

# 溶解氧大时滞控制过程预测优选策略应用研究\*

张 堃<sup>1,2</sup>, 吴建国<sup>1</sup>, 陈伟峰<sup>1</sup>, 张培建<sup>1</sup>, 费敏锐<sup>3</sup>

(1. 南通大学电气工程学院 南通 226007; 2. 南通先进通信技术研究院 南通 226007;  
3. 上海大学机电工程与自动化学院 上海市电站自动化技术重点实验室 上海 210053)

**摘要:**针对污水溶解氧浓度这类大时滞有自衡过程的控制问题,提出了一种基于曲线拟合直接预测被控变量和采用专家控制,以及优选法搜索目标控制量相结合的控制策略。通过最小二乘法对在线采集的数据进行曲线拟合,以得出延迟 $\tau$ 时间后的被控变量预测值,专家控制快速逼近目标控制量的区间,然后再采用基于黄金分割点的优选法快速逼近目标控制量。这种预测优选法控制策略是按照被控变量的预测值来确定控制量。有自衡过程的设定值一旦确定,目标控制量也相应确定,预测优选法控制策略就是快速搜索目标控制量。仿真和工程模拟试验结果均表明:针对这类大时滞有自衡过程,该控制策略可以实现有效控制,系统调节时间较专家控制提高50%,目标偏差可控制在1%以内。

**关键词:**污水;溶解氧浓度;大时滞;直接预测;优选法

中图分类号: TP273 TH86 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.80

## Investigation of optimal prediction strategies for large time delay control process of dissolved oxygen

Zhang Kun<sup>1,2</sup>, Wu Jianguo<sup>1</sup>, Chen Weifeng<sup>1</sup>, Zhang Peijian<sup>1</sup>, Fei Minrui<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong 226007, China; 2. Nantong Research Institute for Advanced Communication Technologies, Nantong 226007, China; 3. Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology, School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 210053, China)

**Abstract:** To deal with the long delayed control process of dissolved oxygen in sewage, a control strategy is proposed by combining directly predicting variables based on curve fitting and directly searching for optimization control variables. This proposed method uses a least square algorithm to fit the online data and obtains the predictive values after  $\tau$  time delay. An optimization method based on the golden section points is used to determine the boundary of the target control variables. The search interval length is gradually reduced till the target control target is reached. Simulation and experimental results show that the proposed control strategy is more effective and efficient for control process of a large time delay. Comparing with traditional method like expert control, the proposed approach can improve convergence accuracy up to 50% and can be used to control the target to  $\pm 1\%$ .

**Keywords:** sewage; dissolved oxygen concentration; large time delay; direct prediction; optimum seeking

## 0 引 言

目前,活性污泥法已普遍运用于污水处理中。活性污泥法是指在曝气的作用下,利用存活在活性污泥上微生物的氧化和絮凝等作用,分解并去除污水中的有机污

染物<sup>[1]</sup>。通常通过测定污水中的游离氧浓度即溶解氧(DO)浓度来科学分配曝气量。DO浓度是衡量水体净化能力的一个指标,其值过高或过低都会影响微生物的代谢活动、降低污水处理效果。其值过高会加速消耗污水中的有机物质,导致活性污泥的絮凝和吸附能力下降;过低又会影响微生物正常代谢活动,出现污泥腐化、膨胀,

影响出水水质<sup>[2-3]</sup>。污水处理是一个大时间常数、大时滞、时变的工业控制过程,其内部机理错综复杂,其被控对象的数学模型难以精确建立,在运用传统控制算法进行控制时,普遍存在 DO 超调量大、精度低、抗干扰性差等问题,导致污水厂的出水水质不够理想<sup>[4-6]</sup>。

近年来,污水排放标准不断提高,常规控制算法已难以满足控制要求,因而越来越多的智能控制算法被应用于污水处理当中。Holenda B 等人<sup>[7]</sup>提出采用模型预测控制实现 DO 浓度的跟踪控制,并验证了该算法的可行性,但传统模型预测控制(model prediction control, MPC)预测模型难以精确建立<sup>[8]</sup>,而智能 MPC 建模以及训练耗时长<sup>[9-11]</sup>,并且参数由离线获得,与实际系统仍然存在辨识误差;Belchior C. A. C. 等人<sup>[12]</sup>提出结合监督模糊控制和自适应模糊控制的跟踪控制策略,从而实现 DO 浓度的精准控制,但其设计缺乏系统性,并且自学习能力有限;张爱娟等人<sup>[13]</sup>提出利用专家规则对进水 DO 浓度进行提前控制,然后通过模糊 PID 进行闭环反馈控制的前馈-反馈组合控制策略,提高了系统的动态和稳态性能,但其依然存在规则间关系不透明、搜索效率低等问题<sup>[14]</sup>;张伟等人<sup>[15]</sup>提出由自组织神经网络控制器和补偿器组成的直接自适应动态神经网络控制方法并通过国际基准仿真模型进行了研究,但其收敛速度慢并且实现复杂<sup>[16]</sup>,针对 PLC 等通用控制器难以适用。

