蜂群算法研究综述 *

张超群[1,2], 郑建国[1], 王 翔[1]
(1. 东华大学 旭日工商管理学院, 上海 200051; 2. 广西民族大学 数学与计算机科学学院, 南宁 530006)

摘 要: 蜂群算法是一种模仿蜜蜂繁殖、采蜜等行为的新兴的群智能优化技术,近几年备受研究者关注。初步探讨了蜂群算法的理论基础,详细论述了基于蜜蜂繁殖行为和采蜜行为的两类蜂群算法的生物学机理及其最常见算法的应用研究情况,并分析比较了遗传算法、蚁群算法、粒子群算法和蜂群算法的优缺点、适用范围及性能。最后,总结了现有蜂群算法存在的问题,并指出其未来的研究方向。

关键词: 蜂群算法; 繁殖行为; 采蜜行为; 蜜蜂交配优化算法; 人工蜂群算法
中图分类号: TP301.6 **文献标志码**: A **文章编号**: 1001-3695(2011)09-3201-05
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2011.09.001

Overview of research on bee colony algorithms

ZHANG Chao-qun[1,2], ZHENG Jian-guo[1], WANG Xiang[1]
(1. *Glorious Sun School of Business & Management*, *Donghua University*, *Shanghai* 200051, *China*; 2. *College of Mathematics & Computer Science*, *Guangxi University for Nationalities*, *Nanning* 530006, *China*)

Abstract: Bee colony algorithms are new swarm intelligence techniques inspired by the intelligent behaviors of real honey bees such as the reproductive behavior and the foraging behavior. More recently, researchers have become very interested in it and its related research. Therefore, this paper preliminary studied the theoretical basis of bee colony algorithms. According to the different bee behaviors, bee colony algorithms were mainly classified into two types, namely the reproductive behavior and the foraging behavior. Then discussed and illustrated the biological mechanism and the most popular algorithm of each type in detail, respectively. Moreover, analyzed and compared genetic algorithm, ant colony optimization, particle swarm optimization and bee colony algorithms in terms of advantages and disadvantages, application fields and performances. Finally, summarized the existing problems in current research on the bee colony algorithms and suggested some future research directions to address the problems.

Key words: bee colony algorithm; reproductive behavior; foraging behavior; honey bee mating optimization; artificial bee colony algorithm

0 引言

计算智能涉及进化计算、模糊逻辑、神经网络和人工生命等领域,系统适应是计算智能的核心概念。群智能是一种在自然界生物群体的智能行为启发下提出的智能模式,它是进化计算的扩展,属于人工生命的范畴,是计算智能领域快速发展的分支之一[1]。目前,群智能是一个非常活跃的研究领域[2],它为人们揭示生命现象和进化规律,为解决复杂系统提供新的思路与方法,为实现适应性系统提供有用的范例。

蜜蜂的生物学机理比较复杂,蜂群的每种行为就是一种算法。为了方便称谓,笔者将模仿蜂群独特的繁殖、采蜜等行为的任何一种算法统称为蜂群算法。各种蜂群算法基本是 2000 年以后才陆续提出的,属于新兴的群智能优化技术,近几年备受研究者关注,发表的相关论文数量也日益猛增[3]。但是,迄今有关蜂群算法的综述很少,国外只有文献[3,4],它们均主要介绍一些蜂群算法的应用研究情况,并且前者只讨论了 2009 年以前的文献(2009 年仅有 2 篇),而后者只综述了 2008 年以前的文献(2008 年仅有 1 篇);国内只有文献[5]简单介绍了三种蜂群算法的发展概况。因此,非常有必要对蜂群算法的理论基础、生物学机理、应用研究情况、优势、适用范围、存在的问题及未来研究方向作较全面、系统的总结和评述,以期进一步加快对蜂群算法的研究与应用进程,从而能有效解决更多的实际问题。

1 蜂群算法的理论基础

目前,有关蜂群算法的理论研究基本处于空白状态。文献[6]认为蜂群算法是一种建立在 Seeley 的自组织模型[7]上的群智能算法,这是因为,通常群智能是基于自组织的由众多无智能的简单个体组成的群体,每个个体自发地随机活动,通过相互间的简单协作来完成复杂的集体智能行为[3,7]。在自组织模型中,虽然处于各种“社会阶层”的蜜蜂只完成单一的任务,但是蜜蜂通过摇摆舞、气味等多种方式交流信息,使整个蜂群协同完成如筑巢、采蜜等工作[7]。

蜂群除具有自组织特征外,Karaboga 等人[3]认为其还应满足 Millonas 的构成群智能的五项原则[8]和 Bonabeau 等人的群自组织的四个特征[9]。Millonas 定义了一个群具有智能行为应满足如下五个原则:a)群能作简单的时空计算(邻近原则);b)群能对环境中的质量因素(如食物质量)作出反应(质量原

收稿日期: 2011-03-17; **修回日期**: 2011-04-30 **基金项目**: 国家自然科学基金资助项目(70971020)
作者简介: 张超群(1974-),女,广西罗城人,副教授,博士研究生,主要研究方向为智能决策与知识管理(chaozi_0771@163.com);郑建国(1962-),男,教授,博导,博士后,主要研究方向为智能决策、数据挖掘、智能信息处理等;王翔(1976-),男,博士研究生,主要研究方向为进化计算.

