

基于改进麻雀搜索算法的分数阶混沌系统参数辨识

李悠¹, 彭越兮^{2†}

(1. 湖南体育职业学院, 湖南 长沙 410019; 2. 湘潭大学 计算机学院·网络空间安全学院, 湖南 湘潭 411105)

摘 要:混沌系统的参数辨识是非线性科学中的一个经典反问题。由于智能优化算法的高效率和鲁棒性, 利用算法对混沌系统进行参数辨识已成为近年来兴起的热点话题。本文致力于针对分数阶定义下的混沌系统进行参数辨识研究, 在经典麻雀搜索算法的基础上提出随机扰动和 Lévy 局部飞行搜索的改进方式, 并对分数阶 Chen 混沌系统和分数阶 Lorenz 混沌系统进行了参数辨识。仿真实验在 6 种不同的智能优化算法中进行, 其结果证明了所提出的改进麻雀搜索算法具有更快的收敛速率和更高的辨识精度, 并能够保证所有的辨识参数与原始参数的误差在 10^{-4} 以下。研究成果可为非线性系统的智能同步控制提供新的解决办法。

关键词:分数阶微积分; 混沌系统; 参数辨识; 麻雀搜索算法

中图分类号:TP391.8

文献标识码:A

Parameter Identification of Fractional-order Chaotic Systems Based on Improved Sparrow Search Algorithm

LI You¹, PENG Yuexi^{2†}

(1. Hunan Sports Vocational College, Changsha, Hunan 410019, China;

2. School of Computer Science & School of Cyberspace Science, Xiangtan University, Xiangtan, Hunan 411105, China)

Abstract: Parameter identification of chaotic systems is a classical inverse problem in nonlinear science. Due to the high efficiency and robustness of intelligent optimization algorithm, parameter identification of chaotic system based on intelligent optimization algorithm has become a hot topic in recent years. This paper focuses on the parameter identification of fractional-order chaotic system. Based on the classical sparrow search algorithm, an improved sparrow search algorithm which introduced a random disturbance and the Lévy local flight search is proposed. The identified systems were selected as fractional-order Chen chaotic system and fractional-order Lorenz chaotic system, and simulation were carried out in six different intelligent optimization algorithms. The results demonstrate that the improved sparrow search algorithm has faster convergence rate and higher identification accuracy, and it can ensure that the error of identified parameters are less than 10^{-4} . The research results can provide a new solution for intelligent synchronization control of nonlinear systems.

Key words: fractional order; chaotic system; parameter identification; sparrow search algorithm

混沌现象是确定性系统所产生的外在的、无规则的复杂运动, 它广泛存在于自然界中, 是非线性

科学中的重要研究内容之一^[1]。由于混沌自身具有特殊的初值敏感性、遍历性和伪随机性, 这些特点推

收稿日期: 2023-03-01

基金项目: 第二批国家级职业教育教师教学创新团队课题研究项目(ZH2021080401); 湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ40545); 湖南省教育厅资助项目(20C1787)

作者简介: 李悠(1991—), 女, 湖南邵阳人, 硕士, 讲师, 研究方向: 信息安全, 智能优化等。

† 通信联系人, E-mail: 244896301@qq.com

动了混沌与其他学科的交叉融合。近年来,混沌理论已受到了物理、电子、生物、经济等领域中众多研究者的重点关注^[2]。混沌动力学行为的直接来源是混沌系统,比如气象、经济系统、电路系统等都可以使用混沌系统来解释。然而,混沌的混乱性又使得在受控系统中应当尽量消除其带来的不良影响。如何在未知先验信息的情况下通过混沌系统产生动力学行为来辨识出系统的关键参数,是控制和利用混沌的重要手段之一^[3,4]。

得益于人工智能的鲁棒性和高效率,利用智能优化算法对混沌系统的各类参数进行智能辨识成了热点话题,不断有学者改进新的智能优化算法应用于参数辨识问题中。张宏立等人^[5]和 Xu 等人^[6]分别提出了使用量子粒子群优化算法和改进的鸟群算法对 Lorenz 系统、Rössler 系统等经典连续时域混沌系统进行参数辨识,取得了良好的辨识结果。Chen 等人^[7]提出了一种融入了混沌映射的改进全局花授粉算法,并将其应用于几类超混沌系统进行参数辨识,仿真实验结果证实了所提算法的良好性能。随后,宋健等人^[8]又提出了一种基于云模型的进化与变异策略的改进粒子群优化算法,并针对统一混沌系统进行了参数辨识。刘文霞等人^[9]针对经典 Lorenz 混沌系统提出了一种改进的人工蜂群优化算法。

