

# 基于 SSA 优化的变论域模糊 PID 控制器及其污水处理过程应用

李志峰, 熊伟丽

(江南大学物联网工程学院, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 由于复杂多变的生化反应、进水流量和浓度的不断变化, 污水处理过程表现出强非线性和时变性等特征, 从而导致其过程变量难以精确控制。设计一种麻雀搜索算法 (SSA) 优化的变论域模糊比例、积分和微分 (PID) 控制器, 对溶解氧和硝态氮浓度进行跟踪控制。首先利用 SSA 优化第 5 单元和第 2 单元的变论域模糊 PID 控制器的 PID 初始参数值; 然后进行二次寻优, 即对量化因子和比例因子进行优化, 并设计基于模糊规则的论域自适应调整策略在线整定控制器参数, 以提高控制器的跟踪精度; 最后应用污水处理过程国际基准仿真平台进行恒值和动态变值跟踪控制的实验验证。实验结果表明, 与基于自适应伸缩因子变论域模糊 PID 控制器、模糊 PID 控制器、常规 PID 控制器相比, 所设计控制器的绝对误差积分指标明显降低, 在有效降低能耗的同时提升了出水水质。

**关键词:** 污水处理过程; 麻雀搜索算法; 变论域模糊; 比例、积分、微分控制器; 参数优化

中图分类号: TP393

文献标志码: A

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0069342

## Variable Discourse Domain Fuzzy PID Controller Based on SSA Optimization and Its Application in Sewage Treatment Process

LI Zhifeng, XIONG Weili

(School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China)

**【Abstract】** Owing to complex biochemical reactions and the constant change in influent flow and concentration, sewage treatment processes exhibit strong nonlinear and time-varying characteristics, making it difficult to control the process variables accurately. Therefore, this paper presents a fuzzy Proportional, Integral, Derivative (PID) controller optimized by the Sparrow Search Algorithm (SSA) to track the concentration of dissolved oxygen and nitrate-nitrogen. First, SSA is used to optimize the initial PID parameters of the variable theory domain fuzzy PID controller of units 5 and 2. Then, quadratic optimization is carried out, that is, the quantization factor and scale factor are optimized. A theory domain adaptive adjustment strategy based on fuzzy rules is designed to adjust the controller parameters online, to improve the tracking accuracy of the controller. Finally, Benchmark Simulation Model no. 1 (BSM1) for the sewage treatment process is used to experimentally verify constant value and dynamic variable value tracking control, and the applicability of SSA in wastewater treatment process is analyzed. Experimental results show that compared with the conventional fuzzy PID controller based on the adaptive scaling factor variable theory domain, the absolute error integral index of the designed controller is reduced. Moreover, energy consumption is reduced while effluent quality is improved.

**【Key words】** sewage treatment process; Sparrow Search Algorithm (SSA); variable discourse domain fuzzy; Proportional, Integral, Derivative (PID) controller; parameter optimization

## 0 引言

随着城市化进程不断加速和城市污水排放量逐年增加, 污水处理过程运行能耗不断增大, 且出水水质容易超标<sup>[1-3]</sup>。污水处理过程中第 5 单元溶解氧浓度 ( $S_{O,5}$ )、第 2 单元硝态氮浓度 ( $S_{NO,2}$ ) 是影响出水水质和能耗的重要控制变量, 如何设计先进的控制器来提高其控制精度, 已经成为提高出水水质和节能领域的一个重要研究方向。

近年来, 针对  $S_{O,5}$  和  $S_{NO,2}$  的控制策略得到了广泛研究。由于污水处理过程具有强非线性、时变性等特征<sup>[4-6]</sup>, 传统比例、积分和微分 (PID) 控制器很难满足高控制精度要求, 众多研究者在 PID 的基础上进行了改进并应用于污水处理过程。文献[7]引入 ziegler-Nichols 整定 PID 参数, 达到对  $S_{NO,2}$  的良好跟踪效果。文献[8]利用误差积分准则算法对 PID 参数进行寻优, 对  $S_{O,5}$  进行控制。文献[9]提出一种多变量 PID 控制器, 通过优化 PID 参数, 实

收稿日期: 2024-02-01 修回日期: 2024-03-02

基金项目: 国家自然科学基金 (61773182, 62003300); 国家重点研发计划 (2018YFC1603705-03)。

通信作者 E-mail: 18056654837@163.com

现了对  $S_{O_5}$  的跟踪控制。然而, PID 参数整定困难,不能实时在线调整,无法满足污水处理过程动态特性和时变性特点,进而导致控制精度下降。

模糊 PID 是将模糊算法与 PID 控制相结合的新型智能控制器,通过对 PID 参数进行实时优化,能够适应被控对象的非线性和时变性<sup>[10-11]</sup>。为进一步提高控制性能,许多学者对其进行了改进研究。文献[12]利用遗传算法对模糊 PID 的隶属函数和模糊规则进行优化,取得了较好的温度控制效果。文献[13]设计了一种区间二型模糊免疫 PID 控制器,结果表明,控制精度优于 PID 控制。文献[14]利用混合遗传算法和粒子群算法对模糊 PID 控制器参数离线优化,取得了较高的控制精度。但是,在模糊 PID 控制中,模糊论域确定了就无法改变,随着输入信号和被控对象的改变,模糊论域就不再符合控制要求,从而导致控制精度降低。

变论域模糊 PID 是在不改变模糊规则的情况下,根据系统误差大小,对模糊 PID 输入和 3 个输出论域进行适度伸缩变化,相当于增加了新的规则,进一步提高控制精度。文献[15]利用变论域模糊 PID 控制器来提高打印机对准中的响应速度。文献[16]为提高直升机飞行控制系统的操纵舒适性,提出了一种变论域模糊 PID 控制器阻尼力控制策略。文献[17]利用变论域模糊 PID 控制器解决磁流变阻尼器与电动助力转向系统的集成控制问题。但是,由于变论域 PID 控制器的初始参数、量化因子和比例因子是人为设置的,具有随机性,影响控制精度的提升。

综上所述,本文利用麻雀搜索算法(SSA)较强的全局探索和跳出局部最优能力,提出一种基于 SSA 优化的变论域模糊 PID 控制器。为解决变论域模糊 PID 控制器参数设置随机性问题,通过 SSA 离线优化 PID 参数值,获得变论域模糊 PID 控制器调整的初始值,并对量化因子和比例因子进行二次离线优化;在优化 PID 参数值的基础上,通过基于模糊规则的变论域模糊 PID 控制器在线整定 PID 参数值,有效提升控制器跟踪精度。最后,在基于国际基准仿真平台(BSM1)的污水处理控制过程中,实现对  $S_{O_5}$  和  $S_{NO_2}$  设定值的精确跟踪控制以降低能耗。

