第36卷 第15期 计 算 机 工 程 2010年8月
Vol.36 No.15 Computer Engineering August 2010
·人工智能及识别技术· 文章编号：1000—3428(2010)15—0171—03 文献标识码：A 中图分类号：TP18

基于群智能算法的玻璃切割问题求解研究

毛 力，童 科，沈明明，董洪伟
(江南大学信息工程学院，无锡 214122)

摘 要：通过对玻璃切割问题的研究，提出一种融合量子粒子群优化和蚁群优化的混合算法(QPSO-ACO 算法)。该算法对 QPSO 及 ACO 的模型进行必要的修改，以实现对玻璃切割中的旅行商问题的较好求解。同时充分利用 QPSO 的快速性、全局收敛性和 ACO 的正反馈性及求精解效率高等特点，达到优势互补。实验结果表明，QPSO-ACO 算法寻优能力较强，是解决玻璃切割问题的有效方法。

关键词：群智能算法；量子粒子群优化；蚁群优化；玻璃切割；旅行商问题

Study on Glass-block Cutting Problem Solving Based on Swarm Intelligent Algorithm

MAO Li , TONG Ke, SHEN Ming-ming, DONG Hong-wei
(School of Information Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122)

【Abstract】Through the study on the glass-block cutting problem, a new hybrid algorithm of Quantum-behaved Particle Swarm Optimization and Ant Colony Optimization(QPSO-ACO algorithm) is proposed. The algorithm modifies the model of QPSO and ACO to solve Traveling Salesman Problem(TSP) in glass-block cutting. It makes full use of the positive feedback mechanism and high solution efficiency of ACO, as well as the fast convergence of QPSO. Experimental results show that QPSO-ACO algorithm has stronger optimization ability in solving the glass-block cutting problem.

【Key words】swarm intelligent algorithm; Quantum-behaved Particle Swarm Optimization(QPSO); Ant Colony Optimization(ACO); glass-block cutting; Traveling Salesman Problem(TSP)

1 概述

群智能是指无智能的或具有简单智能的个体通过群体协作和组织来表现出群体智能行为的特性。群智能作为一个理论被正式提出，并掀起高潮则是由意大利学者 Dorigo M 等人在 1991 年提出著名的蚁群最优化理论开始的，此后群智能研究迅速展开。目前，群智能理论研究领域有 2 种主要的算法：蚁群优化算法[1](Ant Colony Optimization, ACO)和粒子群优化算法[2](Particle Swarm Optimization, PSO)。

玻璃切割问题是一种特殊的旅行商问题，也是一个 NP 问题。目前群智能算法已成为解决此类问题所采用的主要算法，如文献[3-4]分别采用了 PSO 算法及改进 ACO 算法来求解玻璃切割问题。尽管这类应用已取得了一定的成效，但也暴露出一些不足之处，主要表现在：

(1)在求解 TSP 时，PSO 算法和 ACO 算法各有优缺点，如 PSO 算法早期求解速度快，但其后期的求精解效率较低，且不能充分利用系统中的反馈信息；而 ACO 具有正反馈性及求精解效率高等特点，但其初期信息素匮乏，求解速度慢。故采用单纯的某一种群智能算法求解 TSP，往往不能获取更好的优化性能。如文献[3]采用单纯的 PSO 算法来求解玻璃切割问题，其后期求解效果并不理想。

(2)玻璃切割问题是一种特殊的旅行商问题，求解此类问题时要对群智能算法的模型进行必要的修改，以实现对玻璃切割中的旅行商问题的较好求解，否则会影响算法的求解效率。如文献[4]中将玻璃切割问题作为一般的旅行商问题用蚁群算法来求解，这显然会影响算法的求解效率。

