

文章编号: 1001-0920(2005)02-0237-04

## SBR 污水生化处理系统的最优控制及改进

樊立萍<sup>1,2</sup>, 于海斌<sup>1</sup>, 袁德成<sup>1,2</sup>, 王秀兰<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 沈阳化工学院 自动化系, 辽宁 沈阳 110142)

**摘要:** 针对序批式反应器污水处理工艺, 提出一种以排水质量指标为约束条件, 以能量消耗最小为目标的最优控制方案. 由于生化过程机理复杂, 导致这个最优问题求解困难. 所构造的解法是首先建立通用的序批式反应器模型; 然后借助仿真工具试差求取次优解. 为解决搜索求解计算量大的问题, 进一步结合进退法提出了一种改进的优化算法, 显著提高了求解效率.

**关键词:** 序批式反应器; 污水生化处理; 最优控制

**中图分类号:** TP13      **文献标识码:** A

## Improved optimal control of SBR biological wastewater treatment systems

FAN Li-ping<sup>1,2</sup>, YU Hai-bin<sup>1</sup>, YUAN De-cheng<sup>1,2</sup>, WANG Xiu-lan<sup>2</sup>

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. Automation Department, Shenyang Institute of Chemical Technology, Shenyang 110142, China. Correspondent: FAN Li-ping, E-mail: flpsd@163.com)

**Abstract:** An optimal control scheme for sequencing batch reactor (SBR) wastewater treatment processes is proposed to achieve the wastewater effluent standards with minimal energy consumption. Because of the complex mechanism in biological processes, it is difficult to solve this optimization problem. The constructed solving process is to establish a general SBR model firstly, then to derive the suboptimum solution by trial and error method with the help of simulation tools. To solve the problem of large search solution computation, an improved optimization algorithm is proposed based on the thought of advance-retreat method, and it raises the solution efficiency significantly.

**Key words:** sequencing batch reactor; biological wastewater treatment; optimal control

### 1 引言

市场竞争的压力使得分布式柔性加工模式日益受到重视, 可持续发展的要求增强了人类有效利用资源和保护环境意识. 由此, 传统批处理过程的设计和过程优化近年来已成为研究的热点<sup>[1]</sup>. 在废水处理行业, 序批式反应器(简称 SBR, 属于典型的批处理过程)以操作灵活、结构简单、投资节省等优点而受到关注, 在工业、服务业等许多分布广、种类杂的场合被普遍采用<sup>[2]</sup>. 日益严格的污水排放标准及对脱氮除磷的严格要求, 也对 SBR 系统的控制提出

了更高的要求. 需要借助于先进的控制策略, 对 SBR 的厌氧、好氧、缺氧 3 个阶段进行规划和协调配置, 以达到满意的运行状况和理想的处理效果. 除没有稳态操作点等本质特征外, SBR 具有复杂的生化反应机理, 缺乏易维护且性价比适当的在线分析仪表, 特别是其动态优化问题更具挑战性<sup>[1]</sup>.

本文提出了 SBR 污水处理工艺的一种动态优化控制策略, 旨在满足排水性能指标的前提下, 尽可能地节约能量. 基于国际水协会(IWA)的活性污泥模型 ASM 2d, 建立了 SBR 系统的仿真平台. 在此基

收稿日期: 2004-03-26; 修回日期: 2004-06-21.

作者简介: 樊立萍(1965—), 女, 山东淄博人, 副教授, 博士生, 从事集成化城市水资助管理等研究; 于海斌(1964—), 男, 辽宁沈阳人, 研究员, 博士, 从事智能生产高度理论与应用等研究.

基础上,结合进退法提出一种改进的优化算法,以解决试差求取最优解计算量大的问题.仿真结果表明,本文建议的方法显著缩短了求解时间,有助于优化控制策略的实现.

## 2 SBR 工艺简述

SBR 系统用时间分割的操作方式替代传统活性污泥系统的空间分割方式.在工艺流程上,SBR 只设一个反应池,兼行水质水量调节、微生物降解有机物和混合液分离等功能.

