

污水处理过程溶解氧浓度的自抗扰控制

魏 伟, 左 敏[†], 李 伟, 王小艺, 刘载文

(北京工商大学 计算机与信息工程学院, 食品安全大数据技术北京市重点实验室, 北京 100048)

摘要: 溶解氧是活性污泥法处理污水的一个关键变量, 它关系到污水中有机物的生物降解、微生物生长和出水水质。多数污水处理过程选择溶解氧为被控量。然而, 溶解氧浓度受进水流量、进水组分、浓度波动等诸多因素影响, 较难控制。本文根据曝气量变化确定溶解氧浓度设定值, 以污水进水变化率为控制量, 设计线性自抗扰控制实现对溶解氧浓度的跟踪, 进而获得对污水出水底物浓度的间接控制。设计两组仿真实验, 分别模拟进水底物浓度固定和变化时, 线性自抗扰控制对溶解氧浓度和出水底物浓度的控制; 同时, 设计仿真实验验证线性自抗扰控制对总扰动的估计和补偿效果。仿真结果表明, 线性自抗扰控制可获得良好的溶解氧浓度跟踪和出水底物浓度控制效果; 在进水水质波动时, 线性自抗扰控制亦具有很强的干扰补偿能力, 可保证出水水质。

关键词: 污水处理; 溶解氧; 底物浓度; 抗扰控制

引用格式: 魏伟, 左敏, 李伟, 等. 污水处理过程溶解氧浓度的自抗扰控制. 控制理论与应用, 2018, 35(1): 24 – 30
中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Control of dissolved oxygen for a wastewater treatment process by active disturbance rejection control approach

WEI Wei, ZUO Min[†], LI Wei, WANG Xiao-yi, LIU Zai-wen

(School of Computer and Information Engineering, Beijing Key Laboratory of Big Data Technology for Food Safety, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: Dissolved oxygen (DO) is a key parameter in activated sludge wastewater treatment processes. It relates to the biodegradation of organic compounds, the growth of microorganisms and the effluent quality. DO is always taken as a controlled variable in wastewater treatment processes. However, DO concentration is sensitive to many factors, such as the rate of inflow, component of inflow, variation of concentrations. The control of DO concentration is a difficult problem in control engineering. Desired DO concentration is assigned by aeration rate, and dilution rate is taken as the control input. Linear active disturbance rejection control (LADRC) is designed to make DO concentration tracks the setpoints, and, indirectly, the substrate concentration is controlled within an acceptable level. Two cases, i.e. fixed and varied influent substrate concentrations, are considered in simulations. Additionally, in order to verify the disturbance rejection and compensation ability of LADRC, a group of numerical simulation is also performed. Numerical results show the fact that both DO concentration tracking and substrate concentration regulation can be realized effectively by LADRC, and LADRC is also able to reject the disturbance and guarantee the effluent quality even if the influent wastewater are fluctuated.

Key words: wastewater treatment process; dissolved oxygen; substrate concentration; active disturbance rejection control

Citation: WEI Wei, ZUO Min, LI Wei, et al. Control of dissolved oxygen for a wastewater treatment process by active disturbance rejection control approach. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(1): 24 – 30

1 引言(Introduction)

水是人类赖以生存的宝贵资源。我国水资源有限, 人均淡水占有量仅为世界人均的1/4, 是世界上21个最缺水的国家之一^[1]。随着我国城镇化、工业化和人民生活水平的提高, 人们对水资源的需求越来越大; 同

时, 工业和生活污水的排放量也越来越大, 水环境污染问题突出。可见, 水资源短缺、水资源污染恶性循环, 形势严峻。然而, 将污水处理后再次利用, 使之资源化, 不仅可以避免污染, 而且能够极大地减小水资源短缺的压力。

收稿日期: 2017-04-06; 录用日期: 2017-09-14.

[†]通信作者. E-mail: zuomin@btbu.edu.cn; Tel.: +86 10-68984282.

本文责任编辑: 陈增强.

国家自然科学基金项目(61403006), 北京市属高等学校青年拔尖人才培养计划项目(CIT&TCD201704044), 北京市自然科学基金项目(9162002), 北京市教委科技计划重点项目(KZ201510011011), 国家重点研发计划课题(2016YFD0401205)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (61403006), Importation and Development of High-Caliber Talents Project of Beijing Municipal Institutions (CIT&TCD201704044), Beijing National Natural Science Foundation (9162002) and Key program of Beijing Municipal Education Commission (KZ201510011011) and National Key Research and Development Program of China (2016YFD0401205).

活性污泥法模拟自然界水体的自净过程, 利用活性污泥中微生物的生命活动, 清除污水中的有机污染物, 在污水处理领域应用广泛^[2]. 活性污泥法处理污水(其基本流程如图1所示)由好氧生化反应池(曝气池)和沉淀池组成.

