

# 一种混沌多样性控制的萤火虫优化算法

徐华丽<sup>1</sup>, 苏守宝<sup>2,3</sup>, 严仍荣<sup>1</sup>, 马艳<sup>1</sup>

(1. 皖西学院信息工程学院, 六安 237012; 2. 中国科学院南京软件研究院, 南京 211169;  
3. 金陵科技学院计算机学院, 南京 211169)

**摘要:**针对基本萤火虫算法存在早熟停滞现象,提出了一种混沌多样性控制的萤火虫优化算法.运用混沌映射产生均匀分布的萤火虫初始位置,获得质量较好的初始解;在搜索过程中对适应值低的部分萤火虫进行混沌扰动,以保持群体活性,减小陷入局部最优的可能性;同时利用真实物理反弹理论对超越边界萤火虫位置进行控制,提高种群的多样性.用标准测试函数测试,实验结果表明,该算法能有效地提高了算法的全局搜索和局部开发能力,寻优精度和收敛速度明显提高.

**关键词:**群智能;萤火虫算法;混沌;混沌扰动;多样性

**中图分类号:**TP273+.4      **文献标识码:**A      doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2014.07.011

**引用格式:** Xu Huali, Su Shoubao, Yan Renrong, et al. A firefly algorithm with chaotic diversity control[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2014,44(7):612-617.  
徐华丽,苏守宝,严仍荣,等.一种混沌多样性控制的萤火虫优化算法[J].中国科学技术大学学报,2014,44(7):612-617.

## A firefly algorithm with chaotic diversity control

XU Huali<sup>1</sup>, SU Shoubao<sup>2,3</sup>, YAN Renrong<sup>1</sup>, MA Yan<sup>1</sup>

(1. School of Information and Engineering, West Anhui University, Lu'an 237012, China;  
2. Nanjing Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211169, China;  
3. School of Computers, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

**Abstract:** To overcome the disadvantage of premature convergence in the firefly algorithm, a firefly algorithm based on chaos diversity control (CDFA) was proposed. Applying chaotic mapping, CDFA achieved an initial firefly population that is high quality and uniformly distributed; it then disturbed some individuals with low fitness values by chaotic mapping in the process of the search so as to keep the group's activity and reduce the possibility of falling into local optimum; meanwhile, in order to increase the diversity of the population, the proposed algorithm used the physical reflection theory to control the position of the firefly outside the borders. Experimental results of bench mark functions show that CDFA can effectively improve the ability of the global search and local exploitation and has a better optimization precision and convergence rate than the basic FA.

**Key words:** swarm intelligence; firefly algorithm; chaos; chaos disturbance; diversity

收稿日期:2014-03-21;修回日期:2014-04-15

基金项目:国家自然科学基金(61375121,61075049),安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2014A277),六安市定向委托皖西学院产学研合作项目(2012LWA017),安徽省高校自然科学研究项目(KJ2010B469)资助.

作者简介:徐华丽(通讯作者),女,1977年生,硕士/副教授.研究方向:智能计算、数据挖掘. E-mail:hlxu@wxc.edu.cn

## 0 引言

萤火虫算法 (firefly algorithm, FA) 是英国剑桥大学学者 Yang 在 2008 年提出的一种群智能优化算法<sup>[1-2]</sup>. FA 算法是受自然界中萤火虫通过萤火进行信息交流这种群体行为的启发演变而来的. 由于 FA 具有结构简单、可调参数少、宜于并行处理等优点, 已被应用到许多科学和工程应用领域, 如聚类<sup>[3]</sup>、数字图像的压缩和图像处理<sup>[4-5]</sup>、旅行商问题<sup>[6]</sup>、优化问题<sup>[7]</sup>、天线设计<sup>[8-9]</sup>、刚性图像匹配<sup>[10]</sup>、动态问题<sup>[11-12]</sup>等, 并且表现出了良好的性能, 但它也存在着后期收敛速度慢, 寻优精度不高等缺点.