## 1 污水处理过程

污水处理过程主要采用活性污泥技术,其主要工作原理是通过大量微生物吸附和分解污水中的有机物,其中典型工艺是前置反硝化生物脱

氮<sup>[18]</sup>。该工艺通过厌氧菌和好氧菌的生化反应,将污泥中有机物进行分解,主要包含硝化和反硝化生化反应过程。首先污水进入厌氧区进行反硝化反应,再流入好氧区进行硝化反应。为了合理地研究和对比优化控制方法性能,国际水质协会开发了 BSM1 模型。BSM1 模型主要由 5 个生化反应单元构成,其中,前面 2 个单元为厌氧池,后面 3 个单元为好氧池。第 1 个单元的物料平衡公式如式(1)所示:

$$\frac{dC_1}{dt} = \frac{1}{V_1} (Q_a C_a + Q_r C_r + Q_0 C_0 + r_1 V_1 - Q_1 C_1) \quad (1)$$

式中:  $C_1$  为第 1 单元的基础组分浓度;  $V_1$  为第 1 单元的体积;  $Q_a$  为内回流量;  $C_a$  为内回流量的基础组分浓度;  $Q_r$  为外回流量;  $C_r$  为外回流量的基础组分浓度;  $Q_0$  为入水流量;  $C_0$  为入水的基础组分浓度;  $r_1$  为第 1 单元中组分反应速率;  $Q_1$  为第 1 单元的出水流量;  $t$  为反应时间。

第 2~5 单元的物料平衡公式如式(2)所示:

$$\frac{dC_k}{dt} = \frac{1}{V_k} (Q_{k-1} C_{k-1} + r_k V_k - Q_k C_k) \quad (2)$$

式中:  $C_k$  为第  $k$  单元的基础组分浓度;  $V_k$  为第  $k$  单元的体积;  $r_k$  为第  $k$  单元中组分反应速率;  $Q_k$  为第  $k$  单元的出水流量。

废水在 5 个单元中经过硝化和反硝化反应后,一部分混合液流向第 1 单元,再次进行处理,剩余部分则流向二次沉淀池进行物理沉淀。在沉淀池中大部分下层固体物质和剩余活性污泥回流到第 1 单元,小部分被排出,上层清水流出系统,其具体模型结构如图 1 所示。

为实现降低能耗(OCI)和提升出水水质(EQI)的目的,第 5 单元溶解氧浓度( $S_{O_5}$ )、第 2 单元硝态氮浓度( $S_{NO_2}$ )是重要的控制参数。 $S_{O_5}$ 、 $S_{NO_2}$  不仅影响硝化和反硝化反应过程,而且影响 OCI 大小,其中 OCI 包括爆气能耗(AE)和泵送能耗(PE)大小。第 5 单元溶解氧传递系数  $K_{La5}$  和内回流量  $Q_a$  为控制  $S_{O_5}$ 、 $S_{NO_2}$  的操作变量。

面对污水处理过程的强非线性、时变性等特点,本文采用基于 SSA 优化的变论域模糊 PID 控制器来解决  $S_{O_5}$  和  $S_{NO_2}$  的精确跟踪控制问题。

$$O_{OCI} = A_{AE} + P_{PE} \quad (3)$$

$$A_{AE} = \frac{S_{O,sat}}{T \times 1.8 \times 1000} \int_{t_0}^{t_f} \sum_{i=1}^5 V_i K_{Lai}(t) dt \quad (4)$$

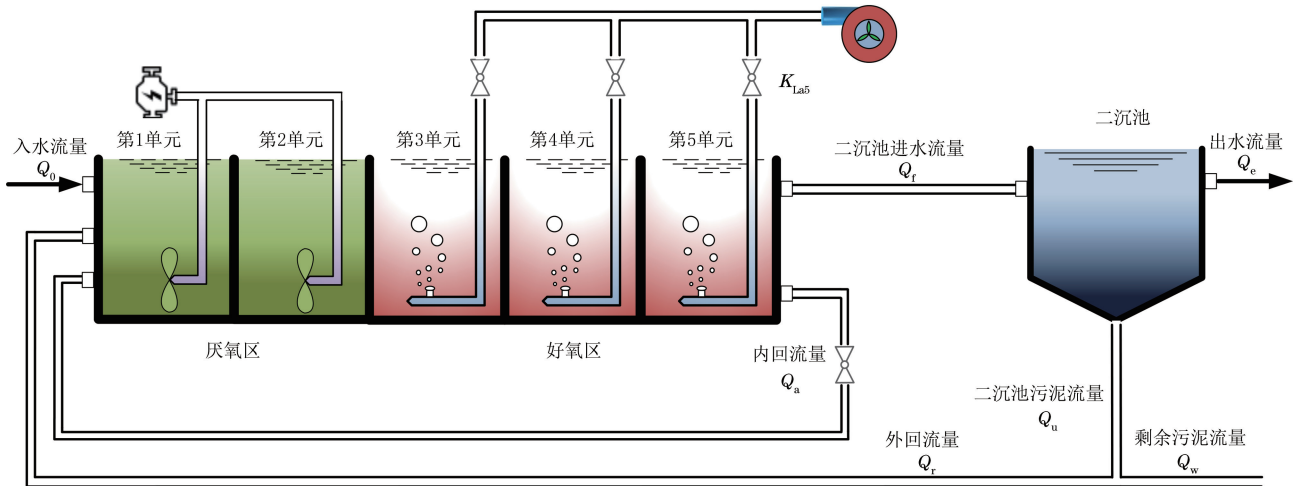


图 1 BSM1 模型结构

Fig.1 BSM1 model structure

$$P_{PE} = \frac{1}{T \times 1000} \int_{t_0}^{t_f} [4Q_a(t) + 8Q_e(t) + 50Q_w(t)] dt \quad (5)$$

式中： $S_{O,sat}$  为溶解氧饱和浓度； $T$  为采样周期； $t_0$  为开始时刻； $t_f$  为结束时刻； $K_{Lai}(t)$  为第  $i$  个单元的曝气量； $Q_w(t)$  为剩余污泥流量。

$$E_{EQI} = \frac{1}{T \times 1000} \int_{t_0}^{t_f} [2T_{TSS}(t) + C_{COD}(t) + 3S_{NKj}(t) + 10S_{NO}(t) + 2B_{BOD_5}(t)] Q_e(t) dt \quad (6)$$

式中： $T_{TSS}(t)$  为固体悬浮物的浓度； $C_{COD}(t)$  为化学需氧量； $S_{NKj}(t)$  为凯氏氮的浓度； $S_{NO}(t)$  为硝态氮的浓度； $B_{BOD_5}(t)$  为 5 日生化需氧量； $Q_e(t)$  为出水流量。