值得一提的是上述研究都只考虑了普通的整数阶混沌系统,缺乏对分数阶定义下混沌系统进行参数辨识的研究。事实上,相较于整数阶的非线性系统,分数阶系统由于其特殊的记忆效应,能够更准确地描述自然现象^[10],分数阶系统的建模与应用已成为了当前非线性动力学领域的热点话题。然而,由于分数阶微积分复杂的数学原理,分数阶混沌系统所产生的行为具有更强的参数敏感性和更高的复杂度,因此对其进行参数辨识颇具挑战。麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)^[11]是一种新型智能优化算法,已经证明了该算法要优于粒子群优化算法、遗传算法等传统的智能优化算法,但是当其面临复杂优化问题的求解时,仍然存在收敛速度慢、易陷入局部极值等问题。综上所述,本文将在麻雀搜索算法的基本框架上对其进行改进,并用改进后的算法对两种典型的分数阶混沌系统进行参数辨识研究。

1 混沌系统参数辨识原理

基于智能优化算法参数估计的基本流程如

图 1 所示。由图可知,在参数辨识的过程中,首先存在一个原始的连续混沌系统,其系统方程为:

$$\dot{x} = F(X, X_0, \theta), \quad (1)$$

其中, X 为原系统所产生的 M 维度的时间序列, $X = (x_1, x_2, \dots, x_M)^T \in R^M$; X_0 是系统的初始值;参数 θ 是原系统的系统参数。

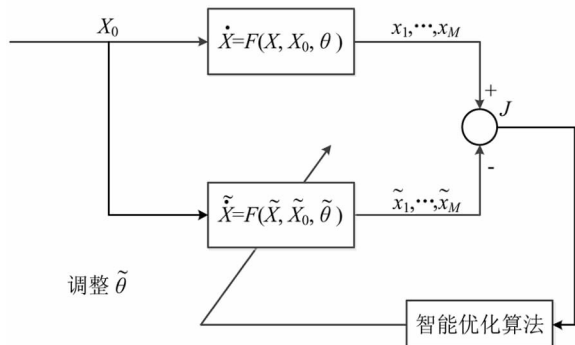


图 1 混沌系统参数辨识的基本框架

所有带有上标符号“~”的是对应于原系统中的辨识系统各类参数。基于原系统所产生的时间序列和辨识系统所产生的时间序列,参数辨识问题的优化目标函数则被设置为它们之间的误差 J , 定义为:

$$J = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M (x_n - \tilde{x}_n)^2 \quad (2)$$

因此,混沌系统的参数估计问题就转化成了一个单目标的最小优化问题,寻优过程是不断地调整被辨识的系统参数,使目标函数 J 最小化,从而完成对原混沌系统参数的精确辨识,而智能优化算法的性能关系着辨识精度的高低。

2 改进的麻雀搜索算法

麻雀搜索算法是由 Xue 等人提出的一种仿生学群智能优化算法,该算法模拟了麻雀种群觅食的群体行为。SSA 由三种类型的麻雀群体组成,即发现者、追随者和侦察者,因此该算法主要分为三个更新步骤:发现者负责引导种群方向并寻找觅食区域,追随者则会一直跟随发现者并争夺食物,而侦察者负责警戒群体,如果发现捕食者则向种群发出警报,使整个群体进行活动范围的迁移。

发现者的位置更新公式为:

$$Y_{i,j}(t+1) = \begin{cases} Y_{i,j}(t) \exp\left(\frac{-i}{\alpha T}\right), & \text{if } R_2 < ST \\ Y_{i,j}(t) + QL, & \text{if } R_2 > ST \end{cases} \quad (3)$$

其中, t 是当前的迭代次数; T 是最大迭代次

数; $Y_{i,j}(t)$ 是第 i 只麻雀在求解空间中第 j 维度 t 次迭代后的位置; α 是 $(0, 1)$ 之间的随机数; Q 是一个服从正态分布的随机数; L 是一个 $1 \times d$ 维度的矩阵,其中所有的元素均为 1; R_2 是预警值; ST 是安全阈值;当 $R_2 >$ 安全阈值时,表示侦察者发现了捕食者,整个种群将迁移至其他安全区域。