目前国内外学者对 FA 算法的研究大多是进一步扩展了其应用领域, 对算法本身的改进研究较少. 已有的改进方法主要分为两类, 第一类是将其与其他启发式算法相混合. 如文献<sup>[13-16]</sup>分别将 FA 算法与遗传算法、文化基因算法、蚁群算法、差分演化算法等相混合, 这些算法结合不同应用、选择混合不同算法在一定程度上提高了算法的性能. 第二类算法是运用混沌理论优化算法解空间, 利用混沌变量具有遍历性、随机性和规律性的特点进行搜索, 如文献<sup>[17]</sup>提出了一种基于混沌理论的动态种群萤火虫算法 (CDPFA), 运用立方映射混沌初始化萤火虫初始位置, 并在算法迭代过程中向种群中添加新的萤火虫个体, 在一定程度上提高了种群的多样性, 提高了算法的寻优精度和求解速度. 现有的混沌优化算法在变异时均采用均匀的变异方法, 算法的逃逸能力大大减弱, 使得改进的算法在有限的迭代次数内无法快速找到全局最优解. 因此, 如何增强种群的多样性和算法的逃逸能力, 使其在快速定位到最优解区域的同时提高最优解的精度, 值得进一步研究.

鉴于上述原因, 本文提出了一种混沌多样性控制的萤火虫优化算法 (a firefly algorithm with chaotic diversity control, CDFA), 利用混沌映射生成均匀分布的萤火虫初始种群, 在算法迭代过程中将最优值计入公告板, 设定一阈值如连续多次最优值没有更新则判断算法陷入局部最优, 则对该萤火虫位置进行高斯扰动, 同时为了减少种群多样性的流失, 运用了真实反弹理论对种群多样性进行了控制, 从而使算法搜索的多样性和逃出局部最优的逃逸能力大大增强.

## 1 基本萤火虫算法的分析

FA 算法是一种群智能技术, 它利用萤火虫的

发光特性, 模拟萤火虫之间相互吸引的行为, 在搜索空间中搜索最优解. 萤火虫的亮度用目标函数的适应值表示, 每个萤火虫都因受到邻近萤火虫中更亮的萤火虫的吸引, 而移动位置. 如果没有比这个萤火虫更亮的邻近萤火虫, 那么它就会随机移动. 萤火虫之间的相互吸引和位置更新过程可模拟成优化过程. 萤火虫之间的吸引力随着它们之间距离的减小而增加. 萤火虫  $i$  与萤火虫  $j$  之间的吸引度计算表示为:

$$\beta_{ij} = \beta_0 e^{-\lambda r_{ij}^2} \quad (1)$$

式中,  $\beta_0$  表示光源, 即距离  $r=0$  处的吸引力.  $r_{ij}$  表示两只萤火虫  $i, j$  之间的距离, 通常使用欧氏距离, 计算如下:

$$r_{ij} = \|x_i - x_j\|_2 = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (2)$$

也可以根据实际问题使用其他距离.  $\lambda$  表示媒介对光的吸收率.

萤火虫位置更新公式为:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \beta(x_j^t - x_i^t) + \alpha \epsilon_i^t \quad (3)$$

式中,  $x_i^{t+1}$  表示萤火虫  $i$  在  $t+1$  时刻的位置;  $\beta(x_j^t - x_i^t)$  表示更亮的萤火虫  $j$  对萤火虫  $i$  的吸引;  $\alpha \epsilon_i^t$  称为扰动因子, 其中  $\alpha \in [0, 1]$  表示  $t$  时刻的步长,  $\epsilon_i^t$  是  $t$  时刻服从高斯分布的随机因子.

## 2 混沌萤火虫优化算法

混沌运动是存在于非线性系统中的一种较为普遍的现象<sup>[18]</sup>, 存在于绝大多数非线性系统中. 混沌优化算法的基本思想是把混沌变量从混沌空间映射到解空间, 然后利用混沌变量具有遍历性、随机性及规律性的特点进行搜索, 从而可以避免演化算法陷入局部最优<sup>[19-20]</sup>. 本文选取典型的 Logistic 方程产生混沌序列:

$$Z_{n+1} = uZ_n(1 - Z_n); \quad n = 0, 1, 2, \dots; \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (4)$$

式中,  $u \in [0, 4]$ , 当  $u=4$  时为完全混沌状态.

### 2.1 混沌初始化种群的产生

随机产生一个  $D$  维向量  $z_1 = [z_{1,1}, z_{1,2}, \dots, z_{1,d}]$ ,  $z_{1,d} \in [0, 1]$ , 用向量  $z_1$  作为混沌迭代初始向量进行迭代, 根据式(4)将得到的各混沌变量映射到优化变量的各维取值空间. 计算目标函数值, 对其值进行排序从中选取  $N$  个较好的个体作为初始种群.

