

人工蜂群算法研究综述*

何尧[†], 刘建华, 杨荣华

(福建工程学院 信息科学与工程学院, 福州 350118)

摘要: 介绍了2013年以来国内外蜂群算法的研究成果,包括加快收敛、提高开采能力、提高算法性能方面的改进;针对约束优化、并行化运行、多目标寻优等多方面的研究,以及人工蜂群算法在神经网络、无线传感网、决策调度、图像信号处理等多个领域的研究现状,并指出人工蜂群算法有待进一步解决的问题及未来的研究方向。

关键词: 人工蜂群算法; 群智能; 多目标优化; 约束优化

中图分类号: TP301.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2018)05-1281-06

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2018.05.001

Survey on artificial bee colony algorithm

He Yao[†], Liu Jianhua, Yang Ronghua

(College of Information Science & Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: This paper reviewed research achievements and application status of ABC at home and abroad since 2013, it included the improvement about accelerating the convergence, strengthening the exploitation ability, improving the performance of ABC, the research progress on constrained optimization, parallel operation, multi-objective optimization; and applications in the fields of neural network, wireless sensor network, scheduling problem, image signal processing area. Finally it proposed several unsolved issues and further research directions of ABC.

Key words: artificial bee colony(ABC) algorithm; swarm intelligence; multi-objective optimization; constrained optimization

人工蜂群算法(artificial bee colony, ABC)是由土耳其学者 Karaboga^[1]于2005年提出,它是模拟蜜蜂的采蜜行为来解决生活中一些多维和多模的优化问题,它最初应用于数值优化问题,自提出以来受到了众多学者极大的关注,并广泛应用到神经网络、数据挖掘、工程应用、图像识别等多个领域。研究ABC算法的文章层出不穷,通过谷歌学术搜索,以“artificial bee colony”为关键字搜索出的从2013年以来的相关记录就有18 200条,而2014年以来对ABC算法较为全面的综述文章较少^[2-4],其中文献[2, 3]发表于2014年,考虑到论文一般一年的发表周期,本文将对2013年以来发表的引用率较高的论文进行一个全面综述,文献来源于谷歌学术搜索和国内知网搜索。

1 人工蜂群算法

1.1 人工蜂群算法介绍

在ABC算法里,用蜜源的位置来表示解,用蜜源的花粉数量表示解的适应值。所有的蜜蜂划分为雇佣蜂、跟随蜂、探索蜂三组。雇佣蜂和跟随蜂各占蜂群总数的一半。雇佣蜂负责最初的寻找蜜源并采蜜分享信息,跟随蜂负责呆在蜂巢里根据雇佣蜂提供的信息去采蜜,探索蜂在原有蜜源被抛弃后负责随机寻找新的蜜源来替换原有的蜜源。与其他群智能算法一样,ABC算法是迭代的。对蜂群和蜜源的初始化后,反复执行三个过程,即雇佣蜂、跟随蜂、探索蜂阶段,来寻找问题的最优解。每个阶段描述如下:

a) 蜂群的初始化。对ABC算法的参数进行初始化,这些

参数有蜜源数SN、蜜源确定被抛弃的次数limit、迭代终止次数。在标准ABC算法里,蜜源的数目SN与雇佣蜂数相等,也与跟随蜂数相等。产生某个蜜源的公式为

$$x_{ij} = x_{\min j} + \text{rand}[0, 1](x_{\max j} - x_{\min j}) \quad (1)$$

其中: x_{ij} 代表第*i*个蜜源 x_i 的第*j*维度值, i 取值于{1, 2, ..., SN}, j 取值于{1, 2, ..., D}; $x_{\min j}$ 和 $x_{\max j}$ 分别代表第*j*维的最小值和最大值。初始化蜜源就是对每个蜜源的所有维度通过以上公式赋一个在取值范围内的随机值,从而随机生成SN个最初蜜源。

b) 雇佣蜂阶段(employed bee phase)。在雇佣蜂阶段,雇佣蜂用以下公式来寻找新蜜源:

$$v_{ij} = x_{ij} + \varphi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \quad (2)$$

其中: x_k 代表邻域蜜源, k 取值于{1, 2, ..., SN},且*k*不等于*i*; φ_{ij} 是取值在[-1, 1]的随机数,通过式(2)得到新蜜源后,利用贪婪算法,比较新旧蜜源适应值,选择优者。

c) 跟随蜂阶段(onlooker bees phase)。雇佣蜂阶段结束,跟随蜂阶段开始。在该阶段,雇佣蜂在舞蹈区分享蜜源信息。跟随蜂分析这些信息,采用轮盘赌策略来选择蜜源跟踪开采,以保证适应值更高的蜜源开采的概率更大。跟随蜂开采过程与雇佣蜂一样,利用式(2)找寻新蜜源,并留下更优适应者。

蜜源拥有参数trial,当蜜源更新被保留时,trial为0;反之,trial加1。从而trial能统计出一个蜜源没有被更新的次数。

d) 探索蜂阶段。如果一个蜜源经过多次开采没被更新,也就是trial值过高,超过了预定阈值limit,那么需抛弃这个蜜

收稿日期: 2017-03-15; 修回日期: 2017-04-26 基金项目: 福建省科技厅引导性项目(2017H0001); 福建省教育厅科研资助项目(JA15356)