针对上述情况,提出了一种新型预测控制策略。该控制策略适用于具有纯滞后的一阶惯性环节的被控过程,该被控过程的特点是,稳态时控制量趋于常值。通过在线采集被控变量实际值,采用加权最小二乘法对所测数据进行曲线拟合,得出拟合函数后求出迟延  $\tau$  时间后的被控变量预测值,用此预测值代替被控变量当前值与设定值进行比较,从而校正控制量,而控制量则是根据专家经验选取一控制量初始置信区间,通过 0.618 和 0.382 这两个黄金分割系数从初始置信区间中交替选取相应的控制量作用于被控对象上,根据被控变量与其设定值的超调关系确定搜索区间边界,从而逐步缩短目标控制量搜索区间长度,直至寻找到使系统稳定在设定值时对应的目标控制量。

## 1 污水曝气过程动态模型的建立

由于活性污泥法污水处理过程内部机理复杂,无法精确建立其数学模型,只能依据历史和经验数据作近似处理建立其近似模型,假设条件如下。

假设 1:曝气过程在空间上混合充分,时间上推流均匀;

假设 2:同一周期内,污水池中生物总量近似不变;

假设 3:反应期内反应速率近似不变;

假设 4:上一周期的出水浓度近似等于原水浓度。

依据 DO 浓度的物料平衡公式<sup>[17]</sup>: DO 浓度变化量 = DO 输入量 - DO 输出量 - DO 消耗量。

可建立如下动态模型:

$$V \frac{dC}{dt} = QC_0 - QC_1 - VkC \quad (1)$$

式中:  $V$  为污水池容积,  $k$  为反应速率常量,  $Q$  为空气流量,  $C_0$  为曝气空气的 DO 浓度,  $C_1$  为尾气 DO 浓度,  $C$  为污水池中的 DO 浓度。

对式(1)作拉式变换得到 DO 浓度比空气流量的传递函数:

$$G(s) = \frac{(C_0 - C_1)}{V(s + k)} = \frac{(C_0 - C_1)/(Vk)}{(1/k)s + 1} \quad (2)$$

根据上述假设条件,令  $(C_0 - C_1)/(Vk) = K$ ,  $1/k = T$ ,则式(2)变为一阶惯性环节:

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} \quad (3)$$

污水溶解氧的过程具有大时滞特点,氧气溶解于液体需一定的滞后时间,DO 浓度的检测同样具有滞后特性。为此,用纯滞后时间  $\tau$  来表示滞后环节并对以上模型进行修正,则修正后的曝气过程动态近似模型为:

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s} \quad (4)$$

由此可见,污水溶解氧的控制过程属于具有纯滞后的一阶惯性环节。该被控过程为工业生产过程中的常见过程。当纯滞后时间  $\tau$  与对象时间常数  $T$  的比值  $\tau/T > 0.5$  时称之为大时滞过程,对应的对象称为大纯滞后对象,采用常规控制算法进行控制时普遍存在超调量大、波动大、稳定时间长甚至发散的情况<sup>[18]</sup>。污水溶解氧过程  $\tau/T > 0.5$ ,显然属于大时滞过程。

## 2 污水溶解氧控制策略

针对具有纯滞后的一阶惯性环节这种有自衡的大时滞过程,在设计中采用了“宏微”控制思想,即在系统初始控制阶段实际值与目标值偏差较大时进行最大控制量调整,以迅速缩小实际值与目标值的偏差,然后切换到优选法进行最终稳定调整。系统调节包括快速调节和稳定调节两个阶段。其中快速调节阶段采用专家控制,而稳定调节阶段采用黄金分割优选法直接搜索目标控制量。此外,在控制时用基于曲线拟合直接预测得到的被控变量的预估值来代替实际测量值进行控制,从而减弱时滞和非线性等因素带来的影响。考虑到专家控制技术比较成熟以及篇幅的因素,这里重点介绍基于曲线拟合的直接预测控制以及基于黄金分割的预测优选法。

## 2.1 基于曲线拟合的直接预测控制

### 2.1.1 基于曲线拟合的直接预测控制的方法

对于具有纯滞后的一阶惯性环节的被控对象,滞后时间  $\tau$  是影响其控制性能的主要参数<sup>[19]</sup>。受此参数影响,被控变量当前的测量值  $x(i)$  是延迟  $\tau$  时间前对应控制量  $u(i - \tau)$  的控制结果,而当前的控制量  $u(i)$  的控制结果为延迟  $\tau$  时间后的状态  $x(i + \tau)$ ,它们对应的关系为  $u(i - \tau) \rightarrow x(i)$  或  $u(i) \rightarrow x(i + \tau)$ 。

常规控制策略是根据当前被控变量的实测值  $x(i)$  即延迟  $\tau$  时间前的控制量  $u(i - \tau)$  的控制结果,与设定值进行比较后得到的结果来修正当前的控制量  $u(i)$ ,从而控制延迟  $\tau$  时间后的状态  $x(i + \tau)$ 。这种控制量  $u(i)$ 、被控变量测量值  $x(i)$  和产生控制效果时间点的不对应性导致系统的控制性能变差。

