

# 基于规则及多色集合的多品种订单调度方法

高 丽<sup>1,2</sup>, 徐克林<sup>1</sup>, 毛道晓<sup>1</sup>, 李艳冰<sup>1</sup>

(1. 同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 上海理工大学 图书馆, 上海 200093)

**摘要:** 针对多品种订单生产企业多工序、多品种、中小批量的生产特点,以最小化订单总完工时间和平均流程时间为目标建立了订单调度模型。提出了一种按规则分配订单以及作业排序相结合的调度思想,并利用改进的非支配排序遗传算法——NSGA II 对问题进行求解。考虑到多品种订单的多重约束性,采用多色集合理论中的围道布尔矩阵对多品种订单中各作业加工关系作了约束化处理;同时,以双层染色体进行编码,可以有效降低染色体的空间和时间复杂度;采用置换和反转变异两种算子,缩小了算法搜索范围,避免了早熟现象。最后以典型的订单生产实例进行仿真实验,结果表明应用该算法收敛快、运算效率高,可以获得满意的 Pareto 解集。

**关键词:** 多品种订单调度; 按规则分配; 多色集合理论; 约束化处理; 非支配排序遗传算法(NSGA II)

中图分类号: TP 39

文献标志码: A

## Multi-item Order Scheduling Method Based on Rule and Polychromatic-sets Theory

GAO Li<sup>1, 2</sup>, XU Kelin<sup>1</sup>, MAO Daoxiao<sup>1</sup>, LI Yanbing<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Library, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** With a consideration of the feature of multi-process, multi-item and small lot in an order-production enterprise, an order scheduling model was established to minimize the overall completion time of all orders and average flow time. A new integrated thought of multi-rule order assignment and job sequencing was proposed. An improved non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA II) was employed to solve this model. The contour matrix in polychromatic set theory was adopted to deal with the processing relationship of all jobs. Then double recoding was adopted to reduce time and space complex of chromosome. At the same time, the adopted inversion operators and hybrid mutation can reduce searching space and improve the

algorithm premature properties. The typical order production simulation experiment results show that the algorithm converges faster with high computation efficiency, which can satisfy Pareto solution set.

**Key words:** multi-item order scheduling; multi-rule allocation; polychromatic set theory; constraint processing; non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA II)

多品种订单调度过程可以分为两步:订单分配和作业排序<sup>[1-2]</sup>。为提高订单生产企业的运作效率及服务水平,必须从系统化、集成化的角度出发,将这两个过程进行整合<sup>[3]</sup>。因增加了多目标之间的协调关系,其求解难度较大。

求解多目标优化问题的方法主要有 3 种:①将多目标转化为各单目标,然后对单目标求解。由于该方法是分别优化,所以不能保证解的全局最优性<sup>[4]</sup>;②将各单目标加权,通过改变随机权重得到 Pareto 解集,这种方法的优化性能明显强于第①种,但随机权重要求均匀,所以各目标加权值的分配带有较大的主观性<sup>[5]</sup>;③基于 Pareto 解的概念,在多目标空间寻优,得到所有 Pareto 解集。调度人员可根据偏好选择结果<sup>[6]</sup>。综合而言,第③种方法更适合于客观生产实际。其中,改进的非支配排序遗传算法(Non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA II)的优化效果尤为明显。

基于以上分析,针对一类多订单、多品种、中小批量生产的订单调度问题,本文构建了多品种订单调度模型,并设计了基于改进 NSGA II 的多目标集成优化方法:即以订单总完工时间最小和平均流程时间最小为目标,基于多规则订单分配和多品种作业排序相结合的订单调度思想对问题建模并求解。该方法特色之处在于:①采用多规则订单分配策略,并通过“规则选择”对各种规则的使用加以人为导

收稿日期: 2012-01-13

第一作者: 高 丽(1973—),女,博士生,主要研究方向为工业工程及物流。E-mail: dolly2005@163.com

通讯作者: 徐克林(1945—),女,教授,博士生导师,主要研究方向为工业工程、物流工程及企业 ERP。E-mail: tjklxu@163.com

向;②针对各订单中存在多个品种的产品,将多色集合理论中的围道布尔矩阵引入算法中,对多品种订单加工关系作了约束化处理,提高了算法的计算效率和可扩展性<sup>[7]</sup>;③结合多规则订单分配和多品种作业排序的多目标集成调度思想,利用改进的非支配排序遗传算法——NSGA II对多目标优化模型进行寻优。

