

文章编号:1000-582X(2006)11-0101-04

污水处理中基于仿人智能的 DO 参数控制策略*

梅小艳, 杨志, 查智

(重庆大学 自动化学院, 重庆 400030)

摘要:污水处理是一个复杂的生化反应过程,难以数学建模. 针对其曝气控制过程中参数的不确定性,采用传统 PID 控制策略难以实现优化控制的问题,文章以 DO 参数控制为例,提出了基于仿人智能的控制策略对其实施控制. 仿人智能控制策略很好地解决了 DO 参数值波动的控制问题,有效地保证了出水水质和曝气风量的合理控制. 文中给出了控制策略、系统结构和控制规则. 仿真结果表明了该控制策略的可行性和有效性,系统动、静态品质好.

关键词:污水处理;活性污泥法;溶解氧;智能控制

中图分类号:TP273

文献标识码:A

污水处理一般采用间歇式活性污泥法(Sequencing Batch Reactor—SBR),在污水处理过程中,曝气有以下作用:给污水供氧,气体吹脱,充分搅拌和提高传质效果.在曝气过程中,预曝气、脱氮、好氧污泥消化等过程要消耗大量能源,约占整个污水处理厂能源消耗的50%^[1].因此,曝气控制既是整个工艺的重要环节,又是节能的重点环节.在曝气充氧过程中,如果污水量多、需氧量大则曝气风量大,反之亦然,曝气风量不足,则会延缓生化处理过程时间,且出水水质难以保证;曝气风量过多则造成能源浪费,正确的控制方法是曝气风量大小自动跟踪污水量的变化.由于污水处理是一个复杂的生化反应过程,难以用数学模型进行准确描述,因此在污水处理过程控制中存在不少控制问题.

1 污水处理过程中存在的问题及过程特性

1.1 存在的问题

污水处理过程中的重要参数是污水进出水水质参数,在污水处理过程中,生化处理系统本身必须维持动态平衡,如果 DO 偏低(或偏高),则必须调节鼓风机转速以增加(或减少)曝气量,以维持动态平衡,否则曝气量过多必然导致能源的巨大浪费,曝气量不足会导致在污水处理过程中,曝气控制就是根据好氧池中的 DO 值来控制鼓风机的曝气风量,实际上污水水质的监测与控制之间存在时间滞后,因此导致鼓风机难以准确地根据好氧池中实际溶解氧的浓度来提供曝气量.

目前,国内很多污水处理厂由于工艺技术落后,至

今还仍然采用手工曝气控制、时间控制或进水量比例控制等方法曝气,不仅消耗大量的人力、物力,而且造成电能的巨大浪费.国内外许多学者为提高污水处理厂的处理效率和降低能耗作了大量研究工作,如 Ferrer. J 开发的模糊控制系统,将其用于中试规模的 BARDENPHO 工艺的主曝气区^[2],试验结果表明采用模糊逻辑控制的曝气系统可节省 40% 的能源,其稳定性提高 60%; Yu Ruey - Fang 等将人工神经网络与实时控制相结合,对连续流 SBR 系统进行控制^[3]以提高控制系统的性能,该控制系统将 ORP 和 pH 值的在线监测与 BP 神经网络模型融汇,对连续流 SBR 系统脱氮过程中每一阶段的水力停留时间进行控制以提高脱氮效率; Paul. A 应用专家系统对厌氧废水处理进行监测和诊断^[4]等;彭永臻^[5-6]等对硝态氮污染水脱氮处理新方法及生物电极法采用模糊控制,也取得了较好的控制效果.

1.2 过程特性

由于污水处理是一个典型的具有非线性、时变性、随机性、模糊性和非稳定性的复杂处理过程,很难用严格的数学方法对过程特性进行描述.其过程特性概括起来可归纳为:1)过程参数的未知性、时变性、随机性和分散性;2)过程时滞的未知性和时变性;3)过程严重的非线性;4)过程各变量间的关联性;5)过程环境干扰的未知性、多样性和随机性.

面对上述特性,由于传统控制方法是基于数学模型的控制,而污水处理难以数学建模,因此用传统的控

* 收稿日期:2006-05-27

基金项目:重庆市应用基础研究项目(6803)

作者简介:梅小艳(1979-),女,湖北安陆人,重庆大学硕士研究生,主要从事智能控制的研究.

