

量子进化算法在生产调度中的应用综述^{*}

宋强磊, 车阿大

(西北工业大学 管理学院, 西安 710072)

摘要: 量子进化算法是量子计算和进化计算相融合的产物, 具有种群多样性好、全局搜索能力强、收敛速度快等优点。综述了量子进化算法在 Job-Shop 调度、Flow-Shop 调度、车辆路径规划、项目调度等生产调度领域中的应用现状, 讨论了面向生产调度的量子进化算法的编码转换方式和进化策略以及存在的问题, 并指明了其进一步的研究方向。

关键词: 量子进化算法; 生产调度; 量子概率幅编码; 量子旋转门

中图分类号: F224 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2012)05-1601-05

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.05.001

Survey on application of quantum evolutionary algorithm in production scheduling

SONG Qiang-lei, CHE A-da

(School of Management, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Quantum evolutionary algorithm, which is the result of the combination of quantum computation and evolutionary computation, has good population diversity, strong global search capability and fast convergence. This paper reviewed the applications of quantum evolutionary algorithm to Job-Shop scheduling, Flow-Shop scheduling, vehicle routing problem and project scheduling. And it discussed code conversion and evolution strategies and specified further research directions.

Key words: quantum evolutionary algorithm; production scheduling; quantum probability coding; quantum rotation gate

0 引言

生产调度是为完成若干项任务而将所需要用到的人、财、物等资源进行最优分配的过程。生产调度是近年来自动化与管理科学领域的研究热点之一, 也是理论研究中的难点问题之一。根据加工系统的特征, 生产调度问题可以分为单机、并行机、Flow-Shop、Job-Shop、Open-Shop 调度等基本类型。现有对生产调度方法研究大多集中在基于运筹学、启发式调度和基于仿真等方法, 但这些方法在计算时间或解的质量方面存在局限性。从 20 世纪 80 年代开始, 学者们开始将神经网络、遗传算法、禁忌搜索和模拟退火等智能算法引入生产调度的研究。

进化计算是目前研究很热的一类并行算法, 它基于适者生存的思想, 将问题的求解表示成染色体的适者生存过程, 通过染色体群的不断进化, 最终收敛到问题的最优解或满意解^[1]。量子进化算法(QEA)是量子计算与进化计算相融合的产物, 它利用量子理论中有关量子态的叠加和纠缠等特性^[1,2], 通过量子旋转门、量子交叉、量子变异等操作来实现个体的变异和种群的进化, 利用当前最优个体的信息来更新量子旋转门, 以加速算法收敛。传统智能优化算法虽然具有各自的特点, 但在具体求解过程中常常表现出早熟收敛、易陷入局部最优等不足。量子进化算法将量子比特的概率幅表示方式应用于染色体的编码, 在对一个量子染色体执行观察前, 其处于多个确定状态的叠加状态, 从而提高了个体的多样性, 增强了全局搜索

能力, 可较好地克服早熟收敛现象^[2]。目前量子进化算法已成为国际学术界研究的一个重要的新课题。

量子进化算法作为一种智能优化算法, 国内外部分学者已将其引入到生产调度的研究中。本文综述了量子进化算法在生产调度问题中的应用, 讨论了面向生产调度的量子进化算法的编码转换方式和进化策略以及存在的问题, 为量子进化算法在生产调度中的进一步研究应用提供了思路和展望。

1 量子进化算法概述

量子进化算法采用量子比特的概率幅编码方式, 通过量子旋转门、量子交叉、量子变异等操作来实现个体的变异和种群的进化, 利用当前最优个体的信息来更新量子旋转门, 以加速算法收敛。量子进化算法作为一种概率优化算法, 其染色体是采用量子概率幅的方式表示。通常, 一个量子位可表示为^[1]

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad (1)$$

其中: α 和 β 为复数, 分别表示状态 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 对应的概率幅。因此, $|\alpha|^2$ 和 $|\beta|^2$ 分别表示该量子位处于状态 0 和 1 的概率, 并满足归一化条件 $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ 。一个含有 m 个量子位(长度为 m) 的量子染色体可表示为

$$\begin{matrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \cdots & \alpha_m \\ \beta_1 & \beta_2 & \cdots & \beta_m \end{matrix} \quad (2)$$