作者简介: 何尧(1979-),女(通信作者),湖南岳阳人,讲师,硕士,主要研究方向为智能计算、数据挖掘(wonderkewen@163.com); 刘建华(1967-),男,教授,博士,主要研究方向为智能计算、数据挖掘; 杨荣华(1966-),男,副教授,硕士,主要研究方向为智能计算、信息安全。

源,启动探索蜂阶段。这体现了 ABC 里自组织的负反馈和波动属性^[5]。在该阶段里,探索蜂利用式(3)随机寻找新的蜜源来代替被抛弃蜜源。

$$x_{ij} = x_{\min j} + \text{rand}[0, 1] \cdot (x_{\max j} - x_{\min j}) \quad (3)$$

1.2 性能分析及与其他群智能算法比较

ABC 算法自提出后,引起了很多学者的关注并对其进行比较分析,文献[6]最早对 ABC 进行详细全面的性能分析,通过对 50 个数值基准测试函数测试并与其他著名的进化算法,如基因算法(GA)、粒子群算法(PSO)、差分算法(DE)和蚁群算法(ACO)进行了比较。文献[7]分析在多维和多模数值问题下,ABC 与其他智能算法的性能比较及 ABC 控制参数取值大小的影响。文献[8]分析了参数的变化对 ABC 性能的影响。文献[9]利用随机过程理论,给出了人工蜂群算法的 Markov 链模型的一系列定义和一步转移概率,通过分析该 Markov 链的性质,并结合随机搜索算法的收敛准则,验证了 ABC 算法的全局收敛性。以及文献[10~16]均对 ABC 算法的性能进行了分析比较。综上所述,对 ABC 算法性能进行分析总结如下:

a) ABC 运算简单、局部搜索能力较弱。GA 和 DE 是采用杂交的方式来产生新解,而 ABC 却不是。ABC 产生新解只是基于其父解(旧解),并且运算简单,适合局部搜索调频,但这也导致好的信息无法在种群中快速传播,同时每次变异只修改父解的一个维度,并且改变幅度较小,所以这导致 ABC 局部寻优能力较弱,收敛速度较慢,尤其在解决约束问题、复合函数、不可分函数上性能欠佳。

b) ABC 具有较好的探索能力。探索蜂可以跳出原有解集,随机找到一个新解来完全代替旧解,这个特征也减弱了算法对于群规模的依赖性,及受初始解集的影响,保证群体的多样性,防治早熟收敛问题,使 ABC 适宜解决高维、多模问题。

c) ABC 参数较少。除了最大循环次数和种群规模,ABC 算法只有一个控制参数 limit。而 limit 值又依赖于种群数量和问题维度,即 $\text{limit} = SN \times D$,最终 ABC 只有两个控制参数,最大循环次数(MCN)和蜂群数量(SN)。

对于 ABC 算法,一些关键参数对算法性能的影响概括如下:

a) ABC 在初始蜂群个数越多的情况下,性能越好。然而蜂群数量达到一定量后,ABC 算法性能将不再提升。蜂群数量在 50~100 的情况下能得到较好的收敛速度。ABC 算法在高维优化问题上不需要大量的蜂群数量,适宜解决高维问题。

b) ABC 的 limit 控制参数很关键,它的大小与探索蜂的出动频率呈反比关系,以保证种群的多样性。对于单模函数,探索蜂的出动不会影响算法性能,但对于多模函数,能有效地提高算法的搜索能力。同时,对于较小规模的蜂群,limit 不能设置得过低,而对于大规模种群能保证种群多样性,limit 值的大小影响将相对减少。通过实验分析得出 $\text{limit} = SN \times D$ 较为适宜。

2 蜂群算法的改进

2.1 对 ABC 搜索机制的改进

针对 ABC 收敛速度过慢问题,大部分的改动都集中在 ABC 搜索新蜜源的式(2)上,该公式适宜探索,但不适宜开采,导致收敛速度过慢^[17]。文献[18]提出了经典的改进算法 MrABC,通过添加振动频率 MR 让参与搜索新蜜源的维度数量由 1 变为 MR 个,添加振动幅度 SF 让式(2)里 φ_{ij} 的取值范

围由 $[-1, +1]$ 变为 $[-SF, +SF]$,从而加快收敛。文献[19]记录下蜜源上一次更新后每个维度的方向,该方向信息用来指导下一次开采方向,从而加快收敛。文献[20]修改新蜜源搜索公式,找出开采蜜源附近(定某个半径值)最好的蜜源进行开采,以提高蜂群算法的局部寻优能力。文献[21]通过 OAT 方法^[22]找出有较强影响力的维度,并加大这些维度的开采力度,以提高 ABC 算法的开采能力。文献[23]在人工蜂群算法的搜索公式中采用邻域搜索机制,从当前蜜源的环形邻域拓扑结构中选择较优的邻居蜜源进行开采,以平衡算法的探索与开采能力,并采用一般反向学习策略生成被抛弃蜜源的反向解以保存探索蜂的搜索经验,用来提高算法的搜索效率。文献[24]利用信息熵改变搜索过程,提高搜索效率。文献[25]采用随机动态局部搜索算子对当前最优蜜源进行局部搜索,以加快算法的收敛速度,采用基于排序的选择概率代替原 ABC 中直接依赖适应度的选择概率,来保证解的多样性。

