

蚁群算法综述

任伟建¹, 陈建玲¹, 韩冬², 王凤好³

(1. 大庆石油学院 电气信息工程学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 大庆油田创业集团 腾飞建筑工程有限公司, 黑龙江 大庆 163000; 3. 大庆石油管理局 电力集团燃机电厂, 黑龙江 大庆 163000)

摘要: 作为一种新型的智能优化方法, 蚁群算法采用分布式并行运算机制, 易于与其他算法相结合, 具有很强的鲁棒性和适应性, 但存在搜索时间长、易陷入局部最优解的缺点。对此, 首先介绍了蚁群算法的产生和寻优过程; 然后综述了蚁群算法的发展状况、存在的问题以及对其若干改进及在优化问题中的应用; 最后对蚁群算法的发展方向进行了展望。

关键词: 蚁群算法; 信息素; 正反馈; 优化

Survey of ant colony algorithm

REN Wei-jian¹, CHEN Jian-ling¹, HAN Dong², WANG Feng-yu³

(1. Daqing Petroleum Institute, Faculty of Electric and Information Engineering, Daqing 163318, China; 2. Tengfei Construction Project Ltd, CNPC Daqing Petroleum Founders Corporation, Daqing 163000, China; 3. Fuel Enginery Power Plant, CNPC Daqing Petroleum Power Corporation, Daqing 163000, China. Correspondent: CHEN Jian-ling, E-mail: chenjianling2004@163.com)

Abstract: As a kind of new type intelligent optimization method, ant colony algorithm adopts the mechanism of distributed parallel calculation. It can be combined with other algorithms easily, and has the advantages of strong robustness and adaptability. But it has the disadvantages of long time search and easily getting into local best solutions. Therefore, the basic principle and the process of the optimization of ant colony algorithm are introduced. The current development status, existing problems, some improvements of ant colony algorithm and its application in optimization problems are reviewed. Finally, the developing direction of ant colony algorithm is viewed.

Key words: Ant colony algorithm; Pheromone; Positive feedback; Optimization

1 引言

受自然界中真实蚁群集体行为的启发, 意大利学者 Dorigo 于 1991 年首次系统地提出了一种基于蚂蚁种群的新型优化算法——蚁群算法(ACO), 并成功地用于求解旅行商(TSP)问题。自 1996 年之后的 5 年时间里, 蚁群算法逐渐引起了世界各国学者的关注, 在应用领域得到了迅速拓宽。我国最早研究蚁群算法的是东北大学张纪会博士和徐心和教授。

目前人们对蚁群算法的研究已由当初单一的 TSP 领域渗透到了多个应用领域; 由解决一维静态优化问题发展到解决多维动态组合优化问题; 由离散域范围内研究逐渐拓展到连续域范围内的研究, 使这种新兴的仿生优化算法展现出勃勃生机, 并已成为可与遗传算法相媲美的仿生优化算法。

本文首先介绍了蚁群算法的基本原理, 然后讨论了蚁群优化算法的发展及应用状况, 最后对该算法存在的问题和前景作了展望。

2 蚁群算法的基本原理

蚂蚁在运动过程中, 在它所经过的路径上留下信息素, 并感知信息素的存在及其强度, 朝着强度高的方向移动。因此, 由大量蚂蚁组成的蚁群集体行为表现出一种信息正反馈现象。某一路径上走过的蚂蚁越多, 后来的蚂蚁选择该路径的概率就越大。蚂蚁个体之间就是通过这种信息的交流进行路径的最优选择, 从而达到搜索食物的目的。下面举例说明蚂蚁的搜索机制。

