

污水生化处理过程仿真及在 A²/O 工艺改进中的应用

于广平^{1,2}, 王 宏¹, 苑明哲¹

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



摘要: 基于国际水协会 IWA 发布的国际评价基准 Benchmark, 建立了与污水处理厂实际特性相近的标准仿真平台。对污水处理传统 A²/O 工艺做了合理改进, 在不影响出水水质的情况下, 取消内回流。应用该平台分别对晴天、雨天与暴雨三种天气的工艺过程模拟, 验证了工艺改进的合理性。仿真结果表明, 与传统 A²/O 工艺相比, 出水指标差别不大, 但污泥泵能耗降低约 50%。

关键词: 污水处理; 仿真; Benchmark; A²/O; 工艺改进

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-731X (2009) 22-7355-04

Simulation of Biological Wastewater Treatment Process and Its Application on A²/O Technology Improvement

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

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

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

Abstract: Based on the Benchmark published by the International Water Association (IWA), the standard simulation software was developed. The process during the software was close to the real wastewater treatment plants. The traditional A²/O technology was modified with reason. The internal recycle flow was canceled without the affection of effluence indexes. By the software, the modified A²/O technology process was simulated respectively using dry, rain and storm weather files. The modification was proved reasonable by the simulation result. Compared with the traditional A²/O technology, the difference on effluence indexes is slight, but 50% pumping energy is saved.

Key words: wastewater treatment; simulation; Benchmark; A²/O; technology improvement

引 言

污水生化处理过程 (WWTP) 就是利用人工培养的微生物群体 (活性污泥) 来吸附、分解、氧化污水中可生物降解的有机物, 通过生物化学反应, 将这些有机物从污水中分离出来, 使污水得到净化^[1]。

一段时期以来, 能耗大、运行费用高是制约我国污水处理行业发展的重要瓶颈。许多污水处理厂“建得起, 养不起”。污水处理工艺落后和国外工艺“水土不服”是主要原因之一。改进现有的污水处理工艺, 特别是引进的国外先进工艺, 是提高我国污水处理工艺水平的捷径。

由于微生物在污水环境下的生存规律及所依赖的条件还远没有被完全认识, 工艺改进试验又周期长、成本高, 因此应用基于复杂机理模型的模型仿真技术, 在污水处理工艺改进研究中就显得格外重要, 也越来越引起有关专家和学者的重视。

本文根据国际水协会 (International Water Association, 简

称 IWA) 发布的国际评价基准 Benchmark^[2], 建立了与污水处理厂实际特性相近的标准仿真平台。并利用该平台对污水处理 A²/O 工艺的工艺改进与验证提供了理论支持。

Benchmark 是 IWA 为了规范和促进关于 WWTP 建模、控制和优化的系统研究而发布。该基准包括工厂构造、模拟模型、进水负荷、测试数据和性能评价标准。Benchmark 与具体的编程语言平台无关, 研究者在应用时首先按照相关文件自主编写 Benchmark 仿真程序, 然后输入稳态数据验证数值计算结果。若与 Benchmark 所给评测数据基本一致, 则可应用于工艺模拟与控制策略的评价等具体任务。作者根据 Benchmark 开发了基于 MATLAB 语言与 C++ 语言混合编程的仿真软件, 经 100 天的稳态计算, 结果与 Benchmark 提供的最终测试数据完全一致。

A²/O 工艺是污水生化处理应用最为广泛的工艺之一, 由 Bardenpho 生物脱氮工艺^[3]发展而来, 由厌氧、缺氧与好氧三部分组成 (如图 1), 具有脱氮除磷效果好、运行费用低、技术成熟和应用广泛等特点。传统 A²/O 工艺的脱氮能力是依靠回流比来保证的, 回流包括混合液回流 (内回流) 与污泥回流 (外回流)。为了达到较高的氮去除率, 就必须要有较高的污泥及混合液回流比 (一般为 3—4)。这主要是基于对反硝化反应的这样一种认识: 只有在缺氧条件下, 反硝化反应才能进行。也就是说只有将尽可能多的硝酸盐态氮回流到前置缺氧区, 才能够得到较高的氮去除率。但在生产实

收稿日期: 2008-05-08

修回日期: 2009-10-23

基金项目: 863 项目 (2009AA04Z155); 辽宁省通信与控制重点实验室资助

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。

际运行中发现, 提高回流比会增加动力消耗和运行成本, 在有些情况下, 混合液回流比很低, 甚至完全取消混合液回流, 也能取得较好的脱氮效果。因此, 有研究者提出假定: 对于反硝化反应所需要的缺氧条件的传统认识存在一定的误区, 在好氧条件下, 也可以进行一定程度的反硝化反应^[4]。如果这一假定成立, 并且其机理和反应条件被充分认识, 将会使 A²/O 工艺更加经济合理。