## 2 SSA 优化的变论域模糊 PID 控制器设计

污水处理过程是一个强非线性和时变性的复杂动态系统,难以建立精确的对象模型。变论域模糊 PID 控制器不依赖于精确的被控对象模型,并且根据实际误差采用伸缩因子对模糊论域进行调整,间接增加了控制规则数,实现了控制器的动态调节,因此适用于污水处理过程。

SSA 具有寻优能力强、局部最优逃逸能力强等优点<sup>[19]</sup>,而且传统变论域模糊 PID 控制器的初始参数值、量化因子和比例因子是随机设置的,为提高控制器精度,本文利用 SSA 对 PID 初始参数值  $K_{p0}$ 、 $K_{i0}$ 、 $K_{d0}$ 、量化因子  $K_e$ 、 $K_{ec}$  和比例因子  $K_{up}$ 、 $K_{ui}$ 、 $K_{ud}$  进行离线寻优。针对  $S_{O,5}$  和  $S_{NO,2}$  的控制

问题,本文设计两个 SSA 优化的变论域模糊 PID 控制器。 $S_{O,5}$  的控制器输入为  $S_{O,5}$  设定值和实际  $S_{O,5}$  之间的误差和误差变化率,输出为  $K_{La5}$ 。 $S_{NO,2}$  的控制器输入为  $S_{NO,2}$  设定值和实际  $S_{NO,2}$  之间的误差和误差变化率,输出则为  $Q_a$ 。 $S_{O,5}$  和  $S_{NO,2}$  控制过程主要由两部分组成,包括两次离线优化过程和在线控制过程。第一次离线优化为 PID 初始参数寻优,以获得 PID 最优初始参数值;第二次离线优化为量化因子和比例因子寻优,以获得最优量化因子和比例因子。基于模糊规则自适应调整模糊论域,在线调整控制器参数,实现污水处理过程在线控制。基于 SSA 变论域模糊 PID 控制器的污水处理优化控制结构如图 2 所示。

### 2.1 变论域模糊 PID 控制器设计

以  $S_{O,5}$  控制器为例说明 SSA 变论域模糊 PID 控制器的设计过程。修正量  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  的模糊控制规则参考文献[20],控制器可根据  $S_{O,5}$  的实时误差在线调整输出大小,实现了 PID 参数自适应调整。

变论域模糊 PID 的关键是确定合适的伸缩因子。伸缩因子的调整主要有基于函数和基于模糊规则的调整方法,基于函数的伸缩因子控制效果易受函数模型及其参数的影响,而基于模糊规则的方法具有更好的适应性,避免了基于函数的方法在构造函数中的不确定性和随机性导致控制精度下降的问题,并且满足了伸缩因子的对偶性、单调性、协调性和避零性等<sup>[21-22]</sup>。因此,本文采用基于模糊规则<sup>[23]</sup>的伸缩因子调整方法。

本文设计的伸缩因子调整单元是二输入三输出的控制器,输入为  $S_{O,5}$  的误差  $e(t)$  和误差变化率  $e_c(t)$ ,输出为误差模糊论域的伸缩因子  $\alpha_1(t)$ 、误差变化率模糊论域的伸缩因子  $\alpha_2(t)$  以及输出模糊

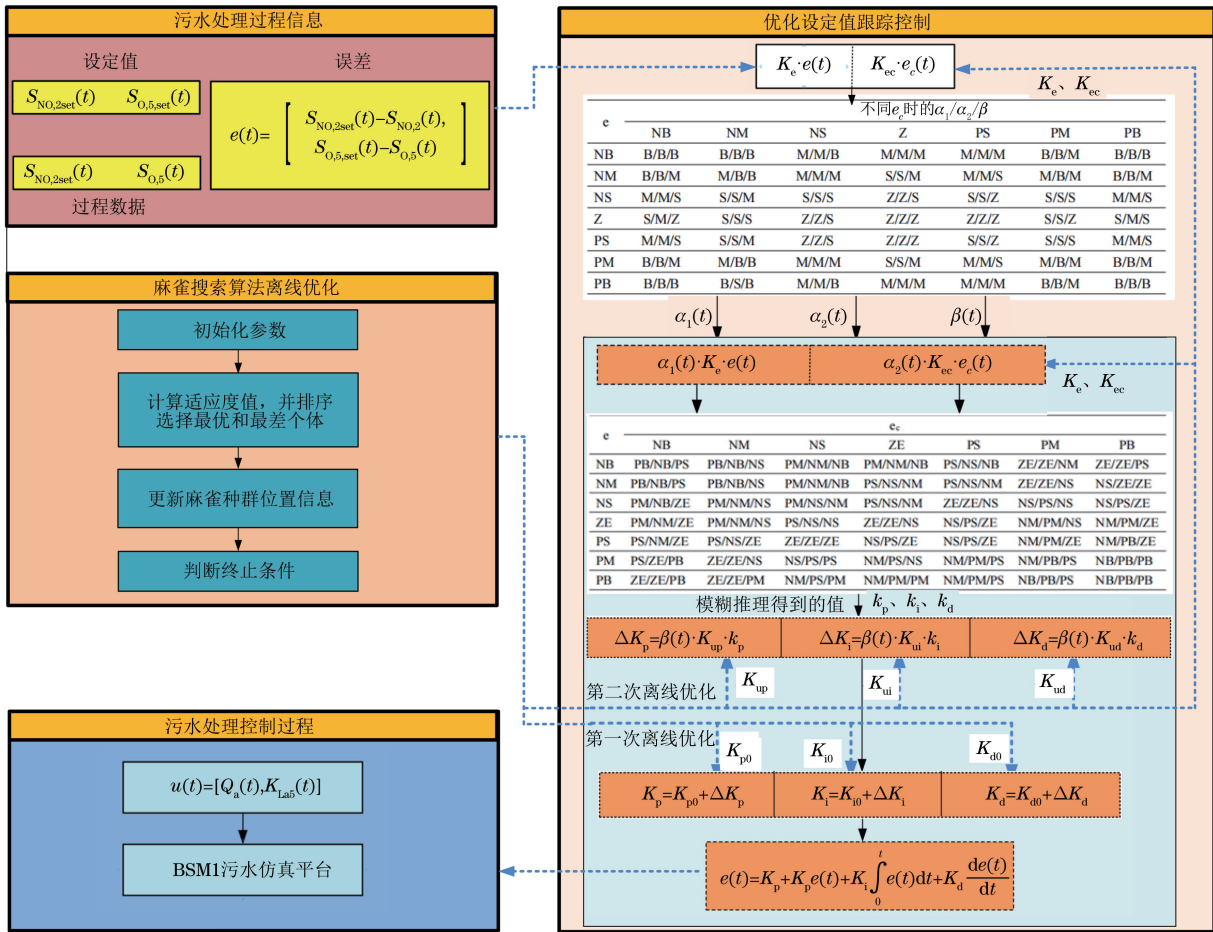


图 2 基于 SSA 变论域模糊 PID 的污水处理优化控制结构

Fig.2 Optimal control structure of wastewater treatment based on SSA variable discourse domain fuzzy PID

