

文章编号: 1001-0920(2004)12-1321-06

蚁群算法理论及应用研究的进展

段海滨¹, 王道波¹, 朱家强², 黄向华¹

(1. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016; 2. 清华大学 智能技术与系统国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 蚁群算法是优化领域中新出现的一种仿生进化算法. 该算法采用分布式并行计算机制, 易与其他方法结合, 具有较强的鲁棒性; 但搜索时间长、易陷入局部最优解是其突出的缺点. 针对蚁群算法, 首先介绍其基本原理; 然后讨论了近年来对蚁群算法的若干改进以及在许多新领域中的发展应用; 最后评述了蚁群算法未来的研究方向和主要研究内容.

关键词: 蚁群算法; 信息素; 智能计算; 优化

中图分类号: TP13; TP18

文献标识码: A

Development on ant colony algorithm theory and its application

DUAN Hai-bin¹, WANG Dao-bo¹, ZHU Jia-qiang², HUANG Xiang-hua¹

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. State Key Laboratory of Intelligent Technology and Systems, Tsinghua University, Beijing 100084, China. Correspondent: DUAN Hai-bin, E-mail: hebinduan@nuaa.edu.cn)

Abstract: Ant colony algorithm is a novel category of bionic algorithm for optimization problems. Parallel computation mechanism is adopted in this algorithm. Ant colony algorithm has strong robustness and is easy to combine with other methods in optimization, but it has the limitation of stagnation, and is easy to fall into local optimums. Firstly, the basic principle of ant colony algorithm is introduced. Then, a series of schemes on improving the ant colony algorithm are discussed, and the new applications are also provided. Finally, some remarks on the further research and directions are presented.

Key words: ant colony algorithm; pheromone; intelligent computation; optimization

1 引 言

蚁群算法(ant colony algorithm)是由意大利学者 Colorni 等人^[1]于 20 世纪 90 年代初期通过模拟自然界中蚂蚁集体寻径的行为而提出的一种基于种群的启发式仿生进化算法. 从公开发表的论文看, 我国最先研究蚁群算法的是东北大学张纪会博士和徐心和教授^[2].

蚁群算法最早成功地应用于解决著名的旅行商问题(TSP). 它采用分布式并行计算机制, 易与其他方法结合, 具有较强的鲁棒性^[3], 但搜索时间长且易

陷入局部最优解是其突出的缺点.

目前, 蚁群算法已成为国际智能计算领域关注的热点和前沿课题. 1998 年在布鲁塞尔专门召开了第一届蚂蚁优化国际研讨会, 以后每两年召开一次. 尽管蚁群算法的严格理论基础尚未奠定, 但这种新兴的智能进化仿生算法已展现出勃勃生机.

本文首先介绍蚁群算法的基本原理; 然后讨论了蚁群算法的一系列改进策略和近年来在许多新领域中的发展应用; 最后对其存在的问题和今后进一步研究的方向和内容作了展望.

收稿日期: 2004-01-08; **修回日期:** 2004-03-08.

基金项目: 国家航空科学基金资助项目(01C52015); 江苏省“333”工程基金资助项目.

作者简介: 段海滨(1976—), 男, 山东东营人, 博士生, 从事智能控制的研究; 王道波(1957—), 男, 江苏南京人, 博士生导师, 从事智能控制、无人机先进控制技术等研究.

2 蚁群算法基本原理

蚁群算法包含两个基本阶段^[4,5]:适应阶段和协作阶段.在适应阶段,各候选解根据积累的信息不断调整自身结构;在协作阶段,候选解之间通过信息交流,以期产生性能更好的解,这类似于学习自动机的学习机制.

为更清楚地理解蚁群算法的基本原理,一般多借助经典的对称 TSP 问题来进行说明^[6].

假设 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ 是 n 个城市的集合, $L = \{l_{ij} | c_i, c_j \in C\}$ 是集合 C 中元素(城市)两两连接的集合, $d_{ij}(i, j = 1, 2, \dots, n)$ 是 l_{ij} 的 Euclidean 距离, $G = (C, L)$ 是一个有向图. TSP 问题的目的是从有向图 G 中寻出长度最短的 Hamilton 圈.

