

# 解模糊交货期多机并行调度问题的改进量子遗传算法<sup>①</sup>

吴灵芝, 黄德才

(浙江工业大学 计算机科学与技术学院, 杭州 310032)

**摘要:** 在结合遗传算法和量子理论的基础上, 提出了一种改进的量子遗传算法(IQGA)求解模糊交货期多机并行调度问题。采用量子比特相位比较法更新量子位, 以加快搜索的速度和效率; 采用求反解码操作, 以扩大种群规模。通过仿真验证, 改进的量子遗传算法在求解模糊交货期多机并行调度问题时较好的寻优能力。

**关键词:** 模糊交货期; 多机并行; 量子遗传算法; 遗传算法

## Improved Quantum Genetic Algorithm for Fuzzy Due Date for Parallel Machines

WU Ling-Zhi, HUANG De-Cai

(College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

**Abstract:** Based on the combination of evolutionary theory and quantum theory, this paper proposes an improved quantum genetic algorithm (IQGA) to solve fuzzy due date scheduling problem on parallel machines. It updates the quantum gates with quantum phase comparison method to speed up the search for efficiency; using inverted decoding operation to expand the population size. The simulation results show that the proposed quantum genetic algorithm for fuzzy Due Date on Parallel Machines with better search capabilities.

**Key words:** fuzzy due date; parallel machines; quantum genetic algorithm; genetic algorithm

### 1 引言

随着 JIT 准时制的发展, 考虑提前/拖延费用的生产调度问题, 已日益成为一个引人注目的研究领域<sup>[1]</sup>。许多调度方法通常将交货期当作一个固定的值来计算, 而实际上, 客户通常希望交货期落在一定的时间范围内, 即模糊交货期。在实际生产中, 一些易腐项目的生产(食物、血液、药材等), 如果作业的某一部分提前完工, 但其它所必需的条件尚未准备好, 那么就不可能进行下一步的生产。而已生产部分由于存在生命周期, 随着时间的等待其内部结构发生变化, 导致进行到下一步生产时该部分已经不能再使用。厂家也将随着交货期的不同受到惩罚, 可以用模糊交货期函数表示顾客对交货期的满意程度。

多机并行调度问题是为实现某一目的而对并行使用的多个资源进行时间分配的问题。由于其具有随机性、约束复杂、规模大等特点, 没有一个有效的算法

能在多项式时间内求出其最优解。很多研究表明, 寻找生产调度问题的最优解是非常困难的, 最有工程意义的求解算法是放弃寻找最优解的目标, 转而试图在合理、有限的时间内寻找到一个近似的、有用的解。近年来在这方面已经取得了不少研究成果, 特别是遗传算法(GA)、神经网络(NN)等智能求解方法。本文通过对量子遗传算法的深入研究, 采用量子比特相位比较法更新量子门和增加求反解码操作, 扩大搜索的范围和提高搜索效率。经过仿真验证, 这种改进的量子遗传算法在求解模糊交货期多机并行调度问题时, 不仅收敛速度快, 而且有效地避免了遗传算法容易早熟的问题。

### 2 模糊交货期多机并行调度问题的描述

模糊交货期下多机并行问题可描述为: 有  $n$  个待加工的生产作业  $J=\{1,2,\dots,n\}(n \geq 2)$ , 需要通过  $m$  台不

① 基金项目:浙江省重大科技专项课题(2009C11024)

