

变参数活性污泥系统的最优鲁棒控制法

冯裕钊, 龙腾锐, 郭劲松, 庞煜
(重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

摘要: 利用改进的 Riccati 方程设计不确定参数的污水处理控制系统, 提出了一种设计新方法, 并在某小型污水处理厂进行了数字仿真分析, 结果表明用该方法设计的 LOC (Linear Optimal Controller) 具有良好的动态品质、抗冲击负荷强, 提高了控制系统对参数变化的鲁棒性。

关键词: 活性污泥系统; 最优控制; 参数不确定; 鲁棒性

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2003)03-0014-03

Optimal Robustness Control Method of Activated Sludge System Based on Uncertain Parameters

FENG Yu-zhao, LONG Teng-rui, GUO Jin-song, PANG Yu

(School of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The modified Riccati Equation was used to design wastewater treatment system based on uncertain parameters, and then a new design method - optimal robustness control method was proposed. The method was tested with the digital simulation analysis in a small-scale wastewater treatment plant. The results showed that LOC (Linear Optimal Controller) designed by the method has good dynamic characteristics and strong adaptability to shock load, and thus improves insensitivity of the control system to the change of parameters.

Key words: activated sludge system; optimal control; uncertain parameter system; robustness

1 系统模型

对图 1 所示的活性污泥法污水处理系统作如下假设^[1,2]:

微生物为非自养微生物, 其生长率大于死亡率并满足 Monod 方程;

二沉池无生化反应发生;

回流污泥影响污泥龄和产率系数;

进水生物量 $X_i = 0$, 完全沉淀后的生物量 $X_e = 0$;

有机底物的饱和常数 $K_s \ll S$;

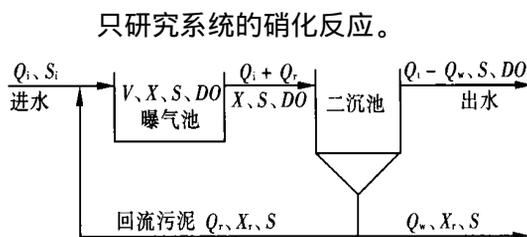


图 1 活性污泥污水处理系统的流程
在上述假设条件下, 根据物料平衡定律得到活性污泥系统正则状态方程:

基金项目: 国家自然科学基金重点课题 (59838300); 国家自然科学基金资助项目 (50178069)

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= \left(u_H - k_d - \frac{CO_w}{V} \right) X + DO \\ \frac{dS}{dt} &= \frac{u_H}{Y_{NH}} X - \frac{Q}{V} S + \frac{Q}{V} S_i \\ \frac{dDO}{dt} &= \frac{u_H(1 - ff_x Y_{NH}) - ff_x Y_{NH} k_d}{fY_{NH}} X - DO + O_t \end{aligned} \quad (1)$$

通过这组方程将非线性系统表达成了线性状态方程,方程中各符号的物理意义参见文献[2]。为充分考虑反应器中氧的生化反应作用,对溶解氧设置一冲量系数。

定义:一类参数不确定系统——具有不确定参数且任一不确定参数有界的系统。

在这一定义下方程(1)又可表示为:

$$X(t) = A(t) X(t) + B(t) u(t) \quad (2)$$

其中: $X(t) = [X(t), S(t), DO(t)]^T$

$$A(t) = \begin{bmatrix} u_H - k_d - \frac{CO_w}{V} & 0 \\ \frac{u_H}{Y_{NH}} & -\frac{Q}{V} & 0 \\ \frac{u_H(1 - ff_x Y_{NH}) - ff_x Y_{NH} k_d}{fY_{NH}} & 0 & - \end{bmatrix}$$

$$B(t) = [0 \quad QS_i/V \quad O_t]^T$$

在上述矩阵中,各参数均与污水处理厂的运行工况有关,具有很大的不确定性,有些参数在不同温度下会产生成倍的变化。根据上述一类参数不确定系统的定义,假设:

$$\begin{aligned} u_H - k_d - \frac{CO_w}{V} & [1_{min}, 1_{max}] \\ \frac{u_H}{Y_{NH}} & [2_{min}, 2_{max}] \\ \frac{Q}{V} & [3_{min}, 3_{max}] \\ \frac{u_H(1 - ff_x Y_{NH}) - ff_x Y_{NH} k_d}{fY_{NH}} & [4_{min}, 4_{max}] \\ \frac{QS_i}{V} & [5_{min}, 5_{max}] \\ O_t & [6_{min}, 6_{max}] \end{aligned}$$