追随者的位置更新公式为:

$$Y_{i,j}(t+1) = \begin{cases} Q \exp\left(\frac{Y_{\text{worst}}(t) - Y_{i,j}(t)}{t^2}\right), & \text{if } i < n/2 \\ Y_p(t+1) + |Y_{i,j}(t) - Y_p(t+1)| A^+ L, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $Y_p(t)$ 是发现者在第 t 次迭代时的最优位置; $Y_{\text{worst}}(t)$ 是第 t 次迭代时的全局最差位置, A 是一个内部元素随机设置为 1 或者 -1 的 $1 \times d$ 矩阵,且 $A^+ = A^T(AA^T)^{-1}$ 。当 $i < n/2$ 时表明第 i 个追随者会因为饥饿而飞往其他区域寻找食物。

侦查者的位置更新公式为:

$$Y_{i,j}(t+1) = \begin{cases} Y_{\text{best}}(t) + \beta |Y_{i,j}(t) - Y_{\text{best}}(t)|, & \text{if } f_i < f_g \\ Y_{i,j}(t) + K \left(\frac{|Y_{i,j}(t) - Y_{\text{worst}}(t)|}{(f_i - f_w) + \epsilon} \right), & \text{if } f_i = f \end{cases} \quad (5)$$

其中, $Y_{\text{best}}(t)$ 是第 t 次迭代时的全局最优位置; β 是步长因子,它服从随机的正态分布; K 是一个 $[-1, 1]$ 之间的随机数; f_i 是当前位置的适应度值; f_g 和 f_w 分别是当前的全局最优适应度值和全局最差适应度值; ϵ 是避免分母为 0 的控制参数,一般取值为一个非常小的常数。

由“*No free lunch*”原则^[12]可知,任何一种优化算法都不可能成功应对所有种类的优化问题。因此,本文根据混沌系统参数辨识问题,对经典的 SSA 进行随机扰动和 Levy 局部飞行搜索的改进方式,以解决 SSA 陷入局部最优的困境,提升辨识精度。首先,在追随者的更新公式中,追随者因为饥饿而飞往其他区域寻找食物的条件是“if $i < n/2$ ”。此条件限定了追随者是当编号小于种群总数一半数值时才产生饥饿感,因此不利于算法跳出局部最优并前往其他区域搜索。本文提出随机选定追随者产生饥饿感,将公式(4)中的条件更改为“if $\text{random}(1, n) < n/2$ ”,以此来提升算法的搜索能力。另外,为了提升算法的局部寻优能力,提出根据当前全局最优麻雀使用 Lévy 飞行进行局部搜索,以提升算法避免早熟收敛的能力。Lévy 飞行

因子的计算公式为:

$$Levy = 0.02 \frac{r_1 \sigma}{|r_2|^{1/\beta}}, \sigma = \left\{ \frac{\Gamma(1+\beta) \sin(\pi\beta/2)}{\Gamma[(1+\lambda)/2] \beta 2^{(\beta-1)/2}} \right\}^{1/\beta} \quad (6)$$

其中, $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数; β 和 λ 为常数,本文均设置为 1.5; r_1 和 r_2 是 $(0, 1)$ 之间的随机数。Lévy 局部飞行搜索的位置更新公式为:

$$Y_{i,j}(t) = (f_g - af_g) + [(f_g + af_g) - (f_g - af_g)]Levy \quad (7)$$

其中, a 是局部飞行搜索的范围因子,设置为 $(0, 1)$ 之间的常数或者随机数。如果新的位置优于当前的位置,则会保留新的位置,否则就舍弃掉。

改进后的 SSA 算法(improved sparrow search algorithm, ISSA)的伪代码如算法 1 所示,其流程图如图 2 所示。

算法 1:ISSA 算法

1. 设置种群数量 n 、发现者及追随者数量、安全阈值 ST 和最大迭代次数 T
2. 计算每只麻雀的适应度值,求出最优个体和最差个体
3. While($t < T$)
4. for $i = 1$:发现者数量
5. 根据公式(3)进行位置更新
6. end for
7. for $i = \text{发现者数量} + 1:n$
8. 根据公式(4)进行位置更新
9. end for
10. for $l = 1$:侦查者数量
11. 根据公式(5)进行位置更新
12. end for
13. 执行公式(6)和(7)进行局部飞行搜索
14. 保留更优的位置
15. $t = t + 1$
16. end While

