

一种布谷鸟初始化的萤火虫算法及工程应用

郝晓莹, 贺兴时, 薛菁菁

(西安工程大学 理学院, 陕西 西安 710048)

摘要:为进一步提高萤火虫算法(firefly algorithm, FA)的收敛速度和计算精度,提出一种布谷鸟算法(cuckoo search, CS)初始化萤火虫初始种群的算法(CSFA)。该算法利用布谷鸟算法来优化FA算法的初始种群,使得萤火虫迭代时得到的位置有助于加速CSFA算法收敛并找到全局最优解。通过6个标准测试函数进行仿真实验,分别从平均值、标准差、最优值和最差值四方面进行分析,结果表明CSFA算法在寻优精度和稳定性方面都超过了萤火虫算法和布谷鸟算法,从迭代曲线图中也可以看出改进后的算法可更快地接近于全局最优值。最后将CSFA算法应用到压力容器设计问题中,应用结果表明CSFA算法不管是最优值、最差值还是平均值和标准差都要好于SBSM算法, CPSO算法, HPSO算法, TVDFPA算法对压力容器问题的求解值。

关键词:萤火虫算法;布谷鸟算法;初始种群;压力容器设计

中图分类号: TP18

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2018)12-0167-04

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2018.12.035

A Cuckoo Initialization of Firefly Algorithm and Its Engineering Application

HAO Xiao-ying, HE Xing-shi, XUE Jing-jing

(School of Science, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to further improve the convergence speed and accuracy of firefly algorithm (FA), we propose an algorithm of initializing firefly initial population by cuckoo algorithm (CSFA). The algorithm uses cuckoo search (CS) to optimize FA initial population, making the firefly iteration obtained position helps accelerate the convergence of the CSFA and find the global optimal solution. Simulation experiment through six standard test functions, respectively from the mean, standard deviation, the optimal value and worst for analysis, the results show that CSFA algorithm in the optimization precision and stability than FA and CS. It also can be seen from the iterative curve that the improved algorithm can be close to the global optimal value more quickly. Finally, the CSFA is applied to the pressure vessel design, which shows that CSFA is better than SBSM, CPSO, HPSO, TVDFPA to solve the pressure vessel problem.

Key words: firefly algorithm; cuckoo search algorithm; initial population; pressure vessel design

0 引言

2008年, Yang通过模拟萤火虫的闪光行为提出萤火虫算法^[1-2]。萤火虫算法具有操作简单, 需要调整参数少, 易实现等特点, 一经提出就成为启发算法研究的热点, 现已广泛应用于TSP问题^[3]、车间调度^[4]、图像检测^[5]等领域。虽然许多学者对标准萤火虫算法进行了改进^[6-8], 但萤火虫算法的收敛速度慢, 求解精度不高等缺陷仍然制约其发展和应用。因此, 更好地提升萤火虫算法的寻优性能具有广阔的研究空间。

对于非线性工程优化问题之一的压力容器设计问

题^[9], 传统的优化方法求解质量往往不高。而萤火虫算法是一种非常有潜力的工程优化算法, 因此将其扩展到工程应用领域非常必要。通过引进布谷鸟算法, 首先对萤火虫初始种群进行优化, 使初始种群的质量大大提高, 加快了萤火虫向最优解收敛的速度; 其次, 通过6个标准测试函数对CSFA算法的性能进行测试; 最后应用该算法对压力容器设计问题进行求解。

1 萤火虫算法及其数学模型

萤火虫算法是由萤火虫的闪光行为启发而来, 其

收稿日期: 2018-01-17

修回日期: 2018-05-22

网络出版时间: 2018-09-21

基金项目: 陕西省软科学研究计划项目(2014KRM280D); 西安市教育科技重大招标项目(2015ZB-ZY04)