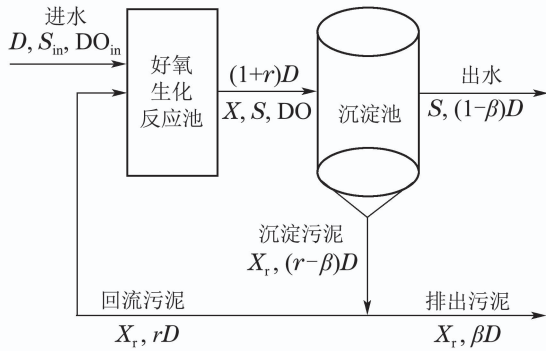


图 1 活性污泥法处理污水的基本流程

Fig. 1 Layout of activated sludge wastewater treatment processes

由图1可知, 活性污泥法处理污水时, 曝气池内的生化反应实现了污水净化的主要功能. 溶解氧参与了曝气池中的生化反应, 其浓度决定了生化反应程度和出水水质. 溶解氧浓度过低, 好氧微生物无法生存, 其氧化分解作用亦无法充分发挥; 溶解氧浓度过高, 会降低除氮效果. 同时, 增大溶解氧浓度需加大曝气量, 进而增加能耗^[3-4]. 因此, 从污水处理的工艺、效果, 以及节能、降耗等角度看, 有效、合理控制溶解氧浓度非常关键.

PI/PID^[5-7]在溶解氧浓度控制中普遍使用. 然而, 污水处理过程具有典型的非线性、多变量、强耦合特点, 出水水质受进水流量、组分、浓度波动, 污泥浓度变化, 内回流浓度变化等多源干扰的影响, PI/PID控制效果并不理想. 污水处理过程的特点给污水处理过程控制提出了极大的挑战. 为获得更好的污水处理效果, 改进PID^[8]、自组织模糊神经网络控制^[9-10]、多目标优化控制^[11]、线性二次型最优控制^[12]、模型预测控制^[13-18]、多变量自适应控制^[19]等控制策略相继提出.

实际上, 污水处理始终处于动态变化之中, 出水水质受多源干扰影响. 实时、准确地获取扰动信息, 并通过控制通道迅速补偿扰动, 使被控量不受扰动的影响, 是工程控制的本质问题^[20]. 以此为核心, 中科院系统所韩京清研究员提出了自抗扰控制^[21], 之后, 美国克利夫兰大学高志强教授继承自抗扰控制的核心思想提出了线性自抗扰控制及其带宽参数化整定方法^[22-23]. 在国内外控制领域众多学者的共同努力下, 经过几十年的发展, 自抗扰控制的理论和应用研究都取得了长足的发展^[24-30].

本文将影响溶解氧浓度值、出水底物浓度值的因

素视为扰动, 从抗扰角度研究污水处理过程控制问题. 利用扩张状态观测器实时估计各种不确定因素, 并在控制量中予以补偿, 以保证溶解氧浓度跟踪效果和出水水质.

2 活性污泥污水处理过程模型 (Model of activated sludge wastewater treatment processes)

活性污泥法利用活性污泥中的微生物去除污水中的有机污染物, 是城市生活污水处理的主要方式之一, 其基本处理流程由好氧生化反应池(曝气池)和沉淀池构成. 如图1所示.

好氧生化反应池中, 在曝气(充氧)条件下, 利用活性污泥的凝聚吸附、氧化分解功能, 除氮、除磷, 去除污水中的有机污染物、净化污水. 沉淀池中, 分离生化反应池出水中的活性污泥与处理后的上层清液. 沉淀出的活性污泥一部分回流至生化反应池, 保持生化反应池内的污泥浓度、以保证污水处理效果; 另一部分则被排出, 以保证不断生成新的污泥时, 系统的污泥总量是动态平衡的.

理想状况下, 基于物料平衡, F. Nejjari等提出如下污水处理过程(wastewater treatment process, WWTP)的非线性多变量控制模型^[19]:

$$\begin{cases} \frac{dX(t)}{dt} = \mu(t)X(t) - D(t)(1+r)X(t) + rD(t)X_r(t), \\ \frac{dS(t)}{dt} = -\frac{\mu(t)}{Y}X(t) - D(t)(1+r)S(t) + D(t)S_{in}, \\ \frac{dDO(t)}{dt} = -\frac{K_0\mu(t)}{Y}X(t) - D(t)(1+r)DO(t) + K_{La}(DO_s - DO(t)) + D(t)DO_{in}, \\ \frac{dX_r(t)}{dt} = D(t)(1+r)X(t) - D(t)(\beta+r)X_r(t), \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} \mu(t) = \mu_{\max} \frac{S(t)}{K_s + S(t)} \frac{DO(t)}{K_{DO} + DO(t)}, \\ K_{La} = \alpha W(t), D(t) = \frac{Q_{in}}{V_a}, \\ r = \frac{Q_r}{Q_{in}}, \beta = \frac{Q_w}{Q_{in}}. \end{cases} \quad (2)$$

式(1)和式(2)中: $X(t)$ 为活性污泥浓度, $S(t)$ 为出水底物(BOD)浓度, $X_r(t)$ 为回流污泥浓度, $DO(t)$ 为好氧生化反应池中的溶解氧浓度, $D(t)$ 为进水变化率, DO_s 为最大溶解氧浓度, S_{in} 为进水底物浓度, DO_{in} 为进水溶解氧浓度, Y 为产率系数, $\mu(t)$ 为微生物增殖率, μ_{\max} 为最大增殖率, K_s, K_{DO} 为饱和常数, K_{La} 为氧转移系数, α 为氧转移率, $W(t)$ 为曝气量, K_0

为模型常数, $r, Q_r, Q_{in}, \beta, Q_w, Q_{in}$ 为进水、循环和出水常数. 关于该模型的更多信息可参见文献[19].