如图 1 所示, 假设在 $t = 0$ 时刻有 16 只蚂蚁从巢穴出发外出寻食(设蚂蚁在单位时间走过单位长

基金项目: 黑龙江省自然基金项目(TF2005-26)。

作者简介: 任伟建(1963—), 女, 黑龙江泰来人, 教授, 博士, 从事进化算法、智能控制等研究。

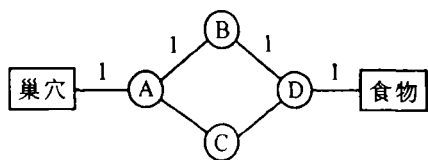


图1 蚂蚁的搜索机制

度). 在 $t = 1$ 时到达 A 点, 因为此时 AB 和 AC 都没有信息激素, 所以蚂蚁按等概率选择, 8 只选择 AB, 另 8 只选择 AC. 在 $t = 4$ 时, 从 AB 走的 8 只到达食物处, 并开始返回. 在 $t = 5$ 时, 返回的蚂蚁到达 D, 这时 BD 和 CD 上的信息素浓度还相等, 都为 8, 所以蚂蚁还按等概率选择, 4 只选择 BD, 另 4 只选择 CD. 在 $t = 8$ 时, 从 BD 返回的 4 只蚂蚁返回巢穴, 并重新外出. 当 $t = 9$ 时, 又来到 A, 此时 AB 的信息激素的浓度是 16, 而 CA 的是 12, 所以将有较多的蚂蚁选择从 AB 走. 以后, 如此循环, 最后所有的蚂蚁都会选择 ABD 路线.

以 TSP 问题为例, 给出蚁群算法的流程如图 2 所示.

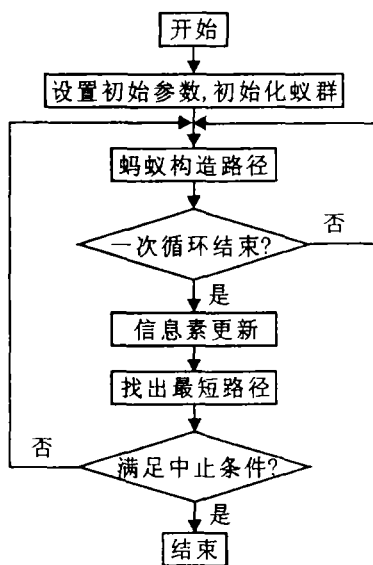


图2 用于 TSP 问题的蚁群系统流程图

每只蚂蚁应用一个状态转移规则来建立一个问题的解决方案, 直到所有蚂蚁都建立了完整的解决方案. 完成一次循环后, 各路径进行信息量调整, 存储所找到的最短路径, 直到满足条件为止. 其中: 状态转移规则为

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{k \in \{\text{允许}k\}} [\tau_{ik}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ik}]^\beta}, & j \in \{\text{允许}k\}; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (1)$$

$\text{tabu}_k (k = 1, 2, \dots, m)$ 用以记录蚂蚁 k 当前走过的城市称为记忆列表, 其中允许 $k = \{n - \text{tabu}_k\}$,

集合 tabu_k 随着进化过程动态调整. η_{ij} 为先验知识能见度在 TSP 问题中为城市转移到城市的启发信息, 一般取 $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$. α 为路径上 ij 残留信息的重要程度, β 为启发信息的重要程度.

信息素更新规则采用如下公式:

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t, t+1), \quad (2)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t, t+1) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t, t+1), \quad (3)$$

$$\Delta\tau_{ij}^k(t, t+n) = \begin{cases} Q/L_k, & \text{如果蚂蚁 } k \text{ 在本次} \\ & \text{循环中经过路径}(i, j); \\ 0, & \text{否则.} \end{cases} \quad (4)$$

其中: L_k 为第 k 只蚂蚁在本次循环中所走的路径长度, Q 是信息素强度. $\Delta\tau_{ij}^k(t, t+1)$ 表示第 k 只蚂蚁在时刻 $(t, t+1)$ 留在路径 (i, j) 上的信息素量, $\Delta\tau_{ij}(t, t+1)$ 表示本次循环中路径 (i, j) 的信息素的增量; $(1-\rho)$ 为信息素轨迹的衰减系数, $\rho \in (0, 1)$.