论域的伸缩因子  $\beta(t)$ 。将  $S_{O_5}$  误差  $e(t)$  和误差变化率  $e_c(t)$  的量化因子  $K_e$  和  $K_{ec}$  分别乘以  $\alpha_1(t)$ 、 $\alpha_2(t)$ ，将比例因子  $K_{up}$ 、 $K_{ui}$ 、 $K_{ud}$  分别乘以  $\beta(t)$ ，即可实现控制器输入和输出模糊论域的自适应伸缩和扩张。

### 2.2 PID 初始参数值寻优

PID 3 个初始参数值  $K_{p0}$ 、 $K_{i0}$ 、 $K_{d0}$  被视为麻雀的位置信息，故麻雀个体位置向量维数为 3 维，初始值随机产生，其表达式如式(7)所示：

$$x(i, j) = l_{lb} + (u_{ub} - l_{lb}) \times \text{rand}(0, 1) \quad (7)$$

式中： $x(i, j)$  代表  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ ； $l_{lb}$  和  $u_{ub}$  为上下界。

适应度函数值是评价麻雀个体位置好坏的标准，其形式如式(8)所示：

$$J = 0.01 \cdot \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (8)$$

式中： $e(t)$  为系统误差。

寻优过程中以 PID 作为控制器，将每代中所有麻雀个体代入式(8)得到相应适应度值，根据适应度值大小将种群个体进行排序，再更新麻雀种群位置

信息，直到满足迭代停止条件，输出 PID 初始参数最优值，并将其作为  $S_{O_5}$  的 SSA 变论域模糊 PID 控制器在线调整的初始值。初始参数值寻优步骤如下：

- 1)初始化麻雀种群规模(3 维)、上下边界、变量维度、最大迭代次数、种群比例；
- 2)随机生成麻雀种群，确定目标适应度值；
- 3)计算每个麻雀的适应度值，并选出全局最优和最差个体；
- 4)更新麻雀种群位置；
- 5)判断算法是否达到最大迭代次数，若满足则退出，否则返回步骤 3)；
- 6)输出最优解。

### 2.3 二次寻优

量化因子和比例因子的作用是控制系统的性能，确定合适的参数值十分重要。 $K_e$  越大，使得误差的控制作用增强，直接导致系统超调增大。 $K_{ec}$  越小，使得模糊集的隶属函数宽度增加，控制精度下降。比例因子过小则使得系统响应时间加长，并容易引起系统振荡。

为有效利用第一次离线优化得到的先验信息,二次寻优采用第一次离线优化得到的最优 PID 初始参数值,在此参数值基础上,变论域模糊 PID 控制器自适应调整控制器参数。利用 SSA 进行二次离线寻优,与第一次离线优化的区别在于二次寻优

过程中以变论域模糊 PID 为控制器,并且有 5 个参数  $K_e$ 、 $K_{ec}$ 、 $K_{up}$ 、 $K_{ui}$ 、 $K_{ud}$  需要优化,每个参数作为麻雀个体位置信息,故算法初始种群维数为 5 维。SSA 优化变论域模糊 PID 控制器的基本原理如图 3 所示。

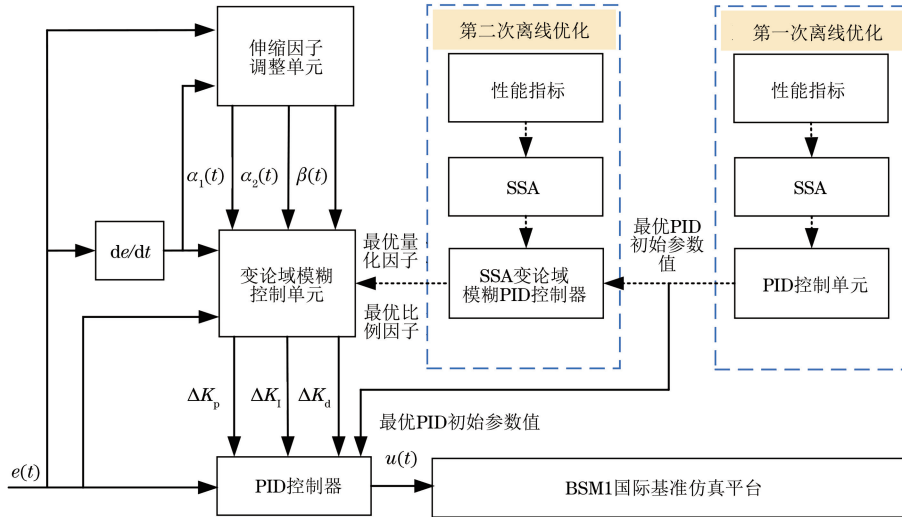


图 3 SSA 优化的变论域模糊 PID 控制器原理图

Fig. 3 SSA optimization variable theory domain fuzzy PID controller schematic

### 2.4 SSA 变论域模糊 PID 参数设计

本文设置  $S_{O,5}$ 、 $S_{NO,2}$  控制器的  $e(t)$  和  $e_c(t)$  模糊论域分别为  $[-6, 6]$ 、 $[-3, 3]$ , 输出模糊论域为  $[-6, 6]$ , 伸缩因子  $\alpha_1(t)$ 、 $\alpha_2(t)$ 、 $\beta(t)$  的模糊论域分别为  $[0.5, 2]$ 、 $[0.5, 2]$ 、 $[0.4, 1.5]$ 。根据先验知识确定 PID 初始参数值、量化因子和比例因子的置信区间并作为算法的参数优化范围。

为了减小统计量,本文隶属函数采用均匀分布的三角形隶属函数。为将模糊集合转换为实际物理值,需要进行解模糊化。重心法是根据模糊集合的标准权值分布进行推理输出的,使得输出推理更为平滑,有效避免了信息丢失,因此本文选择重心法解模糊化计算公式如式(9)所示:

$$v_o = \frac{\sum_{k=1}^m v_k u_v(v_k)}{\sum_{k=1}^m u_v(v_k)} \quad (9)$$

式中:  $v_k$  为输出模糊论域中第  $k$  个点; 输出模糊论域一共有  $m$  个点;  $u_v(v_k)$  为该点处的隶属度函数值。

### 2.5 变论域模糊 PID 控制器稳定性分析

假设某系统为<sup>[24]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(f(\mathbf{x}) + k\mathbf{u} + d) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $t$  代表时间;  $\mathbf{A}$  代表系统状态向量;  $\mathbf{B}$  代表系统输入向量;  $\mathbf{C}$  代表系统输出向量;  $f(\mathbf{x})$  代表未知连续有界光滑标量函数, 设  $|f(\mathbf{x})| \leq F_b(\mathbf{x})$ ,

