

文章编号:1006-5911(2013)09-2193-09

基于混合量子进化算法的自动化制造单元调度

王跃岗, 车阿大

(西北工业大学 管理学院, 陕西 西安 710072)

摘要:为解决传统智能优化算法在求解自动化制造单元调度问题时易出现早熟、陷入局部最优等问题,提出了混合量子进化算法。该算法采用序列染色体和量子染色体相结合的混合编解码策略,利用构造启发式算法生成初始种群,避免了不可行解的大量产生;为提高算法的优化性能,进化过程中采用序列染色体和量子染色体同步交叉变异策略,并引入了基于图论的不可行解修复策略。通过与遗传算法、基本量子进化算法的对比实验,验证了算法的有效性。

关键词:自动化制造单元;调度;混合量子进化算法;构造启发式算法

中图分类号:F224

文献标志码:A

Robotic cells scheduling based on hybrid quantum evolutionary algorithm

WANG Yue-gang, CHE A-da

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

Abstract: To overcome premature convergence and local optima of traditional intelligent algorithms on solving the robotic cell scheduling problem, an Hybrid Quantum Evolutionary Algorithm (HQEA) was proposed. In this algorithm, a mixed coding scheme combining the sequence chromosome with the quantum chromosome was developed, and a new constructive heuristic algorithm was designed to generate initial populations to avoid the generation of a great quantity of infeasible solutions. To increase the optimization property of the algorithm, the synchronized crossover and mutation operation strategy was applied. In addition, repaired strategies of infeasible solutions based on the graph theory were also proposed. Through contrast test between Genetic Algorithm (GA) and basic Quantum Evolutionary Algorithm (QEA), the effectiveness of HQEA was validated.

Key words: robotic cell; scheduling; hybrid quantum evolutionary algorithm; constructive heuristic algorithm

0 引言

随着科学技术的不断发展,现代化生产车间的调度和管理工作的复杂性也在不断增加。作为一类中小型先进自动化制造系统,自动化制造单元(robotic cells)^[1]的应用日趋广泛。与经典的流水车间和单件车间调度问题不同,在自动化制造单元中,物料运送机器人作为输送设备被所有工作站所共享,其调度过程不仅要合理安排工件的加工作业,还需

要有效规划机器人搬运作业的顺序。不难看出,机器人物料搬运作业的合理规划是影响整个自动化生产系统效率的关键^[2-3]。因此,如何权衡机器人和各工作站资源,对机器人搬运顺序进行合理的调度和规划,进而保证产品质量和生产计划按时完成,已成为现代企业自动化制造单元管理中迫切需要解决的问题。

本文研究的是一类带有时间窗口的自动化制造单元调度问题,即工件在工作站上的加工时间必须

收稿日期:2012-05-02;修订日期:2012-07-14。Received 02 May 2012; accepted 14 July 2012.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71071129,71101016);西北工业大学研究生创业种子基金资助项目(z2012175,z2012174)。**Foundation items:** Project supported by the National Natural Science Foundation, China (No. 71071129,71101016), and the Graduate Starting Seed Fund of Northwestern Polytechnical University, China (No. z2012175,z2012174).

在给定的上下限时间范围内。带有时间窗口的自动化制造单元在集束型半导体制造系统(Cluster tool)^[4-5]、印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)电镀生产线^[6]、钢铁冶炼生产线^[7]等行业中有着广泛的应用。Lei 和 Wang^[8]证明了此类自动化制造单元调度问题为强 NP 难题。由于自动化制造单元调度问题的强 NP 性,精确算法难以用来解决此类大规模调度问题。因此,国内外研究者研究了自动化制造单元调度问题的启发式方法,如遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、模拟退火算法、禁忌搜索算法等。Lim^[9]提出了基于机器人搬运顺序编码的遗传算法来求解自动化制造单元调度问题。杨广文等^[10]提出了一种求解自动化制造单元调度问题的模拟退火算法。周支立和汪应洛^[11]则为自动化制造单元调度问题提出了一种基于线性规划模型和禁忌表的搜索算法。李鹏等^[12]则采用基于工件加工时间编码的混沌遗传算法来求解自动化制造单元调度问题,利用混沌初始化技术来生成高效的初始种群。晏鹏宇等^[13]则改进了 Lim 所提出的遗传算法。由于加工时间窗口的约束,使得本文所研究问题的可行解空间非常狭窄。上述文献中提出的遗传算法等智能算法在求解该问题的过程中没有较好地解决如何产生高效的初始种群解,以及如何进行不可行解的修复等问题,并且上述算法在全局搜索能力和解的多样性方面仍有一定的局限性,求解时容易出现早熟收敛、陷入局部最优解等现象。

量子进化算法^[14-16](Quantum Evolutionary Algorithm, QEA)因为其编码的特殊性,一个量子染色体可以表达多个模态解的叠加,使其个体多样,探索的解空间大,从而使 QEA 具有全局搜索能力强、不易陷入局部最优解、求解效率高等优点。基于 QEA 的优越性,它已被应用于求解组合优化问题,如旅行商问题(Traveling Salesman Problem, TSP)^[17]、背包问题^[18]、车辆路径问题^[15]和电力系统优化调度^[19-22],并取得了很好的效果。目前,有关 QEA 在生产调度中的研究并不多。Wang 等^[23]首次将 QEA 应用于流水车间调度问题的研究,为后续相关研究奠定了基础;傅家旗等^[24]和王小芹等^[25]也分别为流水车间调度问题提出了有效的量子进化算法;Niu^[26]等将一种基于实数编码的 QEA 应用到混合流水车间调度问题中;Zheng^[27]等提出了一种基于微分进化策略的 QEA,并应用到流水车间调度问题上;于艾清等^[28]将混合 QEA 应用于并