则);c)群不是沿着非常狭窄的通道分配所有资源而是将资源分配到各处(多样性原则);d)群对环境变动不应轻易改变其行为模式(稳定性原则);e)当值得改变行为时,群必须能改变行为模式以适应环境(适应性原则)。Bonabeau 等人描述了群自组织的四个特征:a)正反馈是群的一种很重要的简单行为,它促进群形成适应环境的结构,如蜜蜂通过摇摆舞来招募同伴一起去采蜜等,但是正反馈不能维持群的稳态;b)负反馈平衡正反馈,这有助于稳定群模式,根据已有的觅食者,为了避免可能发生的食物枯竭或竞争,用负反馈来管理群及其资源是很有必要的;c)变动(如群个体的随意出行)对群的变革很重要,随机性对群产生突变结构非常关键,它能使群有新发现;d)群个体之间存在多级交互,可使信息传遍整个群以实现信息共享。显然,自然界中的蜂群能满足 Millonas 的五项原则和 Bonabeau 的四个特征。

另外,蜜蜂是一种社会群居性昆虫,每只蜜蜂都有明确的分工,尤其是当蜂巢所处的环境发生变化时,蜂群能灵活调整蜜蜂的劳动分工,如增加或减少采蜜的工蜂[10]。可见,劳动分工是蜂群的一个重要特征。要研究蜂群的劳动分工规律可参考 Robinson[10] 的研究成果。

鉴于以上原因,考虑到有关蜂群的自组织和劳动分工的理论研究较多,如 Camazine 等人[11] 也对蜂群的自组织机制进行了研究。因此,笔者认为蜂群算法的理论基础由核心理论与补充理论构成,其中核心理论为自组织理论(如 Seeley 的自组织模型及 Camazine 的自组织机制)和劳动分工理论(如 Robinson 的劳动分工规律),而补充理论(如 Millonas 的五项原则与 Bonabeau 的四个特征)是对核心理论的补充说明以清楚解释相关概念。

2　蜂群算法的分类及应用

根据所受启发的蜜蜂的不同行为,文献[4]将蜂群算法主要分为基于婚配(marriage)行为与基于采蜜(foraging)行为两大类,而文献[12,13]提到蜂群算法主要有基于交配(mating)行为与基于采蜜行为两类算法。考虑到蜜蜂的繁殖(reproductive)行为(或过程)包括婚配或交配、产卵和照顾幼蜂等行为,笔者认为将蜂群算法主要分为基于繁殖行为与基于采蜜行为两大类算法更恰当。下面将详细论述这两类蜂群算法的生物学机理及其最常见算法的应用研究情况。

2.1　基于蜜蜂繁殖行为的蜂群算法

2.1.1　生物学机理

一个完整的蜂群由蜂王、雄蜂和工蜂组成[14]。蜂王是蜂群中唯一具有生殖能力的雌蜂,它由受精卵发育而成,是工蜂从幼蜂中精心培养出来的,其个体最大,体重约为工蜂的 2 倍,寿命长达 56 年,而一般的工蜂和雄蜂的寿命不超过 6 个月[14]。蜂王的主要任务是与不同的雄蜂进行交配与产卵。雄蜂由不受精的卵发育而成,主要职责是与蜂王交配。工蜂由受精卵发育而来,个体最小,生殖器官发育不完全,无生殖能力,负责照顾幼蜂、采蜜等工作。

蜂王性成熟后,出巢飞舞,一群雄蜂追随其后。蜂王选择其中一只雄蜂进行交配,交配后这只雄蜂立即死亡,而蜂王可以多次(如 7 ~ 17 次[10])交配,直至纳满精子飞回蜂巢产卵。为了避免近亲繁殖,蜂王有时会寻找其他蜂群的雄蜂交配。刚开始交配时,蜂王飞行速度很快,每交配一次,蜂王的飞行速度有所衰减。当蜂王衰弱到一定程度时,则由成熟且胜任的幼蜂替代,即产生新一代蜂王,此时结束原蜂王的生命周期。蜂群繁殖进化过程也是蜂王不断更新的过程,如图 1 所示。其实,新蜂王的产生类似于进化计算中的一个优化过程,蜂王是优化过程中待求解问题的最优解。