作者简介: 郝晓莹(1993-), 女, 硕士研究生, 研究方向为智能计算与大数据分析; 贺兴时, 教授, 研究方向为智能优化算法、数理统计、数据挖掘等。

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20180920.1535.010.html>

主要思想是利用亮度较高的萤火虫吸引亮度较低的萤火虫,在亮度较低的萤火虫向亮度较高的萤火虫的移动过程中完成位置更新。萤火虫算法的基本数学模型如下:

$$I_i = f(x_i) \quad (1)$$

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

$$r_{ij} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (3)$$

$$x_j(t+1) = x_j(t) + \beta_{ij}(r_{ij})(x_i(t) - x_j(t)) + \alpha \xi_j \quad (4)$$

其中, I_i 为第 i 只萤火虫的绝对亮度; $f(x_i)$ 为目标函数值; β_0 为最大吸引力; r_{ij} 为第 i 只萤火虫到第 j 只萤火虫的笛卡尔距离; α 为常数; ξ_j 为由高斯分布、均匀分布或者其他分布得到的随机数向量。

2 布谷鸟算法及其数学模型

布谷鸟算法是模拟布谷鸟寻窝产卵飞行的一种随机过程。该算法可以用以下三点理想化条件:(1)每只布谷鸟每次仅产一个蛋,并且随机产在一个鸟窝中;(2)质量最好的鸟窝将被保留到下一代;(3)固定鸟窝的数量 n , 鸟窝宿主发现布谷鸟鸟蛋的概率是 $P_a \in [0,1]$ [10-13]。在这种情况下,鸟窝主人可以将该鸟蛋丢弃,或者放弃这个鸟窝,在新的地方重新建立一个鸟窝。在这3个理想化条件下,布谷鸟根据 Levy 飞行进行搜索,步长更新公式为:

$$X_i^{t+1} = X_i^t + \alpha \oplus \text{Levy}(\lambda), i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

其中, X_i^t 表示第 i 个鸟窝在第 t 代的鸟窝位置; α 表示步长,一般令其为 1; \oplus 表示对点乘法; $\text{Levy}(\lambda)$ 表示服从 Levy 分布的随机飞行步长。

$$\text{Levy} \sim u = t^{-\lambda} (1 < \lambda \leq 3) \quad (6)$$

3 布谷鸟初始化的萤火虫算法

众所周知,初始值对启发式算法意义重大,初始种群的选取能够直接影响算法的性能及收敛速度。为了更好地改进萤火虫算法初始种群的质量,将 CS 算法思想用于 FA 算法的位置初始化过程,提出了一种布谷鸟初始化的萤火虫算法,从而改善了萤火虫算法的寻优性能。

CSFA 算法步骤如下:

(1) 初始化布谷鸟种群,设置鸟窝数量 n , 最大迭代次数 N , 发现概率为 P_a , 搜索域上下界 Ub 、 Lb ;

(2) 利用目标函数对每个鸟窝进行测试,并记录当前的最好解,将最优鸟窝位置保留到下一代;

(3) 利用式 5 对其他鸟窝位置进行更新,对现有的鸟窝与上一代鸟窝位置进行对比,若较好,将其作为

当前最好位置;

(4) 用一个服从均匀分布的随机数与布谷鸟的鸟蛋被鸟窝宿主发现的概率 P_a 进行比较,若 $r > P_a$, 则随机对鸟窝的位置进行列维变化,获得一组新的鸟窝位置,反之不变。再对新的位置进行测试,将最优位置保留到下一代;

(5) 判断是否满足结束条件,若不满足则返回步骤 2 重新运行;若满足,则跳出循环,输出最优位置;

(6) 将布谷鸟算法得到的最优位置作为萤火虫算法的初始位置,计算每个萤火虫个体的荧光亮度;

(7) 利用式 1 和式 2 计算个体之间的相对亮度和吸引力,并根据相对亮度决定个体的移动方向;

(8) 根据式 3 更新个体位置,并对处在最优位置的个体进行随机扰动,计算每个个体的适应度函数值,并找出最优解;