行机拖期调度问题中;Gu 等^[29-30]先后将并行 QEA 和协同 QEA 应用于随机单间车间的调度中。从上述文献可看出,目前 QEA 在相关领域的研究主要集中在不包含物料搬运机器人的流水车间和车间作业调度问题上,而针对自动化制造单元调度问题,目前尚未发现有相关文献报道。

本文针对传统智能算法容易出现早熟收敛、陷入局部最优等现象,提出了混合量子进化算法来求解自动化制造单元调度问题。该算法采用序列染色体和量子染色体相结合的混合编解码策略,运用移位解码方式实现量子染色体与序列染色体之间的转换,解决了单纯使用量子染色体编码时容易出现染色体编码长度过大的问题;利用基于禁止区间法的构造启发式算法来生成初始种群,保证初始种群的质量;在进化过程中,采用序列染色体和量子染色体同步交叉变异策略,在保证解的多样性的同时,避免了冗余迭代、陷入局部最优等现象。另外,该算法还采用了基于图论的不可行解修复机制。最后,通过基准算例和随机算例的测试实验,验证了算法的有效性。

1 问题描述及数学模型建立

带有时间窗口的自动化制造单元由一系列执行不同工序作业的 n 个工作站和一个物料搬运机器人组成,工作站 0 和工作站 $n+1$ 分别为装载和卸载工作站,如图 1 所示。工件首先从装载站进入系统,然后按照一定的加工顺序进入各个工作站进行加工处理,最后从卸载站离开。工作站之间没有缓冲存储站,工件在前一工作站完成加工后必须立刻被物料搬运机器人搬运至下一工作站进行加工。工件在每个工作站上的加工时间必须在给定的时间窗口下限和上限内。当所有工序都完成后,机器人将工件搬运到卸载工作站上进行卸载。

在批量生产模式下,自动化制造单元通常以周期性(cyclic)的方式进行运作。相邻两个工件的出产时间间隔被称为生产节拍或周期长度(cycle time)。机器人每隔一个周期长度重复相同的搬运作业,每个周期中有且仅有一个工件进入系统、一个工件离开系统。因此,周期长度决定了整个制造单元的生产效率。

为方便定义模型,定义相关参数如下:

n 为自动化制造单元中加工工作站的总数,工作站 0 和工作站 $n+1$ 分别为装载和卸载工作站;

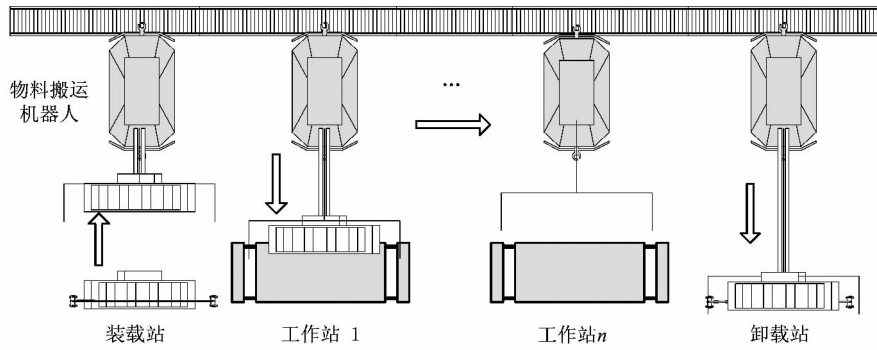


图1 自动化制造单元示例

搬运操作 i 指机器人将工件从工作站 i 上卸载,然后将该工件从工作站 i 搬运到工作站 $i+1$,并将其装载在工作站 $i+1$ 上的整个作业活动, $i=0, 1, 2, \dots, n$;

a_i 和 b_i 分别表示工件在工作站 i 上的加工时间下限值和上限值, $i=1, 2, \dots, n$;

d_i 为机器人完成搬运操作 i 所需时间, $i=0, 1, 2, \dots, n$;

$c_{i,j}$ 为机器人从工作站 i 空驶到工作站 j 所需时间, $i, j=0, 1, 2, \dots, n$ 。

该问题的决策变量为:

T 为周期长度;

s_i 为搬运操作 i 的开始时间, $i=0, 1, \dots, n$ 。

给定一组机器人搬运作业顺序,带有时间窗口的自动化制造单元调度模型可建模为^[9, 13]:

$$\min T.$$

$$\text{s. t.} \quad a_i \leq s_i - (s_{i-1} + d_{i-1}) \leq b_i, \\ s_i > s_{i-1}, 1 \leq i \leq n; \quad (1)$$

$$a_i \leq T + s_i - (s_{i-1} + d_{i-1}) \leq b_i, \\ s_i < s_{i-1}, 1 \leq i \leq n; \quad (2)$$

$$s_i + d_i + c_{i+1,j} \leq s_j, \\ s_i < s_j, 1 \leq i \leq j \leq n; \quad (3)$$

$$T \geq s_i + d_i + c_{i+1,0}, 0 \leq i \leq n; \quad (4)$$

$$s_i \geq 0, T \geq 0, 0 \leq i \leq n. \quad (5)$$

该模型的目标为最小化周期长度 T 。式(1)和式(2)表示工件在工作站上的实际加工时间必须在给定的时间窗口的上下限内。当 $s_i > s_{i-1}$ 时,同一工件的搬运作业 $i-1$ 和 i 在同一周期内执行,因此工件的实际加工时间为 $s_i - (s_{i-1} + d_{i-1})$;当 $s_i < s_{i-1}$ 时,同一工件的搬运作业 $i-1$ 和搬运作业 i 为跨周期