其中: $|\alpha_i|^2 + |\beta_i|^2 = 1 \quad i = 1, 2, \dots, m$ 。如果一个系统有 m 个量子位, 则该系统可同时描述 2^m 个状态, 但是在观测时, 该系

收稿日期: 2011-11-25; 修回日期: 2012-01-06 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71071129); 西北工业大学人文社科与管理振兴基金资助项目(RW200902); 西北工业大学研究生创业种子基金资助项目(GBKY4001)

作者简介: 宋强磊(1987-), 男, 河南漯河人, 硕士研究生, 主要研究方向为生产计划与调度、项目调度; 车阿大(1972-), 男, 浙江鄞州人, 教授, 博导, 博士, 主要研究方向为生产计划与调度、交通规划、项目调度(ache@nwpu.edu.cn)。

系统将塌陷为一个确定的状态^[3]。观测过程首先产生一个属于 $[0, 1]$ 的随机数,若此随机数大于 $|\alpha_i|^2$,则对应的量子位塌陷为1,否则为0。正是由于量子系统可以描述叠加态的特性,基于概率幅编码的进化算法比传统算法有更好的种群多样性。基本量子进化算法的流程如图1所示。

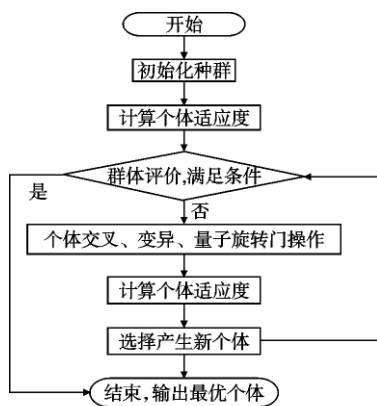


图1 量子进化算法流程

量子进化算法保留了传统进化算法中的种群初始化、交叉、变异和选择操作,并在进化操作中引入了量子旋转门。其特点是采用量子比特的概率幅编码方式,使一个小种群的量子个体可对应于传统编码方式下很大数量的个体^[1]。

2 量子进化算法在生产调度中的应用现状

2.1 Flow-Shop 调度

Flow-Shop 调度问题已被证明是典型的 NP-hard 问题,至今仍未证明存在一种多项式复杂性的算法能够求解该问题的所有实例,但是由于其应用背景广泛,在计算机科学和运筹学领域已进行了许多研究。量子进化算法在 Flow-Shop 调度中的应用是近年的研究热点之一,国内外部分学者已尝试将量子进化算法及混合量子进化算法用于 Flow-Shop 调度问题。

Wang 等人^[4]首次将量子进化算法应用于 Flow-Shop 调度问题,他们首先将量子位概率幅编码转换为随机键(random key)编码,然后转换为工件加工顺序,并使用量子门旋转和遗传算子进行种群进化。Niu 等人^[5]将量子进化算法应用于混合 Flow-Shop 调度问题,提出了一种实数编码用于将量子概率幅编码转换为工件加工顺序。Li 等人^[6]针对多目标 Flow-Shop 调度问题提出了一种混合量子进化算法,使用随机键来将量子概率幅编码转换为工件加工顺序,并进一步应用基于工件顺序的进化算法来搜索调度解空间获得较优的调度解。傅家旗等人^[7]采用并行的量子比特的编码方式,借鉴微粒群算法的搜索特性,提出了一种新型混合量子进化算法,并将其应用于置换 Flow-Shop 问题。王小芹等人^[8]提出了一种新的量子染色体解码方法以适应流水车间调度问题,并提出了一种新的动态旋转角更新策略,即根据距离值的不断变化而变化,使整体进化方向朝着当前最优解方向发展。Zheng 等人^[9]提出了一种基于微分进化策略的量子进化算法,并用于 Flow-Shop 问题,算法对比发现其获得解的质量更高。并行机调度^[10]是实际生产过程中一类典型的调度问题,也是一类特殊的 Flow-Shop 调度问题。于艾清等人^[11]将量子进化算法应用于并行机调度问题,提出了新的量子旋转角,使个体向更好的解靠近。