根据具体算法的不同, $\Delta\tau_{ij}$, $\Delta\tau_{ij}^k$ 及 $P_{ij}^k(t)$ 的表达形式可以不同. Dorigo 曾给出 3 种不同模型^[1], 分别称为蚁周系统、蚁量系统和蚁密系统^[2]. 在蚁密系统和蚁量系统中, 蚂蚁在建立方案的同时释放信息素, 利用的是局部信息; 而蚁周系统是在蚂蚁已经建立了完整的轨迹后再释放信息素, 利用的是整体信息. 在一系列标准测试问题上运行的实验表明, 蚁周算法的性能优于其他两种算法.

3 蚁群算法的研究现状

3.1 用于离散优化问题的算法

虽然传统的蚁群算法具有很强的全局寻优解的能力, 但也存在一些缺陷, 例如: 该算法的搜索时间过长, 大部分计算时间被用于解的构造; 在执行过程中容易出现停滞现象, 当问题规模较大时存在陷入局部最优的可能性等. 因此, 研究者对传统的蚁群算法进行了很多改进研究.

为了克服算法停滞现象, Thomas Stutzle 等^[3]提出了 MAX-MIN 蚁群系统, 限制了残留信息量 τ 在一定范围 $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ 内, 避免某条路径的信息量远大于其他路径, 使蚂蚁过于集中. 在每次循环之后, 只对最好路径的信息素进行更新, 避免了早熟现象. 将信息素初始化为 $\tau_{\max}$, 可使蚂蚁在算法的初始阶段能够更多地搜索新的解决方案, 现在最大最小蚂蚁系统 (MMAS) 仍是解决 TSP 和 QAP 等离散优化问题的较好模型之一.

为解决计算时间较长这一缺点, 吴庆洪等^[4]提出了具有变异特征的蚁群算法, 在基本算法中引入

了逆转变异机制,充分利用了2-交换法简洁高效的特点,使得该方法具有较快的收敛速度。同时选择TSP为例进行实现,经过较少的代数就得到了较好解,大大节省了计算时间。

针对传统蚁群算法容易出现早熟和停滞,许多文献提出了各种不同的更新信息量的策略,但它们主要采用固定信息量增减的比例来进行信息量的更新,而忽视了解的分布特征。李开荣等^[5]提出了一种动态自适应蚁群算法,该算法对传统的MMAS算法中的信息素进行自适应调整,分别在 $\tau > \tau_{\max}$ 和 $\tau < \tau_{\min}$ 时采用不同的信息素更新公式,在公式中引入与收敛次数成正比的函数,根据解的分布情况自适应地进行信息量更新,从而动态地调整各路径上的信息量强度,使蚂蚁既不过分集中也不过分分散,避免了早熟和局部收敛,提高了全局搜索能力。通过对TSP问题仿真实验看出,算法具有比MMAS和传统蚁群算法更好的稳定性和收敛性。

丁建立等^[6]将简单遗传算法和最大最小蚂蚁算法相结合,提出了GAAA(genetic algorithm-ant algorithm)算法。Cheng等^[7]将简单遗传算法(SGA)和蚂蚁网(AntNet)算法结合,提出蚂蚁路径算法并用于网络路径规划中。但上述算法都是将简单遗传算法和蚁群优化算法相结合,SGA在进化代数不够大时容易陷入局部最优,且在初始种群选取覆盖空间不足的情况下种群多样性差。陈云飞等^[8]提出了广义分配问题的一种小生境遗传蚁群优化算法,结合了小生境遗传算法,避免了算法易陷入局部最优的缺陷,并以火力分配问题为例进行实验,结果表明该算法优化效率高,运行时间短,同样对其他的NP问题适用。