设 $\tau_{ij}(t)$ 为 t 时刻路径 (i, j) 上的信息素数量, m 为蚂蚁群中蚂蚁的数目; $\Gamma = \{\tau_{ij}(t) | c_i, c_j \in C\}$ 是 t 时刻集合 C 中元素两两连接 l_{ij} 上的残留信息素数量集合,在初始时刻各条路径上信息素数量相等.蚁群算法的寻优是在有向图 $g = (C, L, \Gamma)$ 上通过 3 个准则加以实现,即转移概率准则、局部调整准则和全局调整准则.

1) 转移概率准则:蚂蚁 $k(k = 1, 2, \dots, m)$ 在运动过程中,根据各条路径信息素数量决定转移方向.算法中人工蚂蚁与实际蚂蚁不同,具有记忆功能.

禁忌表 $\text{tabu}_k(k = 1, 2, \dots, m)$ 用来记录蚂蚁 k 当前所走过的城市.在搜索过程中,蚂蚁根据各个路径上的信息素数量和路径的启发信息来计算转移概率. $p_{ij}^k(t)$ 表示在 t 时刻蚂蚁 k 由元素 i 转移到元素 j 的转移概率,即

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{j \in \text{allowed}_k} [\tau_{is}(t)]^\alpha [\eta_{is}(t)]^\beta}, & j \in \text{allowed}_k, s \in \text{allowed}_k; \\ 0, & \text{否则.} \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\text{allowed}_k = \{C - \text{tabu}_k\}$ 表示蚂蚁 k 下一步允许选择的城市, α 表示轨迹的相对重要性, β 表示能见度的相对重要性^[7,8], $\eta_{ij}(t)$ 为启发函数,即

$$\eta_{ij}(t) = 1/d_{ij}. \quad (2)$$

显然,该启发函数表示了蚂蚁从元素(城市) i 转移到元素(城市) j 的期望程度.

2) 局部调整准则:局部调整是每只蚂蚁在建立一个解的过程中进行的.经过 h 个时刻,两个元素状态之间的局部信息素数量要根据下式作调整:

$$\tau_{ij}(t+h) = (1-\zeta)\tau_{ij}(t) + \zeta\tau_0, \quad (3)$$

$$\tau_0 = 1/(nl_{\min}). \quad (4)$$

其中: $\zeta \in [0, 1]$, l_{\min} 表示集合 C 中两个最近元素之间的距离.

3) 全局调整准则:只有生成了全局最优解的蚂蚁才有机会进行全局调整.全局调整规则为

$$\tau_{ij}(t+n) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \rho\Delta\tau_{ij}(t), \quad (5)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t). \quad (6)$$

其中: ρ 为挥发系数, $\rho \in [0, 1]$; $\Delta\tau_{ij}(t)$ 表示本次循环中路径 ij 上的信息素数量的增量; $\Delta\tau_{ij}^k(t)$ 表示第 k 只蚂蚁作本次循环中留在路径 ij 上的信息量.

文献[1]中曾给出 3 种不同的蚁群算法模型: Ant-Cycle, Ant-Quantity 及 Ant-Density, 它们的差别在于 $\Delta\tau_{ij}^k(t)$ 求法的不同: Ant-Cycle 利用的是整体信息,在求解 TSP 问题时性能较好;而 Ant-Quantity 和 Ant-Density 利用的是局部信息.因而通常采用 Ant-Cycle 作为基本模型,即

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} Q/L_k, & \text{第 } k \text{ 只蚂蚁在本次循环中经过 } ij; \\ 0, & \text{否则.} \end{cases} \quad (7)$$

其中: Q 是信息素强度,它影响算法的收敛速度; L_k 表示第 k 只蚂蚁在本次循环中所走路径总长度.

3 蚁群算法的改进

蚁群算法发展的“瓶颈”问题是算法的收敛性和连续空间寻优.近年来,众多学者围绕这两个核心问题发表了大量有价值的学术论文^[9~26].