作业,因此工件的实际加工时间为 $T + s_i - (s_{i-1} + d_{i-1})$ 。式(3)表示若 $s_i < s_j$,则为避免机器人搬运作业时发生冲突,搬运作业 j 必须在机器人完成搬运作业 i ,并从工作站 $i+1$ 空驶到工作站 j 之后才能开始;式(4)表示新周期必须在机器人完成最后一次搬运作业,并空驶回装载站后才能开始;式(5)为非负约束。

给定一组机器人搬运作业顺序,通过求解式(1)~式(5),即可获知该问题的决策变量。但由于工件的实际加工时间必须在预先给定的下限值和上限值内,使得大部分机器人搬运作业顺序为不可行解。针对上述模型的这一缺陷,本文从工件加工时间的角度提出该问题的另一类数学模型。定义工件在工作站 i 上的加工时间为 t_i , $1 \leq i \leq n$ 。当 t_i 为一固定值时,Levner 等^[31]利用禁止区间法来求解此类问题,并证明该问题的计算复杂为 $O(n^3 \log n)$,即多项式计算时间可解。因此,从禁止区间法的角度,自动化制造单元调度问题也可建模成周期长度 T 的一系列禁止区间:

$$\min T.$$

$$\text{s. t.} \quad a_i \leq t_i \leq b_i, 1 \leq i \leq n; \quad (6)$$

$$T \notin (-\infty, \beta) \cup \bigcup_{k=1}^n \bigcup_{j=0}^{n-1} \bigcup_{i=j+1}^n \\ ((Z_i - Z_j - d_j - c_{j+1,i})/k, \\ (Z_i - Z_j + d_i + c_{i+1,j})/k). \quad (7)$$

其中:

$$\beta = \max_{1 \leq i \leq n} (t_i + d_i + c_{i+1,i-1} + d_{i-1}); \quad (8)$$

$$Z_i = \sum_{j=1}^i (d_{j-1} + t_j), 1 \leq i \leq n. \quad (9)$$

上述模型的优点在于,当工件在工作站上的加工时间都落在其对应的下限值和上限值内时,根据

式(7)~式(9)可直接计算出最优调度方案。

2 混合量子进化算法设计

2.1 编码和解码方式

量子染色体将量子比特(Q-bit)的概率幅表示方式应用于染色体的编码。这样的编码方式解决大规模组合优化问题时易导致染色体过长,进而导致算法的搜索效率下降。为了解决传统的 QEA 在编解码过程中的上述缺陷,本文采用序列染色体和量子染色体相结合的混合编解码策略。

序列染色体应用一组十进制的数字来表示机器人搬运作业顺序。设 $Y=(x_0, x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为一序列染色体,则 x_i 表示机器人第 i 次执行的搬运作业号。例如 $Y=(0, 2, 1, 3)$,则表示机器人的搬运顺序为:作业 0→作业 2→作业 1→作业 3。

量子染色体采用基于量子位的概率幅编码方式。含有 n 个量子位的染色体可定义为 $\begin{bmatrix} \alpha_1 \cdots \alpha_i \cdots \alpha_n \\ \beta_1 \cdots \beta_i \cdots \beta_n \end{bmatrix}$,其中 α_i 和 β_i 是复数,为量子位对应态的概率幅; $|\alpha_i|^2$ 和 $|\beta_i|^2$ 分别表示第 i 个量子位塌陷为 $|0\rangle$ 态和 $|1\rangle$ 态的概率,并满足归一化条件 $|\alpha_i|^2 + |\beta_i|^2 = 1, i=1, 2, \dots, n$,每个量子位可以表示两种量子态的任意叠加,种群的多样性在任意量子叠加态的形式下得以体现。当 $|\alpha|^2$ 或 $|\beta|^2$ 趋近于 1 或 0 时,多样性将逐渐消失,量子染色体会收敛到一个确定的状态。

本文采用二进制移位解码法^[24]来实现量子染色体和序列染色体之间的转换。移位解码是以父代序列染色体为参考模板,依据量子染色体转换成的二进制串进行解码,得到子代序列染色体的编码转换方式。其基本步骤如下:首先生成 n 个大小在 $[0, 1]$ 之间的随机数,分别将其与量子染色体 $\begin{bmatrix} \alpha_1 \cdots \alpha_i \cdots \alpha_n \\ \beta_1 \cdots \beta_i \cdots \beta_n \end{bmatrix}$ 中对应基因位的 $|\alpha_i|^2$ 值进行比较,当其小于等于 $|\alpha_i|^2$ 时,相应位的二进制码取 0;否则取 1。以此类推,可获得一组长度为 n 的二进制串。解码时定义二进制串中 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的基因组成子代个体,取出的基因即从父代中剔除,以进行下一位的选择,末位直接保留到子代。例如,设父代序列染色体(0, 2, 1, 3, 4),同时随机生成一组与之对应的二进制串(0, 0, 1, 1, 0),进行移位解码后的结果如表 1 所示。可以