人工免疫算法(AIA)具有比遗传算法更好的自适应能力,同时具有记忆功能,因此将蚁群算法(ACA)与免疫算法结合具有更好的寻优能力。胡纯德等^[9]提出了基于人工免疫算法和蚁群算法来求解旅行商问题,算法前过程采用AIA,充分利用AIA的快速性、随机性、全局收敛性,寻找较优的可行解;算法后过程采用蚁群算法(ACA),利用前过程中AIA获得的较优可行解,产生初始信息素分布,然后充分利用AIA的并行性和正反馈性提高求解效率。结果表明这是一种寻优能力较好的算法。钟一文等^[10]提出一种免疫蚁群算法解决有约束关系的多任务调度问题。算法中使用免疫机理来保持蚁群的多样性。研究结果表明,该算法比其他调度算法能够获得更好的调度结果。

另外,陈知美等^[11]应用改进型蚁群算法解决车间作业调度问题。通过区分Job Shop问题中蚂蚁的出发点,采用了新的状态转移规则。采用6种不同轨迹更新规则,得到了多种改进的蚁群算法。王琨等^[12]采用蚁群优化算法求解机组最优启停问题。刘云忠等^[13]利用一种动态蚁群算法解决带时间窗车辆路径问题。李果等^[14]提出一种基于改进的蚁群算法的解决策略,并将其应用于移动机器人路径规划问题。Ryan等^[15]利用蚁群算法较好地解决了光纤网络中的波分复用动态拓扑最优传输规划问题。

此外,蚁群算法还在数据挖掘^[16]、参数辨识^[17]、图像处理^[18]、图形着色^[19]、分析化学^[20]以及岩石力学^[21]等领域得到了很大进展。

3.2 用于连续优化问题的算法

在连续空间的寻优问题求解中,解空间是以区域性方式表示,而不是以离散空间优化问题中离散的点状分布表示。通过将传统蚁群算法中的“信息量留存”过程拓展为连续空间中的“信息量分布函数”可实现对多极值函数和非线性连续函数的求解^[22,23]。

熊伟清等^[24]提出一种求解函数优化的混和蚁群算法,算法将遗传算法与蚁群算法中的协同模型进行有机结合,在蚁群算法中引入交叉、变异、选择算子来改进基本蚁群算法,克服了蚁群算法不太适合求解连续空间优化问题的缺陷,实例的仿真实验结果充分说明该算法是实用而有效的。Isaacs等^[25]将遗传算法和蚂蚁算法相结合,提出一种嵌入式硬件随机数据发生器设计的新思路,但仅限于仿真,并没在硬件上给予实现。

程志刚等^[26]提出了基于信息正态分布的连续蚁群优化系统,以正态分布模拟信息素的密度分布,并以此进行随机数抽样,构成蚁群的状态转移规则,系统随着蚂蚁的移动调整分布函数实施信息素更新,蚁群在信息素的引导下逐步向最优路径聚集。系统还引入了优选策略和变异策略。优选策略是指在随机中引入确定性操作;提高局部搜优效率,引入模式搜索法^[27];变异策略可保持群体多样性,改善全局搜索性能。二者结合可提高蚁群的寻优能力。经多种经典函数的测试表明,该算法适用于连续函数优化问题,性能良好,对于维数较高和搜索空间较广的问题更具优势,算法的参数少,设置简单,实用性较强。

为进一步提高蚁群算法的效率,高玮等^[28]将免疫机理引入连续蚁群算法,提出了免疫连续蚁群算

法,并将算法应用到岩土工程反分析中,通过简单的算例验证了算法的有效性及其卓越的计算效率.算法思路是在内循环中,当蚁群个体概率移动完成后,对每个个体进行以优化程度为标准的自适应变异操作,变异完成后再进行群体的选择操作.为使选择效果提高,这里采用基于浓度的免疫选择操作.这样改进后的算法可使蚂蚁个体进行有目的地移动和变化,从而保证了算法的优化搜索性能.