制策略是难于对污水处理过程进行有效控制的. 因为污水处理厂的进水水质和水量是变化的、随机的, 因此污水处理池的需氧量也是变化的. 按照工艺要求, 只有使供氧量在曝气池的各段内与该段时间需氧量相适应, 才能保证出水水质的质量. 污水处理过程中 DO 参数的控制是极其复杂的, 因此, 必须研究与过程特性相适应的控制策略.

2 控制策略选取

采用传统控制策略是难于对污水处理过程控制取得良好控制效果的, 集中表现在如下 5 个方面:

- 1) 不确定性问题;
- 2) 高度非线性;
- 3) 半结构化与非结构化问题;
- 4) 系统复杂性问题;
- 5) 可靠性问题.

上述表明, 传统的控制策略不能很好地对污水处理过程进行有效的控制, 因此有必要对控制策略作进一步的研究.

20 世纪 50 年代发展起来的近代控制理论, 无论是状态空间法, 还是基于 I/O 描述的黑箱法, 精确的数学描述是它分析与设计系统的基础, 而对污水处理过程而言显然不具备数学模型的条件, 不应列为选取的控制策略.

神经网络控制的关键是选择一个合适的神经网络模型, 并进行训练与学习, 直至达到符合要求为止. 然而, 神经网络的学习, 需要一定的实验样本, 由于不确定性所致, 很难从已知经验和事先的实验中获得实验样本; 神经网络的训练与学习过程, 有时较为复杂, 需要运行成千上万次才能获得最佳结构, 有时获得的往往是一个局部最优解, 而不是全局最优解, 因方法的局限性, 一般也难于对被控对象实现有效的控制.

专家控制系统是以知识为基础, 能够处理各种定性的、定量的、精确的、模糊的信息, 因此可根据对被控过程的经验和知识获取情况, 采取不同的描述形式, 以便更多地反映对象特性, 为控制提供控制策略和控制模态. 但特征信息的采集、特征信息的表达以及完备知识库建立等的实现难度大, 所以, 专家控制系统未必对所有的不确定性复杂对象都是好的选择.

人的控制经验是用人的语言来进行总结和描述的, 而语言是思维的外壳, 它具有很大的模糊性. 可以用模糊数学中的模糊集合来刻画这些模糊语言, 并用 IF condition THEN action 语句予以实现. 它为处理客观世界中已存在的模糊性问题, 提供了有力的工具. 但是, 因为不确定因素太多, 对污水处理过程的控制未必是好的选择.

仿人智能控制 HSIC (Human Simulated Intelligent

Control) 在结构和功能上具有以下基本特征: 分层递阶的信息处理和决策机构(高阶产生式系统结构); 在线的特征识别和特征记忆; 开闭环控制结合和定性决策与定量控制结合的多模态控制; 启发式和直觉推理逻辑的应用. 由于它的基本特点是模仿控制专家的控制行为, 因此, 它的控制算法是多模态的控制, 是多种模态控制间的相互交替使用. 正是由于这一特点使得该算法完美地协调了控制系统中诸多相互矛盾的控制品质的要求, 是一种较理智的选择.

3 控制模型与工程控制算法

仿人智能控制不仅具有优良的控制效果, 而且对被控过程的先验知识要求甚少, 并对环境的变化有很强的自适应能力, 是实现智能控制的一条有效的途径^[7]. 仿人智能控制选用误差 e 和误差变化率 Δe 作为控制的输入变量, 而 e 和 Δe 都是可以准确测量的, 用这 2 个变量来识别控制系统所处的状态、动态特征及行为, 计算机借助于这些特征变量就能实现控制. 文中将仿人智能和专家系统技术应用于这个典型的非线性和动态特性控制系统中, DO 参数仿人智能控制系统把专家系统技术引入控制系统设计的同时, 对专家系统的结构进行简化, 把知识库、推理机构和规则集合并为一个具有优异控制性能而结构又较为简单的仿人智能控制器中, 从而对出水水质和曝气量进行控制. 专家系统是一个智能程序系统, 它利用知识库和推理机构来解决专业范围内只有靠专家才能解决的问题. 基于 HSIC 的 DO 参数控制系统在开闭环控制基本特征的基础上, 利用专家系统技术实现灵活的多模态控制, 增强了判断和推理的能力, 控制系统结构模型如图 1 所示.