为了消除这种影响,需要采用预估的思想。由于被控对象内部机理很复杂,一般难以建立被控对象的精确数学模型,并且所建立近似模型的结构和参数由离线获得,具有开环控制的特点,与实际运行状况仍然存在着辨识误差。为此,更加直接的在线、闭环的预测方式是直接利用已经采集到的数据,  $x(0), x(-1), \dots, x(-m)$ ,  $x(0)$  为当前测量值,  $x(-m)$  为  $m$  时刻前的测量值) 进行曲线拟合,从而得到延迟时间  $\tau$  后的被控变量预测值,用预测值代替当前测量值来校正当前控制量。它的特点是直接根据在线测得数据的变化趋势预测未来值,它只对控制量及其产生控制效果的时间不对应性进行校正,并没有替代系统原控制策略,而是对原控制策略的完善和补充。其结构如图 1 所示,其中开关连接 1 点时为常规控制,连接 2 点时为预测控制。

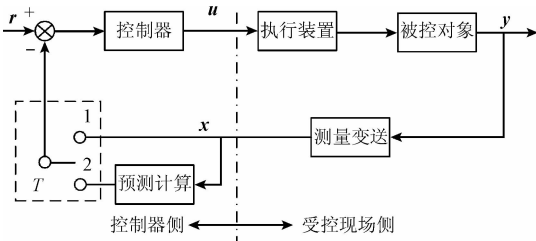


图 1 直接预测控制结构

Fig. 1 Schematic diagram of direct predictive control

直接预测策略的核心就是依据误差准则得到最优拟合函数  $x^*(i)$ , 最终得到被控变量的预测值  $x^*(\tau)$ 。设采样周期  $T = 1$ , 被控变量测量值为  $x(i) (i = 0, -1, -2, \dots, -m)$ , 将这  $m + 1$  个数据记作  $x_i$ , 这些数据由在线测得, 并且不断滚动更新。1) 当  $i = 0$  时,  $x^*(0)$  为当前滤波估值; 2) 当  $i = \tau$  时,  $x^*(\tau)$  为延迟  $\tau$  时间后的预估值也就是直接预测控制所需的预测值; 3) 当  $0 < i < \tau$  时,  $x^*(i)$  是中间估值。测量误差  $\delta_i = x^*(i) - x_i (i =$

$0, -1, -2, \dots, -m)$ , 由于实际测量当中  $x(i)$  存在测量误差, 因此  $x(i)$  无需与实测值  $x_i$  重合, 只需满足误差的平方和即范数  $\|\delta\|$  最小。这里采用基于正交多项式的加权最小二乘法进行曲线拟合操作, 具体的拟合方法是: 根据  $i = 0, -1, -2, \dots, -m$  这  $m + 1$  个实测值  $(x_i, i)$ , 在函数簇  $\varphi = \{\varphi_0, \varphi_1, \varphi_0, \dots, \varphi_n\}$  中寻找最优函数  $x^*(i) = S^*(i)$ , 使得如下范数  $\|\delta\|$  的值最小<sup>[20]</sup>:

$$\|\delta\| = \sum_{i=0}^m \delta_i^2 \rightarrow \min_{\varphi_i \in \varphi} \sum_{i=0}^m \{S(i) - x_i\}^2 = \sum_{i=0}^m \{S^*(i) - x_i\}^2 \quad (5)$$

其中,

$$S^*(i) = a_0\varphi_0(i) + a_1\varphi_1(i) + \dots + a_n\varphi_n(i) \quad (6)$$

式中:  $n$  为函数  $x^*(i) = S^*(i)$  的次数且  $n < m$ 。函数簇  $\varphi$  取自正交多项式  $P_k$  族,  $P_k(t)$  为  $k$  次正交多项式且首项系数为 1<sup>[21-22]</sup>, 由如下递推公式表示:

$$\begin{cases} P_0(t) = 1 \\ P_1(t) = (t - \alpha_1)P_0(t) \\ P_{k+1}(t) = (t - \alpha_{k+1})P_k(t) - \beta_k P_{k-1}(t) \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $k = 1, 2, 3, \dots, n - 1$ 。根据  $P_k(t)$  的正交性, 得:

$$\begin{cases} \alpha_{k+1} = \frac{\sum_{i=0}^{-m} \omega_i t_i P_k^2(t_i)}{\sum_{i=0}^{-m} \omega_i P_k^2(t_i)} \\ \beta_k = \frac{\sum_{i=0}^{-m} \omega_i P_k^2(t_i)}{\sum_{i=0}^{-m} \omega_i P_{k-1}^2(t_i)} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\omega_i$  为权系数, 一般选取  $\sum_{i=0}^{-m} \omega_i = 1$ 。在求取多项式  $P_k(t)$  的同时, 计算式(6)的预测函数的系数:

$$a_k = \frac{\sum_{i=0}^{-m} \omega_i x_i P_k(t_i)}{\sum_{i=0}^{-m} \omega_i P_k^2(t_i)} \quad (9)$$

式中:  $k = 1, 2, 3, \dots, n$ 。最后求出拟合函数, 当  $i > 0$  时, 通过  $x^*(i) = S^*(i)$  函数就可求出相应的预估值。