2.2 对 ABC 其他环节的改进

虽然大部分改进都集中在 ABC 搜索环节,但为使算法性能进一步提高,不少研究者在 ABC 算法其他环节也作了不少改进。文献[26]利用组合搜索公式来加速搜索过程,并在探索蜂阶段和初始化蜂群阶段采用了混沌算法,在跟随蜂阶段采用轮盘赌的反向选择来多方面提高算法性能。文献[27]提出了增长式蜂群算法,通过迭代让蜂群规模逐渐增长,以解决大规模持续优化问题。文献[28]提出动态蜂群算法,用概率因子 p 来动态确定蜂群规模,并应用于发电系统的环保经济调度问题。文献[29]提出采用正交实验设计的方式来生成新的食物源,使得探索蜂能够同时保存被放弃的食物源和全局最优解在不同维度上的有益信息,从而防止搜索经验丢失,来提高算法的搜索效率。

2.3 ABC 与其他算法的结合

近年来,许多研究者把人工蜂群算法与其他数学方法、优化算法进行结合,使优化性能进一步提高。受 PSO 启发,文献[14]提出了经典的 GABC(gbest-guided ABC)利用全局最优值来引领跟随蜂搜索新蜜源,从而提高蜂群算法的开采能力。文献[30]考虑到 GABC 算法搜索机制中,新蜜源处于最优蜜源与原有蜜源之间,搜索方向相反会产生振动,影响开采效率,对此借鉴遗传算法里的交叉操作,随机利用原有蜜源附近两个蜜源来完成搜索操作。文献[31]借鉴遗传算法里的交叉互换操作提出了 GB-ABC 算法来处理二进制优化问题。文献[32]把蚁群算法和 ABC 算法进行整合用于分布式能源系统的布局优化和规模设置,以实现最大限度地减少电力损耗、污染排放、降低成本、提高电压稳定性等多目标。文献[33]考虑到差分算法需要大规模的种群来避免早熟收敛,而 ABC 有着优越的全局寻优能力,故在差分算法中加入 ABC 局部寻优和全局寻优思想来处理电力系统无功潮流优化问题。文献[34]在 ABC 中加入萤火虫的搜索机制来提高 ABC 的开采能力,并应用于具有基数约束的均值-方差投资组合优化问题。文献[35]结合量子理论、混沌局部搜索策略及 ABC 算法来解决电力最优潮流问题。文献[36]采用了过滤风机算法^[37]的局部搜索来替换原 ABC 中开采过程,并应用于车间作业调度问题,以求最小化加权延误。文献[38]结合 ABC 和田口方法来处理汽车零部件优化和多刀铣削优化问题。文献[39]采用基于 NEH 方法^[40]的贪婪随机自适应搜索过程 GRASP 来初始化种群,并在雇佣

蜂、跟随蜂、探索蜂阶段采取了一系列的插入、交换、路径重连等操作来生成新解,用于流水车间调度,以寻求完工时间最早的优化问题。文献[41]把离散式ABC算法用于流水车间调度,以保证生产时各工序等待时间最少。文献[42]把Powell方法^[43]用于局部搜索来提高ABC的开采能力。文献[44]把ABC与Tent混沌优化算法结合,利用Tent映射初始化种群,并自适应调整混沌搜索空间,提高了ABC算法的收敛性,避免陷入局部最优。文献[45]提出一种基于Nelder-mead单纯形法的改进人工蜂群算法,旨在利用NM-SM提高ABC的局部搜索能力,同时ABC帮助NM-SM方法跳出局部最优点,达到两者协同搜索。文献[46]把鲶鱼效应和混沌理论加入ABC算法中,以跳出局部最优,加速收敛。文献[47]组合二乘支持向量和人工蜂群优化算法来预测越南老街降雨诱发滑坡的问题。

2.4 ABC约束化问题求解

文献[48]是最早把ABC应用于有约束的优化问题,对于可行方案和不可行方案之间的选择,它用Deb^[49]的三个启发式规则代替了原ABC算法的贪婪选择。文献[50]集成了ABC算法和BA(bees algorithms)算法,提出ABC-BA算法,由ABC子蜂群和BA子蜂群组成,两个子蜂群采用竞争机制,更优者将获得更多的开采机会,并用不可行度选择策略^[51]来处理不等式约束问题。文献[52]提出了基于多目标优化方法和Deb方法^[49]的自适应约束蜂群算法来处理约束优化问题。文献[53]在ABC中的蜜源搜索机制中采取约束处理技术,让搜索更偏向于可行解区域。考虑到约束问题中采用Deb's规则,使对不可行解的搜索概率降低,文献[54]消除前述区别,提高跟随蜂选中不可行解的概率。

2.5 ABC平行化运行机制

当问题规模变大时,人们开始研究ABC算法的平行机制。文献[55]考虑到有可能会多次反复地把当地子蜂群里的最优解来代替邻居子蜂群的最差解而降低了蜂群的多样性,采用移民拓扑来代替传统的环形拓扑结构,它没有像传统做法那样直接把子蜂群中的最优解来与邻居子蜂群进行信息交换,而是找个随机解与最优解组合,通过贪婪算法得出更优解来作交换,这样保证了解的多样性,提高了平行ABC的收敛性能。文献[56]提出了粗粒度模型的平行化ABC算法,并在多个处理单元之间采用消息传递接口MPI^[57]来进行信息交流。文献[58]提出了平行化ABC用来解决车间作业调度问题,该算法由分布在网络中不同节点的多个蜂群通过平行运算而完成,各个蜂群之间利用动态移民策略来交换信息。