为了在一定程度上减小算法陷入局部最优解的概率, Gambardella 等^[9]提出了一种修正的蚁群算法,对转移概率(1)进行了修订,让第 k 只蚂蚁按下式概率从元素(城市) i 转移到元素(城市) j :

$$j = \begin{cases} \arg \max_{s \in \text{allowed}_k} \{[\tau_{is}(t)]^\alpha [\eta_{is}(t)]^\beta\}, & \text{若 } q \leq q_0; \\ \text{根据式(1)选择 } j, & \text{否则.} \end{cases} \quad (8)$$

为使算法在寻优的初始阶段能较快地找到可接受的解,针对转移概率(1)和(8)采用强化学习策略^[10],可有效地提高收敛速度.

蚁群算法的适应性在输入数据不太精确的场合下是一个突出问题. Lucić 等^[11]提出了一种模糊蚂蚁系统(fuzzy ant system),对式(1)进行了模糊化处理:

If distance is SHORT

and trail intensity is STRONG

Then utility is VERY HIGH

为迅速提高解的质量,可在每次循环建立各蚂蚁的解之后,再以各自的解为起点,用局部搜索算法

求局部最优解^[12],并以此作为相应蚂蚁的解。

信息素强度 Q 是表征蚂蚁所留轨迹数量的一个常数.当集合 C 包含的元素很多时, Q 的值也需随之变化^[13],将信息素强度 Q 由常数转化为阶梯函数,实现动态地调整路径上的信息素,从而使得算法跳离局部最优解.吴斌等^[14]在对蚁群算法采用局部优化的基础上,在一次周游中采用两只蚂蚁分头寻找、途中碰头合并路径信息的方法,可在一定程度上改善蚂蚁一次周游的质量。

在集合 C 元素很多或蚂蚁数目很多的情况下,若挥发系数 ρ 太大,算法的全局搜索能力就会降低;若减小 ρ ,算法的全局搜索能力会随之提高,但算法的收敛速度会变慢^[15].因此可对 ρ 值采取自适应控制策略,即将 ρ 改为阈值函数:

$$\rho(t+1) = \begin{cases} \xi\rho(t), & \xi\rho(t) > \rho_{\min}; \\ \rho_{\min}, & \text{否则.} \end{cases} \quad (9)$$

其中 ξ 为挥发约束系数, $\xi \in (0,1)$. 式(9)虽然对算法有一定改进,但 ρ 的初始值的选择仍是一个难题^[16].为解决这一问题,可采用如下动态挥发系数调整策略:

$$\tau_{ij}(t+n) = (1-\rho')\tau_{ij}(t) + \rho'\Delta\tau_{ij}(t), \quad (10)$$

其中 $\rho' \in (0,1)$ 且 $\rho' = \frac{\rho}{mn^2}$. 实例应用表明,即使在 ρ 的适合值不确定的情况下,式(10)仍表现出良好的实用性。

将各条寻优路径上可能的残留信息素数量限制在 $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ 内, τ_{\min} 用来避免算法停滞^[17], τ_{\max} 可有效地限制算法的扩散.在此基础上,采用固定数量的迭代次数结束后进行全局搜索,而不是每次迭代结束后进行全局搜索^[18].这不仅减少了蚂蚁之间总的信息联络时间,而且可使在频繁通过的路径上积累更多的信息量,有利于增强算法的正反馈机制。

蚁群算法往往在初期信息素匮乏,求解速度慢;而遗传算法具有快速随机的全局搜索能力,但对于系统中反馈信息的利用却无能为力.因此,人们尝试将蚁群算法与遗传算法融合,采用遗传生成信息素分布,利用蚁群算法求精确解,从而实现优势互补^[19,20].在蚁群算法中采用逆转变异,能有效克服基本蚁群算法中计算时间较长的缺陷,在一定程度上提高算法的收敛速度。

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^[21,22],但算法参数的选择缺乏理论上严格证明。

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^[23],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. Isaacs 等^[24]将遗传算法和蚂蚁算法相结合,提出了一种嵌入式硬件随机数据发生器设计的新思路,但仅限于离线仿真,并没在硬件上给予实现。

到目前为止,关于蚁群算法收敛性的数学证明并不太多. Thomas^[25]以及孙森等^[26]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蚁群算法的一个重要内容。