为抑制原有蚁群算法在优化过程中出现的运算时间长、容易停滞的现象,任伟建^[29]将免疫思想和遗传思想与蚁群算法相结合,提出一种基于免疫机制的蚁群遗传算法,该算法的核心在于在信息素和适应度的基础上,增加了抗体(即蚂蚁个体)的浓度,使其对蚂蚁的转移概率起作用,并且进行传统遗传算法的交叉和变异操作,并将搜索空间划分为若干子空间,来提高抗体的适应度和防止群体的退化,从而减轻原有算法后期的波动、停滞现象,提高了收敛速度.通过对多个非线性函数寻优验证了该算法具有较好的寻优能力.

将蚁群算法和神经网络相结合是对蚁群算法理论发展的一个新的尝试^[30],用蚁群算法训练神经网络,可兼有神经网络广泛映射能力和蚁群算法快速全局收敛的性能.张国立等^[31]尝试将蚁群算法用于3层前向神经网络的训练过程,建立了相应的优化模型,进行实际的编程计算,给出两个函数 $\cos(x)$ 和 $\sin(x)$ 的实验结果,并与加动量项的BP算法、演化算法以及模拟退火法进行比较,结果表明该方法具有更好的全局收敛性.

王德智等^[32]将一种改进的连续蚁群算法成功用于供水水库的优化调度中,该算法在随机搜索过程中嵌入确定性搜索,以改善寻优性能,增加经验指导,从而加速收敛.结果表明,该算法具有并行化和较强的全局寻优能力,为解决水库优化调度问题提供了一条行之有效的途径.

贺益君等^[33]针对经典蚁群算法只适用于离散优化问题的不足,从蚂蚁觅食的生物学行为出发,以寻觅最优食物源为目标,运用蚁群的海量募集和成群募集两种机制(海量募集操作是根据群体信息选择蚂蚁移动方向;成群募集操作只由头蚁执行,它引领较差的个体向当前种群的最优食物源移动),并结合蚂蚁的厌食现象,构建了适用于连续问题的蚁群优化系统(MG-CACO).经典函数的测试表明, MG-CACO 的全局寻优效率高,稳定性好,尤其对高维问题的适应性强.将 MG-CACO 用于二甲苯异构

化装置的操作条件优化,效果令人满意,其全局寻优性能和稳定性优于其他方法.

詹士昌等^[34]在借鉴文献^[35]基本思想的基础上,改进了蚁群算法的搜索策略,该策略能提高搜索过程的效率以及搜索状态的多样性和随机性,为蚁群算法应用于实际优化问题提供了一条可行途径.数值算例结果表明,该搜索策略能较好地找到近似全局最优解,是一种有效的近似方法.

目前为止,关于蚁群算法的收敛性证明并不太多,Thomas^[36]及孙焘^[37]等对蚁群算法的全局收敛性进行了初步讨论,该算法收敛性的理论研究将成为算法研究的重要内容.

4 蚁群优化算法的展望

虽然蚁群优化算法的研究刚刚起步,但在众多领域中已展现出它的特点和魅力.这些初步研究已显示了蚁群优化算法在求解复杂优化问题方面的优越性,证明它是一种很有发展前景的方法.而算法在某些方面仍存在问题并有待解决.

1) 蚁群优化算法是一种概率算法,从数学上对它们的正确性与可靠性的证明还比较困难,而且在解决问题时,算法系统的高层次的行为需要通过低层次蚂蚁之间的行为交互涌现产生,这是蚁群算法乃至群集智能中一个极为困难的问题.因此,要加强对算法的基础理论的研究,鲁棒性分析以及算法中诸如 α, β, ρ 等参数的设计理论.目前有关合理选择蚂蚁数量以及算法运行时间数学分析的概述仍很少.

