活性污泥系列模型 (ASM1, ASM2, ASM2D, ASM3) 是目前研究最为成熟的活性污泥模型, 其中以 ASM1 (活性污泥 1 号模型) 使用最为广泛^[5]。ASM1 模型原本是由于对市政污水处理过程的

资助信息: 国家自然科学基金项目 (61074109)

模拟，但是通过近年来的研究发现，通过对 ASM1 进行修正或者加入特定的功能，也能够较好的模拟工业废水处理过程。本文基于 ASM1，对广州市某二次纤维造纸厂的活性污泥法污水处理过程进行了研究，通过 MATLAB/SIMULINK 建立了该厂活性污泥法污水处理过程的仿真模型，并在模型的基础上研究了活性污泥法污水处理过程中溶氧量浓度的控制。

2 造纸厂污水处理系统简介

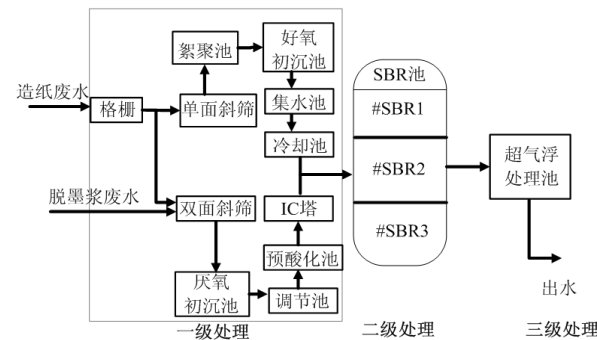


Figure 1. Flow chart of wastewater treatment process of paper mill
图 1. 造纸厂污水处理流程图

该造纸厂是一家利用 100%二次纤维造纸的企业，处理污水为脱墨制浆污水、抄纸白水和部分生活污水的混合水，采用三级处理技术，包含了初沉、IC 塔厌氧处理、SBR 好氧处理、超气浮处理等工艺过程，具体流程如图 1 所示。其中活性污泥法污水好氧处理过程采用了 SBR 工艺（序列间歇式活性污泥工艺）。SBR 在这个污水处理中作为二级处理工艺，入水 COD 浓度在 500mg/L 左右，SS 浓度在 200mg/L 左右，处理目标为使出水 COD<200mg/L，SS 浓度<100mg/L。

3 仿真模型的建立

3.1 模型简化

活性污泥 1 号模型中包含了碳氧化、硝化和反硝化等 8 个反应过程，以及 13 个污水组分，由于活性污泥模型反应过程复杂，参数众多，并存在实际污水处理过程中难以测量或者不能测量的参数，因此将 ASM1 模型应用到造纸污水处理过程中必须对其进行简化和修正^{[6][7]}：首先根据污水处理系统的实际运行情况，可以假设系统在恒定温度下运行，pH 值接近中性且恒定，不考虑氮、磷和其他无机营养物对有机物去除及细胞生长的影响，沉淀过程不发生任何生化反应，仅为物理沉淀作用。由于该纸厂 SBR 废水处理工艺不包含厌氧生物反应过程，因此不考虑异养菌缺氧生长

过程；国内绝大多数污水处理厂采用的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，对氮、磷的去除几乎不考虑，因此去掉颗粒性有机氮和溶解性有机氮两种组分。经简化后的模型包扩异养菌的好氧生长、自养菌的好氧生长、异养菌的衰减、自养菌的衰减、网捕性有机物的水解五个工艺过程和溶解惰性有机物、易生物降解有机物、颗粒惰性有机物等 10 种污水组分。

3.2 模型参数的确定

简化的活性污泥模型中包含了 10 个动力学参数和 5 个化学计量参数，在进行模型仿真之前要确定这些参数，才能保证仿真的准确稳定。在众多参数中，一些参数因为假设值能收到良好的效果，因此不需要测定；而其它参数受环境因素和污泥自身特性影响较大，必须根据仿真对象对其进行测定。本文采用呼吸计量法对异养菌产率系数 Y_H ，异养菌衰减系数 b_H 和异养菌最大生长速率 u_H 进行了测定，并根据国际水质协会的推荐值对其它参数值进行校正，模型参数值如表 1 所示。

Table 1. Parameters of simplified activated sludge model of paper mill
表 1. 造纸活性污泥简化模型参数值