$F_b(\mathbf{x})$  代表上界函数;  $k$  代表未知常量;  $\mathbf{u}$  代表输入量;  $d$  代表外界干扰。

假设系统参考值为  $\mathbf{y}_r = [\mathbf{y}_r, \mathbf{y}_r]^T \in \mathbb{R}^n$ , 故系统误差为  $\mathbf{e} = \mathbf{y}_r - \mathbf{y} = [\mathbf{e}, \mathbf{e}]^T \in \mathbb{R}^n$ , 当  $f(\mathbf{x})$  和  $k$  可知、 $d$  有界时, 定义 Lyapunov 函数  $V_1 = \mathbf{e}^T \mathbf{e} > 0$ , 进一步得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \mathbf{e}^T \dot{\mathbf{e}} = \mathbf{e}^T (\mathbf{y}_r - \dot{\mathbf{y}}) = \\ &= \mathbf{e}^T \{ \mathbf{y}_r - \mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{C}\mathbf{B}f(\mathbf{x}) - \mathbf{C}\mathbf{B}k\mathbf{u} - \mathbf{C}\mathbf{B}d \} \end{aligned} \quad (11)$$

令  $\mathbf{y}_r - \mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{C}\mathbf{B}f(\mathbf{x}) - \mathbf{C}\mathbf{B}k\mathbf{u}^* - \mathbf{C}\mathbf{B}d = -\mathbf{H}\mathbf{e}$ , 则  $\dot{V}_1 = -\mathbf{e}^T \mathbf{H}\mathbf{e} < 0$ , 故闭环系统理想控制率为:

$$\mathbf{u}^* = \frac{\mathbf{y}_r - \mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{C}\mathbf{B}f(\mathbf{x}) - \mathbf{C}\mathbf{B}d + \mathbf{H}\mathbf{e}}{\mathbf{C}\mathbf{B}k} \quad (12)$$

式中:  $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h^{11} & h^{12} & \cdots & h^{1n} \\ h^{21} & h^{22} & \cdots & h^{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h^{n1} & h^{n2} & \cdots & h^{nm} \end{bmatrix}$ , 各项系数是使系

统特征多项式  $m(s) = s^n + h^m s^{n-1} + \cdots + h^{11}$  稳定的值。然后得到系统闭环误差关系式:

$$\begin{aligned} \mathbf{e} &= \mathbf{y}_r - \mathbf{y} = \\ &= \mathbf{A}\mathbf{y}_r + \mathbf{B}\mathbf{y}_r - \mathbf{C}[\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}(f(\mathbf{x}) + k\mathbf{u} + d)] = \\ &= (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{H})\mathbf{e} + \mathbf{C}\mathbf{B}[k(\mathbf{u}^* - \mathbf{u}) - f(\mathbf{x}) - d] \end{aligned} \quad (13)$$

存在某正定对称矩阵  $M$ , 使得下面关系式成立:

$$(A - BH)^T M + M(A - BH) = -Q \quad (14)$$

式中:  $Q$  为正定矩阵。

假设  $1 \leq k_l \leq k \leq k_d$ ,  $k_l$  和  $k_d$  为已知常数; 干扰  $d$  的上界  $N$ , 其中  $|d(t)| \leq N < D < \infty$ ,  $D$  为已知常数。

在变论域模糊 PID 控制器中, 取控制率为:

$$u = u_c + u_s \quad (15)$$

式中:  $u_c$  为变论域模糊 PID 控制项, 通过前面所述的模糊化、模糊推理以及重心法解模糊化得到;  $u_s$  为监督补偿控制项, 为了消除外界干扰和模糊逼近误差产生的影响。

定义 Lyapunov 函数:

$$V_2 = \frac{1}{2} e^T M e \quad (16)$$

故:

$$\dot{V}_2 = -\frac{1}{2} e^T Q e + e^T M B k (u - u^*) \leq -\frac{1}{2} e^T Q e + |e^T M B| [ |F_b(x)| + |\hat{y}_r| + |H e| + k_d |u_c| ] - e^T M B k u_s \quad (17)$$

取补偿率控制器为:

$$u_s = \begin{cases} 0, & |e^T M B| (F_b(x) + |\hat{y}_r| + |H e| + k_d |u_c|) < \frac{1}{2} e^T Q e \\ \text{sgn}(e^T M B) \left[ \frac{1}{k_l} (F_b(x) + |\hat{y}_r| + |H e| + k_d |u_c|) \right], & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $\text{sgn}(\cdot)$  为符号函数。

故在  $\|e\| = 0$  时,  $\dot{V}_2 = 0$ , 在其他情况之下,  $\dot{V}_2 < 0$ , 在补偿项  $u_s$  作用下系统是渐近稳定的。 $u_s$  是在函数  $f(x)$  和  $k$  已知的条件下给出的一类“粗调”控制项, 而变论域模糊 PID 控制器中伸缩因子可以实现控制项的“细调”, 最终使得闭环系统达到稳定。因此需要寻找合适的伸缩因子, 文献[25]提供一种伸缩因子以证明控制器稳定性, 这里不再赘述, 最后得到在相应条件下,  $\lim_{t \rightarrow \infty} \|e\| = 0$ , 从而证明系统成为最终有界系统, 达到系统稳定。

### 3 仿真实验

为了验证所提控制方法的有效性, 本文设置了污水处理过程的应用仿真实验, 并与基于自适应伸缩因子变论域模糊 PID 控制器 (NEVUFP)<sup>[26]</sup>、模糊 PID

和常规 PID 控制方法进行对比。常规 PID 控制系统中溶解氧控制器的  $K_p, K_i, K_d$  的参数分别设置为 200、60、0.5, 硝态氮控制器的  $K_p, K_i, K_d$  的参数值分别设置为 30 000、700、500。选取晴天污水数据, 每隔 60 min 采样一次, 获得 336 组数据, 计算绝对误差积分 (IAE) 并进行比较分析, 计算公式如式 (19) 所示:

$$I_{IAE} = \sum_{i=1}^{i=n} |e| \quad (19)$$

式中:  $e$  为实际值与设定值之间的误差;  $n = 336$ 。

#### 3.1 恒值跟踪控制

将  $S_{O_2}$  和  $S_{NO_2}$  的设定值固定为 1 mg/L, 进行恒值跟踪控制。同时将 DE<sup>[27]</sup>、GA<sup>[28]</sup> 算法优化变论域模糊 PID 控制器, 并应用于  $S_{O_2}$  控制器中初始 PID 参数优化过程, 得到它们各自的适应度值变化曲线。 $S_{O_2}$  和  $S_{NO_2}$  控制效果如图 4、图 5 所示, 适应度值变化曲线如图 6 所示。