看出,移位解码本身就是对父代种群的一种变异操作。

表 1 移位解码法

父代	0	2	1	3	4
二进制码	0	0	1	1	0
子代	0	2	3	4	1

2.2 初始种群的生成

由于工件在工作站上加工时间的不确定性,在机器人能力、工作站能力等约束条件下,传统的随机生成机器人搬运作业顺序的方式很容易产生大量不可行解。为了能够获得高质量的初始种群,本文采用随机生成工件加工时间的方式来生成初始种群。该方法首先根据工件在工作站上的加工时间下限值和上限值,随机产生满足式(6)的工件在各个工作站上的实际加工时间 t_i ,然后根据式(7)~式(9)求得周期长度 T 的各禁止区间的上下界点,并根据各区间的上下界点对发生重叠的部分进行合并,合并后的禁止区间是相互独立的。根据文献[2]和文献[31],此时禁止区间集合中第一个禁止区间的上界点即为最优解。不断重复上述过程,直至达到所规定的初始种群数量 N 为止。

因为量子染色体以概率幅形式表示其所对应的序列染色体存在的概率,所以为了表达初始种群中各序列染色体以等概率的形式存在,本文将初始序列染色体所对应的各个量子位塌陷为任一量子态的概率均设为 $\frac{1}{2}$,即 $|\alpha_i|^2 = |\beta_i|^2 = \frac{1}{2}, i=1, 2, \dots, n$ 。

2.3 染色体的进化操作

本文采用序列染色体和量子染色体同步交叉变异策略。在对序列染色体进行交叉和变异的同时,为保证量子染色体以概率幅形式表示解的叠加性不失真,其对应的量子染色体也要进行等位的变异和交叉操作。本文通过序列染色体和量子染色体的两点交叉和反转变异操作^[25]来增强算法的全局寻优能力,避免由于单纯移位解码造成的染色体前后端序列难以实现互换而出现局部最优的现象。

两点交叉的基本步骤如下:任选两个父代染色体 F_1 和 F_2 并随机选取两个基因位 i 和 j ($i, j \in [1, n]$),如图 2a 阴影部分所示,去除父代 F_2 中包含的父代 F_1 中阴影部分基因以及 F_1 中包含的 F_2 中阴影部分基因,分别将 $F_2(F_1)$ 中阴影部分两个基因

保持的原有相对顺序放置到已去除阴影部分基因位的父代染色体 $F_1(F_2)$ 的前端和后端,形成新的子代染色体 z_1, z_2 ,如图 2b 所示。

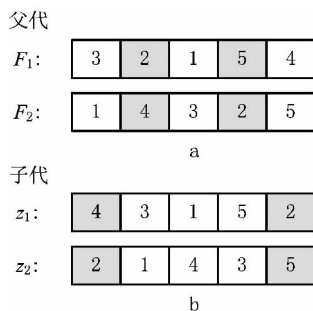


图2 染色体两点交叉

反转变异的基本步骤如下:随机选取父代染色体中的两个基因位,如图 3a 的阴影部分所示,对这两个基因位之间的所有基因位实施颠倒排列,从而产生如图 3b 所示的新的子代染色体。

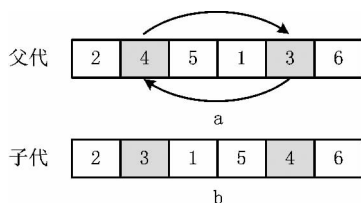


图3 染色体反转变异

除上述序列染色体和量子染色体的变异和交叉操作外,为避免由于量子概率幅的不断旋转更新而出现算法过早收敛的现象,进一步对量子位进行突变操作,即随机产生一个整数 $q(q \in [1, n])$,将位置 q 的量子比特概率幅 α 和 β 的值进行互换。

2.4 染色体的适应度计算及选择

进化过程中给定一组机器人搬运作业顺序,通过求解式(1)~式(5)即可获知对应的调度方案。由于式(1)~式(5)都可以写成 $s_i - s_j \geq l_{i,j} + h_{i,j}T$ 的形式,其中 $h_{i,j} = 1$ 或者 -1 ,可用图论方法来求解式(1)~式(5),利用有向图中的最大路径法^[32]求出最优周期长度 T 以及最优调度方案。适应度函数定义为^[12] $Fit = s/T$, s 为一固定常数。从适应度函数不难看出, Fit 值越大,周期长度 T 越小,该调度方案也就越好。

在求得适应度值的基础上,为了尽可能地使优良个体参与到种群的进化中,采用整体排序选择法^[24]来选择进化种群。该方法的基本思想是将所有父代和子代个体作为一个被选整体,并从中按适

应度值从大到小原则选择规定数量的个体作为下一代的进化群体。

2.5 不可行解的修复

由于进化过程中的随机性,使得新产生的序列染色体往往会因不满足时间窗口约束或机器人能力约束等而成为不可行解,为保证算法在进化过程中的效率,本文采用不可行解修复策略。

如上所述,给定一组机器人搬运作业顺序,利用有向图中的最大路径法来求解式(1)~式(5),并求得最优周期长度 T 以及最优调度方案。根据文献^[33]可知,当有向图中出现正回路时,式(1)~式(5)无解,对应的机器人搬运作业顺序为不可行解。本文的修复策略就是在有向图中找出由于约束条件不满足而形成正回路的节点,在出现正回路的节点中任意选择两个节点进行搬运顺序的互换,破坏掉现有的正回路组合,形成新的有向图。如果新有向图仍然存在正回路,则重新选择其中两个节点,再次进行其顺序互换。当然,有可能经过多次修复仍存在正回路的可能。因此,为保证算法的求解效率,设定了固定的修复次数 cnt ,对达到修复次数但仍为不可行解的染色体,将其剔除出进化群体。