收稿时间:2011-01-05;收到修改稿时间:2011-02-01

同的机器  $M=\{1,2,\dots,m\}(m \geq 2)$  加工。加工作业至少能在一台机器上被加工。各台机器加工各作业的能力不同,且加工时间为大于零的实数。各作业在各机器上加工且仅加工一次。当机器无法完成作业时,加工时间为  $+\infty$ 。各作业在机器上加工的能力用一个  $m \times n$  的二维矩阵表 *timetable* 表示。该模型的加工时间是确定的,加工顺序是不确定的,由此得到的作业的完工时间及总流程时间是模糊的。假设每个作业  $j$  在机器  $i$  上的实际完工时间是  $C_j$ 。任务的交货期窗口为  $[d_j^m, d_j^n]$ , 交货悲观值为  $d_j^0$  和  $d_j^p$ , 其中  $d_j^0 \leq d_j^m \leq d_j^n \leq d_j^p$ 。当  $C_j$  落在  $(d_j^m, d_j^n)$  区间时, 顾客最满意, 满意度为 1; 当  $C_j$  落在区间  $(d_j^0, d_j^m)$  或  $(d_j^n, d_j^p)$  时, 因为它偏离交货期窗口较近, 顾客比较满意; 当  $C_j$  落在区间  $(d_j^0, d_j^p)$  以外的区间时, 顾客对这种调度的满意度为 0。用  $\mu$  表示作业  $j$  的完工时间相对应的满意度, 转换为模糊交货期函数, 可以如下表示:

$$\mu(c_j) = \begin{cases} 1 & , d_j^m < c_j \leq d_j^n \\ \frac{c_j - d_j^0}{d_j^m - d_j^0} & , d_j^0 < c_j \leq d_j^m \\ \frac{d_j^p - c_j}{d_j^p - d_j^n} & , d_j^n < c_j \leq d_j^p \\ 0 & , otherwise \end{cases} \quad (1)$$

该调度模型的目标就是所有机器的交货满意度加权之和最大, 公式表示如下:

$$\max F_{\max} = \sum_{j=1}^n \omega_j \mu_j(c_j) \quad (2)$$

$\omega_j$  为工件  $j$  的权重。

### 3 基于量子遗传算法的求解方法

#### 3.1 量子遗传算法的原理

量子遗传算法(QGA)是基于量子位和量子叠加态的概念提出的。在量子计算中,量子位或量子比特是最小的信息单位。一个量子位可以处于  $|0\rangle$  态、 $|1\rangle$  态、以及  $|0\rangle$  和  $|1\rangle$  之间的任意叠加态。一个量子位的状态可以描述为  $|\psi\rangle = |\alpha\rangle + |\beta\rangle$ 。其中  $\alpha$ 、 $\beta$  为复数,为量子位对应态的概率幅。 $|\alpha|^2$  表示量子态被观测  $|0\rangle$  的概率,  $|\beta|^2$  表示量子态被观测  $|1\rangle$  的概率,其中  $\alpha$ 、 $\beta$  满足归一化条件  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ 。如果一个系统用  $m$  位量子位表示, 则用量子位可同时表示  $2^m$  种状

态。相比于传统遗传算法采用的二进制、十进制、符号等染色体编码,量子遗传算法中则采用基于量子位的编码方式。假设  $m$  为量子染色体的比特位数;  $t$  为进化代数; 第  $t$  代种群的第  $j$  个体的染色体。

$$q_j^t = \begin{bmatrix} \alpha_1^t & \alpha_2^t & \dots & \alpha_m^t \\ \beta_1^t & \beta_2^t & \dots & \beta_m^t \end{bmatrix}, j=1, \dots, n \quad (3)$$

在 QGA 中,由于染色体的状态处于叠加或纠缠状态,因而 QGA 的染色体更新操作不能采用遗传算法的选择、交叉和变异等操作方式,对信息的基本操作是由量子门来实现的。量子门通过对量子比特实施一种幺正变换来控制量子态的演化和传递,进而实现种群的进化。量子门的设计是 QGA 实现的关键,直接影响 QGA 的性能。一般情况下采用量子旋转门  $U$ , 其更新过程如下:

$$[\alpha_i^t, \beta_i^t]^T = U \cdot [\alpha_i^{t-1}, \beta_i^{t-1}]^T \quad (4)$$

$$U(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中  $\theta$  为旋转角, 它的正负决定着算法收敛的方向, 它的幅度(大小)决定算法收敛的速度和效率。<sup>[5]</sup>