针对上述问题，本文提出了一种群智能混合算法——QPSO-ACO 算法，该算法针对玻璃切割问题的特殊性，对 PSO 的改进算法 QPSO[5]及 ACO 的模型进行了必要的修改，以实现对此类问题的较好求解；同时将 QPSO 与 ACO 有效地融合以克服各自算法的缺点。实验结果表明，与文献[3-4]中的算法相比，QPSO-ACO 算法具有更好的寻优能力。

2 群智能算法简介

2.1 QPSO算法

QPSO 算法是在经典的 PSO 算法基础上提出的一种有较高收敛性和稳定性的进化算法，在许多优化问题中，QPSO 已经证明比 PSO 要优越。

在 QPSO 算法中，每一个粒子 i 包含以下的信息：

(1) $X_i=(X_{i1},X_{i2},\cdots,X_{id})$：粒子的当前位置。

(2) $P_i=(P_{i1},P_{i2},\cdots,P_{id})$：代表粒子 i 的最佳适应性值，即 p_{best}。

(3) $P_g=(P_{g1},P_{g2},\cdots,P_{gd})$：代表粒子群的最佳适应性值，即 g_{best}。

在 QPSO 算法中，粒子群按照下面的 3 个公式移动：

基金项目：江苏省高校高技术产业化基金资助项目“全自动数控玻璃切割系统”(JHB05-31)

作者简介：毛 力(1967－)，男，副教授、硕士，主研方向：人工智能，数据挖掘；童 科、沈明明，硕士研究生；董洪伟，副教授、博士

收稿日期：2009-12-30 **E-mail：**wxmaoli@163.net

$$m_{best}=\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}P_i=(\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}p_{i1},\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}p_{i2},\cdots,\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}p_{ij}) \quad (1)$$

$$pp_{ij}=f\times p_{ij}+(1-f)\,p_{gj};f=rand \quad (2)$$

$$x_{ij}=pp_{ij}\pm a\times(m_{best}-x_{ij})\times\ln(1/u),\ u=rand \quad (3)$$

其中，m_{best}是粒子群 p_{best} 的中间位置；粒子数目为 M；pp_{ij} 为 p_{ij} (局部最优)和 p_{gj} (全局最优)之间的随机点；a 为 QPSO 的收缩扩张系数，它是 QPSO 收敛的一个重要的参数；第 T 次迭代时一般可取 a=0.5+0.5×(maxtime-T)/maxtime(具体 a 取值视情况而定),其中,maxtime 是迭代的最大次数;f 和 u 为(0,1)间的随机数。

QPSO 的主要优点有：(1)具有良好的全局搜索能力；(2)算法早期收敛速度快，参数简单。但其后期的求精解效率较低，且不能充分利用系统中的反馈信息。

2.2 ACO算法

ACO 算法源于自然界蚂蚁寻找从巢穴到食物源的最短路径的启发。目前蚁群优化算法很多，在解决许多优化问题上也取得了不错的成果。ACO 算法的优点：(1)具有信息正反馈机制；(2)分布式计算特征；(3)通用型随机优化方法；(4)具有启发式搜索特征。ACO 算法存在的主要缺点：(1)初期信息素匮乏，蚂蚁比较盲目，收敛速度慢；(2)算法容易停滞，陷入局部优化。

3 玻璃排版优化中的玻璃切割问题

在解决玻璃排版优化问题时，问题通常被分为两部分来解决，即布局问题和切割路径寻优问题，本文主要讨论切割路径的寻优问题。

玻璃排版优化问题在形成排版方案之后，其相应的切割边也即确定，接着要解决的就是为这些切割边找到一条最优切割路径，这正好是一个 TSP。然而玻璃切割问题中的 TSP 具有其特殊性，因为在切割玻璃过程中，每两条边之间的距离的长短和每条边的切割方向是有关的。本文将最优切割路径定义为：沿此路径，切割刀能够切割且只切割一次所有的切割边，并且切割这些切割边时所走的路径最短，即玻璃切割中的 TSP 的目标函数为

$$\min\ Z=d_0+\sum_{i,j=1}^{n}d_{ij}+\sum_{i=1}^{n}l_i \quad (4)$$

其中，d_0为从切割原点到第 1 条切割边起点的距离(切割工作开始时，切割刀都是从切割原点先移动到第 1 条切割边的起点，再开始切割)；d_{ij}为切割边 i 与 j 之间的距离，它和 i 与 j 的切割方向是有关的；l_i为切割边 i 的长度。