3 仿真实验

参数辨识的仿真实验将针对两个经典的分数阶混沌系统:分数阶 Chen 系统和分数阶 Lorenz 系统。其中每个系统从初始值 $x(0) = y(0) = z(0) = 0.1$ 开始演化,为了消除混沌系统的初始过渡状态,舍掉前 300 个状态,并保留随后 $M = 50$ 个序列进行参数辨识,采用 Adomian 分解算法^[13]在步长为 0.01 的情况下对系统进行求解。为了验证所提 ISSA 的有效性和优越性,选取经典 PSO 算法、DE 算法、ABC 算法、JAYA 算法和 SSA 进行对比实验,各个算法使用了经典的参数配置,其具体数值见表 1,且它们的最大迭代次数设置为 100,种群数量设置为 $n = 40$ 。为了消除算法的随机性,每个算法都会独立运行 30 次以上。仿真实验的软、硬件环境是基于 MATLAB 2020a 和 Intel

(R) Core(TM) i5-4200H CPU @2.80 GHz with 8 GB RAM.

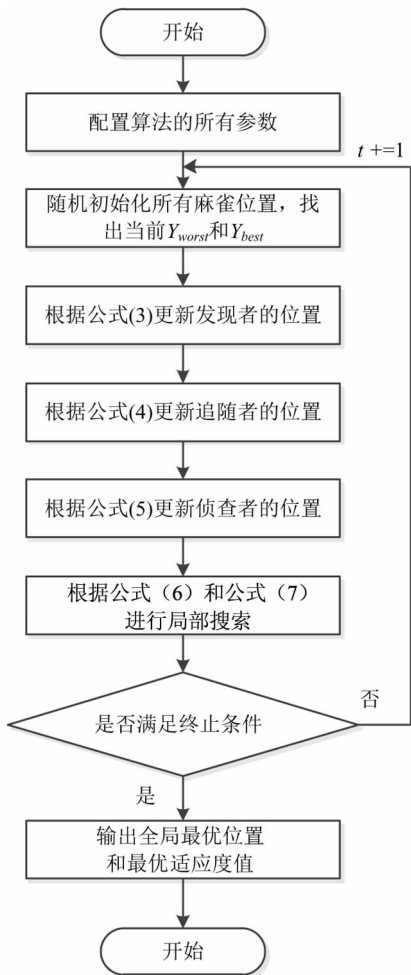


图 2 ISSA 流程图

表 1 各个算法的参数配置

算法	参数
PSO	$\omega_{max} = 0.9, \omega_{min} = 0.4, c_1 = c_2 = 2$
DE	$F = 0.6, CR = 0.6$
ABC	$limit = 100$
JAYA	无参数设置
SSA	$ST = 0.8$
ISSA	$ST = 0.8, \beta = \gamma = 1.5$

3.1 分数阶 Chen 系统的参数辨识

分数阶 Chen 系统的公式如下^[14]:

$$\begin{cases} D^q \dot{x} = a(y - x) \\ D^q \dot{y} = (c - a)x - xz + cy \\ D^q \dot{z} = xy - bz, \end{cases} \tag{8}$$

其中, a 、 b 和 c 是系统的参数; q 是系统的分数阶阶数。当参数分别设置为 $a=35$ 、 $b=3$ 、 $c=28$ 和 $q=0.98$ 时, 系统呈现复杂混沌状态, 其混沌吸引子相图如图 3 所示。因此选用该组参数 ($a=35$ 、 $b=3$ 、 $c=28$ 、 $q=0.98$) 作为原系统的参数, 即需要被辨识的参数。

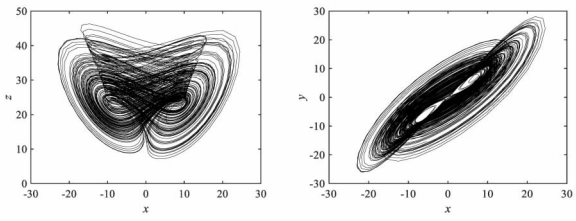


图 3 分数阶 Chen 系统在参数 $a=35$ 、 $b=3$ 、 $c=28$ 和 $q=0.98$ 时的混沌吸引子相图

针对分数阶 Chen 系统参数辨识的目标函数 J 值的演化情况如图 4 所示, 根据公式(2)可知 J 值越低, 辨识结果的误差越低, 所以辨识参数的精度越高。由图 3 可见, 本文提出的 ISSA 虽然在早期收敛速率不如 SSA 和 DE 算法, 但在迭代 70 次之后超越了这两种算法, 并在达到最大迭代次数时取得了最小的 J 值, 因此具有最高的精度和更快的收敛速度。DE 算法和 SSA 分别排名第二和第三。而剩下的 PSO 算法、ABC 算法、JAYA 算法在收敛速度上远不如前三种算法。最终的辨识精度上也要比另外三种算法至少低 10^{-5} 个数量级。