2) 进一步提高算法的收敛速度,虽然蚁群算法经过优化后收敛速度得到了一定的提高,但对于高组合优化问题并不很理想.算法的并行性为提高算法的收敛性提供了可能性,尽管不少学者在算法的并行方面做了不少工作,但比起其他算法如遗传算法还是远远不够的.

3) 蚁群算法有易于与其他算法相结合的特点,因此可将蚁群算法与其他类型方法综合使用以开发混和优化算法,进而发展思想更先进、功能更强大、解决更复杂系统的智能行为.文献^[17,8,9]已做了很好的尝试,将蚁群算法与神经网络、遗传算法、人工免疫算法等相融合.基于蚁群算法的混和算法必将成为今后蚁群算法领域内新的研究热点.

4) 对算法的收敛性进行进一步的理论研究.

5) 尽管蚁群算法在众多领域得到了推广应用,但其中大多仅仅是对蚁群算法在该领域应用的一个简单的仿真实验和思想的引入.因此,今后应充分挖

掘蚁群算法在实际应用中的潜力,在对现有应用的领域进行深化研究的同时,进一步扩大其应用范围。此外,蚁群算法的硬件实现也将成为今后研究的热点。

对以上问题的研究必将大大促进蚁群算法的理论和应用的发展,蚁群算法也必将在智能设计领域有更大的发展前景。

参考文献(References)

- [1] Dorigo M, Maniezzo V, Colonna A. The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents [J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, Part B, 1996, 26(1): 29-41.
- [2] Bullnheimer B, Hard R F, Strauss C. Applying the ant system to the vehicle routing problem / meta-heuristics: Advances and trends in local search paradigms for optimization[M]. Boston, 1998: 109-120.
- [3] Stutzle T, Hoos H. Improvements on the ant system: Introducing MAX-MIN ant system[C]. Proc of the Int Conf on Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms. Wien: Springer-Verlag, 1997: 245-249.
- [4] 吴庆洪, 张纪会, 徐心和. 具有变异特征的蚁群算法[J]. 计算机研究与发展, 1999, 36(10): 1240-1245.
(Wu Qing-hong, Zhang Ji-hui, Xu Xin-he. An ant colony algorithm with mutation features [J]. J of Computer Research and Development, 1999, 36(10): 1240-1245.)
- [5] 李开荣, 陈宏建, 陈峻. 一种动态自适应蚁群算法[J]. 计算机工程与应用, 2004, 29(2): 152-155.
(Li Kai-rong, Chen Hong-jian, Chen Ling. A dynamic and adaptive ant algorithm [J]. Computer Engineering and Applications, 2004, 29(2): 152-155.)
- [6] 丁建立, 陈增强, 袁著祉. 遗传算法与蚂蚁算法的融合[J]. 计算机研究与发展, 2003, 40(9): 1531-1536.
(Ding Jian-li, Chen Zeng-qiang, Yuan Zhu-zhi. On the combination of genetic algorithm and ant algorithm [J]. J of Computer Research and Development, 2003, 40(9): 1531-1536.)
- [7] Cheng X, Hou Y B. A study of genetic ant routing algorithm [EB/OL]. <http://ieeexplore.ieee.org/xplore/toclogin.jsp?url=2003-11-05/2004-03-16>.
- [8] 陈云飞, 刘玉树, 范洁, 等. 广义分配问题的一种小生境遗传蚁群优化算法[J]. 北京理工大学学报, 2005, 25(6): 490-494.
(Chen Yun-fei, Liu Yu-shi, Fan Jie, et al. A niching genetic and ant colony optimization algorithm for generalized assignment problem [J]. J of Beijing Institute of Technology, 2005, 25(6): 490-494.)
