

# 多品种柔性生产企业的订单调度模型及其遗传算法

高 丽<sup>1,2</sup>, 徐克林<sup>1</sup>, 杨娜娜<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:** 以订单总完工时间最小和订单平均流程时间最小为目标函数, 利用改进的多目标遗传算法生成了多品种订单调度模型. 为解决组合模型的指数爆炸问题, 提出了一种按规则分配订单以及订单中各作业排序相结合的集成调度思想; 以一种整数和字母组合的编码方法用于可行解的表达, 并在每个分目标的进化过程中, 对选择、交叉、变异算子以及精英解保留策略重新进行设计, 保证了解的分布性和均匀性; 同时还提出了一种新的终止条件, 将精英种群与分目标的子种群进行合并, 从而加快收敛的速度. 以典型的订单生产企业为例进行仿真实验, 实验结果表明, 应用该算法可以获得满意的 Pareto 解集.

**关键词:** 多品种柔性生产; 订单调度; 多目标遗传算法; 按规则分配; pareto 解集

## 1 引言

多品种柔性生产企业订单调度的重点是订单优化排程问题的求解, 订单调度问题可以看作两个子问题: 即订单分配子问题和作业调度子问题. 订单分配子问题指安排各订单的加工先后顺序和起止时间, 作业调度问题指订单中各产品加工的先后顺序及分配问题. 因增加了多个目标之间的协调关系, 其求解难度比较大. 因此, 研究高效的多目标优化方法具有重要的意义<sup>[1-2]</sup>.

求解多目标优化问题的方法主要有三种: ①将多目标转化为各单目标, 然后对单目标求解. 由于该方法分别是分别优化所以不能保证解的全局最优性<sup>[3]</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一种, 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>[4]</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>[5-6]</sup>. 综合而言, 第三种方法更适合于客观生产实际.

文献 [7-8] 采用多目标遗传算法对于单条混流装配线的多目标优化排序问题进行了研究, 但目前尚未发现应用多目标遗传算法对于多条混流生产线进行研究的文献. 同时, 求解订单生产企业的调度问题, 一般仅限于每份订单只包括单一品种, 对于多级多品种的订单调度问题还未见报道.

基于以上分析, 本文主要是针对多订单、多品种、中小批量生产的一类订单优化排序问题进行研究. 采用基于精英选择和个体迁移的多目标算法<sup>[9]</sup>对订单调度问题进行求解, 提出了一种按规则分配订单以及订单中各作业排序相结合的集成调度思想, 利用精英种群来保存

进化过程中所产生的 Pareto 最优解, 在每一个分目标的进化过程中, 将精英种群与分目标的子种群进行合并, 从而加快收敛的速度. 研究的目的是当存在多条并行生产线时, 如何分配多品种订单任务并制定合理的投产顺序, 使得订单总完工时间最短从而提高资金周转率, 同时又要考虑订单中各类产品的作业排序, 以使得的订单平均流程时间最短从而提高客户整体满意度.

## 2 订单调度模型

### 2.1 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生产设备 (或技能人员) 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各订单随机到达按规则排产; ④所有订单均满足物料约束即无缺件⑤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.

### 2.2 模型参数和决策变量

$$I = \{i | i = 1, 2, \dots, N\}$$

为订单集合;  $N_i$  为订单  $i$  的总产品数.  $K = \{k | k = 1, 2, \dots, M\}$  为加工线集合;  $J_i$  为订单  $i$  的第  $j$  个产品;  $R_k$  为  $k$  加工线的生产节拍.  $St_{ijk}$  为订单  $i$  的产品  $j$  在生产线  $k$  的开工时间.  $T_k$  为生产线  $k$  的最早开始时间;  $E_{ik}$  为订单  $i$  的第一个产品在生产线  $k$  的下线时间.  $F_{ik}$  为订单  $i$  的最后一个产品在生产线  $k$  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.  $S_i$  为订单总加工时间.

