

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2417445

基于改进型蜣螂算法 Fuzzy-Smith-LADRC 混凝投药^{*}王文成^{1,2} 余智科^{1,2} 郑诗翰^{1,2}

(1. 桂林理工大学机械与控制工程学院 桂林 541006; 2. 广西高校先进制造与自动化技术重点实验室 桂林 541006)

摘要: 二十届三中全会强调全面落实深化改革水利任务,其中居民饮用水是重点民生任务,混凝工艺是饮用水处理的关键环节。由于混凝过程具有大时滞特性,故对于原水水质频繁变化的控制系统,常规的PID控制不能达到满意的效果。为此,将一种不依赖系统精确模型的线性自抗扰控制器(LADRC)应用于系统中,利用扩张观测器对混凝控制系统中出现的扰动进行估计并补偿,同时设计史密斯预估器(Smith)与模糊控制器(Fuzzy)相结合的自适应史密斯控制器来消除大时滞对控制效果的影响,提出 Fuzzy-Smith-LADRC 控制器。针对控制器参数调节困难而引入改进型蜣螂算法(MSIDBO)进行参数整定。改进型算法对 DBO 算法中初始种群分布不均匀、易陷入局部最优解等问题进行优化,使得 MSIDBO 能快速收敛并更好平衡全局探索与局部开发能力。系统模型精确时,该控制方法比 PID 控制的调节时间减少 279 s 和超调量降低 8%,比 DMC 控制的调节时间减少 40 s,系统模型变化时,相比 LADRC 具有更好的抗干扰性与鲁棒性。

关键词: 混凝工艺;模糊史密斯预估-线性自抗扰;改进蜣螂算法;参数优化

中图分类号: TN868 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.35

Coagulation dosing based on an improved dung beetle algorithm Fuzzy-Smith-LADRC

Wang Wencheng^{1,2} Yu Zhike^{1,2} Zheng Shihan^{1,2}

(1. School of Mechanical and Control Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China;

2. Guangxi Higher Education Key Laboratory of Advanced Manufacturing and Automation Technology, Guilin 541006, China)

Abstract: The 20th Central Committee's Third Plenary Session emphasized the comprehensive implementation of water conservancy reform tasks, with a focus on residential drinking water as a key livelihood task. The coagulation process is a critical step in drinking water treatment. Due to the significant time delay characteristic of the coagulation process, conventional PID control cannot achieve satisfactory results for control systems with frequent changes in raw water quality. Therefore, a linear active disturbance rejection controller (LADRC), which does not rely on an accurate system model, is applied to the system. An extended observer is used to estimate and compensate for disturbances in the coagulation control system. Additionally, an adaptive Smith controller, combining a Smith predictor with a fuzzy controller, is designed to mitigate the impact of large time delays on control effectiveness, leading to the proposed Fuzzy-Smith-LADRC controller. To address the difficulties in adjusting the controller parameters, an improved dung beetle optimization algorithm (MSIDBO) is introduced for parameter tuning. This improved algorithm optimizes issues such as uneven initial population distribution and the tendency to fall into local optima found in the DBO algorithm, enabling MSIDBO to converge quickly and better balance global exploration and local exploitation capabilities. When the system model is accurate, this control method reduces the settling time by 279 s and decreases overshoot by 8% compared to PID control, it also reduces settling time by 40 s compared to DMC control. When the system model changes, it demonstrates better anti-disturbance and robustness compared to LADRC.

Keywords: coagulation process; Fuzzy Smith predictor-linear active disturbance rejection; improved dung beetle optimization algorithm; parameter optimization

0 引言

混凝过程是水处理的核心环节,其效果直接关系到饮

用水的水质安全。然而,混凝过程中,源水流量和浑浊度易受到环境影响,并且涉及复杂的物化学反应,具有非线性、大时滞以及时滞突变等复杂特性,使得优化混凝过程具有

收稿日期:2024-11-25

* 基金项目:国家自然科学基金(52467022)、广西自然科学基金(2021GXNSFAA220038)项目资助

挑战性^[1]。对水厂混凝工艺的精确控制是实现其他任务的基础,因此研究精确控制混凝投药问题具有明确的现实意义。

早期水厂混凝工艺常基于源水状态的前馈控制。后来出现了使用源水的紫外-可见光谱来确定过程控制中混凝剂剂量^[2],通过测量与混凝工艺精密相关的间接变量进行投药控制。随着控制技术的进步,出现基于优化 RBF 神经网络预测^[3]、前馈-模糊 PID 控制策略^[4]、改进型史密斯预估器控制算法^[5]、随机森林与二阶滑膜复合控制^[6]、遗传算法与自适应模糊推理系统(ANFIS)^[7]相结合构建预测模型控制等控制算法,都获得不错的仿真效果。但在实际中,考虑到随机森林和 RBF 性能依赖高质量的数据并有过拟合风险,前馈-模糊 PID 和改进型史密斯模型控制器对于时滞大幅度跃变的控制效果较差,滑膜控制对系统模型要求较高、控制器鲁棒性限制和高频切换特性而导致系统维护成本较高,ANFIS 模型的复杂性较高,特别是在规则数量较多的情况下,模型训练和调整变得困难等原因,上述控制方法未能在水厂中大规模的实施。故目前大多数水厂还是使用烧杯试验来评估混凝剂的投药效果进行人工调节,普遍为饱和式投药,且调节滞后。因此,改善投药策略以提高混凝效率是亟待解决的课题。