### 2.1.2 直接预测控制在污水溶解氧控制中的实现

在利用上述控制策略实现污水 DO 浓度控制时, 需要注意以下 4 个方面问题。

1) 预测函数的选取: 综合考虑控制的高效性和预测的精确性, 这里选用二次型预测函数, 其函数形式为:

$$x^*(i) = a_0 P_0(t) + a_1 P_1(t) + a_2 P_2(t) \quad (10)$$

因为  $n = 2$ , 所以取 5 ~ 8 个数据已经足够预测计算, 其中  $P_k$  为:

$$\begin{cases} P_0 = 1 \\ P_1 = t - \alpha_1 \\ P_2 = (t - \alpha_1)(t - \alpha_2) - \beta_1 \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $\alpha_1, \alpha_2$  和  $\beta_1$  分别为:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \sum_{i=0}^{-m} \omega_i t_i \\ \alpha_2 = \frac{\sum_{i=0}^{-m} \omega_i t_i (t_i - \alpha_1)^2}{\sum_{i=0}^{-m} \omega_i (t_i - \alpha_1)^2} \\ \beta_1 = \sum_{i=0}^{-m} \omega_i (t_i - \alpha_1)^2 \end{cases} \quad (12)$$

从而得到了  $k = 0, 1, 2$  的正交多项式  $P_k$ , 再根据式(9)计算  $a_0, a_1$  和  $a_2$ , 它们分别为:

$$\begin{cases} a_0 = \sum_{i=0}^{-m} \omega_i t_i \\ a_1 = \sum_{i=0}^{-m} \omega_i t_i (t_i - \alpha_1) / \sum_{i=0}^{-m} \omega_i (t_i - \alpha_1)^2 \\ a_2 = \sum_{i=0}^{-m} \omega_i t_i [(t_i - \alpha_1)(t_i - \alpha_2) - \beta_1] / \sum_{i=0}^{-m} \omega_i [(t_i - \alpha_1)(t_i - \alpha_2) - \beta_1]^2 \end{cases} \quad (13)$$

从而得到了式(10)的预测函数  $x^*(i)$ , 最后再进行预测。

2) 权系数  $\omega_i$  的选择: 权系数分为等权系数和非等权系数 2 种。等权系数指平等地看待所测数据, 非等权系数则更看重最新测量的数据。因污水溶解氧控制过程具有不确定性等特点, 这里选择非等权系数, 更注重采用最新几个测量数据进行预测。

3) 预测时机: 由于污水处理过程存在纯滞后时间  $\tau$ , 当前控制量的控制效果在迟延  $\tau$  时间后才能显现, 所以在实际控制当中每当控制量发生变化时需保持  $\tau$  时间后再进行预测计算, 为了减小延时带来的影响, 在控制时 also 需借助常规控制思想进行辅助判断, 即如图 1 所示那样, 需要在常规控制和预测控制中相互切换。

4) 预测时间  $\Delta T$  和采样间隔  $T$ : 预测的目的是得到被控变量迟延  $\tau$  时间后对应的预测值, 其理想预测时间为  $\Delta T \leq \tau$  且  $\Delta T \approx \tau$ 。采样间隔  $T$  的选取直接关系到预测控制的控制效果, 其值过小时会降低预测的精度, 过大时又会降低系统的动态性能, 一般选取  $T = (0.3 \sim 1)\tau / (m + 1)$ , 其中  $m + 1$  为预测所需数据的数目, 采样数据与预测时间的关系如图 2 所示。

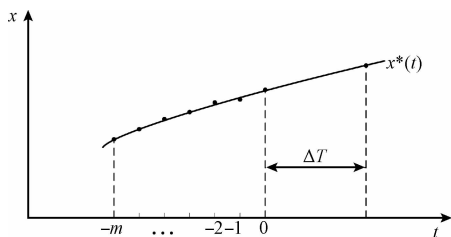


图 2 采样数据与预测时间关系

Fig. 2 Relationship between the sampled data and the predicted time

## 2.2 基于黄金分割的预测优选法

优选法是一种以数学理论为指导, 以尽可能高效率找到工程中最优解的科学方法。基于黄金分割的优选法具有实现简单、效果显著的特点, 它适用于一维区间  $[a, b]$  上的凸函数。它的核心是 0.618 和 0.382 这两个

优选系数<sup>[23-24]</sup>。

黄金分割优选法依据插入点继承原则、对称原则、和等比收缩原则来逐步缩小搜索区间<sup>[25]</sup>。具体来说, 对于函数  $f(x)$ , 若在起始搜索区间  $[a, b]$  中寻找极值, 可在区间  $[a, b]$  中取插入点  $x_1$  和  $x_2$ :

$$x_1 = a + 0.382(b - a) \quad (14)$$

$$x_2 = a + 0.618(b - a) \quad (15)$$

若  $f(x_1) > f(x_2)$ , 则令  $a = x_1$ , 继续寻找; 若  $f(x_1) < f(x_2)$ , 则令  $b = x_1$ , 继续寻找。

这样每次可将搜索区间缩小至原来的 0.382 倍或 0.618 倍, 直到收敛为一点。与此不同的是, 这里是根据黄金分割优选法直接寻找目标控制量。对于具有纯滞后的一阶惯性环节, 其稳态过程的控制量应相对稳定, 可以作为搜寻的目标控制量。设目标控制量初始搜索置信区间为  $[u_a, u_b]$ , 其中  $u_a$  对应目标控制量搜索置信区间的下限,  $u_b$  对应搜索置信区间的上限。设系统被控变量的实际采集值为  $x_i (i = 0, -1, \dots, -m)$ , 其对应的预测值为  $x^*(\tau)$ , 设定值为  $x'$ , 控制精度为  $\pm n$ 。结合直接预测控制的搜索过程如图 3 所示。