### 2.2 混沌扰动策略

为了防止进化后期由于多样性不足而使收敛速

度变慢,用混沌序列对部分萤火虫进行混沌扰动,以加强局部搜索能力,提高搜索精度.扰动过程如下:

$$\mathbf{Z}'_k = (1 - \alpha)\mathbf{Z}^* + \alpha\mathbf{Z}_k, 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (5)$$

式中,  $\mathbf{Z}^*$  为当前最优解映射到  $[0, 1]$  后形成的混沌向量;  $\mathbf{Z}_k$  为迭代  $k$  次后的混沌向量;  $\mathbf{Z}'_k$  为添加扰动后形成的混沌向量;  $\alpha$  指扰动的强度,  $k$  为迭代次数,  $m$  由优化问题决定.

$$\alpha = 1 - \left( \frac{k-1}{k} \right)^m \quad (6)$$

萤火虫根据适应值进行排序,选取适应值较低的部分 20% 的部分个体进行混沌扰动,将扰动后产生的新位置和适应值较高的 80% 部分重新组合生成新的种群进入下一轮搜索.

### 2.3 真实物理反弹理论的多样性控制策略

利用 2.2 节策略对萤火虫进行混沌扰动,由于随机性的扰动控制,会出现 2 种情况,一是可能出现多样性太高,在一定程度上会导致算法后期收敛速度变慢或不收敛,二是可能出现种群多样性较低算法无法快速逃离局部最优.为了防止萤火虫飞出解空间范围之外,已有文献大多采用限制操作,将萤火虫限制在边界,这样导致群体多样性损失,为此,引入文献[21]的真实物理反弹理论将解空间外的萤火虫反弹回解空间内,增强种群的多样性.

位置公式更新如下:

$$\begin{aligned} x'_{id}(t) = & \\ & lb_{id} + r[lb_{id} - x_{id}(t)], lb_{id} - a < x_{id}(t) < kb_{id} \\ & x_{id}(t) + v_{id}(t+1), lb_{id} < x_{id}(t) < ub_{id} \\ & ub_{id} - r[x_{id}(t) - ub_{id}], ub_{id} < x_{id}(t) < ub_{id} + a \\ & lb_{id} + r[ub_{id} - lb_{id}], lb_{id} - a > x_{id}(t) \\ & \text{or } x_{id}(t) > ub_{id} + a \end{aligned} \quad (7)$$

式中,  $lb_{id}$  和  $ub_{id}$  是解空间第  $i$  个萤火虫第  $d$  维的上限和下限,  $r$  为服从  $[0, 1]$  变化的随机数,  $a$  是常量.

### 2.4 算法流程

CDFA 算法的流程描述如下:

**Step 1** 初始化各参数:最大吸引度  $\beta_0$ , 步长因子  $\alpha$ , 最大迭代次数  $T_{max}$  等;根据 2.1 节的混沌策略产生取值区间的混沌初始化种群;

**Step 2** 判断迭代条件是否达到最大迭代次数或给定精度,若满足,则进入迭代;若不满足,就退出迭代,结束;

**Step 3** 计算目标函数  $f$ , 根据目标函数计算萤火虫各自最大荧光亮度;

**Step 4** 所有萤火虫移位;

① 对每只萤火虫,寻找比它亮的萤火虫,根据式(2)计算它们之间的距离;

② 由适应值函数计算群体中萤火虫的相对亮度,由式(1)计算萤火虫的相对吸引度,根据相对亮度决定萤火虫的移动方向,由式(3)更新位置;

**Step 5** 根据亮度对萤火虫排序,根据 2.2 节混沌扰动策略用式(5)对适应值后 20% 萤火虫位置进行混沌扰动;

**Step 6** 检查萤火虫的位置,运用式(7)进行多样性控制;

**Step 7** 跳到 Step 2;

**Step 8** 算法结束,输出结果.

## 3 数值实验与结果分析

### 3.1 实验操作环境

实验参数设置如下:萤火虫数  $m = 30$ ,  $\beta_0 = 1.0$ ,  $\gamma = 1.0$ ,  $\alpha = 0.2$ ,  $T_{max} = 2000$ , 算法中的萤火虫的适应值函数取为测试函数,每个函数独立运行 50 次,取平均最优适应值作为比较依据,测试维数为 30.