#### 3.2 改进的量子遗传算法 (IQGA)

##### 3.2.1 编码设计

为了降低算法在编码和解码过程的复杂性, 本文在实数编码阶段不再采用传统的车间调度编码, 而是采用文献[4]提出的屏蔽每台设备上作业排序顺序的编码方式。用一个  $n$  维的向量  $R(r_1, r_2, \dots, r_i, \dots, r_n)$  作为可行解的编码, 其中  $r_i \in (1, 2, \dots, m)$ 。用向量元素的下标表示待加工作业的编号, 元素的值表示作业加工的机器编号。如设  $m=3, n=9$ , 则向量  $(2, 1, 3, 2, 1, 3, 1, 3, 3)$  表示第 1 台机器上加工  $J_2, J_5, J_7$ ; 第 2 台机器上加工  $J_1, J_4$ ; 第 3 台机器上加工  $J_3, J_6, J_8, J_9$ 。通过这样的编码的方式, 我们将每台机器上作业的排序顺序留在计算满意度函数值的时候, 通过调用单机问题使整体调度的满意度到达最优解。

染色体编码方式从实数编码转换为量子编码后, 第  $t$  代种群  $Q(t)$  中的第  $j$  个染色体可以表示如下:

$$q_j^t = \begin{bmatrix} \alpha_{j_1}^t & \alpha_{j_2}^t & \dots & \alpha_{j_k}^t \\ \beta_{j_1}^t & \beta_{j_2}^t & \dots & \beta_{j_k}^t \end{bmatrix}; j = 1, 2, \dots, P$$

式中  $k = N \times (\log_2 M)$ ;

M: 机器的个数;

N: 作业 的个数;

Ceil(log2M): ceil 为 matlab 中对正无穷方向取整函数, 表示机器编号所需的二进制编码的位数。

### 3.2.2 旋转门

由于 QGA 主要采用量子旋转门实现种群染色体的更新,  $\theta$  为量子旋转门的旋转角度, 因此  $\theta$  角的产生是 QGA 的关键。旋转角  $\theta$  的大小和符号是根据一个事先设计的调整策略而确定的, 符号决定收敛的方向, 幅值(大小)影响收敛速度。

在传统的 QGA 中,  $\theta$  的调整的系数通常和量子位的观测值、满意度和概率幅有关。正如文献[3]所述, 这种方法更适于用来求解组合优化问题。因为这类问题的更新策略是基于事先已知所优化问题的最优解原则, 且量子位的观测值与满意度密切相关。如背包问题, 其取得最优解的原则是在满足约束条件的情况下, 使各量子染色体中的线性叠加态的观测值为“1”的概率尽可能大, 也就意味着其满意度越大。

在 IQGA 中, 旋转角的大小可以表示为  $\theta = k \times f(\alpha, \beta)$ ; 其中  $k$  是与算法收敛速度有关的系数。 $k$  的取值必须合理选取, 如果  $k$  的值取得太大, 算法搜索的范围就很大, 容易出现早熟现象, 算法易收敛于局部极值点, 反之, 如果  $k$  的值取得太小, 算法搜索的范围就很小, 速度太慢, 甚至会处于停滞状态。因此本文将  $k$  定义为与进化代数有关的变量, 以便其自适应地调整搜索范围的大小, 设  $k = 10 \times \exp(-t/\max t)$ , 其中  $t$  为迭代的代数,  $\max t$  为最大进化代数。函数  $f(\alpha, \beta)$  的作用是使算法朝着最优解的方向搜索, 本文采用表 1 的变化策略, 其原理是使当前解逐步地逼近搜索到的最优解, 从而确定量子门的旋转方向。如表中所述, 当  $d_1$  和  $d_2$  同时大于 0 时, 当前解和搜索到的最优解均处于第一或第三象限; 当  $|\theta_1| \geq |\theta_2|$  时, 当前解应向逆时针的方向转移, 其值取+1, 反之取-1。同理推出其它三种情况。

表 1 函数  $f(\alpha, \beta)$  的查询表

$d_1 > 0$	$d_2 > 0$	$f(\alpha, \beta)$	
		$ \theta_1  \geq  \theta_2 $	$ \theta_1  <  \theta_2 $
True	True	+1	-1
True	False	+1	+1
False	True	-1	-1
False	False	-1	+1

