



中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

# 控制与决策

CONTROL AND DECISION



## 基于改进麻雀搜索算法的分数阶PID参数整定

陈炫儒, 吴立飞, 杨晓忠

引用本文:

陈炫儒, 吴立飞, 杨晓忠. 基于改进麻雀搜索算法的分数阶PID参数整定[J]. *控制与决策*, 2024, 39(4): 1177–1184.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1360>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于PID参数整定的线性自抗扰控制参数整定

Tuning of linear active disturbance rejection controllers based on PID tuning rules  
*控制与决策*. 2021, 36(7): 1592–1600 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1408>

#### 嵌入Circle映射和逐维小孔成像反向学习的鲸鱼优化算法

Whale optimization algorithm for embedded Circle mapping and one-dimensional oppositional learning based small hole imaging  
*控制与决策*. 2021, 36(5): 1173–1180 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1362>

#### 双重驱动的果蝇优化算法及其在PID控制器中的应用

Double drive fruit fly optimization algorithm and its application in PID controller  
*控制与决策*. 2021, 36(9): 2225–2233 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0046>

#### 一种自适应拟牛顿-状态转移混合智能优化算法及应用

A hybrid state transition optimization algorithm based on adaptive quasi-newton method and its application  
*控制与决策*. 2021, 36(10): 2451–2458 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0214>

#### 基于多种群分解预测的动态多目标引力搜索算法

Dynamic multi-objective gravitational searching algorithm based on multi-population decomposition prediction  
*控制与决策*. 2021, 36(12): 2910–2918 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1002>

# 基于改进麻雀搜索算法的分数阶PID参数整定

陈炫儒<sup>1</sup>, 吴立飞<sup>2</sup>, 杨晓忠<sup>1†</sup>

(1. 华北电力大学 数理学院, 北京 102206; 2. 华北电力大学 控制与计算机工程学院, 北京 102206)

**摘要:** 针对分数阶PID控制器的设计问题, 提出一种改进麻雀搜索算法(ISSA)对分数阶PID控制器进行参数整定. 在麻雀搜索算法(SSA)中引入Chebyshev混沌映射, 提高SSA的种群多样性和全局搜索能力; 采用自适应 $t$ 分布和萤火虫算法, 设置转换概率 $p$ 使二者交替执行, 提高SSA的收敛精度和寻优性能. 对10个基准测试函数进行寻优, 结果表明相较于已有的4种经典算法, ISSA在收敛速度、收敛精度、全局搜索能力等方面均有较大提升. 最后, 对两类被控系统进行仿真分析, 相比现有成果, 证实了ISSA算法对求解分数阶PID控制器参数整定问题的有效性和实用性.

**关键词:** 分数阶PID控制器; 改进麻雀搜索算法; 自适应 $t$ 分布; 萤火虫算法; 基准函数寻优; 参数整定

**中图分类号:** TP18; TP273 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.13195/j.kzyjc.2022.1360

**引用格式:** 陈炫儒, 吴立飞, 杨晓忠. 基于改进麻雀搜索算法的分数阶PID参数整定[J]. 控制与决策, 2024, 39(4): 1177-1184.

## Fractional order PID parameter tuning based on improved sparrow search algorithm

CHEN Xuan-ru<sup>1</sup>, WU Li-fei<sup>2</sup>, YANG Xiao-zhong<sup>1†</sup>

(1. School of Mathematics and Physics, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Aiming at the design problem of a fractional order PID controller, an improved sparrow search algorithm (ISSA) is proposed to adjust the parameters of the fractional order PID controller. The Chebyshev chaotic map is introduced into sparrow search algorithm (SSA) to improve the population diversity and global search ability of the SSA. The adaptive  $t$ -distribution and firefly algorithm are adopted, and the conversion probability  $p$  is set to make them execute alternately, so as to improve the convergence accuracy and optimization performance of the SSA. The 10 benchmark functions, and the results show that compared with the existing four classical algorithms, the ISSA has a great improvement in convergence speed, convergence accuracy and global search ability. Finally, two kinds of controlled systems are simulated and analyzed. Compared with the existing results, the effectiveness and practicability of the proposed ISSA algorithm for solving the fractional order PID controller parameter tuning problem are verified.

**Keywords:** fractional order PID controller; improved sparrow search algorithm; adaptive  $t$  distribution; firefly algorithm; benchmark function optimization; parameter tuning

## 0 引言

分数阶PID (fractional order PID, FOPID)控制器的参数整定问题是当前分数阶控制领域研究的重要课题. FOPID控制器<sup>[1]</sup>与传统PID控制器相比增加了两个可调节的参数, 从而使得FOPID参数的调节更加灵活, 改善了控制系统的鲁棒性、稳定性和暂态特性, 控制效果更为优越<sup>[2]</sup>, 但也大大增加了FOPID控制器设计的难度. 凭借在工业控制领域中所具有的

整数阶不可比拟的特性<sup>[3]</sup>, FOPID控制器的设计方法已成为当前分数阶控制工程领域的前沿问题.

随着计算机技术的快速发展与现代启发式智能优化方法的兴起, 越来越多的优化方法应用于FOPID控制器的参数整定问题<sup>[4]</sup>. 文献[5]采用一种参数自适应差分进化方法完成FOPID控制器的设计; 文献[6]在FOPID的设计中引入人工蜂群算法, 简化了控制器的结构; 文献[7]基于群灰狼优化算法整定了

收稿日期: 2022-07-30; 录用日期: 2023-01-20.