表 2 中统计了各个算法针对分数阶 Chen 系统的详细参数辨识结果。可以看到, ISSA 无论是在平均 J 值还是最优 J 值上都要好于其他 5 种算法, 且数值结果至少高 10^{-2} 个数量级。从辨识结果来看, 被辨识的参数也可以至少保证其误差在 10^{-4} 以下。因此 ISSA 在所有 6 种算法中具有最佳表现。DE 算法和 SSA 虽然也取得了不错的辨识结果, 但是在精度上还稍显不足, 其平均 J 值分别跟 ISSA 差了 10^{-2} 和 10^{-3} 个数量级。而 PSO 算法的最优结果虽然具有较高的辨识精度, 但算法稳定性不足, 平均辨识结果比较差, 因此在实际应用中不能够保证始终获得准确的辨识结果。ABC 算法和 JAYA 算法无论是在平均辨识结果上还是最优辨识结果上的精度都很低, 因此不能够对分数阶 Chen 系统进行有效的参数辨识。

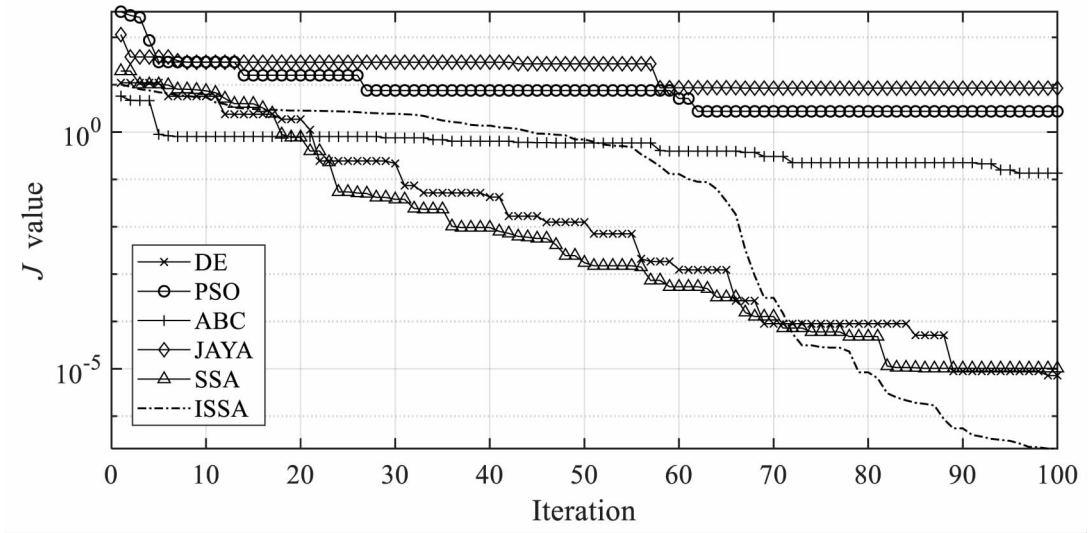


图 4 分数阶 Chen 系统参数辨识的目标函数 J 的演化情况

表 2 分数阶 Chen 系统的参数辨识结果

算法	平均 J 值	最优 J 值	平均辨识结果	最优辨识结果
DE	8.4748e-05	4.7275e-07	$a=34.9991, b=3.0005,$ $c=28.0008, q=0.9797$	$a=34.9999, b=3.0001,$ $c=28.0000, q=0.9799$
PSO	9.0115e+00	4.8875e-08	$a=35.2532, b=1.8478,$ $c=27.7393, q=0.9855$	$a=35.0000, b=3.0000,$ $c=28.0000, q=0.9800$
ABC	3.0287e-01	1.1198e-02	$a=35.0094, b=2.9724,$ $c=27.9966, q=0.9826$	$a=35.0222, b=2.9997,$ $c=28.1119, q=0.9779$
JAYA	2.9169e+01	1.1361e+00	$a=33.9972, b=3.4656,$ $c=27.6545, q=0.9722$	$a=34.6032, b=3.1196,$ $c=27.8938, q=0.9856$
SSA	4.9610e-04	8.9128e-08	$a=35.0010, b=2.9995,$ $c=28.0007, q=0.9802$	$a=35.0003, b=2.9999,$ $c=28.0001, q=0.9800$
ISSA	2.0156e-07	1.8299e-10	$a=35.0000, b=3.0000,$ $c=28.0000, q=0.9800$	$a=35.0000, b=3.0000,$ $c=28.0000, q=0.9800$