线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control, LADRC)在常规水厂混凝投药控制中表现出较强的抗干扰能力,能够实时估计并补偿系统中的总扰动^[8]。唐德翠等^[9]应用线性自抗扰控制器在准确的混凝投药系统中取得稳定的控制效果,但对于控制系统可能出现的不确定时滞环节,LADRC 难以有效补偿由时滞引起的延迟效应,影响控制精度。故针对时滞较小的系统,由线性自抗扰控制器内部特性可忽略时滞环节进行常规 LADRC 设计^[10],针对于大时滞系统,李向阳等^[11]提出串联前馈补偿器,解决时滞环节导致的扩张状态观测器前馈信号和反馈信号不同步问题,吴俊杰等^[12]提出 Smith 预估器对输入提前预估来补偿信息滞后,Jain^[13]设计鲁棒自适应控制规律来过滤跟踪误差、控制输入的先前值和不确定参数,上述 3 种方法对确切的时滞环节有着不错的控制效果,但对于可能存在时滞突变系统的改善效果不明显。因此,针对水厂混凝投药控制系统中可能存在的时滞突变问题,本文提出将模糊史密斯预估器与线性自抗扰控制(Fuzzy Smith prediction-linear active disturbance rejection control, Fuzzy-Smith-LADRC)相结合的方法。模糊控制器可以动态调整史密斯预估器的参数,实时补偿由时滞突变引起的滞后效应,从而在保持 LADRC 的优势基础上,提升系统对时滞突变的适应性。针对控制器参数调节困难,应用多策略改进的蛭螂算法(multi-strategy improved dung beetle optimizer, MSIDBO)优化控制系统中的各项关键参数,确保在时滞突变和外部扰动的影响下,系统仍能保持较高的控制精度和鲁棒性。

1 混凝投药过程分析与系统建模

制水系统的水处理主要工艺流程:配水井→投药混凝→絮凝沉淀→过滤消毒→配水管道等工序构成,工艺流程如图 1 所示。

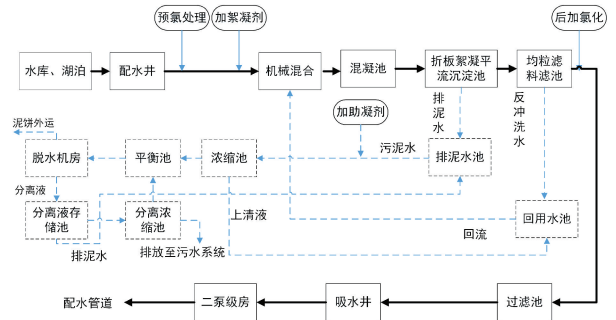


图 1 制水工艺流程图

Fig. 1 Process flow diagram of the water production

在水处理过程中,混凝投药是核心步骤,具体流程为投药-混合-混凝-沉淀。通过精确投药与混合,混凝剂有效降低水中的浑浊度。工艺流程中,控制器监测投放量,以确保混凝和沉淀过程的稳定性,实现预期控制。经沉淀池的处理后,水从出水口流出,达到安全饮用的标准。具体的操作流程为:控制器根据浊度信息发出控制信号,调节变频器的频率,从而精确控制加药泵的转速,确保混凝剂的准确投放。机械混合和沉淀后,待滤水的浊度逐渐降低,沉淀池出水口的浊度测量仪器将数据反馈给控制器,确保最终出水浊度符合设定标准。

由于混凝投药过程具有大时滞特性,当处理水质发生变化时,反馈信号需经较长时间反应待滤水浊度。由实验室混凝投药装置上得到明矾耗飞升实验数据结果(如图 2)分析,确定混凝投药系统模型为二阶惯性时滞系统。

$$G(s) = \frac{ke^{-\tau s}}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} \quad (1)$$

式中: $G(s)$ 为系统传递函数; T_1 、 T_2 为时间常数; τ 为时滞系数; k 为控制增益,运用 MATLAB 对混凝控制系统的传递函数模型进行辨别。通过辨别得到水质浊度关于混凝投药剂量的传递函数为式(2)。

$$G(s) = \frac{-2.3569e^{-39.7s}}{(19.371s + 1)(9.0858s + 1)} \quad (2)$$

2 模糊史密斯-线性自抗扰控制器原理分析与设计

2.1 线性自抗扰控制器原理分析

自抗扰控制(ADRC)是由 Han 提出不依赖于被控过程模型,利用扩张状态观测器实时监测系统运行状态,以有效应对未知扰动的控制方法^[14]。Gao 教授在此基础上提出线性自抗扰控制(LADRC),强调对扩张状态观测器的线性化处理,将复杂的非线性关系转换为线性关系^[15]。简化后

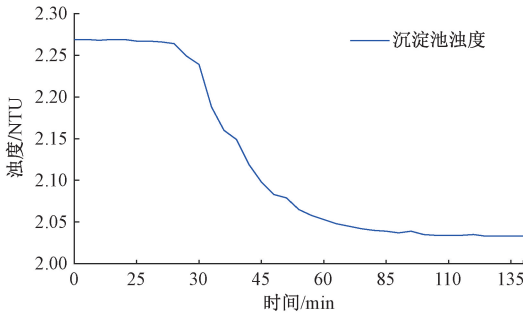


图 2 明矾耗飞升实验数据

Fig. 2 Experimental data of alum consumption elevation

的二阶 LADRC 结构如图 3 所示。

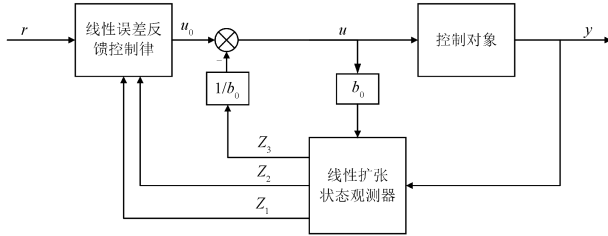


图 3 二阶 LADRC 结构图

Fig. 3 Second-order LADRC structure diagram

根据混凝投药动态过程分析,可以用二阶微分方程来描述浊度变化,可用二阶系统来表示:

$$\ddot{z} = f(z, \dot{z}, w(t), t) + bu \quad (3)$$

式中: z 为浊度, $w(t)$ 为外部扰动, $f(z, \dot{z}, w(t), t)$ 为总扰动。LADRC 的核心思想是实时估计总扰动,并通过估计值进行实时补偿从而消除扰动,使式(3)转化为简单的积分串联型,如式(4)所示。

$$\ddot{z} = u_0 \quad (4)$$

由被控对象可知,可引入二阶 LADRC 控制器实现混凝投药控制。选择状态变量: $x_1 = z, x_2 = \dot{z}, x_3 = f$, 则式(3)可以转为式(5)的连续扩张状态方程。由于 \dot{f} 未知,可在设计状态观测器时将 \dot{f} 省略掉。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + bu \\ \dot{x}_3 = \dot{f} \\ y = x_1 \end{cases} \quad (5)$$