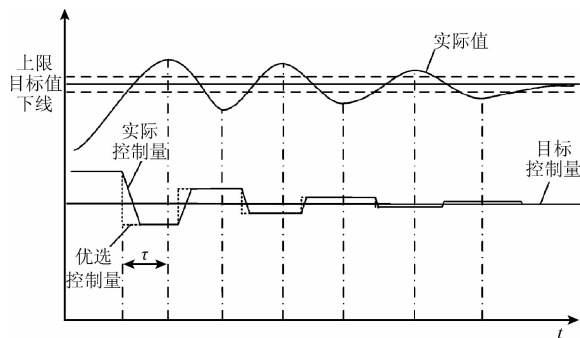


图 3 搜索过程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of search process

搜索过程就是逼近目标控制量的过程。根据黄金分割优选的方法, 选择不同的控制量作用于被控对象上, 当实际控制量大于目标控制量时, 被控变量处于上升阶段, 且最终会超出其设定误差区间上限; 当实际控制量小于目标控制量时, 被控变量处于下降阶段且最终会低于其设定误差区间下限; 当实际控制量等于目标控制量时, 被控变量处于稳态状态且位于误差区间之间。而控制量的保持作用会使得被控变量与其预测值具有统一的变化趋势。其优选过程如下: 1) 为确定控制量搜索区间上限的过程; 2) 确定控制量搜索区间下限的过程, 在控制的过程中同时结合了常规控制。

(1) 令控制量  $u = u_a + 0.618(u_b - u_a)$  作用于被控对象上, 切换至常规控制进行辅助判断并延时  $\tau$  时间后, 若  $x_0 \geq x' - n$  ( $x_0$  为当前测量值) 则当前控制量  $u$  大于目

标控制量,令  $u_b = u$  进入步骤(2),否则采集实测值  $x_i$  并进行预测计算得到  $x^*(\tau)$ ,若  $x^*(\tau) < x_0$  则当前控制量  $u$  小于目标控制量,令  $u_a = u$  重新进入步骤(1);若  $x^*(\tau) \geq x_0$  且  $x^*(\tau) < x' - n$  则继续进行下一次预测判断;若  $x^*(\tau) \geq x_0$  且  $x^*(\tau) > x' + n$  则当前控制量  $u$  大于目标控制量,令  $u_b = u$  并进入步骤(2)。

(2)令控制量  $u = u_a + 0.382(u_b - u_a)$  作用于被控对象上,切换至常规控制进行辅助判断并延时  $\tau$  时间后,若  $x_0 \leq x' + n$  ( $x_0$  为当前测量值)则当前控制量  $u$  小于目标控制量,令  $u_a = u$  进入步骤(1),否则采集实测值  $x_i$  并进行预测计算得到  $x^*(\tau)$ ,若  $x^*(\tau) > x_0$  则当前控制量  $u$  大于目标控制量,令  $u_b = u$  重新进入步骤(2);若  $x^*(\tau) \leq x_0$  且  $x^*(\tau) > x' + n$  则继续进行下一次预测判断;若  $x^*(\tau) \leq x_0$  且  $x^*(\tau) < x' - n$  则当前控制量  $u$  小于目标控制量,令  $u_a = u$  并进入步骤(1)。

若当前控制量切换到另一个控制量时,被控变量无超调即处于稳态,且存在静态误差,则需要再次调节控制量以消除静差。这样,优选区间不断收敛,直至搜索到目标控制量。此调节过程中控制量存在突变,为了减弱控制量突变对系统造成的影响,当通过优选法确定好下一个控制量时,当前的控制量按照直线“下坡”或“上坡”方式平滑过渡到下一个控制量。同时在过渡到下一个控制量的过程中,可以边调节边判断,如果在调节的过程中,再次确定了下一个控制量则无需继续调到之前确定的控制量,直接再次平滑过渡到下一个控制量。

### 3 污水溶解氧控制策略仿真

为了验证控制算法的有效性,首先进行仿真研究,并且将所设计的控制算法,与传统的专家控制算法进行比较。

污水溶解氧的控制过程具有不确定性和大时滞特性,根据式(4)动态模型以及参考文献[17]中的数据,取曝气过程近似仿真模型:

$$G(s) = \frac{0.24}{421s + 1} e^{-280s} \quad (16)$$

该模型  $\tau/T \approx 0.67 > 0.5$ ,显然属于大时滞控制过程。利用 MATLAB 采用上述控制策略对式(16)的模型进行仿真并与专家控制对比。预测时取5个采样点,采样点间隔为0.06,起始搜索区间为[8,20]。控制量平滑变化的控制效果如图4所示。

仿真时间为140 min,DO 设定值为3 mg/L,并待系统稳定后在80 min处加入扰动量。由图4可知,与专家控制相比,预测优选法调节时间更短,预测优选法抗干扰能力明显强于专家控制。