4 蚁群算法的应用进展

自从蚁群算法在著名的 TSP 问题上取得成效以来,目前已陆续渗透到许多新的领域。

4.1 网络路由——通讯问题

随着 Internet 上广泛的分布式多媒体应用对服务质量(QoS)需求的增长,各种服务应用对网络所能提供的 QoS 提出了不同的要求,而路由是实现 QoS 的关键之一.将蚁群算法用于解决受限路由问题,目前可以解决包括带宽、延时、包丢失率和最小花费等约束条件在内的 QoS 组播路由问题^[27~29],比现有的链路状态路由算法具有明显的优越性.但所研究的实例相对简单,没有对更复杂的 QoS 问题进行深入探讨。

Ryan 等^[30]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. Mohammad 等^[31]利用该算法很好地解决了移动自组网(MANET)最优规划问题,但仅用 10 只蚂蚁对 10 个处理单元进行了仿真研究,没有对这类问题进行泛化。

4.2 生产调度——多目标分配问题

生产调度是一个复杂的动态管理优化问题.因为蚁群算法机制可以不断从过去的加工经历中学习,能自然地适应车间内外部环境的变化,从而实现动态调度,所以,它能适应动态的工件到达、不确定的加工时间以及机床故障等扰动,比静态确定性调度算法具有更好的应用前景^[32,33]。

蚁群算法同样可求解混流装配线调度等动态任务多目标分配问题^[34,35],并对车间内外部环境变化具有良好的自适应性.但这些应用研究大多是针对小规模实例的仿真,用蚁群算法解决大规模生产调度和多目标分配问题是今后进一步的研究方向。

4.3 电力系统优化问题

电力系统优化是一个复杂的系统工程,它包括无功优化、经济负荷分配、电网优化及机组最优投入等一系列问题,其中很多是高维、非凸、非线性的优化问题。Hou 等^[36]将蚁群算法成功地用于解决经济负荷分配问题;王志刚等^[37]则解决了该算法在配电网优化规划中的初步设计问题。

电力系统优化中的机组最优投入问题是寻求一个周期内各个负荷水平下机组的最优组合方式及开停机计划,使运行费用最小。利用状态、决策及路径概念,将机组最优投入问题设计成类似 TSP 问题的模式^[38],从而可方便地利用蚁群算法来求解。

Teng 等^[39]针对分布式系统中开关重定位问题对蚁群算法进行了遗传变异改进,但未能给出解决这类非线性、不可微目标函数优化问题的蚁群算法参数选择原则。文献[40]将蚁群算法编入水力发电规划能源管理软件,可很好地节约能源,但对于蚁群算法在实际应用中的可靠性问题还需进一步探讨。

4.4 机器人路径规划问题

机器人路径规划就是在障碍有界空间内找到一条从出发点到目标位置的无碰撞且能满足一些特定要求的满意路径。近几年许多学者^[41~43]开始用蚁群算法在这方面进行了一系列出色的研究工作。

为有效地解决机器人避障问题,并扩展其对具体问题的适应性,在蚁群算法中通过调整避障系数,可以得到不同的优化轨迹。樊晓平等^[44]对复杂环境下的机器人路径规划进行了初步尝试,但更多的工作有待进一步展开。

澳大利亚学者 Russell^[45]设计了一种用于移动机器人的气味传感器导航机制,并深入分析了蚁群算法在该领域应用的鲁棒性。瑞士学者 Michael 等将蚁群算法的程序编入微型机器人中,使众多微型机器人象蚂蚁一样协同工作,完成复杂任务。这项研究成果已被国际著名刊物《Nature》报道^[46]。

4.5 车辆路径问题(VRP)

VRP(vehicle routing problem)研究的是交通运输问题。在已知车辆的载重量和各客户点需求量的前提下,求至少需要多少车辆,才能满足需求且车辆的总行程最短。目前除了一些经典的智能算法以外,采用 TSP 风格的蚁群算法同样可求解 VRP,求解时可将车辆模拟成蚂蚁^[47]。