3.2 分数阶 Lorenz 系统的参数辨识

分数阶 Lorenz 系统的公式如下^[15]：

$$\begin{cases} D^q \dot{x} = a(y - x) \\ D^q \dot{y} = bx - y - xz \\ D^q \dot{z} = xy - cz \end{cases} \tag{9}$$

其中, a 、 b 和 c 是系统参数; q 是系统的分数阶阶数。当参数选取为 $a=10$ 、 $b=28$ 、 $c=8/3$ 和 $q=0.97$ 时, 系统呈现混沌状态, 其混沌吸引子相图如图 5 所示, 形状呈现出了著名 Lorenz 系统“蝴蝶翅膀”的形状。因此选用该组参数($a=10$ 、 $b=28$ 、 $c=8/3$ 、 $q=0.97$)作为原系统的参数。

针对分数阶 Lorenz 系统参数辨识的目标函数 J 的演化情况如图 6 所示。由图 6 可知, 所提出的 ISSA 具有最好的表现, 因为该算法始终具有最快的收敛速率, 并在最大迭代次数时取得了最小的 J 值。跟针对分数阶 Chen 系统参数辨识结果类似, DE 算法和 SSA 分别排名第二和第三, 而剩下的

PSO 算法、ABC 算法、JAYA 算法的表现无论是在收敛速率上还是最终的辨识精度上都远不如前三种算法。

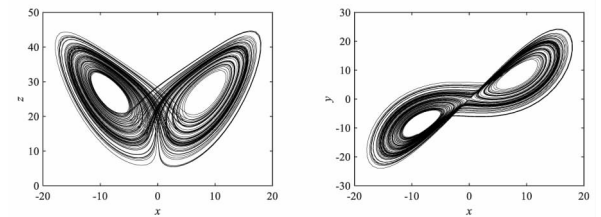


图 5 分数阶 Lorenz 系统在参数 $a=10$ 、 $b=28$ 、 $c=8/3$ 和 $q=0.97$ 时的混沌吸引子相图

针对分数阶 Lorenz 系统的详细辨识结果列在了表 3 中。其统计结果类似于针对分数阶 Chen 系统的参数辨识, ISSA 依然是最优的算法, 无论是平均 J 值还是最优 J 值都要比其他算法高出至少 10^{-2} 个数量级, 且仍然能保证不高于 10^{-4} 的误差。DE 算法和 SSA 比所提出的 ISSA 稍欠准确性。

而 PSO 算法、ABC 算法和 JAYA 算法依旧无法有效地对分数阶 Lorenz 系统进行参数辨识。另外,从辨识结果可知,6 种算法针对分数阶 Lorenz 系