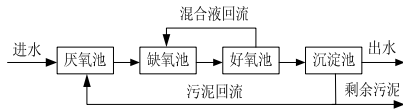


图 1 传统 A²/O 工艺的基本流程

本文利用研发的污水处理仿真平台, 分别对传统 A²/O 工艺与取消内回流的 A²/O 工艺进行过程仿真, 输入晴天、雨天和暴雨三种不同天气的数据文件, 得到模拟结果, 并计算相应的性能评价指标。通过性能评价指标的比较, 证明取消内回流是对传统 A²/O 工艺的合理改进, “好氧条件下也可以进行反硝化反应”的假定是成立的。

1 国际评价基准 Benchmark

1.1 Benchmark 工厂构造

Benchmark 工厂设计入水平均流量为 $2 \times 10^4 \text{m}^3/\text{day}$, 入水平均化学需氧量 (COD) 为 300mg/L , 污泥浓度为 3000mg/L 。工厂由 5 个生化反应器 (体积分别为 $1000 \text{m}^3, 1000 \text{m}^3, 1333 \text{m}^3, 1333 \text{m}^3, 1333 \text{m}^3$) 和一个二沉池 (6000m^3) 组成, 所有的反应器均认为完全混合。前两个生化反应器缺氧, 溶解氧浓度为 0, 后三个好氧, 其中第 3-4 个反应器的氧传递系数 k_{La} 为 10h^{-1} , 第 5 个反应器通过控制氧传递系数将溶解氧浓度维持在 2mg/L 。

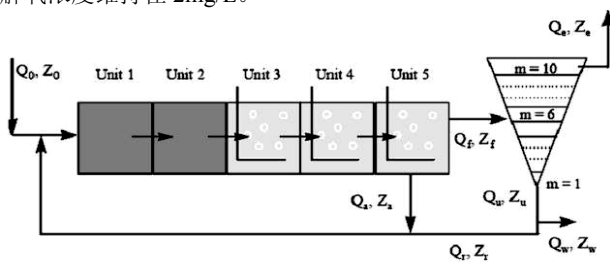


图 2 Benchmark 工厂构造

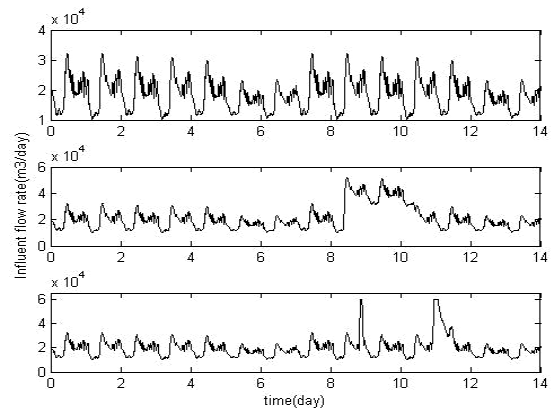
采用 IWA 的活性污泥 1 号模型 ASM1^[5]模拟反应器中的生物反应过程。ASM1 包括了碳氧化、硝化和反硝化过程, 描述了污水中所发生的有机碳水解、微生物生长和衰减等 8 个反应过程^[6]。采用 Takács^[7]等人开发的基于双指数沉降速率的固体通量方程描述二沉池的沉降过程, 将二沉池等分为 10 层, 并假设二沉池中不发生生化反应, 每层内部的污泥浓度均匀唯一, 没有密度差。

稳态计算时混合液回流 (Q_a) 与污泥回流的流量 (Q_r) 分别为 $55,338 \text{m}^3/\text{day}$ 与 $18,446 \text{m}^3/\text{day}$; 动态计算时采用回流

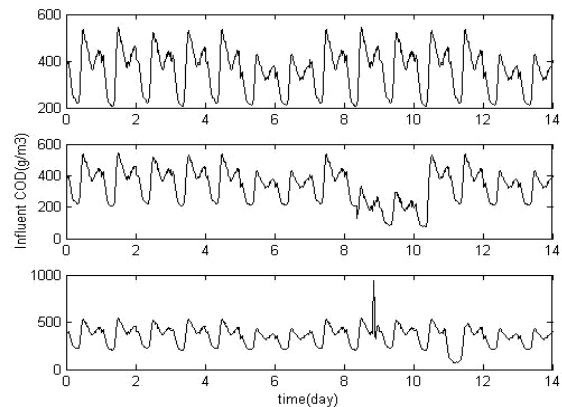
比 4。剩余污泥流量为 $385 \text{m}^3/\text{day}$ 。

