

蚁群算法的理论与应用

王 剑, 李 平, 杨春节

(浙江大学 工业控制技术研究, 浙江 杭州 310027)

摘 要:介绍了一种求解复杂组合优化问题的新的拟生态算法——蚁群算法。阐述了该算法的基本原理、几种改进蚁群算法以及蚁群算法在 TSP 问题、job-shop 调度问题、大规模集成电路布线、电信网络路由等各种组合优化问题中的应用。

关键词:蚁群算法; 进化算法; 组合优化

中图分类号: TP13

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2003)05-0126-04

The Research and Application of Ant Colony Algorithm

WANG Jian, LI Ping, YANG Chun-jie

(Institute of Industrial Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Ant colony algorithm was a novel simulated ecosystem evolutionary algorithm. After introducing the essence of the ant colony algorithm and several improved ant colony algorithms, this paper discussed its application in the complicated combinatorial optimization problems, such as the TSP problem, the job-shop scheduling problem, routing in LSI, the telecommunication networks routing problem, and so on.

Key words: ant colony algorithm; evolutionary algorithm; combinatorial optimization

1 引 言

蚁群算法就是最近几年才提出的一种新型的拟生态系统算法,由意大利学者 M. Dorigo、V. Maniezzo、A. Colorini 等人首先提出^[1~4],他们称之为蚁群系统(Ant Colony System, ACS),并用该方法来解决旅行商问题(TSP)^[2~4]、指派问题^[2]、Job-shop^[2~4]调度问题等,取得了一系列较好的实验结果。

蚁群算法的主要特点是:正反馈、分布式计算。与某种启发式算法相结合,正反馈过程使得该方法能很快发现较好解;分布式易于并行实现,与启发式算法相结合,使得该方法易于发现较好解。

初步的研究表明,蚁群算法是一种基于种群的鲁棒性较强的算法,具有许多优良的性质,为求解复杂的组合优化问题提供了一种新思路。

2 基本蚁群算法

2.1 原 理

人工蚁群算法是模仿真实的蚁群行为而提出的。仿生学家经过大量细致的观察研究发现,蚂蚁个体之间是通过一种称之为外激素(pheromone)的物质进行信息传递的。蚂蚁在运动过程中,能够在它所经过的路径上留下该种物质,而且蚂蚁在运动过程中能够感知这种物质,并以此指导自己的运动方向。因此,由大量蚂蚁组成的蚁群的集体行为便表现出一种信息正反馈现象:某一路径上走过的蚂蚁越多,则后来者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达到搜索食物的目的。

M. Dorigo 对基本蚁群算法的论述如下^[1~4]:如图 1(a)所示,设 A 是巢穴, E 是食物源, HC 为一障碍物。由于障碍物存在,蚂蚁要想由 A 到达 E,或者由 E 返回 A,只能由 H 或 C 绕过障碍物。各点之间的距离,如图 1 所示。设每个时间单

收稿日期:2003-06-20

作者简介:王 剑(1971-),男,山西榆次人,杭州电子工业学院讲师,浙江大学工业控制技术研究所在职研究生。研究方向:控制系统优化,仿真,流程 CIMS。

位有 30 只蚂蚁由 A 到达 B, 有 30 只蚂蚁由 E 到达 D 点, 蚂蚁过后留下的激素物质(以下我们称之为信息素)为 1。为方便, 设该物质停留时间为 1。在初始时刻, 由于路径 BH、BC、DH、DC 上均无信息存在, 位于 B 和 E 的蚂蚁可以随机选择路径。从统计的角度可以认为它们以相同的概率选择 BH、BC、DH、DC, 如图 1(b) 所示。经过一个时间单位后, 在路径 BCD 上的信息量是路径 BHD 上信息量的二倍。 $t=1$ 时刻, 将有 20 只蚂蚁由 B 和 D 到达 C, 有 10 只蚂蚁由 B 和 D 到达 H。随着时间的推移, 蚂蚁将会以越来越大的概率选择路径 BCD, 最终完全选择路径 BCD, 如图 1(c) 所示。从而找到由蚁巢到食物源的最短路径。由此可见, 蚂蚁个体之间的信息交换是一个正反馈过程。