决策变量为:  $S_{ijk}$ , 为正整数决策变量, 表示订单  $i$  中的第  $j$  个产品在第  $k$  条生产线上的上线次序.

$$Y_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{表示订单 } i \text{ 的第 } j \text{ 个产品分配到第 } k \text{ 条生产线} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

### 2.3 建立数学模型

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

$$f_2 = \min \sum_{i,j=1}^N \sum_{k=1}^M st_{ijk} \quad (2)$$

St.

$$T_k = 0 \quad (3)$$

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

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

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

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

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

$$\sum_{k=1}^M X_{ijk} > 0 \quad i = 1, 2, \dots, N_i, j = 1, 2, \dots, N_j \quad (9)$$

$$X_{ijp}X_{ijq} = 0, i = 1, 2, \dots, N_i, j = 1, 2, \dots, N_j, p, q = 1, 2, \dots, M, p \neq q \quad (10)$$

$$St_{ijk} \geq 0 \quad (11)$$

$$0 \leq X_{ijk} \leq \sum_{i=1}^N N_i \quad (12)$$

$$y_{ijk} = \left\lfloor \frac{x_{ijk}}{\sum_{i=1}^N N_i} \right\rfloor \text{ 其中, } \lfloor \cdot \rfloor \text{ 为取整符号} \quad (13)$$

目标函数 (1) 为所有订单的总完成时间最小, 目标函数 (2) 为各订单中各产品的开工时间最小, 由于各工位加工时间已知, 订单是随机到达的, 所以若开工时间最小则可以保证订单的平均流程时间最小. 约束式 (3) 式表示所有产品在零时刻都可以被加工; (4) 和 (5) 式为订单  $i$  在生产线  $k$  上第一个产品的下线时间约束; (6) 和 (7) 式为订单  $i$  在装配线  $k$  上最后一个产品的下线时间约束; (8) 式为订单完工时间约束; (5) 式表示必须为每一订单中的任一个产品分配一条生产线; (6) 式为每个订单中的每一产品仅能分配一个生产线. (11) 产品开工时间约束.

## 2.4 模型求解方案

本文应用启发式规则求解订单生产总时间最小的调度问题, 随机到达的订单遵循先到先生产 (First in First out, FIFO) 的规则<sup>[10]</sup>, 在满足这一规则的前提下, 由于各产品在各工位的加工时间已知, 所以对每一个订单中各产品尽可能早的安排生产. 这样多级多品种的订单调度模型就分为两个子问题: 选择合适的订单分配规则和最优的作业排序, 以确保订单总完工时间最短和每个订单完成时间最短.

基于以上分析, 笔者首先, 以订单总完工时间最小, 订单平均流程时间最小为优化目标, 建立一类多目标订单调度模型; 其次, 针对模型的组合爆炸特点, 为降低问题复杂度, 提高求解效率, 提出一种将按规则分配订单及作业排序相结合的多目标集成优化思想; 再次, 为进一步提升计算效率, 利用改进的多目标遗传算法借助于精英选择和个体迁移来保留一组 pareto 最优解 (pareto optimal solutions) 集. 最后, 通过仿真对比与应用验证对模型和算法进行验证和分析.

## 3 求解算法

通过以上分析可以看出, 本文所提出的问题是带有约束的多目标组合优化问题, 属于典型的 NP 难问题, 在多项式内很难找到全局最优解最优解. 因此本文提出了改进的多目标遗传算法, 将该算法应用在订单优化排程问题中, 需要解决以下几个关键问题:

### 3.1 染色体编码

对于多条生产线的柔性生产系统, 要计算总的完工时间, 就需要用各生产线所加工的不同订单产品型号组合来组成投产序列. 因此, 本文提出了整数和字母排列编码的方法: ①用一个唯一的实数代替一个订单, 产生一个混流生产线的投产序列; ②用一个唯一的字母代替一

种型号的产品, 根据产品在第一工位的加工时间确定投产序列; ③根据各生产线的空闲状况, 对上述各加工线的投产序列进行调整组合为各加工线实际的投产序列. 其中各染色体按工件进行编码, 每个工件对应  $m$  个基因位, 各工件的基因值按升序排列. 染色体编码如图 1 所示. 11A 表示订单 1 的 A 号产品在第 1 条生产线上生产.

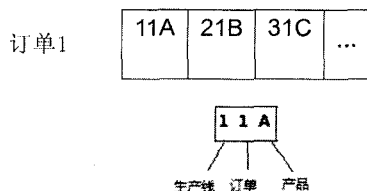


图 1 编码方案

### 3.2 种群规模

考虑到多品种柔性生产企业的特点, 群体规模的大小要充分考虑各生产线的生产能力、多品种中小批量按订单生产的特点, 根据经验, 群体规模一般取 10-200.

### 3.3 帕累托 (Pareto) 支配关系定义

本问题属于有约束的多目标组合优化问题, 是一组无法简单进行相互比较的最优解的集合, 称为 pareto 最优解集. 考虑具有  $Z$  个目标的最小化优化问题, 假定两个解  $w_1, w_2 \in W$ ,  $W$  是解的可行域,  $f_z(W)$  是第  $z$  个目标函数值. 假如

$$f_z(w_1) \leq f_z(w_2), \quad \forall z = 1, 2, \dots, Z$$

而且  $f_z(w_1) < f_z(w_2) \quad \exists z = 1, 2, \dots, Z$

则称解  $w_1$  支配解  $w_2$ ,  $w_1$  是一个非被支配解<sup>[11]</sup>.