近几年,国内外学者^[48~50]在用蚁群算法求解 VRP 方面的研究取得了很多成果,但模拟效果距现实中的 VRP 问题还有很大差距。因此,这方面的研

究还有待于进一步深化。

此外,蚁群算法还在数据挖掘^[51]、参数辨识^[52]、图像处理^[53]、图形着色^[54]、分析化学^[55]、岩石力学^[56]以及生命科学^[57]等领域的应用取得了很大进展,限于篇幅这里不作详细介绍。

5 发展与展望

蚁群算法是一种原理相对简单的新兴仿生进化算法,在众多领域中已展现出它的特点和魅力。但蚁群算法理论与遗传算法、禁忌搜索算法等理论相比还远不成熟,实际应用也远未挖掘出其真正潜力,还有很多富有挑战性的课题亟待解决。主要体现在以下几个方面:

1) 加强蚁群算法的基础理论研究,进一步发展新的数学分析和建模工具,尤其对算法的基础理论研究非常重要,包括对解决不同优化问题时收敛性和收敛速度的估计、避免陷入局部最优值、鲁棒性分析以及 $\alpha, \beta, \zeta, \rho, Q$ 等参数的设计理论。目前尚未发现有关合理选择蚂蚁数量以及算法运行时间数学分析的论述。因此,该算法的数学基础理论研究将成为今后研究的一个重要课题。

2) 可将蚁群算法与其他类型方法综合使用以开发混合优化方法,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[19, 20, 23, 24]已经作了很好的尝试。将蚁群算法与神经网络、模糊控制、遗传算法、模拟退火算法等相融合,必将成为今后蚁群算法领域内新的研究热点。

3) 新的理论必须通过实践进行检验,在实践过程中,可以发现新问题,从而促进理论向前发展。近年来,蚁群算法虽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仿真。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研究的热点方向之一。

对上述问题的深入研究必将大大促进蚁群算法理论和应用的发展,蚁群算法也必将在智能计算领域中展现出更加光明的前景。

参考文献(References):

- [1] Colorni A, Dorigo M, Maniezzo V, et al. Distributed optimization by ant colonies [A]. *Proc of European Conf on Artificial Life*[C]. Paris, 1991. 134-142.
- [2] 张纪会,徐心和. 一种新的进化算法——蚁群算法[J]. *系统工程理论与实践*, 1999, 19(3): 84-87.
(Zhang J H, Xu X H. A new evolutionary algorithm —