注: 其中  $\alpha_1$  和  $\beta_1$  是搜索到的最优解的概率幅,  $d_1 = \alpha_1 \times \beta_1$ ,  $\theta_1 = \arctan(\beta_1/\alpha_1)$ ;  $\alpha_2$  和  $\beta_2$  是当前的概率幅,  $d_2 = \alpha_2 \times \beta_2$ ,  $\theta_2 = \arctan(\beta_2/\alpha_2)$ 。

### 3.2.4 量子解码设计

量子解码即对个体的量子位测量并转换为实际问题编码的过程。一般是对种群的每个个体实施一个测量, 得到一个状态  $p(t)$ 。测量时, 是根据量子比特概率幅  $|\alpha|^2$  (或  $|\beta|^2$ ) 来决定相应基因位的值。具体方法为: 通过随机产生一个  $[0, 1]$  的数, 若它大于等于概率幅  $|\alpha|^2$  (或  $|\beta|^2$ ) 的值, 则测量结果取 1; 否则, 取 0 (也可反之)。在测量完成后, 再对测量得到的二进制码转换为实际问题编码计算满意度。

由表 1 的量子门更新策略可知, 算法的搜索方向主要由最优解和当前解的量子比特相位决定的。通过使当前解量子位观测值接近当前最优解观测值的概率变大的方式来达到寻优的目的。但由于本文中采用的编码方式, 当前最佳个体的量子位观测值并不能直接地反应当前的最佳调度方式。因此除了要使当前解朝着最优解的方向搜索外, 还需要尽可能地保持个体的多样性, 防止出现局部优化。在 IQGA 中, 在完成对量子染色体的测量后, 将对二进制测量结果做求反操作, 并将观测结果和求反结果作为两个个体分别计算满意度。采用求反操作后, 当产生一定数目的初始种群时, 新的 IQGA 的初始化个体的速度比一般量子遗传算法速度提高了一倍。另一方面, 求反操作使 IQGA 能同时朝着最优解及其反方向搜索, 使搜索的范围扩大了。

### 3.2.5 IQGA 具体实现步骤

步骤 1: 令  $t=0$ , 最佳满意度为 0, 初始化种群规模为  $N$  的初始种群  $Q(t)$ ;

步骤 2: 判断是否满足终止条件 ( $t$  大于最大进化代数), 满足则终止程序, 反之继续;

步骤 3: 对种群  $Q(t)$  中的所有个体做一次测量得到  $P(t)$ ;

步骤 4: 对  $P(t)$  作求反操作, 得到  $P'(t)$ ;

步骤 5: 对  $P(t)$  和  $P'(t)$  同时计算满意度, 并记录最佳个体及其满意度;

步骤 6: 利用旋量子门操作对种群个体进行更新得到下一代种群  $Q(t+1)$ ;

步骤 7: 另  $t=t+1$ , 返回步骤 2。

### 4 应用实例及结果分析

为验证改进的量子遗传算法在模糊交货期多机并行调度中的效果, 本文在 Windows 的平台下搭建了模拟平台, 用 Matlab 进行编程, 对不同规模的问题进行了仿真实验。每个任务在各个机器上的加工时间  $c_j$  为 10~150 之间随机数整数, 作业  $j$  交货期窗口为  $Mix(c_j)$ ~800 之间的 4 个随机数整数, 权重用  $1/n$  表示。其中,  $Mix(c_j)$  为加工作业  $j$  最快的机器所需的时间,  $n$  为作业数。

#### 4.1 算法参数选择

(1) 遗传算法 (GA): 种群大小为  $P=500$ , 采用轮盘赌选择, 单点交叉, 交叉概率为  $pc=0.6$ , 基本位变异, 变异概率  $pm=0.05$ , 终止代数  $t=200$ 。