1.2 入水负荷

Benchmark 提供了晴天、雨天、暴雨三种天气下的入水数据, 数据均为历时两周的实际运行数据, 采样时间 15min 。图 3 给出了三种天气的入水流量与 COD 的变化情况。由图可以看出晴天的入水数据, 周末在入水流量与负荷上均有 20% 左右的降低; 雨天的入水数据是在晴天入水数据的基础上, 第二周添加了雨天的情况, 持续时间为 2 天。这 2 天中入水流量增加, 入水负荷降低; 暴雨入水数据是在晴天入水数据的基础上, 第二周添加了两次暴雨的情况, 与雨天相比, 暴雨持续的时间更短、雨量更大、冲击力更强。



(a) 入水流量



(b) 入水 COD

图 3 晴天、雨天和暴雨三种天气的入水流量与入水 COD

1.3 性能评价指标

与一般工业生产过程相比, 污水处理厂的运行具有特殊性。其最终“产品”必须遵守环保法规强制性的排放要求, 然后才是考虑工艺目标与控制目标的实现。评价运行效果需要综合考虑以下三类指标:

(1) 出水限制指标

总氮浓度 $N_{\text{tot},e} < 18 \text{g/m}^3$, 化学需氧量 $COD_e < 100 \text{g/m}^3$, 氨氮浓度 $S_{\text{NH}_e} < 4 \text{g/m}^3$, 固体悬浮物浓度 $SS_e < 30 \text{g/m}^3$, 生物需氧量浓度 $BOD_{5,e} < 10 \text{g/m}^3$ 。上述出水指标按式(1)~(4)计算 (文中的参数意义同活性污泥 1 号模型 ASM1^[5])。

$$N_{tot,e} = S_{NKj,e} + S_{NO,e} \quad (1)$$

$$SS_e = 0.75 \cdot (X_{S,e} + X_{I,e} + X_{BH,e} + X_{BA,e} + X_{P,e}) \quad (2)$$

$$BOD_{5,e} = 0.25 \cdot (S_{S,e} + X_{S,e} + (1-f) \cdot (X_{BH,e} + X_{BA,e})) \quad (3)$$

$$COD_e = S_{S,e} + S_{I,e} + X_{S,e} + X_{I,e} + X_{BH,e} + X_{BA,e} + X_{P,e} \quad (4)$$

(2) 出水质量指标

出水质量 EQ 是衡量主要污染物对受纳水体污染程度的一个指标,取观测期(如两周采样期的后 7 天)内的平均值表征。

$$EQ = \frac{1}{T \cdot 1000} \int_{t=7}^{t=14} (B_{SS} \cdot SS_e(t) + B_{COD} \cdot COD_e + B_{NKj} \cdot S_{NKj,e}(t) + B_{NO} \cdot S_{NO,e}(t) + B_{BOD5} \cdot BOD_{5,e}(t)) Q_e(t) dt \quad (5)$$

式中 B_i 表示不同污染物对受纳水体污染程度的权重系数。

(3) 经济指标:在污水处理的成本核算中,约 40%-60% 的电能消耗在污泥泵和风机上^[8],主要电耗定义为:

五个曝气风机总能耗:

$$AE = \frac{24}{T} \int_{t=7}^{t=14} \sum_{i=3}^5 (0.4032 \cdot (k_L a)_i^2 + 7.8408 \cdot (k_L a)_i) dt \quad (6)$$

污泥泵总能耗:

$$PE = \frac{0.04}{T} \int_{t=7}^{t=14} (Q_a(t) + Q_r(t) + Q_w(t)) dt \quad (7)$$

2 基于 Benchmark 的仿真平台

本文根据 Benchmark 开发了基于 MATLAB 语言与 C++ 语言混合编程的仿真平台,经 100 天的稳态计算,结果与 Benchmark 提供的最终测试数据完全一致。仿真平台利用 Matlab 图形用户界面(GUI)采用面向对象的方法实现,主界面如图 4 所示。仿真平台着重于污水生化处理的基本过程、原理及其动态模拟过程,包括 ASM1 模型的碳氧化、硝化和反硝化等反应过程,并考虑了异养和自养微生物、多种基质组分、硝态氮和氨氮等 13 种组分的物料平衡关系。通过仿真平台可以完成污水处理过程模拟、工艺优化与评价、控制策略仿真与评价等任务。仿真平台总体框架如图 5 所示,主要包含输入、计算、输出和评价四部分。输入部分主要对 ASM1 的各种参数、反应器参数、二沉池参数、工艺控制参数及入水数据进行初始化;计算部分则对基于物料平衡的各组分浓度微分方程组进行求解;输出部分主要用表