研究结果显示,即使在小种群情况下,所得解均优于进化规划求得的解。

2.2 Job-Shop 调度

Job-Shop 调度问题也是经典的组合优化问题之一,具有很多实际应用背景。近年来,人工智能、神经网络、计算机技术及仿真技术的迅速发展,为调度问题的研究开辟了新的思路^[12]。由于量子进化算法在搜索空间和收敛速度方面的优越性,部分学者也尝试将量子进化算法应用于 Job-Shop 调度问题。

Gu 等人^[13]提出了一种新的协同进化量子进化算法,并将其应用于随机 Job-Shop 调度问题。该算法将三种新的进化策略和量子进化算法结合求解,获得了较好的求解效率。他们^[14]还提出了一种新型并行量子进化算法,并将其应用于随机 Job-Shop 调度问题,该算法采用一种新的基于渗透理论的变异策略和一种新的多宇宙交叉策略。

2.3 车辆路径问题

赵燕伟等人^[2]应用一种结合了 2-opt 优化的混合量子进化算法求解车辆路径问题(VRP),通过与遗传算法、粒子群算法的求解结果进行比较,验证了其提出的算法具有更优的性能。张景玲等人^[15]将一种结合了 2-opt 优化的混合量子进化算法应用于多车型动态需求车辆路径问题,对线路内的子路径进行局部调整,进一步提高了算法的收敛速度。高辉等人^[16]设计了一种自适应计算量子旋转门旋转角的量子进化新方法,并应用该算法求解车辆路径问题,仿真表明改进的量子进化算法性能优于基本量子进化和传统进化算法。

2.4 项目调度

黄志宇^[17]提出了资源约束型项目调度问题的量子进化算法。该算法应用一种基于活动对连接关系的调度解表示方法,并且扩展了前向—后向搜索思想,构造出原问题的反向问题,并把原问题和反向问题以同样的方式进行求解,利用反向搜索一个方向上的解群来更新另一个方向上的解群。仿真实验验证了该算法在求解项目调度问题上的有效性。

2.5 电力系统机组组合调度

电力系统机组组合调度问题(UC problem)是电力系统调度中的一类重要问题,其通过控制发电机组的开关组合来达到满足电力负荷要求的同时使电力生产成本最小。传统的动态规划、拉格朗日松弛法和整数规划等方法在求解时间和解的质量方面存在不足,因此启发式算法、遗传算法以及量子进化算法被引入到这类问题的求解中。

Lau 等人^[18]提出了应用于大规模电力系统机组组合调度问题的量子进化算法,发现相对传统方法求解电力系统机组组合调度问题,量子进化算法的计算时间和问题规模之间存在线性关系。王家林等人^[19]根据电力系统网络结构特点给出了量子编码方案,将量子进化算法应用于电力系统同步相量测量装置(PMU)最优配置问题,得到了较少 PMU 配置的解。Liao^[20]将一种混沌量子进化算法应用于集成了风电的电力系统调度中。Lu 等人^[21]将改进的量子进化算法应用于电力系统经济排放调度,提出了用于控制约束条件的一种启发式策略和一种基于适应度的选择策略。Zhang^[22]将改进的量子粒子群算法用于电力系统调度。

2.6 其他应用

除了在生产调度领域的应用之外,量子进化算法还在诸多领域得到了应用。一些具有代表性的应用研究如表 1 所示。

表 1 量子进化算法的其他应用

应用领域	作者	问题
数值优化	Yang、Han、赵吉、杨海东等人 ^[23-26]	数值优化、约束优化、多峰函数优化、多目标优化
组合优化	Han、Narayanan、Wang 等人 ^[27-29]	背包问题、旅行商问题
信号处理	Li、Zhang 等人 ^[30-31]	信号分离矩阵求解、滤波器设计
路由优化	Xing 等人 ^[32-33]	QoS 组播路由优化
基因编码	Xiao 等人 ^[34]	DNA 编码、神经网络训练
参数估计	任子武、Wang 等人 ^[35-36]	混沌系统参数估计、非线性系统参数估计
金融预测	De Araújo 等人 ^[37-38]	时间序列预测、股票市场预测
其他	Moore、Ghavami、Ykhlef 等人 ^[39-41]	逻辑电路的设计、数字设计、数据挖掘