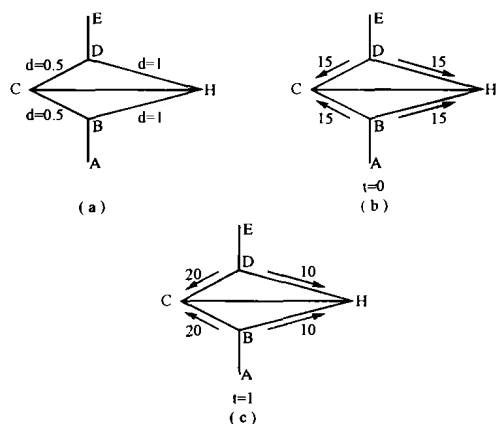


图 1 蚁群算法原理

2.2 算法模型及实现

为了便于理解, 通过蚁群算法来求解平面上 n 个城市的 TSP 问题(0, 1, ..., $n-1$ 表示城市序号), 以此来说明图搜索蚁群算法具体的实现步骤。对于其它问题, 可以对此模型稍作修改便可应用^[5]。

给定一个有 n 个城市的 TSP 问题, 人工蚂蚁的数量为 m , 每个人工蚂蚁的行为符合下列规律:

- (1) 根据路径上的信息素浓度, 以相应的概率来选取下一步路径;
- (2) 不再选取自己本次循环已经走过的路径为下一步路径, 用一个数据结构(tabu list)^[2]来控制这一点;
- (3) 当完成了一次循环后, 根据整个路径长度来释放相应浓度的信息素, 并更新走过的路径上的信息素浓度。

$\varphi_{ij}(t)$ 表示在搜索周期的第 t 代, 连接弧 (i, j) 上的信息素大小。

搜索开始时, 各条路径上分布的信息素相等, 即 $\varphi_{ij}(0) = C$ (C 为常数)。然后在搜索周期的每一代, 通过信息素的蒸发作用和一些蚂蚁个体搜索带来的信息素增强作用来改变信息素值的大小。蚂蚁个体 A_k ($k = 1, 2, \dots, m$) 在搜索过程中, 根据各条路径上的信息量决定前进的方向, 在各节点

处向下一节点的转移概率 P_{ij}^k 由信息素 $\varphi_{ij}(t)$ 和局部启发信息量 η_{ij} 共同决定。后者是连接弧长度的函数, 一般定义为 $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$ 。因此, 蚂蚁个体依转移概率偏向于选择连接弧最短、具有高信息素值的城市作为下一个搜索的节点。

在搜索周期的第 t 代, 蚂蚁个体 A_k 由城市 i 转移到城市 j 的概率 $P_{ij}^k(t)$ 。

定义为:

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\varphi_{ij}^a(t) \eta_{ij}^b(t)}{\sum_{r \in W^k} \varphi_{ir}^a(t) \eta_{ir}^b(t)} & j \in W^k \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

式中 W^k ——蚂蚁 k 下一步允许选择的的城市

与实际蚁群不同, 图搜索蚁群算法具有记忆功能, 每个蚂蚁个体可以记忆自己所走过的城市。随着时间的推移, 以前留下的信息素逐渐消逝, 用参数 $1 - \rho$ 表示信息消逝的程度, 经过 n 个城市的搜索, 蚂蚁完成一次循环, 各路径上信息量要根据式(2)、(3)作调整:

$$\varphi_{i,j}(t+1) = \rho \varphi_{i,j}(t) + (1 - \rho) \Delta \varphi_{i,j}(t) \quad (2)$$

$$\Delta \varphi_{i,j}(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k} & \text{若第 } k \text{ 只蚂蚁在本次循环中经过 } ij \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

式中 Q ——常数

L_k ——第 k 只蚂蚁在本次循环中所走路程的长度

α, β ——分别表示蚂蚁在运动过程中所积累的信息及启发因子在蚂蚁选择路径中所起的不同作用。

根据具体算法的不同, $\varphi_{i,j}^k(t)$ 、 $\Delta \varphi_{i,j}^k(t)$ 及 $P_{i,j}^k(t)$ 的表达形式可以不同, 要根据具体问题而定。