## 1 多品种订单调度模型

### 1.1 问题描述

订单生产企业根据顾客订单需求加工若干不同种类的产品,各产品的生产均按照相同的加工路线依次经过不同的生产阶段,在各生产阶段都有处理能力相同的并行设备和技能人员可供选择。

假设条件:①每份订单中包含至少两种以上产品;②产品工艺路线已知且固定;③各订单在各个时间段随机到达按规则安排生产;④各产品在每道工序的加工时间已知且同时只能被一台设备(或一名技术人员)加工;⑤同一产品前道工序结束后,才能开始下一道工序的加工;⑥工序之间以紧密衔接为原则,即尽可能无耽搁地连续加工;⑦所有订单均满足物料约束即无缺件;⑧排除生产中的突发事件。

调度目标是确定订单的最佳加工顺序,以使得订单总完工时间最短,以及各订单平均流程时间最短。

变量定义如下: $I=\{i|i=1,2,\dots,N\}$ 为订单集合; $N_i$ 为订单*i*的总产品数。 $K=\{k|k=1,2,\dots,L\}$ 为工序集合; $P=\{p|p=1,2,\dots,J\}$ 为产品集合; $S_k$ 为第*k*道工序的最早开始时间; $R_k$ 为*k*道工序的生产节拍; $E_{ik}$ 为订单*i*的第一个产品在工序*k*的下线时间; $F_{ik}$ 为订单*i*的最后一个产品在工序*k*的下线时间; $E_i$ 为订单*i*的第一个产品的下线时间; $F_i$ 为订单*i*的最后一个产品的下线时间; $T_i$ 为订单总加工时间; $T_{ik}$ 为订单的平均流程时间。

决策变量: $X_{ijk}$ 为正整数变量,表示订单*i*中的第*j*个产品在第*k*道工序上的上线次序。

### 1.2 多目标优化模型

$$f_1 = \min \sum_{i=1}^N T_i \quad (1)$$

$$f_2 = \min \sum_{i,j=1}^N \sum_{k=1}^L T_{ik} \quad (2)$$

$$\text{st. } S_k \geq 0 \quad (3)$$

$$E_{ik} = S_k + (\min X_{ijk})/R_k \quad (4)$$

$$E_i = \min E_{ik} \quad (5)$$

$$F_{ik} = S_k + (\max x_{ijk})/R_k \quad (6)$$

$$F_i = \max F_{ik} \quad (7)$$

$$T_i = |F_i - E_i| \quad (8)$$

$$T_{ik} = |F_{ik} - E_{ik}| \quad (9)$$

目标函数(1)为所有订单的总完成时间最小,目标函数(2)为各订单平均流程时间最小。约束式(3)表示各工序最早上线时间约束;式(4)为订单*i*在第*k*道工序上第一个产品的下线时间约束;式(5)为订单*i*第一个产品的下线时间约束;式(6)为订单*i*在第*k*道工序上最后一个产品的下线时间约束;式(7)为订单最后一个产品的下线时间约束;式(8)为订单完工时间约束;式(9)表示订单平均流程时间约束。

## 2 基于多规则订单分配及作业排序的优化策略

为了实现上述调度目标,降低模型的求解难度,本文提出了基于多规则订单分配及作业排序的集成调度思想。其优化决策如下:①确定订单的生产顺序;②确定订单中各产品的生产开始和结束时间。其中决策②是有并行生产设备(及技术人员)调度中的难点,考虑订单随机到达的特点,基于启发式规则的调度方法,如根据订单到达的先后对所有订单排序后依次生产,同时再根据一定的规则确定订单中各类型产品的加工顺序,如选择空闲机器优先的原则加工当前订单。本文将根据优化调度目标,引入一组较为完善的启发式规则以实现订单—产品—设备(人员)的合理分配。