基金项目: 国家自然科学基金项目(11371135); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2021MS045).

责任编辑: 陈家伟.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: yxiaoZh@ncepu.edu.cn.

FOPID的参数,并将其应用到光伏逆变器.文献[8]基于布谷鸟算法优化了FOPID控制器,并将其应用到电子节气门控制.

麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)是一种新型群智能算法<sup>[9]</sup>,该算法结构简单、收敛速度快、迭代过程稳定,受到众多学者的重视,已成功应用到众多实际问题.文献[10]对若干新型群智能算法进行对比研究,证实了麻雀搜索算法的良好寻优性能.然而,麻雀搜索算法也存在一些不足,比如在搜索过程中可能会产生对初始解的依赖性,易陷入局部最优等缺点.在实际应用过程中,研究者们针对SSA算法的缺陷做了一些相应的改进.文献[11]融合了柯西变异和反向学习机制对麻雀算法的改进,提升了抗局部极值能力,并用Wilcoxon秩和检验了改进了算法的优化性能;文献[12]引进鸡群算法的随机跟随机制优化了跟随者的位置更新,增强了算法的抗滞后功能和全域寻优特性,并对最小二乘向量机的参数进行了整定;文献[13]融合了黄金正弦和曲线自适应对算法进行改进,使用MAE排序来验证所提出改进策略的有效性,结果表明改进算法的求解精度和收敛性均有提高.

上述文献针对SSA的缺陷进行了不同程度的改进,但在FOPID控制器的设计问题中仍然存在收敛精度低、全局搜索性差等不足.文献[14]采用莱维随机步长机制对SSA改进并设计了FOPID控制器,但仍存在种群初始资源分布不均、局部极值逃逸能力较弱等问题.本文提出一种改进麻雀搜索算法(improved sparrow search algorithm, ISSA),采用Chebyshev混沌映射初始化种群,增加种群多样性;为改善搜索效果和提高全局寻优能力,应用自适应 $t$ 分布和萤火虫算法,设置转换概率 $p$ ,动态选择自适应 $t$ 分布和萤火虫算法,进一步提高ISSA的寻优搜索效果.选择10个不同的基准函数进行算法性能测试,比较ISSA与已有的4种经典算法的仿真结果,最后对两类控制系统进行仿真实验来验证ISSA算法对FOPID控制器的设计和参数整定的有效性和实用性.

## 1 麻雀搜索算法

麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)是一种新型群智能算法<sup>[9]</sup>.SSA具有控制参数较少、鲁棒性强、收敛精度较高等优点.2020年一经推出,就表现出很好的应用前景.麻雀集合矩阵为

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T,$$

$$x_i = [x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,d}]. \quad (1)$$

其中: $n$ 为种群数量, $d$ 为维数, $i = 1, 2, \dots, n$ .适应度值矩阵为

$$F_x = [f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n)]^T, \quad (2)$$

其中 $f$ 为适应度值.根据式(1)和(2),在迭代中,发现者位置将更新为

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{i,j} \cdot \exp\left(-\frac{i}{\alpha \cdot \text{iter}_{\max}}\right), & R_2 < \text{ST}; \\ X_{i,j} + Q \cdot L, & R_2 \geq \text{ST}. \end{cases} \quad (3)$$

其中: $t$ 为当前迭代数, $j = 1, 2, \dots, d$ , $\text{iter}_{\max}$ 为最大迭代次数, $X_{i,j}$ 为第 $i$ 个麻雀在第 $j$ 维中的位置, $\alpha \in (0, 1]$ 为随机数, $R_2$ ( $R_2 \in [0, 1]$ )和ST( $\text{ST} \in [0.5, 1]$ )为预警值和安全值, $Q$ 是正态分布的随机数, $L$ 是 $1 \times d$ 的矩阵.当 $R_2 < \text{ST}$ 时,此时没有捕食者,发现者需开始执行搜索.若 $R_2 \geq \text{ST}$ ,此时捕食者已经被发现,所有麻雀需要迅速转移觅食环境.加入者的位置更新为

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} Q \cdot \exp\left(\frac{X_{\text{worst}} - X_{i,j}^t}{i^2}\right), & i > \frac{n}{2}; \\ X_P^{t+1} + |X_{i,j} - X_P^{t+1}| \cdot A^+ \cdot L, & \text{otherwise}. \end{cases} \quad (4)$$

其中: $X_P$ 为发现者的最佳位置, $X_{\text{worst}}$ 为当前最差位置, $A$ 为 $1 \times d$ 的矩阵,且

$$A^+ = A^T(AA^T)^{-1}. \quad (5)$$

在种群觅食的时候,会有少量麻雀担任警戒的角色.每代从种群中随机选择SD只麻雀警戒,其位置更新的描述如下:

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{\text{best}}^t + \beta \cdot |X_{i,j}^t - X_{\text{best}}^t|, & f_i > f_b; \\ X_{i,j}^t + K \cdot \left(\frac{|X_{i,j}^t - X_{\text{worst}}^t|}{(f_i - f_{\omega}) + \varepsilon}\right), & f_i = f_b. \end{cases} \quad (6)$$

其中: $X_{\text{best}}$ 为当前最佳位置, $\beta$ 为步长控制参数, $K \in [-1, 1]$ 为随机数, $f_i$ 为麻雀的适应度值, $f_b$ 为最优适应度值, $\varepsilon$ 为常数, $K$ 为控制步长的参数.

