

解决复杂优化问题的一个有效工具 ——蜂群优化算法*

杨进^a, 马良^b

(上海理工大学 a. 理学院; b. 管理学院, 上海 200093)

摘要: 蜂群的某些群智能行为在昆虫中是很独特的, 因此来源于蜂群智能行为的各种优化算法在解决某些实际问题时是很有效的。较之其他的优化算法, 目前国内关于蜂群优化算法的文献相对较少。简要介绍了若干蜂群优化算法的发展概况, 并探讨了一些未来可做的工作。

关键词: 群智能; 蜂群交配; 蜜蜂采蜜; 黄蜂与环境信息交互

中图分类号: TP301.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2010)12-4410-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.12.003

Efficient tool for complex optimization problems: bee colony optimization algorithm

YANG Jin^a, MA Liang^b

(a. School of Science, b. School of Management, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The swarm intelligence of the bee colony is unique in insect societies, so it is beneficial to solve some practical problems by the optimization algorithms based on the swarm intelligence of the bee colony. Now of the bee optimization algorithm were few compared with other optimization algorithms. So this paper gave a simple summarization of several bee optimization algorithms and discussed some work that can do in future.

Key words: swarm intelligence; honeybee mating; bee foraging; information communication of wasp and surrounding

0 引言

群智能^[1]是一个新兴的研究领域。该领域主要是通过研究和模拟社会性昆虫, 如蚂蚁、蜜蜂、驯鹿等的行为来构造一些模型, 并通过建立在这些模型基础上的群优化算法(SOAS)来研究和解决某些问题。群优化算法与其他直接搜索算法如爬山算法等最重要的不同在于 SOAS 在每次循环中用一组解来代替一个解。如果最优问题的解是一个单一解, SOAS 的解集会收敛于单一解; 如果最优问题有多个最优解, SOAS 能找到其最优解组。群优化算法包括蚁群优化算法(ACO)、遗传算法(GA)和粒子群优化算法(PSO)等。

蚁群优化算法是发展得较成熟的群智能算法中的一种。其实, 蚂蚁并不是唯一让人类领悟到群体智慧的昆虫。康奈尔大学的生物学家 Thomas Seeley 长期以来一直在观察蜂群奇特的决策能力——一个蜂房里的工蜂多达 50 000 之多, 蜂群是如何统一分歧, 为自身谋得最大利益的? Seeley 发现蜂群作出决策的法则是集思广益, 各抒己见, 用一种有效的机制使选择最优化, 这让 Seeley 大为惊讶。这就是动物群体智慧的非凡魅力。

无论是蚂蚁、蜜蜂、鸽子或是驯鹿, 这些智慧群体基于自身经验的简单法则, 为人类提供了解决复杂问题的策略。所以,

群体智能吸引了大量的科学工作者对其进行研究和讨论。相对于其他发展较成熟的群智能算法, 建立在蜂群群体行为基础上的各种算法研究就比较少了, 文献也相对较少。本文简要介绍了建立在蜂群各种智能行为基础上的优化算法, 并探讨了一些未来可做的工作。

蜂群是社会化的昆虫群体, 蜂群中的个体可以担任不同的角色, 能够完成构建巢穴、觅食、生育后代、养育后代和御敌等工作, 并且能够自发地在这些角色之间进行转换。一般蜂群有两种创建方式^[2]: a) 独立创建方式(independent founding), 即蜂群是由一个或多个母蜂创建的, 这些母蜂建造巢穴、生育后代以及哺育幼蜂, 幼蜂一直被哺育到能承担种群的工作为止, 自此种群的分工是蜂王专门生育后代, 而工蜂则哺育后代。b) 群创建方式(swarming founding), 即蜂群是由一个或多个蜂王及一群工蜂创建的。从蜂群创建之初就有明确的分工, 即蜂王生育后代, 工蜂哺育后代。在蜂群的整个生命循环过程中, 若始终只有一个蜂王, 则称为单种蜂群(monogynous colony); 反之, 则称为多种蜂群(polygynous colony)。