- Ant colony algorithm[J]. *System Engineering Theory & Practice*, 1999, 19(3): 84-87.)
- [3] Dorigo M, Gambardella L M. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 1997, 1(1): 53-66.
- [4] Bonabeau E, Dorigo M, Theraulaz G. Inspiration for optimization from social insect behaviour[J]. *Nature*, 2000, 406(6): 39-42.
- [5] Katja V, Ann N. Colonies of learning automata[J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics — Part B*, 2002, 32(6): 772-780.
- [6] Dorigo M, Maniezzo V, Coloni A. Ant system: Optimization by a colony of cooperating Agents[J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics — Part B*, 1996, 26(1): 29-41.
- [7] Dorigo M, Caro G D, Gambardella L M. Ant algorithms for discrete optimization[J]. *Artificial Life*, 1999, 5(2): 137-172.
- [8] James M, Marcus R. Anti-pheromone as a tool for better exploration of search space[A]. *Proc of 3rd Int Workshop on Ant Algorithms*[C]. Brussels, 2002. 100-110.
- [9] Gambardella L M, Dorigo M. Solving symmetric and asymmetric TSPs by ant colonies[A]. *Proc of the IEEE Conf on Evolutionary Computation*[C]. Nagoya, 1996. 622-627.
- [10] Sun R Y, Tatsumi S J, Zhao G. Multiagent reinforcement learning method with an improved ant colony system[A]. *Proc of the 2001 IEEE Int Conf on Systems, Man, and Cybernetics*[C]. Sydney, 2001. 1612-1617.
- [11] Lucić P, Teodorović D. Transportation modeling: An artificial life approach[A]. *Proc of the 14th IEEE Int Conf on Tools with Artificial Intelligence*[C]. Washington D C, 2002. 216-223.
- [12] Gambardella L M, Dorigo M. HAS-SOP: An hybrid ant system for sequential ordering problem[R]. Lugano: IDSIA, 1997.
- [13] 覃刚力, 杨家本. 自适应调整信息素的蚁群算法[J]. 信息与控制, 2002, 31(3): 198-201.
(Qin G L, Yang J B. An improved ant colony algorithm based on adaptively adjusting pheromone[J]. *Information and Control*, 2002, 31(3): 198-201.)
- [14] 吴斌, 史忠植. 一种基于蚁群算法的 TSP 问题分段求解算法[J]. 计算机学报, 2001, 24(12): 1328-1333.
(Wu B, Shi Z Z. An ant colony algorithm based partition algorithm for TSP[J]. *Chinese J of Computers*, 2001, 24(12): 1328-1333.)
- [15] 王颖, 谢剑英. 一种自适应蚁群算法及其仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(1): 31-33.
(Wang Y, Xie J Y. An adaptive ant colony optimization algorithm and simulation[J]. *J of System Simulation*, 2002, 14(1): 31-33.)
- [16] Lee S, Jung T, Chung T. An effective dynamic weighted rule for ant colony system optimization[A]. *Proc of the 2001 Congress on Evolutionary Computation*[C]. Seoul, 2001. 1393-1397.
- [17] Thomas S, Holger H H. MAX-MIN ant system[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2000, 16(8): 889-914.
- [18] Douglas A L P, Paul L. A new approach to exploiting parallelism in ant colony optimization[A]. *Proc of the Int Symposium on Micromechatronics and Human Science*[C]. Nagoya, 2002. 237-243.
- [19] Marcin L P, Tony W. Using genetic algorithms to optimize ACS-TSP[A]. *Proc of 3rd Int Workshop ANTS*[C]. Brussels, 2002. 282-287.
- [20] 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 Q H, Zhang J H, Xu X H. An ant colony algorithm with perturbation features[J]. *J of Computer Research and Development*, 1999, 36(10): 1240-1245.)
- [21] 汪镭, 吴启迪. 蚁群算法在连续空间寻优问题求解中的应用[J]. 控制与决策, 2003, 18(1): 45-48.
(Wang L, Wu Q D. Ant system algorithm in continuous space optimization[J]. *Control and Decision*, 2003, 18(1): 45-48.)
- [22] Wang L, Wang X P, Wu Q D. Ant system algorithm based rosenbrock function optimization in multi-dimension space[A]. *Proc of the 1st int Conf on Machine Learning and Cybernetics*[C]. Beijing, 2002. 710-714.
- [23] 洪炳熔, 金飞虎, 高庆吉. 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 R B, Jin F H, Gao Q J. Multilayer feedforward neural network based on ant colony system[J]. *J of Harbin Institute of Technology*, 2003, 35(7): 823-825.)
- [24] Isaacs J, Watkins R, Foo S. Evolving ant colony systems in hardware for random number generation[A]. *Proc of the 2002 Congress on Evolutionary Computation*[C]. Honolulu, 2002. 1450-1455.
- [25] 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): 358-365.