符号	参数值	单位
Y_A	0.24	g(细胞 COD)/g(氧化 N)
μ_A	2.39	day ⁻¹
f_p	0.08	量纲为 1
i_{XB}	0.086	g(N)/g(生物量 COD)
i_{XP}	0.06	g(N)/g(内源代谢产物 COD)
K_{OH}	0.2	g(O ₂)/m ³
K_{NO}	0.5	g(NO ₃ -N)/m ³
K_{OA}	0.4	g(O ₂)/m ³
b_A	0.21	day ⁻¹
μ_H	9.69	day ⁻¹
Y_H	0.625	g(细胞 COD)/g(氧化 COD)
b_H	1.98	day ⁻¹
K_{NH}	7.14	g(NH ₃ -N)/m ³
k_h	7.19	g(慢速可生物降解 COD) / g(细胞 COD·day)
K_S	20	g(COD)/m ³

3.3 仿真模型的初始化

简化的活性污泥模型中采用的 10 种污水组分，除溶解氧浓度以外的其它组分浓度都是难以在线直接测量的，因此需要根据模型组分对入水 COD 组分进

行划分。本文中,对于入水 COD 组分结合了呼吸计量法和物化法对其进行划分,得到的各组分浓度比例如表 2 所示,入水中 X_P 、 X_{BA} 、 X_{BH} 的浓度由于较低,假设为 0mg/L。

Table 2. COD component division of influent of paper mill
表 2. 造纸入水 COD 组分划分

组分	S_s	S_i	X_s	X_i
浓度	224.77mg/L	51mg/L	247.89mg/L	717.54mg/L
比例	18.11%	4.11%	19.97%	57.81%

此外,生物反应过程中包含 10 个独立的状态变量,这要求在开始仿真之前确定这些变量的初始值。由于大多数的初始值都不能很好的估计,通常需要在进行动态模拟之前做平均负荷条件的稳态仿真,稳态仿真最终得到的状态变量作为动态仿真状态变量的初始值。本文将稳态仿真 200 个周期得到的状态变量终值作为动态仿真状态变量的初始值。

3.4 仿真模型建立及运行

基于简化的活性污泥数学模型,通过 MATLAB/SIMULINK 建立 SBR 仿真模型,取纸厂 SBR 池连续 10 天的入水数据进行仿真,得到的仿真出水数据和实际出水数据如图 2 所示。该纸厂 SBR 的运行周期为 6 小时,图 2 中以仿真过程中的采样周期为横坐标,从图中可以看出,出水 COD 的仿真值和实际值十分接近,因此说明本文仿真模型能够很好的模拟该纸厂的 SBR 污水处理过程。

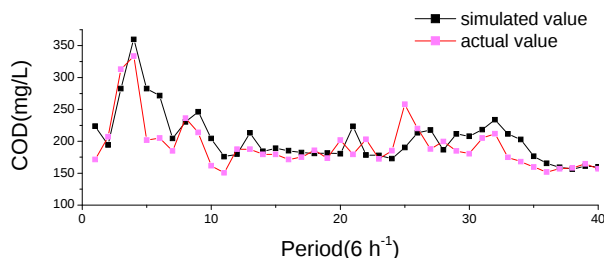


Figure 2. Effluent COD curves of simulated value and actual value
图 2. 出水 COD 的仿真值和实际值曲线

4 溶解氧浓度控制器设计

SBR 池中的氧气首先是满足好氧反应所需的氧量,不足和过量都会导致污泥生存环境的恶化。当氧气不足时,一方面由于曝气池中丝状菌会大量繁殖,最终产生污泥膨胀,另一方面由于细菌的生长速率降

低而引起出水水质下降;而氧气过量(即过量曝气)则会使絮凝剂遭到破坏而导致悬浮固体沉降性变差,同时增加能耗。因此需要对 SBR 废水处理过程进行溶解氧(DO)浓度控制,DO 浓度控制的目的是通过调整输入的空气量(或氧气量),使曝气池中的 DO 浓度保持在一定的范围之内,此污水处理工艺中的 DO 浓度控制在 2~2.5mg/L。

4.1 PID 控制器

当控制器输出 u 和输入 $\hat{u}$ 之间存在非线性特性 $N(u)$ 时,控制器 PI/PID 积分部分会产生一种称为控制器饱和(windup)的不良现象。在实际过程中,当有大信号输入或其他情况使控制系统进入饱和状态时,系统性能会被降低。因此,本文引入 Anti-windup 控制补偿模块,使控制系统在出现饱和现象时仍能达到比较满意的性能。

