

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.051

基于近亲变异 NSGA-II 算法的多目标柔性作业车间调度*

陈鸿海¹ 蒋增强² 左乐² 张彦如¹

(1. 合肥工业大学机械与汽车工程学院, 合肥 230009; 2. 北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京 100044)

摘要: 在研究柔性作业车间多目标调度问题现状和不足的基础上,提出了包括最大完工时间、加工成本以及加工质量3个优化目标的多目标柔性作业车间调度模型;并针对上述模型,提出了基于近亲变异的改进非支配排序遗传算法(Non-dominated sorting genetic algorithm, NSGA-II),该算法根据计算交叉染色体的血缘关系,确定子代个体的变异率,优化了NSGA-II的变异策略,避免了算法的早熟问题;最后,针对实际案例,构建相应的调度模型和算法,计算结果证实了模型和算法的可行性和有效性。

关键词: 多目标调度 柔性作业车间 改进非支配排序遗传算法 近亲变异

中图分类号: TH18 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)04-0344-07

Multi-objective Flexible Job-shop Scheduling Problem Based on NSGA-II with Close Relative Variation

Chen Honghai¹ Jiang Zengqiang² Zuo Le² Zhang Yanru¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

2. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: At present, the non-dominated sorting genetic algorithm-II (NSGA-II) is used widely in researches of flexible job-shop multi-objective rescheduling problem. Because of the excessive elite reservation, the algorithm is easily precocious, thus the performance of multi-objective optimization algorithm could be improved. By analyzing the research status and insufficiency of multi-objective flexible job-shop scheduling problem (FJSP), a multi-objective FJSP optimization model was put forward, in which the makespan, processing cost and processing quality were considered. According to the above model, a modified non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) with close relative variation was designed. In this algorithm, the chromosome mutation rate was determined after calculating the blood relationship between the two cross chromosomes. Crossover and mutation strategies of NSGA-II were optimized, and the prematurity of population was overcome. Finally, the performance of the proposed model and algorithm was evaluated through a case study, and the results demonstrated the efficiency and feasibility of the proposed model and algorithm.

Key words: Multi-objective scheduling Flexible job-shop NSGA-II Close relative variation

引言

调度是影响制造业生产效率的关键因素^[1],不仅影响制造系统的生产效率,同时也影响产品质量和成本等。柔性作业车间调度问题(Flexible job-shop scheduling problem, FJSP)是传统作业车间

调度问题的扩展,它假定一个工序可以在多台机器上加工,增加了将每个工序分配到可以加工它的机器上的路径选择问题,更加符合实际的生产环境,但具有建模复杂、计算复杂和多约束等特点^[2]。

FJSP通常涉及多个不一致甚至相互冲突的目标的同时优化,其优化结果往往不是一个最优解,而

收稿日期:2014-10-10 修回日期:2014-11-24

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAF12B03)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2012JBM090)

作者简介:陈鸿海,博士生,副研究员,主要从事基于瓶颈理论的离散制造企业执行系统研究,E-mail:chenhonghai@hfut.edu.cn

是符合 Pareto 最优解概念的一组解^[3]。目前,多目标优化模型一般采用单目标转化法、随机权重目标法以及基于 Pareto 的优化方法^[4-8]。由于基于 Pareto 的优化方法能够在一次优化计算过程中得到一组近似 Pareto 最优解集,因此该方法受到研究者的青睐^[9-10]。典型的算法包括 Fonseca 等提出的 Moga^[11]、Horn 等^[12]提出的 NPGA、Srinivas 等提出的 NSGA^[13]、Deb 等提出的 NSGA-II^[14]、Knowles 等^[15]提出的 PAES、Zitzler 等^[16]提出的 SPEA 和 SPEA2、Corne^[17]提出的 PESA 和 PESA-II 以及曾三友等提出的 OMOEA^[18]和郑金华提出的 DMOEA^[4]。其中,NSGA-II 因具有良好的分布性和较快的收敛速度,被广泛应用,但也存在运算复杂度高、易早熟等不足。

本文在综合考虑时间、成本、质量 3 个目标的基础上,构建柔性作业车间的多目标优化调度模型;并建立基于血缘变异的 NSGA-II 求解算法,优化 NSGA-II 的交叉和变异策略,避免算法的早熟。