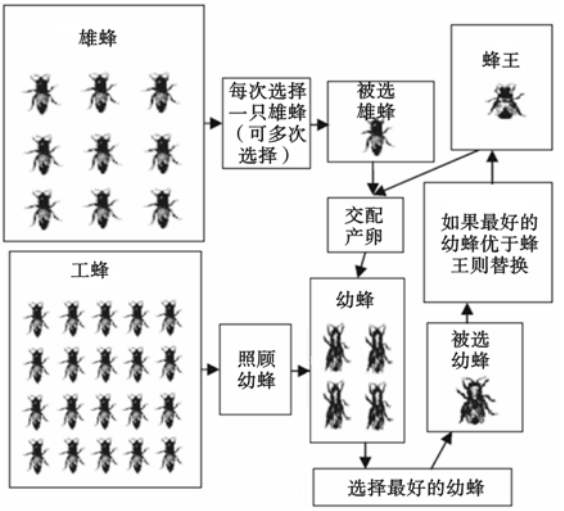

图1　蜜蜂的繁殖机理

2.1.2　最常见算法的应用研究

最常见的基于蜜蜂繁殖行为的蜂群算法是 Abbass[15] 于 2001 年提出的蜜蜂交配优化算法(honey bee mating optimization,HBMO)。HBMO 模拟由一只蜂王进化为一个包含一只或多只蜂王的蜂群的整个过程,并被用于解决可满足性问题。Amiri 等人[16] 基于 K-均值聚类算法将自组织映射神经网络与 HBMO 结合用于细分网上书店市场;Fathian 等人[17] 将 HBMO 用于聚类分析;Magdalene 等人[12] 用 HBMO 进行金融分类;Chang[18] 改进 HBMO 以求解随机动态规划问题;Curkovic 等人[19] 用 HBMO 求解非线性的丢番图方程标准函数和引导移动机器人避障;Haddad 等人[20] 用 HBMO 优化非凸水资源管理;Mohan 等人[21] 用 HBMO 优化水配网设计;Niknam[22,23] 将 HBMO 分别与混沌局部搜索、模糊聚类技术结合以解决多目标配电网重构问题;Yang 等人[24] 用改进婚配的 HBMO 优化武器组网系统的军事布阵;Marinakis 等人[25] 将 HBMO 与多级邻域搜索—贪婪自适应搜索过程、扩展邻域搜索算法结合以解决车辆路径问题;Horng[26,27,14] 将 HBMO 分别与最大熵值技术、多级最小交叉熵值法、Linde-Buzo-Gray 算法结合用于寻找图像边界及构造矢量量化的码本。

除 HBMO 外,基于蜜蜂繁殖行为的蜂群算法还有蜜蜂进化型遗传算法[28] 和蜂王算法[29] 等。基于蜜蜂繁殖行为的蜂群算法本质上是对遗传算法(genetic algorithm,GA)[30] 的改进。

2.2　基于蜜蜂采蜜行为的蜂群算法

2.2.1　生物学机理

自然界中的蜂群总能较快地找到优质蜜源。蜂巢中的一部分蜜蜂作为采蜜蜂,它们不断并随机地在蜂巢附近寻找蜜源[7]。如果这些采蜜蜂发现了花蜜超过某个阈值的蜜源,则飞回蜂巢并用摇摆舞告知其他蜜蜂。摇摆舞是蜜蜂之间交流信息的一种基本形式,它传达了有关蜂巢周围蜜源的重要信息(如蜜源方向及离巢距离等)[11,13],其他蜜蜂利用这些信息准确评价蜂巢周围的蜜源质量。当采蜜蜂跳完摇摆舞之后,就与巢中的一些同伴一起飞回原先找到的蜜源采蜜。跟随采蜜蜂

的蜜蜂数量取决于蜜源质量。以这种方式,蜂群能快速且有效地找到花蜜。蜜蜂采蜜通常要先判断蜜源质量。如果在采集该蜜源之后,其花蜜质量仍然很高,它们会回到蜂巢继续通过摇摆舞招募更多的同伴去采蜜[11]。

蜜蜂采蜜的群体智能通过不同角色之间的交流、转换及协作来实现,其机理如图 2 所示。蜂群实现采蜜行为包括蜜源、采蜜蜂与待采蜜蜂三个基本部分。蜜源取决于多种因素,可用蜜源质量来衡量。假设蜂群已找到两个蜜源 A 和 B。采蜜蜂与当前正在采集的蜜源联系在一起,它们携带了具体的蜜源信息,并通过摇摆舞和蜂巢中的其他蜜蜂分享这些信息。待采蜜蜂是准备去采蜜的蜜蜂。刚开始时,待采蜜蜂没有任何关于蜂巢附近蜜源的信息,它有两种可能的选择:a)由于蜂巢内部或外部因素刺激,自发地随机搜索蜂巢附近的蜜源(如图 2 中的 S 线);b)在蜂巢内等待,通过观察采蜜蜂的摇摆舞后,被招募并根据获得的信息寻找蜜源如图 2 中的 R 线。当待采蜜蜂发现新蜜源后,它会记住蜜源的相关信息并开始采蜜,此时,待采蜜蜂变成了采蜜蜂。蜜蜂采蜜回到蜂巢并卸载花蜜后,它有以下三种基本的行为模式[31]:a)放弃原先找到的蜜源,成为待采蜜蜂,如图 2 中的 UF;b)返回同一蜜源前,跳摇摆舞招募其他蜜蜂,如图 2 中的 EF1;c)不招募其他蜜蜂,继续返回同一蜜源采蜜,如图 2 中的 EF2。