根据龙格伯状态观测器理论,式(5)对应的连续线性状态观测器(LESO)可表示为式(6):

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = l_1(z - \hat{x}_1) + \hat{x}_2 \\ \dot{\hat{x}}_2 = l_2(z - \hat{x}_1) + \hat{x}_3 + bu \\ \dot{\hat{x}}_3 = l_3(z - \hat{x}_1) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3$ 为观测器的状态量, l_1, l_2, l_3 为观测器增益,当观测器增益取得合适的数值时就可实现 LESO 对被控对象的状态变量精确跟踪。对 LESO 方程拉普拉斯变换

可得式(7):

$$\begin{cases} \hat{x}_1(s) = \frac{l_1 s^2 + l_2 s + l_3}{L'(s)} Y(s) + \frac{bs}{L'(s)} U(s) \\ \hat{x}_2(s) = \frac{l_2 s^2 + l_3 s}{L'(s)} Y(s) + \frac{bs(s + l_1)}{L'(s)} U(s) \\ \hat{x}_3(s) = \frac{l_3 s^2}{L'(s)} Y(s) - \frac{bl_3}{L'(s)} U(s) \end{cases} \quad (7)$$

LESO 对应的特征方程为:

$$L'(s) = s^3 + l_1 s^2 + l_2 s + l_3 \quad (8)$$

要使控制系统稳定,特征根均在 S 左半平面,观测器的 3 个极点均配置在 S 平面的左半实轴 ($-\omega_0$ 为观测器带宽, $\omega_0 > 0$) 处,即:

$$L'(s) = (s + \omega_0)^3 \quad (9)$$

故整理可得观测器增益为: $l_1 = 3\omega_0, l_2 = 3\omega_0^2, l_3 = \omega_0^3$, 整理可得观测器增益只与观测器的带宽相关。LESO 估计出系统扰动后就可把相关信息反馈回控制器内进行控制,结果如式(10)所示。

$$\begin{cases} e_1 = v_1 - \hat{x}_1 \\ e_2 = v_2 - \hat{x}_2 \\ u_0 = b_1 e_1 + b_2 e_2 \end{cases} \quad (10)$$

式中: v_1, v_2 是投药控制中期望浊度 v 经过跟踪微分器的输出, b_1, b_2 为控制增益, u_0 为误差反馈控制量,根据式(10)可得 u_0 与 r_0 的传递函数,如式(11)所示。

$$\frac{U_0(s)}{R(s)} = \frac{b_1 + b_2 s}{s^2 + b_2 s + b_1} \quad (11)$$

将控制器的两个极点均配置在 S 平面的左半实轴 $-\omega_0$ 处,可得到控制器增益为,如式(12)所示。

$$\begin{cases} b_1 = \omega_c^2 \\ b_2 = 2\omega_c \end{cases} \quad (12)$$

式中: ω_c 为控制器带宽 ($\omega_c > 0$), 控制器的参数只与控制带宽相关。在 u_0 可再加上对总扰动估计的补偿值,如式(13)。

$$u = \frac{(u_0 - \hat{x}_3)}{b} \quad (13)$$

2.2 改进模糊 Smith-LADRC 控制器设计

对于传统 Smith 控制器,当时滞环节的参数发生变化时,控制系统中的反馈信号和预估器信号会出现误差使得系统性能变差。故 Zhu 等^[16]运用一种增益自适应 Smith 预估器,利用在反馈信号和预估器间串联的惯性环节进行自适应调整误差。Smith 预估器中惯性环节的时间常数对误差调整至关重要,过大会影响系统的动态特性,过小对滤波效果较差。因上述自适应预估器中时间常数固定,对时滞参数小范围波动具有良好的调节效果,但对参数发生较大变化时的控制效果较差,故引入模糊控制算法对时间常数进行实时整定,提出模糊 Smith 预估控制器。

控制器的校正量 ΔT 与初始值 T_0 相加就可得到整定控制参数 T_f , 则由 $T_f = T_0 + \Delta T$ 来实现自适应调整 T_f

的数值。模糊控制器 E_y 、 ΔE_y 与 ΔT 的论域均取 $[-3, 3]$ ，模糊论域设为 5 个变量级别: {负大(NB), 负小(NS), 零(Z), 正小(PS), 正大(PB)}，高斯函数为隶属函数,应用 Mamdani 法对 ΔT 进行模糊处理^[17],最后采用重心清晰化推理,如表 1 所示。模糊控制器可以动态调整史密斯预估器的参数,实时补偿由时滞突变引起的滞后效应,使得系统具有良好的鲁棒性和快速性。

表 1 ΔT 模糊规则表
Table 1 Fuzzy rule table of ΔT

ΔE_y	ΔE				
	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	PB	PB	PS	PS	PB
NS	PS	NS	NS	ZO	PB
ZO	PS	ZO	ZO	ZO	PS
PS	PS	ZO	NS	PS	PS
PB	PB	ZO	NS	PS	PB