对污水处理的非线性多变量控制模型(1)做如下假定^[19]:

A1) 假定仅溶解氧浓度 $DO(t)$ 可测, 污泥浓度 $X(t)$ 、出水底物浓度 $S(t)$ 、回流污泥浓度 $X_r(t)$ 均无法在线检测;

A2) 假定微生物生长模型已知.

模型参数取值见表1.

表1 活性污泥法模型参数

Table 1 Parameters of the activated sludge wastewater treatment process model

参数	取值	参数	取值
Y	0.65	S_{in}	$200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$
r	0.6	DO_{in}	$0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$
β	0.2	μ_{max}	0.15
α	0.018 m^{-3}	K_s	$100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$
K_0	0.5	K_{DO}	$2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$
DO_s	$10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$		

3 污水处理的线性自抗扰控制设计 (Design of linear active disturbance rejection control for wastewater treatment processes)

3.1 污水处理控制方案(A program of wastewater treatment processes)

因溶解氧浓度便于在线检测、精度较高, 通过在线实时测量溶解氧浓度, 控制其在一定的范围内, 可保证好氧生化反应池内生物降解的效率、提高出水水质. 溶解氧控制被污水处理过程广泛采用.

图1所示活性污泥法污水处理流程. 污水进入好氧生化反应池后, 需要在其中停留一段时间, 完成生化反应之后再进入沉淀池. 如果进水流量变化太快, 即: 污水在生化反应池内停留时间过短, 要使出水水质达标必然要求以较大的曝气量保证生化反应所需的溶解氧浓度. 此操作必然带来较大的能量消耗. 然而, 出水水质并不一定能够达标. 因此, 给定合理的曝气量, 控制好污水的进水变化率, 使溶解氧浓度符合要求, 进而保证出水水质是一种可参考的控制方案.

本文以进水变化率 $D(t)$ 为控制量, 控制溶解氧浓度, 进而实现对出水底物浓度的间接控制, 以保证出水水质.

3.2 线性自抗扰控制 (Linear active disturbance rejection control)

线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control, LADRC)由高志强教授提出. 它继承了自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)的核心思想, 利用线性扩张状态观测器实时估计来自系统

自身以及外部的总扰动, 并予以补偿, 最终获得优良的控制性能^[22]. 与ADRC相比, LADRC具有参数整定更为方便、更适用于工程应用的优势. 二阶线性自抗扰控制结构如图2所示.

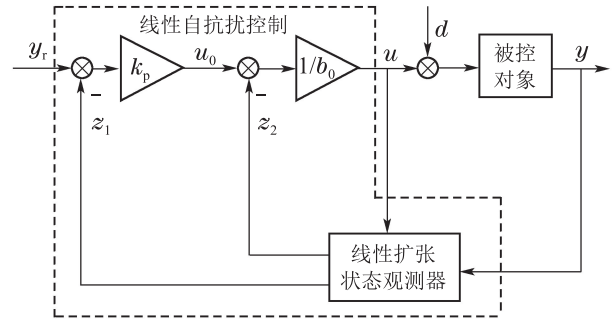


图2 二阶线性自抗扰控制结构

Fig. 2 Second-order linear active disturbance rejection control system

图2中: d 是外部干扰信号; 线性扩张状态观测器(linear extended state observer, LESO)用于实时估计外部干扰 d 和系统内部的不确定性(如: 被控对象的参数摄动、未建模动态等); y_r 为设定值; 控制量 u 和系统输出 y 是LESO的两个输入; z_1, z_2 是LESO的两个输出, 分别为系统输出及系统总扰动的估计值; k_p, b_0 是可调参数.

3.3 溶解氧浓度的线性自抗扰控制设计(Design of dissolved oxygen control by linear active disturbance rejection approach)

本文利用线性自抗扰控制策略, 设计基于活性污泥法的污水处理过程溶解氧浓度控制. 控制结构如图3所示.

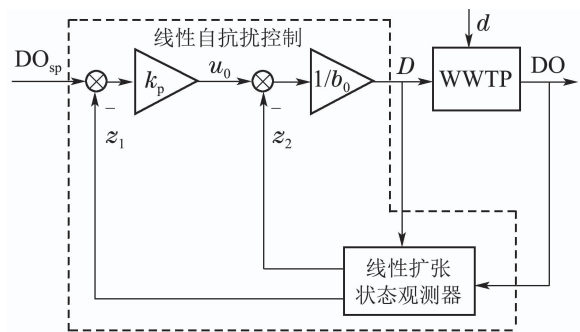


图3 溶解氧浓度的线性自抗扰控制结构

Fig. 3 Linear active disturbance rejection control for dissolved oxygen

图3中: WWTP为污水处理过程, 其动力学方程可由式(1)描述; DO_{sp} 为溶解氧浓度设定值; DO 为溶解氧浓度实测值; D 为进水变化率; d 为系统外部干扰. 本文以污水的进水变化率为控制量, 实现对溶解氧浓度的控制.