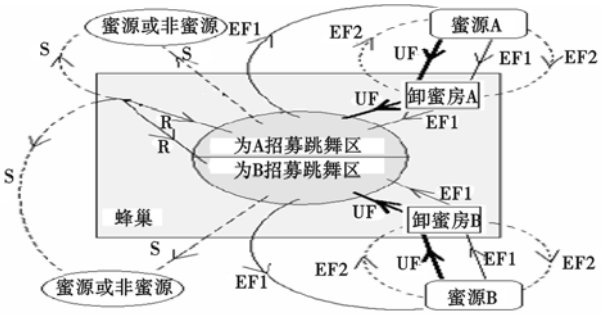

图2　蜜蜂的采蜜机理

蜜蜂采蜜的过程(即寻找高质量的蜜源)类似于进化计算中的搜索待求解问题最优解的过程。在采蜜模型中,蜜源代表可能的解,采蜜相当于搜索最优解,蜜源质量可视为适应度函数决定整个算法的优化方向。

2.2.2　最常见算法的应用研究

最常见的基于蜜蜂采蜜行为的蜂群算法是 Karaboga[32] 于 2005 年提出的人工蜂群算法(artificial bee colony algorithm, ABC)。Karaboga 等人用 ABC 训练神经网络[33]、聚类分析[34]和解决约束优化问题[35];胡中华等人用 ABC 求解 JSP[36] 和 TSP[37];樊小毛等人[38]用 ABC 解决 0-1 背包问题;Sundar 等人[39]用 ABC 求解二次最小生成树问题;Bernardino 等人[40]用 ABC 解决加权环网负荷问题;Hsieh 等人[41]用 ABC 预测股票价格;Karaboga[42]用 ABC 设计数字无限脉冲反应过滤器;Kang 等人[43]将 ABC 与 Nelder-Mead 单纯形法结合以解决逆分析问题;Ho 等人[44]用 ABC 求解逆电磁问题;Hetmaniok 等人[45]用 ABC 解决逆热传导问题;Sabat 等人[2]用 ABC 抽取 GaAs 金属扩展半导体场效转换器模型参数;Rao 等人[46]用 ABC 优化多工序制粉操作过程参数;Sonmez[31]用带有自适应罚函数的 ABC 设计桁架结构最小重量;肖永豪等人[47]用 ABC 检测图像边缘;Banharnsakun 等人[48]用迄今最优选择法改进 ABC 进行图像配准;Xu 等人[49]基于混沌理论改进 ABC 以解决无人驾驶战斗机的路径规划问题;Pulikanti 等人[50]将 ABC 与贪婪启发法、局域搜索结合以求解二次方程渐缩问题;Rebreyend 等人[51]将 ABC 与贪婪法结合以优化多处理机调度;Omkar 等人[52]用并行向量估计 ABC 优化多目标复合件设计;Jeya 等人[53]用三种蜜蜂并行搜索的 ABC 优化软件测试定位。

除 ABC 外,基于蜜蜂采蜜行为的蜂群算法还有虚拟蜜蜂算法[54]、蜂群优化算法[55]、自适应混沌量子蜜蜂算法[6]、蜜蜂群优化算法[56]、蜜蜂算法[13]、蜜蜂采蜜算法[57]及蜜蜂选巢算法[58]等。目前,蜜蜂的采蜜行为、学习、记忆和信息分享的特性已成为群智能的研究热点之一[46]。

需要说明的是,由于受篇幅所限,本文未介绍 HBMO 和 ABC 的处理流程,仅列出这两种算法的典型应用研究情况,若想进一步了解各种蜂群算法可参考文献[3,4]及相关文献。

3　蜂群算法与三种算法的比较

GA、蚁群算法(ant colony optimization, ACO)[59]、粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)[60]与蜂群算法均属于进化算法,它们都是基于种群的通过迭代来完成寻优过程的概率搜索算法。其中,GA 是最通用的进化算法,而 ACO 和 PSO 为非常流行的两种群智能算法[26]。根据文献[2~6,12~60],对这四种算法的优缺点及适用范围进行了归纳与比较,其结果列于表 1。

表 1　蜂群算法与 GA、ACO、PSO 的比较

算法	优点	缺点	适用范围
GA	收敛速度快,通用性强	易早熟收敛、在迭代后期收敛速度慢(尤其是高维、高精度优化问题)	求解组合优化问题和连续优化问题
ACO	通过个体间信息素的共享形成正反馈机制,有效提高全局寻优效率	在迭代初期信息素匮乏,蚂蚁寻优比较盲目,收敛速度慢;由于信息素更新能力有限,算法容易陷入局部最优解,从而出现停滞现象;当问题规模增大时,算法效率明显下降	主要求解组合优化问题,并能求解一些连续优化问题
PSO	收敛速度快,设置参数少	在迭代后期难以保持种群多样性,容易陷入局部最优解,且搜索精度不高(特别是复杂多峰优化问题)	主要求解连续优化问题,并能求解一些组合优化问题
蜂群算法	有劳动分工和协作机制,蜜蜂按照劳动分工采用不同的搜索策略或模式,并能相互协作共同完成寻优工作;全局寻优能力强:基于繁殖行为的蜂群算法总保留每一代的最优个体(蜂王),而基于采蜜行为的蜂群算法能利用蜜蜂之间寻优的正反馈机制,它们均有效加快了全局寻优过程	在接近全局最优解时,搜索速度变慢,种群多样性减少,甚至陷入局部最优解	求解组合优化问题和连续优化问题(包括复杂的优化问题)