SBR 按间歇曝气方式运行,每个周期包括进水(Fill),混合(Mix),曝气(Aerate),沉降(Settle),排放(Discharge)和空置(Idle)等阶段.活性污泥微生物以污水中各种有机物为营养,在厌氧混合阶段,积磷菌(PAO)将贮积在菌体内的聚磷分解,并积贮聚羟基酸(PHA),聚磷分解后的无机磷盐释放到积磷菌体外(厌氧放磷).在好氧阶段,废水中的有机碳被氧化成二氧化碳和水(去碳);氨被氧化成硝酸盐(硝化);积磷菌将积贮的 PHA 好氧分解,释放出大量能量供积磷菌吸收磷酸盐,并以聚磷形式贮积于体内(好氧吸磷).在缺氧阶段,硝酸盐被还原成气态氮(反硝化).经过厌氧、好氧、缺氧 3 个阶段的合理配置交替运行,实现了生物去碳、脱氮、除磷.

## 3 SBR 污水处理系统的优化控制

在污水处理厂,生化处理和过剩污泥的费用各占 1/2 左右.通过控制技术改善生化处理过程是降低运行成本的主要方法,主要途径包括:

- 1) 曝气量适当;
- 2) 尽可能减少各类泵的流量;
- 3) 污泥产量最小化控制;
- 4) 严格控制各种外补加化学物质的总量.

本文工作属于第 1 种方法.SBR 系统的性能与各阶段运行时间的分配有直接关系,适时启动或结束有关进程是提高 SBR 系统处理效果、降低运行成本的一种可行方法.

### 3.1 最优控制问题构成

选择厌氧时间  $t_{ana}$ ,好氧时间  $t_{ae}$  和缺氧时间  $t_{ano}$  作为控制变量.在 SBR 污水处理系统中,影响运行费用的最主要因素是曝气阶段消耗的能量.因为曝气阶段氧传递系数  $k_{La}$  恒定,即单位时间内曝气量恒定,因此运行代价最小可归结为曝气时间  $t_{ae}$  最小.最优控制问题构造如下:

目标函数为

$$\min_{t_{ana}, t_{ae}, t_{ano}} J = t_{ae}. \quad (1)$$

约束条件为

$$\dot{x} = f(X, u, t_{ana}, t_{ae}, t_{ano}), X(0) = X_0;$$

$$\begin{aligned} \text{总氮(TN)}: & x_5(t_f) + x_7(t_f) \quad 18; \\ \text{总磷(TP)}: & 0.01(x_2(t_f) + x_{10}(t_f) + \\ & x_{11}(t_f)) + 0.02(x_{13}(t_f) + \\ & x_{16}(t_f) + x_{17}(t_f)) \quad 0.8; \\ \text{氨氮}(S_{NH_4}): & x_5(t_f) \quad 1.8; \\ & 1 \text{ h} \quad t_{ana} \quad 4 \text{ h}, 1 \text{ h} \quad t_{ae} \quad 4 \text{ h}, \\ & 1 \text{ h} \quad t_{ano} \quad 4 \text{ h}, t_f = t_{ana} + t_{ae} + t_{ano}. \end{aligned}$$

其中:  $X \in R^{19}$  是状态变量,  $X_0$  是状态变量初值,  $u$  是操作变量(曝气开关动作),其余变量涵义见下节.这个最优问题虽然可以化为经典表达形式<sup>[3]</sup>,但由于厌氧/好氧/缺氧阶段相互影响,在构造数值解法方面存在困难.根据污水组成情况,借助仿真工具试差求解是目前求解这个问题的途径之一.