图 3 所示的为通过 MATLAB/SIMULINK 建立的包含 Anti-windup 算法的 PID 控制器。将控制器嵌入到上面建立的活性污泥法污水处理仿真模型,进行仿真,图 4 所示的为在未加 Anti-windup 模块的 PID 控制下的 DO 浓度变化曲线和氧传递系数(KLa)变化曲线图,DO 浓度设定值为 2mg/L(下文中的 DO 浓度设定值都为 2mg/L),可以看出 DO 浓度波动剧烈,控制效果很差;图 5 所示的为在加上 Anti-windup 模块的 PID 控制器控制下的 DO 浓度变化曲线和 KLa 变化曲线。可以看出加上 Anti-windup 模块后 PID 控制器的效果明显变好,DO 浓度基本控制在 2mg/L 左右,但是 DO 浓度的波动仍然存在,并且通过 KLa 变化曲线可以发现 DO 浓度稳定是通过曝气量的快速、频繁、大范围的变化实现的,在实际过程中很难实现这样的曝气量变化控制,因此仍需要对控制器进行改进。

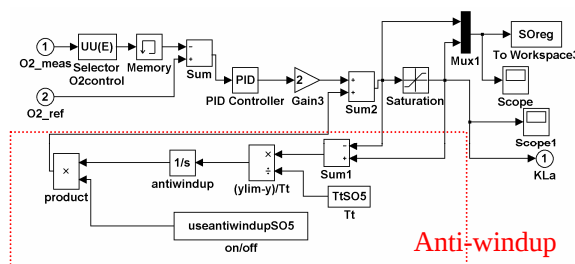


Figure 3. Schematic of PID controller model structure in SIMULINK

图 3. PID 控制器模块 SIMULINK 结构图

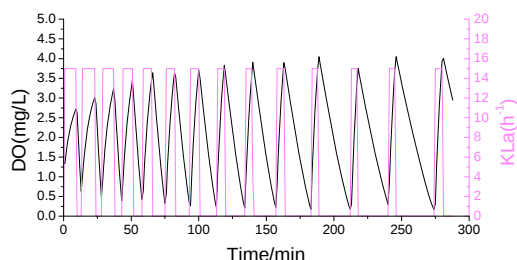


Figure 4. Curves of dissolved oxygen concentration and KLa with PID controller (without Anti-windup model)

图 4. PID 控制中溶解氧浓度和氧传递系数曲线图 (未加 Anti-windup 模块)

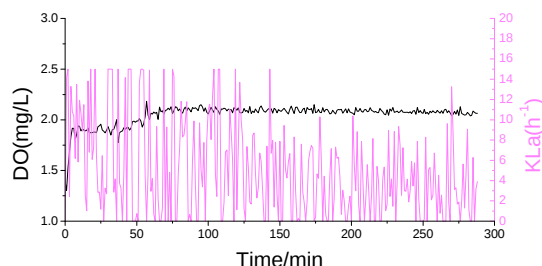


Figure 5. Curves of dissolved oxygen concentration and KLa with PID controller (with Anti-windup model)

图 5. PID 控制中溶解氧浓度和氧传递系数曲线图 (加 Anti-windup 模块)

4.2 BP-PID 控制器

PID 控制要取得较好的控制效果,就必须通过调整好比例、积分和微分三种控制作用,形成控制量中既相互配合又相互制约的关系,这种关系不一定是简单的“线性组合”,而是从变化无穷的非线性组合中找出最佳的。神经网络所具有的任意非线性表达能力,可以通过对系统性能的学习来实现具有最佳组合的 PID 控制。采用 BP (Back Propagation) 网络,可以建立参数 k_p , k_i , k_d 自学习的 PID 控制器,从而实现更加精确的 PID 控制。

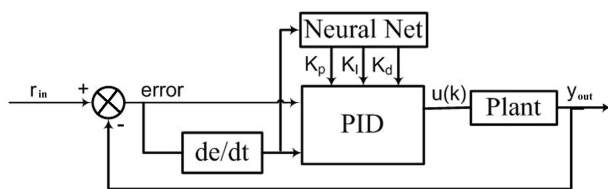


Figure 6. Schematic of BP-PID control system

图 6 BP-PID 控制系统结构图

基于 BP 网络整定的 PID 控制系统(简称 BP-PID 控制系统)结构如图 6 所示, 控制器由两部分构成:

- (1) 经典的 PID 控制器, 直接对被控对象进行闭环控制, 三个调节器参数 k_p , k_i , k_d 为在线调整方式。
- (2) 神经网络, 根据系统的运行状态, 调整 PID 控制

器的参数,以期达到某种性能指标的最优化,使输出层神经元的输出状态对应于PID控制器的三个可调参数 k_p , k_i , k_d ,通过神经网络的自学习,加权系数调整,使神经网络输出对应于某种最优控制规律下的PID控制器参数。