虽然 GA、ACO 和 PSO 三者都比蜂群算法的发展历史悠久,前三者的研究及应用也比较成熟,但由表 1 可知,蜂群算法因有劳动分工和协作机制,算法更灵活,易与其他技术结合以改进原算法,既能解决连续优化问题,又能求解组合优化问题,可见其具有广泛的适用性。需要说明的是,文献[12]比较了分别用这四种算法解决含有信贷风险评估的金融分类问题所获得的总体分类准确率,

在 k-NN 情况下的结果为:蜂群算法 > PSO > ACO > GA(用“ > ”表示“优于”,下同);而在 1-NN 与 Wk-NN 情况下的结果为:蜂群算法 > ACO > PSO > GA。此外,文献[13,14,19 ~ 23,27 ~ 29,34 ~ 35,40,55]的研究结果也表明蜂群算法在解决某些复杂问题的性能要优于 GA、ACO 和 PSO。显然,蜂群算法是后起之秀,其应用前景十分广阔,对其进行研究极具理论意义和应用价值。

4 蜂群算法存在的问题及展望

由上文可知,蜂群算法有诸多优点,具有广泛的适用性。因此,近几年研究者对蜂群智能兴趣愈来愈浓厚,蜂群算法的研究与应用日益猛增并取得了一定的理论成果和实践成效。但是,蜂群算法是一种新兴的群智能优化技术,有许多关键问题有待解决。目前,蜂群算法存在的问题及其未来研究方向可总结如下:

a)蜂群算法的参数设置对算法性能影响很大,参数值一般根据反复实验获得的经验值来设置。例如在 ABC 中,合理选择侦察蜂数量、引领蜂数量 leader 和更新阈值 limit 对算法收敛速度及全局寻优能力很重要。Karaboga 等人[32-35]认为 leader 应与观察蜂数量相同,并各取种群规模的一半,侦察蜂只选一只,limit 等于 leader 与问题维数的乘积。能不能任意设置算法参数? 因此,有必要对蜂群算法各参数的设置进行灵敏性分析,并通过改进原算法实现自适应设置参数以减少人为主观因素和增加算法的智能性。

b)蜂群算法容易陷入局部最优解,从而出现停滞现象。如何避免算法早熟收敛,增强算法的鲁棒性、提高算法的全局搜索能力? 考虑到计算智能优化技术在各领域备受欢迎,而每种优化技术都有其应用的优缺点,随着优化问题复杂程度与规模的不断扩大,只通过单一的优化计算往往很难得到满意解。从解决实际问题出发,本着优势互补的思想,充分发挥各种计算智能技术的优势,可达到单一算法无法实现的优化效果,也是解决问题的必然发展趋势。近年来,国内外研究者正是将各种智能技术结合提出了各种混合算法,并成功地解决了大量实际问题。因此,将蜂群算法与其他智能技术结合以改进原算法也是一种发展趋势,其具体混合策略可根据不同应用领域和求解问题的实际情况进行灵活选择。此外,现有的混合蜂群算法很多都是针对具体问题设计的,所解决的问题不同其混合策略也就存在差异,不具备系统性和一般性。因此,在现有成果的基础上继续进行深入研究,努力探讨每种蜂群算法之间或与其他智能技术相混合的统一机制将是一个非常具有理论意义和应用价值的课题。

c)蜂群算法是一种新兴技术,其发展尚欠成熟,各种蜂群算法的相关模型提出后,主要是在经典数值优化函数上进行了实验仿真,但是尚未有理论支持或数学证明所提出的各种算法或现有的理论仍不够完善,而且这些算法的应用研究仍处于起步阶段。蜜蜂的生物原理比较复杂,蜂群的每种行为就是一种算法。因此,有必要研究自然界蜂群的生物学机理,进一步分析蜂群的行为模式,从方法论到实现技术各个层次对现有蜂群算法的体系结构、技术特点及局限性进行比较、反思、扩展,构造简洁高效的基于群智能原则、自组织模型和劳动分工规律的蜂群算法以解决复杂、高维、多峰、多目标与动态的优化问题,并设法用数学方法证明算法的收敛性。这些对于不断完善、提升蜂群算法的理论和实现技术及拓展其应用领域意义重大。

d)现有蜂群算法很多都是串行计算,随着计算机软硬件技术发展与网络普及,并行和分布式计算将会越来越流行。如何实现蜂群算法的并行或分布式计算? 显然,很有必要深入探讨并行或分布式蜂群算法的设计及对其收敛性进行分析与验证。

e)蜂群算法的应用研究仍处于起步阶段,目前除蜂群优化算法[55]主要用于求解组合优化问题外,其他蜂群算法主要应用于解决连续优化问题。如何将蜂群算法应用于更多领域? 因此,研究、实践和开辟蜂群算法的应用领域对有效解决复杂的工程、管理与控制等领域的优化问题尤为重要,同时既能检验蜂群算法优劣又能体现其研究价值。

5 结束语

蜂群算法是一种新兴的群智能优化技术,其应用前景十分广阔。对蜂群算法的理论及应用进行深入研究将会在很大程度上拓展群智能和相关技术的研究与应用领域,使它们获得更大发展和广泛融合,从而能有效解决更多的实际问题。

参考文献:

[1] KRÓL D, DROŻDŻOWSKI M. Use of MaSE methodology for designing a swarm-based multi-agent system[J]. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems,2010,21(3):221-231.