2.6 量子位的旋转更新

采用量子旋转门进行量子概率幅的更新,通过更新量子概率幅来指引算法的整体进化方向。量子旋转门可描述为^[34]:

$$Q(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}. \quad (10)$$

式中 θ 为旋转角。量子旋转门可实现任意叠加态之间的转换,具有高度并行性。对含有 n 个工作站的制造单元调度问题,如第 j 代解群中的某量子染色体为 $\begin{bmatrix} \alpha_1^j & \alpha_2^j & \dots & \alpha_n^j \\ \beta_1^j & \beta_2^j & \dots & \beta_n^j \end{bmatrix}$,根据式(10)的量子旋转门对其基因位 i 进行旋转操作:

$$\begin{bmatrix} \alpha_i^{j+1} \\ \beta_i^{j+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\theta_i^j) & -\sin(\Delta\theta_i^j) \\ \sin(\Delta\theta_i^j) & \cos(\Delta\theta_i^j) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_i^j \\ \beta_i^j \end{bmatrix}. \quad (11)$$

式中 $\Delta\theta_i^j$ 为旋转角度, $\Delta\theta_i^j$ 的计算公式在借鉴文献^[25]的基础上,作了如下进一步改进:

$$\Delta\theta_i^j = \text{sgn}(d) \text{sgn}(\alpha_i^j \beta_i^j) \theta_0 \exp\left(\frac{-|\beta_i^j|}{|\alpha_i^j| + \gamma}\right). \quad (12)$$

式中:参数 θ_0 为初始旋转角, γ 为进化尺度, θ_0 和 γ 通过控制旋转角的大小来控制算法的收敛速度, $\theta_0 \exp\left(\frac{-|\beta_i^j|}{|\alpha_i^j| + \gamma}\right)$ 控制算法的整体进化幅度,可以很

好地避免因旋转跨度过大而导致优良基因的丢失。符号函数 $\text{sgn}(\alpha_i^t \beta_i^t)$ 和 $\text{sgn}(d)$ 共同控制旋转角的方向,以确保算法收敛。 d 是当前最优解的各基因位对应的工序号与当前个体各基因位的工序号差值。例如:种群中最优个体(3,2,1),当前个体(2,1,3),则这三个基因位对应的 d 值分别为 1,1,-2。

2.7 算法流程及复杂度计算

根据以上分析本文提出的混合量子进化算法的流程如下:

步骤 1 参数初始化,设定最大迭代次数 $MaxGen$,初始群体规模 N ,进化种群规模 $SmpSize$,初始旋转角 θ_0 ,进化尺度 γ ,交叉率 p_c ,变异率 p_m ,不可行解修复次数 cnt 。

步骤 2 种群初始化,通过构造启发式算法生成初始种群,同时进行量子概率幅的初始化。

步骤 3 对已生成的解群进行首次移位解码,产生子代种群。

步骤 4 对新个体进行可行性检验,并修复不可行解。

步骤 5 变异和交叉操作。

步骤 6 种群个体评价、修复与选择,对父代和子代群体中的每个染色体进行适应度评价,并采用冒泡排序从种群中选出最优染色体。

步骤 7 量子门的旋转更新。

步骤 8 根据旋转后新的量子概率幅,进行移位解码,产生新的子代。

步骤 9 进化代数 $t=t+1$,当达到最大迭代次数 $MaxGen$ 时,输出最满意解,算法结束;否则,转步骤 5。

上述算法流程中,步骤 1~步骤 4 为算法参数和种群初始化过程,步骤 5~步骤 9 为量子进化过程,且需要重复执行 $MaxGen$ 次。步骤 2 为产生 N 个初始个体,由文献[2]可知,生成单个初始个体需要的计算时间为 $O(n^3 \log n)$,因此步骤 2 的计算复杂度为 $O(N n^3 \log n)$;步骤 3 为初始种群的移位解码,计算时间为 $O(3Nn)$;步骤 4 为个体可行性检验及不可行个体修复,由文献[32]可知,个体检验的计算复杂度为 $O(n^4 (4n)^2)$,又根据文献[33],对不可行个体进行 cnt 次修复的计算复杂度为 $O(cnt n^2)$,因此步骤 4 在最差情况下对 N 个新个体进行检验和修复的计算复杂度为 $O(16N n^6 + N cnt n^2)$;由此,步骤 1~步骤 4 的计算复杂度为 $O(N n^3 \log n + 3Nn + N 16n^6 + N cnt n^2)$ 。步骤 5~步骤 9 为量