3.4 闭环系统分析 (Analysis of the closed-loop system)

3.4.1 闭环稳定性分析 (Stability analysis of the closed-loop system)

对于污水处理过程, 设计线性自抗扰控制律

$$u = \frac{k_p(y_r - z_1) - z_2}{b_0}, \quad (3)$$

其中: y_r 为设定值, z_1, z_2 是二阶线性扩张状态观测器的输出, 二阶LESO可设计为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 + \beta_1(y - z_1) + b_0 u, \\ \dot{z}_2 = \beta_2(y - z_1). \end{cases} \quad (4)$$

定理 1 对于描述污水处理过程的动态系统(1), 选择合适的控制参数 ω_c, ω_o 可使闭环系统(1)(3)-(4)有界输入有界输出稳定.

证 令污水处理过程状态向量 $\mathbf{x} = (X, S, \text{DO}, X_r)^T$, 系统输出 $y = \text{DO}$, 溶解氧浓度设定值 $y_r = \text{DO}_{\text{sp}}$, 控制量 $u = D$, 系统的总扰动为 f . 于是, 描述污水处理过程的动力学方程(1)可写为

$$\dot{y} = f(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) + b_0 u. \quad (5)$$

对系统(5)设计二阶线性自抗扰控制. 依据文献[23], 选取控制参数及观测器参数为

$$k_p = \omega_c, \beta_1 = 2\omega_o, \beta_2 = \omega_o^2, \quad (6)$$

其中: ω_c 为控制器带宽, ω_o 为观测器带宽.

于是, 对式(4)两端取拉氏变换, 有

$$\begin{cases} z_1(s) = \frac{2\omega_o s + \omega_o^2}{(s + \omega_o)^2} y(s) + \frac{b_0 s}{(s + \omega_o)^2} u(s), \\ z_2(s) = \frac{\omega_o^2 s}{(s + \omega_o)^2} y(s) - \frac{b_0 \omega_o^2}{(s + \omega_o)^2} u(s). \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)代入式(3), 可得

$$u(s) = \frac{1}{b_0} \frac{(s + \omega_o)^2}{s^2 + 2\omega_o s + \omega_c s} (\omega_c y_r - \frac{\omega_c(2\omega_o s + \omega_o^2) + \omega_o^2 s}{(s + \omega_o)^2} y(s)). \quad (8)$$

根据被控系统的动力学方程(5)及控制量(8)可将图3所示溶解氧浓度的线性自抗扰控制结构化为图4所示的等效结构. 此时, 将系统的总扰动 f 视为影响系统输出的一个扰动输入信号.

图4中, $G(s), H(s), G_p(s)$ 分别为

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{(s + \omega_o)^2}{s^2 + 2\omega_o s + \omega_c s}, \\ H(s) &= \frac{\omega_c(2\omega_o s + \omega_o^2) + \omega_o^2 s}{(s + \omega_o)^2}, \\ G_p(s) &= \frac{1}{s}. \end{aligned}$$

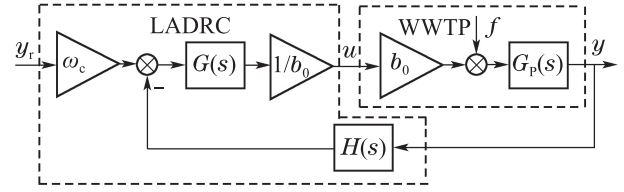


图4 溶解氧浓度的线性自抗扰控制等效结构

Fig. 4 Equivalent structure of the linear active disturbance rejection control for dissolved oxygen

由图4可知, 系统有两个输入信号 y_r, f . 根据线性系统的叠加原理, 可得系统的输出

$$y(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} y_r + \frac{s^2 + (2\omega_o + \omega_c)s}{(s + \omega_o)^2 (s + \omega_c)} f. \quad (9)$$

通常, 参考输入信号 y_r 和总扰动信号 f 皆为有界值. 于是, 选择合适的控制参数 ω_c, ω_o 可使闭环系统有界输入有界输出稳定.

3.4.2 抗扰性能分析 (Disturbance rejection ability analysis of the closed-loop system)

若总扰动信号 f 为单位阶跃, 则由式(9)可知, f 作用下的系统输出 y_f 为

$$\begin{aligned} y_f(s) &= \frac{s^2 + (2\omega_o + \omega_c)s}{(s + \omega_o)^2 (s + \omega_c)} \cdot f = \\ &= \frac{s^2 + (2\omega_o + \omega_c)s}{(s + \omega_o)^2 (s + \omega_c)} \cdot \frac{1}{s} = \\ &= \frac{s + 2\omega_o + \omega_c}{(s + \omega_o)^2 (s + \omega_c)}, \end{aligned}$$

于是

$$\begin{aligned} y_f(t) &= \frac{\omega_c + \omega_o}{\omega_c - \omega_o} t e^{-\omega_o t} - \frac{2\omega_o}{(\omega_c - \omega_o)^2} e^{-\omega_o t} + \\ &= \frac{2\omega_o}{(\omega_o - \omega_c)^2} e^{-\omega_c t}. \end{aligned} \quad (10)$$

显然, $\lim_{t \rightarrow \infty} y_f(t) = 0$, 即: 总扰动为阶跃信号时, 其对输出的稳态影响为零. 根据式(9), 稳态时, 系统输出取决于设定值信号 y_r 以及总扰动被完全补偿时的理想闭环传递函数 $\frac{\omega_c}{s + \omega_c}$.