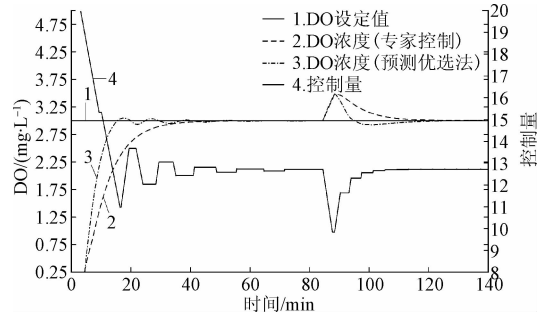


图4 控制量平滑变化的控制效果

Fig.4 The control effect of smooth change of control variable

DO 设定值变化的控制效果如图5所示,仿真时间为300 min,每100 min改变一次DO 设定值,3次DO 设定值分别为3,3.75和2.5 mg/L。由于3.75 mg/L > 3 mg/L,所以其对应的控制量大于3 mg/L对应的控制量即其搜索区间下限为3 mg/L对应的控制量。同理,2.5 mg/L对应控制量的搜索区间上限为3 mg/L对应的控制量,这样可缩小搜索范围。

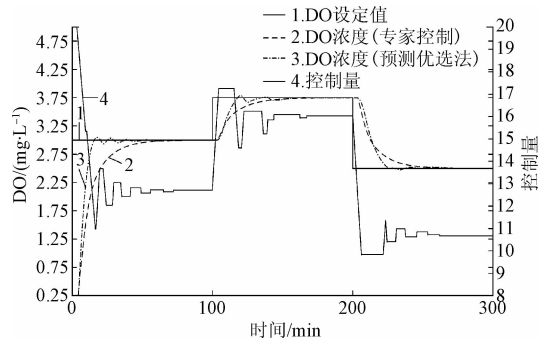


图5 DO 设定值变化的控制效果

Fig.5 The control effect of change of DO setpoint value

从图5中可看出,专家控制虽然可以逼近系统设定值但它牺牲了系统的调节速度,而预测优选法能够使系统更快达到稳定。

图4、5中的控制量曲线均为预测优选法所对应的控制量变化过程。可以看出,在过渡过程的起始阶段,控制量变化的幅度较大,在这一阶段主要处于快速调节阶段,由于采用的是专家控制策略,可以快速得出大致得出目标控制量的区间。当进入稳定调节阶段,

转入黄金分割优选法搜索目标控制量,从而快速准确逼近目标控制量。由曲线的变化可以看出,每次控制量的改变是按照被控变量的预测值来确定的。对于有自衡过程来讲,当设定值确定时,对应的目标控制量也相对确定,只要设法找到目标控制量,系统就调节完成。尽管在图5中,设定值不断改变,对应的目标控制量也不断改

变,采用预测优选法控制策略,都可以实现有效控制。本文提出的方法和专家控制方法的主要性能参数对比如表1所示。综上所述,预测优选法控制策略在调节性能、抗干扰性和跟踪性等方面都能够满足污水溶解氧的控制要求,且要优于纯专家控制,其调节时间只有后者的50%,并且控制量偏差能控制在1%以内。

表1 控制算法性能比较

Table 1 Comparison of two control algorithms

算法	调节时间/min	控制目标偏差量/%
专家控制	36	$\pm 1.2$
本文方法	18	$\pm 1$

## 4 模拟试验

除了计算机仿真实验外,模拟了污水曝气过程不确定性和大时滞等特性,在实验室搭建了实物仿真平台。试验中,基于STM32设计了控制器,采用威伦的触摸屏作为人机界面,通过4~20 mA模拟量输入模块采集现场传感器信号,通过4~20 mA模拟量输出模块将控制量输出给执行器,模拟试验现场如图6所示。

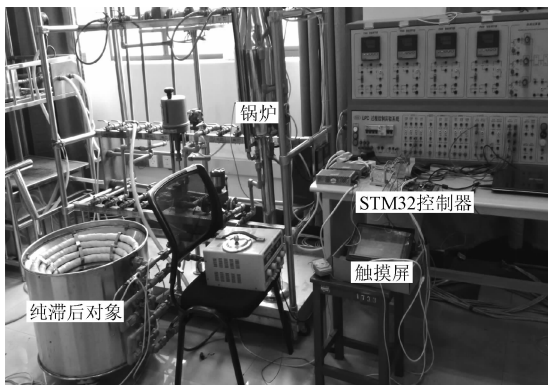


图6 模拟试验现场

Fig.6 The scene of simulation experiment

该实验平台由电加热炉和纯滞后对象组成,模拟了污水曝气多变量、大时滞、复杂的工业控制过程环境。其基本原理为,电加热炉加热后的液体流入纯滞后装置,纯滞后装置的输出量作为被控变量。该被控变量模拟溶解氧浓度,电加热炉的加热量模拟空气流量。从而模拟污水溶解氧的控制过程。通过实测,试验系统纯滞后时间约为310 s,时间常数 $T$ 约为490 s,其 $\tau/T \approx 0.63$ 与污水溶解氧近似模型近似。在实施预测控制时,取5个采样点,且采样点间隔为 $0.06\tau$ 。

试验过程中实时波形在人机界面上显示,如图7所示,曲线1是纯滞后水箱出水温度采集值曲线;曲线2为

纯滞后水箱出水温度设定值曲线;曲线3是电加热炉内液位采集值曲线;曲线4是电加热炉内液位设定值曲线;曲线5是电加热可控硅(silicon controlled rectifier, SCR)模块给定电流值曲线,即控制量的曲线;曲线6是进水电动调节阀给定电流值曲线。其中电加热炉液位的设定值为300 mm,纯滞后对象的出水温度的设定值为55℃,初始水温为28.3℃,液位的控制精度为 $\pm 5$  mm,温度精度为 $\pm 0.5$ ℃。