4 基于QPSO-ACO算法求解玻璃切割问题

4.1 QPSO-ACO算法中QPSO算法的设计

QPSO-ACO 算法通过引入交换子和交换序[6-7]，同时根据玻璃切割问题的特殊性，引入取反算子的概念，对基本 QPSO 算法进行改造，其中交换子和交换序定义见文献[6-7]，取反算子定义如下：

设 n 个节点的 TSP 的解序列为 $S=(a_i),i=1,2,\cdots,n$。如果用取反算子 REVERSE(i)作用于解序列，那么其结果为：解序列中 a_i 的符号位发生变化。如 $S=(1,2,3,5)$，那么 $S'=S+$REVERSE(3)$=(1,2,-3,5)$。

这里规定横向边的起点至终点为从左向右，而纵向边的起点至终点为从下向上。本文直接用带符号位的阿拉伯数字对每一条切割边进行编号，设起点至终点的切割边 i 为$+i$，终点至起点的切割边 i 为$-i$。算法中的每个粒子 Y_i，表示一种有向切割边的切割序列。定义目标函数 $f(Y_i)=\min Z$，则基于 QPSO 求解玻璃切割问题的具体算法步骤如下：

(1)初始化粒子群数 M，迭代次数 t，将每个粒子 Y_i 初始化为一个随机的解序列和一个随机的交换序。

(2)计算出每个粒子的目标函数值 $f(Y_i)$，$f(Y_i)$表示粒子 Y_i 所代表路径的长度。

(3)取 $f(Y_i)$的平均值，选取 $f(Y_i)$中最接近该平均值的 Y_i 赋值给 m_{best}。

(4) pp_{ij} 随机选取 p_{pj} 或 p_{gj} 的值，其中，p_{pj} 为粒子本身找到的最优解 p_{best}，p_{gj} 为整个种群目前找到的最优解 g_{best}。

(5)计算 m_{best} 和 x_{ij} 之间的差 A，$A=m_{best}-x_{ij}$，其中，A 是一个交换序，表示 A 作用于 m_{best} 得到 x_{ij}；A 经过 $a,\ln(1/u)$作用后得到一个新的交换序列，该序列作用于 pp_{ij} 得到新的 x_{ij}。

(6)更新每个粒子的新局部最优位置 p_{pj}。

(7)更新全局最优位置 p_{gj}。

(8)$t=t+1$，如不满足终止条件，则返回到步骤(2)。

(9)输出最短路径，终止整个程序。

4.2 QPSO-ACO算法中ACO的设计

考虑到玻璃切割问题是一种特殊的非对称 TSP 问题，故提出一种基于 ACO 算法求解玻璃切割问题的算法模型：

设有 N 条有向切割边，将每条切割边 x 对应于 TSP 中的 2 个顶点$+x$ 和$-x$，$+x$ 表示切割方向从左向右或为从下向上，$-x$ 表示切割方向从右向左或为从上向下。将构造一个有向网络 $G=[V,A,D,\tau]$来讨论切割玻璃中的 TSP 问题，其中：

$V=\{0,\pm1,\pm2,\cdots,\pm x,\cdots,\pm N\}$为顶点集，0 表示切割原点，$x$ 表示蚂蚁需要经过的切割边；

$A\{(i,j)|i,j\in V,|i|\neq|j|\}$为弧集，表示两顶点间的线段的集合；

$\boldsymbol{D}=\{d_{ij}|(i,j)\in A\}$为距离矩阵集，$d_{ij}$ 表示蚂蚁经过弧(i,j)所走的距离；

$\boldsymbol{\tau}=\{\tau_{ij}|(i,j)\in A\}$为信息素矩阵集，$\tau_{ij}$ 表示在弧(i,j)上蚂蚁留下的信息素浓度。