## 2 改进麻雀搜索算法

### 2.1 Chebyshev混沌映射

Chebyshev混沌映射<sup>[15]</sup>具有良好的伪随机特性,对初始参数敏感.文献[16]对常见几种离散混沌映射进行比对分析,证明Chebyshev混沌映射的优势最为明显.因此,本文选择Chebyshev混沌映射对SSA

进行种群初始化,采用Chebyshev映射方式生成混沌变量,其迭代方式如下:

$$x_{n+1} = \cos(k \arccos x_n), x_n \in [-1, 1], \quad (7)$$

其中 $k$ 为阶次. Chebyshev映射迭代500次的分布如图1所示.

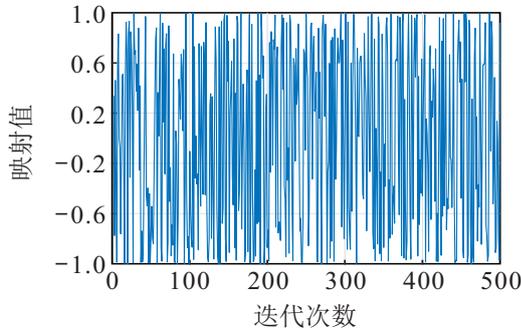


图1 Chebyshev映射分布

由图1可知, Chebyshev映射分布于 $[0, 1]$ ;以混沌性来代替麻雀搜索算法的随机初始化,可使得种群资源在搜索空间中更加均衡的分配. Chebyshev映射麻雀种群数的步骤如下:

- 1) 规定麻雀种群数为 $N$ ,随机产生向量为第1只麻雀个体,  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_d)$ ;
- 2) 利用式(7)对 $Y$ 的每一维进行 $n - 1$ 次迭代,产生其余的 $n - 1$ 只麻雀个体;
- 3) 用式(8)映射生成 $n$ 只麻雀个体,即

$$x_{id} = l_d + \frac{(1 + y_{id})(u_d - l_d)}{2}. \quad (8)$$

其中, $u_d$ 、 $l_d$ 分别为搜索空间第 $d$ 维的上、下界, $y_{id}$ 为第 $i$ 只麻雀第 $d$ 维, $x_{id}$ 为第 $i$ 只麻雀在搜索空间中第 $d$ 维坐标值.

### 2.2 自适应 $t$ 分布

$t$ 分布又称学生分布,概率密度函数<sup>[17]</sup>如下:

$$p_t(x) = \frac{\Gamma\left(\frac{n+1}{2}\right)}{\sqrt{n\pi}\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \cdot \left(1 + \frac{x^2}{n}\right)^{-\frac{n+1}{2}}. \quad (9)$$

其中

$$\Gamma\left(\frac{n+1}{2}\right) = \int_0^{+\infty} x^{\frac{n+1}{2}-1} e^{-x} dx \quad (10)$$

为第2型欧拉积分. 自适应 $t$ 分布对麻雀位置的更新如下:

$$x_i^t = \begin{cases} x_i + x_{it}(\text{iter}), & \text{rand} < p; \\ x_i, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (11)$$

其中: $x_i^t$ 为扰动后的麻雀位置, iter为迭代次数,  $t(\text{iter})$ 为以迭代次数为自由度的 $t$ 分布函数. 在扰动前生成随机数rand, 设置概率 $p$ , 若 $\text{rand} < p$ , 则利用自适应 $t$

分布扰动麻雀位置.

### 2.3 萤火虫算法

在萤火虫算法<sup>[18]</sup>中,萤火虫产生光亮的目的是成为一种信息体系,以引导其余的萤火虫个体. 萤火虫的吸引度为

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r_{i,j}^2}. \quad (12)$$

其中: $\beta_0$ 为最大吸引度, $\gamma$ 为光强吸收系数, $r_{i,j}$ 为萤火虫 $i$ 与 $j$ 的距离. 萤火虫的位置更新如下:

$$x_{\text{best}}(t+1) = x_{\text{best}}(t) + \alpha \left( \text{rand} - \frac{1}{2} \right). \quad (13)$$

其中: $x_i, x_j$ 为萤火虫 $i$ 与 $j$ 所处位置, $\alpha \in [0, 1]$ 为步长因子,rand为 $[0, 1]$ 的随机数.

### 2.4 ISSA算法步骤

针对SSA的不足,首先,利用Chebyshev混沌映射对SSA的初始化过程进行改进,改善初始种群在搜索空间上的分配,增强全局搜索的能力. 其次,引入自适应 $t$ 分布,通过将算法的迭代次数作为 $t$ 分布的自由度参数来增加种群的多样性,从而避免算法陷入局部最优. 最后,采用萤火虫算法,设置转换概率 $p$ 将自适应 $t$ 分布和萤火虫算法动态执行,增强局部极值逃逸能力,改善寻优效果. 为避免算法随机性和系统误差,进行大量数值实验确保获得全局最优解. 本文的ISSA算法的具体实现步骤如下.

step 1: 初始化. 种群数量 $N$ 、问题求解维数 $d$ 、发现者比例PD、警戒者比例SD、警戒者预警值ST、转换概率 $p$ 、初始值的上界 $u_b$ 、下界 $l_b$ 、最大迭代次数 $T_{\text{max}}$ .

step 2: 应用式(7)和(8)对种群进行初始化映射.

step 3: 计算麻雀的适应度值,并排序.

step 4: 麻雀更新捕食者、加入者、警戒者的位置.

step 5: 一次迭代后计算适应度值,更新麻雀位置.

step 6: 若 $\text{rand} < p$ ,则根据式(11)更新麻雀的适应度值;若 $\text{rand} \geq p$ ,则应用式(13)扰动加入者并更新警戒者的适应度值.

step 7: 越界处理. 若新适应度值变优,则更新位置和适应度值,反之则保留.

step 8: 判断当前迭代次数 $R$ 是否达到 $T_{\text{max}}$ ,若是,则结束循环并输出全局最优解,否则返回step 6.