### 3.2 最优控制问题求解

#### 3.2.1 模型建立

选择活性污泥 2 号模型 ASM 2d<sup>[4]</sup> 作为脱氮除磷 SBR 系统的质量平衡模型.它把污水处理过程抽象为 19 种组分和 21 个反应子过程.其中 19 种组分为:溶解氧  $S_{O_2}$ , 发酵性易生物降解物  $S_F$ , 醋酸类发酵产物  $S_A$ , 惰性溶解有机物  $S_I$ , 氨氮  $S_{NH_4}$ , 氮气  $S_{N_2}$ , 硝酸盐  $S_{NO_3}$ , 磷酸盐  $S_{PO_4}$ , 碱  $S_{Alk}$ , 惰性粒子有机物  $X_1$ , 慢生物降解物  $X_S$ , 异养菌  $X_H$ , 积磷菌  $X_{PAO}$ , 聚磷  $X_{PP}$ , 聚羟基化合物  $X_{PHA}$ , 自养菌  $X_{AUT}$ , 总悬浮固体  $X_{TSS}$ , 金属羟化物  $X_{MeOH}$ , 金属磷酸盐  $X_{MeP}$ . 这些成分被选为状态变量,即

$$X(x_1, \dots, x_{19}) = (S_{O_2}, S_F, \dots, X_{MeOH}, X_{MeP}). \quad (2)$$

21 个反应过程包括水解、异养菌生长、发酵、自养菌生长、积磷菌生长、聚磷存储和聚磷分解等.在典型污水生化处理过程仿真平台构造<sup>[5]</sup>的基础上,本文结合 SBR 特点,建立了具有广泛用途的 SBR 系统仿真平台.它由解题器和人机界面两部分组成,各工序时间可手动或自动设定.

#### 3.2.2 直接寻优法

式(1)是有约束条件的最优控制问题.本文首先采用直接寻优法<sup>[3]</sup>求解上述最优化问题,即采用补偿函数法来满足约束条件,使之成为无约束条件问题;然后借助仿真工具求取数值解.仿真测试数据采用国际水协会工作组提供的污水组成文件.由于这些文件仅与活性污泥 1 号模型(ASM 1)的 13 个组分相对应<sup>[6]</sup>,用这些数据仿真 ASM 2d 时,需根据文献[5]建议的有关物质定义及组成比例,把污水组成扩展到 19 个成分.变换处理后,以 ASM 1 状态变量为基础的输入污水文件便可用于 ASM 2d 的仿真计算.仿真在 MATLAB 仿真平台下进行,数值积分调用 ODE45 解题器,计算步长为 0.1 min,运行结果

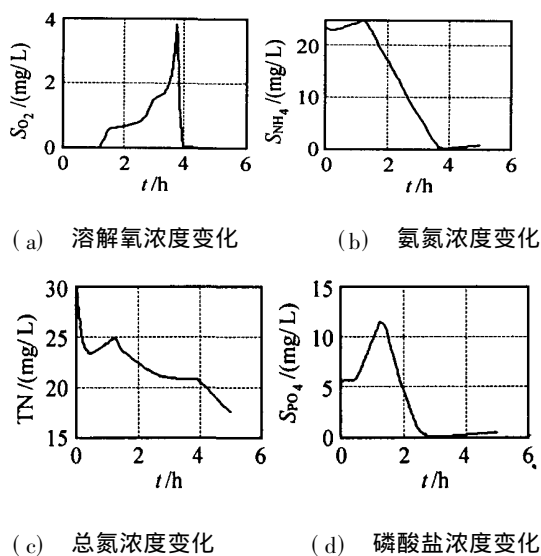


图 1 优化控制仿真结果

如图 1 所示. 仿真运行得到的 3 段运行时间分别为: 厌氧 1.25 h, 好氧 2.5 h, 缺氧 1.25 h, 排水中总磷浓度为 0.48 mg/L, 氨氮浓度为 0.76 mg/L, 总氮浓度为 17.68 mg/L, BOD 浓度为 4.49 mg/L, COD 浓度为 57.15 mg/L, 排水水质满足排放标准.