(9) 检验是否满足终止条件。若满足,则输出全局最优值;若未达到终止条件,则返回步骤 7。

4 仿真实验和结果分析

4.1 测试函数集及实验参数设置

数值实验在 Windows7 环境下运行,利用 Matlab7.0 进行编程。对于所有的测试函数,CS 算法设置的基本参数值为:种群规模 $n = 25$, 最大迭代次数为 500, 发现概率为 $P_a = 0.25$ 。FA 算法设置的基本参数值为:种群规模 $n = 50$, 光强吸收系数 $\lambda = 1$, 步长因子 $\alpha = 0.02$, 最大吸引力 $\beta_0 = 1$, 最大迭代次数为 500。

为了验证 CSFA 算法的性能,分别将 CSFA 算法、CS 算法、FA 算法用于 6 个典型的测试函数,并对结果进行了比较。这 6 个测试函数如下所示:

$$(1) \text{Sphere 函数: } f_1 = \sum_{i=1}^n x_i^2。$$

$$(2) \text{Rastrigin 函数: } f_2 = \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10)。$$

$$(3) \text{Rosenbrock 函数: } f_3 = \sum_{i=1}^{n-1} [100(x_i^2 - x_{i+1})^2 + (x_i - 1)^2]。$$

$$(4) \text{Chung Reynolds 函数: } f_4 = (\sum_{i=1}^n x_i^2)^2。$$

$$(5) \text{Griewank 函数: } f_5 = \frac{1}{4000} [\sum_{i=1}^n (x_i - 100)^2] - [\prod_{i=1}^n \cos(\frac{x_i - 100}{\sqrt{i}})] + 1。$$

$$(6) \text{Zakharov 函数: } f_6 = \sum_{i=1}^d x_i^2 + (\frac{1}{2} \sum_{i=1}^d i x_i^2)^2 + (\frac{1}{2} \sum_{i=1}^d i x_i)^4。$$

基准测试函数的维数、迭代次数及搜索空间如表 1 所示。

| 函数名称 | 维数 | 最大迭代次数 | 搜索空间 | 理论最优值 |
|------------|----|--------|-----------------|-------|
| Sphere | 30 | 500 | $[-5.12, 5.12]$ | 0 |
| Rastrigin | 30 | 500 | $[-5.12, 5.12]$ | 0 |
| Rosenbrock | 10 | 500 | $[-30, 30]$ | 0 |
| Ackley | 15 | 500 | $[-35, 35]$ | 0 |
| Griewank | 10 | 500 | $[-100, 100]$ | 0 |
| Zakharov | 15 | 500 | $[-5, 10]$ | 0 |

4.2 实验结果分析

为了更好地验证 CSFA 算法的性能,对选取的测试函数,分别利用 FA 算法、CS 算法、CSFA 算法独立运行 30 次,统计结果如表 2 所示。其中,最差值、最优值反映了解的质量,平均值反映了解的整体水平,标准差反映了算法的稳定性。