## 3 基于ISSA的分数阶PID控制器设计

分数阶微积分在控制工程的领域是一种优秀的建模工具<sup>[3]</sup>. FOPID控制器新增了一个积分阶次 $\lambda$ 和一个微分阶次 $\mu$ ,因此在调节参数时具有随意性,在

控制被控对象的过程中更具灵活性. 其传递函数表示为

$$G(s) = K_p + \frac{K_I}{s^\lambda} + K_D s^\mu. \quad (14)$$

本文对FOPID控制器的设计就是利用ISSA算法在寻优空间内寻找一组参数  $\{K_p, K_I, K_D, \lambda, \mu\}$ , 使得该系统满足设计要求, 具有良好的性能.

在FOPID控制器的设计中, 应选取符合控制系统性能指标的目标函数. 为了获取满意的迭代过程动态特性, 评价函数  $Q$  设置如下:

$$Q = \int_0^\infty (w_1|e(t)| + w_2u^2(t))dt. \quad (15)$$

其中:  $e(t)$  为输出值与输入值的误差;  $u(t)$  为控制值;  $w_1$  和  $w_2$  为权重, 在  $[0, 1]$  中取值. 同时, 为防止超调现象, 在目标函数  $Q$  中引入超调项  $w_3|e(t)|$ , 即

$$Q = \int_0^\infty (w_1|e(t)| + w_2u^2(t) + w_3|e(t)|)dt. \quad (16)$$

其中  $w_3$  为权值, 当发生超调时将超调项  $w_3|e(t)|$  作为最优控制指标的一项. 由于采用惩罚功能, 故  $w_3 \gg w_1$ , 一般情况下  $w_1 = 0.999, w_2 = 0.001, w_3 = 100$ . 采用ISSA算法设计FOPID控制器, 设定参数范围  $K_p, K_I, K_D \in [0, 100], \lambda, \mu \in [0, 2]$ , 将式(16)作为适应度函数, 采用ISSA算法整定5个参数, 使得适应度

函数值最低. 基于ISSA算法的FOPID控制器设计框图如图2所示, 其中  $G_p(s)$  为被控系统.

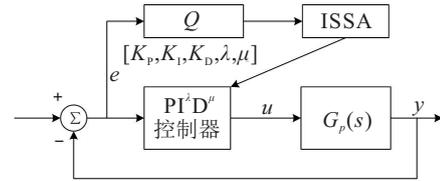


图2 基于ISSA算法的FOPID控制器设计框图

### 4 仿真实验

仿真实验环境为 Intel Core i5 CPU; 操作系统为 Windows 10; 处理器速度为 2.40 GHz; 内存为 16 GB; 编程环境为 Matlab R2018b.

#### 4.1 基准函数寻优

为验证本文ISSA算法的正确性和有效性, 使用SSA、ISSA、粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO)<sup>[19]</sup>、灰狼算法 (grey wolf optimizer, GWO)<sup>[20]</sup>、鲸鱼算法 (whale optimization algorithm, WOA)<sup>[21]</sup> 对10个基准函数<sup>[22]</sup>进行测试. 设置各算法种群大小为30, 迭代次数为1000, 算法参数取自对应文献. 为避免误差, 选取各算法独立运行30次的均值 mean 和标准差 std 为测试结果.