### 3.4 适应度函数

订单优化排程问题是求极小值的问题, 因而作下列转换, 获取相应的适应度函数  $fit(f_1)$  和  $fit(f_2)$ :

$$fit(f_1) = N \times \max\{N_i\} / \min\{R_k\}^{-f_1}$$

其中,  $i = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, M$ .

$$fit(f_2) = \sum\{N_i\} \times \max\{St_{ijk}\} / \min\{R_k\}^{-f_2}$$

其中,  $i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, M$ ,

### 3.5 选择操作

在群体中选生命力强的个体产生新的群体的过程, 采用锦标赛选择方法, 其基本思想是每次选取几个个体中适应度最高的一个个体遗传到下一代群体中, 个体数目称为联赛规模 Tour. 为了保持种群的多样性, 对锦标赛选择方法进行改进, 即为每一个个体设置一个最大选择次数  $T_{time}$ , 当超过该最大选择次数时, 个体不允许再参与选择.

### 3.6 交叉、变异操作

本文的遗传算法采用整数和字母编码, 交叉算子采用单点交叉, 具体做法如下: 随机选择两个父代个体,

$$x^1 = (x_1^1, x_2^1, \dots, x_n^1), x^2 = (x_1^2, x_2^2, \dots, x_n^2)$$

) 产生一个随机数. 如果该数小于交叉概率  $P_c$ , 执行单点交叉生成两个子个体, 分别为:

$$y^1 = (y_1^1, y_2^1, \dots, y_n^1), y^2 = (y_1^2, y_2^2, \dots, y_n^2),$$

$$y_2^1 = \alpha^1 x_i^1 + (1 - \alpha^1) x_i^2, y_2^2 = \alpha^2 x_i^1 + (1 - \alpha^1) x_i^2$$

$0 \leq \alpha^1 \leq 1$  和  $0 \leq \alpha^2 \leq 1$  随机产生. 否则, 不执行交叉操作, 直接将两个父代个体复制为子代个体. 变异操作, 首先选定一个个体变量, 然后产生一个随机数, 如果该数小于变异概率  $P_m$ , 则在该个体相应变量的定义域范围重新随机生成一个变量; 否则, 不执行变异操作;

### 3.7 终止条件

本文提出采用一种新的终止条件: 如果在连续指定的迭代次数  $T_{\text{time}}$  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.

### 3.8 多目标遗传算法步骤

**步骤 1** 产生初始化种群  $P_1, P_2$ , 初始化参数: 包括交叉概率  $P_c$ , 变异概率  $P_m$ , 锦标赛竞赛规模  $\text{Tour}$ , 优秀个体复制次数的上限, 各个目标值的计算精度, 连续迭代次数  $T_{\text{time}}$ .

**步骤 2** 根据帕累托支配关系对初始种群  $P_1, P_2$ , 进行个体编码, 计算其目标函数值.

**步骤 3** 对上一代种群的个体的目标函数值进行比较, 选择本代的精英个体群  $\text{Pop}(g)$ .

**步骤 4** 剔除精英个体群  $\text{Pop}(g)$  中的劣解.

**步骤 5** 判断是否满足终止条件, 如满足, 结束算法; 否则, 继续下一步.

**步骤 6** 设定初始化种群  $P_1, P_2$  的复制次数为 0; 然后在种群  $P_1, P_2$  中随机选择  $\text{Tour}$  个个体, 其中每随机选择一个种群个体都必须保证复制次数小于指定的上限, 否则重新选择, 直到选择出  $\text{Tour}$  个个体; 然后通过竞争将该分目标函数值最优的个体保存下来, 同时该个体的复制次数加 1, 重复进行这个过程, 直至完成所有分目标个体的选择.

**步骤 7** 对精英种群  $P_1, P_2$  分别进行交叉、变异操作.

**步骤 8** 通过对新一代种群中个体进行比较, 产生多目标的新一代子种群  $P_1, P_2$ , 并且进行 Pareto 解更新.

**步骤 9** 将新一代种群  $P_1, P_2$  产生的 Pareto 最优解集进行比较, 剔除精英种群中的劣解, 选择本代精英个体种群  $\text{Pop}(g)$ , 完成对精英种群的更新操作; 然后返回步骤 5.

## 4 实例计算与分析

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, 一般餐饮企业有两个顾客高峰期: 午高峰和晚高峰. 在这个时间段其厨房加工是按照顾客订单生产的, 那么如何进行订单排序优化对于企业有着至关重要的作用.