1 问题描述与建模

1.1 问题描述

FJSP 通常可以描述为有 m 台机器和 n 个工件,工件 i 包含 q_i 道工序;每道工序可在多台机器上进行;工序的加工成本、时间、质量与机器相关, S_{ij}^k 为工件 i 的第 j 道工序在机器 k 上开始加工的时间; T_{ij}^k 为工件 i 的第 j 道工序在机器 k 上加工的时间; F_{ij}^k 为工件 i 的第 j 道工序在机器 k 上结束加工的时间, $F_{ij}^k = S_{ij}^k + T_{ij}^k$ 。调度目标需要满足以下约束条件:①同一时间,一台机器只能加工一个工件。②机器从零时刻开始均可使用。③加工一旦开始将不被中断。④工件加工工艺确定,且所有工件均具有相同优先级。⑤同一工件的不同工序具有先后约束关系,即工序 $J-1$ 完成后才能开始工序 J 。从而确定工件的加工顺序和机器,并使各个调度指标达到整体最优。

1.2 调度模型

调度模型考虑了生产成本、时间、质量 3 个调度优化目标集 (T, C, Q) ,其优化目标可以表示为: $\min(T, C, Q)$,其中 T, C, Q 分别表示所有工序总的加工时间、成本、质量。

(1) 加工时间

加工时间采用最大完工时间,为

$$T = \max \{ F_{ij}^k \} = \max \{ S_{ij}^k + T_{ij}^k \}$$

(2) 加工成本

加工成本包括材料成本以及生产费用,其中工序加工费用与调度方案直接相关。因此本文只考虑

工序加工费用

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{q_i} O_{ij}^k T_{ij}^k c_k$$

O_{ij}^k 的取值为 1 或者 0,表示工件 i 的第 j 道工序是否在机器 k 上加工; c_k 为设备 k 单位时间的加工费用,包括人员成本。

(3) 加工质量

一台机器上加工一道工序的加工质量,可用该工序的不合格品率来反映。不合格品率越高,表明工序加工质量越不稳定。工序加工质量采用工序质量不稳定指数 L_{ij}^k 来表示。从而调度方案质量不稳定指数为

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{q_i} O_{ij}^k L_{ij}^k$$

2 基于近亲变异的 NSGA-II 调度算法设计

NSGA-II 是对非支配排序遗传算法在非支配解排序、选择策略等方面进行改进而形成的多目标优化问题求解算法,该算法具有良好的收敛性,但其精英选择策略导致其种群多样性不足。基于近亲变异的 NSGA-II 算法通过改进 NSGA-II 算法的交叉和变异策略,即通过根据计算交叉染色体的血缘关系,确定染色体交叉变异率,从而有效缓解种群多样性不足的问题,避免算法提前收敛于局部最优解。

2.1 编码和解码

编码是遗传算法成功实施优化的首要和关键问题。FJSP 的编码既要给出加工工序的先后顺序,同时还需为每个工序选择加工机器,因此,本文采用基于工序和机器的双重编码方法。

如图 1 所示,基于工序和机器的双层整数编码由两部分组成:第一部分为确定工序加工顺序的编码;第二部分为用来选择每道工序的加工机器的编码。因此,图 1 中的染色体表示有 3 个工件,共 8 个工序,在 5 个机器上加工,该染色体表示的加工顺序为 $O_{21}^3, O_{11}^1, O_{31}^4, O_{12}^3, O_{32}^3, O_{22}^4, O_{13}^2, O_{23}^5$ 。其中 O_{ij}^k 表示工件 i 的第 j 道工序在设备 k 上加工,如 O_{21}^3 表示工件 2 的第 1 个工序在设备 3 上加工。

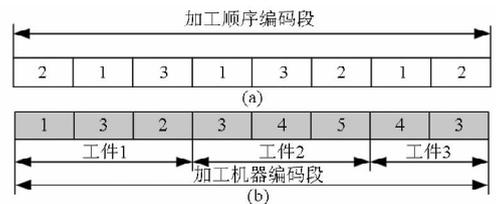


图 1 基于工序和机器的双重编码

Fig. 1 Double encoding

2.2 选择操作

多目标优化问题比单目标优化问题的选择操作更加复杂,它包括个体的等级排序和同一等级

Pareto 解的选择策略。

目前 NSGA-II 算法研究中得到普遍认同的 Pareto 排序法主要包括 Jensen 提出的递归排序方法^[19]和郑金华提出的一种改进的快速排序方法^[4]。文献[4]实验结果表明:当目标数大于2时,改进的快速排序方法具有更好的计算性能。因此,本文将采用改进的快速排序算法对个体等级进行排序。