1 源于蜂群交配过程的优化算法

1.1 蜂群的交配原理

蜂群的行为是一系列因素的产物, 如它们潜在的基因、它

收稿日期: 2010-05-20; **修回日期:** 2010-06-30 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(70871081); 上海市重点学科建设资助项目(S30504)

作者简介: 杨进(1978-), 女, 江苏无锡人, 讲师, 博士, 主要研究方向为系统工程、智能优化、图论与组合优化(yangjin_78@hotmail.com); 马良(1964-), 男, 上海人, 教授, 博导, 博士, 主要研究方向为系统工程、智能优化。

们所处生态环境、种群的阶级状况以及那些以前和正在发生的许多相互作用的因素^[3]。蜂群的交配行为是比较难研究的一类行为,因为蜂王的交配过程是在远离蜂巢的交配飞行中进行的。蜂王的整个交配过程很难观察。

一个典型的蜂群^[4]由一个长寿的、能生育后代的蜂王,零个至几个雄蜂(这个视季节而定)以及 10 000 ~ 60 000 个工蜂组成。只有蜂王被喂以一种奶白色、汁液样食物,名为“黄浆”,“黄浆”能使蜂王变得比蜂巢中的其他蜜蜂都要大。蜂王一般可以活 5 ~ 6 年,而工蜂和雄蜂则活不过 6 个月。

在蜂群中,雄蜂扮演着父亲的角色,它们都是单染色体细胞,除了通过交配,无法改变自己的基因组成。它们唯一的任务就是和蜂王交配即提供一定的精子。在交配完成后,雄蜂就死去了;而工蜂则哺育幼蜂,幼蜂来源于孵化过的或未孵化过的蜂卵。前者产生将来的蜂王或工蜂,后者则产生雄蜂。

在整个交配过程中,蜂王是在远离巢穴的飞行中进行交配的。蜂王的交配飞行始于一种舞蹈,然后雄蜂尾随其后,并在随后的飞行中与其交配。在一个典型的交配飞行中,蜂王与 7 ~ 10 个雄蜂进行交配^[5]。在每次交配中,雄蜂的精子到达蜂王的受精囊中,并在此积聚起来形成蜂群的基因池。每次蜂王产下卵后,都会随机地将积聚在受精囊中的精子更新一下,然后再接着产卵。

交配发生时,蜂王被一大群雄蜂追随着。交配最终以雄蜂的死去而告终,而蜂王在此过程中获得了交配记号。蜂王可以交配许多次,而雄蜂一生只能一次,蜂群交配的这个特点也使蜂群成为昆虫中比较特殊的一种。

1.2 蜂群交配优化算法原理

Abbass^[6,7]受蜂群交配过程的启发,提出了一种用于解决组合优化问题的新的群智能优化技术——蜜蜂交配优化算法(marriage in honey-bee optimization, MBO)。

蜂群的交配飞行可被视为是一系列状态间的改变。在此过程中,蜂王以一定的速度在不同状态间转变,并以一定的概率在每一状态下与雄蜂进行交配。交配飞行之初,蜂王具有一定的飞行速度和能量。在每次状态改变后,蜂王的速度和能量都会有所衰退,衰退方程为

$$S(t+1) = \alpha \times S(t)$$

$$E(t+1) = E(t) - \gamma$$

其中: $\alpha \in [0, 1]$, γ 是状态间改变后能量的衰退值。当蜂王的速度和能量衰减到一定的阈值范围内时,它便飞回蜂巢。在每一状态下,雄蜂以下面的概率与蜂王进行交配

$$\text{prob}(Q, D) = \exp\left[\frac{-\Delta(f)}{S(t)}\right]$$

其中: $\text{prob}(Q, D)$ 是雄蜂 D 将其精子成功加入蜂王 Q 的受精囊中的概率,即一次成功交配的概率; $\Delta(f)$ 是雄蜂与蜂王匹配值的绝对差,即 $f(D)$ 与 $f(Q)$ 的绝对差; $S(t)$ 表示时刻 t 时蜂王的飞行速度。显然,在交配飞行之初,蜂王的飞行速度高,或者雄蜂与蜂王的匹配较好时,成功交配的概率就高。

Abbass^[7]在研究中发现求解问题时单种蜂群更优于多种蜂群,他们将 MBO 算法成功用于解决带有离散变量的单一水库优化问题^[8];并通过求解一类带有连续状态变量的非线性、