2.3 基本蚁群算法的优缺点

基本蚁群算法的优点:

- (1) 较强的鲁棒性。对该算法模型稍加修改, 便可以应用于其它问题;
- (2) 分布式计算。该算法是一种基于种群的拟生态系统算法, 具有本质并行性, 易于并行实现;
- (3) 易于与其它方法结合。该算法很容易与多种启发式算法结合, 以改善算法的性能。

基本的蚁群算法的不足之处:

- (1) 需要较长的计算时间, 容易出现停滞现象^[6];
- (2) 根据式(3), 所有通过路段 (i, j) 的搜索路径对应的候选解均会对该路段带来信息素的增量。而实际上, 候选解并非都是最好解, 这样计算信息素的增量会导致错误的引导信息, 从而造成大量的无效搜索, 使系统出现停滞现象。
- (3) 式(3)中, 采用了信息素均匀分配策略, 即对已搜索路径中的所有路段采用同样的信息素增量, 与路段的重要性无关。没有考虑当连续空间优化问题转换到有向图搜索问题

时,信息素分配给可行解带来的尺度变化对于连续解空间搜索效率的影响。

3 改进型蚁群算法

鉴于基本蚁群算法的这些特点,人们提出了许多改进型的蚁群算法。如:

3.1 具有随机扰动特征的蚁群算法^[7]

蚁群算法的主要依据是信息正反馈原理和某种启发式算法的有机结合。但是,根据式(3),所有通过路段 (i, j) 的搜索路径对应的候选解均会对该路段带来信息素的增量。而实际上,候选解并非都是最好解,这样计算信息素的增量会导致错误的引导信息,从而造成大量的无效搜索,使系统出现停滞现象。故可以采用可变的扰动因子,使系统跳出局部最优。策略如下:

(1) 在最初的几次迭代中,为加速算法的收敛,应取较大的转移概率,但如果一直不变必将导致随后的搜索出现停滞现象;

(2) 由此,在随后的搜索过程中仅在最优值路径上保持原来的转移概率,其它路径上则适当减小转移概率,这样一方面可以提高路径选择的多样性(即起到一定的扰动作用),另一方面可以使收敛趋于平缓。

(3) 同时,为了防止最优的一条路径可能被漏选,故设计如下的扰动策略:

$$P_{ij}(k) = \begin{cases} (\tau_{ij}(k) \eta_{ij}(k))^\gamma & \tau_{ij}(k) = \max(\tau_u(k)), s \notin \text{tabu}(k) \\ (\tau_{ij}(k))^\alpha \eta_{ij}(k) & \tau_{ij}(k) = \tau_u(k) - \max(\tau_u(k)), \\ & \text{且 } P \leq \tau_0, s \notin \text{tabu}(k) \\ (\tau_{ij}(k) \eta_{ij}^{\frac{1}{2}}(k))^\gamma & \tau_{ij}(k) = \tau_u(k) - \max(\tau_u(k)), \\ & \text{且 } P > \tau_0, s \notin \text{tabu}(k) \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

$s = \max(C_{ij}(k))$ 所对应的城市。式(4)中, γ 为具有倒指数的扰动因子; $\tau_0 = (0, 1)$, p 是 $(0, 1)$ 中均匀分布的随机数。

该公式表明:某次迭代过程中某只蚂蚁有若干条路径可选,对于信息素密度最大的那一条路径,应用转移概率公式(1),而对于其它的可选路径,采用随机选择方式。该公式是确定性选择与随机选择相结合的产物,确定性选择导致蚂蚁总是选择转移系数最大的路径,随机选择导致计算转移系数时具有较强的随机性,正是两者的共同作用才使改进的具有更强的全局搜索能力。

3.2 自适应调整信息素的蚁群算法

鉴于基本蚁群算法利用随机选择策略,使得进化速度较慢,正反馈原理旨在强化性能较好的解,却容易出现停滞现象。文献[8]通过采用确定性选择和随机选择相结合的选择策略,并且在搜索过程中动态地调整作确定性选择的概率,当进化到一定代数后,进化方向已经基本确定,这时对路径