混凝投药控制系统结合线性自抗扰和改进 Smith 预估器的优点,设计出一款改进型模糊 Smith-LADRC 控制器如图 4 所示,能快速调节突发扰动从而提高系统的鲁棒性。

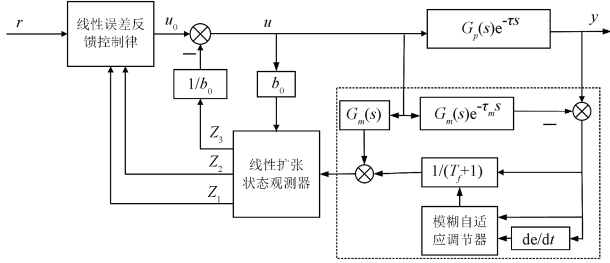


图 4 二阶 Fuzzy-Smith-LADRC 结构图

Fig. 4 Second-order Fuzzy-Smith-LADRC structure diagram

3 改进蜚螂算法优化 Fuzzy-Smith-LADRC 控制及运用

3.1 蜚螂算法优化器

蜚螂优化器(DBO)是由 Xue 等^[18]提出的元启发算法,灵感来源于蜚螂的种群行为。该算法模拟蜚螂在滚球、跳舞、觅食以及偷窃行为中的策略,以优化复杂问题的解。相对于粒子群算法、正弦算法等算法,蜚螂的行为被分工为不同类型的蜚螂。通过模拟这些不同蜚螂的特性,可以提高收敛速度和求解精度。具体的映射数学模型如下:

滚球蜚螂在搜索空间内以直线路径滚动,滚球蜚螂位置更新模型为式(14)。

$$\begin{cases} x_i(t+1) = x_i(t) + a \times k \times x_i(t-1) + b \times \Delta x \\ \Delta x = |x_i - X^w| \end{cases} \quad (14)$$

式中: t 为迭代次数, $x_i(t)$ 为迭代位置信息, a 为 -1 或 1 ,

$k \in (0, 0.2]$ 为偏转系数, $b \in (0, 1)$ 为常数, X^w 为历史最差位置。当蜚螂遇阻无法移动时,由跳舞改变前进方向,具体数学位置模型如式(15)。

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \tan(\theta) |x_i(t) - x_i(t-1)| \quad (15)$$

式中: $\theta \in [0, \pi]$, 如果 θ 等于 $0, \pi/2$ 或 π 时,将不会更新蜚螂的位置信息。

繁育蜚螂在选择产卵区域时,采用边界选择策略来确保雌性蜚螂能在适宜的环境中成功产卵。这种策略有助于提高后代的存活率,其策略数学模型为式(16)。

$$\begin{cases} Lb^* = \max(X^* \times (1-R), Lb) \\ Ub^* = \min(X^* \times (1-R), Ub) \end{cases} \quad (16)$$

式中: X^* 为当前局部最佳位置, Lb^* 和 Ub^* 为产卵区的下界与上界, $R = 1 - t/T_{max}$, T_{max} 为最大迭代次数。迭代过程中,育雏球的位置也是动态变化的,如式(17)。

$$B_i(t+1) = X^* + b_1 \times (B_i(t) - Lb^*) + b_2 \times (B_i(t) - Ub^*) \quad (17)$$

式中: $B_i(t)$ 为第 t 次迭代时第 i 个育雏球的位置, b_1 和 b_2 表示两个 $1 \times D$ 随机变量。

小蜚螂需要在最佳觅食区域式(18)进行位置式更新来觅食。

$$\begin{cases} Lb^b = \max(X^b \times (1-R), Lb) \\ Ub^b = \min(X^b \times (1-R), Ub) \end{cases} \quad (18)$$

式中: X^b 为全局最佳位置, Lb^b 和 Ub^b 为最佳觅食区域的下限和上限, $R = 1 - t/T_{max}$, T_{max} 为最大迭代次数,小蜚螂觅食的位置更新如式(19)。

$$x_i(t+1) = x_i(t) + C_1 \times (x_i(t) - Lb^b) + C_2 \times (x_i(t) - Ub^b) \quad (19)$$

式中: $x_i(t)$ 为第 i 只小蜚螂迭代 i 次的位置信息, C_1 为正态分布的随机数, C_2 为 $(0, 1)$ 随机向量。

X^b 为食物竞争的最佳位置。偷窃蜚螂通过争夺其他蜚螂的球体,以获取食物竞争中的最佳位置,其中位置更新模型为式(20)。

$$x_i(t+1) = X^b + S \times g \times (|x_i(t) - X^*| + |x_i(t) - X^b|) \quad (20)$$

式中: $x_i(t)$ 是第 t 次迭代时第 i 只偷窃蜚螂的位置信息, g 是服从正态分布的大小为 $1 \times D$ 的随机向量, S 为常量。

3.2 改进算法策略

针对蜚螂算法易陷入局部最优的问题,引入混沌映射初始化来取代原算法随机变量初始化,使得初始化对解的空间搜索范围更加广阔。并嵌入改进正弦算法来有规律的引导滚球蜚螂,促进蜚螂之间位置更新的互动。同时应对迭代后期种群多样性骤降,提出高斯算子与柯西算子结合变异扰动策略来提高种群的多样性,最后运用贪婪法则对比当前运算最优解,从而进一步寻找到更优解^[19]。

1) 混沌映射种群初始化

在种群初始化过程中,利用 Bernoulli 映射将混沌变量空间中的值进行线性变换到算法中,有效提升初始解的多样性,从而增强 DBO 算法的均匀性和收敛速度。Bernoulli 映射的数学模型为:

$$Z_{n+1} = \begin{cases} \frac{z_n}{1-\beta}, & 0 \leq z_n \leq 1-\beta \\ \frac{z_n - (1-\beta)}{\beta}, & 1-\beta \leq z_n \leq 1 \end{cases} \quad (21)$$