对比结果见表1, 对于单峰函数  $F_1 \sim F_7$ , ISSA的

表1 算法测试结果对比

| Fun                 | Metric | SSA          | PSO          | GWO          | WOA          | 本文ISSA       |
|---------------------|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| $F_1(0)$            | mean   | 9.031 2e-170 | 1.168 0e-01  | 8.217 2e-04  | 3.891 2e-14  | 1.234 6e-270 |
|                     | std    | 0.000 0      | 6.672 4e-06  | 8.162 0e-04  | 7.913 2e-14  | 0.000 0      |
| $F_2(0)$            | mean   | 1.872 6e-85  | 4.608 2e-01  | 7.139 0e+04  | 5.243 2e-10  | 1.903 2e-126 |
|                     | std    | 9.414 2e-85  | 5.367 1e-02  | 2.298 2e+04  | 8.753 2e-10  | 1.673 3e-126 |
| $F_3(0)$            | mean   | 6.136 5e-204 | 2.208 3e-01  | 2.208 2e-02  | 8.134 5e+04  | 5.358 8e-256 |
|                     | std    | 0.000 0      | 7.154 3e-02  | 0.892 4      | 2.314 4e+04  | 0.000 0      |
| $F_4(0)$            | mean   | 8.812 4e-150 | 1.793 2e-01  | 0.489 2      | 51.213 8     | 3.681 1e-228 |
|                     | std    | 9.412 3e-150 | 2.823 5e-02  | 0.274 2      | 28.146 2     | 1.356 7e-218 |
| $F_5(0)$            | mean   | 4.390 9e-03  | 5.213 5e+01  | 3.132 4e+06  | 29.978 0     | 2.432 6e-03  |
|                     | std    | 8.499 7e 03  | 8.235 3e+00  | 96.230 2     | 0.143 2      | 1.435 6e-03  |
| $F_6(0)$            | mean   | 2.098 2e-05  | 4.123 8e-01  | 1.808 2      | 1.512 8      | 2.043 2e-05  |
|                     | std    | 6.132 1e-05  | 1.182 3e-01  | 0.781 4      | 0.417 2      | 2.872 3e-05  |
| $F_7(0)$            | mean   | 8.467 6e-05  | 2.163 4e-01  | 9.899 6e-04  | 1.230 2e-02  | 6.923 4e-05  |
|                     | std    | 9.545 7e-05  | 1.907 2e-01  | 6.023 2e-04  | 1.982 6e-02  | 3.221 4e-05  |
| $F_8(-12\ 569.487)$ | mean   | -4.321 7e+03 | -6.702 3e+03 | -7.821 4e+03 | -6.032 4e+03 | -8.231 7e+04 |
|                     | std    | 2.491 4e+03  | 1.243 2e+02  | 1.523 0e+03  | 1.998 2e+03  | 1.677 8e+03  |
| $F_9(0)$            | mean   | 0.000 0      | 6.145 8e+01  | 28.498 0     | 2.129 8e-10  | 0.000 0      |
|                     | std    | 0.000 0      | 1.762 3e+02  | 9.428 5      | 1.312 8e-10  | 0.000 0      |
| $F_{10}(0)$         | mean   | 9.421 2e-16  | 3.029 8      | 8.092 2e-03  | 2.801 2e-08  | 9.421 2e-16  |
|                     | std    | 0.000 0      | 3.785 0e-01  | 1.989 2e-03  | 6.018 6e-08  | 0.000 0      |