4 仿真研究 (Simulation studies)

通常, 处理污水时会将污水的进水变化率控制在一定范围内, 也就是说进水变化率不能太大, 否则会因保证出水水质而加大曝气量, 导致能耗增大, 出水水质也未必能够得到保证.

本文利用进水变化率控制溶解氧浓度. 通过设定曝气量的合理变化, 确定溶解氧浓度的设定值. 设计线性自抗扰控制确定进水变化率, 使溶解氧浓度达到设定值, 同时保证出水的底物浓度在允许范围之内.

与文献[6]选取相同的曝气量 $W(t)$ (如图5所示), 曝气量与溶解氧设定值之间的关系为^[6]

$$\text{DO}_{\text{sp}}(t) = 0.05 * W(t) + 3.25. \quad (11)$$

污水处理动力学方程的模型参数初值如表2所示。

表2 污水处理动力学模型参数初值

Table 2 Initial values of the wastewater treatment dynamic model

参数	$X(0)$	$S(0)$	$X_R(0)$	$DO(0)$
取值/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	210	27	400	6.87

设计二阶线性自抗扰控制。仿真中控制参数取值如表3所示。

表3 线性自抗扰控制参数取值

Table 3 Parameters of linear active disturbance rejection control

参数	ω_c	ω_o	b_0
取值	2	24	-20

为便于对比,加入溶解氧控制中常用的PID控制,其参数可依据文献[6]的PI参数整定规则,取为

$$K_P = 0.0466, K_I = -0.3034.$$

通过3组仿真实验,比较线性自抗扰与PID的控制效果、验证线性自抗扰控制估计和补偿总扰动的能力。

第I组实验 考虑进水底物浓度 S_{in} 为固定值($S_{in} = 200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)时的污水处理效果。

经线性自抗扰和PID控制的溶解氧浓度跟踪响应、出水底物浓度变化以及进水变化率分别如图6-8所示。

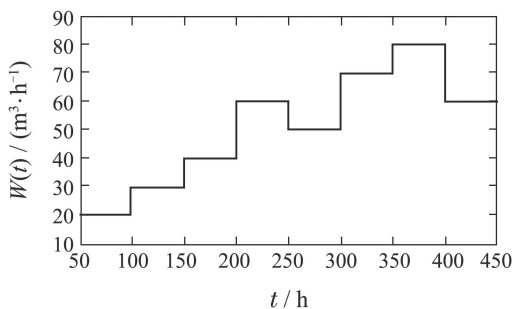


图5 曝气量设定值

Fig. 5 Setting values of the aeration rate

由图6至图8可知,与PID控制相比,线性自抗扰控制能够以较小的进水变化率获得更好的跟踪性能,并且能够保证出水底物浓度在最大允许值 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [6]范围内。