统的参数辨识精度要普遍高于针对分数阶 Chen 系统的参数辨识,其原因可能是因为该参数状态下的分数阶 Chen 系统具有更高的 Lyapunov 指数。

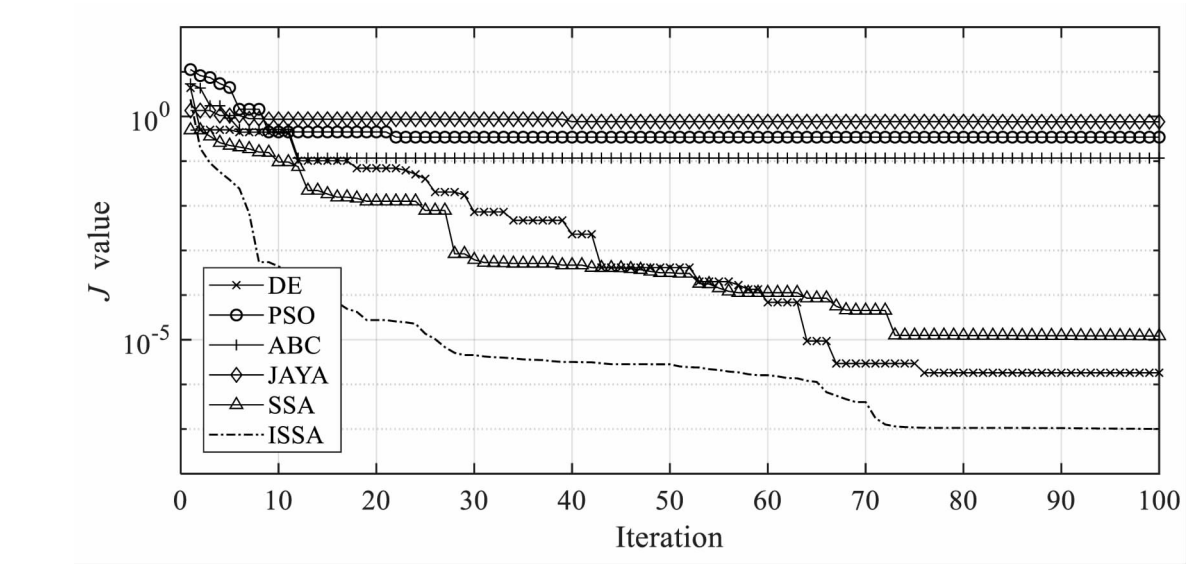


图 6 分数阶 Lorenz 系统参数辨识的目标函数 J 的演化情况

表 3 分数阶 Lorenz 系统的参数辨识结果

算法	平均 J 值	最优 J 值	平均辨识结果	最优辨识结果
DE	2.0918e-06	4.2670e-08	$a=10.0001, b=28.0001,$ $c=2.6666, q=0.9700$	$a=10.0000, b=28.0000,$ $c=2.6667, q=0.9700$
PSO	2.6599e-01	2.6926e-09	$a=10.2787, b=27.8533,$ $c=2.9972, q=0.9565$	$a=10.0000, b=28.0000,$ $c=2.6667, q=0.9700$
ABC	1.7822e-01	1.5314e-03	$a=9.9573, b=28.0568,$ $c=2.6134, q=0.9726$	$a=10.0551, b=28.0023,$ $c=2.7007, q=0.9668$
JAYA	1.7135e+01	6.2562e-01	$a=10.8175, b=27.2138,$ $c=4.2264, q=0.9758$	$a=10.6640, b=27.5565,$ $c=3.1109, q=0.9677$
SSA	1.0260e-05	2.8255e-09	$a=10.0001, b=27.9998,$ $c=2.6666, q=0.9699$	$a=10.0000, b=28.0000,$ $c=2.6667, q=0.9700$
ISSA	4.8837e-08	7.6500e-11	$a=10.0000, b=28.0000,$ $c=2.6667, q=0.9700$	$a=10.0000, b=28.0000,$ $c=2.6667, q=0.9700$

4 结 论

主要考虑了分数阶混沌系统的智能参数辨识问题,为了提升传统 SSA 的辨识精度,采用了随机扰动和 Lévy 飞行两种方式对 SSA 进行改进。所提出的 ISSA 与另外 5 种智能优化算法分别对分数阶 Chen 系统和分数阶 Lorenz 系统进行了参数辨识的仿真实验。结果证明了 ISSA 不光具有最高的辨识精度,可保证所有参数的误差均不高于 10^{-4} ,且辨识的收敛速度也要优于其他算法,因此

具有更好的参数辨识效果。本文所做的工作将为分数阶混沌系统的智能同步控制研究提供一定的技术支撑。另外,对系统参数的辨识也可以尝试拓展至针对混沌系统初值甚至系统结构进行智能辨识。我们下一步的工作将尝试把提出的算法扩展至其他类型的非线性系统进行同步控制应用。

参考文献

[1] STROGATZ S. Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics, biology, chemistry, and engineering [M]. Boca Raton: CRC Press, 2015.

[2] 孙克辉. 混沌保密通信原理与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.

[3] PENG Yuexi, SUN Kehui, HE Shaobo. Synchronization for the integer-order and fractional-order chaotic maps based on parameter estimation with JAYA-IPSO algorithm [J]. The European Physical Journal Plus, 2020, 135: 331.

[4] YOUSRI D, ABDELATY A, SAID L, et al. Parameter identification of fractional-order chaotic systems using different meta-heuristic optimization algorithms [J]. Nonlinear Dynamics, 2019, 95(3): 2491—2542.

[5] 张宏立, 宋莉莉. 基于量子粒子群算法的混沌系统参数辨识[J]. 物理学报, 2013, 62(19): 190508.