餐饮顾客订单主要是针对餐饮企业固有的各式餐点进行点菜, 一般先就餐点进行分门, 现我们假定对菜单已做好分类, 这里主要是研究一些热炒类菜品, 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). 该餐饮企业厨房生产以 3 条加工线为例, 现假设有 3 个顾客订单, 以相同的加工顺序按订单的先后经过 4 道工序, 各菜品在各工位的加工时间已知 (见表 1)(数据由生产现场实测获得, 单位: 秒), 设生产线的参数:  $R_k = 15$  件/小时,  $T_k = 0$ . 求解最佳订单排序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 顾客订单需求和各工位加工时间

工序	订单	1	2	3
	菜品	A B C	E F A G	H I C B J
1 2 3 4		5.7 3.9 5	8.4 13.8 5.7 19	7.8 6.1 5 3.9 15.4
	加工时间 (秒)	26.5 24 23	22 17.3 26.5 20.3	24.7 36.6 23 24 41
		251 282 137	137 244 251 142	131 147 173 282 235
		10.1 8.2 9	10 11.3 10.1 12.7	10 15.6 9 22 10

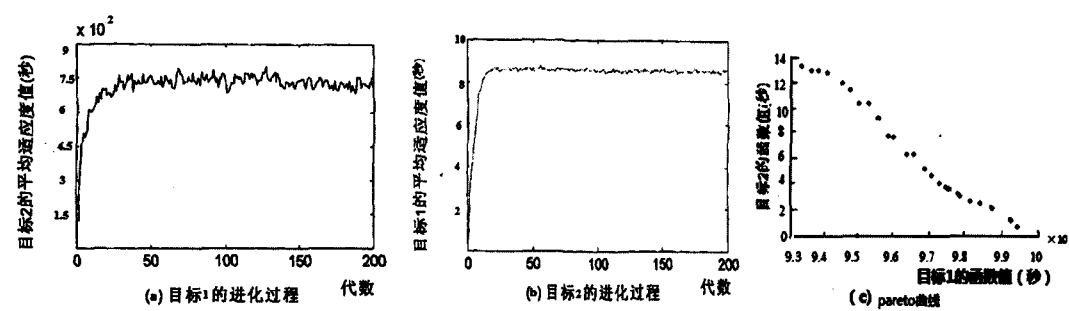


图 2 遗传过程

表 2 计算所得的部分 Pareto 解集与经验排产结果比较

序号	经验投产结果			本文算法计算结果		
	投产序列	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	Pareto 部分解集	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>
1	11A 11B 11C 22E 22F 22A	1021	24	11A 21B 31C 12E 22F 32A	945	12
	22G 33H 33I 33C 33B 33J			12G 13H 23I 33C 23B 33J		
2	11A 11B 11C 22E 22F 22A	1011	28	11A 21B 31C 12E 22F 32A	8	980
	22G 33H 33I 33C 23B 13J			22G 13H 23I 33C 13B 23J		
3	11A 11B 11C 22E 22F 22A	1238	32	11A 21B 31C 12E 22F 32A	951	10
	12G 33H 33I 33C 13B 23J			32G 13H 23I 33C 33B 23J		
4	11A 11B 11C 22E 22F 32A	1241	41	11A 21B 31C 12E 22F 32A	969	7
	33G 33H 33I 33C 33B 13J			12G 13H 23I 33C 33B 13J		
5				11A 21B 31C 12E 32F 22A	972	5
				12G 23H 13I 33C 23B 33J		
6				11A 21B 31C 12E 22F 32A	941	14
				22G 33H 13I 23C 23B 33J		

从表 1 可以看出各订单中有相同的菜品, 订单按 FIFO 规则生产, 假定三个订单顺序为:  $U_1 > U_2 > U_3$ , 本文基于精英选择和个体迁移的多目标算法, 采用 C++ 进行编程, 并在计算机 (Pentium (R) 4, CPU2.80 GHz, 内存 512 MB) 上进行了实现. 应用文献 [12-14] 研究结果进行参数敏感性计算, 参数均设定为: 每个目标的子种群规模 Popsiz e = 50, 竞赛规模 T our = 5, 最大终止迭代次数 Max gen = 80,  $P_c=0.7$ ,  $P_m=0.04$ , 在选择过程中每个个体的最大可复制次数设为 3. 遗传过程和 Pareto 最优解的分布区域和分布密度如图 2 所示, 计算所得的部分 Pareto 解集如表 2 所示 (计算结果近似整数), 计算时间为 38 秒. 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.