同时,图6也表明溶解氧浓度设定值不断变化时,线性自抗扰控制具有更好地适应设定值变化的能力。

第II组实验 进水底物浓度 S_{in} 变化时的污水处理效果。

考虑到污水的进水水质动态变化,仿真中假定进水底物浓度实时变化(进水底物浓度变化曲线如图9所示),考察LADRC的抗扰能力。

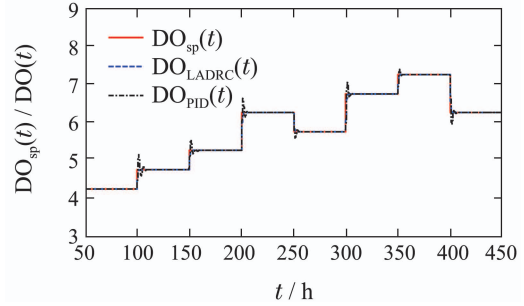


图6 溶解氧浓度变化

Fig. 6 Responses of the dissolved oxygen

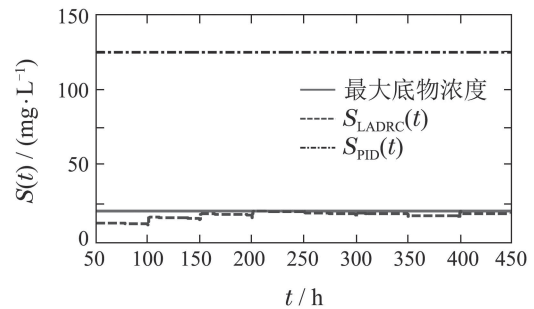


图7 出水底物浓度变化

Fig. 7 Responses of the effluent substrate

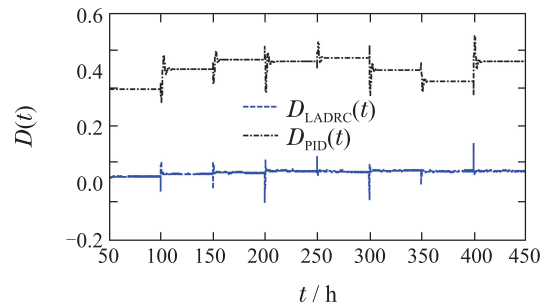


图8 进水变化率

Fig. 8 Dilution rate

从图9可知,进水浓度变化最大时达50%。仿真中,曝气量和溶解氧浓度设定值与第I组实验相同,保持线性自抗扰和PID控制参数不变。图10至图12分别给出了进水底物浓度变化时,经线性自抗扰和PID调节后的溶解氧浓度跟踪响应、出水底物浓度变化以及进水变化率的情况。

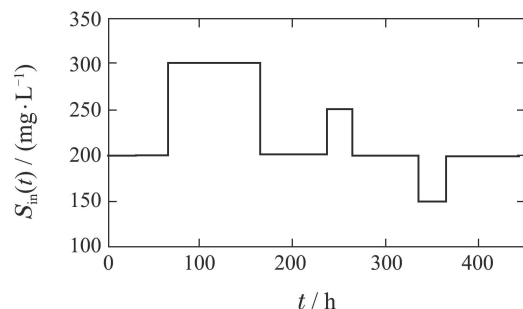


图9 进水底物浓度变化

Fig. 9 Variations of the influent substrate

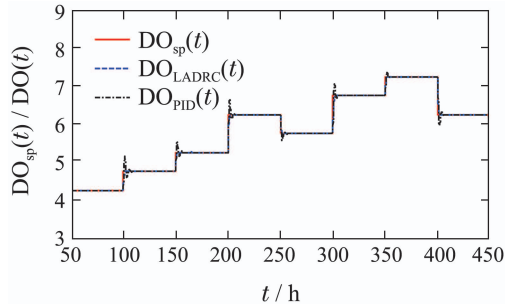


图 10 溶解氧浓度变化

Fig. 10 Responses of the dissolved oxygen

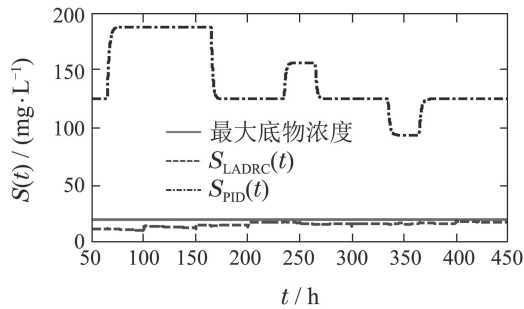


图 11 出水底物浓度变化

Fig. 11 Responses of the effluent substrate

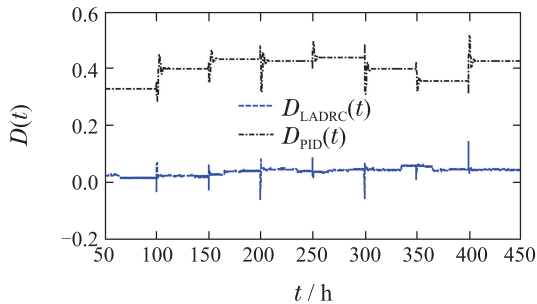


图 12 进水变化率

Fig. 12 Dilution rate

从图10至图12的仿真结果看,即使进水底物浓度波动较大,线性自抗扰控制仍可实时、准确地估计并补偿总扰动,实现以较小的进水变化率获得更好的溶解氧浓度跟踪效果,并保证出水底物浓度达标.这表明线性自抗扰控制具有很强的抗干扰能力.

第Ⅲ组实验 验证自抗扰控制对扰动的估计和补偿能力.

考察进水底物浓度 S_{in} 变化时的情形(S_{in} 变化如图9所示).扩张状态观测器对总扰动的估计效果、经控制量补偿后的模型近似效果分别如图13及图14所示.

从图13可见,总扰动信号可近似为分段阶跃扰动,线性扩张状态观测器可很好地估计之.

经线性自抗扰控制估计和补偿后,污水处理系统(5)近似为一个线性系统,其闭环传递函数为 $\frac{\omega_c}{s + \omega_c}$.图14表明,该线性系统在溶解氧浓度设定

值 $y_r = DO_{sp}$ 的作用下,其溶解氧浓度响应与同样的设定值作用下,污水处理系统(5)的溶解氧浓度响应几乎完全相同.这与第3.3.2节的抗扰性能分析结果一致.