2.6 ABC多目标优化

在现实应用中,很多问题都是多目标优化问题,需要同时满足两个或两个以上的目标要求,其中,电力潮流优化是典型的多目标优化问题,它需要同时满足多个目标函数:燃料消耗最小化、总功率损耗最小化、电压波形改善、更轻的环境污染、电压在正常和应急条件下的稳定性增强等。ABC算法在这个领域研究颇多,如文献[59~61]。除此之外,在其他领域,文献[62]用多目标人工蜂群算法来处理基于模糊互信息的特征选择,文献[63]采用新的解码方法来表示蜜源,并对不同前景区域的蜜源采用自适应策略来生成邻居蜜源,结合禁忌策略来搜索新的蜜源,用于多目标柔性作业车间调度问题。文献[64]提出了基于levy飞行的多目标ABC算法来确定最佳施工场地布置。

3 ABC应用

1) 神经网络 人工神经网络是人工智能研究领域的重要分支之一,在控制、预测、优化、系统辨识、信号处理和模式识别等领域有广泛的应用。鉴于神经网络的传统训练方法存在的缺陷,很多研究者开始将包括人工蜂群算法在内的智能启发式算法应用到神经网络的设计和参数优化中。文献[65]用ABC来优化基于信息粒化的模糊径向基神经网络,用来解决影像融合的问题。文献[66]用ABC来优化人工神经网络中神经元的连接权值,并应用于短期电力负荷预测。文献[67]通过在原ABC搜索新蜜源机制中添加交叉率和适应性系数来提高收敛速度,并应用于数值优化问题和训练ANFIS来确定非线性动态系统。文献[68]把ABC与神经网络结合来估测土耳其水力发电年产量。文献[69]利用ABC算法来处理核磁共振脑图像的肿瘤分割,利用模糊C-均值方法来实现分割图像的聚类从而识别脑肿瘤病情。

2) 无线传感网 文献[70]利用ABC对传感器节点进行最优化部署,以求在指定的覆盖范围内获得最大网络生存期。文献[71]提出了紧凑的ABC算法(cABC)用于无线传感网的拓扑优化,有助于开发小型和低成本的嵌入式设备。文献[72]把ABC算法用于稀疏无线传感网中移动机器人的路径规划。文献[73]把ABC算法应用于无线传感网中中继节点的优化配置,以减少中继节点配置个数同时延长网络的生存时间。

3) 决策、规划与调度 自动决策、规划与调度是人工智能的一个分支,已广泛应用于生产、管理、电力等多个领域,ABC作为启发式智能算法,在该问题上有较多的应用。合理的车间调度能极大提高生产效能,车间调度是一个求解最优资源分配的离散问题,而标准ABC算法是处理连续函数的优化方法,所以大部分用于车间调度的ABC算法都是改进的离散型ABC算法,相关的文献有求最小化加权延误的车间作业调度^[36]、基于工序排序的流水车间调度^[74]、以求完工时间最小化的流水车间调度^[39,41,75]、平行化处理车间作业调度^[58]、多目标柔性作业车间调度^[63]等。除此以外,还有其他领域的应用,如制造厂物料流优化^[76]、飞机智能着陆决策^[77,78]、周期车辆路径规划问题^[79],以及前述多目标电力潮流优化调度、多目标水火电系统短期调度^[61]、发电机组经济排放调度^[80,81]、基于混沌理论的改进人工蜂群算法求解电力非凸排放/经济调度^[82]、带局部搜索的增量人工蜂群算法求解带阀点效应的非凸经济调度问题^[83]、自适应混沌人工蜂群算法用于短期水热发电调度^[84]。

4) 图像、信号处理 ABC算法在图像、信号处理上也得到了广泛的应用。图像处理上有核磁共振图像脑肿瘤的识别^[69,85]、卫星图像分割^[86]、2D图像处理^[87]、基于蜂群优化补偿的小波域图像水印算法^[88]、图像对比度增强^[89]、气象卫星图像无监督分类^[90]。信号处理上有多普勒信号降噪^[91]、滤波器优化设计^[92]等。

5) 其他 ABC算法在其他领域也取得了成功应用,如医药生物^[93]、材料^[94,95]等。数据挖掘中聚类^[96]、分类^[90]、频谱分配^[97]。ABC算法在电力系统也得到了广泛应用,除了前述电力潮流优化、调度等研究,还有电容器优化配置以求配电网最大化节能及提高系统稳定性^[98]。通过蜂群算法来提高部分阴影条件下光伏系统的能量输出^[99]等。

4 结束语

ABC 自提出以来,受到了很多学者的关注,在后面几年,有以下几点值得深入研究:

a) 现有的研究都是围绕着算法的改进和应用方面,对 ABC 理论研究相对较少,对于 ABC 的运行时间和收敛属性、适应值曲面和动态特性的理论研究还需进一步开展。

b) 现有的对算法参数的设置都是基于经验确定,对环境的具体问题有较大依赖。研究 ABC 算法参数选取方法,尤其是如何设置具有普适性的无须精密调节的参数及自适应参数的研究及相关理论支持值得开展。

c) 为了进一步提高 ABC 性能,还可继续在 ABC 搜索策略、蜂群初始化、探索蜂运行机制,以及算法间的混合优化策略等方面进行研究,以平衡探索—开采两个过程,保证算法的多样性,提高 ABC 的收敛速度。

d) 对 ABC 应用领域进一步扩展,进一步研究 ABC 在多目标、多约束、离散和动态的不确定环境下的优化问题。

e) ABC 应用于符号回归优化问题,在以往关于 ABC 算法文献中,把 ABC 用于符号回归这一个很重要的现实优化问题中的文献很少^[100],所以把 ABC 用于符号回归的研究是一个值得开展的方向。