3 面向生产调度的量子编码转换方式

编码问题是设计进化算法的首要 and 关键问题。进化算法的编码必须考虑染色体的可行性、有效性以及对问题解空间表征的完全性。在生产调度问题中,问题的解往往是工件或作业的排列顺序,因此需要将量子位的概率幅编码转换为顺序编码。

3.1 基于实数排序的转换方式

基于实数排序的编码转换方式是指先将量子个体转换成二进制串个体,再换算成十进制编码,对十进制编码排序后得到相应的工件或作业排序^[4-11]。例如考虑 3 工件生产调度问题,采用 2 量子位来表示量子个体,一个量子个体对应一个工件,随机生成 3 工件的量子编码为

$$\begin{bmatrix} -1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/2 \\ \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{3} \\ -1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

对以上量子染色体进行观测,若得到二进制串 [0 1] [0 0] [1 0] 则换算成十进制为 [1 0 2],按照十进制数的大小顺序来排列对应的工件次序;若出现相同的数,则按照出现次序来排列工件次序,可得工件排序为 [2 1 3]。由于这种编码方式对于大规模问题会存在染色体长度过长的问题,部分学者提出了基于实数编码的量子进化算法^[42]。

3.2 基于工件优先顺序比较的转换方式

基于工件优先顺序比较的转换方式是依据观测到的二进制串确定工件两两优先顺序,进而得到工件排序的解码方法^[43]。在该转换方式中,一个量子比特代表在某一台机器上两个工件加工先后顺序的概率。考虑两个工件 i 和 j ,以 $\text{prior}(i, j)$

$\text{prior}(i, j)_k = q_{ijk} = \begin{bmatrix} \alpha_{ijk} \\ \beta_{ijk} \end{bmatrix}$ 表示工件 i 和 j 在机器 M_k 上加工优先顺序的概率。如果 $\text{prior}(i, j)_k$ 塌陷到 1,则表示工件 i 先于工件 j 在机器 M_k 上加工;否则,工件 i 后于工件 j 在机器 M_k 上加工。当所有工件在所有机器上的加工优先顺序确定以后,就可以得到一个调度方案。例如一个 3×3 (三个工件和三台机器)调度问题的量子比特染色体可以表示为

$$\begin{aligned} \text{prior}(1, 2) &= \begin{bmatrix} \alpha_{121} & \alpha_{122} & \alpha_{123} \\ \beta_{121} & \beta_{122} & \beta_{123} \end{bmatrix} \\ \text{prior}(1, 3) &= \begin{bmatrix} \alpha_{131} & \alpha_{132} & \alpha_{133} \\ \beta_{131} & \beta_{132} & \beta_{133} \end{bmatrix} \\ \text{prior}(2, 3) &= \begin{bmatrix} \alpha_{231} & \alpha_{232} & \alpha_{233} \\ \beta_{231} & \beta_{232} & \beta_{233} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

若对上述染色体进行观测后得到二进制串 [1 0 1], [1 0 0], [1 0], 即可得到工件加工顺序为: 机器 1 为 [1 3 2], 机器 2 为 [2 1 3], 机器 3 为 [3 1 2]。

3.3 基于移位解码的转换方式

基于移位解码的转换方式是以父代工件排序序列为参考模板,依据某一二进制串进行解码得到子代工件排序的编码转换方式^[44]。定义二进制串中 0 取当前父代序列的首基因,1 取当前父代序列的第 2 位基因,按此思路,从父代个体中一一取出基因组成子代个体,取出的基因即从父代中剔除,以进行下一位的选择,如表 2 所示。

表 2 移位解码

名称	编码
父代	6 1 9 8 7 5 2 4 3
二进制解集	1 1 0 1 1 0 1 0 0
子代	1 9 6 7 5 8 4 2 3

4 面向生产调度的量子进化策略

4.1 量子旋转门及其改进

量子进化算法中的进化操作既可以使用传统意义上的交叉变异,也可根据量子的叠加特性和量子变迁的理论,运用量子旋转门来变换产生新的下一代种群^[45]。根据薛定谔方程,量子旋转门必须为酉正矩阵,量子旋转门的构造直接影响算法的性能。最常用的量子旋转门构造如下:

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix}$$

则量子位 $\begin{bmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{bmatrix}$ 的量子旋转门更新过程为

$$\begin{bmatrix} \tilde{\alpha}_i \\ \tilde{\beta}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{bmatrix}$$

其中 θ_i 为量子旋转门的旋转角,取值为

$$\theta_i = kf(\alpha_i, \beta_i)$$

其中: k 是一个与算法收敛速度有关的系数;函数 $f(\alpha_i, \beta_i)$ 的作用是使算法朝着最优解的方向搜索,其原理是使当前解逐渐逼近搜索的最优解,从而确定量子门的旋转方向。通过文献综述可发现,量子旋转门的改进主要集中在调整策略和旋转角度设计方面。

量子旋转门的存在使量子进化算法具有较强的全局搜索能力。但如果量子旋转门调整策略设计不当,由此产生的新染色体容易远离当前最优染色体,影响算法的收敛。为解决以上问题,黄力明等人^[46]依据确保在任何状态下以较大的概率使当前解收敛到一个具有更高适应度的染色体(最优解染色体)的思想提出了一种新的量子旋转门调整策略。解平等^[47]在使用量子旋转门进行全局更新的基础上引入了局部更新操作,确保个体向最优解方向进化。

量子旋转门中的初始旋转角直接影响算法的收敛速度和

搜索能力,初始旋转角过大,易早熟;初始旋转角过小,收敛速度慢。高辉等人^[16]探讨了初始旋转角对算法性能的影响,通过设置不同的初始旋转角进行的算例计算得出初始旋转角为 0.05π 时收敛速度和解的平均质量都是最优的。他们还设计了一种依据量子比特概率幅比值自适应计算旋转角的方法,通过这种方法控制旋转角方向和旋转角大小,使搜索更为全面和精细。Yang 等人^[48]使用了动态调整初始旋转角的策略,即根据遗传代数不同将初始旋转角的大小在 $0.01\pi \sim 0.05\pi$ 之间动态调整,动态旋转角的策略收敛速度优于固定旋转角策略。

4.2 量子交叉和变异

交叉是进化算法搜寻最优解的一种手段。常用的交叉方法有单点、多点、均匀、算术交叉等^[49]。在量子进化算法中,仅使用量子旋转门更新种群仍有可能陷入局部最优,因此引入交叉变异等遗传操作是必要的。有学者利用了量子的相干特性构造了全干扰交叉^[47]。王小芹等人^[8]分别采用 exchange 的交叉方法和 interchange 的变异方法直接对工件排序编码染色体进行了交叉和变异操作。傅家旗等人^[44]使用了量子映射交叉和隔离小生境多交叉的方法。

传统量子变异是随机或以一定概率选中个体,然后随机产生变异位置,交换相应量子位的两个概率幅 α_i 和 β_i ,使得原先倾向于“0”的状态转变为倾向于“1”的状态,反之亦然。陈辉等人^[50]使用混沌序列对当前代中所有的实数染色体所对应的相角进行限幅扰动,幅度按照适应值的大小进行自调整,然后再使用量子旋转门实现个体变异。周传华等人^[51]引入基于概率划分的小生境协同进化策略,此外还引入了量子灾变跳出局部最优。陈有青等人^[52]首先根据个体间适应值的相似性将群体分为若干组,以组为单位按照轮盘赌选择方式进行变异。

4.3 混合算法

No free lunch 定理^[53]表明,没有哪一种方法能够最有效地解决所有问题,由于各种优化算法都有各自的优缺点,学者们尝试将不同优化算法相结合以提高算法性能。量子进化算法中,所有的个体都朝着当前最优解按照同样的量子门旋转,易陷入局部最优。混合算法正是尝试利用不同优化算法的优点获得更高质量的解。

