

# 蚁群优化算法及其应用

刘乃文<sup>1)</sup> 王奎峰<sup>2)</sup>

(1) 山东师范大学信息科学与工程学院, 250014, 济南; (2) 山东师范大学教务处, 250014, 济南//第一作者 35岁, 男, 讲师)

**摘要** 介绍了蚁群优化理论的产生和发展过程, 重点阐述了蚁群算法的基本原理, 给出了算法的 TSP 问题模型, 讨论了其研究现状和应用现状, 对下一步的研究工作做了展望。

**关键词** 群智能; 蚁群算法; 优化算法

**中图分类号** TP 18

为解决 NP 问题和 NP 难问题, 20 世纪 80 年代产生了现代优化计算方法, 如禁忌搜索算法、模拟退火算法、遗传算法和神经网络算法等。这些算法在解决组合优化问题中取得了实际应用, 并得到了快速的发展和完善。与各种各样的自适应随机搜索算法相比, 演化计算技术创造了被称为“种群”的潜在解, 并通过种群间个体的协作与竞争来实现对问题最优解的搜寻, 这类方法往往能够比传统优化方法具有更快地收敛速度<sup>[1]</sup>。群智能(Swarm Intelligence)作为一种新兴的演化计算技术已成为越来越多研究者的关注焦点, 与进化策略以及遗传算法有着极为特殊的联系。群智能中的群体指的是“一组相互之间可以进行直接通信或者间接通信(通过改变局部环境)的主体(Agent), 这组主体能够合作进行分布式的问题求解”, 而群智能则是指“无智能的主体通过合作表现出智能行为的特性”。群智能在没有集中控制且不提供全局模型的前提下, 为寻找复杂的分布式问题求解方案提供了基础<sup>[2]</sup>。

群智能理论的基本原理源于生物社会系统(Biology Social System), 是由简单个体组成的群落与环境以及个体之间的互动行为。这种生物社会性的模拟系统利用局部信息产生难以估量的群体行为。作为基于迭代的优化方法, 群智能理论是一种全新的进化计算方法, 该理论研究的典型算法有两个: 蚁群算法(Ant Colony Optimization, ACO)和粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)。粒子群算法起源于对简单社会系统的模拟, 最初是模拟鸟群觅食的过程, 但后来发现它是一种很好的优化工具。蚁群是对蚂蚁群落食物采集过程的模拟, 已成功应用于许多离散优化问题, 如 TSP 等。自从 Colomni 和 Dorigo 等意大利学者在 20 世纪 90 年代初提出蚁群优化(Ant Colony Optimization, ACO)算法以来, 这种新型的分布式智能模拟算法已逐渐引起人们的注意并得到了广泛的应用。

## 1 蚁群算法理论

**1.1 算法原理** 如图 1 所示, 蚂蚁从 A 点(蚁巢)出发, 速度相同, 目的地在 D 点(食物), 可能随机选择路线 ABD 或 ACD。假设初始时每条分配路线一只蚂蚁, 每个时间单位行走一步, 图 1 中上图为经过 9 个时间单位时的情形: 走 ABD 的蚂蚁到达终点, 而走 ACD 的蚂蚁刚好走到 C 点, 为一半路程。图 1 中下图为经过 18 个时间单位时的情形: 走 ABD 的蚂蚁到达终点后得到食物又返回了起点 A, 而走 ACD 的蚂蚁刚好走到 D 点。

假设蚂蚁每经过一处所留下的信息素为一个单位, 则经过 36 个时间单位后, 所有开始一起出发的蚂蚁都经过不同路径从 D 点取得了食物, 此时 ABD 的路线往返了 2 趟, 每一处的信息素为 4 个单位, 而 ACD 的路线往返了一趟, 每一处的信息素为 2 个单位, 其比值为 2:1。寻找食物的过程继续进行, 则按信息素的指导, 蚁群在 ABD 路线上增派一只蚂蚁(共 2 只), 而 ACD 路线上仍然为一只蚂蚁。再经过 36 个时间单位后, 两条线路上的信息素单位积累为 12 和 4, 比值为 3:1。若按以上规则继续, 蚁群在 ABD 路线上再增派一只蚂蚁(共 3 只), 而 ACD 路线上仍然为一只蚂蚁。再经过 36 个时间单位后, 两条线路上的信息素单位积累为 24 和 6, 比值为 4:1。若继续进行, 则按信息素的指导, 最终所有的蚂蚁会放弃 ACD 路线, 而都选择 ABD 路线。这就是蚁群的自催化效应。