[2] SABAT S L,UDGATA S K,ABRAHAM A. Artificial bee colony algorithm for small signal model parameter extraction of MESFET[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence,2010,23(5):689-694.

[3] KARABOGA D, AKAY B. A survey: algorithms simulating bee swarm intelligence[J]. Artificial Intelligence Review,2009,31(1-4):61-85.

[4] BITAM S,BATOUCHE M,TALBI E. A survey on bee colony algorithms[C]//Proc of IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing, Workshops and Phd Forum. [S. l.]: IEEE Service Center,2010:1-8.

[5] 杨进,马良. 解决复杂优化问题的一个有效工具——蜂群优化算法[J]. 计算机应用研究, 2010,27(12):4410-4413.

[6] XUE Han, LI Xun, MA Hong-xu. Random fuzzy chance-constrained programming based on adaptive chaos quantum honey bee algorithm and robustness analysis[J]. International Journal of Automation and Computing,2010,7(1):115-122.

[7] SEELEY T D. The wisdom of the hive: the social physiology of honey bee colonies[M]. Cambridge:Harvard University Press,1995.

[8] MILLONAS M M. Swarms, phase transitions, and collective intelligence[C]//Proc of Artificial Life Ⅲ Conference. New York: Addison-Wesley Publishing Company,1994:417-445.

[9] BONABEAU E,DORIGO M,THERAULAZ G. Swarm intelligence: from natural to artificial systems[M]. New York:Oxford University Press, 1999.

[10] ROBINSON G E. Regulation of division of labor in insect societies[J]. Annual Review of Entomology,1992,37(1):637-665.

[11] CAMAZINE S,DENEUBOURG J L,FRANKS N R,*et al*. Self-organization in biological systems[M]. Princeton: Princeton University Press, 2003.

[12] MAGDALENE M,YANNIS M,CONSTANTIN Z. Honey bees mating optimization algorithm for financial classification problems[J]. Applied Soft Computing,2010,10(3):806-812.

[13] DERELI T, DAS G S. A hybrid 'bee(s) algorithm' for solving container loading problems[J]. Applied Soft Computing,2011,11(2):2854-2862.

[14] HORNG M H,JIANG T W. Image vector quantization algorithm via honey bee mating optimization[J]. Expert Systems with Applications,2011,38(3):1382-1392.

[15] ABBASS H A. MBO: marriage in honey bees optimization: a haplometrosis polygynous swarming approach[C]//Proc of IEEE Congress on Evolutionary Computation. [S. l.]: IEEE Service Center, 2001:207-214.

[16] AMIRI B,FATHIAN M. Integration of self organizing feature maps and honey bee mating optimization algorithm for market segmentation[J]. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2007,3(3):70-86.

[17] FATHIAN M,AMIRI B. A honeybee-mating approach for cluster analysis[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2008,38(7-8):809-821.

[18] CHANG H S. Converging marriage in honey-bees optimization and application to stochastic dynamic programming[J]. Journal of Global Optimization,2006,35(3):423-441.

[19] CURKOVIC P, JERBIC B. Honey-bees optimization algorithm applied to path planning problem[J]. International Journal of Simulation Modelling,2007,6(3):154-165.

[20] HADDAD O B, AFSHAR A, MARIÑO M A. Optimization of non-convex water resource problems by honey-bee mating optimization (HBMO) algorithm[J]. Engineering Computations,2009,26(3):267-280.

[21] MOHAN S,BABU K S J. Optimal water distribution network design with honey-bee mating optimization[J]. Journal of Computing in Civil Engineering,2010,24(1):117-126.

[22] NIKNAM T. A new HBMO algorithm for multiobjective daily volt/var control in distribution systems considering distributed generators[J]. Applied Energy,2011,88(3):778-788.

[23] NIKNAM T. An efficient multi-objective HBMO algorithm for distribution feeder reconfiguration[J]. Expert Systems with Applications, 2011,38(3):2878-2887.

[24] YANG Chen-guang,TU Xu-yan,CHEN Jie. Study of direction probability and algorithm of improved marriage in honey bees optimization for weapon network system[J]. Journal of China Ordnance,2009,5(2):152-157.

[25] MARINAKIS Y,MARINAKI M,DOUNIAS G. Honey bees mating optimization algorithm for large scale vehicle routing problems[J]. Natural Computing,2010,9(1):5-27.

[26] HORNG M H. A multilevel image thresholding using the honey bee mating optimization[J]. Applied Mathematics and Computation, 2010,215(9):3302-3310.

[27] HORNG M H. Multilevel minimum cross entropy threshold selection based on the honey bee mating optimization[J]. Expert Systems with Applications,2010,37(6):4580-4592.