在 QPSO-ACO 算法中，ACO 算法采用 MMAS 算法，采用蚁周模型进行信息素更新，其中转移概率公式中的 η_{ij} 取 $1/d_{ij}$，d_{ij} 的值来自距离矩阵，τ_{ij} 的值来自信息素矩阵。由于每条切割边 x 对应于 TSP 中的 2 个顶点即$+x$ 和$-x$，因此在 MMAS 算法中当第 k 只蚂蚁根据转移概率公式转移到切割边 x 对应的某个顶点时，应将该切割边 x 对应的 2 个顶点同时加入到该蚂蚁个体的禁忌表中。

4.3 QPSO-ACO算法步骤

QPSO-ACO 算法步骤如下：

(1)算法初始化

初始化粒子种群数目 M，QPSO 算法的迭代次数 $Nc1$(规定 QPSO 的最小迭代次数及最大迭代次数)；蚂蚁数 m、切割边数 n、距离矩阵 $\boldsymbol{D}$、ACO 算法的迭代次数 $Nc2$, α, β, ρ等。

(2)QPSO 寻优

利用 QPSO 算法作为前期搜索得出各粒子的历史最优值，作为后期蚁群算法的初始信息素分布。在此过程中，当 QPSO 求解效率降低，出现停滞现象且已达到规定的最小迭代次数或已达到规定的最大迭代次数，则终止 QPSO，进入蚁群算法寻优过程。

(3)ACO 算法寻优

用前期 QPSO 算法得出的各粒子历史最优值初始化信息素矩阵τ，将 m 只蚂蚁置于切割原点上，然后采用 MMAS 算法寻优，如满足终止条件，则输出最短路径，终止整个程序。

4.4 实验结果

为了对算法进行合理评价，本文利用文献[3]中得到的排版布局方案确定相应的切割边和切割边数。选取 9 块、15 块、20 块布局中的优化结果进行切割路径寻优，如图 1~图 3 所示(图中的黑粗线表示需要切割的边，其中，9 模块布局的切割边为 10 条；15 模块布局的切割边为 13 条；20 模块布局的切割边为 19 条，图左下角设为切割原点)。