子进化过程,其中步骤 5 为交叉变异过程,由于序列染色体和量子染色体同步交叉变异,对种群中 $SmpSize$ 个个体交叉变异的计算复杂度为 $O(SmpSize 2n)$;在步骤 6 中,首先对新个体进行可行性检验并修复不可行解,参照步骤 4,其计算复杂度为 $O(16SmpSize n^6 + 2SmpSize cnt n^2)$,其次对种群个体进行冒泡排序,其计算复杂度为 $O(2SmpSize \log 2SmpSize)$,则步骤 6 的计算复杂度为 $O(16SmpSize n^6 + 2SmpSize cnt n^2 + 2SmpSize \log 2SmpSize)$;步骤 7 和步骤 8 分别为量子旋转更新和移位解码操作,其计算复杂度分别为 $O((2SmpSize-1)n)$ 和 $O(3n 2SmpSize)$;步骤 9 采用冒泡排序选择较优进化种群进入下一代进化,其计算复杂度为 $O(4SmpSize \log 4SmpSize)$ 。由于在量子进化过程中,步骤 5~步骤 9 需要重复执行 $MaxGen$ 次,因此量子进化过程的计算复杂度为 $O(MaxGen (SmpSize 2n + 16SmpSize n^6 + 2SmpSize cnt n^2 + 2SmpSize \log 2SmpSize + (2SmpSize-1)n + 3n 2SmpSize + 4SmpSize \log 4SmpSize))$,可简化为 $O(MaxGen (16SmpSize n^6))$ 。综上,本文提出的算法计算复杂度为 $O(16N n^6 + MaxGen(16SmpSize n^6))$ 。

3 算法验证

为验证算法的有效性,分别对 6 个基准算例和 6 组随机算例进行测试,并与 GA^[9] 和基本型 QEA 进行实验对比。进一步与 ILOG CPLEX(V11.2) 优化软件的测试结果进行比较。本文算法用 C++ 进行编程,所有的测试均在 CPU 为 2.93 GHz 的 PC 上进行。

3.1 基准案例的验证

所测试的 6 个基准算例为 phillips, lignel, ligne2, bolb, bo2b 和 min,其数据来源于文献[32, 35, 36]。这些算例是目前自动化制造单元调度领域应用最为广泛的基准案例。在进化过程中,参数的设置对算法的优化性能具有极大的影响。当种群规模 $SmpSize$ 较大时,算法搜索空间大,全局寻优的能力强,但收敛时间将会很长,当规模较小时则相反。交叉率 P_c 较大时可以增强搜索能力,但易出现破坏优良个体、降低收敛速度、影响进化效率的情况,而较小时其结果则相反。变异率 P_m 较大时群体多样性将会得到有效提高,全局寻优能力较强,缺点是收敛速度慢,易破坏优良个体。不可行解修复

次数 cnt 较大时邻域搜索能力较强,局部寻优能力显著,但运行时间比较长。进化尺度 γ 和初始旋转角度 θ_0 控制量子旋转门的旋转跨度,其取值较大时收敛较快,但易遗漏种群中的部分优良基因,其取值较小时局部搜索能力较强,但收敛速度较慢。结合上述参数对算法性能的影响,通过综合考虑和实验测试,本算法进化参数的设置为:初始种群规模 N

$=100$,进化种群规模 $SmpSize=100$,交叉率 $P_c=0.3$,变异率 $P_m=0.7$,进化尺度 $\gamma=0.01$,初始旋转角度 $\theta_0=0.05\pi$,不可行解的修复次数 $cnt=4$,最大迭代次数 $MaxGen=500$ 。GA 和 QEA 的基本参数设置为: $N=1\ 000$,其他相关参数与 HQEA 一致。本文算法与 GA 和 QEA 在基准算例上的比较结果如表 2 所示。

表 2 HQEA 和 GA、QEA 求解结果对比

基准算例	CPLEX	HQEA			GA			QEA		
	所求最优解	最满意解	出现最满意解代数	运行时间/s	最满意解	出现最满意解代数	运行时间/s	最满意解	出现最满意解代数	运行时间/s
phillips	521.0	521.0	23	112	887.1	322	89	998.1	242	72
bo1b	281.9	281.9	19	127	342.7	279	92	327.1	209	46
bo2b	279.3	279.3	37	99	329.2	283	78	313.3	231	41
ligne1	392.0	392.0	7	128	483.3	311	86	411.0	217	30
ligne2	712.0	712.0	18	311	814.0	292	99	876.5	289	78
min	287.0	287.0	1	60	387.0	237	43	296.4	192	22

由于采用了构造启发式初始种群生成法,初始解群的可行率为 100%,这在很大程度上提高了算法的进化效率。由表 2 可以看出,HQEA 算法在 40 代以内就可以求解出 6 个基准案例的最满意解。通过与 ILOG CPLEX(V11.2),GA 和 QEA 的实验对比发现,对于所有的基准例子,本文算法均找到了最优解,而 GA 和 QEA 均没有找到基准算例的最优解,对比结果充分验证了本文算法的有效性。

3.2 随机算例的验证

为进一步验证算法的有效性,对 6 组大规模随机算例进行了测试,并与 ILOG CPLEX(V11.2)优化软件的测试结果进行对比。6 组随机算例中工作站个数分别设定为 12, 14, 16, 18, 20 和 22。随机算例数据的生成方式为: $a_i=30+U(0,40)$, $b_i=2a_i+U(0,250)$, $c_{i,i+1}=c_{i+1,i}=2+U(0,3)$, $c_{i,j}=c_{j,i}=\sum_{k=i}^{j-1}c_{k,k+1}$, $d_i=c_{i,i+1}+12$, $0\leq i<j\leq n+1$, 其中 $U(a,b)$ 为一个 $a\sim b$ 之间的任意实数。每组算例均测试 10 组。

设定初始种群规模和进化种群规模均为 100,最大迭代次数 100,由于随机算例中时间窗口的上下限跨度较大,为了提升全局寻优能力,使算法尽快找到最满意解,设置交叉率 $P_c=0.8$,变异率 $P_m=0.9$,对不可行解修复的次数 $cnt=15$ 。其他参数与