通过 MATLAB/SIMULINK 建立具有三层神经网络(3-10-1)的 BP-PID 控制器(图 7 所示),将 BP-PID 控制器嵌入活性污泥法污水处理仿真模型,经过仿真运行,得到 DO 浓度变化曲线和氧传递系数变化曲线如图 8 所示,可以观察到 DO 浓度在反应初期微小抖动后就立刻稳定在 2mg/L,控制效果稳定,并且通过氧传递系数曲线可以观察到,曝气量的变化也是比较平稳的,因此 BP-PID 对 DO 浓度的控制效果良好。

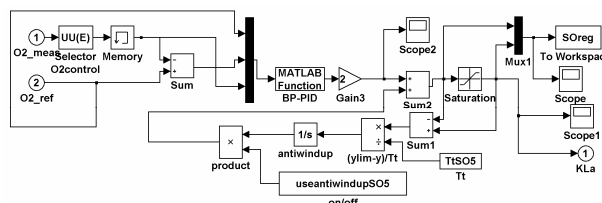


Figure 7. Schematic of BP-PID controller model structure in SIMULINK

图 7. BP-PID 控制器模块 SIMULINK 结构图

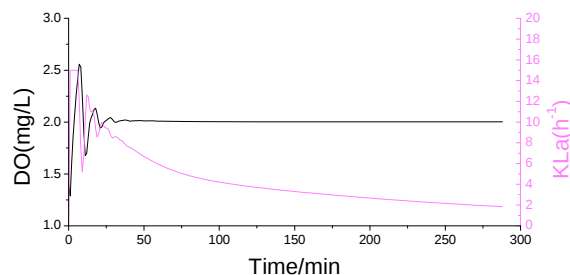


Figure 8. Curves of dissolved oxygen concentration and KLa (BP-PID)

图 8. 溶解氧浓度和氧传递系数曲线图 (BP-PID)

5 结论

首先将简化的 ASM1 应用到造纸污水活性污泥处理过程中, 基于 MATLAB/SIMULINK 工具建立了仿真模型, 并通过仿真运行证明了模型在造纸污水处理过程的可行性; 其次简化的模型在组分和过程上都较 ASM1 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, 并且给出了 COD 组分划分和参数测定的方法, 从而提高该模型在实际污水活性污泥处理过程中的应用。

基于仿真模型的 DO 浓度控制研究表明, 在传统的 PID 控制下, 曝气量抖动剧烈, DO 浓度控制效果较差; 采用基于 BP 网络整定的 PID 控制系统, DO

浓度得到了很好的控制，曝气量的变化也相对稳定。

References (参考文献)

- [1] J. Copp, Ed. The COST Simulation Benchmark description and simulator manual [M]. Luxembourg: Office Publications of the European Community, 2001.
- [2] Jiang Wei-gang, Gu Guo-wei, Yu Guo-Ping. Application of computerized simulation for wastewater treatment Plant reconstruction. *Water & Wastewater Engineering*, 2004, 30(3): 91-94 (Ch).
蒋卫刚, 顾国维, 俞国平. 计算机模拟在污水处理厂改建设计中的应用[J]. *给水排水*, 2004, 30(2): 91-94.
- [3] Zhang Yuan-yuan. Application of simulate activated sludge No.2 in Dengjia village Xi'an city [J]. *Technology of water treatment*, 2009, 35(3): 113-117 (Ch).
张园园. 活性污泥 2 号模型在西安市邓家村污水处理厂的应用[J]. *水处理技术*, 2009, 35(3): 113-117.
- [4] R.C. Ky, Y. Comeau, M. Perrier and I.Takacs. Modelling biological phosphorus removal from a cheese factory effluent by an SBR [J]. *Water Science and Technology*, 2001, 43(3): 257-264.
- [5] Krist V. Gernaey, Mark C.M. van Loosdrecht, Mogens Henze, Morten Lind, StenB. Jørgensen. Activated sludge wastewater treatment plant modelling and simulation: state of the art [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2004, 19: 763-783.
- [6] Ilse Y. Smets, Jeroen V. Haegebaert, Ronald Carrette, Jan F. Van Impe. Linearization of the activated sludge model ASM1 for fast and reliable predictions [J]. *Water Research*, 2003, 37: 1831-1851.
- [7] U. Jeppson, *Modelling Aspects of Wastewater Treatment Processes* [D]. Lund Institute of Technology, Sweden, 1996.