在应用启发式订单分配规则求解订单生产总时间最短的调度问题时,应遵循尽早开始生产的原则,当求解订单平均流程时间最短的调度问题时,应尽可能优先考虑加工时间短的产品。根据上述启发式规则及调度目标,本文分别以先到先加工规则1、空闲机器(人员)优先规则2、最短加工时间规则3为例,说明如何根据多规则分配订单和安排作业。

现有3份订单先后到达,即:订单1→订单2→订单3,其中横坐标表示各订单在各工位的加工时间,假设前2份订单的分配已完成,如图1a所示。现要确定第3份订单排产顺序,若优先考虑规则2,由图1b可看出,订单3总体完工时间较早。若优先考虑规则3,则由图1c可看出,此时订单3平均流程时间较短。

由图1比较得出,选择不同的订单分配规则,会对各调度目标产生不同的影响,同样一个目标也可

能受多个规则的影响. 因此, 若事先指定了各订单选择规则, 则相当于使用一种规则导向机制“推动”搜索过程向指定目标方向移动. 针对多品种订单模型的调度目标, 本文对以上 3 个规则依次排序: 规则 1

→规则 2→规则 3, 采用集成调度思想对订单分配规则进行人为引导, 使算法尽快找到符合调度人员要求的满意解.

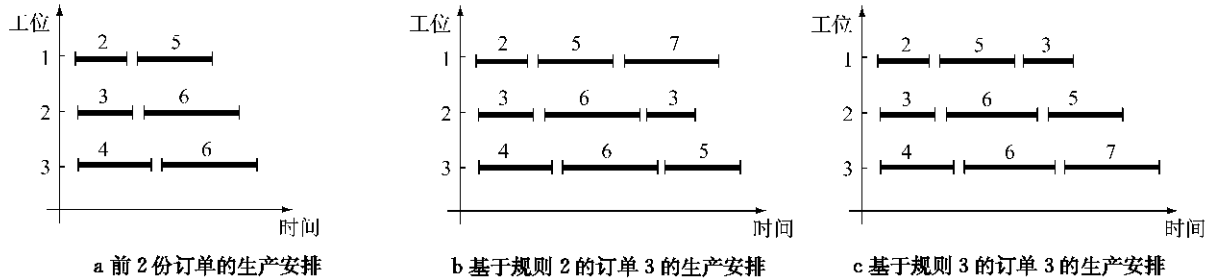


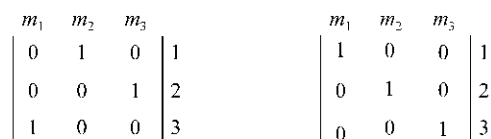
图 1 基于多规则的订单分配和作业排序示意图

Fig.1 Multi-rule-based order assignment and job sequencing

### 3 基于多色集合理论中围道布尔矩阵的约束处理

多品种订单生产是复杂的生产系统, 其生产过程中存在多个约束条件, 应用上述启发式规则可能得到不可行的调度方案, 这也是现有基于启发式规则调度方法中较难处理的问题. 应用启发式规则是在所有订单分配完成后, 对当前订单中各产品作业排序进行检查, 若不可行则放弃当前分配方案并生成新的订单生产序列, 以重新分配订单, 如此反复直到可行方案生成为止. 显然, 这种处理方法将带来巨大的计算量, 甚至无法得到优化解.

为此, 本文利用多色集合理论 (polychromatic set theory, PST) 中的围道矩阵、统一颜色、个人颜色等概念, 从功能分解和约束条件等多方面进行了约束化处理. 围道是概念、特征、属性的抽象概念, 使用个人颜色来表示, 用统一颜色表示属性之间的关联因素<sup>[7-8]</sup>. 当前引入多色集合理论求解复杂生产系统的调度问题的研究还很少, 本文试以个人颜色和统一颜色的相互关系, 代表各类作业和各订单之间的相互关系. 同样以 3×3 的多品种订单为例, 将图 1b 和图 1c 分别转化为订单 3 的围道布尔矩阵, 如图 2 所示.



a 基于规则 2 的围道布尔矩阵      b 基于规则 3 的围道布尔矩阵

图 2 订单 3 的产品—工位围道布尔矩阵

Fig.2 Contour matrix of Order 3

矩阵中: 行表示工位编码; 列表示产品种类编码; 布尔值 1 表示此品种被分配在该工位上加工, 0 则反之. 以上矩阵则称为加工关系的约束处理, 用于描述同一订单中各类工件对应加工工位的实时状态.