基准算例中所设参数一致。同样用 ILOG CPLEX(V11.2)对上述 6 组随机算例进行测试,并得出表 3 的测试对比结果。根据表 3 的测试对比结果,可得出 HQEA 对 6 组随机算例所求最满意解的误差趋势图,如图 4 所示。

表 3 HQEA 和 ILOG CPLEX(V11.2) 的测试结果对比

工作站个数	HQEA			ILOG CPLEX(V11.2)	
	与最优解平均值的误差(%)	最满意解平均值	平均运行时间/s	最优解平均值	平均运行时间/s
12	0.0	323.0	107.2	323.0	45.2
14	0.0	365.0	252.1	365.0	117.6
16	0.9	451.0	318.4	449.0	495.4
18	0.7	549.0	433.5	545.0	862.7
20	1.6	715	402.0	703.1	1023.4
22	2.5	799.0	535.3	779.5	1547.6

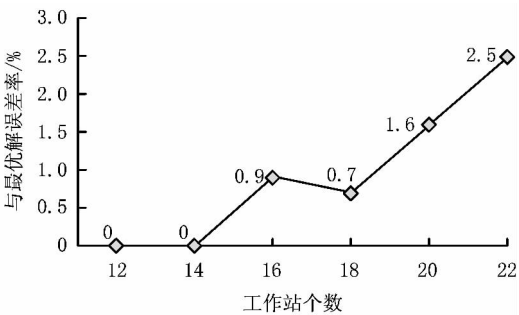


图4 HQEA对随机算例所求最满意解的误差趋势图

从表 3 和图 4 可以看出,随着调度问题规模的不断加大,HQEA 所求得的最满意解的误差率虽然有所增加,但是却始终保持在 5% 的可接受范围内,也就是说误差并不显著。反观求解的速度和效率,HQEA 随着问题规模的不断增大始终保持着较好的求解速度和效率,而 CPLEX 优化软件在问题规模较大时其求解效率明显下降,甚至会出现由于所求问题规模过大而导致 CPLEX 长时间无法求出最优解的现象。

4 结束语

本文针对带有时间窗口的自动化制造单元调度问题,提出了混合量子进化算法。通过构造启发式算法生成较高质量的初始种群,解决了常规随机生成方式无法保证初始解群可行性的问题,从而提高了算法的后续优化性能和求解效率。运用序列染色体和量子染色体相结合的混合编解码策略,在保证解的多样性的同时,解决了传统量子进化算法在求解大规模调度问题时易出现编码长度过大的问题。此外,文中提出的混合交叉变异策略进一步增强了算法的全局搜索能力;采用基于图论的不可行解修复策略,提高了进化种群中可行解的比例,增强了算法的局部搜索能力,保证了其求解效率。通过与 GA 和基本 QEA 的实验对比,验证了所提出的算法的有效性。

参考文献:

- [1] DAWANDE M, GEISMAR H N, SETHI S P, et al. Sequencing and scheduling in robotic cells: recent developments [J]. *Journal of Scheduling*, 2005, 8(5):387-426.
- [2] CHE Ada, YAN Pengyu, YANG Naiding. Polynomial algorithm for cyclic scheduling of a complex no-wait robotic production system [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2007, 13(8): 1616-1623(in Chinese). [车阿大, 晏鹏宇, 杨乃定. 复杂无等待自动化制造系统的调度算法研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2007, 13(8): 1616-1623.]
- [3] ZHAO Zhenhong, XIAO Tianyuan. Research on modeling and analysis method for robot manufacturing cell[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2011, 21(11): 20-24(in Chinese). [赵振宏, 肖田元. 机器人制造单元的建模与分析方法研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2011, 21(11): 20-24.]
- [4] KIM J H, LEE T E. Schedulability analysis of time-constrained cluster tool with bounded time variation by an extended Petri net [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2008, 5(3): 490-503.
- [5] WU Naiqi, CHU Chengbin, CHU Feng, et al. A petri net method for schedulability and scheduling problems in single-arm cluster tools with wafer residency time constraints [J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2008, 21(2): 224-237.
- [6] CHE Ada, CHU Chengbin, CHU Feng. Multicyclic hoist scheduling with constant processing times [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, 18(1): 69-80.
- [7] TANG Lixin, XIE Xie, LIU Jiyin. Scheduling of single crane in batch annealing process [J]. *Computers & Operations Research*, 2009, 36(10): 2853-2865.
- [8] LEI L, WANG T J. A proof: the cyclic hoist scheduling problem is NP-hard [M]. New Brunswick, N. J., USA: Rutgers University, 1989: 89-0016.
- [9] LIM J M. A genetic algorithm for a single hoist scheduling in the printed-circuit-board electroplating line [J]. *Computer and Industrial Engineering*, 1997, 33(3/4): 789-792.
- [10] YANG Guangwen, JU Dapeng, ZHENG Weimin, et al. Solving multiple Hoist scheduling problems by use of simulated annealing[J]. *Journal of Software*, 2001, 12(1): 11-17.
- [11] ZHOU Zhili, WANG Yingluo. A search algorithm for cyclic scheduling of two hoists without overlapping partition [J]. *Systems Engineering*, 2007, 25(4): 104-109(in Chinese). [周支立, 汪应洛. 无重叠区的两抓钩周期性排序问题的一个搜索求解法[J]. *系统工程*, 2007, 25(4): 104-109.]
- [12] LI Peng, CHE Ada. Robotic cells scheduling based on chaos genetic algorithm [J]. *Systems Engineering*, 2008, 26(11): 75-80(in Chinese). [李 鹏, 车阿大. 基于混沌遗传算法的自动化生产单元调度方法研究[J]. *系统工程*, 2008, 26(11): 75-80.]
- [13] YAN Pengyu, CHE Ada, LI Peng, et al. Improved genetic algorithm for robotic cell scheduling problem with flexible processing times [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2010, 16(2): 404-410(in Chinese). [晏鹏宇, 车阿大, 李 鹏, 等. 具有柔性加工时间的机器人制造单元调度问题改进遗传算法[J]. *计算机集成制造系统*, 2010, 16(2): 404-410.]
- [14] WANG Ling. Advances in quantum-inspired evolutionary algorithms [J]. *Control and Decision*, 2008, 23(12): 1321-1326(in Chinese). [王 凌. 量子进化算法研究进展[J]. *控制与决策*, 2008, 23(12): 1321-1326.]
- [15] ZHAO Yanwei, PENG Dianjun, ZHANG Jingling, et al. Quantum evolutionary algorithm for capacitated vehicle routing problem [J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2009, 29(2): 159-166(in Chinese). [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): 159-166.]
- [16] QIN Chaoyong, ZHENG Jianguo, ZHU Jiajun. Real-coded quantum-inspired evolutionary algorithm and its convergence [J]. *Control and Decision*, 2009, 24(6): 854-858(in Chinese). [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): 854-858.]