- [9] 胡纯德, 祝延军, 高随祥. 基于人工免疫算法和蚁群算法求解旅行商问题[J]. 计算机工程与应用, 2004, 34(1): 63-66.
(Hu Chun-de, Zhu Yan-jun, Gao Sui-xiang. A hybrid algorithm based on artificial immune algorithm and ant colony algorithm for solving traveling salesman problem [J]. Computer Engineering and Applications, 2004, 34(1): 63-66.)
- [10] 钟一文, 杨建刚. 求解多任务调度问题的免疫蚁群算法[J]. 模式识别与人工智能, 2006, 19(1): 73-78.
(Zhong Yi-wen, Yang Jian-gang. The immune ant colony algorithm solving the problem of multi-task scheduling [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2006, 19(1): 73-78.)
- [11] 陈知美, 顾幸生. 改进型蚁群算法在 Job Shop 问题中的应用[J]. 华东理工大学学报, 2006, 32(4): 486-470.
(Chen Zhi-mei, Gu Xing-sheng. Application of improved ant colony system to job shop scheduling problem [J]. J of East China University of Science and Technology, 2006, 32(4): 486-470.)
- [12] 王琨, 刘青松. 蚁群算法在电力系统机组优化组合中的应用研究[J]. 电力学报, 2005, 20(2): 112-115.
(Wang Kun, Liu Qing-song. A study on the application of colony algorithm to optimal generating unit commitment of power system [J]. J of Electric Power, 2005, 20(2): 112-115.)
- [13] 刘云忠, 宣慧玉. 动态蚁群算法在带时间窗车辆路径问题中的应用[J]. 中国工程科学, 2005, 7(12): 35-40.
(Liu Yun-zhong, Xuan Hui-yu. Application research on vehicle routing problem with time windows based on dynamic ant algorithm [J]. Engineering Science, 2005, 7(12): 35-40.)
- [14] 李果, 刘少军. 基于改进蚁群算法的机器人路径规划[J]. 控制工程, 2005, 12(5): 473-485.
(Li Guo, Liu Shao-jun. Path planning of mobile robot based on improved ant colony algorithm [J]. Control Engineering of China, 2005, 12(5): 473-485.)
- [15] Ryan M G, Richard S B. Dynamic wavelength routing in WDM networks via ant colony optimization [C]. Proc of 3rd Int Workshop ANTS. Brussels, 2002: 250-255.
- [16] Tsai C F, Wu H C, Tsai C W. A new data clustering approach for data mining in large databases [C]. Proc of the Int Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks. Makati, 2002: 315-321.
- [17] Abbaspour K C, Schulin R, Genuchten M T V. Estimating unsaturated soil hydraulic parameters using ant colony optimization [J]. Advance in Water Resources, 2001, 24(8): 827-841.