引入围道矩阵对多品种订单进行约束化处理具有如下优点: 缩短编码长度, 大大提高了算法的求解效率; 保证调度方案可行, 减少修复计算量; 简化中间计算结果, 同时减少了重复计算量.

### 4 算法设计

在以上研究的基础上, 针对模型的优化目标, 以先到先生产、空闲机器优先和最短加工时间 3 个规则为订单分配规则, 设计了基于改进 NSGA II 的多目标集成优化方法<sup>[9-10]</sup>. 改进主要体现在以下 3 点: ①采用多规则订单调度策略, 增强了算法的导向性, 降低了多目标组合模型的求解难度; ②将多规则订单分配和多色集合理论中的围道布尔矩阵引入染色体编码解码操作中, 提高了计算效率; ③设计了新的遗传算子, 其中交叉操作采用码位一一对应的方式, 变异操作采用置换和反转变异两种算子<sup>[11]</sup>.

根据多品种订单生产的特点, 将该算法应用在订单优化排程问题中, 主要考虑以下几个问题: 编码、解码、种群规模、选择交叉和变异等几个关键步骤.

#### 4.1 算法步骤

步骤 1 生成规模为  $N$  的初始种群  $P_0$ .

步骤 2 计算种群  $P_0$  中每个个体对应的目标值.

步骤 3 通过目标值进行非支配排序.

步骤4 通过选择、交叉、变异得到第1代种群  $Q_0$ 。

步骤5 将父代与子代合并  $P_0 \cap Q_0$  生成  $2N$  的种群  $R_0$ 。计算目标值,进行非支配排序并计算拥挤度。

步骤6 根据非支配关系,以及拥挤度选择合适个体,以子代取代父代形成新的父代种群  $P_1$ 。

步骤7 以此类推,直到满足终止条件,否则转到步骤4。

#### 4.2 染色体编码

对于多订单单件多品种生产模式,本文采用双层染色体编码的方法来表述各道工序的投产序列。有  $n$  个订单,订单中每类产品有  $K$  道工序,需要先对工件的加工次序进行编码,仍以3份订单为例,由图1b,c可以看出,3份订单共包括6类产品,首先按订单分配规则对订单进行排序,生成第1层染色体(图3)。图3中:订单1中B表示B类产品第1次出现,订单3中B表示B类产品第2次出现,以此类推。

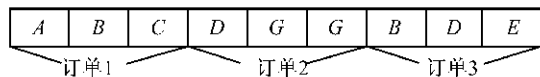


图3 第1层染色体

Fig.3 The first layer of chromosome

再结合围道布尔矩阵,生成第2层染色体(图4)。图中:  $A_{111}$  为第1个订单的A类产品的第1道工序、第1工位上加工,以此类推。

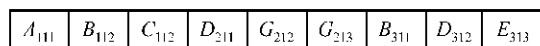


图4 第2层染色体

Fig.4 The second layer of chromosome

#### 4.3 计算拥挤度确定种群规模

拥挤度是指种群中给定个体的周围个体的密度<sup>[10, 12]</sup>。拥挤度确定方法:  $f_k$  对应个体的目标函数,  $C_{d_i}$  为第  $i$  个染色体的拥挤度  $C_d$ , 令边界的2个个体拥挤度为无穷。则对于其他个体利用差值法按下式进行拥挤度计算:

$$C_d = C_{d_i} + \frac{f_k(i+1) - f_k(i-1)}{f_{k,max} - f_{k,min}} \quad (10)$$

式中:  $f_1$  为最短完工时间;  $f_2$  为最小的平均流程时间;  $f_{k,max}, f_{k,min}$  分别为同一前沿面上染色体  $k$  目标的最大、最小值。由式(10)可见,拥挤度  $C_{d_i}$  越大,说明染色体  $i$  周围的点越稀疏,进化过程中应给与越大的生存概率,以保证种群的多样性。