**1.2 算法用于 TSP 问题的数学模型** 蚁群算法的提出借鉴和吸收了现实世界中蚂蚁种群的行为特征<sup>[5]</sup>。和遗传算法一样, 蚁群算法是一种通用型随机优化方法, 不需要任何先验知识, 开始只是随机地选择搜索路径, 随着对解空间的“认识”, 随机搜索过程逐渐变得有规律, 并逐渐收敛直至最后获得全局最优。蚁群算法对搜索空间的“认识”机制主要包括三个方面:

1) 记忆。一只蚂蚁搜索过的路径在下次搜索时就不会再被选择, 由此在蚁群算法中建立禁忌列表来进行模拟, 以此来避免

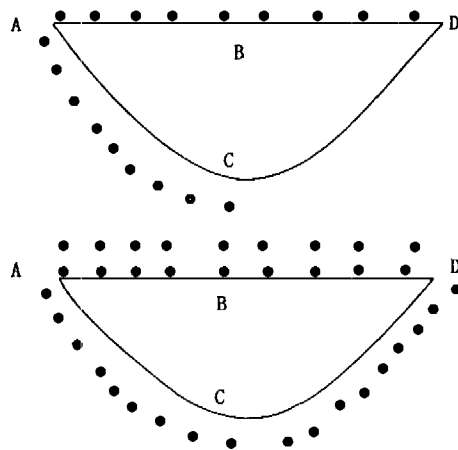


图1 蚁群原理图

过快收敛到局部最优;

2) 间接通信.蚂蚁在所经过的路径上释放信息素,其他蚂蚁进行路径选择时,在信息素的指导下进行,信息素是蚂蚁之间进行通讯的媒介.

3) 集群活动.一只蚂蚁的活动可能很难到达食物所在地,但整个蚁群进行搜索则完全不同.如果从蚁巢到食物源的某条路径为最优路径时,该路径的运载能力高于其他路径,从而该路径上的信息素数量越来越多,强度增大,因此蚂蚁选择该路径的概率随之增加,继而进一步增加该路径的信息素强度,反之其他路径的信息素就会随时间挥发,最终被蚁群“遗忘”.

基于原理部分所讨论的蚁群寻找食物时的最优路径选择问题,可以构造人工蚁群来解决离散最优化问题,如 TSP 问题.人工蚁群中把具有简单功能的工作单元看作蚂蚁.二者的相似之处在于都是优先选择信息素浓度大的路径.较短路径的信息素浓度高,所以能够最终被所有蚂蚁选择,也就是最终的优化结果.

TSP 问题表示为一个  $N$  个城市的有向图  $G = (N, A)$ , 其中  $N = \{1, 2, \dots, n\}$   $A = \{(i, j) | i, j \in N\}$ , 城市之间的距离表示为:  $(d_{ij})_{n \times n}$ , 目标函数为:  $f(w) = \sum_{i=1}^n d_{i, i_{i+1}}$ , 其中  $w = (i_1, i_2, \dots, i_n)$  为城市  $1, 2, \dots, n$  的一个排列, 并且  $i_{n+1} = i_1$ .

TSP 问题的蚁群算法中, 假设  $m$  只蚂蚁在图的相邻节点间移动, 从而协作异步地得到问题的解. 每只蚂蚁的一步转移概率由图中的每条边上的两类参数决定: 1) 信息素值 也称信息素痕迹. 2) 可见度, 即先验值. 信息素的更新方式有 2 种, 一是挥发, 也就是所有路径上的信息素以一定的比率进行减少, 模拟自然蚁群的信息素随时间挥发的过程; 二是增强, 给评价值“好”(有蚂蚁走过)的边增加信息素. 蚂蚁向下一个目标的运动是通过一个随机原则来实现的, 也就是运用当前所在节点存储的信息, 计算出下一步可达节点的概率, 并按此概率实现一步移动, 逐此往复, 越来越接近最优解.