具有连续约束的问题来说明该算法在解决水库问题上的有效性,所得实验结果与用非常成熟的传统线性规划求得的结果十分具有可比性^[9]。后来,又将该算法用于求解函数优化的三个 benchmark 问题^[10]。也有人将该算法与一些经典算法及启发式算法嵌套组成混合算法去求解 TSP 及 CVRP,并取得了较好的效果。

2 源于蜂群采蜜过程的优化算法

2.1 蜂群采蜜原理

蜂群能同时从不同方向,飞行较长的距离(超过 10 km)去找寻大量的食物源^[11,12],蜂群也正是通过此种方式找到好的食物源从而使整个种群繁荣起来。尤为重要的是,那些有大量花粉并且无须花太多力气采蜜的花朵会引来更多的蜜蜂;而花粉少的花朵则很难吸引蜜蜂的到来^[1,13]。

蜂群的采蜜过程始于派遣一些侦查蜂去搜寻花朵。侦查蜂随机地在不同花朵间移动,当侦查蜂飞回巢穴时,那些发现满足一定质量要求(花粉的质量是从很多方面组合来衡量的,如花蜜的糖分等)花蜜的侦查蜂会先卸下它们采到的花蜜或花粉,然后去蜂巢中的舞池中跳一种称为“摇摆舞”的舞蹈^[11]。这种神秘的舞蹈对于蜜蜂间的交流来说是至关重要的。舞蹈暗示了关于它所采集过的花朵的三个信息:花朵所在方向、离开巢穴的距离以及花蜜的质量等级^[11,13]。这些信息能够帮助蜂群在没有向导和地图的情况下准确地派遣蜜蜂去那些花朵处。每个蜜蜂所了解到的外部信息都能完全从它的摇摆舞里体现出来,比如,如果花朵离巢穴较近,它就会不停地转圈,如果花朵离巢穴比较远,它就会跳一种类似于“8”的舞蹈;摇摆舞还能使蜂群根据花蜜的质量和采蜜所需能量来判断花蜜的等级^[13]。侦查蜂跳完摇摆舞后,仍然飞回它们找到的花朵,并伴有许多原来等待在巢穴中的蜜蜂尾随其后。这样,更多的蜜蜂会去搜寻更多的花朵,从而使蜂群快速而有效地获取食物。

2.2 人工蜂群优化算法

通过蜂群的采蜜过程发现,蜜蜂可以通过气味、摇摆舞等多种信息交流方式,使整个蜂群协调完成收获花粉的工作。这种方式使蜂群成为具有自组织性、自我适应性及鲁棒性强的群体。Seeley 最先提出了蜂群的自组织模拟模型,受蜂群采蜜过程启发提出的蜂群优化算法正是建立在蜜蜂自组织模型和群体智能基础上的一种非数值优化计算方法。Karaboga^[14]在 2005 年成功地将该优化算法应用在函数的数值优化问题上,并提出了比较系统的人工蜂群优化算法(artificial bee colony algorithm, ABC)。

在 ABC 算法中,人工蜂群由雇佣蜂、等候蜂以及侦查蜂组成。侦查蜂执行随机找寻食物的任务;雇佣蜂执行到已找到的食物源上采蜜的任务;等候蜂执行在舞池中观察摇摆舞并决定到哪个食物源附近采蜜的任务。在整个算法中,一次循环主要有以下三个步骤:

a) 派遣雇佣蜂去那些已找到的食物源并且测量这些食物源的花粉量。

b) 通过雇佣蜂的摇摆舞让等候蜂来挑选好的食物源。

c) 派遣侦查蜂去那些可能的食物源处。

人工蜂群优化算法其本身简单、鲁棒性强,在非限制性数值优化函数上有着比常见的启发式算法更加优越的性能。2006 年 Basturk 等人^[15]又进一步将 ABC 理论应用到限制性数值优化问题的解决上,并取得了比较好的测试效果。来源于蜂群采蜜行为的优化算法结合某些邻域搜索算法也被应用于如车间作业调度问题、函数优化问题等。