俞洋等人^[54]将量子进化算法和粒子群算法(PSO)相结合,提出了两种混合量子进化算法,发现混合算法提高了算法保持种群多样性的能力和运算速度。解平等人^[47]提出了一种基于双编码机制(经典二进制编码和量子概率幅编码)的混合量子进化算法。Li 等人^[6]则提出了一种混合量子进化算法应用于多目标 Flow-Shop 调度问题,结合 PGA(permutation-based GA)进行解空间探测和优质调度解的开发。傅家旗等人^[44]引入了概率解码和有限基因排列的优化策略,并结合模拟退火算法提出了一种混合量子进化算法用于 Flow-Shop 调度问题。Wang 等人^[4]将一种改进的混合量子进化算法用于 Flow-Shop 调度问题。

5 结束语

由于量子进化算法良好的种群多样性、较强的全局搜索能力、可较好地克服早熟收敛现象等优点,现今已引起了越来越多学者的关注。针对各类生产调度问题,国内外学者就编码设计以及算法的进化策略等进行了研究,取得了一些成果。

综观量子进化算法在生产调度领域的研究现状,虽然量子进化已经成为目前计算智能领域的热点之一,但是理论研究以及在若干复杂优化领域中的研究尚有待推广和深入。通过文献研究可总结出量子进化算法在生产调度领域未来的几个研究方向:

a) 目前量子进化算法在生产调度问题乃至组合优化问题中的应用广度尚显不足,目前的应用主要集中在背包、旅行商、传统的 Job-Shop 和 Flow-Shop 调度等问题,而且研究成果较少。因此,基于量子进化算法的优越性,其与其他类型的生产调度问题中的应用有较大的空间。

b) 传统的量子进化算法的量子位概率幅编码方式会导致在求解较大规模问题时染色体长度过长,影响量子进化算法的效率。因此,如何设计更有效的编码转换方式是未来基于量子进化的生产调度算法研究的重点。

c) 量子进化策略中的量子交叉、量子变异和量子旋转门的设计直接影响算法的寻优能力和收敛效率,因此基于所研究的生产调度问题的特性,如何设计高效的量子进化策略是基于量子进化的生产调度算法研究的重点和难点之一,其中混合算法的研究应该是未来的研究热点。

参考文献:

- [1] 王凌. 量子进化算法研究进展[J]. 控制与决策, 2008, 23(12): 1321-1326.
- [2] 赵燕伟, 彭典军, 张景玲, 等. 有能力约束车辆路径问题的量子进化算法[J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(2): 159-168.
- [3] 李士勇, 李盼池. 量子计算与量子优化算法[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2009: 69-78.
- [4] WANG Ling, WU Hao, TANG Fang *et al.* A hybrid quantum-inspired genetic algorithm for Flow-Shop scheduling [C]//Lecture Notes in Computer Science, vol 3645, 2005: 636-644.
- [5] NIU Qun, ZHOU Tai-jin, MA Shi-wei. A quantum-inspired immune algorithm for hybrid Flow-Shop with make span criterion [J]. Journal of Universal Computer Science, 2009, 15(4): 765-785.
- [6] LI Bin-bin, WANG Ling. A hybrid quantum-inspired genetic algorithm for multi objective Flow-Shop scheduling [J]. IEEE Trans on Systems, Part B: Cybernetics, 2007, 37(3): 576-591.
- [7] 傅家旗, 叶春明, 谢金华. 混合量子算法及其在 Flow-Shop 问题中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(20): 48-50.
- [8] 王小芹, 王万良, 徐新黎. 一种求解 Flow-Shop 调度问题的混合量子进化算法[J]. 机电工程, 2009, 26(9): 5-8.
- [9] ZHENG Tian-min, YAMASHIRO M. Solving Flow-Shop scheduling problems by quantum differential evolutionary algorithm [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 49(5-8): 643-662.
- [10] 王凌. 车间调度及其遗传算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [11] 于艾清, 郭平, 顾幸生. 混合量子衍生进化规划算法及其在并行机拖期调度中的应用[J]. 华东理工大学学报: 自然科学版, 2009, 35(1): 125-131.
- [12] 王书锋, 邵益仁. 车间作业调度(JSSP)技术问题简明综述[J]. 系统工程理论与实践, 2003, 23(1): 49-55.
- [13] GU Jin-wei, GU Man-zhan, CAO Cui-wen *et al.* A novel competitive co-evolutionary quantum genetic algorithm for stochastic Job-Shop scheduling problem [J]. Computers & Operations Research, 2010, 37(5): 927-937.