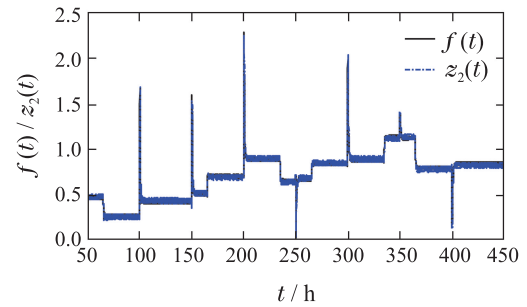


图 13 总扰动估计效果

Fig. 13 Estimation of the generalized disturbances

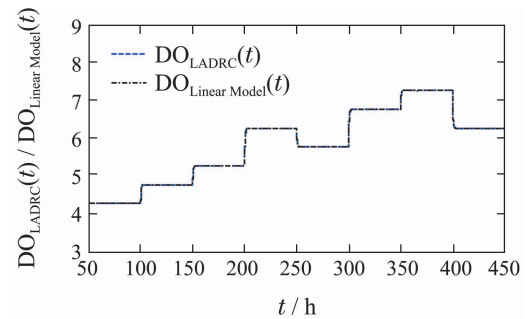


图 14 模型近似效果

Fig. 14 Model approximation

5 结论(Conclusions)

本文基于污水处理过程的非线性多变量控制模型,研究了溶解氧浓度的跟踪控制问题.在给定曝气量的前提下,确定溶解氧浓度设定值,以进水变化率为控制量,设计二阶线性自抗扰控制,实现了溶解氧浓度的跟踪和出水底物浓度的调节.仿真实验和理论分析均表明线性自抗扰控制能够应对进水水质波动,实现良好的溶解氧浓度跟踪控制,保证出水水质.

参考文献(References):

- [1] WANG Xi, WANG Zhan, YANG Wentao, et al. Shortage of water resources in China and countermeasures [J]. *Environmental Engineering*, 2014, 32(7): 1-5.
(王熹, 王湛, 杨文涛, 等. 中国水资源现状及其外来发展方向展望 [J]. *环境工程*, 2014, 32(7): 1-5.)
- [2] PENG Yongzhen. *Biological Nitrogen Removal, Phosphorus Removal of Waste Water by SBR Approach and Its Process Control* [M]. Beijing: Science Press, 2011.
(彭永臻. *SBR法污水生物脱氮除磷及过程控制* [M]. 北京: 科学出版社, 2011.)
- [3] CARLOS A C B, RUI A M A, JORGE A C L. Dissolved oxygen control of the activated sludge wastewater treatment process using stable adaptive fuzzy control [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2012, 37(10): 152-162.
- [4] ZHANG Rongbing, BAO Haipeng, BAI Xue, et al. Application of aeration volume control system to stable operation and energy saving optimization of A^2/O process [J]. *China Water & Wastewater*, 2012,