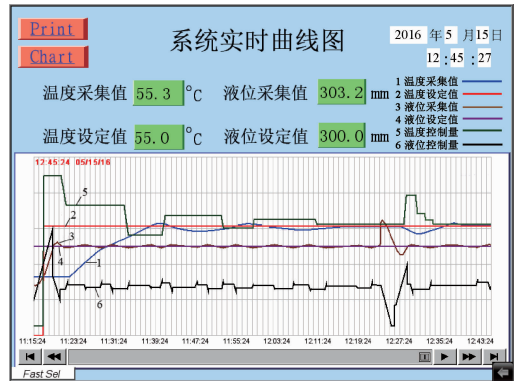


图7 控制系统实时波形

Fig.7 The real-time waveform of the control system

系统初始调节阶段采用专家控制进行最大控制量作用即采用最大加热功率作用于电加热炉上,专家控制作用是依据初始水温、水温设定值和环境温度等综合选定,之后切换到预测优选法控制阶段。首先,初始化控制量初始搜索区间并进行第1次优选(0.618系数确定控制量搜索区间上限),然后进入常规控制进行辅助判断并在持续作用时间后对温度进行预测计算;当温度预测值超出误差区间上限时进行第2次优选(0.382系数确定控制量搜索区间的下限),然后再次进入常规控制进行辅助判断并在持续作用时间后再次对温度进行预测计算;当温度预测值低于误差区间下限时,再次进行下一次调整,此时新的控制量搜索区间已经被确定且区间长度被缩短,就这样“一上一下”不断交替确定控制量新的搜索区间的上下限,将新确定的区间作为控制量新的搜索区间重复上述过程即可使控制量搜索区间不断收敛,直至搜索到系统的目标控制量。由于本系统设定的精度为 $\pm 0.5$ ℃,因而当温度值在54.5~55.5℃范围内变化时,控制量并不进行优选,若温度值一直处于此区间内则认为系统已经达到稳态。

待系统完全稳定后,将一盆冷水倒入电加热炉内,从而给稳定系统施加一定的扰动作用。在冷水的扰动影响下,电加热炉内液位升高、温度降低,从而破坏了此前已经达到平衡的系统。由于本系统并未直接测量电加热炉内的水温,而是测量纯滞后装置的出水水温,因而测量到水温变化与测量到液位变化之间有一定的迟延时间,这

正是滞后作用的体现。系统在经过一段时间的调整后,再次达到稳定状态。这表明了本控制策略具有较高的抗干扰性。

## 5 结 论

针对溶解氧这一类大滞后有自衡过程,本文提出了采用基于曲线拟合直接预测被控变量,以及专家控制和采用黄金分割优选法搜索目标控制量相结合的控制策略。该控制策略通过曲线拟合直接预测被控变量的未来值,在控制的初始阶段,采用专家控制快速缩小系统调节范围,随后采用黄金分割优选法快速逼近目标控制量。MATLAB 仿真以及工程模拟试验均表明了该控制策略的有效性。

## 参考文献

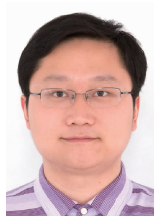
- [1] 孙云辉. 基于 PLC 的污水处理厂生物池精确曝气量控制研究[D]. 北京:机械科学研究总院, 2011.  
SUN Y H. Research on control of the aeration volume for biological pond in waste water treatment plant based on PLC [D]. Beijing: Mechanical Science Research Institute, 2011.
- [2] 韩改堂, 乔俊飞, 韩红桂. 基于递归模糊神经网络的污水处理控制方法[J]. 化工学报, 2016, 67(3): 954-959.  
HAN G T, QIAO J F, HAN H G. Wastewater treatment control method based on recurrent fuzzy neural network [J]. CIESC Journal, 2016, 67(3): 954-959.
- [3] 朱亚明, 丁为民. 一种在线检测溶解氧的方法[J]. 电子测量技术, 2009, 32(7): 122-124.  
ZHU Y M, DING W M. Online measurement method for dissolved oxygen [J]. Electronic Measurement Technology, 2009, 32(7): 122-124.
- [4] 张平, 王宏, 苑明哲. 污水生化处理过程中溶解氧的非线性控制[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(2): 387-391.  
ZHANG P, WANG H, YUAN M ZH. Nonlinear control of dissolved oxygen concentration in wastewater biological treatment [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(2): 387-391.
- [5] 李明河, 王健, 孟凡许. 基于支持向量机  $\alpha$  阶逆系统方法的污水处理内模控制[J]. 控制工程, 2016, 23(2): 185-189.  
LI M H, WANG J, MENG F X. Internal model control of nonlinear sewage disposal system based on  $\alpha$ -order inverse system of support vector machine [J]. Control Engineering, 2016, 23(2): 185-189.
- [6] ABOBAKAR A, CARTMELL E, STEPHENSON T, et