2)改进正弦算法引导蛭螂

利用引入自适应系数对正弦算法位置进行更新,使得可以对局部区域更加全面的搜索,位置更新为式(22)所示。

$$x_i(t+1) = \omega_i x_i(t) + r_1 \times \sin(r_2) \times [r_3 p_i(t) - x_i(t)] \quad (22)$$

式中: t 为迭代次数, ω_i 为惯性权重, $x_i(t)$ 为个体在第 t 次迭代的第 i 个的位置量, $p_i(t)$ 是第 t 次迭代最好的位置个体的第 i 个分量, r_1 为非线性递减函数, r_2 是 $[0, 2\pi]$ 的随机数, r_3 是 $[-2, 2]$ 的随机数。

使用 $0 \sim \pi$ 区间的余弦函数来设置非线性递减 r_1 的数值,数学表示为式(23)所示。

$$r_1 = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{2} \cos\left(\frac{\pi t}{T_{\max}}\right) + \frac{\omega_{\max} + \omega_{\min}}{2} \quad (23)$$

式中: ω_{\max} 和 ω_{\min} 是 ω_i 的最大值与最小值, t 为当前迭代次数, T_{\max} 为最大迭代次数。并采用自适应权重来伴随迭代次数的增加线性减小,如式(24)所示。

$$\omega_i = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \times \frac{t}{T} \quad (24)$$

改善蛭螂算法局部开发与全局探索能力而引入自适应正弦算法,取代原 ODB 滚球策略来对蛭螂位置进行正弦引导位置更新,改进后位置更新为式(25)。

$$x_i(t+1) = \begin{cases} x_i(t) + \alpha \times k \times x_i(t-1) + b \times \Delta x, & \delta < ST \\ \omega_i x_i(t) + r_1 \times \sin(r_2) \times [r_3 p_i(t) - x_i(t)], & \delta \geq ST \end{cases} \quad (25)$$

式中: $\delta = rand(1)$, $ST \in (0.5, 1]$, 当 $\delta < ST$ 时,蛭螂进行特定的滚动探索,当 $\delta \geq ST$ 时,蛭螂以随机的正弦函数方式进行探索。

3)高斯-柯西混合变异扰动

随着迭代后期的蛭螂个体聚集在当前最优解附近,使得种群的多样性减少而出现搜索停滞的情况,该情况易陷入局部最优解。通过引入变异算子增强算法的探索能力^[20]。具体而言,柯西变异和高斯变异可以通过调整搜索范围和步长来影响后代的生成。本文提出高斯-柯西混合扰动能够充分利用蛭螂最优个体的优势,通过变异扰动进一步增强算法的探索能力,有助于找到更优解。具体如式(26)。

$$H^b(t) = X^b(t) \times (1 + \mu_1 \times Gauss(s) + \mu_2 \times cauchy(s)) \quad (26)$$

式中: $X^b(t)$ 为个体在第 t 次迭代的最优值, $H^b(t)$ 为第 t

次迭代中的最优位置 $X^b(t)$ 在高斯-柯西扰动的位置, $Gauss(\sigma)$ 为高斯变异算子, $cauchy(\sigma)$ 为柯西变异算子,变异算子权重 μ_1, μ_2 是一种逐步线性变动的方式:

$$\mu_1 = t/T_{\max}, \mu_2 = 1 - t/T_{\max} \quad (27)$$

最后引入贪婪规则^[21]对变异后蛭螂值与当前最优值比较,确定出来最好的适应度的值来替换当前最优值,具体公式为式(28)。

$$X^b = \begin{cases} H^b(t), f[H^b(t)] < f[X^b(t)] \\ X^b(t), f[H^b(t)] \geq f[X^b(t)] \end{cases} \quad (28)$$

3.3 结合优化算法在混凝控制系统中应用

Fuzzy-Smith-LADRC 控制器需要优化 ω_0, ω_c, b_0 三个参数。根据文献[22]给定的 ITAE 指标,构建优化目标函数为:

$$ITAE = \int_0^{t_f} t |e(t)| dt \quad (29)$$

式中: $e(t)$ 为误差, t 为时间, t_f 为结束时间。即多策略改进蛭螂算法优化 Fuzzy-Smith-LADRC 的调参流程如下:

- 1) 设定蛭螂群算法初始参数、蛭螂规模、最大迭代次数。
- 2) 以 Bernoulli 映射进行初始化,计算初始化蛭螂的适应度。
- 3) 根据 ST 的数值来选择滚球蛭螂更新方式,同时对其他各类蛭螂位置更新。
- 4) 利用高斯-柯西变异策略对最优值扰动,产生新解。
- 5) 应用贪婪法则来比较位置是否需要更新,若变异后的蛭螂适应度最优则位置更新,若否则算法继续。
- 6) 检查算法是否达到最大迭代次数,若是则输出最优解,算法结束,若否则返回至步骤 3)。

4 仿真结果与实验分析

4.1 仿真结果分析

根据上述分析,建立系统模型并设计控制器,在 MATLAB/Simulink 仿真平台上进行混凝投药控制仿真实验。在假设模型准确的前提下,将 1NTU 设定为期待浊度,对 Fuzzy-Smith-LADRC、传统 PID 和动态矩阵 DMC 三种控制器进行实验仿真,以验证 Fuzzy-Smith-LADRC 的优越性。在期待浊度为 1NTU 的情况下,持续 600 s 后加入幅度为 0.1 的阶跃扰动,以检验混凝投药控制系统在浊度变化时的自适应能力,并分析系统的鲁棒性。