### 3.2.3 改进的进退优化算法

直接寻优算法虽然能够选择最佳运行时间, 但运算时间较长, 尤其步长选择越短, 计算时间越长, 不利于实际工程应用. 为此, 本文利用进退法思想, 结合 SBR 脱氮除磷系统的工艺特点, 对上述最优算法进行了改进. 通过仿真, 对不同配置 SBR 系统的性能指标进行分析发现: 1) 前两个阶段固定时, 性能

指标随缺氧时间的增加呈由大到小再增大的趋势, 性能指标最小值对应一个最佳缺氧时间; 2) 厌氧时间固定时, 每一个好氧时间可对应一个最佳缺氧时间, 相应的性能指标随好氧时间的增加而呈由大到小再增大的趋势; 3) 厌氧时间变化时, 性能指标同样随厌氧时间的增加而呈由大到小再增大的变化趋势. 性能指标最小值对应一个最佳厌氧时间、一个最佳好氧时间和一个最佳缺氧时间, 即 SBR 优化控制系统的 3 段最佳运行时间.

以上述规律为基础, 结合进退法<sup>[3]</sup>的某些思想, 对最优算法程序进行改进. 采用固定步长, 对控制变量按其增加的方向进行搜索, 如果搜索成功, 即性能指标下降, 则沿增大的方向继续搜索. 如果在第  $k$  次迭代时, 搜索失败, 即性能指标上升, 则停止搜索. 改进算法的仿真结果见表 1, 其中进水成分与直接寻优时相同. 为了检验算法的鲁棒性, 进行了大量仿真实验, 表 1 给出了在输入的主要成分氨氮和磷酸盐加上 5% 的随机扰动后寻优的结果, 与扰动前相比产生的偏差均小于 5%, 表明优化算法具有较好的鲁棒性.

从表 1 可以看出, 对于相同的进水, 步长一定时, 算法改进前后得到的 3 段反应时间相同. 但改进算法后, 计算时间大大缩短, 尤其步长选得越小, 二者差距越明显, 时间配置也趋于固定. 综合考虑, 最合适的寻优步长是 0.1 h. 为了验证改进优化算法的可行性, 选择了 3 组不同进水进行仿真研究. 3 种工

表 1 算法改进前后的仿真结果

	寻优步长/0.25 h		寻优步长/0.1 h		寻优步长/0.05 h		鲁棒性校验		
	改进前	改进后	改进前	改进后	改进前	改进后	步长/0.25 h	步长/0.1 h	步长/0.05 h
厌氧时间/h	1.25	1.25	1.1	1.1	1.1	1.1	1.25	1.2	1.11
好氧时间/h	2.5	2.5	2.2	2.2	2.2	2.2	2.25	2.3	2.23
缺氧时间/h	1.25	1.25	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0
运算时间/s	1 336	35	17 130	46	93 096	132			

表 2 进水成分及浓度

	$S_F$	$S_A$	$S_I$	$S_{NH_4}$	$S_{PO_4}$	$X_I$	$X_S$	$X_H$	$X_{TSS}$
周期 1	43.28	28.86	30	40.91	10.33	47.16	219.93	29.68	227.02
周期 2	48.05	32.03	30	43.13	9.71	35.56	184.48	24.45	187.03
周期 3	37.21	24.81	30	37.34	8.40	46.28	226.26	30.28	231.66

表 3 3 个周期出水水质的数值计算结果

	BOD/(mg/L)	COD/(mg/L)	$S_{NH_4}^I$ /(mg/L)	TN/(mg/L)	TP/(mg/L)	厌氧时间/h	好氧时间/h	缺氧时间/h	运算时间/s
周期 1	4.52	57.00	1.64	17.36	0.46	1.1	2.2	1.0	43.16
周期 2	4.46	57.05	1.21	14.97	0.46	1.3	2.0	1.0	79.86
周期 3	4.42	56.88	1.28	15.09	0.46	1.5	2.0	1.0	81.19