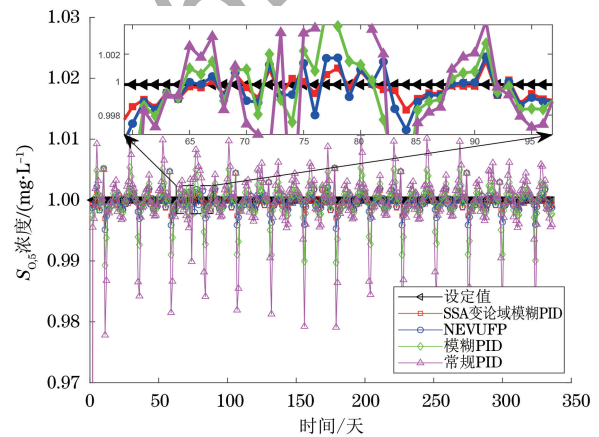


图 4  $S_{O_2}$  控制效果图

Fig. 4 Control effect diagram of  $S_{O_2}$

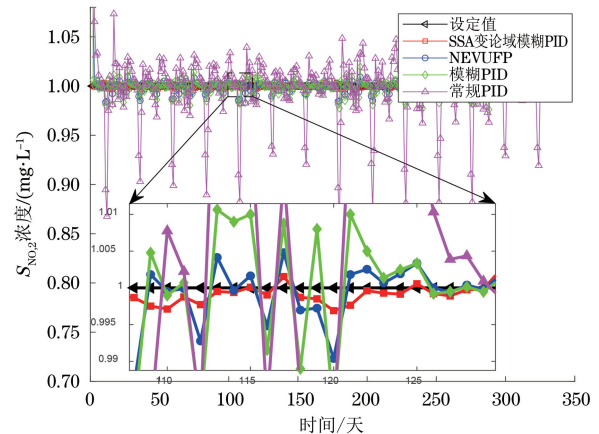


图 5  $S_{NO_2}$  控制效果图

Fig. 5 Control effect diagram of  $S_{NO_2}$

从图 4、图 5 可以看出, 本文方法控制效果明显优于常规 PID 控制器、模糊 PID 控制器和 NEVUFP 控制器。表 1 是不同控制方法下的跟踪控制精度对比结果, 可以看出本文所提控制器的

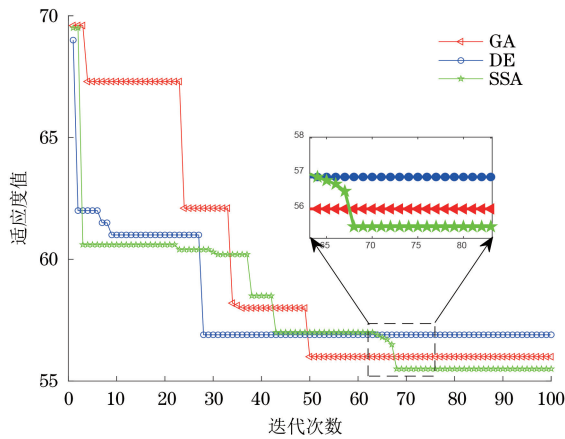


图 6 适应度值变化曲线

Fig.6 Fitness value change curve

IAE 数值最小,对于  $S_{O_5}$ 、 $S_{NO_2}$  的控制问题,具有更好的跟踪控制精度。

表 1 恒值跟踪误差的对比结果

Table 1 Comparison results of constant tracking error

方法	IAE	
	$S_{O_5}$	$S_{NO_2}$
常规 PID	1.682 0	10.228 4
模糊 PID	1.038 3	2.978 6
NEVUFPP	0.897 6	1.624 5
本文方法	0.802 2	1.038 3

从图 6 可以看出,DE 寻优速度最快,在第 28 次迭代就找到了最优解,但是易陷入局部最优;SSA 较好的全局搜索和跳出局部最优能力,使得 SSA 优化变论域模糊 PID 参数时,在搜索空间中进行了广泛探索,适应度值变化较多;虽然 SSA 寻优速度比 DE 和 GA 慢,但是其全局搜索和跳出局部最优能力却是最强的,收敛得到的适应度值最小,即离线优化得到的参数值更优。表 2 是在 DE、GA、SSA 优化变论域模糊 PID 控制器下的跟踪误差对比结果,可以看出本文所提控制器的 IAE 数值最小,对于  $S_{O_5}$  和  $S_{NO_2}$  的控制问题,SSA 变论域模糊 PID 控制器具有更好的跟踪控制精度,同时也验证了 SSA 更适合于解决污水处理过程中变论域模糊 PID 参数优化问题。

表 2 不同方法优化的控制器跟踪误差对比结果

Table 2 Comparison results of tracking error for controllers optimized by different methods

方法	IAE	
	$S_{O_5}$	$S_{NO_2}$
DE 变论域模糊 PID	0.893 1	1.364 7
GA 变论域模糊 PID	0.831 1	1.144 6
本文方法	0.802 2	1.038 3

### 3.2 动态变值跟踪控制

污水处理优化控制的目的是为有效降低能耗并提升出水水质,减少污水对环境的负面影响,提高淡水资源的循环利用。为实现该目的不仅与上层多目标优化算法性能有关,还与下层控制器性能有关。为研究控制器动态变值跟踪控制效果,并探讨控制器跟踪精度与 OCI、EQI 的关系,本文将污水处理仿真过程总共 14 天分为 112 个周期,每个优化周期是 3 h,溶解氧浓度设定值  $S_{O_5, set}$  和硝态氮浓度设定值  $S_{NO_2, set}$  的优化范围分别为 0.4~3 mg/L、0.4~2 mg/L,利用融合多策略的多目标麻雀算法对各优化周期  $S_{O_5}$ 、 $S_{NO_2}$  的设定值进行寻优,获得溶解氧和硝态氮最优设定值,得到的最优设定值是动态变化的,最后使用 SSA 变论域模糊 PID 跟踪器进行跟踪控制,同时利用 NEVUFPP、模糊 PID 和常规 PID 进行对比仿真实验。 $S_{O_5}$ 、 $S_{NO_2}$  控制效果和跟踪误差如图 7~图 10 所示。