从表 2 可以看出,无论从最优值、最差值,还是标准差和平均值,CSFA 算法在寻优精度上都明显高于 FA 算法和 CS 算法。

为了直观地比较 3 种算法的寻优精度及收敛速度,画出 FA 算法、CS 算法和 CSFA 算法在六个测试函

数上的迭代曲线,如图 1 所示。可以发现,CSFA 算法比 FA 算法和 CS 算法能更快地收敛到最优解,求解精度也大大提高。

表 2 FA 算法、CS 算法和 CSFA 算法的性能比较

| 函数 | 算法 | 最优值 | 平均值 | 最差值 | 标准差 |
|-------|------|-----------|--------------|-----------|--------------|
| f_1 | FA | 0.001 2 | 0.001 2 | 0.030 7 | 0.011 5 |
| | CS | 0.001 2 | 0.021 1 | 0.031 5 | 0.010 6 |
| | CSFA | 5.20E-07 | 1.20E-06 | 2.14E-06 | 5.386 22E-07 |
| f_2 | FA | 80.186 6 | 102.805 3 | 137.977 8 | 19.175 5 |
| | CS | 162.410 8 | 205.230 6 | 257.829 2 | 31.591 5 |
| | CSFA | 10.994 4 | 15.964 5 | 23.928 5 | 4.588 3 |
| f_3 | FA | 6.945 6 | 9.409 7 | 86.128 4 | 1.986 4 |
| | CS | 5.012 3 | 6.893 2 | 8.442 5 | 1.448 0 |
| | CSFA | 3.745 6 | 5.497 5 | 6.380 0 | 1.220 5 |
| f_4 | FA | 0.002 7 | 0.006 0 | 0.008 8 | 0.002 4 |
| | CS | 0.003 0 | 2.218 9 | 5.065 3 | 0.035 3 |
| | CSFA | 8.73E-06 | 1.936 96E-05 | 1.31E-05 | 1.596 94E-05 |
| f_5 | FA | 0.017 3 | 0.112 9 | 0.261 4 | 0.099 2 |
| | CS | 0.050 6 | 0.063 0 | 0.088 1 | 0.013 4 |
| | CSFA | 0.017 2 | 0.027 6 | 0.034 5 | 0.006 1 |
| f_6 | FA | 0.121 0 | 2.788 9 | 5.879 5 | 2.475 2 |
| | CS | 5.173 7 | 11.085 0 | 28.655 5 | 8.918 0 |
| | CSFA | 6.34E-05 | 0.016 6 | 0.032 8 | 0.011 6 |