- [14] GU Jin-wei, GU Xing-sheng, GU Man-zhan. A novel parallel quantum genetic algorithm for stochastic Job-Shop scheduling[J]. *Journal of Mathematical Analysis and Applications* 2009, 355(1): 63–81.
- [15] 张景玲, 赵燕伟, 王海燕, 等. 多车型动态需求车辆路径问题建模及优化[J]. *计算机集成制造系统* 2010, 3(16): 543–549.
- [16] 高辉, 徐光辉, 王哲人. 改进量子进化算法及其在物流配送路径优化问题中的应用[J]. *控制理论及应用* 2007, 24(6): 969–972.
- [17] 黄志宇. 具有资源约束的项目调度问题中的量子进化算法[J]. *计算机集成制造系统*, 2009, 15(9): 1780–1787.
- [18] LAU T W, CHUNG C Y, WONG K P, *et al.* Quantum-inspired evolutionary algorithm approach for unit commitment [J]. *IEEE Trans on Power Systems* 2009, 24(3): 1503–1512.
- [19] 王家林, 夏立, 吴正国, 等. 采用量子遗传算法的电力系统 PMU 最优配置[J]. *高电压技术* 2010, 36(11): 2838–2842.
- [20] LIAO G C. A novel evolutionary algorithm for dynamic economic dispatch with energy saving and emission reduction in power system integrated wind power[J]. *Energy* 2011, 36(2): 1018–1029.
- [21] LU Song-feng, SUN Cheng-fu, LU Zheng-ding. An improved quantum-behaved particle swarm optimization method for short-term combined economic emission hydrothermal scheduling [J]. *Energy Conversion and Management* 2010, 51(3): 561–571.
- [22] ZHANG Zhi-sheng. Quantum-behaved particle swarm optimization algorithm for economic load dispatch of power system[J]. *Expert Systems with Applications* 2010, 37(2): 1800–1803.
- [23] YANG Shu-yuan, WANG Min, JIAO Li-cheng. A novel quantum evolutionary algorithm and its application [C]//Proc of IEEE Congress on Evolutionary Computation. 2004: 820–826.
- [24] HAN K H, KIM J H. Quantum inspired evolutionary algorithm for a class of combinatorial optimization [J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation* 2002, 6(6): 580–593.
- [25] 赵吉, 孙俊, 须文波. 一种求解多峰函数优化问题的量子行为粒子群算法[J]. *计算机应用* 2006, 26(12): 2956–2960.
- [26] 杨海东, 杨春. 求解多目标优化问题的分级变异量子进化算法[J]. *控制与决策* 2009, 24(6): 894–902.
- [27] HAN K H, KIM J H. Genetic quantum algorithm and its application to combinatorial optimization problem [C]//Proc of IEEE Congress on Evolutionary Computation. 2000: 1354–1360.
- [28] NARAYANAN A, MOORE M. Quantum-inspired genetic algorithms [C]//Proc of IEEE International Conference on Evolutionary Computation. 1996: 61–66.
- [29] WANG A, FENG Xiao-Yue, HUANG Yan-xin, *et al.* A novel quantum swarm evolutionary algorithm and its applications[J]. *Neurocomputing* 2007, 70(4–6): 633–640.
- [30] LI Na, DU Peng, ZHAO Hui-jie. Independent component analysis based on improved quantum genetic algorithm: application in hyper spectral images[C]//Proc of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2005: 4323–4326.
- [31] ZHANG Ge-xiang, JIN Wei-dong, HU Lai-zhao. A novel parallel quantum genetic algorithm [C]//Proc of International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies. 2003: 693–697.
- [32] XING Huan-lai, BAI Lin, JI Yue-feng. QoS multicast routing scheme using QGA in IP/DWDM networks[J]. *Journal of China Universities of Posts and Telecommunications* 2008, 15(4): 95–100.