## 2 蚁群算法研究和应用现状

2.1 蚁群算法研究现状 90 年代初期意大利学者 Dorigo 最早提出了蚁群优化算法——蚂蚁系统 (Ant System, AS) 并将其应用于解决计算机算法学中经典的旅行商问题 (TSP). 从蚂蚁系统开始, 基本的蚁群算法得到了不断的发展和完善, 并在 TSP 以及许多实际优化问题求解中进一步得到了验证. 这些改进的 AS 算法都是增强了蚂蚁搜索过程中对最优解的搜寻能力, 只是搜索控制策略有所不同. 最初提出的 AS 有三种版本: 蚁密算法 (Ant-density)、蚁量算法 (Ant-quantity) 和蚁环算法 (Ant-cycle). 前两种算法中蚂蚁在两个位置节点间每移动一次后即更新信息素, 而在蚁环算法当所有的蚂蚁都完成了自己的行程后才对信息素进行更新, 而且每个蚂蚁所释放的信息素被表达为反映相应行程质量的函数. 与其它各种通用的启发式算法相比, 在不超过 75 城市的 TSP 中, 这三种基本算法的求解能力还是比较理想的, 但是当问题规模扩展时, AS 的解题能力大幅度下降.

以后的 ACO 研究工作主要都集中于 AS 性能的改进方面. 如精英策略 (Elitist Strategy), 其思想是在算法开始后即对所有已发现的最好路径给予额外的增强, 并将随后与之对应的行程记为全局最优行程, 当进行信息素更新时, 对这些行程予以加权, 同时将经过这些行程的蚂蚁记为“精英”, 从而增大较好行程的选择机会. 这种改进型算法能够以更快的速度获得更好的解. 但是若选择的精英过多, 则算法会由于较早的收敛于局部次优解而导致搜索的过早停滞.

在对 AS 进行直接完善的方法中, MAX-MIN Ant System 是一个典型代表. 该算法修改了 AS 的信息素更新方式, 每次迭代之后只有一只蚂蚁能够进行信息素的更新以获取更好的解. 为了避免搜索停滞, 路径上的信息素浓度被限制在  $[MAX, MIN]$  范围内, 另外, 信息素的初始值被设为其取值上限, 这样有助于增加算法初始阶段的搜索能力. 另一种对 AS 改进的算法是 Rank-based Version AS. 与“精英策略”相似, 在此算法中总是更新更好路径上的信息素. 这种算法求解 TSP 的能力与 AS、精英策略 AS、遗传算法和模拟退火算法进行了比较. 在大型 TSP 问题中 (最多包含 132 座城市), 基于 AS 的算法都显示出了优于 GA 和 SA 的特性. 而且在 Rank-based AS 和精英策略 AS 均优于基本 AS 的同时, 前者还获得了比精英策略 AS 更好的解.

2.2 蚁群算法应用现状 随着群智能理论和应用算法研究的不断发展, 蚁群算法在离散求解空间问题中表现出良好的搜索效果. 蚁群优化算法并不是旅行商问题的最佳解决方法, 但是它却为解决组合优化问题提供了新思路, 并很快被应用到其它组合优化问题中. 比较典型的应用研究包括: 网络路由优化、数据挖掘以及一些经典的组合优化问题. 蚁群算法在电信路由优化中已取得了一定的应用成果. HP 公司和英国电信公司设计了蚁群路由算法 (Ant Colony Routing, ACR). 该算法中, 每只蚂蚁就像蚁群优化算法中一样, 根据它在网络上的经验与性能, 动态更新路由表项. 如果一只蚂蚁因为经过了网络中堵塞的路由而导致了比较大的延迟, 那么就对该表项做较大的增强. 同时根据信息素挥发机制实现系统的信息更新, 从而抛弃过期的路由信息. 这样, 在当前最优路由出现拥堵现象时, ACR 算法就能迅速的搜寻另一条可替代的最优路径, 从而提高网络的均衡性、负荷量和利用率. 目前这方面的应用研究仍在升温, 因为通信网络的分布式信息结构、非稳定随机动态特性以及网络状态的异步演化与 ACO 的算法本质和特性非常相似.