上信息量作动态调整,缩小最好和最差路径上的信息量的差距,并且适当加大随机选择的概率,以利于对解空间的更完全搜索,从而可以有效地克服基本蚁群算法的两个不足。算法按照式(5)确定蚂蚁 k 由 i 转移到的下一城市 j :

$$j = \begin{cases} \arg \max_{u \in \text{allowed } k} \{ \tau_{iu}^\alpha(t) \eta_{iu}^\beta(t) \} & \text{如果 } \gamma \leq \rho_0 \\ \text{依概率 } P_j^\gamma(t) \text{ 选择 } j & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

式中 $\rho_0 \in (0, 1)$

r —— $(0, 1)$ 中均匀分布的随机数

当进化方向基本确定后用简单的放大(或缩小)方法调整每一路径上的信息量。实验表明^[7],由于采用自适应选择和动态调整策略,算法的性能明显得到改善,该方法不仅能够加快收敛速度,节省搜索时间,而且能够克服停滞行为的过早出现,有利于发现更好的解。这对于求解大规模优化问题是十分有利的。

3.3 混合蚁群算法^[9]

所谓混合蚁群算法主要是针对混合生产调度问题而提出的一种蚁群算法。混合生产调度是一类具有高度复杂性的生产调度问题。这类问题包含两种性质不同的部分:连续时间过程和离散事件过程。根据这种特点,混合蚁群算法采用了如下调度策略^[9]:

(1) 针对混合调度问题解空间中存在不同类型的待优化变量,采用了不同的搜索图生成方法;

(2) 根据优化变量在逻辑上的不同层次,采用嵌套的蚁群搜索方法,在不同层次分别进行不同搜索图上的搜索。

通过仿真研究表明^[9],嵌套混合蚁群算法在求解特定混合生产调度问题中,解的有效性和平稳性比其它拟生态算法都有明显提高。

4 蚁群算法的应用

虽然蚁群算法的研究时间还不是很长,还没有形成完整的理论体系,但已经显示出了其在求解复杂问题方面的优势。下面是该算法的一些主要应用。

4.1 TSP 问题

TSP 问题(旅行商问题)是一种复杂的组合优化问题,其算法难度 NP 完全难度的。目前尚无很好的求解方法。旅行商问题可简单描述为:求一条通过全部 N 个城市一次且仅一次的最短旅行路线。文献[1~4, 10, 11]的研究表明,蚁群算法可以有效地求解这类问题。

4.2 Job-shop 调度问题

生产调度问题可以描述为:在一定的时间范围内完成特定的生产任务而分配共享资源,并使得预定的某些生产指标最优。生产调度问题的解决过程本质是对一个资源限制问题的寻优过程。其最大的困难是存在其计算复杂性,因此需要找出有效的调度规则和方法,从而减少寻优问题的求解空

间,缩短寻优过程。文献[1,12,26]对使用蚁群算法求解这类问题进行了论述。

4.3 大规模集成电路综合布线问题

大规模集成电路中的综合布线可以采用蚁群算法的思想来进行。在布线过程中,各个引脚对蚂蚁的引力可根据引力函数来计算。各个线网 Agent 根据启发策略,象蚁群一样在开关盒网格上爬行,所经之处便布上一条金属线,历经一个线网的所有引脚之后,线网便布通了^[13,14]。给定一个开关盒布线问题,问题的计算量是固定不变的,主要由算法的迭代次数决定,而迭代次数由 Agent 的智能和开关盒问题本身的性质确定。蚁群算法本身的并行性,使之比较适合于解决布线问题。

4.4 电信网络路由问题

电信网络中的路由是通过路由表进行的。在每个节点的路由表中,对每个目的节点都列出了与该节点相连的节点,当有数据包到达时,通过查询路由表可知道下一个将要到达的节点。首先对路由表中的信息素强度进行初始化。在节点 x ,以节点 i 为目的地址,邻节点为 j 处的信息素强度为 $\tau_{ij} = 1/d_{ij}$, d_{ij} 为从 x 经节点 j 到节点 i 路径的最小费用值。然后周期性地释放蚂蚁来进行路由。并修改相应的信息素的值^[15~17]。仿真结果表明,无论呼叫是均匀分布还是集中分布,利用蚁群算法所得呼叫拒绝率和平均路径长度均小于最小负载法结果;在呼叫符合集中分布时,蚁群算法所得呼叫拒绝率低于最短路径法。研究表明,蚁群算法已经成为解决多点路由、电网布线的一种较有效的方法。