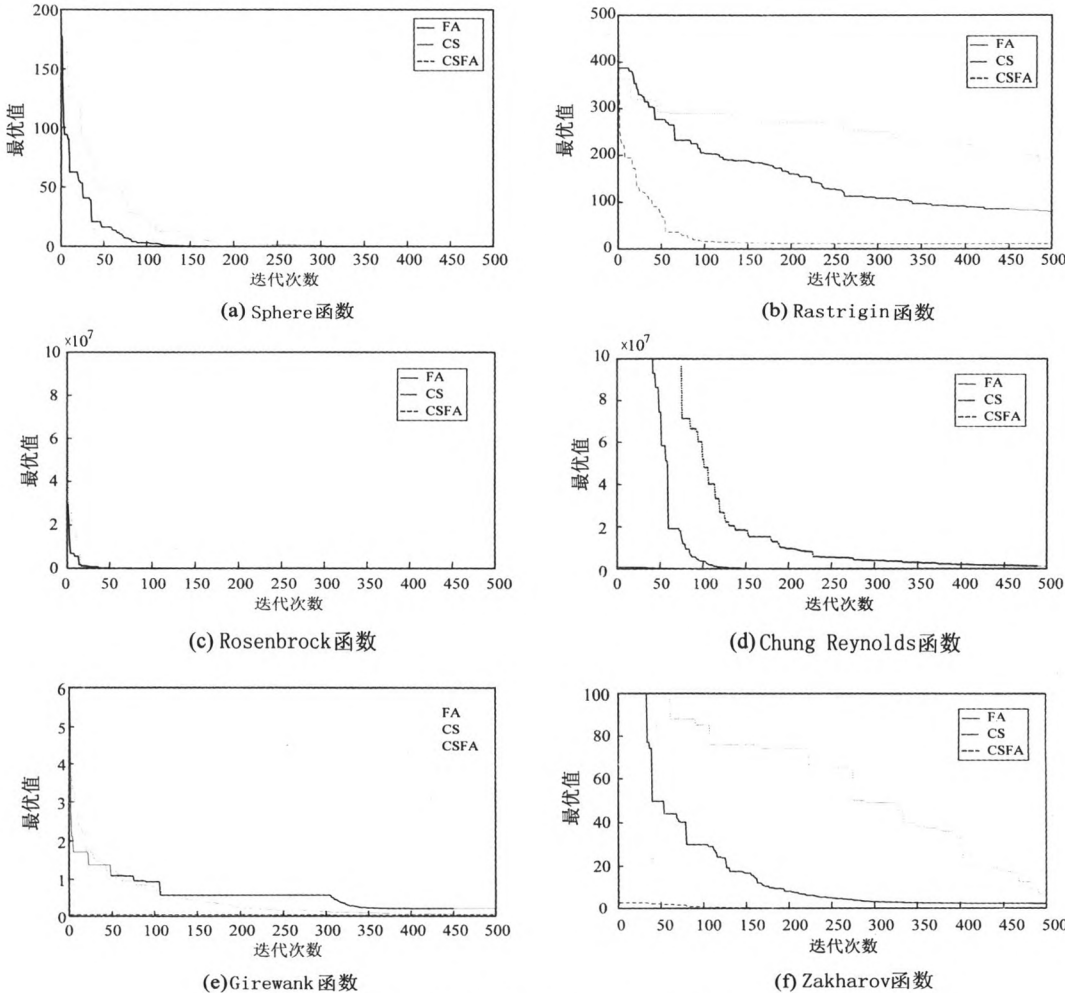


图 1 FA、CS 和 CSFA 的收敛曲线比较

5 布谷鸟初始化的萤火虫算法求解压力容器设计问题

随着启发式算法的发展,出现了越来越多的新型算法。为了验证新算法的性能,它们被用于各种工程结构设计中,而其中应用最广泛的就是压力容器设计问题。它有 4 个设计变量:半球形厚度,厚度,内部半径和长度。其主要目标是在非线性约束条件下,使得设计总成本达到最小。压力容器示意图如图 2 所示。

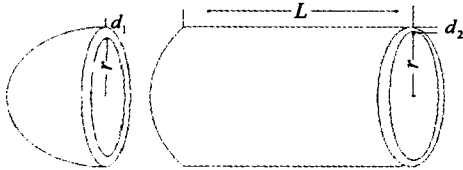


图 2 压力容器示意图

压力容器设计问题目标函数和约束条件为:

表 3 5 种算法对压力容器优化设计问题的最好结果比较

| 变量 | SBSM | CPSO | HPSO | TVDFPA | CSMA |
|-------|----------------|-----------|------------|------------|------------|
| d_1 | 0.812 5 | 0.812 5 | 0.812 5 | 0.812 5 | 0.850 4 |
| d_2 | 0.437 5 | 0.437 5 | 0.437 5 | 0.437 5 | 0.424 3 |
| r | 42.098 4 | 42.091 3 | 42.098 4 | 42.098 4 | 44.060 4 |
| L | 176.637 1 | 176.7465 | 176.636 6 | 176.636 59 | 153.753 3 |
| g_1 | -0.002 300 | -1.4E-03 | -8.8E-07 | -1.1E-10 | -4.894E-05 |
| g_2 | -0.035 882 | -3.6E-04 | -3.6E-02 | -0.035 88 | -0.003 978 |
| g_3 | -23 420.596 60 | -118.77 | 3.122 6 | -0.000 64 | -3.052 06 |
| g_4 | -57.715 500 | -63.254 | -463.363 4 | -63.363 4 | -86.246 7 |
| f | 6 171.000 | 6 061.078 | 6 059.714 | 6 059.714 | 6 034.608 |

表 4 5 种算法对压力容器优化设计问题的统计结果比较

| 算法 | 最优值 | 平均值 | 最差值 | 标准差 |
|--------|---------------|---------------|---------------|------------|
| SBSM | 6 171.000 0 | 6 335.050 0 | 6 453.650 0 | — |
| CPSO | 6 061.077 7 | 6 147.133 2 | 6 363.804 1 | 86.450 0 |
| HPSO | 6 288.677 0 | 6 099.939 3 | 6 288.670 | 86.200 0 |
| TVDFPA | 6 059.714 335 | 6 348.511 000 | 6 435.126 000 | 329.244 0 |
| CSFA | 6 034.608 | 6 079.57 | 6 239.845 7 | 71.121 061 |