#### 4.4 解码操作及目标函数求解

在调度问题中,解码是一项非常重要的工作。本

文主要是基于多规则订单分配及布尔矩阵的解码方法,根据染色体的双层编码信息来确定每个工位上所有产品的加工次序、加工开始时间和完工时间,将解码结果赋给  $C_{d_i}$  计算拥挤度,将拥挤度属性赋于式(1)和式(2),得到订单的最小完工时间和平均流程时间。

#### 4.5 选择操作

本文采用精英选择策略,即在上一代种群中选择优秀的个体,择优首要依据是染色体前沿值,选择前沿值较小的染色体进行比较,如果前沿值相等,则选择拥挤度大的作为优秀个体。将上一代种群中优秀个体所对应的染色体直接选择进入下一代种群,避免交叉、变异破坏最优个体,有利于其优良特性的传播。

#### 4.6 交叉、变异操作

由于编码时各染色体位置具有双层意义,在进行交叉操作时,码位之间的交叉必须一一对应。这种交叉方式保证了染色体的可行性。对于求解组合优化问题,变异是促进种群进化的一项重要操作,本文采用置换变异与反转变异混合的订单变异策略。所谓置换变异,是指随机选取订单生产序列中的2个位置,交换这2个位置上的订单;所谓反转变异,是指随机选取订单生产序列中的2个位置,将这2个位置之间的所有订单生产顺序反转,图5给出了这2种变异的过程。很显然,置换变异对个体性状改变较小,而反转变异对个体性状改变较大。由于本算法中的多品种订单为订单分配规则与多品种作业排序的组合,因此在实施变异时采用2种方法混合变异策略,应用于本算法中主要通过随机赋值的方式来实施变异。

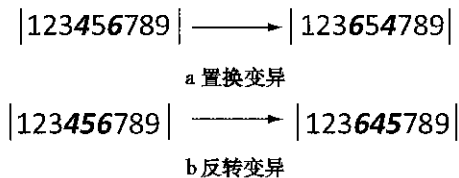


图5 变异过程

Fig.5 Mutation

#### 4.7 终止条件

不同于目前多目标遗传算法给定一个最大进化代数作为终止条件,本文采用一种新的终止条件:如果在连续指定的迭代次数  $T_{time}$  中新一代精英种群的 Pareto 最优解集与上一代的 Pareto 最优解集都未发生变化,则认为算法收敛,迭代结束。这个终止条件说明该算法已经收敛到了 Pareto 最优解。这样改变了以往算法运行时已经收敛了,但还在继续搜索,或

者还没收敛到最优解就结束搜索,从而降低了算法的性能.

### 5 实例仿真与比较分析

本文以某中小规模餐饮企业的菜品生产过程为例验证算法的有效性. 餐饮企业厨房生产过程属于典型的多订单、多品种、中小批量的订单生产企业. 本文主要研究影响企业收入的产品,即热炒类菜品. 其加工流程基本一致:工序 1(切配)→工序 2(打荷:包括取盘、整理、拿辅料等)→工序 3(烹饪)→工序 4(打荷:包括整理、送至传菜口). 现以 10 份订单 9 种热炒菜品在高峰时段的加工情况为例,各订单信息如表 1 所示. 各菜品以字母 A\B\C\...\I 表示,且其各工位的加工时间已知(见表 2),设  $R_k=15 \text{ 件} \cdot \text{h}^{-1}$ ,  $K=4$ ,各道工序的并行设备(对应的并行技术人员)  $M_k$  分别为:3,3,4,3. 求解最佳订单分配方式以使订单总完工时间最小,以及订单平均流程时间最小.