此外,蚁群算法还被在光谱分析,露天采矿边坡临界滑动面搜索,洞群施工等多种场合应用,都得到了比较理想的效果。

5 结 论

蚁群算法是一种新型的模拟进化算法,虽研究时间不长,还不像其它的启发式算法那样已形成系统的分析方法和具有坚实的数学基础。参数的选择更多的是依靠实验和经验,没有定理来确定,而且它的计算时间偏长,其在理论和实践方面尚有许多问题需要更深入的研究与解决。但它却具有的正反馈、并行计算和强鲁棒性等许多优点,可以预料,随着研究的深入,蚁群算法将给我们展示一个求解复杂组合优化问题的优秀寻优算法。

参考文献

- [1] Dorigo M. Optimization, learning and natural algorithms. Ph. D. Thesis, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Italy, 1992.
- [2] Colomi A., Dorigo M., Maniezzo V. Distributed optimization by ant colonies[A]. Proc. 1st European Conf. Artificial Life[C]. Paris, France: Elsevier, 1991:134-142.
- [3] Colomi A., Dorigo M., Maniezzo V. An investigation of some properties of an ant algorithm[A]. Proc. of Parallel Problem Solving from Nature (PPSN)[C]. France: Elsevier, 1992:509-520.
- [4] Colomi A., Dorigo M., Maniezzo V., Trubian M., Belgian J. Ant system for job shop scheduling[J]. Operations. Research. Statistics and Computer. Science, 1994, 34(1): 39-53.
- [5] Costa D. Hertz A. and Dubuis O. Imbedding of a sequential algorithm within an evolutionary algorithm for coloring problem in graphs[J]. Journal of Heuristics, 1995,(1): 105-128.
- [6] 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, 3:84-87.
- [7] 郝晋,石立宝,周家启. 具有随机扰动的蚁群算法[J]. 仪器仪表学报,2001,22(4).
- [8] 张纪会,高齐圣,徐心和. 自适应蚁群算法[J]. 控制理论与应用,2000,17(1).
- [9] 李艳君. 拟生态系统算法及其在工业过程控制中的应用[D]. 杭州:浙江大学,2001.
- [10] 伍文城,肖建. 基于蚁群算法的中国旅行商问题满意解[J]. 计算机与自动化,2002,(8).
- [11] 黎锁平,张秀媛,杨海波. 工蚁群算法理论及其在经典 TSP 问题中的实现[J]. 交通运输系统工程与信息,2002,2(1).
- [12] 刘道海,方毅,黄樟灿. 一种求解组合优化问题的演化算法[J]. 武汉大学学报(理学版),2002,48(3).
- [13] 庄昌文,范明,李春辉,虞厥邦. 基于协同工作方式的一种蚁群布线系统[J]. 半导体学报,1999,20(5).
- [14] 庄昌文,范明,李春辉,虞厥邦. 采用面向 Agent 技术的并行布线系统[J]. 计算机研究与发展,1999,36(12).
- [15] Ying Wang and Jian ying Xie, Ant Colony Optimization For Multicast Routing[A], IEEE, Circuits and Systems, 2000. IEEE APC-CAS2000. The 2000 IEEE Asia-Pacific conference, 2000,(12).
- [16] Lu guo ying, Zhang su bing and Liu ze min, Distributed Dynamic Routing Using Ant Algorithm for Telecommunication Networks[A], IEEE, Communication Technology Proceedings, 2000[C]. WCC-ICT2000. International Conference, 2000,2(13).
- [17] Griselda Navarro Varela and Mark C. Sinclair, Antcolony Optimisation For Virtual-Wavelength-Path Routing and Wavelength Allocation[A], IEEE, Evolutionary Computation[C], 1999. CEC99. Proceedings of the 1999 Congress, 1999,3:1816.

[1] Dorigo M. Optimization, learning and natural algorithms. Ph. D. The-