- [26] 孙焱, 王秀坤, 刘业欣, 等. 一种简单蚂蚁算法及其收敛性分析[J]. 小型微型计算机系统, 2003, 21(8): 1524-1526.
- (Sun T, Wang X K, Liu Y X. Ant algorithm and analysis on its convergence[J]. *Mini-Micro Systems*, 2003, 21(8): 1524-1526.)
- [27] Lu G Y, Liu Z M. QoS multicast routing based on ant algorithm in internet[J]. *The J of China Universities of Posts and Telecommunication*, 2000, 7(4): 12-17.
- [28] Chu C H, Gu J, Hou X, et al. A heuristic ant algorithm for solving QoS multicast routing problem[A]. *Proc of the 2002 Congress on Evolutionary Computation*[C]. Honolulu, 2002. 1630-1635.
- [29] 丁建立, 陈增强, 袁著祉. 基于自适应蚂蚁算法的动态最优路由选择[J]. 控制与决策, 2003, 18(6): 751-753.
- (Ding J L, Chen Z Q, Yuan Z Z. Dynamic optimization routing method based on ant adaptive algorithm [J]. *Control and Decision*, 2003, 18(6): 751-753.)
- [30] Ryan M G, Richard S B. Dynamic wavelength routing in WDM networks via ant colony optimization[A]. *Proc of 3rd Int Workshop ANTS*[C]. Brussels, 2002. 250-255.
- [31] Mohammad T I, Parimala T, Ruppia K T. A parallel ant colony optimization algorithm for all-pair routing in MANETs[A]. *Proc of the Int Parallel and Distributed Processing Symposium*[C]. Nice, 2003. 259-266.
- [32] Shervin N. Agent-based approach to dynamic task allocation [A]. *Proc of 3rd Int Workshop on Ant Algorithms*[C]. Brussels, 2002. 28-39.
- [33] Li Y J, Wu T J. A nested ant colony algorithm for hybrid production scheduling[A]. *Proc of the American Control Conf*[C]. Anchorage, 2002. 1123-1128.
- [34] Li Y J, Wu T J. A nested hybrid ant colony algorithm for hybrid production scheduling problems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2003, 29(1): 95-101.
- [35] Joaquin B, Jordi P. Ant algorithms for assembly line balancing[A]. *Proc of 3rd Int Workshop ANTS*[C]. Brussels, 2002. 65-75.
- [36] Hou Y H, Wu Y W, Lu L J, et al. Generalized ant colony optimization for economic dispatch of power systems[A]. *Proc of the Int Conf on Power System Technology*[C]. Kunming, 2002. 225-229.
- [37] 王志刚, 杨丽徙, 陈根永. 基于蚁群算法的配电网网架优化规划方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(6): 73-76.
- (Wang Z G, Yang L X, Chen G Y. An ant colony algorithm for distribution network planning[J]. *Proc of the EPSA*, 2002, 14(6): 73-76.)
- [38] Sisworahardjo N S, El-Keib A A. Unit commitment using the ant colony search algorithm[A]. *Proc of the 2002 Int Conf on Power System Technology*[C]. Kunming, 2002. 2-6.
- [39] Teng J H, Liu Y H. A novel ACS-based optimum switch relocation method[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2003, 18(1): 113-120.
- [40] Huang S J. Enhancement of hydroelectric generation scheduling using ant colony system based optimization approaches[J]. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 2001, 16(3): 296-301.
- [41] Israel A W, Michael L, Alfred M B. Distributed covering by ant-robots using evaporating traces[J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1999, 15(5): 918-933.
- [42] Hoar R, Penner J, Jacob C. Ant trails — An example for robots to follow[A]. *Proc of the 2002 Congress on Evolutionary Computation*[C]. Honolulu, 2002. 1910-1915.
- [43] 金飞虎, 洪炳熔, 高庆吉. 基于蚁群算法的自由飞行空间机器人路径规划[J]. 机器人, 2003, 24(6): 526-529.
- (Jin F H, Hong B R, Gao Q J. Path planning for free-flying space robot using ant algorithm [J]. *Robot*, 2003, 24(6): 526-529.)
- [44] 樊晓平, 罗熊, 易晟, 等. 复杂环境下基于蚁群优化算法的机器人路径规划[J]. 控制与决策, 2004, 19(2): 166-170.
- (Fan X P, Luo X, Yi S, et al. Path planning for robots based on ant colony optimization algorithm under complex environment[J]. *Control and Decision*, 2004, 19(2): 166-170.)
- [45] Russell R A. Ant trails — An example for robots to follow [A]. *Proc of the 1999 IEEE Int Conf on Robotics and Automation* [C]. Detroit, 1999. 2698-2703.
- [46] Michael J B K, Jean-Bernard B, Laurent K. Ant-like task and recruitment in cooperative robots [J]. *Nature*, 2000, 406(31): 992-995.
- [47] Hu J M, Yang Z S, Jian F. Study on the optimization methods of transit network based on ant algorithm [A]. *Proc of the IEEE Int Vehicle Electrmotics Conf* [C]. Tottori, 2001. 215-220.