$i_{min}, i_{max} (i = 1, 2, \dots, 6)$ 表示对应参数的下

界、上界。

2 ASWTORC 设计

在上述分析的基础上,提出活性污泥法污水处理工艺的最优鲁棒控制 ASWTORC (Activated Sludge

Wastewater Treatment Optimal Robust Control) 设计方法。鲁棒控制是 20 世纪 90 年代初自动控制领域提出的一种设计方法,在污水处理控制系统中鲁棒性是指污水处理系统在不确定参数变化扰动下系统具有某种性能指标不变的能力,即控制系统对参数在设定范围内变化的不敏感性。

2.1 系统的不确定性描述

在式(2)中系数矩阵为时变系数矩阵,为了对其时变性进行表述,令:

$$A(t) = A_0 + \Delta A$$

$$B(t) = B_0 + \Delta B$$

故式(2)改写为:

$$X(t) = (A_0 + \Delta A) X(t) + (B_0 + \Delta B) u(t) \quad (3)$$

A_0, B_0 为系统额定运行时的参数矩阵,一般为“下界、上界”参数采用“折衷法”求取,由于考虑了系统参数的不确定性,不确定性参数表示为:

$$\Delta A = \sum_{i=1}^2 A_i r_i(t) \quad (4)$$

$$\Delta B = \sum_{i=1}^2 B_i r_i(t) \quad (5)$$

A_i, r_i 为常数矩阵, $r_i(t) \in [-1, 1]$, $r_i(t)$

r_i (凭经验而定)。

2.2 鲁棒性设计

设采用的线性反馈控制规律为:

$$u(t) = -KX(t) \quad (6)$$

定义下列等式:

$$A_i = d_i e_i^T \quad (7)$$

$$T = \sum_{i=1}^2 r_i d_i^T \quad (8)$$

$$U = \sum_{i=1}^2 e_i e_i^T \quad (9)$$

d_i, e_i 为常矢量。引进修正因子 α 可构成改进的 Riccati 代数方程:

$$PA_0 + A_0^T P - P \{ \frac{2}{\alpha} (1 - \alpha) B_0 R^{-1} B_0^T - \frac{1}{T} \} P + (U + Q) = 0 \quad (10)$$

其中 $Q = \text{diag}(q)$, $R = \text{diag}(1)$, $\alpha > 0$, 这些参数由设计者确定。利用 Riccati 方程求解 P 矩阵,则鲁棒最优反馈系数矩阵:

$$K^* = \frac{1}{\alpha} R^{-1} B_0^T P \quad (11)$$

2.3 设计步骤

确定系统参数的值域 $[i_{min}, i_{max}]$;

求取额定运行系数矩阵 A_0, B_0 ;

选取权阵 R 、 Q 和设计常数 ;
 用式(10)求 Riccati 方程的解 P 矩阵;
 用式(11)求出鲁棒最优反馈系数矩阵

K^* 。

3 实例与数字仿真

某污水处理厂为二级处理,采用图 1 所示的处理工艺,处理能力为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。根据污水处理厂性质和文献[1]的动力学参数,确定该污水处理厂各参数的上、下界为:

$$\begin{aligned} [1_{\min}, 1_{\max}] &= [2.9495, 5.9495] \\ [2_{\min}, 2_{\max}] &= [9.0634, 18.1296] \\ [3_{\min}, 3_{\max}] &= [-10.05, -6.05] \\ [4_{\min}, 4_{\max}] &= [4.9364, 9.9436] \\ [5_{\min}, 5_{\max}] &= [0.012, 0.142] \\ [6_{\min}, 6_{\max}] &= [12.8572, 19.4732] \end{aligned}$$