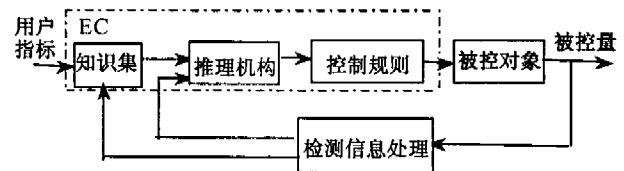


图 1 基于 HSIC 的 DO 参数控制系统结构

3.1 知识的获取与知识集的建立

建立知识集实际上是如何表达已获取的知识. 控制系统采用产生式规则来建立知识集, 其基本结构是

IF <condition> THEN <action>

基于产生式规则构成的系统的突出优点是模块性好, 每条规则可独立增删、修改, 每个产生式规则之间无直接联系, 而且其自然性好, 适合于工业过程控制的特点.

3.2 工程控制算法

工程控制算法的控制规则集, 可由工程控制算法推演出来, 现以仿人智能控制的原型算法为例, 控制算

法为

$$u = \begin{cases} K_p e + kK_p \sum_{i=1}^{n-1} e_{m,i} & (e \cdot \dot{e} > 0 \cup e = 0 \cap \dot{e} \neq 0); \\ kK_p \sum_{i=1}^n e_{m,i} & (e \cdot \dot{e} > 0 \cup \dot{e} = 0). \end{cases}$$

式中, u 为控制输出; K_p 为比例系数; k 为抑制系数; e 为系统误差; \dot{e} 为系统误差的变化率; $e_{m,i}$ 为误差第 i 次峰值。

DO 参数控制规则集是在该原型算法的基础上进一步总结人的控制经验而建立的一套适合于不同特征状况的控制规则, 具体规则如下:

IF $e > \beta R$ THEN $u_n = u_m$;
 IF $e < -\beta R$ THEN $u_n = -u_m$;
 IF $|e| < \delta_1$ and $|\dot{e}| < \delta_2$ THEN $u_n = u_{n-1}$;
 IF $|e| > m \cdot R$ and $e \cdot \dot{e} > 0$ THEN $u_n = u_p$;
 IF $e \cdot \dot{e} < 0$ and $|e/\dot{e}| > a$ THEN $u_n = \alpha p_1$;
 IF $e \cdot \dot{e} < 0$ and $|e/\dot{e}| > b$ THEN $u_n = p_1 + K_d \dot{e}$;
 IF $e \cdot \dot{e} < 0$ and $b \leq |e/\dot{e}| \leq a$ THEN $u_n = p_1$;
 IF $e \cdot \dot{e} \geq 0$ and $|e| \in (\delta_1, \theta_1), |\dot{e}| \in (\delta_2, \theta_2)$;
 THEN $u_n = P_1 + K_{p2}e + K_{i2} \sum e_j$;
 IF $e \cdot \dot{e} < 0$ and $|e| \in (\delta_1, \theta_1), |\dot{e}| \in (\delta_2, \theta_2)$;
 THEN $u_n = P_1 + K_{p2}e$;
 IF $e \cdot \dot{e} \geq 0$ and $|e| > \theta_2$;
 THEN $u_n = P_1 + K_{p1}e + K_{i1} \sum e_j - K_d \dot{y}$.

式中, u_n 为控制器的第 n 次输出值; u_m 为与输入变化量 ΔR 有关的一个输出保持值; u_p 为强制保持值; e, \dot{e} 为系统偏差及其变化率; \dot{y} 为对象输出的变化率;

$p_1 = r \sum_{i=1}^l e_{m,i}$, 控制器输出的最近一次保持值, 式中 $e_{m,i}$ 为偏差的第 i 次极值, r 为极值加权因子, 可在线修正; $K_{p1}, K_{p2}, K_{i1}, K_{i2}, K_d$ 为比例、积分和微分增益; $\sum e_j$ 为在 $e \cdot \dot{e} \geq 0$ 期间内偏差的累计; β 为切换因子; α, a, b 为常数, 由知识集中的经验规则确定; R 为设定值; $\delta_1, \delta_2, \theta_1, \theta_2$ 为允许的误差及误差速率范围。