- al. Nitrous oxide emissions and dissolved oxygen profiling in a full-scale nitrifying activated sludge treatment plant [J]. Water Research, 2013, 47(2): 524-534.
- [7] HOLENDA B, DOMOKOS E, REDEY Á, et al. Dissolved oxygen control of the activated sludge wastewater treatment process using model predictive control [J]. Computers & Chemical Engineering, 2008, 32(6): 1270-1278.
- [8] BERNARDINI D, BEMPORAD A. Stabilizing model predictive control of stochastic constrained linear systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(6): 1468-1480.
- [9] 严珺, 江赞, 严实. 利用 RBF 网络的火电厂氮氧化物浓度检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(1): 45-50.  
YAN Y, JIANG Y, YAN SH. Detection method of NOx concentration in coal fired power plant using RBF network [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(1): 45-50.
- [10] LI J Y, MENG X F. Temperature decoupling control of double-level air flow field dynamic vacuum system based on neural network and prediction principle [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2013, 26(4): 1237-1245.
- [11] 张堃, 费敏锐, 吴建国, 等. 一类参数不确定时滞系统的智能控制应用研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(6): 1394-1401.  
ZHANG K, FEI M R, WU J G, et al. Application study on intelligent control of a class of time delay systems with parameter uncertainty [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(6): 1394-1401.
- [12] BELCHIOR C A C, RUI A M A, LANDECK J A C. Dissolved oxygen control of the activated sludge wastewater treatment process using stable adaptive fuzzy control [J]. Computers & Chemical Engineering, 2012, 37(4): 152-162.
- [13] 张爱娟, 胡慕伊, 黄亚南, 等. 基于专家前馈-模糊 PID 反馈的溶解氧浓度控制方案研究[J]. 中国造纸学报, 2016, 31(2): 43-48.  
ZHANG AI J, HU M Y, HUANG Y N, et al. Dissolved oxygen concentration control system based on expert feed-forward and fuzzy PID feed-back control [J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2016, 31(2): 43-48.
- [14] 郭广颂. 智能控制技术[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2014: 248-253.  
GUO G S. Intelligent control technology [M]. Beijing: Beihang University press, 2014: 248-253.



- [15] 张伟, 乔俊飞, 李凡军. 溶解氧浓度的直接自适应动态神经网络控制方法[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(1): 115-121.  
ZHANG W, QIAO J F, LI F J. Direct adaptive dynamic neural network control for dissolved oxygen concentration [J]. Control Theory & Application, 2015, 32(1): 115-121.
- [16] 罗兵. 智能控制技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 318-225.  
LUO B. Intelligent control technology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011:318-225.
- [17] 原魁. 污水处理厂曝气系统的控制研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011:43.  
YUAN K. Research on aeration system control of wastewater treatment plant [D]. Shenyang: Northeastern University, 2011:43.
- [18] 王万良. 现代控制工程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 321-329.  
WANG W L. Modern control engineering [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011:321-329.
- [19] 刘维. 自动调节系统的工程设计方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011:137-143.  
LIU W. Engineering design method of automatic regulation system [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2011:137-143.
- [20] LI L J, SU H Y, CHU J. Generalized predictive control with online least squares support vector machines [J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(11): 1182-1188.
- [21] 谢春利, 邵诚, 赵丹丹. 基于最小二乘支持向量机的一类非自治系统自适应控制[J]. 信息与控制, 2012, 41(1): 1-6.  
XIE CH L, SHAO CH, ZHAO D D. Adaptive control of a class of non-autonomous systems based on least square support vector machines [J]. Information and Control, 2012, 41(1): 1-6.
- [22] 赵超, 戴坤成, 王贵评, 等. 基于 AWLS-SVM 的污水处理过程软测量建模[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(8):1792-1800.  
ZHAO CH, DAI K CH, WANG G P, et al. Soft sensor modeling for wastewater treatment process based on adaptive weighted least squares support vector machines[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36 (8): 1792-1800.
- [23] 继锴, 媛彬. 智能控制技术[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2007:147-152.  
JI K, YUAN B. Intelligent control technology [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2007: 147-152.
- [24] 刘星, 徐翠锋, 郭庆. 环模模孔自动修复系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2015, 24(3):56-59.  
LIU X, XU C F, GUO Q. Automatic repair system design of ring-die hole [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 24(3):56-59.
- [25] 魏利胜, 吴旭. 基于特征模型的 NCSs 灰预测黄金分割控制器设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(11):1647-1656.  
WEI L SH, WU X. Design of NCSs grey prediction golden-section adaptive controller based on feature model[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(11):1647-1656.

### 作者简介



**张堃**, 2005 年于江苏大学获得学士学位, 2010 年于浙江大学获得硕士学位, 2016 年于上海大学获工学博士学位, 现为南通大学讲师, 主要研究方向为过程控制、人工智能、机器视觉。

E-mail: zhangkun\_nt@163.com

**Zhang Kun** received his B. Sc. degree from Jiangsu University in 2005, received his M. Sc. degree from Zhejiang University in 2010, and received his Ph. D degree from Shanghai University in 2016. Now he is a lecturer in Nantong University. His main research interests include machine vision, machine learning.



**吴建国** (通讯作者), 1998 年于江苏大学获得硕士学位, 2008 年于上海大学获得博士学位, 现为南通大学教授, 主要研究方向为过程控制、智能控制、机器视觉。

E-mail: wu.jg@ntu.edu.cn

**Wu Jianguo** (Corresponding author) received his M. Sc. degree from Jiangsu University in 1998, and his Ph. D degree from Shanghai University in 2008. Now he is a professor in Nantong University. His main research interests include process control, intelligent control and machine vision.