3 源于黄蜂与环境之间的信息交互实现任务分配的优化算法

3.1 黄蜂与环境之间信息交互实现任务分配的原理

优势等级制度是动物群体和昆虫社会中一个广泛存在的现象。自从 Schjelderup-Ebbe 等人^[16,17]首次研究这种行为后,很多人开始了这方面的研究,如关于鸡群体的^[18~20]、关于牛群体的^[21]、关于马群体的^[22]以及关于一些社会性昆虫的,尤其以黄蜂^[23~28]和蚂蚁居多^[29~33]。这种等级制度在同一种群中通过个体间的支配与被支配的关系体现出来。

在 Landau^[34]和 Chase^[35]做过这方面的重要研究后,关于这方面的理论研究就很少了。后来,Theraulaz 等人^[36]也开始了这方面的研究工作,并通过一种黄蜂的研究提出了黄蜂通过与环境之间的信息交互实现任务分配的模式。

这种黄蜂是生态学中研究的一种原始的群居性物种,也叫做马蜂,有时也被称为欧洲纸蜂或纸黄蜂,在欧洲是一种比较常见的、众所周知的蜂种。这种黄蜂通常聚居在北方气候温和的地区,因此它们的巢穴都是毫无包裹裸露在外的。它们的种群一般只有很少数目的个体(约 20 个),然而,这类种群中的个体之间很少有差异,没有等级上的差别,也没有那些既定的规则来控制个体间的行为如年龄、生理上的差别等。但它们仍然能够协同完成种群的一系列工作,靠的就是个体之间的信息交互以及个体与环境之间的交互。

其实早在 Theraulaz 之前就有了蜜蜂与环境之间的信息交互实现任务分配的模式,如 FFW^[37]。只不过在 FFW 模型中,所有个体具有相同的、固定的、很低的反应阈值,而且模型无法体现出蜂群能随着不断地成熟或者学习来影响任务的分配。Theraulaz 正是在此基础上通过一个简单的反应阈值的加强过程使阈值由固定变为及时的变化,提出了黄蜂与环境进行信息交互实现任务分配的模式^[36,38]。

3.2 黄蜂与环境进行信息交互实现任务分配的优化算法

蜂群中的工蜂承担着哺育幼蜂的工作,它们根据反应阈值和外界的刺激信号来自行安排为幼蜂觅食。对蜂巢中的每个区域,工蜂都有相应的反应阈值;同时蜂巢中每个区域内的幼蜂也会给工蜂相应的刺激信号。工蜂对某个区域的反应阈值越低,或者这个区域内的幼蜂给工蜂的刺激信号值越高时,工蜂为这个区域内的幼蜂采集食物的概率就越高^[39~41]。

假定蜂群中有 n 个工蜂,蜂巢中有 m 个幼蜂区域。每个工蜂对幼蜂区域的反应阈值设为 a_{ij} ($i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m$),每个幼蜂区域对工蜂的刺激信号值为 b_j ($j=1,2,\dots,m$;

$i=1,2,\dots,n$)。每个工蜂为幼蜂区域采蜜的概率为

$$P(a_{ij}, b_j) = \frac{b_j^2}{a_{ij}^2 + b_j^2}$$

其中,反应阈值和刺激信号值会随着工蜂为幼虫觅食的情况而不断地进行更新。如果工蜂没有给某个区域内的幼蜂觅食,那么该区域内的幼蜂给工蜂的刺激信号值就会变大;如果工蜂一直给某个区域内的幼蜂觅食,那么它对该区域的反应阈值也会变大。

当然,有时为了避免有些工蜂太忙、有些太闲,可以设置一定的参数加以限制。这些条件有时也可作为程序终止的条件。

目前国内外关于这类优化算法的应用主要都集中在调度和排序问题上,如车间作业调度问题、网络环境下的任务调度、工件的排序等^[39~43]。为了取得较好的效果,大部分都是嵌套了各类经典和启发式算法的混合算法。

4 结束语

蜂群优化算法这种来自大自然的寻优方法,虽然还没有遗传算法、蚁群算法那样成熟,但是蜂群的某些群智能行为在昆虫中还是很独特的,对解决某些实际问题是很有效率的,所以对它的研究十分有价值。