4 仿真实验及分析

采用常见的二阶环节为例, 分别采用 PID 和 HSIC 工程控制算法进行仿真, 设被控对象 DO 参数滞后控制模型为

$$G(s) = \frac{K_0 \times e^{-\tau s}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$$

其中, $T_1 = 1.0 \text{ s}, T_2 = 2.0 \text{ s}, K_0 = 4.134$, 在延迟时间分别为 $\tau = 2 \text{ s}, \tau = 10 \text{ s}$ 和 $\tau = 20 \text{ s}$ 时对系统进行仿真比较, 响应曲线如图 2 的(a)、(b)和(c)所示。从仿真结

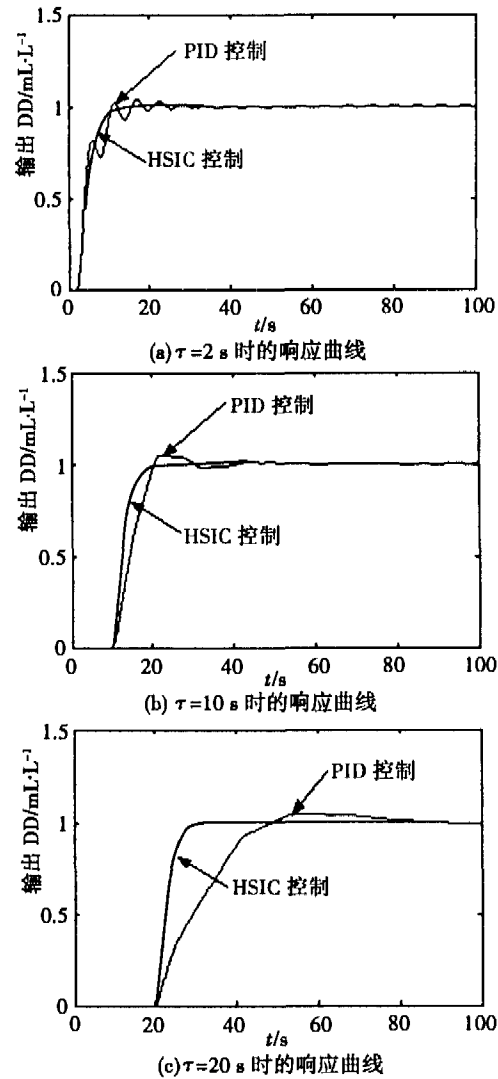


图 2 系统在不同的滞后时间下的响应曲线

果来看, 采用 HSIC 控制器过渡过程时间短, 无超调, 即使在较长滞后时间情况下仍能保持良好的控制性能, 滞后时间常数 τ 越大, HSIC 控制的效果越好, PID 控制效果越差, 说明 HSIC 有很强的鲁棒性。

当 $\tau = 10 \text{ s}$ 时, 在仿真中加入脉冲信号作为系统的外部扰动, 其脉冲宽度为 0.2 s , 振幅分别为 0.5 和 1.0 时, 2 种控制器对应的响应曲线如图 3 (a) 和 (b) 所示。从仿真结果来看, 在加入脉冲扰动的情况下, 对比 PID 控制器, 新的控制策略过渡时间短, 最大偏差小于 0.1 mg/L , 显示了其很强的抗干扰能力。这是由于 HSIC 控制器根据规则由系统输入的偏差信号在整个论域范围内进行调整, 增强了系统偏差信号对控制系统的作用, 从而使系统对扰动能及时做出响应。此外, HSIC 控制是一种非线性控制, 为了提高上升速度, 缩短过渡过程时间, 它允许调节器输出较大的幅值, 同时又通过规则使其抑制超调, 避免了调节过程中因调节过度而引起的振荡, 从而使系统迅速达到稳定。在解