- [17] NARAYANAN A, Moore M. Quantum-inspired genetic algorithms[C]// Proceedings of 1996 IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICEC96). Washington, D. C., USA: IEEE Press, 1996: 61-66.
- [18] HAN K H, KIM J H. Quantum-inspired evolutionary algorithm for a class of combinatorial optimization [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(6): 580-593.
- [19] LAU T W, CHUNG C Y, WONG K P, et al. Quantum-Inspired Evolutionary Algorithm Approach for Unit Commitment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3): 1503-1512.
- [20] LU Songfeng, SUN Chengfu, LU Zhengding. 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.
- [21] LIAO Gwoching. 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.
- [22] ZHANG Zhisheng. Quantum-behaved particle swarm optimization algorithm for economic load dispatch of power system [J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(2): 1800-1803.
- [23] WANG Ling, WU Hao, ZHENG Dazhong. A quantum-inspired genetic algorithm for scheduling problems [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2005, 3612: 417-423.
- [24] FU Jiaqi, YE Chunming, ZHAO Weimin. Application of hybrid quantum algorithm in production scheduling [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2009, 31(6): 557-561(in Chinese). [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.]
- [25] WANG Xiaojin, WANG Wanliang, XU Xinli. Hybrid quantum inspired evolutionary algorithm for flow-shop scheduling problem [J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2009, 26(9): 5-8(in Chinese). [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.]
- [26] NIU Qun, ZHOU Taijin, MA Shiwei. A quantum-inspired immune algorithm for hybrid Flow-Shop with make span criterion [J]. Journal of Universal Computer Science, 2009, 15(4): 765-785.
- [27] ZHENG Tianmin, 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.
- [28] YU Aiqing, GUO Ping, GU Xingsheng. A hybrid quantum-inspired evolutionary programming and its application in tardiness identical parallel machines scheduling [J]. Journal of East China University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2009, 35(1): 125-131(in Chinese). [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.]
- [29] GU Jinwei, GU Xingsheng, GU Manzhan. A novel parallel quantum genetic algorithm for stochastic Job-Shop scheduling [J]. Journal of Mathematical Analysis and Application, 2009, 355(1): 63-81.
- [30] GU Jinwei, GU Manzhan, CAO Cuiwen, 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.
- [31] LEVNER E, KATS V, LEVIT V E. An improved algorithm for cyclic scheduling in a robotic cell [J]. European Journal of Operational Research, 1997, 97(3): 500-508.
- [32] CHEN Haoxun, CHU Chengbin, PROTH J M. Cyclic scheduling of a hoist with time window constraints [J]. IEEE Transactions Robotics and Automation, 1998, 14(1): 144-152.
- [33] YAN Pengyu, CHE Ada, YANG Naiding, et al. A tabu search algorithm with solution space partition and repairing procedure for cyclic robotic cell scheduling problem [J]. International Journal of Production Research, published online, DOI: 10.1080/00207543.2011.645953.
- [34] YANG Shuyuan, JIAO Licheng, LIU Fang. The quantum evolutionary algorithm [J]. Chinese Journal of Engineering Mathematics, 2006, 23(2): 235-246(in Chinese). [杨淑媛, 焦李成, 刘芳. 量子进化算法 [J]. 工程数学学报, 2006, 23(2): 235-246.]
- [35] PHILLIPS L W, UNGER P S. Mathematical programming solution of a hoist scheduling program [J]. AIIE Transactions, 1976, 8(2): 219-225.
- [36] LEUNG J, ZHANG G, YANG X. Optimal cyclic multi-hoist scheduling a mixed integer programming approach [J]. Operations Research, 2004, 52(6): 965-976.

作者简介:

王跃岗(1986—),男,河南周口人,硕士研究生,研究方向:生产计划与调度,E-mail:wanggag.1986@163.com;

车阿大(1972—),男,浙江鄞州人,教授,博士,博士生导师,研究方向:生产计划与调度、交通规划、项目调度等。