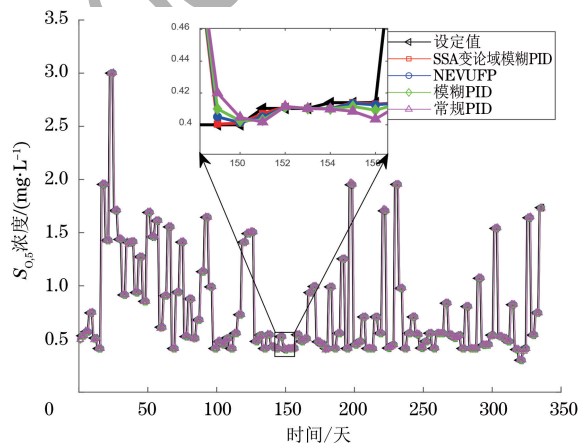


图 7  $S_{O_5}$  动态控制效果图

Fig.7 Dynamic control effect diagram of  $S_{O_5}$

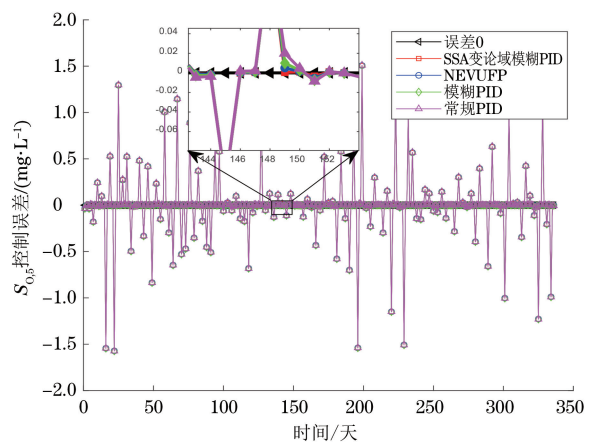


图 8  $S_{O_5}$  跟踪误差图

Fig.8 Tracking error diagram of  $S_{O_5}$

表 3 为在动态变值跟踪控制下的 IAE、OCI、EQI 数据对比结果,由表 3 可以看出,SSA 变论域

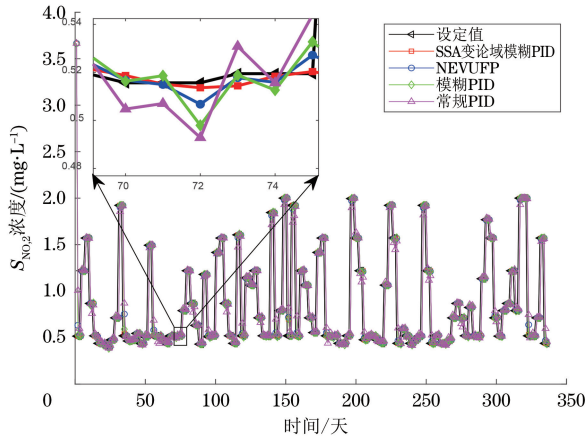


图 9  $S_{NO_2}$  动态控制效果图

Fig. 9 Dynamic control effect diagram of  $S_{NO_2}$

模糊 PID 控制器在动态变值的情况下展现出了更优的稳定性,跟踪误差最小,具有更好的跟踪控制效果。在使用融合多策略的多目标麻雀算法优化  $S_{O_5}$ 、 $S_{NO_2}$  的设定值的基础上,基于 SSA 变论域模糊 PID 控制方法下的 OCI 数值为 3 590.52, EQI 数值为 6 313.43,而基于 PID 控制方法下的 OCI 数值为 3594.37, EQI 数值为 6317.50。由

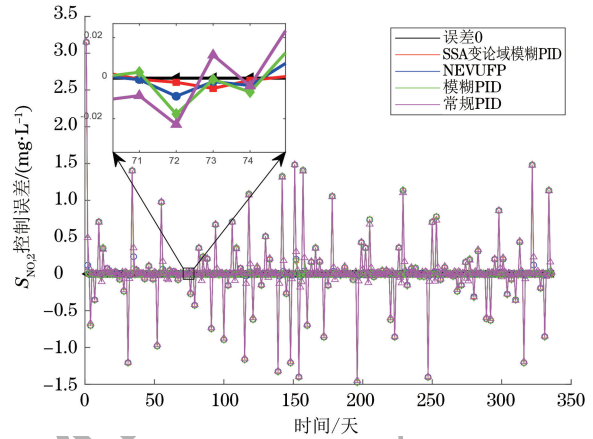


图 10  $S_{NO_2}$  跟踪误差图

Fig. 10 Tracking error diagram of  $S_{NO_2}$

此可得,本文所提控制方法进一步降低了能耗并提升了出水水质。基于 DE、GA 两种变论域模糊 PID 控制方法下的 OCI 数值分别为 3 592.34、3 591.71,进一步可以看出,SSA 的引导机制和预警机制使得算法具有更好的全局搜索和跳出局部最优的能力,更适合污水处理过程中变论域模糊 PID 控制器参数的优化问题。

表 3 动态变值数据对比结果

Table 3 Results of comparison of dynamic variable data

方法	IAE		OCI	EQI
	$S_{O_5}$	$S_{NO_2}$		
常规 PID	45.576 5	58.060 0	3 594.37	6 317.50
模糊 PID	41.128 1	51.508 6	3 592.94	6 315.78
NEVUFP	39.743 5	50.018 3	3 592.07	6 314.93
DE 变论域模糊 PID	40.632 1	50.647 4	3 592.34	6 314.86
GA 变论域模糊 PID	39.336 9	50.328 7	3 591.71	6 314.12
本文方法	38.848 1	49.516 6	3 590.02	6 313.43

#### 4 结束语

针对污水处理过程降低能耗和改善出水水质的问题,设计一种新型的基于 SSA 优化算法变论域模糊 PID 控制器,实现对  $S_{O_5}$ 、 $S_{NO_2}$  优化设定值的动态跟踪控制。与 NEVUFP、模糊 PID 和常规 PID 控制器相比,SSA 变论域模糊 PID 控制器具有更高的运行效率,这是由于所提控制器集成了算法优化模块和在线自适应调整模块。在优化模块中,利用 SSA 离线优化 PID 初始参数值和量化因子、比例因子,获得了满意的初始参数值。在自适应调整模块中,控制器根据当前时刻系统误差,自适应调整论域范围,提高了控制精度。基于 BSM1 平台的污水处理多目标优化控制应用中,所提控制器能够精确地跟踪溶解氧和硝态氮最优设定值,具有较高的稳定

性、精确性,进一步提高了出水水质并降低了运行能耗。下一步研究将对 SSA 算法进行改进,以提高其性能和收敛速度,同时将污水处理过程分成若干周期,在每个周期内对控制器参数进行优化,以适应系统动态变化,为污水处理优化控制提供更出色的解决方案。

#### 参考文献

[1] 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.

[2] 赵杨,熊伟丽. 基于多策略自适应差分进化算法的污水处理过程多目标优化控制[J]. 化工学报, 2021, 72(4): 2167-2177.