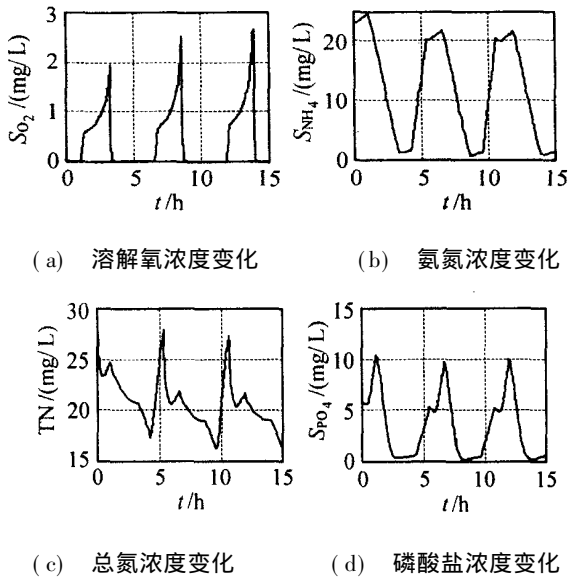


图2 3个周期的优化控制仿真运行结果

况的进水成分、运行参数和出水水质如表2和表3所示,仿真运行结果如图2所示。从仿真结果可以看出,优化控制算法可以根据进水水质的变化,自动选择满足出水指标的最优运行时间。

#### 4 结 语

对于序批式反应器,好氧、厌氧、缺氧3种操作模式相互影响,直接决定了处理的效果和能量消耗。理想的方法是直接在线监测3个阶段是否完成,适时转到下道工序。但目前表征这些进程起始/终结的特征不易估计,只能依据污水组成情况,借助仿真工具,离线优化好3种操作的时间配置,在实际运行时再根据进水水质的变化,自动选择厌氧、好氧、缺氧3

段的运行时间。这样的优化策略能够在满足出水水质的约束下,缩短好氧时间,降低运行成本,达到满意的控制效果。

#### 参考文献(References)

- [1] Srinivasan B, Palanki S, Bonvin D. Dynamic optimization of batch processes I: Characterization of the nominal solution [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2003, 27(1): 1-26.
- [2] 樊立萍,于海斌,袁德成. 序批式反应器污水处理工艺建模与控制研究[J]. 信息与控制, 2004, 33(2): 202-207. (Fan L P, Yu H B, Yuan D C. Modeling and control of sequencing batch reactors for wastewater treatment processes [J]. *Information and Control*, 2004, 33(2): 202-207.)
- [3] 蔡宣三. 最优化与最优控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1982: 176-229.
- [4] Henze M, Gujer W, Mino T, et al. *Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d, ASM3* [M]. London: IWA Publishing, 2000: 14-26.
- [5] 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 D C, Fan L P, Yu H B. Software Development for Simulating Biological Wastewater Treatment Processes [J]. *J of System Simulation*, 2003, 15(11): 1509-1513.)
- [6] Alex J, Beteau J, Copp J, et al. Benchmark for evaluating control strategies in wastewater treatment plant [A]. *Proc of European Control Conf [C]*. Karlsruhe, 1999: 1-7.

(上接第236页)

#### 参考文献(References)

- [1] Takagi H. Interactive evolutionary computation: Fusion of the capabilities of EC optimization and human evaluation [J]. *Proc of the IEEE*, 2001, 89(9): 1275-1296.
- [2] 王上飞,王胜惠,王煦法. 结合SVM的交互式遗传算法及其应用[J]. 数据采集与处理, 2003, 18(4): 429-433. (Wang S F, Wang S H, Wang X F. Improved interactive genetic algorithm incorporating with SVM and its application [J]. *J of Data Acquisition and Processing*, 2003, 18(4): 429-433.)
- [3] Biles J A, Anderson P G, Loggi L W. Neural network fitness functions for a musical IGA [A]. *Proc of the Int*

*ICSC Symposium on Intelligent Industrial Automation and Soft Computing* [C]. UK, 1996: B39-44.

- [4] Lee Joo-young, Cho Sung-bae. Sparse fitness evaluation for reducing user burden in interactive genetic algorithm [A]. 1999 *IEEE Internatitl Fuzzy Systems Conference Proceedings* [C]. Seoul, 1999, 2: 998-1003.
- [5] Sugimoto F, Yoneyama M. An evaluation of hybrid fitness assignment strategy in interactive genetic algorithm [A]. *Proc of the 5th Australasia-Jap an Joint Workshop on Intelligent and Evolutionary Systems* [C]. Dunedin, 2001: 62-69.