格或图形的形式表述出水的各组分浓度值;评价部分则采用上述的性能评价指标,对控制策略或工艺进行评价。

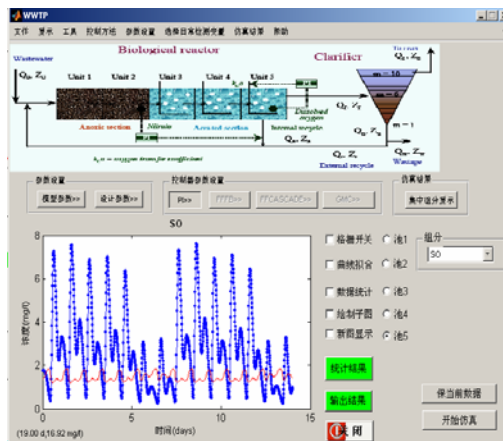


图 4 仿真平台主界面

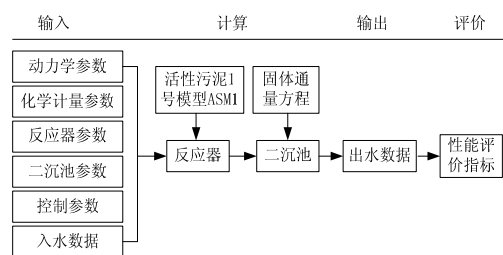


图 5 仿真平台总体框架

3 模型仿真在 A²/O 工艺改进中的应用

以 Benchmark 相关文件为基础,通过仿真平台,分别模拟传统 A²/O 工艺(回流比为 4,其中混合液回流量 Q_a=3Q₀,污泥回流量 Q_r=Q₀)与取消内回流的改进型 A²/O 工艺过程(回流比为 2,混合液回流量 Q_a=0,为保证除氮效果,增加了污泥回流量, Q_r=2Q₀),对两个工艺过程分别采用晴天、雨天和暴雨三种天气的入水文件,模拟结果如表 1 所示。可以看出,改进的 A²/O 工艺与传统的 A²/O 工艺相比,出水指标差别不大,但由于取消了内回流,污泥泵能耗约降低 50%。这也证明了引言部分提及的“在好氧条件下,也可以进行反硝化反应”的假定,该改进是对 A²/O 工艺的一个合理改进。

表 1 传统 A²/O 工艺与改进型 A²/O 工艺仿真结果性能比较

工艺→		传统 A ² /O 工艺			改进型 A ² /O 工艺		
工艺指标↓	天气→	晴天	雨天	暴雨	晴天	雨天	暴雨
出水平均 COD 浓度 (g/m ³)		47.767	46.885	46.496	49.349	47.696	48.231
出水平均 BOD 浓度 (g/m ³)		2.696	3.175	2.932	2.843	3.348	3.1
出水平均 SS 浓度 (g/m ³)		12.584	14.906	13.843	13.794	16.306	15.2
出水平均总氮 TN 浓度 (g/m ³)		15.205	14.208	15.125	16.406	14.836	15.846
出水平均氨氮 NH 浓度 (g/m ³)		3.565	3.251	3.7	3.687	3.443	3.842
出水质量 EQ (kg/day)		7025	8565.6	7602.6	7486.6	8947	8332.7
曝气风机能耗 AE (kWh/day)		6474	6474	6474	6474	6474	6474
污泥泵能耗 PE (kWh/day)		2971.9	3891.4	3387.4	1493.7	1953.4	1701.4

取消内回流的改进型 A²/O 工艺在辽宁某污水处理厂得到了实际应用,目前已稳定运行 3 年时间,在保证出水稳定达标的前提下,降低了系统能耗和处理成本。

4 结论

针对污水处理过程的复杂性与多样性,本文以国际水协会 IWA 发布的 Benchmark 国际评价基准为基础,采用 MATLAB 语言与 C++语言混合编程,建立了与典型污水处理厂实际特性相近的标准仿真平台。一方面可以供研究者分析和比较各种工艺技术和控制策略时使用,另一方面可以根据实际成果、新发现、新工艺,不断完善仿真平台,以适应新的工业需求。应用该仿真平台分别模拟了传统 A²/O 工艺与取消内回流的改进型 A²/O 工艺过程,分别输入晴天、雨天与暴雨三种天气下的入水负荷数据,并将得到的性能评价指标进行对比。结果显示出水指标差别不大,但由于取消了内回流,改进后 A²/O 工艺污泥泵能耗约降低 50%。验证了“在好氧条件下,也可以进行反硝化反应”的假定,该改进是对 A²/O 工艺的一个合理改进。

参考文献:

[1] 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.