ZHAO Y, XIONG W L. Multi-objective optimization control of wastewater treatment process based on multi-strategy adaptive differential evolution algorithm[J]. CIESC Journal,

- 2021, 72(4): 2167-2177. (in Chinese)
- [3] ZHOU H B, QIAO J F. Multiobjective optimal control for wastewater treatment process using adaptive MOEA/D[J]. *Applied Intelligence*, 2019, 49(3): 1098-1126.
- [4] 庄子杰, 范之国, 金海红, 等. 基于水体衰减系数反演的水下图像复原方法[J]. *计算机工程*, 2023, 49(1): 258-269. ZHUANG Z J, FAN Z G, JIN H H, et al. Underwater image restoration method based on water attenuation coefficient inversion [J]. *Computer Engineering*, 2023, 49(1): 258-269. (in Chinese)
- [5] QIAO J F, ZHANG W. Dynamic multi-objective optimization control for wastewater treatment process[J]. *Neural Computing and Applications*, 2018, 29(11): 1261-1271.
- [6] 杨壮, 杨翠丽, 顾镬, 等. 多目标进化算法的污水处理过程优化控制[J]. *控制理论与应用*, 2020, 37(1): 169-175. YANG Z, YANG C L, GU K, et al. Multi-objective evolutionary algorithm for wastewater treatment process optimization control [J]. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(1): 169-175. (in Chinese)
- [7] TZONEVA R. Optimal PID control of the dissolved oxygen concentration in the wastewater treatment plant [C] // *Proceedings of AFRICON'07*. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2007: 1-7.
- [8] BELCHIOR C A C, ARAÚJO R A M, 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: 152-162.
- [9] WAHAB N A, KATEBI R, BALDERUD J. Multivariable PID control design for activated sludge process with nitrification and denitrification[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2009, 45(3): 239-248.
- [10] 石优, 林琳, 吴岩. 基于布谷鸟搜索的模糊 PID 拥塞控制方法[J]. *计算机工程*, 2020, 46(11): 238-245. SHI Y, LIN L, WU Y. Fuzzy PID congestion control method based on cuckoo search [J]. *Computer Engineering*, 2020, 46(11): 238-245. (in Chinese)
- [11] 王述彦, 师宇, 冯忠绪. 基于模糊 PID 控制器的控制方法研究[J]. *机械科学与技术*, 2011, 30(1): 166-172. WANG S Y, SHI Y, FENG Z X. A method for controlling a loading system based on a fuzzy PID controller [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2011, 30(1): 166-172. (in Chinese)
- [12] 吴敏, 王晓璐, 姜玉东, 等. 深度确定性策略梯度与模糊 PID 的协同温度控制[J]. *控制理论与应用*, 2022, 39(12): 2358-2365. WU M, WANG X L, JIANG Y D, et al. Collaborative temperature control of deep deterministic policy gradient and fuzzy PID [J]. *Control Theory & Applications*, 2022, 39(12): 2358-2365. (in Chinese)
- [13] 赵涛岩, 曹江涛, 李平, 等. 区间二型模糊免疫 PID 在环己烷无催化氧化温度控制系统中的应用[J]. *化工学报*, 2022, 73(7): 3166-3173. ZHAO T Y, CAO J T, LI P, et al. Application of interval type-2 fuzzy immune PID controller to temperature control system for uncatalysed oxidation of cyclohexane [J]. *CIESC Journal*, 2022, 73(7): 3166-3173. (in Chinese)
- [14] GHADIMI N. A new hybrid algorithm based on optimal fuzzy controller in multimachine power system [J]. *Complexity*, 2015, 21(1): 78-93.
- [15] ZHANG M, ZHENG M, LI Y Q. The application of variable universe fuzzy PID controller in computer-aided alignment of lithography projector [C] // *Proceedings of 2013 International Conference on Optical Instruments and Technology*. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2013: 134-142.
- [16] GAO Q, LU Z X, XUE J L, et al. Fuzzy-PID controller with variable universe for tillage depth control on tractor-implement [J]. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*, 2021, 21(1): 19-29.
- [17] CAO Z L, ZHENG S. MR-SAS and electric power steering variable universe fuzzy PID integrated control [J]. *Neural Computing and Applications*, 2019, 31(4): 1249-1258.
- [18] 杨翠丽, 武战红, 韩红桂, 等. 城市污水处理过程优化设定方法研究进展[J]. *自动化学报*, 2020, 46(10): 2092-2108. YANG C L, WU Z H, HAN H G, et al. Perspectives on optimal setting methods for municipal wastewater treatment processes [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(10): 2092-2108. (in Chinese)
- [19] TANG A D, ZHOU H, HAN T, et al. A chaos sparrow search algorithm with logarithmic spiral and adaptive step for engineering problems [J]. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2022, 130(1): 331-364.
- [20] 马彦, 丁浩, 牟洪元, 等. 基于模糊 PID 算法的动力电池液体冷却策略[J]. *控制理论与应用*, 2021, 38(5): 549-560. MA Y, DING H, MU H Y, et al. Liquid cooling strategy of power battery based on fuzzy PID algorithm [J]. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(5): 549-560. (in Chinese)
- [21] 邵诚, 董希文, 王晓芳. 变论域模糊控制器伸缩因子的选择方法[J]. *信息与控制*, 2010, 39(5): 536-541. SHAO C, DONG X W, WANG X F. Selection method of the contraction-expansion factor of variable universe fuzzy controller [J]. *Information and Control*, 2010, 39(5): 536-541. (in Chinese)
- [22] 刘洋, 行鸿彦, 侯天浩. 四旋翼无人机串级变论域模糊 PID 姿态控制研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(10): 46-52. LIU Y, XING H Y, HOU T H. Research on attitude control of cascade variable universe fuzzy PID for quadrotor UAV [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(10): 46-52. (in Chinese)
- [23] 谢雨岑, 邹见效, 彭超. 基于变论域模糊增量理论的质子交换膜燃料电池温度控制[J]. *控制理论与应用*, 2019, 36(3): 428-435. XIE Y C, ZOU J X, PENG C. Temperature control of PEMFC system based on variable universe fuzzy incremental theory [J]. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(3): 428-435. (in Chinese)
- [24] 路永坤. 稳定变论域模糊控制系统设计方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2010. LU Y K. Research on design method of stable variable universe fuzzy control system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese)
- [25] 钱虹, 邹明耀. 变论域自适应模糊非线性控制在蒸汽发生器液位控制中的应用[J]. *上海交通大学学报*, 2023, 57(1): 116-126. QIAN H, ZOU M Y. Application of adaptive fuzzy nonlinear control with variable universe in liquid level control of steam generator [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2023, 57(1): 116-126. (in Chinese)
- [26] 蒋伟, 刘纲, 王涛, 等. 基于自适应伸缩因子的变论域模糊 PID 振动控制方法[J]. *工程力学*, 2021, 38(11): 23-32. JIANG W, LIU G, WANG T, et al. Variable universe fuzzy pid control based on adaptive contracting-expanding factors [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(11): 23-32. (in Chinese)
- [27] RAMESH KHAPARDE A, ALASSERY F, KUMAR A, et al. Differential evolution algorithm with hierarchical fair competition model [J]. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 2022, 33(2): 1045-1062.
- [28] KATOCH S, CHAUHAN S S, KUMAR V. A review on genetic algorithm: past, present, and future [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2021, 80(5): 8091-8126.