- 28(12): 71 – 74.
(张荣兵, 鲍海鹏, 白雪, 等. AVS系统在 A^2/O 工艺稳定运行及节能优化中的应用 [J]. 中国给水排水, 2012, 28(12): 71 – 74.)
- [5] AMAND L, CARLSSON B. Optimal aeration control in a nitrifying activated sludge process [J]. *Water Research*, 2012, 46(7): 2101 – 2110.
- [6] VLAD C, SBARCIOG M, BARBU M, et al. Indirect control of substrate concentration for a wastewater treatment process by dissolved oxygen tracking [J]. *Control Engineering and Applied Informatics*, 2012, 14(1): 37 – 47.
- [7] VILANOVA R, KATEBIR, ALFARO V. Multi-loop PI-based control strategies for the activated sludge process [C] // *Proceedings of IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation*. Palma de Mallorca, Spain: IEEE, 2009: 1 – 8.
- [8] JIANG Yunwei, WANG Xiaoyi, WEI Wei, et al. Research of sewage treatment control method based on anti-disturbance and fuzzy PID [J]. *Computers and Applied Chemistry*, 2013, 30(7): 748 – 752.
(蒋耘玮, 王小艺, 魏伟, 等. 基于抗扰动模糊PID的污水处理控制方法研究 [J]. 计算机与应用化学, 2013, 30(7): 748 – 752.)
- [9] QIAO Junfei, FU Wentao, HAN Hongui. Dissolved oxygen control method based on self-organizing T-S fuzzy neural network [J]. *CI-ESC Journal*, 2016, 67(3): 960 – 966.
(乔俊飞, 付文韬, 韩红桂. 基于SOTSFNN的溶解氧浓度控制方法 [J]. 化工学报, 2016, 67(3): 960 – 966.)
- [10] ZHOU Hongbiao. Dissolved oxygen control of wastewater treatment process using self-organizing fuzzy neural network [J]. *CIESC Journal*, 2017, 68(4): 1516 – 1524.
(周红标. 基于自组织模糊神经网络的污水处理过程溶解氧控制 [J]. 化工学报, 2017, 68(4): 1516 – 1524.)
- [11] RAINIER H, NICOLAS R, BRQHIM B. Multi-objective optimal control of small-size wastewater treatment plants [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015, 102(10): 345 – 353.
- [12] ABOUZLAM M, OUVARARD R, MEHDI D. An optimal control of a wastewater treatment reactor by catalytic ozonation [J]. *Control Engineering Practice*, 2013, 21(1): 105 – 112.
- [13] PIMENTEL G A, RAPAPORT A, WOUWER A V. Nonlinear model predictive control of a wastewater treatment process fitted with a submerged membrane bioreactor [C] // *Proceedings of International Symposium on Advanced Control of Chemical Process*. Whistler, British Columbia, Canada: Elsevier, 2015: 1246 – 1251.
- [14] MULAS M, TRONCI S, CORONA F, et al. Predictive control of an activated sludge process: an application to the Viikinmäki wastewater treatment plant [J]. *Journal of Process Control*, 2015, 35(11): 89 – 100.
- [15] YANG T, QIU W, MA Y. Fuzzy model-based predictive control of dissolved oxygen in activated sludge processes [J]. *Neurocomputing*, 2014, 136(7): 88 – 95.
- [16] WANG X, RATNAWEERA H, ABDULLAH J, et al. Statistical monitoring and dynamic simulation of a wastewater treatment plant: a combined approach to achieve model predictive control [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 193(5): 1 – 7.
- [17] SANTÍN I, PEDRET C, VILANOVA R, et al. Advanced decision control system for effluent violations removal in wastewater treatment plants [J]. *Control Engineering Practice*, 2016, 49(4): 60 – 75.
- [18] HAN H G, QIAN H H, QIAO J F. Nonlinear multiobjective model-predictive control scheme for wastewater treatment process [J]. *Journal of Process Control*, 2014, 24(3): 47 – 59.
- [19] NEJJARI F, DAHOU B, BENHAMMOU A, et al. Nonlinear multivariable adaptive control of an activated sludge wastewater treatment process [J]. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 1999, 13(5): 347 – 365.
- [20] GAO Zhiqiang. On the problem of information in engineering cybernetics [J]. *Journal of Systems Science and Mathematical*, 2016, 36(7): 908 – 923.
(高志强. 浅谈工程控制的信息问题 [J]. 系统科学与数学, 2016, 36(7): 908 – 923.)
- [21] HAN Jingqing. Auto-disturbances-rejection controller and its applications [J]. *Control and Decision*, 1998, 13(1): 19 – 23.
(韩京清. 自抗扰控制器及其应用 [J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19 – 23.)
- [22] GAO Zhiqiang. On disturbance rejection paradigm in control engineering [C] // *Proceedings of the 29th Chinese Control Conference*. Beijing: IEEE, 2010: 6071 – 6076.
(高志强. 控制工程的抗扰范式 [C] // 第29届中国控制会议论文集. 北京: IEEE, 2010: 6071 – 6076.)
- [23] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning [C] // *Proceedings of American Control Conference*. Denver Colorado, USA: IEEE, 2003: 4989 – 4996.
- [24] TANG Decui, GAO Zhiqiang, ZHANG Xuhong. Design of predictive active disturbance rejection controller for turbidity [J]. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(1): 102 – 108.
(唐德翠, 高志强, 张绪红. 浊度大时滞过程的预测自抗扰控制器设计 [J]. 控制理论与应用, 2017, 34(1): 102 – 108.)
- [25] LI Yi, CHEN Zhengqiang, SUN Minwei, et al. Attitude control for quadrotor helicopter based on discrete-time active disturbance rejection control [J]. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(11): 1470 – 1477.
(李毅, 陈增强, 孙明玮, 等. 离散型自抗扰控制器在四旋翼飞行姿态控制中的应用 [J]. 控制理论与应用, 2015, 32(11): 1470 – 1477.)
- [26] CHEN Zhengqiang, LI Yi, YUAN Zhuzhi, et al. Attitude control of tandem rotor helicopter based on cascade active disturbance rejection control [J]. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(9): 1219 – 1225.
(陈增强, 李毅, 袁著祉, 等. 串级自抗扰控制器在纵列式双旋翼直升机飞行姿态控制中的应用 [J]. 控制理论与应用, 2015, 32(9): 1219 – 1225.)
- [27] SHI Rongqi, HE Tianqi, PENG Jie, et al. System design and control for waste heat recovery of automotive engines based on organic rankine cycle [J]. *Energy*, 2016, 102(5): 276 – 286.
- [28] ZHENG Q, GAO Z Q. Active disturbance rejection control: between the formulation in time and the understanding in frequency [J]. *Control Theory and Technology*, 2016, 14(3): 250 – 259.
- [29] SHAO S, GAO Z Q. On the conditions of exponential stability in active disturbance rejection control based on singular perturbation analysis [J]. *International Journal of Control*, 2016, 9(2): 1 – 13.
- [30] WEI W, ZHANG W C, LI D H, et al. On the stability of linear active disturbance rejection control: virtual equivalent system approach [C] // *Proceedings of Chinese Intelligent System Conference*. Yangzhou, China: Springer, 2015: 295 – 306.

作者简介:

魏伟 (1984–), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 目前研究方向为抗干扰控制及应用、精密定位系统的控制等, E-mail: weiweizdh@126.com;

左敏 (1973–), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 目前研究方向为智能控制与智能管理, E-mail: zuomin1234@163.com;

李伟 (1990–), 女, 硕士, 目前研究方向为污水处理的抗扰控制, E-mail: 18817384459@163.com;

王小艺 (1975–), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 目前研究方向为水处理过程管理与控制, E-mail: sdwangxy@163.com;

刘载文 (1954–), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为水处理过程智能检测与优化控制, E-mail: liuzw@th.btbu.edu.cn.