[6] XU Chuangbiao, YANG Renhuan. Parameter estimation for chaotic systems using improved bird swarm algorithm [J]. Modern Physics Letters B, 2017, 31: 1750346.

[7] CHEN Yang, PI Dechang, WANG Bi. Enhanced global flower pollination algorithm for parameter identification of chaotic and hyper-chaotic system [J]. Nonlinear Dynamics, 2019, 97(2): 1343—1358.

[8] 宋健, 王聪, 张宏立. 基于云模型的混合粒子群算法的统一混沌系统时变参数辨识[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2020, 37(3): 407—414.

[9] 刘文霞, 王荣杰, 韩冉, 等. 基于人工蜂群算法的混沌系统参数估计[J]. 计算机系统应用, 2021, 30(3): 142—150.

[10] HILFER S. Application of fractional calculus in physics [M]. New Jersey: World Scientific Press, 2000.

[11] XUE Jiankai, SHEN Bo. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm [J]. Systems Science & Control Engineering, 2019, 8(1): 22—34.

[12] WOLPERT D, MACREADY W. No free lunch theorems for optimization [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997, 1(1): 67—82.

[13] 雷腾飞, 贺金满, 王艳玲, 等. 基于 Adomian 分解法的分数阶非线性系统的分析及 Lyapunov 指数算法的实现[J]. 振动与冲击, 2021, 40(11): 1—6.

[14] LU Jinguo, CHEN Guanrong. A note on the fractional-order Chen system [J]. Chaos Solitons & Fractals, 2006, 27(3): 685—688.

[15] 贾红艳, 陈增强, 薛薇. 分数阶 Lorenz 系统的分析及电路实现[J]. 物理学报, 2013, 62(14): 140503.

(上接第 64 页)

4 结 论

在 Modbus 通信协议的基础上调整智能变电站安全监控交互数据监测方案,进一步调整数据收集与处理操作,在优化通信网络拓扑与数据相位的前提下有效监测到交互数据,提升整体监测质量,具有良好的应用前景。

参考文献

[1] 陈月卿, 陈建洪, 邱建斌, 等. 一种智能变电站监控信息自动验收系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 143—150.

[2] 彭志强, 刘翌, 罗俊, 等. 智能变电站监控信息自动验收体系架构及关键技术[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(7): 174—181.

[3] 王帅, 姜敏, 李江林, 等. 全维度智能变电站设备状态监测关键技术研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(7): 82—86.

[4] 张峰, 韩伟, 宋闯, 等. 智能变电站光纤链路在线监测与自动化测试系统设计[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2021, 44(8): 1038—1044.

[5] 袁龙, 安琪, 王建树, 等. 基于无线网络的智能变电站监控信息自动核对新方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(1): 160—166.

[6] 高原, 闫韬, 满成, 等. 基于监控组态软件的变电站智能视频监控系统设计[J]. 现代电子技术, 2020, 43(16): 18—20.

[7] 张立静, 盛戈峰, 江秀臣. 泛在电力物联网在变电站的应用分析与研究展望[J]. 高压电器, 2020, 56(9): 1—10.

[8] 赵宇皓, 郝晓光, 耿少博, 等. 智能变电站二次设备安全措施在线预演及防误预警的研究与实现[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(3): 173—178.

[9] 尹新哲, 杨家志, 蒋存波, 等. Modbus 通信协议在自动走丝系统中的应用[J]. 机床与液压, 2021, 49(6): 71—76.

[10] 王文立, 陈杰. 基于回填算法的实验室云端访问安全监控仿真[J]. 计算机仿真, 2022, 39(1): 441—445.

[11] 刘海强, 陈晓晶, 张兴华, 等. 面向煤矿安全监控的数据仓库关键技术[J]. 工矿自动化, 2022, 48(4): 31—37, 113.

[12] 黄伟, 陈瑶, 华月存, 等. 煤矿安全监控系统层级故障自诊断技术[J]. 煤矿安全, 2021, 52(12): 133—137.

[13] 张鹏鹏, 张宏. 基于 CAN 总线的可燃危险品库安全监控系统设计[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(3): 156—158.

[14] 韩柳, 吴聪颖, 肖智宏. 新型数字智能变电站监控及巡视系统应用研究[J]. 现代电子技术, 2023, 46(3): 156—160.

[15] 申晓杰, 廖华, 袁卫义. 500kV 变电站集中监控模式的指挥策略及系统设计[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(7): 2740—2748.