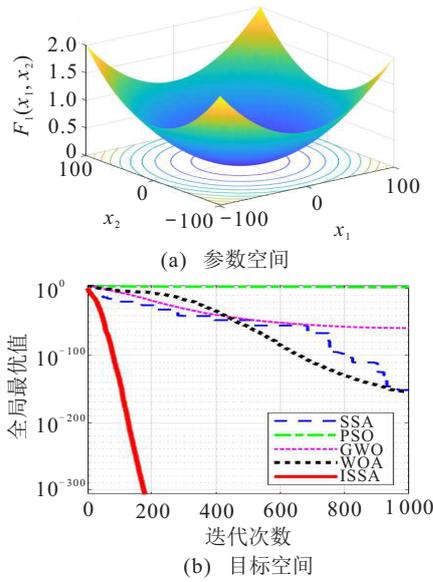


图3 函数  $F_1$  收敛曲线

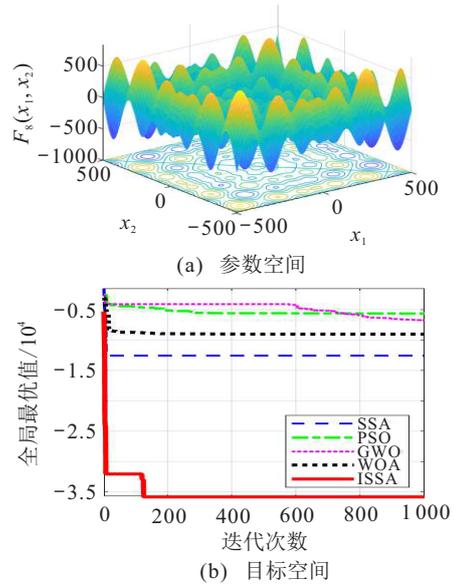


图6 函数  $F_8$  收敛曲线

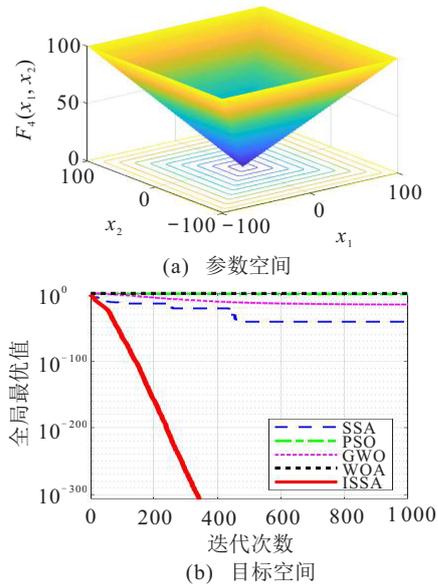


图4 函数  $F_4$  收敛曲线

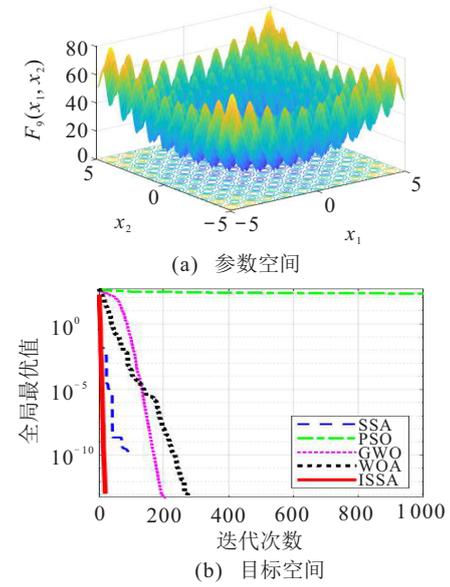


图7 函数  $F_9$  收敛曲线

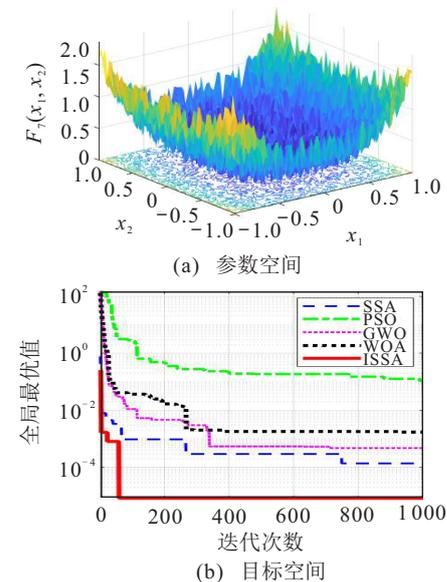


图5 函数  $F_7$  收敛曲线

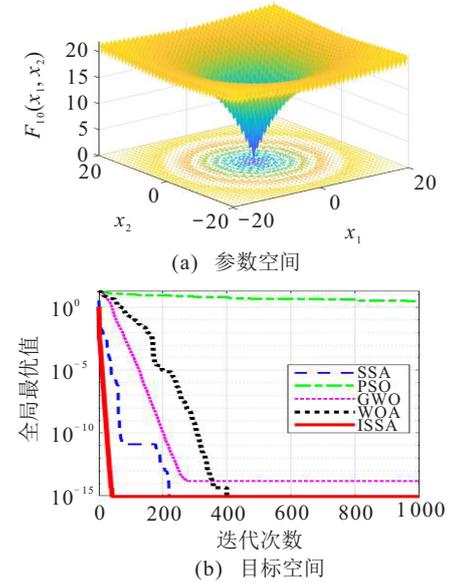


图8 函数  $F_{10}$  收敛曲线

mean 和 std 都明显优于已有的4种经典算法,表明ISSA具有较优的求解精度、求解速度和鲁棒性.对于多峰函数  $F_8 \sim F_{10}$ ,ISSA的求解能力最优,在处理多峰函数中体现了良好的全局探索能力,且不易陷入局部最优.

基准函数收敛图见图3~图8,其中图3~图5为单峰函数的收敛图,图6~图8为多峰函数的收敛图.由图3~图5可知,ISSA的收敛精度、收敛速度最高,相较于SSA的收敛表现,证实了ISSA对SSA缺陷的改进,体现了ISSA良好的全局寻优能力.由图6~图8可知,ISSA最先开始收敛且寻优效果最好,说明ISSA在求解多峰函数上具有更好的局部极值逃逸能力,且迅速收敛到全局最优值.

综上,ISSA的寻优效果优于SSA、PSO、GWO和WOA.这主要得益于Chebyshev混沌映射、自适应t分布和萤火虫算法,使得本文的ISSA算法能有效平衡全局和局部的寻优能力,具有较为理想的寻优效果.

#### 4.2 FOPID控制器参数整定

为验证本文的ISSA算法在FOPID控制器设计中的有效性,选取两类经典被控系统进行实验仿真,与已有文献结果进行对比分析.为避免算法的随机性和系统误差,采用30次实验并取均值作为实验结果.

**例1** 考虑一个经典二阶被控系统<sup>[5]</sup>

$$G_{p1}(s) = \frac{1}{4.32s^2 + 19.1801s + 1}. \quad (17)$$

文献[5]采用改进差分进化算法设计的PID和FOPID控制器分别为

$$C_{f1-huang1}(s) = 175.9591 + 3.8301s^{-1} + 25.9113s,$$

$$C_{f1-huang2}(s) =$$

$$201.6255 - 63.9625s^{-0.0498} + 26.9022s^{0.6988}.$$

文献[6]采用人工蜂群算法设计FOPID控制器,即

$$C_{f1-chen}(s) =$$

$$179.8920 + 12.4811s^{-0.5822} + 50.300s^{0.7501}.$$

应用ISSA算法,参数搜索范围取为:  $K_P, K_I, K_D \in [0, 100], \lambda, \mu \in [0, 2]$ ,取  $\omega_1 = 0.999, \omega_2 = 0.001$ ,优化整定得到FOPID控制器为

$$C_{f1-ISSA}(s) =$$

$$148.8479 + 20.9524s^{-0.2825} + 76.4190s^{0.7843}.$$

系统  $G_{p1}(s)$  的指标如表2所示.由图9、表2可知,本文设计的控制器满足系统响应要求,在调节时间、

超调量、稳态值方面均优于文献[5-6]中的其他控制器,满足系统快速响应、精准控制的目的.