### 3.2 实验结果对比分析

为了验证本文算法的优化性能,分别选取单模态函数和多模态函数进行对比实验,其中的 6 个测试函数取自文献[22].图 1~6 给出了  $f_1$  -  $f_6$  的进化曲线.表 1 和表 2 分别给出了不同算法在处理函数  $f_1$  -  $f_6$  Benchmark 问题所得的最优值、最差值、中值、平均值和标准差结果.

图 1~3 给出了单模态函数  $f_1$  -  $f_3$  运用不同算法的进化曲线.如图 1~2 所示,对于简单的  $f_1$  和  $f_2$  函数,本文算法能迅速找到最优解,而对于复杂的单模态  $f_3$  函数,基本萤火虫算法和 CDPFA 下降较慢,本文算法也能找出正确的搜索方向,下降速度较快,这是由于在混沌扰动的同时采用了真实反弹理论控制边界萤火虫增加了种群多样性,增强了算法的全局搜索和局部开发能力.

从图 4~6 可见,对于多模态函数  $f_4$  -  $f_6$ , 本文算法比其他算法收敛速度快,全局搜索能力明显优于其他算法.从表 2 可知,FA 和 CDPFA 在处理复杂多模态函数时,最优解和最差解差异很大,说明该算法的稳定性都很差,而本文算法差异较小,说明该算法相对稳定,这是由于本文算法利用了混沌的随机性特点和混沌扰动增强了种群的多样性,在处理较复杂问题时能够在解空间范围内进行较详尽的探索,提高了算法逃出局部最优解的能力的结果.