[28] 孟伟,韩学东,洪炳镕. 蜜蜂进化型遗传算法[J]. 电子学报,2006,34(7):1294-1300.

[29] VAKIL-BAGHMISHEH M T,SALIM M. The design of PID controllers for a Gryphon robot using four evolutionary algorithms: a comparative study[J]. Artificial Intelligence Review,2010,34(2):121-132.

[30] HOLLAND J H. Adaptation in natural and artificial systems[M]. Michigan: University of Michigan Press,1975.

[31] SONMEZ M. Artificial bee colony algorithm for optimization of truss structures[J]. Applied Soft Computing,2011,11(2):2406-2418.

[32] KARABOGA D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization, TR06[R]. Kayseri:Erciyes University,2005.

[33] KARABOGA D,OZTURK C. Neural networks training by artificial bee colony algorithm on pattern classification [J]. Neural Network World,2009,19(3):279-292.

[34] KARABOGA D,OZTURK C. A novel clustering approach: artificial bee colony (ABC) algorithm[J]. Applied Soft Computing,2011, 11(1):652-657.

[35] KARABOGA D,AKAY B. A modified artificial bee colony (ABC) algorithm for constrained optimization problems [J]. Applied Soft Computing,2011,11(3):3021-3031.

[36] 胡中华,赵敏,撒鹏飞. 基于人工蜂群算法的 JSP 的仿真与研究[J]. 机械科学与技术,2009,28(7):851-856.

[37] 胡中华,赵敏. 基于人工蜂群算法的 TSP 仿真[J]. 北京理工大学学报,2009,29(11):978-982.

[38] 樊小毛,马良. 0-1 背包问题的蜂群优化算法[J]. 数学的实践与认识,2010,40(6):155-160.

[39] SUNDAR S,SINGH A. A swarm intelligence approach to the quadratic minimum spanning tree problem[J]. Information Sciences,2010, 180(17):3182-3191.

[40] BERNARDINO A M, BERNARDINO E M, SANCHEZ-PEREZ J M, *et al*. Efficient load balancing for a resilient packet ring using artificial bee colony[J]. Evolutionary Applications,2010,6025(2):61-70.

[41] HSIEH T J,HSIAO H F,YEH W C. Forecasting stock markets using wavelet transforms and recurrent neural networks: an integrated system based on artificial bee colony algorithm[J]. Applied Soft Computing,2011,11(2):2510-2525.

[42] KARABOGA N. A new design method based on artificial bee colony algorithm for digital IIR filters[J]. Journal of the Franklin Institute-Engineering and Applied Mathematics,2009,346(4):328-348.

[43] KANG Fei,LI Jun-jie,XU Qing. Structural inverse analysis by hybrid simplex artificial bee colony algorithms[J]. Computers and Structures,2009,87(13-14):861-870.

[44] HO S L,YANG Shi-you. An artificial bee colony algorithm for inverse problems[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics,2009,31(3):181-192.

[45] HETMANIOK E, SLOTA D,ZIELONKA A. Solution of the inverse heat conduction problem by using the ABC algorithm[C]//Proc of the 7th International Conference on Rough Sets and Current Trends in Computing. Berlin: Springer-Verlag,2010:659-668.

[46] RAO R V,PAWAR P J. Parameter optimization of a multi-pass milling process using non-traditional optimization algorithms [J]. Applied Soft Computing,2010,10(2):445-456.

[47] 肖永豪,余卫宇. 基于蜂群算法的图像边缘检测[J]. 计算机应用研究,2010,27(7):2748-2750.

[48] BANHARNSAKUN A, ACHALAKUL T, SIRINAOVAKUL B. The best-so-far selection in artificial bee colony algorithm [J]. Applied Soft Computing,2011,11(2):2888-2901.

[49] XU Chun-fang,DUAN Hai-bin,LIU Fang. Chaotic artificial bee colony approach to uninhabited combat air vehicle (UCAV) path planning [J]. Aerospace Science and Technology, 2010, 14 (8): 535-541.

(下转第 3214 页)

IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000,22(8):888-905.

[15] KERNIGHAN B W,LIN S. An efficient heuristic procedure for partitioning graphs[J]. Bell System Technical Journal,1970,49(2):291-307.

[16] GREGORY S. An algorithm to find overlapping community structure in networks[C]//Proc of the 11th European Conference on Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases. 2007:91-102.

[17] RADICCHI F,CASTELLANO C,CECCONI F. *et al*. Defining and identifying communities in networks[J]. Proceedings of National Academy of Sciences of USA,2004,101(9):2658-2663.

[18] PALLA G,DERENYI I, FARKAS I,*et al*. Uncovering the overlapping community structure of complex networks in nature and society [J]. Nature,2005,435(7043):814-818.

[19] PIKOVSKY A, ROSENBLUM M G, KURTHS J. Synchronization: a universal concept in nonlinear sciences[M]. Cambridge: Cambridge University Press,2001.

[20] LI Ke-zan, SMALL M, FU Xin-chu. Contraction stability and transverse stability of synchronization in complex networks[J]. Physical Review E,2007,76(5):056213-1-7.