- [18] Salima Q, Mohamed B, Catherine G. Ant colony system for image segmentation using Markov random field[C]. Proc of 3rd Int Workshop ANTS. Brussels, 2002: 294-295.
- [19] Costa D, Hertz A. Ants can colour graphs[J]. J of the Operational Research Society, 1997, 48(3): 295-305.
- [20] Ding Y P, Wu Q S, Su Q D. Ant colony algorithm and optimization of test conditions in analytical chemistry [J]. Chinese J of Chemistry, 2003, 21(6): 607-609.
- [21] 王成华, 夏绪勇, 李广信. 基于应力场的土坡临界滑动面的蚂蚁算法搜索技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 813-819.
(Wang Cheng-hua, Xia Xu-yong, Li Guang-xin. Ant algorithm in search of the critical slip surface in soil slopes based on stress fields[J]. Chinese J of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5): 813-819.)
- [22] 汪镭, 吴启迪. 蚁群算法在连续空间寻优问题求解的应用[J]. 控制与决策, 2003, 18(1): 45-48.
(Wang Lei, Wu Qi-di. Ant system algorithm in continuous space optimization [J]. Control and Decision, 2003, 18(1): 45-48.)
- [23] Wang L, Wang X P, Wu Q D. Ant system algorithm based rosenbrock function optimization in multi-dimension space [C]. Proc of the 1st Int Conf on Machine Learning and Cybernetics. Beijing, 2002: 710-714.
- [24] 熊伟清, 陈烽, 魏平. 一种求解函数优化的混合蚁群算法[J]. 计算机应用研究, 2005, 7: 51-53.
(Xiong Wei-qing, Chen Feng, Wei Ping. A mixed ant colony algorithm for function optimization [J]. Application Research of Computers, 2005, 7: 51-53.)
- [25] Isaacs J, Watkins R, Foo S. Evolving ant colony systems in hardware for random number generation [C]. Proc of the 2002 Congress on Evolutionary Computation. Honolulu, 2002: 1450-1455.
- [26] 程志刚, 陈德钊, 吴晓华. 基于信息正态分布连续蚁群优化系统[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(3): 458-462.
(Cheng Zhi-gang, Chen De-zhao, Wu Xiao-hua. Continuous ant colony optimization system based on normal distribution model of pheromone[J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(3): 458-462.)
- [27] 胡上序, 陈德钊. 观测数据德分析与处理[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1996: 167-190.
(Hu Shang-xu, Chen De-zhao. The observational data analysis and processing [M]. Hangzhou: Publish of Zhejiang University, 1996: 167-190.)
- [28] 高玮, 冯夏庭. 基于免疫连续蚁群算法的岩土工程反分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 68-73.
(Gao Wei, Feng Xia-ting. Syudy on a new back analysis algorithm in geotechnical engineering based on immunized continuous and colony algorithm [J]. Chinese J of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 68-73.)
- [29] 任伟建. 智能算法及其在油田故障诊断问题中的应用 [D]. 大庆: 大庆石油学院, 2006.
(Ren Wei-jian. The application of intelligent algorithms in problems of fault diagnosis in oil field [D]. Daqing: Daqing Petroleum University, 2006.)
- [30] 洪炳熔, 金飞虎, 高吉庆. 基于蚁群算法的多层前馈神经网络[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(7): 823-825.
(Hong Bing-rong, Jin Fei-hu, Gao Ji-qing. Multi-layer feed forward neural network based on ant colony system[J]. J of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(7): 823-825.)
- [31] 张国立, 王晶, 谢宏. 利用蚁群算法优化前向神经网络[J]. 商业时代, 2005, 15(1): 65-67.
(Zhang Guo-li, Wang Jing, Xie Hong. Optimization of feed-forward neural networks by using ant colony algorithm[J]. Commercial Economy Studies, 2005, 15(1): 65-67.)
- [32] 王德智, 董增川, 丁胜祥. 基于连续蚁群算法的供水水库优化调度[J]. 水电能源科学, 2006, 24(2): 77-79.
(Wang De-zhi, Dong Zeng-chuan, Ding Sheng-xiang. Optimal scheduling of feeding reservoir based on continuous ant colony algorithm[J]. Water Resources and Power, 2006, 24(2): 77-79.)
- [33] 贺益君, 俞欢军, 陈德钊. 基于募集机制的连续蚁群系统及其应用[J]. 浙江大学学报, 2006, 40(5): 748-752.
(He Yi-jun, Yu Huan-jun, Chen De-zhao. Recruitment mechanism based continuous ant colony optimization system and its application [J]. J of Zhejiang University, 2006, 40(5): 748-752.)
- [34] 詹士昌, 徐婕. 用于多维函数优化的蚁群算法[J]. 应用基础与工程科学, 2003, 11(3): 223-229.
(Zhan Shi-chang, Xu Jie. An ant colony algorithm which applying to the multidimensional function optimization problems [J]. J of Basic Science and Engineering, 2003, 11(3): 223-229.)
- [35] 马良. 全局优化的一种新方法[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(9): 61-63.
(Ma Liang. A new method for global optimization[J]. Systems Engineering and Electronics, 2000, 22(9): 61-63.)
- [36] Thomas S, Dorigo M. A short convergence proof for a class of ant colony optimization algorithms [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002, 6(4): 353-365.