图 5 为系统模型精确的前提条件下的控制响应图,在给定浊度为 1NTU 时,PID 控制在 372 s 才会达到稳态,并且有大约 8% 的超调量;动态矩阵 DMC 控制器在 133 s 时达到稳态,没有超调量;Fuzzy-Smith-LADRC 控制器则在 93 s 时就达到稳态,没有超调量。图 6 为给定期待浊度响应曲线图,在仿真时间达到 600 s 时突然加幅度为 0.1 的阶跃信号,PID 控制会到在 950 s 再次达到稳态;动态矩阵 DMC 控制在 820 s 时再次达到稳态;Fuzzy-Smith-LADRC

在 745 s 就能再次达到稳态值。故 Fuzzy-Smith-LADRC 控制器在混凝控制系统中具有更好的抗干扰性和鲁棒性。

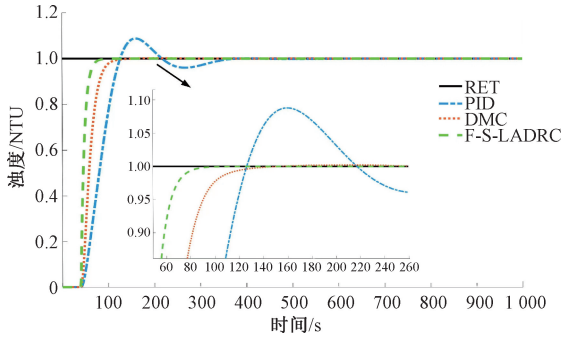


图 5 模型精确仿真曲线

Fig. 5 Model accurate simulation curve

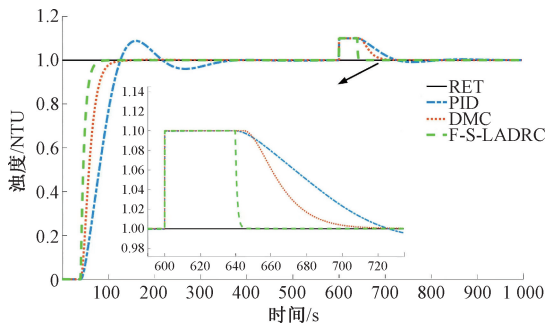


图 6 模型精确阶跃扰动仿真曲线

Fig. 6 Model accurate step disturbance simulation curve

混凝沉淀反应过程复杂,当原水水质突然发生变化时,会导致所建立的模型与实际模型不同,内部的延迟时间和系统增益都可能发生较大变化。生产过程的实际时滞时间的变化一般不会超 15%,故在混凝投药控制参数摄动仿真时,将时滞系数增加 7.6% 即 42 s,对常规的 Smith-LADRC 和 Fuzzy-Smith-LADRC 两种控制器进行比较,系统的输出如图 7 所示。系统增益在控制系统中经常受到水流量的影响,参数摄动仿真实验中将增益增加 59% 进行仿真,图 8 为增益变化响应曲线,由图 8 可知,当系统参数发生摄动会造成系统抖动并可能进一步影响系统的稳定。Fuzzy-Smith 预估器可以快速调节惯性环节的 T 值,对参数摄动给予合适的时间常数,进行精确的滤波来减小误差并增强系统的鲁棒性。

4.2 多策略改进蜚螂算法与其他算法对比

验证多策略改进蜚螂算法的优越性,选取 PSO、DBO 和 MSIDBO 算法对 Fuzzy-Smith-LADRC 参数整定的 ITAE 指标进行比较。结合混凝投药系统的实际运行需求,设定种群规模均为 60,最大迭代次数为 50。图 9 显示,MSIDBO 在初始值最低、收敛速度更快以及适应度最优方面,明显优于另外两种算法。

在优化算法中,PSO 在 12 次迭代后陷入 0.268 的局部最优解,虽然收敛快,但后期易陷入局部最优。相对而言,

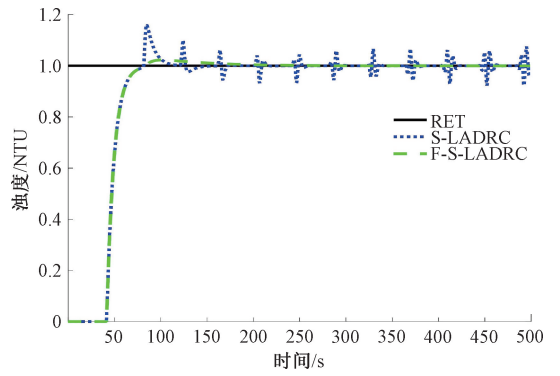


图 7 模型时滞变化仿真图

Fig. 7 Model simulation of time delay variation

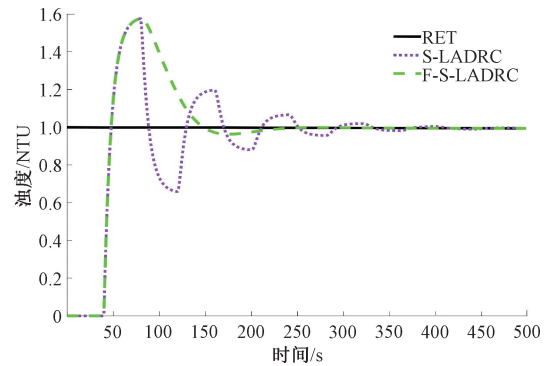


图 8 模型增益变化仿真图

Fig. 8 Model simulation of gain variation

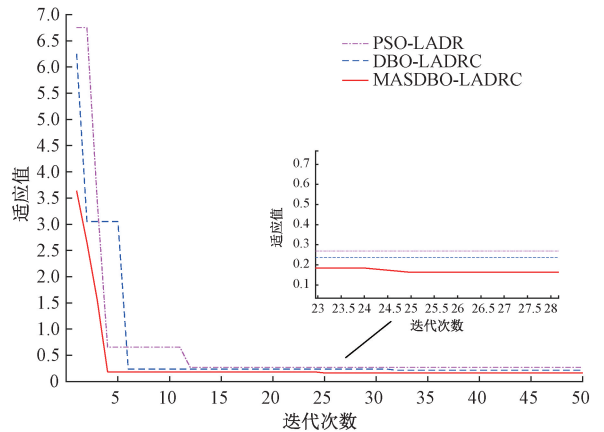


图 9 三种算法寻优对比图

Fig. 9 Comparison of optimization performance for three algorithms

DBO 通过种群划分实现更全面的搜索,达到 0.236 的局部最优解需 6 次迭代,但后期全局探索能力不足。MSIDBO 引入混沌映射初始化,初始适应度为 3.63,并结合改进的正弦算法,有效平衡全局与局部探索,在 4 次迭代时快速收敛至 0.183。自适应高斯-柯西变异策略增强算法探索能力,25 次迭代时成功找到全局最优解 0.162。MSIDBO 融合了 DBO 的优点,同时引入 Bernoulli 映射和其他改进策