(上接第 7354 页)

5 结论

本文针对复杂产品开发过程的仿真预测问题,提出采用两层 DSM 模型作为仿真的结构关系模型,采用拉丁超立方抽样法对服从三角分布的时间与成本模型进行抽样。并对过程迭代特征描述、返工概率的变化调整、返工判断策略和多任务返工执行约束等问题给出了相应的仿真模拟方法,在一定程度上提高了仿真算法的可靠性。实例分析表明,在此基础上构建的仿真算法及仿真平台,能够对复杂产品开发过程的进度与成本分布进行概率预测与风险评估,能够提高项目管理与规划的有效性,具有一定的实际推广价值。

本文所采用的仿真模型侧重的是任务间结构关系,对任务间逻辑关系的建模支持还没有实现。另外,在本文仿真算法的基础上,如果考虑设计任务的资源约束与活动重叠等情况,仿真效果会更好,这些都是今后需要改进的地方。

参考文献:

[1] 徐哲,冯允成. 网络计划进度的风险分析[J]. 系统工程理论与实践, 1998, 18(4): 24-28.
[2] 姚咏,范文慧,熊光楞. 复杂产品开发过程仿真及其优化方法研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(3): 726-730. (YAO Yong, FAN

[2] Mogens Henze, et al. The European co-operation in the Field of Scientific and Technical Research, Action 624: Optimal Management of Wastewater Systems. COST Action 624 [EB/OL]. (1999) [2006]. <http://www.ensic.inpl-nancy.fr/COSTWWTP>.
[3] Barnard, James L. Biological Nutrient Removal Without the Addition of Chemicals [J]. Water Research (S0043-1354), 1975, 9(5): 485-490.
[4] 任洁,顾国维,杨海真. 改良型 A²/O 工艺处理城市污水的中试研究[J]. 给水排水, 2000, 26(6): 7-10.
[5] Henze M, Grady Jr C P L, Gujer W, Marais G v R, Matsuo T. Activated Sludge Model NO.1 [R]. London, UK: IAWQ Scientific and Technical Report NO. 1, 1987.
[6] 于广平,苑明哲,王宏. 基于简化活性污泥数学模型的污水处理仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(23): 5366-5369. (Yu Guang-ping, Yuan Ming-zhe, Wang Hong. Research on Simulation of Wastewater Treatment based on Simplified Mathematical Model for Activated Sludge Process [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2007, 19(23): 5366-5369.)
[7] Takács I, Patry G G, Nolasco D. A Dynamic Model of the Clarification Thickening Process [J]. Water Research (S0043-1354), 1991, 25(10): 1263-1271.
[8] 袁德成,樊立萍,于海斌. 典型污水生化处理过程仿真平台的构造[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(11): 1509-1513. (Yuan De-cheng, Fan Li-ping, Yu Hai-bin. Software Development for Simulating Biological Wastewater Treatment Processes [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2003, 15(11): 1509-1513.)

Wen-hui, XIONG Guang-leng. Research on Complex Product Development Process Simulation and Its Optimization [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2006, 18(3): 726-730.)

[3] 张汉鹏,邱苑华. 复杂产品开发的多因素风险分析模型及仿真[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(7): 1295-1299.
[4] BROWNING T R, EPPINGER S D. Modeling Impacts of Process Architecture on Cost and Schedule Risk in Product Development [J]. IEEE Transactions on Engineering Management (S0018-9391), 2002, 49(4): 428-443.
[5] 吴子燕,覃小文,刘中峰,等. 建筑工程并行设计过程规划与仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(15): 3577-3581. (WU Zi-yan, QIN Xiao-wen, LIU Zhong-feng, et al. Concurrent Building Design Process Planning and Simulation [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2007, 19(15): 3577-3581.)
[6] 蒋增强. 产品协同开发过程管理的关键技术研究[D]. 合肥工业大学, 2006.
[7] WYSS G D, JORGENSEN K H. A User's Guide to LHS: Sandia's Latin Hypercube Sampling Software [R]. Albuquerque, USA: Sandia National Laboratories, 1998.
[8] CHO S H, EPPINGER S D. A Simulation-Based Process Model for Managing Complex Design Projects [J]. IEEE Transactions on Engineering Management (S0018-9391), 2005, 52(3): 316-328.
[9] 王秋萍,梁戈. 求可达矩阵的 Warshall 算法[J]. 西安理工大学学报, 1996, 12(1): 80-82.