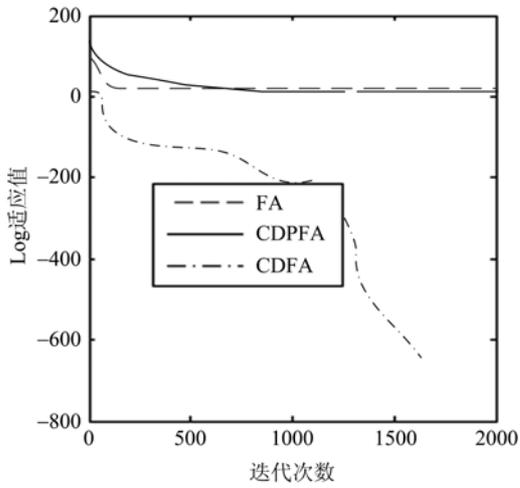


图 1 30 维  $f_1$  收敛曲线

Fig. 1 Convergence results of 30-dimension  $f_1$

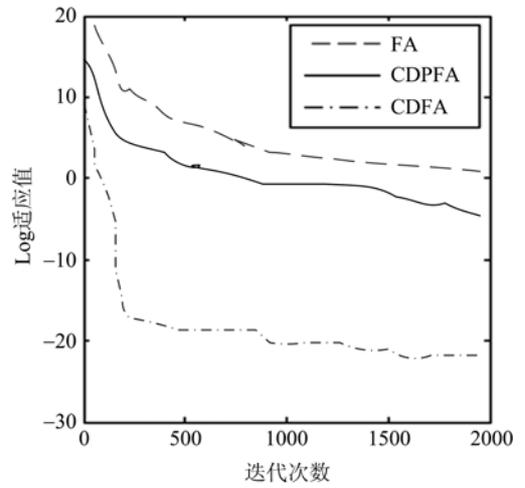


图 2 30 维  $f_2$  收敛曲线

Fig. 2 Convergence results of 30-dimension  $f_2$

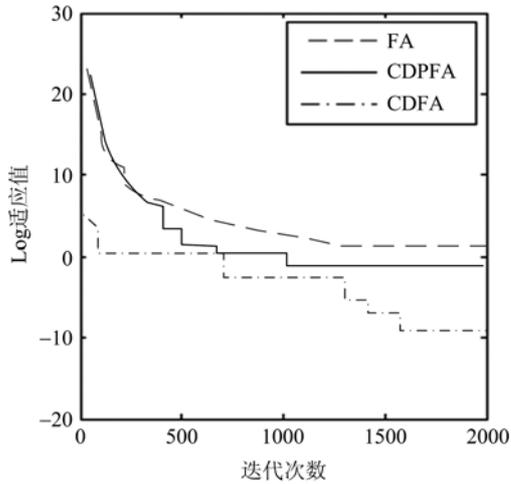


图 3 30 维  $f_3$  收敛曲线

Fig. 3 Convergence results of 30-dimension  $f_3$

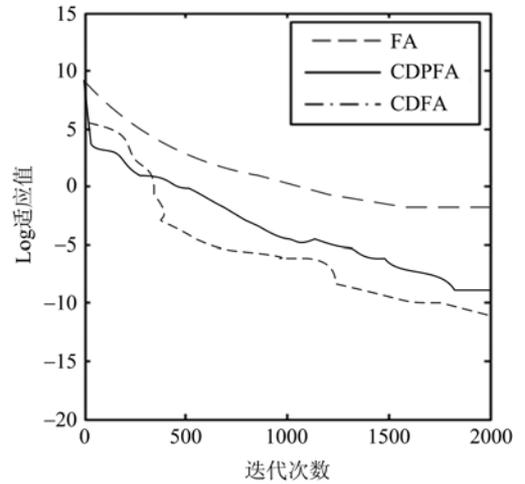


图 4 30 维  $f_4$  收敛曲线

Fig. 4 Convergence results of 30-dimension  $f_4$

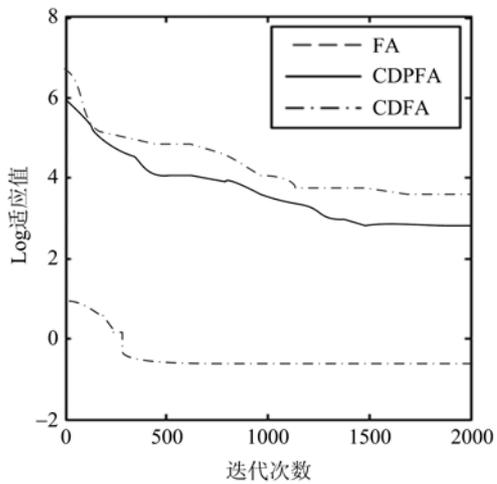


图 5 30 维  $f_5$  收敛曲线

Fig. 5 Convergence results of 30-dimension  $f_5$

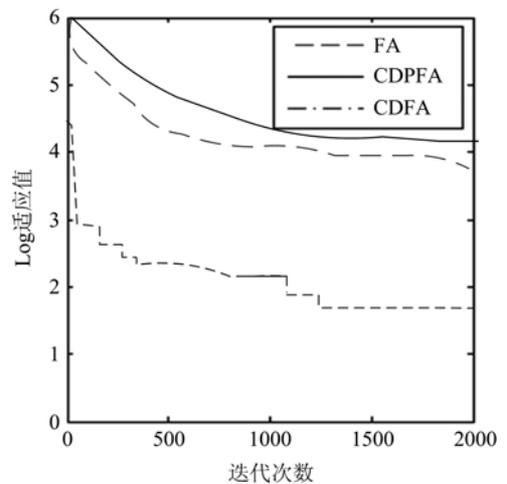


图 6 30 维  $f_6$  收敛曲线

Fig. 6 Convergence results of 30-dimension  $f_6$

表 1 测试函数  $f_1 - f_6$ Tab. 1 Benchmark Functions  $f_1 - f_6$ 

函 数	名称	维数	范 围
$f_1 = 10^6 x_1^2 + \sum_{i=2}^n x_i^2$	Tablet	30	$[-100, 100]$
$f_2 = \sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^i x_j)^2$	Quadric	30	$[-100, 100]$
$f_3 = \sum_{i=1}^n [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2]$	Rosenbrock	30	$[-50, 50]$
$f_4 = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n (x_i)^2 - \prod_{i=1}^n \cos((x_i)/\sqrt{i}) + 1$	Griewank	30	$[-600, 600]$
$f_5 = \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10)$	Rastrigin	30	$[-5.12, 5.12]$
$f_6 = \sum_{i=1}^{n-1} (x_i^2 + x_{i+1}^2)^{0.25} \times [\sin(50 \times (x_i^2 + x_{i+1}^2)^{0.1} + 1.0)]$	Schaffer $f_7$	30	$[-2.408, 2.408]$