参考文献:

- [1] Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization, TR06[R]. Kayseri, Turkey: Erciyes University, 2005.
- [2] Karaboga D, Gorkemli B, Ozturk C, et al. A comprehensive survey: artificial bee colony (ABC) algorithm and applications[J]. *Artificial Intelligence Review* 2014, 42(1): 21–57.
- [3] 秦全德, 程适, 李丽, 等. 人工蜂群算法研究综述[J]. *智能系统学报* 2014, 9(2): 127–135.
- [4] 霍凤财, 杜颖, 刘洋. 人工蜂群算法及其应用[J]. *吉林大学学报: 信息科学版* 2016, 34(4): 468–476.
- [5] Bonabeau E, Dorigo M, Theraulaz G. *Swarm intelligence: from natural to artificial systems* [M]. New York: Oxford University Press, 1999.
- [6] Karaboga D, Akay B. A comparative study of artificial bee colony algorithm[J]. *Applied Mathematics and Computation* 2009, 214(1): 108–132.
- [7] Karaboga D, Basturk B. On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm[J]. *Applied Soft Computing* 2008, 8(1): 687–697.
- [8] Akay B, Karaboga D. Parameter tuning for the artificial bee colony algorithm[C]//Proc of International Conference on Computational Collective Intelligence. Berlin: Springer 2009: 608–619.
- [9] 宁爱平, 张雪英. 人工蜂群算法的收敛性分析[J]. *控制与决策*, 2013, 28(10): 1554–1558.
- [10] Karaboga D, Basturk B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm[J]. *Journal of Global Optimization* 2007, 39(3): 459–471.
- [11] Krishnanand K R, Nayak S K, Panigrahi B K, et al. Comparative study of five bio-inspired evolutionary optimization techniques[C]//Proc of World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing. Piscataway, NJ: IEEE Press 2009: 1231–1236.
- [12] Mala D J, Kamalpriya M, Shobana R, et al. A non-pheromone based intelligent swarm optimization technique in software test suite optimization[C]//Proc of International Conference on Intelligent Agent & Multi-Agent System. Piscataway, NJ: IEEE Press 2009: 1–5.
- [13] Karaboga D, Akay B. Artificial bee colony (ABC), harmony search and bees algorithms on numerical optimization[C]//Proc of Innovative Production Machines and Systems Virtual Conference. 2009.
- [14] Li Huazhe, Liu Kunqi, Li Xia. A comparative study of artificial bee colony, bees algorithms and differential evolution on numerical benchmark problems[C]//Proc of International Symposium on Intelligence Computation and Applications. Berlin: Springer 2010: 198–207.
- [15] Chu S C, Huang H C, Roddick J F, et al. Overview of algorithms for swarm intelligence[C]//Proc of International Conference on Computational Collective Intelligence. Berlin: Springer 2011: 28–41.
- [16] Civicioglu P, Besdok E. A conceptual comparison of the cuckoo-search, particle swarm optimization, differential evolution and artificial bee colony algorithms[J]. *Artificial Intelligence Review* 2013, 39(4): 315–346.
- [17] Zhu Guopu, Kwong S. Gbest-guided artificial bee colony algorithm for numerical function optimization [J]. *Applied Mathematics and Computation* 2010, 217(7): 3166–3173.
- [18] Akay B, Karaboga D. A modified artificial bee colony algorithm for real-parameter optimization [J]. *Information Sciences* 2012, 192(1): 120–142.
- [19] Kiran M S, Finndik O. A directed artificial bee colony algorithm [J]. *Applied Soft Computing* 2015, 26(1): 454–462.
- [20] Karaboga D, Gorkemli B. A quick artificial bee colony (qABC) algorithm and its performance on optimization problems [J]. *Applied Soft Computing* 2014, 23(10): 227–238.
- [21] Loubière P, Jourdan A, Siarry P, et al. A sensitivity analysis method for driving the artificial bee colony algorithm's search process [J]. *Applied Soft Computing* 2016, 41(4): 515–531.
- [22] Morris M D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments [J]. *Technometrics* 1991, 33(2): 161–174.
- [23] 周新宇, 吴志健, 邓长寿, 等. 一种邻域搜索的人工蜂群算法[J]. *中南大学学报: 自然科学版* 2015, 46(2): 534–546.
- [24] 李彦苍, 彭扬. 基于信息熵的改进人工蜂群算法[J]. *控制与决策* 2015, 30(6): 1121–1125.
- [25] 刘三阳, 张平, 朱明敏. 基于局部搜索的人工蜂群算法[J]. *控制与决策* 2014, 29(1): 123–128.
- [26] Xiang Wanli, An Meiqing. An efficient and robust artificial bee colony algorithm for numerical optimization [J]. *Computers & Operations Research* 2013, 40(5): 1256–1265.
- [27] Aydin D, Liao T, De Oca M A M, et al. Improving performance via population growth and local search: the case of the artificial bee colony algorithm[C]//Proc of International Conference on Artificial Evolution (Evolution Artificielle). Berlin: Springer 2011: 85–96.
- [28] Aydin D, Özyön S, Yasar C, et al. Artificial bee colony algorithm with dynamic population size to combined economic and emission dispatch problem [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 2014, 54(1): 144–153.
- [29] 周新宇, 吴志健, 王明文. 基于正交实验设计的人工蜂群算法[J]. *软件学报* 2015, 26(9): 2167–2190.
- [30] Gao Weifeng, Liu Sanyang, Huang Lingling. A novel artificial bee colony algorithm based on modified search equation and orthogonal learning[J]. *IEEE Trans on Cybernetics* 2013, 43(3): 1011.
- [31] Ozturk C, Hancer E, Karaboga D. A novel binary artificial bee colony algorithm based on genetic operators[J]. *Information Sciences*, 2015, 297(5): 154–170.
- [32] Kefayat M, Ara A L, Niaki S A N. A hybrid of ant colony optimization and artificial bee colony algorithm for probabilistic optimal placement and sizing of distributed energy resources[J]. *Energy Conversion and Management* 2015, 92(3): 149–161.