$$-10 \leq x_i \leq 100, i = 1, 2, \dots, 100.$$

函数 $f(x)$ 在可行域内有 2^{100} 个局部最优解, 全局最优解的目标值为 -78.3323 . 对初值进行随机赋值, 进行 10 次仿真, 用优化搜索循环中的外循环次数来衡量优化搜索的速度, 则仿真结果如表 2 所示.

5 结 论

1) 变步长梯度下降法结合优化点判断规则, 能有效地避免寻优过程在优化点附近出现振荡现象并加快寻优速度.

2) 变尺度混沌优化算法能有效地逃离局部极小并实现全局优化搜索.

3) 仿真结果表明, 混沌梯度组合优化算法既具有快速性, 又具有全局收敛性, 是一种行之有效的优化算法.

参考文献(References):

- [1] Ingber L. Simulated annealing: Practice versus theory [J]. *Mathematical and Computer Modeling*, 1993, 18(1):29-57.
- [2] Rudolph G. Convergence properties of control parameters for genetic algorithms[J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 1994, 5(1):65-67.
- [3] 李兵, 蒋慰孙. 混沌优化方法及其应用[J]. *控制理论与应用*, 1997, 14(4):163-165.
(Li B, Jiang W S. Chaos optimization method and its application[J]. *Control Theory and Application*, 1997, 14(4):163-165.)
- [4] 张彤, 王宏伟, 王子才. 变尺度混沌优化方法及其应用[J]. *控制与决策*, 1999, 14(3):285-288.
(Zhang T, Wang H W, Wang Z C. Mutative scale chaos optimization algorithm and its application[J]. *Control and Decision*, 1999, 14(3):285-288.)
- [5] 张春慨, 李霄峰, 邵惠鹤. 基于线性搜索的混沌优化及其在非线约束优化问题中的应用[J]. *控制与决策*, 2001, 16(1):123-128.
(Zhang C K, Li X F, Shao H H. Chaos optimization algorithm based on linear search and its application to nonlinear constraint optimization problems[J]. *Control and Decision*, 2001, 16(1):123-128.)
- [6] 史天运, 贾利民. 基于进化策略的动态递归神经网络建模与辨识[J]. *控制与决策*, 2000, 15(4):439-442.
(Shi T Y, Jia L M. Evolutionary strategy based on dynamic recursive neural network modeling and identification[J]. *Control and Decision*, 2000, 15(4):439-442.)
- [48] Bullnheimer B, Hartl R F, Strauss C. Applying the ant system to the vehicle routing problem[A]. *Meta-Heuristics: Advances and Trends in Local Search Paradigms for Optimization*[C]. Kluwer, Boston, 1998. 109-120.
- [49] 马良, 姚俭, 范炳全. 蚂蚁算法在交通配流中的应用[J]. *科技通报*, 2003, 19(5):377-380.
(Ma L, Yao J, Fan B Q. The application of ant algorithm in traffic assignment[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2003, 19(5):377-380.)
- [50] Ismail E, Otman A B, Paul C. An experimental study of a simple ant colony system for the vehicle routing problem with time windows [A]. *Proc of 3rd Int Workshop ANTS*[C]. Brussels, 2002. 100-110.
- [51] Tsai C F, Wu H C, Tsai C W. A new data clustering approach for data mining in large databases[A]. *Proc of the Int Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks*[C]. Makati, 2002. 315-321.
- [52] Abbaspour K C, Schulin R, Genuchten M T V. Estimating unsaturated soil hydraulic parameters using ant colony optimization[J]. *Advances in Water Resources*, 2001, 24(8):827-841.
- [53] Salima Q, Mohamed B, Catherine G. Ant colony system for image segmentation using markov random field[A]. *Proc of 3rd Int Workshop ANTS*[C]. Brussels, 2002. 294-295.
- [54] Costa D, Hertz A. Ants can colour graphs[J]. *J of the Operational Research Society*, 1997, 48(3):295-305.
- [55] 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.
- [56] 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 C H, Xia X Y, Li G X. Ant algorithm in search of the critical slip surface in soil slopes based stress fields[J]. *Chinese J of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(5):813-819.)
- [57] Shin Ando, Hitoshi Iba. Ant algorithm for construction of evolutionary tree[A]. *Proc of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*[C]. New York, 2002. 1552-1557.

(上接第 1326 页)