6 结束语

萤火虫算法作为一种性能良好的算法,在解决工程优化问题中具有巨大的潜力。文中提出一种布谷鸟初始化的萤火虫算法(CSFA),通过对 6 个标准测试函数的仿真实验,对比已有的启发算法的测试结果,得到了更高精度的最优解。在应用方面,将 CSFA 算法用在压力容器设计问题中,也体现了更好的寻优性能。而压力容器设计问题是一种单目标,连续型优化问题,为验证该算法的广泛性,将其应用到多目标及离散型优化问题,将是今后值得关注的研究方向。

$$\begin{aligned} \min f(x) &= 0.622\,4d_1rL + 1.778\,1d_2r^2 + \\ &\quad 3.166\,1d_1^2L + 19.84d_1^2r \\ \text{subject to } &\begin{cases} g_1(x) = -d_1 + 0.019\,3r \leq 0 \\ g_2(x) = -d_2 + 0.009\,54r \leq 0 \\ g_3(x) = -\pi r^2L - \frac{4\pi}{3}r^3 + 1\,296\,000 \leq 0 \\ g_4(x) = L - 240 \leq 0 \end{cases} \end{aligned}$$

其中, $d_1 = 0.062\,5n_1, d_2 = 0.062\,5n_2, 1 \leq n_1 \leq 99, 1 \leq n_2 \leq 99, 10 \leq r, L \leq 100$ 。

利用 CSFA 算法对压力容器设计问题独立运行 10 次进行求解,并与利用 SBSM 算法^[14]、CPSO 算法^[15]、HPSO 算法^[16]、TVDFPA 算法^[17] 求解压力容器问题的结果进行比较。从表 3 和表 4 可以看出,CSFA 算法不管是最优值、最差值还是平均值和标准差都要好于其他算法对压力容器问题的求解值。

参考文献:

[1] YANG Xinshe. Nature-inspired metaheuristic algorithms [M]. [s. l.]:Luniver Press,2010.

[2] YANG Xinshe. Firefly algorithms for multimodal optimization[C]//International symposium on stochastic algorithms. Sapporo, Japan:Springer,2009:169-178.

[3] 于宏涛,高立群,韩希昌. 求解旅行商问题的离散人工萤火虫算法[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2015,43(1):126-131.

[4] 刘长平,叶春明. 置换流水车间调度问题的萤火虫算法求

(下转第 175 页)

究了基于塔型分解的红外与微光图像融合方法,较全面地描述了塔形分解的实现、重构及特性,重点分析比较了基于像素和区域特征图像融合方式。通过实验详细地分析了不同的金字塔类型、不同分解层数和不同融合方式对图像融合效果的影响。实验结果表明,采用塔形分解图像融合方法可以较好地融合图像。但由于对图像融合效果的影响不仅取决于融合方法,其图像的类型也是一个重要因素。因此,下一步将针对其他类型的图像融合情况进行进一步研究。

参考文献:

- [1] GOSHTASBY A A. Fusion of multi-exposure images[J]. *Image and Vision Computing*, 2005, 23(6): 611-618.
- [2] LOONEY D, MANDIC D P. Multiscale image fusion using complex extensions of EMD[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, 57(4): 1626-1630.
- [3] SIMONE G, FARINA A, MORABITO F C, et al. Image fusion techniques for remote sensing applications[J]. *Information Fusion*, 2002, 3(1): 3-15.
- [4] 任海鹏. 可见光与红外图像融合研究现状及展望[J]. *舰船电子工程*, 2013, 33(1): 16-19.
- [5] HAN Juanjuan, LOFFELD O, HARTMANN K, et al. Multi image fusion based on compressive sensing[C]//*International conference on audio, language and image processing*. Shanghai, China: IEEE, 2010: 1463-1469.
- [6] 苗启广, 王宝树. 基于改进的拉普拉斯金字塔变换的图像融合方法[J]. *光学学报*, 2007, 27(9): 1605-1610.
- [7] 王 建, 刘 肖, 王国琛. 基于梯度变换的多传感器图像融合算法[J]. *重庆理工大学学报: 自然科学*, 2012, 26(10): 62-65.
- [8] 许 欣, 陈 强, 孙怀江, 等. 基于梯度域融合的图像视觉效果改善[J]. *中国图象图形学报*, 2011, 16(2): 278-286.
- [9] 崔 颖. 基于方向可控金字塔的图像融合算法[J]. *航空计算技术*, 2011, 41(4): 24-27.
- [10] 江 铁, 朱桂斌, 孙 奥. 基于金字塔变换的多曝光图像融合[J]. *计算机技术与发展*, 2013, 23(1): 95-98.
- [11] 叶银芳, 聂建英. 基于拉普拉斯金字塔变换的红外/被动毫米波图像融合[J]. *弹箭与制导学报*, 2014, 34(2): 165-167.
- [12] PIELLA G. A general framework for multiresolution image fusion: from pixels to regions[J]. *Information Fusion*, 2003, 4(4): 259-280.
- [13] 杨 桃, 童 涛, 陆松岩, 等. 基于多特征的红外与可见光图像融合[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(2): 489-496.
- [14] 王 昕. 含噪声图像的多聚焦融合算法[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(12): 2977-2984.
- [15] 谢正祥, 王志芳, 熊兴良, 等. 基于视觉感知噪声模型的彩色图像质量评价和彩色图像质量最佳化[J]. *中国图象图形学报*, 2010, 15(10): 1454-1464.
- [16] 张 毅, 贺兴时, 杨新社. 基于模拟退火与高斯扰动的布谷鸟算法[J]. *纺织高校基础科学学报*, 2015, 28(4): 515-521.
- [17] 李 娜, 贺兴时. 基于粒子群算法的布谷鸟搜索算法[J]. *纺织高校基础科学学报*, 2014, 27(3): 374-379.
- [18] GANDOMI A H, YANG X S, ALAVI A H. Cuckoo search algorithm: a metaheuristic approach to solve structural optimization problems[J]. *Engineering with Computers*, 2013, 29(2): 245.
- [19] RUNARSSON T P, YAO X. Stochastic ranking for constrained evolutionary optimization[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2000, 4(3): 284-294.
- [20] HE Qie, WANG Ling. A hybrid particle swarm optimization with a feasibility-based rule for constrained optimization[J]. *Applied Mathematics & Computation*, 2007, 186(2): 1407-1422.
- [21] 李 前, 贺兴时, 杨新社. 花授粉算法的改进及在压力容器设计中的应用[J]. *计算机工程与应用*, 2017, 53(13): 240-245.
- [22] 解[J]. *工业工程与管理*, 2012, 17(3): 56-59.
- [23] 帅 暘, 冯 丽, 祁 佳, 等. 萤火虫算法的图像边缘检测[J]. *通信技术*, 2015, 48(8): 913-917.
- [24] 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.
- [25] 张 毅, 贺兴时. 基于多子群协同进化的自适应萤火虫算法[J]. *纺织高校基础科学学报*, 2016, 29(1): 128-133.
- [26] 臧 睿, 李辉辉. 基于标准萤火虫算法的改进与仿真应用[J]. *计算机科学*, 2016, 43(11A): 113-116.
- [27] YANG Xinshe, HUYCK C, KARAMANOGLU M, et al. True global optimality of the pressure vessel design problem: a benchmark for bio-inspired optimisation algorithms[J]. *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 2013, 5(6): 329-335.
- [28] YANG X S, DEB S. Cuckoo search via levy flights[C]//*World congress on nature & biologically inspired computing*. [s.l.]: IEEE, 2010: 210-214.
- [29] 宋庆庆, 贺兴时, 郭 旭. 基于混沌序列的布谷鸟算法改进[J]. *纺织高校基础科学学报*, 2017, 30(3): 423-428.