表 1 顾客订单需求信息

Tab.1 Data of customer demand

订单号	菜品种类	订单号	菜品种类
1	A,B,C	6	E,C,G
2	B,D,C,E	7	B,E,F
3	A,C,G	8	F,H,I,A
4	C,G,H,I	9	C,D,H
5	A,B,D,C	10	A,C,E,G,H

表 3 本文算法 10 次运算的调度结果

Tab.3 Scheduling results of processing for 10 times with the proposed method

目标值	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值
$f_1$	2 835	2 940	2 853	2 907	2 916	2 823	2 950	2 862	2 895	2 901	2 888
$f_2$	296	291	289	301	299	295	292	303	305	295	297

表 2 各类菜品在各工位加工时间

Tab.2 Processing time of different dishes

工序	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	6	4	5	16	9	14	19	8	6
2	27	24	23	41	22	17	20	25	37
3	251	282	137	235	137	244	142	131	147
4	10	8	9	10	10	11	13	10	16

本文以 Matlab 2007 为编程环境,并在计算机 (Pentium (R) 4, CPU 2.80 GHz, 内存 512 MB) 上实现上述算法. 应用文献 [13] 研究结果进行参数敏感性计算. 参数均设定为:每个目标的种群规模  $N_{pop}=100$ ,交叉率  $C_r=0.5$ ,置换变异率  $M_{r1}=0.3$ ,反转变异率  $M_{r2}=0.3$ ,最大终止迭代次数选择每次运算后结果之差小于 0.001 时停止,计算结果取 10 次独立优化计算的平均值.

设定调度规则:规则 1→规则 2→规则 3. 从表 1 可以看出各订单中有相同的菜品,假定 10 份订单依次到达:即订单 1→订单 2→...→订单 10,表 3 列出了采用本文算法计算 10 次的详细结果. 计算时间为 25.3 s. 计划人员可以根据自己的偏好选取一个方案作为订单优化排程的最终结果.

现选取表 3 中的第 3 个运行结果作为订单优化排程的最终结果(因为该结果 2 个调度目标与平均值最接近),应用多色集合理论个体颜色的概念,分别选取 9 种颜色代表该例中的 9 种菜品,其对应的甘特图如图 6 所示.

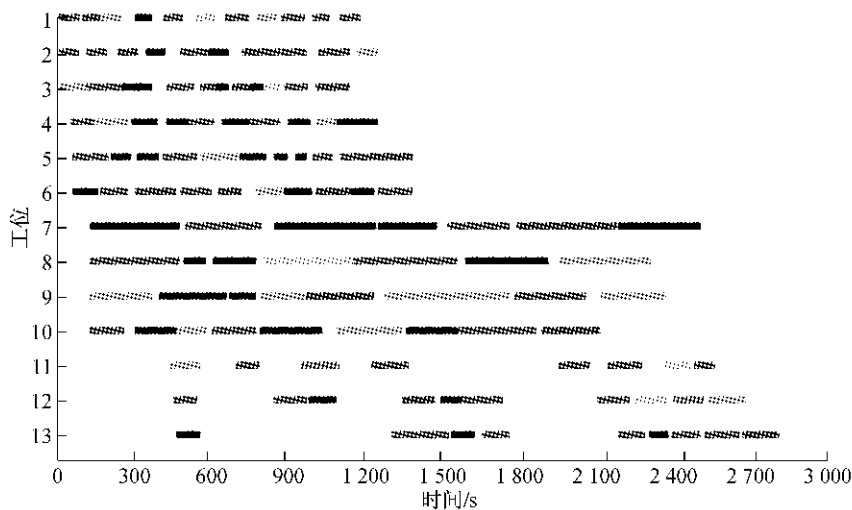


图 6 方案 3 调度结果甘特图

Fig.6 Scheduling result Gannt diagram of scheme 3

为了验证目标函数的有效性,针对上述调度实例,表4列出了3种方法的优化结果,并作了比较分析.从表4中可以看出,在3种不同调度目标的优化方案中,基于本文算法获得的订单总完工时间和平均流程时间的优化结果和按订单分配规则但未引入围道矩阵对加工关系作约束化处理的方法相比,均可获得较优解,但是相比而言,第3种方法的计算时间较长.而这2种方法在优化目标和运算时间上均明显优于经验投产方法.