冲量系数取值恒为 1,故

$$A_0 = \begin{bmatrix} 4.4495 & 0 & 1 \\ 13.5952 & -8.05 & 0 \\ 7.4414 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$B_0 = [0, 0.077, 16.1652]$$

选定 $\lambda = 1$, $Q = \text{diag}[1, 100, 1000]$, $R = \text{diag}[1, 1, 1]$, $r_i(t) = \bar{r} = 1$, $\gamma(t) = 0.3$,通过式(6)~式(11)求得最优反馈系数矩阵:

$$K^* = [286.9785 \quad 0.2162 \quad 33.1138]$$

求出最优反馈矩阵后对反应器底物浓度和溶解氧浓度进行了仿真(见图 2、3)。

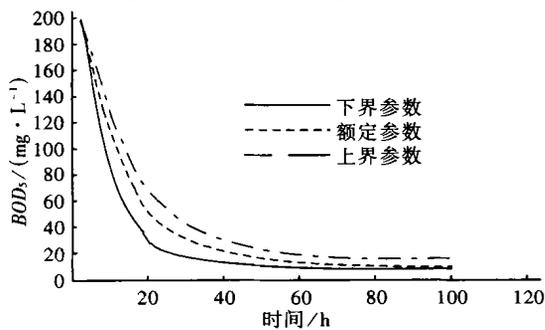


图 2 底物浓度随时间的变化

由图 2 可以看出,系统启动运行 2 d 后出水 $BOD_5 < 20 \text{ mg/L}$,此后系统出水水质处于稳定状态,在控制系统作用下不确定参数的变化对水质几乎无影响,即使处于上界参数也能保证出水 $BOD_5 < 20 \text{ mg/L}$ 。

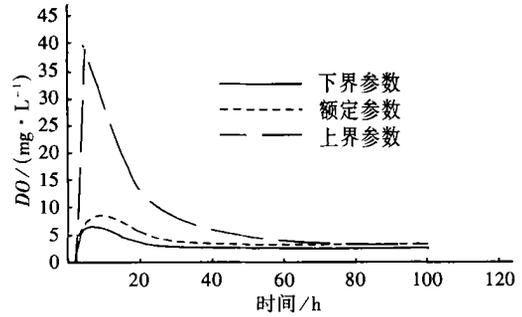


图 3 溶解氧浓度随时间的变化

由图 3 可见,取上界参数时在系统启动初期溶解氧浓度较高,其原因是进水量的增大使溶解氧急剧增加,随着系统的运行则溶解氧急剧下降,运行 2 d 后溶解氧浓度处于稳定状态,保证了反应器内微生物代谢所需的溶解氧量。

从上述二组仿真曲线看,控制系统对系统参数的变化不敏感,较好地体现了所设计的 LOC 的强鲁棒性。

4 结论与建议

在一定假设条件下,将活性污泥系统非线性数学模型转变为正则的状态方程,同时引进冲量系数使溶解氧在生化反应中的作用进一步强化。

试验中对污泥回流仅按与进水量的比例进行控制,如何将影响出水水质和经济运行的诸多因素(特别是进水量、水质)纳入全状态反馈控制中则有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 许保玖,龙腾锐.当代给水与废水处理原理[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [2] Edgar N, Sanchez, et al. Minimal PD fuzzy control of a wastewater treatment plant[A]. Proc of the 15th IEEE International Symposium on Intelligent Control (ISIC2000) [C]. 2000.

作者简介:冯裕钊(1965 -),男,四川射洪人,副教授,博士研究生,研究方向为现代控制理论在污水处理技术中的应用。

电话:(023)68599146

E-mail:johnfeng@cta.cq.cn

收稿日期:2002-08-30