- [33] Li Yuancheng, Wang Yiliang, Li Bin. A hybrid artificial bee colony assisted differential evolution algorithm for optimal reactive power flow [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 2013 52(1): 25–33.
- [34] Tuba M, Bacanin N. Artificial bee colony algorithm hybridized with firefly algorithm for cardinality constrained mean-variance portfolio selection problem [J]. *Applied Mathematics & Information Sciences* 2014 8(6): 2831–2844.
- [35] Yuan Xiaohui, Wang Pengtao, Yuan Yanbin, *et al.* A new quantum inspired chaotic artificial bee colony algorithm for optimal power flow problem [J]. *Energy Conversion & Management* 2015 100(8): 1–9.
- [36] Zhang Rui, Song Shiji, Wu Cheng. A hybrid artificial bee colony algorithm for the Job-Shop scheduling problem [J]. *International Journal of Production Economics* 2013 141(1): 167–178.
- [37] Rego C, Duarte R. A filter-and-fan approach to the Job-Shop scheduling problem [J]. *European Journal of Operational Research*, 2009 194(3): 650–662.
- [38] Yildiz A R. A new hybrid artificial bee colony algorithm for robust optimal design and manufacturing [J]. *Applied Soft Computing* 2013, 13(5): 2906–2912.
- [39] Liu Yanfeng, Liu Sanyang. A hybrid discrete artificial bee colony algorithm for permutation flowshop scheduling problem [J]. *Applied Soft Computing* 2013 13(3): 1459–1463.
- [40] Nawaz M, Enscore E E, Ham I. A heuristic algorithm for the m -machine, n -job Flow-Shop sequencing problem [J]. *Omega*, 1983, 11(1): 91–95.
- [41] Tasgetiren M F, Pan Q K, Suganthan P N, *et al.* A discrete artificial bee colony algorithm for the no-idle permutation flowshop scheduling problem with the total tardiness criterion [J]. *Applied Mathematical Modelling* 2013 37(10): 6758–6779.
- [42] Gao Weifeng, Liu Sanyang, Huang Lingling. A novel artificial bee colony algorithm with Powell's method [J]. *Applied Soft Computing* 2013 13(9): 3763–3775.
- [43] Powell M J D. Restart procedures for the conjugate gradient method [J]. *Mathematical Programming* 1977 12(1): 241–254.
- [44] 匡芳君, 徐蔚鸿, 金忠. 自适应 Tent 混沌搜索的人工蜂群算法 [J]. *控制理论与应用* 2014 31(11): 1502–1509.
- [45] 苏宏升, 殷凯乐. 基于 Nelder-Mead 单纯形法的改进人工蜂群算法研究 [J]. *计算机工程与应用* 2016 52(24): 50–56.
- [46] 王生生, 杨娟娟, 柴胜. 基于混沌鲑鱼效应的人工蜂群算法及应用 [J]. *电子学报* 2014 42(9): 1731–1737.
- [47] Bui D T, Tuan T A, Hoang N D, *et al.* Spatial prediction of rainfall-induced landslides for the Lao Cai area (Vietnam) using a hybrid intelligent approach of least squares support vector machines inference model and artificial bee colony optimization [J]. *Landslides* 2017, 14(2): 447–458.
- [48] Karaboga D, Basturk B. Artificial bee colony (ABC) optimization algorithm for solving constrained optimization problems [C]//Proc of International Fuzzy Systems Association World Congress. Berlin: Springer 2007: 789–798.
- [49] Deb K. An efficient constraint handling method for genetic algorithms [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 2000 186(2): 311–338.
- [50] Tsai H C. Integrating the artificial bee colony and bees algorithm to face constrained optimization problems [J]. *Information Sciences*, 2014 258(3): 80–93.
- [51] Kou Xiaoli, Liu Sanyang, Zhang Jianke, *et al.* Co-evolutionary particle swarm optimization to solve constrained optimization problems [J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2009 57(11): 1776–1784.