(2) 传统量子遗传算法 (QGA): 种群大小  $P=50$ , 旋转门更新查询表如表 4 所示, 终止代数  $t=200$ 。

表 2 量子旋转门更新表

$x_i$	$b_i$	$f(x)>f(b)$	$\Delta\theta$	$S(\alpha_i, \beta_i)$			
				$\alpha_i, \beta_i > 0$	$\alpha_i, \beta_i < 0$	$\alpha_i = 0$	$\beta_i = 0$
0	0	F	0	0	0	0	0
0	0	T	0	0	0	0	0
0	1	F	0	0	0	0	0
0	1	T	$0.05\pi$	+1	-1	0	$\pm 1$
1	0	F	$0.05\pi$	+1	-1	0	$\pm 1$
1	0	T	$0.05\pi$	-1	+1	$\pm 1$	0
1	1	F	$0.05\pi$	-1	+1	$\pm 1$	0
1	1	T	$0.05\pi$	-1	+1	$\pm 1$	0

(3) 改进量子遗传算法 (IQGA): 种群大小  $P=2$ , 旋转门更新查询表如表 1 所示, 量子位测量结果求反操作, 终止代数  $t=200$ 。

#### 4.2 结果分析

为防止单次仿真的随机性, 本文分别 GA、QGA 和 IQGA 三个算法对  $3 \times 7$ 、 $5 \times 10$ 、 $7 \times 15$  和  $9 \times 20$  四个应用模型执行 100 次, 计算的最好解、平均解和平均收敛代数见表 3 所示。四个模型的平均最优满意度值如图 1-4 所示。

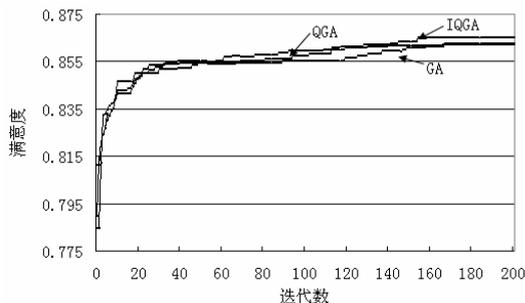


图 1  $m=3; n=7$

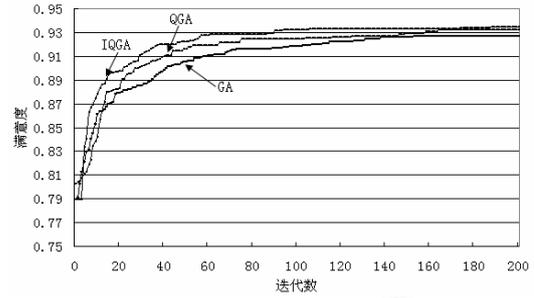


图 2  $m=5; n=10$

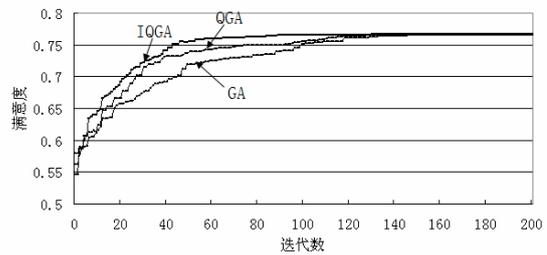


图 3  $m=7; n=15$

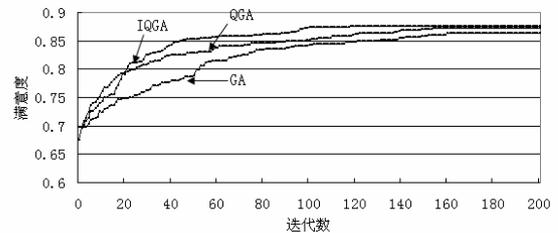


图 4  $m=9; n=20$

从表中数据可知, 通过多次计算 GA、QGA、IQGA 都能获得较好的满意度值。但在 IQGA 的种群规模小于 QGA 和 GA 的一半的前提下, IQGA 的平均满意度仍优于 GA 和 QGA, 且平均迭代次数也有所下降。由图 1-4 可知, 在算法搜索最优解的前期, 由于搜索的盲目性三个算法的最优解都呈现一定的随机性, 因此没有出现明显的差异, 而到了迭代的中后期, IQGA 不仅保持了群体的多样性, 并且具有较快的收敛性, 迅速使整个群体趋向最优解。同时随着问题规模逐渐变大, 三算法的寻优效率也逐步拉开距离。在问题规模为  $3 \times 7$  时, 三个算法的收敛趋势几乎重合, 而在问题规模为  $9 \times 10$  时, IQGA 和 QGA 已经相对 GA 有较快的收敛性。通过仿真可知, IQGA 解模糊交货期多机调度问题是可行的并具有较好的寻优能力。