表4 3种不同方法的优化结果比较

Tab.4 Results comparison of 3 different algorithms

方法	$f_1$	$f_2$	运算时间
改进的NSGA II算法	2 888	297	25
经验投产方法	3 163	327	68
订单分配规则(未约束化处理)	2 896	294	61

## 6 结语

本文提出了基于多规则订单分配及工序排序的多目标集成优化方法,并利用改进的NSGA II方法对多品种订单调度问题进行求解.由于该问题具有多重约束性,其优化过程相对复杂,基于此,本文应用PST的围道布尔矩阵来处理多品种订单调度问题的多重约束关系,使改进后的NSGA II算法能通过缩小搜索范围去除非法解,避免早熟现象的出现.同时,以双层染色体进行编码,可以有效降低染色体的空间和时间复杂度.算例仿真试验表明,本文算法收敛快、运算效率高,能帮助调度人员快速寻找到满意的调度方案,对于多品种订单调度问题具有实际指导意义.

### 参考文献:

- [1] D Wu, Ierapetritou M. Hierarchical Approach for Production Planning and Scheduling under uncertainty [J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2007, 46(11): 1129.
- [2] 曾强, 杨育, 王小磊, 等. 基于多规则设备分配及工序排序的FJSP多目标集成优化方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(5): 980.  
ZENG Qiang, YANG Yu, WANG Xiaolei, et al. Integrated multi-objective optimization method for FJSP based on multiple
- rule machine assignment and job sequencing [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2011, 17(5): 980.
- [3] Peter Fredriksson, Lars-Erik Gadde. Flexibility and rigidity in customization and build-to-order production [J]. *Industrial Marketing Management*, 2005, 34(7): 695.
- [4] Huang R H. Multi-objective job-shop scheduling with lot-splitting production [J]. *International Journal of Production Economics*, 2010, 124(1): 206.
- [5] Yazdani M, Amiri M, Zandieh M. Flexible job-shop scheduling with parallel variable neighborhood search algorithm [J]. *Expert Systems with Applications*, 2010, 37 (1): 678.
- [6] Yokoyama M. Flow-shop scheduling with setup and assembly operations [J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 187: 1184.
- [7] 李宗斌, 高新勤, 赵丽萍. 基于多色集合理论的信息建模与优化技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
LI Zongbin, GAO Xinqin, ZHAO Lipin. Based on polychromatic sets theory of information modeling and optimization technology [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [8] 傅卫平, 刘冬. 基于多色集合的改进遗传算法求解多品种柔性调度问题 [J]. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(5): 1004.  
FU Weiping, LIU Dong. Polychromatic-sets-based improved genetic algorithm for solving multi-species FJSP [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2011, 17(5): 1004.
- [9] 卫田, 范文慧. 基于NSGA II的物流配送中车辆路径问题研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2008, 14(4): 778.  
WEI Tian, FAN Wenhui. Modified NSGAII algorithm for vehicle routing problem in logistic [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2008, 14(4): 778.
- [10] 刘旭红, 刘玉树. 多目标优化算法NSGA-II的改进[J]. *计算机工程与应用*, 2005, 15(1): 73.  
LIU Xuhong, LIU Yushu. Improvement of multi-objective optimization algorithm NSGA-II [J]. *Computer Engineering and Application*, 2005, 15(1): 73.
- [11] 史彬. 流程工业间歇生产调度中并行队列竞争算法的应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学机电工程学院, 2010.  
SHI Bin. Process industry production scheduling in batch and team competition algorithm and its application research [D]. Wuhan: College of Mechanical Engineering of Wuhan University of Technology, 2010.
- [12] 张超勇, 董星, 王晓娟. 基于改进非支配排序遗传算法的多目标柔性作业车间调度技术[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(11): 156.  
ZHANG Chaoyong, DONG Xing, WANG Xiaojuan. Improved NSGA-II for the multi-objective flexible job-shop scheduling problem [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(11): 156.
- [13] 关志华. 非支配排序遗传算法(NSGA)算子分析[J]. *管理工程学报*, 2004, 18(1): 56.  
GUAN Zhihua. Non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA) operator analysis [J]. *Journal of industrial engineering and engineering management*. 2004, 18(1): 56.