- [33] XING Huan-lai, LIU Xin, JIN Xing, *et al.* A multi-granularity evolution based quantum genetic algorithm for QoS multicast routing problem in WDM networks [J]. *Computer Communications* 2009, 32(2): 386–393.
- [34] XIAO Jian-hua, XU Jin, CHEN Zhi-hua, *et al.* A hybrid quantum chaotic swarm evolutionary algorithm for DNA encoding [J]. *Computers and Mathematics with Applications* 2009, 57(11): 1949–1958.
- [35] 任子武, 熊蓉. 基于混合量子进化计算的混沌系统参数估计[J]. *控制理论与应用*, 2010, 27(11): 1448–1453.
- [36] WANG Ling, FANG Tang, WU Hao. Hybrid genetic algorithm based on quantum computing for numerical optimization and parameter estimation [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2005, 171(2): 1143–1158.
- [37] De ARAÚJO R. A robust automatic phase-adjustment method for financial forecasting[J]. *Knowledge-based Systems* 2011, 27(3): 245–261.
- [38] De ARAÚJO R. Hybrid intelligent methodology to design translation invariant morphological operators for Brazilian stock market prediction [J]. *Neural Networks* 2010, 23(10): 1238–1251.
- [39] MOORE P, VENAYAGAMOORTHY G K. Evolving combinational logic circuits using a hybrid quantum evolution and particle swarm inspired algorithm [C]//Proc of NASA Conference on Evolution Hardware. Washington DC: IEEE Computer Society 2005: 97–102.
- [40] GHAVAMI B, PEDRAM H. High performance asynchronous design flow using a novel static performance analysis method [J]. *Computers and Electrical Engineering* 2009, 35(6): 920–941.
- [41] YKHELF M. A quantum swarm evolutionary algorithm for mining association rules in large databases [J]. *Journal of King Saud University Computer and Information Sciences* 2011, 23(1): 1–6.
- [42] 覃朝勇, 郑建国, 朱佳俊. 一种实数编码量子进化算法及其收敛性[J]. *控制与决策*, 2009, 24(6): 854–863.
- [43] 覃朝勇, 刘向, 郑建国. 求解多目标 Job-Shop 生产调度问题的量子进化算法[J]. *计算机应用研究* 2010, 27(3): 849–852.
- [44] 傅家旗, 叶春明, 赵伟民. 混合量子算法在生产调度中的应用[J]. *上海理工大学学报* 2009, 31(6): 557–561.
- [45] 焦李成, 尚荣华. 多目标优化免疫算法、理论和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [46] 黄力明, 徐莹, 于瑞琴. 改进的量子遗传算法及应用[J]. *计算机工程与设计*, 2009, 30(8): 1987–1990.
- [47] 解平, 李斌, 庄镇泉. 一种新的混合量子进化算法[J]. *计算机科学* 2008, 35(2): 166–170.
- [48] YANG Jun-an, LI Bin, ZHUANG Zhen-quan. Research of quantum genetic algorithm and its application in blind source separation [J]. *Journal of Electronics(China)* 2003, 20(1): 62–68.
- [49] 杨淑媛, 刘芳, 焦李成. 量子进化策略[J]. *电子学报*, 2001, 29(12): 1873–1877.
- [50] 陈辉, 张家树, 张超. 实数编码混沌量子遗传算法[J]. *控制与决策* 2005, 20(11): 1300–1303.
- [51] 周传华, 钱锋. 改进量子遗传算法及其应用[J]. *计算机应用*, 2008, 28(2): 286–288.
- [52] 陈有青, 徐蔡星. 一种改进选择算子的遗传算法[J]. *计算机工程与应用* 2008, 44(2): 44–49.
- [53] WOLPERT D H, MACREADY W G. No free lunch theorems for search, SFI-TR-95-02-010[M]. Santa Fe: Santa Fe Institute, 1995.
- [54] 俞洋, 殷志锋, 田亚菲. 混合量子进化算法及其应用[J]. *计算机工程与应用* 2006, 42(28): 72–76.