[21] 黄发良.信息网络的社区发现及其应用研究[J].复杂系统与复杂性科学,2010,7(1):64-74.

[22] WU F Y,STANLEY H E. Universality of Potts models with two-and three-site interactions[J]. Physical Review B,1982,26(11):6326-6329.

[23] CHANDLER D. Introduction to modern statistical mechanics[M]. New York:Oxford University Press,1987.

[24] DOYLE P G, SNELL J L. Random walks and electric networks [M]//Carusmathematical Monographs. Washington DC: Free Software Foundation,1984.

[25] [美]蒋庆琅. 随机过程原理与生命科学模型[M].方积乾,译.上海: 上海翻译出版公司,1987.

[26] LOVÁSZ L. Random walks on graphs: a survey[J]. Combinatorics Paul Erdös is Eighty,1993,2(1):1-46.

[27] 李强,何衍,蒋静坪.一种基于随机游动的聚类算法[J].电子与信息学报,2009,31(3):523-526.

[28] ARENAS A, DAZ-GUILERA A,PEREZ-VICENTE C J. Synchronization reveals topological scales in complex networks[J]. Physical Review Letters,2006,96(11):114102-1-4.

[29] BOCCALETTI S, IVANCHENKO M, LATORA V, *et al*. Detecting complex network modularity by dynamical clustering[J]. Physical Review E,2007,75(4):045102-1-4.

[30] REICHARDT J, BORNHOLDT S. Detecting fuzzy community structures in complex networks with a Potts model[J]. Physical Review Letters,2004,93(21):218701.

[31] BLATT M, WISEMAN S, DOMANY E. Super paramagnetic clustering of data[J]. Physical Review Letters,1996,76(18):3251-3254.

[32] KIRKPATRICK S, GELATT C D,VECCHI M P. Optimization by simulated annealing[J]. Science,1983,220(4598):671-680.

[33] SON S W, JEONG H, NOH J D. Random field Ising model and community structure in complex networks[J]. European Physical Journal B,2006,50(3):431-434.

[34] MIDDLETON A A,FISHER D S. Three-dimensional random-field Ising magnet: interfaces, scaling, and the nature of states[J]. Physical Review B,2002,65(13):134411-1-34.

[35] AHUJA R K, MAGNANTI T L, ORLIN J B. Network flows: theory, algorithms, and applications[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993.

[36] ZHOU Hai-jun. Distance, dissimilarity index, and network community structure[J]. Physical Review E,2003,67(6):061901-1-8.

[37] ZHOU Hua-jun. Network landscape from a Brownian particle's perspective[J]. Physical Review E,2003,67(4):041908-1-5.

[38] HU Y, CHEN H, ZHANG P. Comparative definition of community and corresponding identifying algorithm[J]. Physical Review E, 2008,78(2):026121.

[39] Van DONGEN S. Graph clustering by flow simulation[D]. Utrecht, Netherlands:University of Utrecht,2000.

(上接第 3205 页)

[50] PULIKANTI S,SINGH A. An artificial bee colony algorithm for the quadratic knapsack problem[C]//Proc of the 16th International Conference on Neural Information Processing. Berlin: Springer-Verlag, 2009:196-205.

[51] REBREYEND P,CLUGERY C,HILY E. A heuristic-based bee colony algorithm for the multiprocessor scheduling problem[C]//Proc of International Workshop on Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization. Berlin:Springer-Verlag,2010:295-304.

[52] OMKAR S N,SENTHILNATH J,KHANDELWAL R,*et al*. Artificial bee colony(ABC) for multi-objective design optimization of composite structures[J]. Applied Soft Computing,2011,11(1):489-499.

[53] JEYA M D,MOHAN V,KAMALAPRIYA M. Automated software test optimization framework:an artificial bee colony optimization-based approach[J]. Software,2010,4(5):334-348.

[54] YANG Xin-she. Engineering optimizations via nature-inspired virtual bee algorithms[C]//Artificial Intelligence and Knowledge Engineering Applications: A Bioinspired Approach. Berlin: Springer-Verlag, 2005:317-323.

[55] HUANG Y M,LIN Jin-chen. A new bee colony optimization algorithm with idle-time-based filtering scheme for open shop-scheduling problems[J]. Expert Systems with Applications,2011,38(5):5438-5447.

[56] AKBARI R,MOHAMMADI A,ZIARATI K. A novel bee swarm optimization algorithm for numerical function optimization[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2010,15(10):3142-3155.

[57] VERA D,CARABIAS J,JURADO F,*et al*. A honey bee foraging approach for optimal location of a biomass power plant[J]. Applied Energy,2010,87(7):2119-2127.

[58] NEVAI A L,PASSINO K M,SRINIVASAN P. Stability of choice in the honey bee nest-site selection process[J]. Journal of Theoretical Biology,2010,263(1):93-107.

[59] DORIGO M,MANIEZZO V,COLORNI A,*et al*. Positive feedback as a search strategy,TR91-16[R]. Milano:Politecnico di Milano,1991.

[60] KENNEDY J,EBERHART R C. Particle swarm optimization[C]// Proc of IEEE International Conference on Neural Networks. [S. l.]: IEEE Service Center,1995:1942-1948.