表2  $G_{p1}(s)$  在不同控制器下的系统指标

| 控制器                | 上升时间/s | 超调量/% | 调节时间/s | 稳态误差/% |
|--------------------|--------|-------|--------|--------|
| $C_{f1-huang1}(s)$ | 0.3730 | 3.30  | 0.977  | 0.35   |
| $C_{f1-huang2}(s)$ | 0.3270 | 8.50  | 1.471  | 1.16   |
| $C_{f1-chen}(s)$   | 0.2989 | 5.73  | 0.948  | 0.70   |
| $C_{f1-ISSA}(s)$   | 0.2673 | 3.12  | 0.903  | 0.29   |

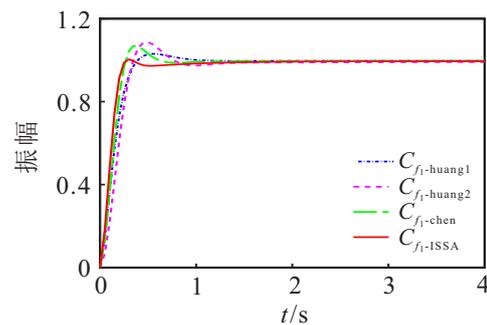


图9 系统  $G_{p1}(s)$  在4种控制器下的阶跃曲线

**例2** 考虑一个经典的分数阶被控系统<sup>[3]</sup>

$$G_{p2}(s) = \frac{1}{0.8s^{2.2} + 0.5s^{0.9} + 1}. \quad (18)$$

文献[3]用幅值裕度和相角裕度法设计的FOPID控制器为

$$C_{f2-xue}(s) = 138.1817 + 2.8914s^{-0.2} + 12.3820s^{1.1}.$$

文献[5]采用改进差分进化算法整定得到的FOPID控制器为

$$C_{f2-huang}(s) =$$

$$24.1934 + 33.3090s^{-0.2392} + 20.2157s^{0.8228}.$$

文献[6]采用人工蜂群算法设计的FOPID控制器为

$$C_{f2-chen}(s) =$$

$$42.015 + 47.468s^{-0.9109} + 27.991s^{0.9900}.$$

应用ISSA算法,参数搜索范围取为:  $K_P, K_I, K_D \in [0, 100], \lambda, \mu \in [0, 2]$ ,取  $\omega_1 = 0.999, \omega_2 = 0.001$ ,优化整定得到FOPID控制器为

$$C_{f2-ISSA}(s) =$$

$$58.9835 + 79.0240s^{-0.8599} + 53.1382s^{1.2991}.$$

系统  $G_{p2}(s)$  的指标如表3所示.由图10、表3可知,本文ISSA算法设计的控制器满足设计要求,且超调更小、稳定更快、稳态精度更高,在系统的控制精度和控制效果等方面具有优越性.

表3  $G_{p2}(s)$  在不同控制器下的系统指标

| 控制器                | 上升时间/s | 超调量/% | 调节时间/s | 稳态误差/% |
|--------------------|--------|-------|--------|--------|
| $C_{f_2-xuc}(s)$   | 0.1120 | 34.00 | 0.9880 | 0.70   |
| $C_{f_2-huang}(s)$ | 0.3020 | 4.90  | 0.9830 | 0.55   |
| $C_{f_2-chen}(s)$  | 0.1470 | 9.63  | 0.6759 | 0.30   |
| $C_{f_2-ISSA}(s)$  | 0.0965 | 4.74  | 0.5236 | 0.26   |

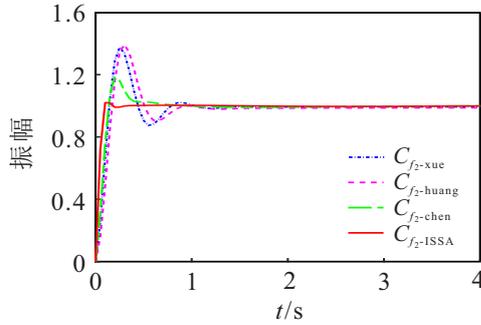


图10 系统  $G_{p2}(s)$  在4种控制器下的阶跃曲线

### 5 结论

本文提出了基于改进麻雀搜索算法的FOPID控制器的参数整定方法,在算法迭代初始化过程中引入Chebyshev混沌映射,提高了初始解的质量;同时引入自适应 $t$ 分布和萤火虫算法,设置转换概率 $p$ 动态选择二者,进一步提高了ISSA的寻优效果.对10个基准函数进行寻优,计算均值和标准差,通过与SSA、PSO、GWO、WOA四种已有的经典算法对比,寻优结果表明ISSA算法的寻优性能提升较为明显,鲁棒性强,表现出良好的全局搜索能力.最后通过对两类被控系统的仿真分析,验证了本文所提出的ISSA算法设计的控制器满足系统响应要求,在超调量、调整时间和稳态误差方面表现优越.后续研究将扩展本文算法的应用领域,可将ISSA应用于工程优化领域,如图像分割、人脸识别、数据分析等方面.

### 参考文献(References)

[1] Podlubny I. Fractional differential equations[M]. San Diego: Academic Press, 1999: 10-36.  
 [2] 王春阳, 李明秋, 姜淑华. 分数阶控制系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 25-59.  
 (Wang C Y, Li M Q, Jiang S H. Design of fractional control system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 25-59.)  
 [3] 薛定宇. 分数阶微积分学与分数阶控制[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 213-249.  
 (Xue D Y. Fractional calculus and fractional-order control[M]. Beijing: Science Press, 2018: 213-249.)  
 [4] 李士勇, 李研, 林永茂. 智能优化算法与涌现计算[M].