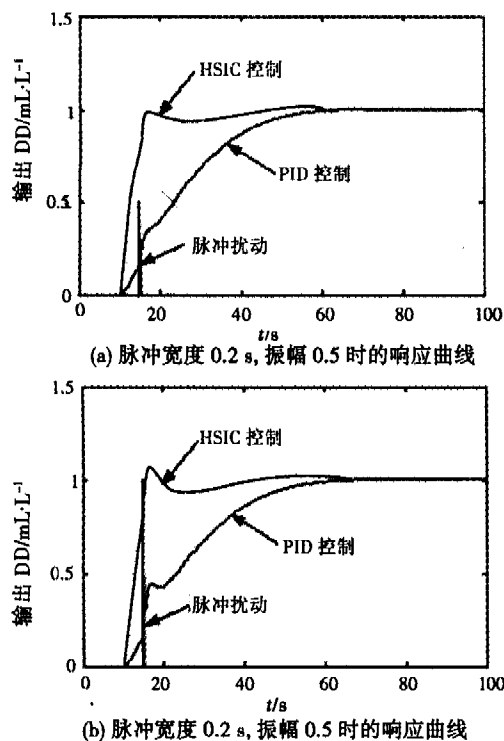


图3 系统在不同的脉冲振幅时的响应曲线

决大滞后或超大滞后的对象时 HSIC 具有绝对优势, 并有较好的控制效果。

从 HSIC 与 PID 控制算法控制的仿真结果比较还可以看出: 对 DO 参数这样难于控制的过程, HSIC 不仅使系统能很快达到稳定, 且 DO 参数在设定值范围波动内较小, 滞后现象得到了改善, 操作人员可根据实时监测值决定鼓风机开启的台数和曝气量, 在保证溶解氧在正常范围内的基础上大幅度节省能源消耗。

5 结 语

曝气过程中的需氧量是实时变化的, 为降低能耗, 减少系统波动, 使处理后的废水达到排放标准, 本文采用仿人智能控制, 把曝气池内的 DO 浓度控制在容许指标范围内, 使间歇式活性污泥法控制系统在保证出水水质的同时达到节能的目的。仿真结果表明, 采用智能控制策略, 其系统的控制品质比较理想, 系统结构简单, 实时性好。

参考文献:

- [1] 侯加全, 赵宏伟, 张晓清, 等. 自适应神经元——模糊推理系统在污水曝气控制中的应用[J]. 自动化与仪器仪表, 2004, (5): 34-36.
- [2] FERRER J, RODRIGO M A. Energy Saving in the Aeration Process by Fuzzy Logic Control [J]. Water Science and Technology, 1998, 38(3): 209-217.
- [3] YU RUEY-FANG, LIAW SHU-LIANG. Applying Real-time Control to Enhance the Performance of Nitrogen Removal in the Continuous - flow SBR System[J]. Water Science and Technology, 1998, 38(3): 271-280.
- [4] PUNAL A, ROCCA E. An Expert System for Monitoring and Diagnosis of Anaerobic Wastewater Treatment Plants [J]. Water Research, 2002, 16: 2 656-2 666.
- [5] 彭永臻, 王淑莹, 周利, 等. 生物电极脱氮的在线模糊控制——I. 模糊控制系统的组成与基本思想[J]. 中国给水排水, 1999, 15(2): 5-9.
- [6] 彭永臻, 王淑莹, 周利, 等. 生物电极脱氮的在线模糊控制——II. 模糊控制系统的组成与基本思想[J]. 中国给水排水, 1999, 15(4): 5-10.
- [7] 李祖枢, 涂亚庆. 仿人智能控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.

Control Strategy of DO Parameter Based on Human Simulated Intelligence in the Wastewater Treatment Process

MEI Xiao-yan, YANG Zhi, ZHA Zhi

(College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The treatment of wastewater is a complicated biological and chemical process, which can not be described precisely with a mathematical model. It is almost impossible to get a satisfactory control result when a traditional PID control method is adopted, for the parameters of the activated-sludge process are uncertain. The paper takes DO parameter controlling as an example, and proposes a human-simulated intelligent control strategy to reduce the fluctuation problem of DO parameter. Both the control rules and the structure of control system are presented. The simulation experiments shows that the control effect of activated-sludge process by HSIC is much better than PID control.

Key words: wastewater treatment; sequencing batch reactor; activated-sludge process dissolutive oxygen (DO); human-simulated intelligent control (HSIC)