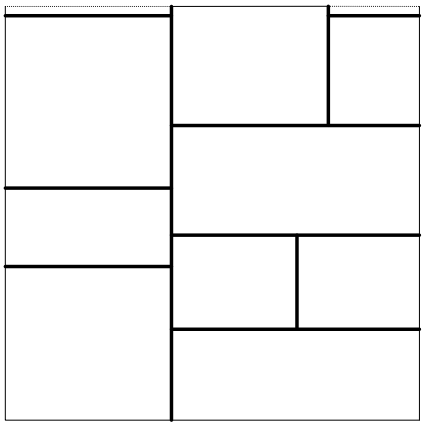


图 1　9 模块切割边为 10 条

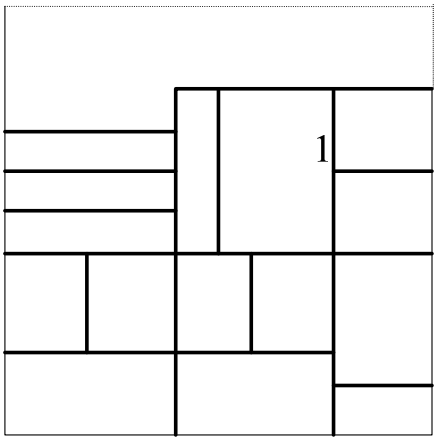


图 2　15 模块切割边为 13 条

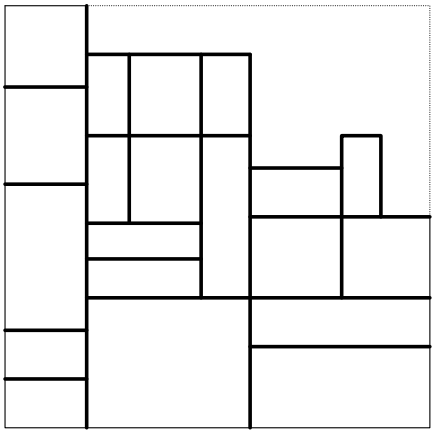


图 3　20 模块切割边为 19 条

本文分别以文献[3-4]算法和 QPSO-ACO 算法对算例进行计算，程序用 Microsoft Visual C++ 6. 0 编译，算法运行环境是：Pentium4, 2.66 GHz CPU, 512 MB 内存，Windows XP 操作系统。实验中文献[3-4]算法迭代次数设为 200 次。QPSO-ACO 算法中 QPSO 迭代次数最小为 50 次，最大为 100 次，ACO 算法迭代 100 次，蚂蚁数目 m=切割边数 n，α =1, β=1, ρ=0.4。上述 3 种算法分别运行 30 次，取其平均值来进行评价，结果如表 1 所示。

表 1　实验结果比较

切割边数	文献[3]算法		文献[4]算法		QPSO-ACO 算法	
	最优长度/cm	平均长度/cm	最优长度/cm	平均长度/cm	最优长度/cm	平均长度/cm
10	3 471.4	3 543.7	3 591.4	3 715.9	3471.4	3 500.2
13	4 516.2	4 607.6	4 899.2	5 281.1	4516.2	4 567.5
19	5 515.2	5 795.1	5 923.6	6 312.9	5223.6	5 261.5

从实验结果可以看出，由于文献[4]在利用蚁群算法求解玻璃切割问题时未考虑切割问题的特殊性，因此寻优能力最差；而 QPSO-ACO 算法针对切割问题的特殊性，对 QPSO 及 ACO 的模型进行了有效的修改，同时又很好地融合了 QPSO 和 ACO 的各自优点，有效克服了 QPSO 后期求精解效率较低和 ACO 前期盲目搜索的缺陷，故在寻优能力方面优于文献[3-4]中的算法。

5　结束语

本文在解决玻璃切割问题上提出了一种 QPSO-ACO 算法，该算法对 QPSO 及 ACO 的模型进行必要的修改，以实现对玻璃切割中的 TSP 的较好求解；同时充分利用 QPSO 的快速性、全局收敛性和 ACO 的正反馈性及求精解效率高等特点，达到优势互补。实验结果表明，相对于文献[3-4]中的算法，QPSO-ACO 算法具有更好的寻优能力。

参考文献

[1] Dorigo M, Maniezzo V, Colorni A. The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1996, 26(1): 23-31.

[2] Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm Optimization[C]// Proceedings IEEE International Joint Conference on Neural Networks. [S. l.]: IEEE Press, 1995: 1942-1948.

[3] 徐　辉. 粒子群优化算法在玻璃排版问题中的应用[D]. 成都: 四川大学, 2006.

[4] 于孜清. 基于蚁群算法的玻璃切割控制系统[D]. 成都: 四川大学, 2006.

[5] Sun Jun, Xu Wenbo. A Global Search Strategy of Quantum-behaved Particle Swarm Optimization[C]//Proceedings of IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems. [S. l.]: IEEE Press, 2004: 111-116.

[6] Clerc M. Discrete Particle Swarm Optimization Illustrated by the Traveling Salesman Problem[EB/OL]. (2007-04-20). http://www.mauriceclerc.net.

[7] 陈其晖, 凌培亮, 萧蕴诗. 基于改进微粒群优化的学习路径优化控制方法[J]. 计算机工程, 2008, 34(4): 190-192.

编辑　索书志