北京: 清华大学出版社, 2019: 578-608.  
 (Li S Y, Li Y, Lin Y M. Intelligent optimization algorithms and emergent computation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2019: 578-608.)  
 [5] 黄丽莲, 周晓亮, 项建弘. 分数阶PID控制器参数的自适应设计[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(5): 1064-1069.  
 (Huang L L, Zhou X L, Xiang J H. Self-adjusting design on parameters of the fractional order PID controller[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(5): 1064-1069.)  
 [6] 陈超波, 胡海涛, 高嵩. 人工蜂群的分数阶PID控制器参数自适应研究[J]. 控制工程, 2020, 27(6): 956-961.  
 (Chen C B, Hu H T, Gao S. Parameters adaptive design of fractional order PID controller based on artificial bee colony algorithm[J]. Control Engineering of China, 2020, 27(6): 956-961.)  
 [7] 杨博, 束洪春, 朱德娜, 等. 基于群灰狼优化的光伏逆变器最优无源分数阶PID控制[J]. 控制与决策, 2020, 35(3): 593-603.  
 (Yang B, Shu H C, Zhu D N, et al. Grouped grey wolf optimizer based optimal passive fractional-order PID control of photovoltaic inverters[J]. Control and Decision, 2020, 35(3): 593-603.)  
 [8] 孙建民, 崔子晗, 张帅, 等. 基于布谷鸟搜索优化带增益分数阶PID的电子节气门控制[J]. 现代制造工程, 2022(3): 41-47.  
 (Sun J M, Cui Z H, Zhang S, et al. Optimization of electronic throttle with gain fractional PID control based on cuckoo search algorithm[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2022(3): 41-47.)  
 [9] Xue J K, Shen B. A novel swarm intelligence optimization approach: Sparrow search algorithm[J]. Systems Science & Control Engineering, 2020, 8(1): 22-34.  
 [10] 李雅丽, 王淑琴, 陈倩茹, 等. 若干新型群智能优化算法的对比研究[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(22): 1-12.  
 (Li Y L, Wang S Q, Chen Q R, et al. Comparative study of several new swarm intelligence optimization algorithms[J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(22): 1-12.)  
 [11] 毛清华, 张强. 融合柯西变异和反向学习的改进麻雀算法[J]. 计算机科学与探索, 2021, 15(6): 1155-1164.  
 (Mao Q H, Zhang Q. Improved sparrow algorithm combining cauchy mutation and opposition-based learning[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2021, 15(6): 1155-1164.)  
 [12] 付华, 刘昊. 多策略融合的改进麻雀搜索算法及其应用[J]. 控制与决策, 2022, 37(1): 87-96.

- (Fu H, Liu H. Improved sparrow search algorithm with multi-strategy integration and its application[J]. Control and Decision, 2022, 37(1): 87-96.)
- [13] 高晨峰, 陈家清, 石默涵. 融合黄金正弦和曲线自适应的多策略麻雀搜索算法[J]. 计算机应用研究, 2022, 39(2): 491-499.  
(Gao C F, Chen J Q, Shi M H. Multi-strategy sparrow search algorithm integrating golden sine and curve adaptive[J]. Application Research of Computers, 2022, 39(2): 491-499.)
- [14] 李雅梅, 张恒. 基于Levy-SSA的分数阶PID控制方法[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(8): 68-70.  
(Li Y M, Zhang H. Fractional PID control method based on Levy-SSA[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022, 41(8): 68-70.)
- [15] Chatterjee S, Roy S, Das A K, et al. Secure biometric-based authentication scheme using Chebyshev chaotic map for multi-server environment[J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2018, 15(5): 824-839.
- [16] 隗小斐, 何如龙, 陈津. 基于混沌加密的水声扩频通信技术[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(5): 101-104.  
(Kui X F, He R L, Chen J. Research on underwater acoustic spread spectrum communication technology based on chaotic encryption[J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(5): 101-104.)
- [17] 苏岩. 数理统计及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 13-44.  
(Su Y. Mathematical statistics and its application[M]. Beijing: Science Press, 2018: 13-44.)
- [18] 刘鑫晶, 刘彦隆, 徐鑫鑫. 细胞膜机制萤火虫算法优化多阈值Otsu图像分割[J]. 小型微型计算机系统, 2020, 41(2): 410-415.  
(Liu X J, Liu Y L, Xu X X. Optimization of multi-threshold Otsu image segmentation by glowworm swarm algorithm with cell membrane mechanism[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2020, 41(2): 410-415.)
- [19] 钱晓宇, 方伟. 基于局部搜索的反向学习竞争粒子群优化算法[J]. 控制与决策, 2021, 36(4): 779-789.  
(Qian X Y, Fang W. Opposition-based learning competitive particle swarm optimizer with local search[J]. Control and Decision, 2021, 36(4): 779-789.)
- [20] Mirjalili S, Mirjalili S M, Lewis A. Grey wolf optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69: 46-61.
- [21] Mirjalili S, Lewis A. The whale optimization algorithm[J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95: 51-67.
- [22] Jamil M, Yang X S. A literature survey of benchmark functions for global optimisation problems[J]. International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation, 2013, 4(2): 150-194.

#### 作者简介

陈炫儒 (1997—), 男, 硕士生, 从事基于智能算法的分数阶PID控制器设计的研究, E-mail: 1138158902@qq.com;

吴立飞 (1985—), 男, 高级工程师, 博士, 从事基于智能算法的分数阶PID控制器设计的研究, E-mail: wulf@ncepu.edu.cn;

杨晓忠 (1965—), 男, 教授, 博士生导师, 从事分数阶微分方程数值方法、分数阶系统动力学分析等研究, E-mail: yxiaoZh@ncepu.edu.cn.