表 2 CDFA 和其他算法在 Benchmark 问题上的性能对比

Tab. 2 Performance comparison between CPFA and other algorithms in benchmark function

函数	算法	最小值	中间值	平均值	方差	最大值
Tablet	FA	$5.3e-21$	$1.2e-19$	$1.1e-18$	$8.2e-19$	$5.7e-17$
	CPSO	$1.44-11$	$1.83e-10$	$1.6e-10$	$1.29e-11$	$3.12e-09$
	CDPFA	$1.5e-12$	$1.9e-10$	$1.7e-10$	$1.3e-11$	$2.8e-10$
	CDFA	$2.2e-26$	$2.5e-24$	$3.9e-24$	$4.7e-24$	$1.6e-23$
Quadric	FA	0.752	70.43	$1.2e+2$	$1.1e+2$	$4.9e+02$
	CPSO	$8.1e-05$	$3.32e-03$	$4.01e-04$	$1.9e-03$	$9.9e-03$
	CDPFA	$7.8e-04$	$3.5e-03$	$3.8e-03$	$2.0e-03$	$1.1e-02$
	CDFA	$4.5e-11$	$6.6e-10$	$1.3e-09$	$1.4e-09$	$7.5e-09$
Rosenbrock	FA	4.923	78.32	93.71	$1.5e+02$	$1.1e+03$
	CPSO	$8.9e-02$	21.56	31.89	31.78	$1.68e+02$
	CDPFA	$9.2e-02$	21.74	32.12	32.18	$1.7e+02$
	CDFA	$2.3e-03$	8.322	12.28	17.19	78.56
Griewank	FA	$6.8e-11$	$1.98e-02$	$2.7e-02$	$2.8e-02$	0.108
	CPSO	$4.46-12$	$1.79e-02$	$2.48e-02$	$3.28e-02$	0.152
	CDPFA	$4.52-12$	$1.8e-02$	$2.5e-02$	$3.3e-02$	0.157
	CDFA	0	$8.6e-03$	$1.3e-02$	$1.6e-02$	$6.7e-02$
Rastrigin	FA	31.27	56.71	56.03	12.28	81.39
	CPSO	$7.19e-09$	$7.12e-08$	0.189	0.485	2.045
	CDPFA	$7.18e-09$	$6.9e-07$	0.201	0.498	2.062
	CDFA	0	$4.0e-12$	0.582	1.087	3.990
Schaffer	FA	$2.38e+02$	$2.87e+02$	$2.87e+02$	31.12	$3.5e+02$
	CPSO	80.98	$1.51e+02$	$1.29e+02$	30.79	$2.29e+02$
	CDPFA	81.86	$1.48e+02$	$1.3e+02$	31.21	$2.3e+02$
	CDFA	0	0.2981	1.5397	2.2716	9.1503

为了进一步比较本文算法与其他算法的优劣,增加了与混沌粒子群算法(CPSO)的比较,结果见表 2.由对  $f_1$  函数和  $f_2$  函数测试结果可以显示,CDPFA 和 CPSO 算法具有比 FA 更差的搜索性能,说明简单的混沌变异增加了 FA 算法的随机性,算法在搜索后期不能得到一个较快的搜索速度,而本文算法较 CPSO 具有较明显的优势.

## 4 结论

针对基本萤火虫算法易早熟陷入局部最优值、易停滞等问题,提出了一种混沌多样性控制策略的萤火虫优化算法.利用混沌系统的随机性、遍历性产生均匀分布的初始解;在搜索过程中,当算法出现停滞或进化速度变慢时,对适应值低的部分采用混沌

扰动,同时在位置更新过程中利用真实物理反弹理论将解空间之外的萤火虫反弹回解空间,有效地保持了种群的多样性.通过与基本萤火虫和其他改进算法对比测试6种基准测试函数仿真实验,实验结果表明该算法能很好地保持种群的多样性,具有较好的收敛速度和精度.下一步的研究内容是将该算法应用到复杂的实际工程问题之中.