目前国内外对于蜂群优化算法理论方面的研究很少,但在应用方面,求解问题的领域在进一步扩大。国外多集中在车间作业调度、水库、水资源利用、解标准的函数优化等问题上;国内现在也开始研究该算法,但文献还是较少,应用范围也较窄,而且大部分算法为了取得比较好的效果,都是在蜂群算法基础上嵌套了许多经典或启发式算法的混合算法。所以,对蜂群优化算法进行理论方面的研究,或是拓展其应用范围,目前而言,都是非常有意义的工作。

参考文献:

- [1] BONABEAU E, DORIGO M, THERAULAZ G. Swarm intelligence: from natural to artificial systems [M]. New York: Oxford University Press, 1999.
- [2] DIETZ A. Evolution [M]//Bee Genetics and Breeding. New York: Academic Press Inc, 1986:3-22.
- [3] RINDERER T, COLLINS A. Behavioral genetics [M]//Bee Genetics and Breeding. New York: Academic Press Inc, 1986:155-176.
- [4] LAIDLAW H H, PAGE R E. Mating designs [M]//Bee Genetics and Breeding. New York: Academic Press Inc, 1986:323-241.
- [5] ADAMS J, ROTHMAN E, KERR W, et al. Estimation of the number of sex alleles and queen matings from diploid male frequencies in a population of *apis mellifera* [J]. *Genetics*, 1972, 86 (3): 583-596.
- [6] ABBASS H A. A monogenous MBO approach to satisfiability [C]//Proc of International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation, 2001.
- [7] ABBASS H A. Marriage in honey bees optimization (MBO): a haplometrosis polygynous swarming approach [C]//Proc of Congress on Evolutionary Computation. 2001:207-214.
- [8] BOZORG HADDAD O, AFSHAR A. MBO (marriage bees optimiza-