- [52] Li Xiangtao, Yin Minghao. Self-adaptive constrained artificial bee colony for constrained numerical optimization [J]. *Neural Computing and Applications* 2014 24(3–4): 723–734.
- [53] Akay B, Karaboga D. Artificial bee colony algorithm for large-scale problems and engineering design optimization [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing* 2012 23(4): 1001–1014.
- [54] Brajevic I, Tuba M. An upgraded artificial bee colony (ABC) algorithm for constrained optimization problems [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing* 2013 24(4): 729–740.
- [55] Karaboga D, Aslan S. A new emigrant creation strategy for parallel artificial bee colony algorithm [C]//Proc of the 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering. 2015: 689–694.
- [56] Basturk A, Akay R. Performance analysis of the coarse-grained parallel model of the artificial bee colony algorithm [J]. *Information Sciences* 2013 253(11): 34–55.
- [57] Gabriel E, Fagg G E, Bosilca G, *et al.* Open MPI: goals, concept, and design of a next generation MPI implementation [C]//Proc of European Parallel Virtual Machine/Message Passing Interface Users' Group Meeting. Berlin: Springer 2004: 97–104.
- [58] Asadzadeh L. A parallel artificial bee colony algorithm for the Job-Shop scheduling problem with a dynamic migration strategy [J]. *Computers & Industrial Engineering* 2016 102: 359–367.
- [59] Adaryani M R, Karami A. Artificial bee colony algorithm for solving multi-objective optimal power flow problem [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 2013 53(1): 219–230.
- [60] Khorsandi A, Hosseini S H, Ghazanfari A. Modified artificial bee colony algorithm based on fuzzy multi-objective technique for optimal power flow problem [J]. *Electric Power Systems Research* 2013, 95(2): 206–213.
- [61] Zhou Jianzhong, Liao Xiang, Ouyang Shuo, *et al.* Multi-objective artificial bee colony algorithm for short-term scheduling of hydrothermal system [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 2014 55(2): 542–553.
- [62] Hancer E, Xue Bing, Zhang Mengjie, *et al.* A multi-objective artificial bee colony approach to feature selection using fuzzy mutual information [C]//Proc of IEEE Congress on Evolutionary Computation. 2015: 2420–2427.
- [63] Li Junqing, Pan Quanke, Tasgetiren M F. A discrete artificial bee colony algorithm for the multi-objective flexible Job-Shop scheduling problem with maintenance activities [J]. *Applied Mathematical Modelling* 2014 38(3): 1111–1132.
- [64] Yahya M, Saka M P. Construction site layout planning using multi-objective artificial bee colony algorithm with Levy flights [J]. *Automation in Construction* 2014 38(3): 14–29.
- [65] Yu Jiaqian, Duan Haibin. Artificial bee colony approach to information granulation-based fuzzy radial basis function neural networks for image fusion [J]. *Optik: International Journal for Light and Electron Optics* 2013 124(17): 3103–3111.
- [66] Awan S M, Aslam M, Khan Z A, *et al.* An efficient model based on artificial bee colony optimization algorithm with neural networks for electric load forecasting [J]. *Neural Computing and Applications*, 2014 25(7–8): 1967–1978.
- [67] Karaboga D, Kaya E. An adaptive and hybrid artificial bee colony algorithm (aABC) for ANFIS training [J]. *Applied Soft Computing*, 2016 49(12): 423–436.
- [68] Uzlu E, Akpinar A, Öztürk H T, *et al.* Estimates of hydroelectric