略,提升了收敛速度与探索能力。

4.3 混凝投药控制实验分析

在实验室水箱中进行混凝投药实验,验证控制方法的可行性。实验的主要设备包括上位机、DCS 控制系统、浊度测量仪、西门子变频器和实验水箱等。当工作台启动时,浊度测量仪实时监测水中浊度,并计算出与预设目标浊度的偏差。通过 Fuzzy-Smith-LADRC 控制算法生成控制信号,驱动变频器调节加药泵转速,从而调控水中浊度。实验设定目标浊度为 1 NTU,实验持续时间为 22 h,期间动态调整原水流量与原水浊度,研究控制系统对出水口浊度的调节能力。图 10 展示是混凝投药水箱实验装置。

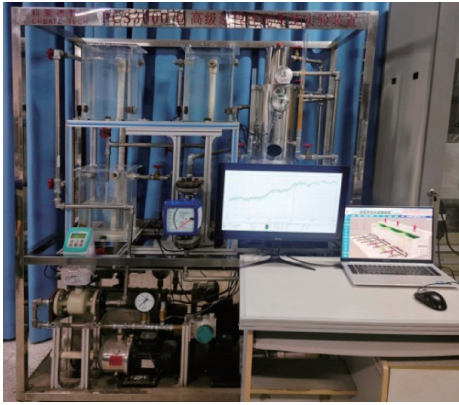


图 10 混凝水箱试验台

Fig. 10 Coagulation water tank test bench

图 11 为系统在试验台控制的响应图。根据图 11 所示,可以观察到控制系统在初始阶段平稳过渡至目标浊度值 1NTU,且在此过程中未出现明显的超调和震荡。在 22:37 到 04:29 期间,保持原水流量不变并动态调整原水浊度,即影响系统模型中的时滞环节,因控制器中的 Fuzzy-Smith 可动态调整控制器,故可观察到出水口浊度基本保持在期待浊度附近。在 5:00~6:00 时间段内,保持原水浊度不变并动态调整原水流量,即影响系统模型中的常数系数,因 LADRC 可动态估计并补偿扰动信息,即出水口保持相对稳定,未出现显著的浊度波动。实验结果表明,Fuzzy-Smith-LADRC 控制器在混凝投药过程中表现出了良好的稳定性和响应精度,具有较好的动态性能。

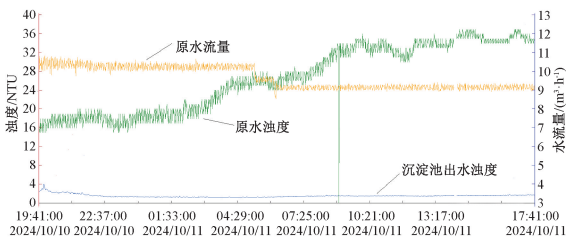


图 11 系统控制响应图

Fig. 11 System control response algorithms

5 结 论

针对水厂混凝投药控制问题,本文提出来了模糊史密斯线性自抗扰控制策略,通过混凝投药试验台得出的数据在 MATLAB 辨别出传递函数模型,设计出模糊史密斯线性自抗扰控制器,并引入改进蛭螂算法调参。仿真结果表明,该控制器在系统模型精确时相比 PID 控制的调节时间减少 279 s 和超调量降低 8%;相比 DMC 控制器的调节时间减少 40 s,当系统模型变化时,该控制器能快速的调节史密斯内部参数,具有较强的鲁棒性。实验室混凝投药试验表明该控制方法能较好水处理效果。本文设定线性反馈误差中的 PI 参数固定,未来可进一步研究滑模控制或模糊控制器动态调节参数作为线性反馈误差控制器,使的更加快速的调节系统。

参考文献

- [1] 王艺颖. 水厂精准混凝投药实时控制系统的构建[J]. 给水排水, 2023, 59(5): 156-164.
WANG Y Y. Construction of a real-time control system for precision coagulation and dosing in water plants[J]. Water Supply and Drainage, 2023, 59(5): 156-164.
- [2] SHI ZH N, CHOW C W K, FABRIS R, et al. Determination of coagulant dosages for process control using online UV-vis spectra of raw water[J]. Journal of Water Process Engineering, 2022, 45: 102526.
- [3] 刘海林,王庭有. 改进 GA-RBF 神经网络的水厂混凝投药预测[J]. 供水技术, 2024, 18(1): 40-45.
LIU H L, WANG T Y. Prediction of coagulation dosing in water treatment plants using improved GA-RBF neural network[J]. Water Supply Technology, 2024, 18(1): 40-45.
- [4] 金志伟,杜宁,邢盼,等. 基于前馈-模糊 PID 策略的风洞控制器应用[J]. 兵工自动化, 2024, 43(7): 48-51.
JIN ZH W, DU N, XING P, et al. Application of wind tunnel controller based on feedforward-fuzzy PID strategy[J]. Ordnance Automation, 2024, 43(7): 48-51.
- [5] 陈刚,尹瑞麟,范常浩,等. 基于抗扰动 Smith 预估补偿的磨煤机出口风粉温度优化控制[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(9): 131-139.
CHEN G, YIN R L, FAN CH H, et al. Optimal control of coal mill outlet air-fuel temperature based on disturbance-rejection smith predictor compensation[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(9): 131-139.
- [6] WANG D SH, WU J F, DENG L Q, et al. A real-time optimization control method for coagulation process during drinking water treatment[J]. Nonlinear Dynamics, 2021, 105(4): 3271-3283.
- [7] 郭雪峰,孟铭,宁一,等. 基于 GA-FCM-ANFIS 的不稳定水质条件下混凝投药预测方法[J]. 中国农村水利水