## 5 结论

1) 从图 2 可以看出, 运用本文提出的多目标遗传算法, 显著提高了收敛速度, 在保证 Pareto 最优解质量的前提下, 降低了局部区域解的分布密度, 并有效地控制了 Pareto 最优解的数量, 维持了种群的均匀性和多样性.

2) 从表 2 pareto 解集得出, 本文提出的多目标遗传算法得到的结果是近优值, 相对于人工经验排序来说, 一方面准确度得到了改进, 另一方面也大大提高了排序效率, 本文仅是以 3 个订单为研究对象, 如果规模增加应用该算法的优化效果将更加明显.

3) 本文未考虑突发事件, 在实际生产中, 若出现撤单情况, 可从事件集合中删除该项, 然后执行下一个事件, 排序不受影响. 而若出现加单情况, 要根据加工时间, 其他订单到达时间等因素重新排产这也将是算法和模型下一步研究工作的重点.

本文针对多级多品种柔性生产企业, 以订单总完工时间最小和订单平均流程时间最小作为优化目标, 基于精英选择和个体迁移的多目标遗传算法对订单调度问题进行求解, 通过对遗传算法的改进, 使得算法更加符合企业生产实际, 能够起到指导生产实践的作用.

## 参考文献

- [1] Wu D, Ierapetritou M. Hierarchical approach for production planning and scheduling under uncertainty[J]. Chemical Engineering and Processing, 2007, 46(11): 1129-1140.
- [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): 980-989.
- [3] HUANG R H. Multi-objective Job-Shop scheduling with lot-splitting production[J]. International Journal of Production Economics, 2010, 124(1): 206-213.
- [4] YAZDANI M, AMIRI M, ZANDIEH M. Flexible Job-Shop scheduling with parallel variable neighborhood search algorithm[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37 (1): 678-687.
- [5] YOKOYAMA M. Flow-shop scheduling with setup and assembly operations[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 187: 1184 -1195.
- [6] TUNG L F, LI L, NAGI R. Multi-objective scheduling for the hierarchical control of flexible manufacturing systems[J]. The International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 1999, 11(4): 379-409.
- [7] Carlos M Fonseca, Peter J. Fleming. Genetic algorithm for multi-objective optimization: formulation, discussion and generalization[C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Generic Algorithms. San Mateo, CA Morgan, Kaufmann. 1993: 416-423.
- [8] vanHoek R I. the Rediscovery of postponement: A literature Review and Discretions for Research[J]. Journal of Operations Management, 2001, 9(2): 161-184
- [9] 祁荣宾, 钱锋, 杜文莉, 颜学峰. 基于精英选择和个体迁移的多目标遗传算法 [J]. 控制与决策, 2007, 22(2): 164-265
- [10] Wang X, Tang L, l. A tabu search heuristic for the hybrid flow-shop scheduling with finite intermediate buffers[J]. Computer & Operations Research, 2009, 36: 907-918.
- [11] 王炳刚. 混流加工/装配系统集成优化研究 [J]. 机械工程学报, 2010, 9: 114-122
- [12] HUANG R H. Multi-objective Job-Shop scheduling with lot-splitting production[J]. International Journal of Production Economics, 2010, 124(1): 206-213.

- [13] XIA Weijun, WU Zhiming. An effective hybrid optimization approach for multi-objective flexible Job-Shop scheduling problems[J]. Computers & Industrial Engineering, 2005, 48(2):409-425.
- [14] Janak S L, Lin X, Floudas C A. A new robust optimization approach for scheduling under uncertainty:11.Uncertainty with known Probability distribution[J]. Computers and Chemical engineering, 2007, 31(3): 171-195.

## The Order Scheduling Model of Multi-Item Flexible Job-shop Based on Genetic Algorithm

GAO Li<sup>1,2</sup>, XU Ke-lin<sup>1</sup>, Yang Na-na<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:** An order scheduling model was established based on Updated Multi- objective Genetic Algorithm. The objective of the model is to minimize the overall completion time of all orders and average flow time. an integrated optimization method based on rule assignment order and job sequencing was proposed. A real number and letter encoding method and the Pareto ranking method was put forwarded, which guaranteed the dispersivity and uniformity of the solutions. At the same time, a new stopping condition of multi-objective genetic algorithm provides faster convergence. Example comparison shows that the solution may acquire valid Pareto results.

**Keywords:** multi-item flexible job-shop; order scheduling; multi-objective genetic algorithm; on rule allocation; Pareto results