表 3 GA、QGA 和 IQGA 计算结果对比

问题规模 (M×N)	GA			QGA			IQGA		
	最好解	平均解	平均收敛代数	最好解	平均解	平均收敛代数	最好解	平均解	平均收敛代数
3×7	0.888737	0.861924	44.81	0.888737	0.86235	58.81	0.888737	0.864903	57.81
5×10	0.951167	0.927218	102.12	0.951622	0.932738	97.7	0.951622	0.934298	81.3
7×15	0.79348	0.74523	101	0.79348	0.76672	70.76	0.79348	0.766804	71.25
9×20	0.90459	0.84725	126.35	0.907194	0.862426	116.25	0.907194	0.875632	108

## 5 结语

本文提出的改进的量子遗传算法能有效地求解模糊交货期多机并行调度问题,解决了传统量子遗传算法更新操作依赖于二进制位、满意度和最优解的缺陷,克服了传统量子遗传算法在量子位观测值与最优解无直接联系时容易陷入局部最优解的缺点。

### 参考文献

- 1 吴悦,汪定伟.用遗传算法解模糊交货期下 low-shop 调度问题.系统工程理论与实践,2002:108-112.
- 2 Han KH, Kim JH. Quantum-inspired evolutionary algorithms with a new termination criterion, H8 gate, and two-phase scheme. IEEE Trans. on Evolutionary Computation, 2004, 8(2):156-169.

- 3 张葛祥,李娜,金炜东,胡来招.一种新量子遗传算法及其应用.电子学报,2004,32(3): 0372-2112.
- 4 黄德才,郭海东.基于 JIT 的非等同并行多机调度问题的混合遗传算法.计算机集成制造,2004,10(3):1006-5911.
- 5 杨淑媛,刘芳,焦李成.一种基于量子染色体的遗传算法.西安电子科技大学学报,2004,31(1):76-81.
- 6 熊焰,陈欢欢.一种解决组合优化问题的量子遗传算法 QGA.电子学报,2004,32(11): 0372-2112.
- 7 王万良,吴启迪.生产调度智能算法及其应用.北京:科学出版社,2007.
- 8 王宇平,李英华.求解 TSP 的量子遗传法.计算机学报, 2007, 30(5):748-755.
- 9 李士勇,李盼池.量子计算与量子优化算法.哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2009.

(上接第 34 页)



图 5 终端界面

## 5 结语

本文提出的基于 UCON 无线阅读 DRM 系统具有以下优点: 1) 系统确切地表达了责任、条件、授权三个决策因素, 逻辑清晰, 具有较强的动态授权控制能力。2) 系统的性能与传统 OMA DRM 系统相比性能相近, 表明系统具有较好的可用性。3) 系统采用 UCON

模型, 该模型能够统一传统访问控制模型, 具有良好的可扩展性。下一步我们将在 UCON 基础上完善权利描述语言 REL。

### 参考文献

- 1 Open Mobile Alliance. DRM Specification Approved Version 2.1.1 - 06 Avr 2010.
- 2 Park J, Sandhu R. Usage control: A vision for next generation access control. International Workshop on Mathematical Methods, Models and Architectures for Computer Networks Security, 2003,2(1):17-31.
- 3 钟勇,秦小麟,刘凤玉.一种面向 DRM 的责任授权模型及其实施框架.软件学报,21(8):2060-2061.
- 4 Park J, Sandhu R. The UCONABC Usage Control Model. ACM Trans. on Information and System Security(TISSEC), Feb 2004.