- 电,2024(12):60-66.
- GUO X F, MENG M, NING Y, et al. Coagulation dosing prediction method under unstable water quality conditions based on GA-FCM-ANFIS[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2024(12): 60-66.
- [8] 马冬寅,王新屏,李卫东.基于BAS-PSO优化自抗扰的高速列车速度跟踪控制[J]. *电子测量技术*, 2024, 47(6): 58-63.
- MA D Y, WANG X P, LI W D. High-speed train speed tracking control based on BAS-PSO optimized active disturbance rejection [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2024, 47(6): 58-63.
- [9] 唐德翠,张绪红.混凝投药预测自抗扰工业控制器设计[J]. *控制工程*, 2017, 24(10): 2099-2106.
- TANG D C, ZHANG X H. Design of active disturbance rejection industrial controller for coagulation dosing prediction[J]. *Control Engineering*, 2017, 24(10): 2099-2106.
- [10] 李壮举,杜朋达,王宁.基于改进LESO的四旋翼无人机模糊线性自抗扰控制方法[J]. *电子学报*, 2024, 52(9): 3185-3194.
- LI ZH J, DU P D, WANG N. Fuzzy linear active disturbance rejection control method for quadrotor UAV based on improved LESO[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2024, 52(9): 3185-3194.
- [11] 李向阳,高志强,田森平,等.大时滞不确定系统的滞后时间削弱与自抗扰控制[J]. *控制理论与应用*, 2024, 41(2): 249-260.
- LI X Y, GAO ZH Q, TIAN S P, et al. Time delay mitigation and active disturbance rejection control for large time-delay uncertain systems[J]. *Control Theory and Applications*, 2024, 41(2): 249-260.
- [12] 吴俊杰,陈明霞,卢澎澎.胎面重量控制系统的CPSO优化Smith预估线性自抗扰策略[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(14): 6105-6112.
- WU J J, CHEN M X, LU P P. CPSO optimized smith prediction linear active disturbance rejection strategy for tread weight control system [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23 (14): 6105-6112.
- [13] JAIN A K. Input delay compensation of nonlinear systems with uncertain time-varying parameters[J]. *European Journal of Control*, 2024, 80: 101100.
- [14] 张鹏强,闫晓健,孟子涵,等.基于自抗扰控制的网络构建及其协调控制研究[J]. *国外电子测量技术*, 2023, 42(11): 97-105.
- ZHANG P Q, YAN X J, MENG Z H, et al. Research on network construction and coordinated control based on active disturbance rejection control [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2023, 42 (11): 97-105.
- [15] CUI SH, ZHAO T. Uncertain surface vessels tracking control based on linear active disturbance rejection control and finite time convergence [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 298: 117263.
- [16] ZHU L J, QI ZH Y, LIN L, et al. A novel Fuzzy-Smith predictive control algorithm application in laser interferometric dynamic positioning feedback control systems[J]. *Measurement*, 2024, 238: 115335.
- [17] 刘煊理.基于改进模糊PID预估算法的混凝投药控制系统研究与设计[D].桂林:桂林理工大学,2023.
- LIU H L. Research and design of coagulation dosing control system based on improved fuzzy PID prediction algorithm [D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2023.
- [18] XUE J K, SHEN B. Dung beetle optimizer: A new meta-heuristic algorithm for global optimization[J]. *Journal of Supercomputing*, 2023, 79(7): 7305-7336.
- [19] 潘劲成,李少波,周鹏,等.改进正弦算法引导的蜣螂优化算法[J]. *计算机工程与应用*, 2023, 59(22): 92-110.
- PAN J CH, LI SH B, ZHOU P, et al. Improved sine algorithm guided dung beetle optimization algorithm[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2023, 59(22): 92-110.
- [20] 刘微,任腾腾,韩广雨,等.多策略改进蜣螂优化算法及其应用[J]. *电子测量技术*, 2024, 47(12): 109-121.
- LIU W, REN T T, HAN G Y, et al. Multi-strategy improved dung beetle optimization algorithm and its application[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2024, 47(12): 109-121.
- [21] 贾鹤鸣,林建凯,吴迪,等.融合学习行为策略的改进黑猩猩优化算法[J]. *计算机工程与应用*, 2023, 59(16): 82-92.
- JIA H M, LIN J K, WU D, et al. Improved chimpanzee optimization algorithm with integrated learning behavior strategy[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2023, 59(16): 82-92.
- [22] 朱国庆,韩东颖,米振涛,等.多策略改进的蜣螂优化算法及其工程实例应用[J]. *电子测量技术*, 2024, 47(21): 82-99.
- ZHU G Q, HAN D Y, MI ZH T, et al. Multi-strategy improved dung beetle optimization algorithm and its engineering application [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2024, 47(21): 82-99.

作者简介

王文成(通信作者),硕士生导师,副教授,主要研究方向为控制技术、工业电气自动化及复杂建模等。

E-mail: wwc816@163.com

余智科,硕士研究生,主要研究方向为复杂系统控制与工业过程控制。

E-mail: 2120231385@glut.edu.cn

郑诗翰,硕士研究生,主要研究方向为机器视觉图像处理研究。

E-mail: 2120231395@glut.edu.cn