#### 参考文献(References)

- [1] Yang X S. Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms [M]. UK: Luniver Press, 2008.
- [2] Yang X S. Firefly algorithms for multimodal optimization[C]// Proceedings of the 5th International Conference on Stochastic Algorithms: Foundations and Applications. Sapporo, Japan; Springer, 2009: 169-178.
- [3] Senthilnath J, Omkar S N, Mani V. Clustering using firefly algorithm: Performance study[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2011, 1(3): 164-171.
- [4] Horng M H, Jiang T W. The codebook design of image vector quantization based on the firefly algorithm [C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Computational Collective Intelligence: Technologies and Applications. Kaohsiung, Taiwan, China: Springer, 2010: 438-447.
- [5] Horng M H. Vector quantization using the firefly algorithm for image compression[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(1): 1 078-1 091.
- [6] Hönig U. A firefly algorithm-based approach for scheduling task graphs in homogenous systems[C]// Proceedings of the International Conference on Informatics. Anaheim, USA: ACTA Press, 2010: 256-263.
- [7] Jati G K, Suyanto. Evolutionary discrete firefly algorithm for travelling salesman problem [C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Adaptive and Intelligent Systems. Klagenfurt, Austria: Springer, 2011, 6943: 393-403.
- [8] Basu B, Mahanti G K. Firefly and artificial bees colony algorithm for synthesis of scanned and broadside linear array antenna [J]. Progress in Electromagnetics Research B, 2011, 32: 169-190.
- [9] Chatterjee A, Mahanti G K, Chatterjee A. Design of a fully digital controlled reconfigurable switched beam concentric ring array antenna using firefly and particle swarm optimization algorithm [J]. Progress in Electromagnetics Research B, 2012, 36: 113-131.
- [10] Farahani S M, Nasiri B, Meybodi M R. A multiswarm based firefly algorithm in dynamic environments[C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Signal Processing Systems. Yantai, China: IEEE Press, 2011: 68-72.
- [11] Abshouri A A, Meybodi M R, Bakhtiary A. New firefly algorithm based on multi swarm and learning automata in dynamic environments [C] // Proceedings of the 3rd International Conference on Signal Processing Systems. Yantai, China: IEEE Press, 2011: 73-77.
- [12] Zhang Y D, Wu L N. A novel method for rigid image registration based on firefly algorithm [J]. International Journal of Research and Reviews in Soft and Intelligent Computing, 2012, 2(2): 141-146.
- [13] Luthra J, Pal S K. A hybrid firefly algorithm using genetic operators for the cryptanalysis of a monoalphabetic substitution cipher [C]// World Congress on Information and Communication Technologies. Mumbai, India: IEEE Press, 2011: 202-206.
- [14] Fister Jr I, Yang X S, Fister I, et al. Memetic firefly algorithm for combinatorial optimization [C]// Proceedings of the 5th International Conference on Bioinspired Optimization Methods and their Applications. Ljubljana, Slovenia: IEEE Press, 2012: 75-86.
- [15] Aruchamy R, Vasantha K D. A comparative performance study on hybrid swarm model for micro array data [J]. International Journal of Computer Applications, 2011, 30(6): 10-14.
- [16] Abdullah A, Deris S, Mohamad M S, et al. A new hybrid firefly algorithm for complex and nonlinear problem [C]// 9th International Conference on Distributed Computing and Artificial Intelligence. Springer, 2012: 673-680.
- [17] 冯艳红,刘建芹,贺毅朝.基于混沌理论的动态种群萤火虫算法[J].计算机应用,2013,33(3):796-799.
- [18] Lu H J, Zhang H M, Ma L H. A new optimization algorithm based on chaos [J]. Zhejiang University Science A, 2006, 7(4): 539-542.
- [19] Tavazoei M S, Haeri M. An optimization algorithm based on chaotic behavior and fractal nature [J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2007, 206(2): 1 070-1 081.
- [20] Choi C, Lee J J. Chaotic local search algorithm [J]. Artificial Life and Robotics, 1998, 2(1): 41-47.
- [21] 徐刚,杨玉群,刘斌斌,等.一种基于多样性策略的粒子群算法[J].南昌大学学报,2013,37(1):17-21.
- [22] 赫然,王永吉,王青,等.一种改进的自适应逃逸微粒群算法及实验分析[J].软件学报,2005,16(12):2 036-2 044.