- generation using neural networks with the artificial bee colony algorithm for Turkey [J]. *Energy* 2014 **69**(5): 638–647.
- [69] Menon N, Ramakrishnan R. Brain tumor segmentation in MRI images using unsupervised artificial bee colony algorithm and FCM clustering [C]//Proc of International Conference on Communications and Signal Processing. Mewlmaruvathur, India: IEEE Press 2015: 6–9.
- [70] Mini S, Udgata S K, Sabat S L. Sensor deployment and scheduling for target coverage problem in wireless sensor networks [J]. *IEEE Sensors Journal* 2014 **14**(3): 636–644.
- [71] Dao T K, Pan T S, Nguyen T T, *et al.* A compact artificial bee colony optimization for topology control scheme in wireless sensor networks [J]. *Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing* 2015 **6**(2): 297–310.
- [72] Chang Weilun, Zeng Deze, Chen Rungching, *et al.* An artificial bee colony algorithm for data collection path planning in sparse wireless sensor networks [J]. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics* 2015 **6**(3): 375–383.
- [73] Hashim H A, Ayinde B O, Abido M A. Optimal placement of relay nodes in wireless sensor network using artificial bee colony algorithm [J]. *Journal of Network and Computer Applications* 2016 **64**(4): 239–248.
- [74] Ince Y, Karabulut K, Tasgetiren M F, *et al.* A discrete artificial bee colony algorithm for the permutation flowshop scheduling problem with sequence-dependent setup times [C]//Proc of IEEE Congress on Evolutionary Computation. 2016: 3401–3408.
- [75] Pan Quanke, Wang Ling, Li Junqing, *et al.* A novel discrete artificial bee colony algorithm for the hybrid flowshop scheduling problem with makespan minimisation [J]. *Omega* 2014 **45**(2): 42–56.
- [76] Alvarado-Iniesta A, Garcia-Alcaraz J L, Rodriguez-Borbon M I, *et al.* Optimization of the material flow in a manufacturing plant by use of artificial bee colony algorithm [J]. *Expert Systems with Applications* 2013 **40**(12): 4785–4790.
- [77] Goel S, Singh J, Ojha N. Intelligent aircraft landing decision support system using artificial bee colony [C]//Proc of the 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development. Piscataway, NJ: IEEE Press 2016: 2412–2416.
- [78] Ng K K H, Lee C K M. Makespan minimization in aircraft landing problem under congested traffic situation using modified artificial bee colony algorithm [C]//Proc of IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. Piscataway, NJ: IEEE Press 2016: 750–754.
- [79] Yao Baozhen, Hu Ping, Zhang Mingheng, *et al.* Artificial bee colony algorithm with scanning strategy for the periodic vehicle routing problem [J]. *Simulation* 2013 **89**(6): 762–770.
- [80] Secui D C. A new modified artificial bee colony algorithm for the economic dispatch problem [J]. *Energy Conversion & Management* 2015 **89**(1): 43–62.
- [81] Jadhav H T, Roy R. Gbest guided artificial bee colony algorithm for environmental/economic dispatch considering wind power [J]. *Expert Systems with Applications* 2013 **40**(16): 6385–6399.
- [82] Shayeghi H, Ghasemi A. A modified artificial bee colony based on chaos theory for solving non-convex emission/economic dispatch [J]. *Energy Conversion and Management* 2014 **79**(3): 344–354.
- [83] Aydin D A, ÖzyöN S. Solution to non-convex economic dispatch problem with valve point effects by incremental artificial bee colony with local search [J]. *Applied Soft Computing* 2013 **13**(5): 2456–2466.
- [84] Liao Xiang, Zhou Jianzhong, Shuo Ouyang, *et al.* An adaptive chaotic artificial bee colony algorithm for short-term hydrothermal generation scheduling [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 2013 **53**(1): 34–42.
- [85] Hancer E, Ozturk C, Karaboga D. Extraction of brain tumors from MRI images with artificial bee colony based segmentation methodology [C]//Proc of the 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering. Piscataway, NJ: IEEE Press 2013: 516–520.
- [86] Bhandari A K, Kumar A, Singh G K. Modified artificial bee colony based computationally efficient multilevel thresholding for satellite image segmentation using Kapur's, Otsu and Tsallis functions [J]. *Expert Systems with Applications* 2015 **42**(3): 1573–1601.
- [87] Wozniak M, Polap D, Gabryel M, *et al.* Can we process 2D images using artificial bee colony? [C]//Proc of International Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing. Berlin: Springer International Publishing 2015: 660–671.
- [88] Ali M, Ahn C W, Pant M, *et al.* An image watermarking scheme in wavelet domain with optimized compensation of singular value decomposition via artificial bee colony [J]. *Information Sciences* 2015 **301**(4): 44–60.
- [89] Draa A, Bouaziz A. An artificial bee colony algorithm for image contrast enhancement [J]. *Swarm & Evolutionary Computation* 2014 **16**(6): 69–84.
- [90] Deriche R, Fizazi H. The artificial bee colony algorithm for unsupervised classification of meteorological satellite images [J]. *International Journal of Computer Applications* 2015 **112**(12): 28–32.
- [91] Karaboga N, Latifoglu F. Adaptive filtering noisy transcranial Doppler signal by using artificial bee colony algorithm [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 2013 **26**(2): 677–684.
- [92] Bose D, Biswas S, Vasilakos A V, *et al.* Optimal filter design using an improved artificial bee colony algorithm [J]. *Information Sciences* 2014 **281**(10): 443–461.
- [93] Li Bai, Li Ya, Gong Ligang. Protein secondary structure optimization using an improved artificial bee colony algorithm based on AB off-lattice model [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 2014 **27**(1): 70–79.
- [94] Apalak M K, Karaboga D, Akay B. The artificial bee colony algorithm in layer optimization for the maximum fundamental frequency of symmetrical laminated composite plates [J]. *Engineering Optimization* 2014 **46**(3): 420–437.
- [95] Zhang Wei, Wang Ning, Yang Shipin. Hybrid artificial bee colony algorithm for parameter estimation of proton exchange membrane fuel cell [J]. *International Journal of Hydrogen Energy* 2013 **38**(14): 5796–5806.
- [96] Ozturk C, Hancer E, Karaboga D. Dynamic clustering with improved binary artificial bee colony algorithm [J]. *Applied Soft Computing* 2015 **28**(3): 69–80.
- [97] 朱冰莲, 朱方方, 段青言, 等. 采用多策略离散人工蜂群的改进频谱分配算法 [J]. *西安交通大学学报* 2016 **50**(2): 20–25 84.
- [98] El-Fergany A A, Abdelaziz A Y. Capacitor placement for net saving maximization and system stability enhancement in distribution networks using artificial bee colony-based approach [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 2014 **54**(1): 235–243.
- [99] Sundareswaran K, Sankar P, Nayak P S R, *et al.* Enhanced energy output from a PV system under partial shaded conditions through artificial bee colony [J]. *IEEE Trans on Sustainable Energy* 2015 **6**(1): 198–209.
- [100] Karaboga D, Ozturk C, Karaboga N, *et al.* Artificial bee colony programming for symbolic regression [J]. *Information Sciences* 2012 **209**(11): 1–15.