- tion), a new heuristic approach in hydro systems design and operation [C]//Proc of the 1st International Conference on Managing Rivers in the 21st Century: Issues and Challenges. 2004:499-504.
- [9] AFSHAR A, BOZORG H O, MARIN M A, *et al.* Honeybee mating optimization (HBMO) algorithm for optimal reservoir operation[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2007,344(5):452-462.
- [10] BOZORG H O, AFSHAR A, MARIN M A. Honey-bees mating optimization algorithm (HBMO): a new heuristic approach for engineering optimization[C]//Proc of the 1st International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization. 2005:661-680.
- [11] Von FRISCH K. Bees; their vision, chemical senses and language [M]. Ithaca: Cornell University Press, 1976.
- [12] SEELEY T D. The wisdom of the hive; the social physiology of honey bee colonies[M]. Cambridge: Harvard University Press, 1996.
- [13] CAMAZINE S, DENEUBURG J L, FRANKS N R, *et al.* Self-organization in biological systems [M]. Kayseri: Princeton University Press, 2003.
- [14] KARABOGA D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization, TR06[R]. [S. l.]: Computer Engineering Department, Engineering Faculty, Erciyes University, 2005.
- [15] BASTURK B, KARABOGA D. An artificial bee colony(ABC) algorithm for numeric function optimization [C]//Proc of IEEE Swarm Intelligence Symposium. 2006.
- [16] SCHJELDERUP-EBBE T, HÖSENE S. Bidrag til hösenes psykologi [J]. *Naturen*, 1913, 37(1913):262-276.
- [17] SCHJELDERUP-EBBE T. Beiträge zur sozialpsychologie des haushuns[J]. *Zeitschr. f. Psychologie*, 1922, 88:225-252.
- [18] ALLEE W C. Social dominance and subordination among vertebrates, levels of integration in biological and social systems[J]. *Biological Symposia*, 1942, 8:139-162.
- [19] ALLEE W C. Dominance and hierarchy in sociétés of vertebrates[J]. *Structure et Physiologie des Sociétés Animals*, 1952, 34:157-181.
- [20] GUHL A M. Social stability and social inertia in chickens[J]. *Animal Behaviour*, 1968, 16(2):219-232.
- [21] SCHEIN M W, FOHRMAN M H. Social dominance relationships in a herd of daily cattle [J]. *British Journal of Animal Behaviour*, 1955, 3(2):45-55.
- [22] TYLER S J. The behaviour and social organisation of the new forest ponies[J]. *Animal Behaviour*, 1972, 48(2):223-233.
- [23] PARDI L, RICERCHESUI P. La poliginia iniziale di *Polistes gallicus* (L.) [C]//Boll. 1st. Entom. 1942:1-106.
- [24] PARDI L, RICERCHESUI P. La "dominazione" e il ciclo ovario annuale in *Polistes gallicus* (L.) [C]//Boll. 1st. Entom. 1946:25-84.
- [25] PARDI L. Dominance order in *Polistes* wasps [J]. *Physiological Zoology*, 1948, 21(1):1-13.
- [26] GERVET J. Etudes de l'effet de group sur la ponte dans la sociétés polygyne de *Polistes gallicus* L. [J]. *Insect Societies*, 1962, 9:231-263.
- [27] GERVET J. La ponte et sa regulation dans la sociétés polygyne de *Polistes gallicus* L. Ann [J]. *Sci. Nat. Zoology*, 1964, 6:601-778.
- [28] THERAULAZ G, GERVET J, THON B, *et al.* The dynamics of colony organization in the primitively eusocial wasp *Polistes dominulus* (Christ) [J]. *Ethology*, 1992, 91(3):177-202.
- [29] COLE B J. Dominance hierarchies in *Leptothorax* ants [J]. *Science*, 1981, 212(4490):83-84.
- [30] FRANKS N R, SCOVELL E. Dominance and reproductive success among slave-making worker ants [J]. *Nature*, 1983, 304(1983):724-725.
- [31] BOURKE A F G. Dominance orders, worker reproduction, and queen-worker conflict in the slave-making ant *Harpagoxenus sublaevis* [J]. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 1988, 23(5):323-333.
- [32] OLIVEIRA P S, HÖLLDOBLER B. Dominance orders in the ponerine ant *Pachycondyla apicalis* (Hymenoptera, Formicidae) [J]. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 1990, 27:385-393.
- [33] HEINZE J. Dominance behaviour among ant females [J]. *Naturwissenschaften*, 1990, 77(1):41-43.
- [34] LANDAU H G. On dominance relations and the structure of animal societies: I. effect of inherent characteristics [J]. *Bulletin of Mathematical Biophys*, 1951, 13(1):1-19.
- [35] CHASE I. Models of hierarchy formation in animal societies [J]. *Behavioral Science*, 1974, 19(6):374-382.
- [36] THERAULAZ G, BONABEAU E, DENEUBOURG J L. Self-organization of hierarchies in animal societies: the case of the primitively eusocial wasp *Polistes dominulus christ* [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1995, 174(3):313-323.
- [37] TOFTS C, FRANK N R. Doing the right thing: ants, honeybees and naked mole-rats [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 1992, 7(10):346-349.
- [38] THERAULAZ G, BONABEAU E, DENEUBOURG J L. Response threshold reinforcement and division of labour in insect societies [C]//Proc of the Royal Society of London B. 1998:327-335.
- [39] THERAULAZ G, GOSS S, GERVET J, *et al.* Task differentiation in polistes wasp colonies: a model for self-organizing groups of robots [C]//Proc of the 1st International Conference on Simulation of Adaptive Behavior on From Animals to Animats. Cambridge: MIT Press, 1991:346-355.
- [40] BONABEAU E, SOBKOW S A, THERAULAZ G, *et al.* Adaptive task allocation inspired by a model of division of labor in social insects [C]//Proc of Biocomputing and Emergent Computation. 1997:36-45.
- [41] CICIELLO V A, SMITH S F. Improved routing wasps for distributed factory control [C]//Proc of IJCAI Workshop on AI and Manufacturing: New AI Paradigms and Manufacturing. 2001:26-32.
- [42] 阎志华, 丁秋林. 基于蜂群算法的作业车间调度研究[J]. *机械科学与技术*, 2004, 23(10):1150-1152.
- [43] 李慧贤, 程春田, 庞辽军. 网格环境下的高效动态任务调度算法 [J]. *华南理工大学学报: 自然科学版*, 2006, 34(1):82-86.