ACO 还在许多经典组合优化问题中获得了成功的应用, 如二次规划问题 (QAP)、机器人路径规划、作业流程规划、图着色 (Graph Coloring) 等问题. 部分研究者将 ACO 用于了武器攻击目标分配和优化问题、车辆运行路径规划、区域性无线电频率自动分配、Bayesian networks 的训练和集合覆盖等应用优化问题. Costa 和 Herz 还提出了一种 AS 在规划问题方面的扩展应用——图着色问题, 并取得了可与其他启发式算法相比的效果<sup>[1]</sup>.

### 3 研究展望

蚁群算法凭借其简单的算法结构和突出的问题求解能力,以及灵活、稳定、分布式控制和自组织能力等特点,吸引了很多研究者,并取得了令人瞩目的成果.该理论很适合于工程问题中日益复杂的信息处理需求,尤其是动态特性突出的问题.

然而,由于其理论依据来源于对生物群落社会性的模拟,因此其相关数学分析还比较薄弱,这就导致了现有研究还存在以下几个主要问题:

1) 蚁群算法的数学理论基础薄弱,缺乏普遍意义的理论性分析.算法中涉及的参数设置没有确切的理论依据,一般按照经验确定,对具体问题的依赖性大.

2) 比较性研究不足,与各种成熟的优化算法之间的基本特性及性能特点的对比研究还不是十分充分.

将来的研究工作应加强算法特性的分析,进一步明确与算法原理相关的重要意义,如:单个个体的复杂性、学习能力和推理能力等.还应扩展蚁群算法与其神经网络、禁忌搜索和支持向量机等先进技术的融合,以改善其自身的性能.

作为一种新型的模拟进化算法,蚁群算法研究时间较短,不像其他启发式算法那样具有系统的分析方法和坚实的数学理论.挥发因子等参数的选择基本是依靠实验和经验,目前尚无通用及确定的理论方法来确定,因此理论和实践方面尚有许多问题需要更深入的研究与探讨.但是该算法的并行特性和强鲁棒性等优点吸引着许多学者不断对其进行深入研究.随着理论研究和实践经验的积累,蚁群算法必将成为求解复杂组合优化问题的高效算法.

### 4 参考文献

- [1] 彭喜元,彭宇,戴毓丰.群智能理论及应用[J].电子学报,2004,21(8):247~250
- [2] 吴斌,傅伟鹏,郑毅,等.一种基于群体智能的Web文档聚类算法[J].计算机研究与发展,2002,39(11):1429~1435
- [3] Dorigo M, Gambardella L M. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997, 1(1):53~66
- [4] Eric Bonabeau, Marco Dorigo, Guy Theraulaz. Swarm intelligence: from natural to artificial systems[M]. London: Oxford University Press, 1999. 271~273
- [5] 张航,罗熊.蚁群优化算法的研究现状及研究展望[J].信息与控制,2004,33(3):318~324
- [6] 丁海军,陈佑健.蚁群算法的现状与研究进展[J].河南大学常州分校学报,2005,19(1):5~9
- [7] 丁建立,陈增强.遗传算法与蚁群算法的融合[J].计算机研究与发展,2003,40(9):1351~1356
- [8] 杨玉凤,刘弘.协同设计中的通信支持技术[J].山东师范大学学报(自然科学版),2005,20(1):18~20

## ANT COLONY OPTIMIZATION AND APPLICATION

Liu Naiwen<sup>1)</sup> Wang Kuifeng<sup>2)</sup>

(1) School of Information Science and Engineering, Shandong Normal University, 250014, Jinan, China;

2) Teaching Affairs Office of Shandong Normal University, 250014, Jinan, China )

**Abstract** A survey of the origin and development of ant colony optimization is presented and a TSP model of ant colony optimization is illustrated. The basic principles and the - state - of - art of researches and applications of the algorithms are discussed. A prospect on the research work is given.

**Key words** swarm intelligence; ant colony optimization; optimization algorithm