对于非支配排序后等级不同的个体,优先选择等级较低的个体参与进化。而对于相同等级的多个个体,需要采用一定的策略以保证进化群体的多样性。目前比较常用的策略有小生境技术、信息熵、聚集密度、网格和聚类分析等^[20]。相关文献表明,采用聚集密度策略能从宏观上表征群体的多样性和分布性^[4],因此,本文将选择聚集密度策略作为同一等级 Pareto 解的选择策略。该策略通过计算个体之间的聚集距离来表示个体间的聚集密度^[21]。个体 i 的聚集距离为

$$P[i]_{\text{dis}} = \sum_{k=1}^r (P[i+1]^k - P[i-1]^k) \quad (1)$$

式中 $P[i]_{\text{dis}}$ ——个体 i 的聚集距离

$P[i]^k$ ——个体 i 在子目标 k 的函数值

为维持种群的多样性,聚集距离大的个体参与繁殖和进化的计划概率较高。

2.3 交叉和变异操作

在个体交叉进化过程中,近亲基因的不断交叉、繁衍,导致群体的过快收敛,从而导致种群多样性不足。鉴于此,本文提出了基于近亲变异的 NSGA-II 算法。该算法对传统 NSGA-II 的交叉策略进行了改进,即在基因进行交叉之前,对将进行交叉的两个染色体的血缘关系进行计算;并根据血缘关系计算新产生染色体的变异率;最后根据这个变异率对交叉后的基因进行变异操作,从而避免算法的早熟。

2.3.1 近亲指数和变异率的计算

近亲交叉容易产生算法的过早收敛,因此本文为不同血缘关系的子代染色体计算不同的变异率,替代传统遗传算法单一变异率。其近亲指数和变异率的计算算法为

```
float Function(int p1[], int p2[])
{
    float s, v;
    constant float V = 0.5; // V 为初始变异率;
    float t = 0;
    for(int i = 0; i < n; i++)
    {
        if(p1[i] == p2[i])
            t++;
    }
    s = t/n();
}
```

$v = V * s;$

return $v;$

}

p_1, p_2 为待交叉的两个染色体, n 为染色体中基因的总数, s 为近亲指数, v 为子代的变异率。

2.3.2 交叉策略

若 C_1 和 C_2 为 2 个父代加工顺序基因段, C'_1 和 C'_2 为交叉后产生的子代。则加工顺序基因段的交叉(图2)步骤为:

(1) 将工件集合 J 分成两个集合 J_1 和 J_2 , 假定: $J_1 = \{1\}$, $J_2 = \{2, 3\}$ 。

(2) C'_1 继承 C_1 中包含在 J_1 的工件, 将 C_2 中包含在 J_2 的工件复制到 C'_1 , 并保证顺序不变。

(3) C'_2 继承 C_2 中包含在 J_2 的工件, 将 C_1 中包含在 J_1 的工件复制到 C'_2 , 并保证顺序不变。

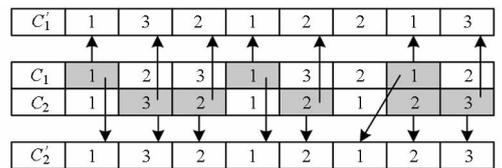


图2 加工顺序基因的交叉

Fig.2 Crossover of operation genes

图3给出机器分配的交叉操作,假设 C_1 和 C_2 交叉形成 C'_1 和 C'_2 。具体交叉步骤为:

(1) 选取 C_1 和 C_2 中的若干列, 假定选取 2、4、5、7 列。

(2) 将 C_1 和 C_2 中选中列对应的基因段的机器相互交叉, 其他部分保留到子代, 产生子代 C'_1 和 C'_2 。

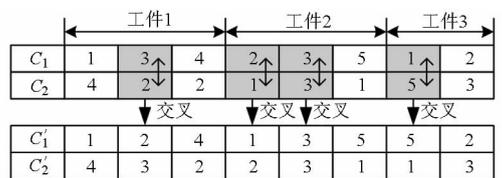


图3 机器分配基因的交叉

Fig.3 Crossover of machine genes

2.3.3 变异操作

图4为加工顺序基因段的变异操作: 首先选择一个工件的一个加工顺序基因(假设为2), 将其插入到随机的一个位置。

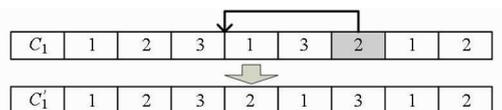


图4 加工顺序基因的变异操作

Fig.4 Mutation of operation genes

机器分配基因段的变异操作是随机选择机器分配基因段的一个机器基因, 接着在该基因对应的工序加工机器集中选取其他机器替换该机器。

2.4 算法流程

NSGA-II 算法采用精英保留策略,该策略在改善算法收敛性的同时导致种群的提前收敛。鉴于此,对 NSGA-II 算法进行了改进,提出了基于近亲变异的 NSGA-II 算法,该算法的执行过程如图 5 所示。

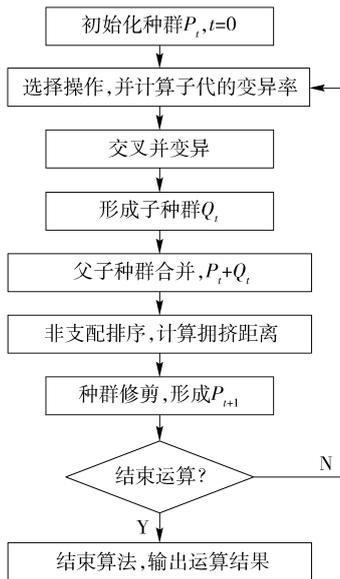


图 5 基于血缘变异的 NSGA-II 算法流程

Fig. 5 Algorithm process of NSGA-II with close relative variation

2.5 算法性能测试

为了比较并验证本算法性能,针对文献[20]中作业车间调度问题常用的 8×8 基准案例进行计算测试,即从最大完工时间、机器总负荷、机器最大负荷 3 个目标对 8 台机器加工 8 个工件的柔性作业车

间调度问题进行测试。设定算法的相关参数为:种群规模 100,最大进化代数 500,交叉率 100%,初始变异率 10%。本文算法与最短加工时间优先规则(SPT)、传统遗传算法(GA)、混合遗传算法(AL+CGA)^[22]、粒子群模拟退火算法(PSO+SA)^[23]的比较测试结果如表 1 所示。

表 1 8×8 基准案例测试结果

Tab. 1 Result of 8×8 benchmark problem

目标	SPT	GA	AL + CGA	PSO + SA	本文算法
完工时间	19	16	16	15	14
总负荷	91	77	75	75	79
最大负荷	16	14	14	12	13

如表 1 所示,对于 8×8 基准案例的 3 个目标,本文算法优于其他算法。由此可见,本文算法对于求解多目标柔性作业车间调度问题是有效且能取得良好结果的。

3 实例仿真

表 2 为某机械加工车间的 FJSP 的基本数据,包括工件到达时间、各工序加工时间、加工质量、设备单位时间加工成本。

算法的相关参数为:种群规模 50,最大进化代数 100,交叉率 100%,初始变异率 10%。随着优化运算的进行,各目标函数的最优值均在逐渐优化。图 6 给出了进化过程中各目标值的变化情况,图 7 为计算最终代的 Pareto 解在时间-成本-质量三维空间坐标中的分布图,表 3 为最终代的 Pareto 最优解

表 2 实例数据

Tab. 2 Data of an actual FJSP problem

工件 J_i	工序 O_{ij}	工件到达时间 R_i	加工时间 T_{ij}^k /加工质量 L_{ij}^k					
			M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
J_1	O_{11}	6	12/0.10	18/0.20	—	18/0.05	—	16/0.15
	O_{12}		—	8/0.10	6/0.11	20/0.06	20/0.04	—
	O_{13}		—	8/0.15	—	—	18/0.10	10/0.20
	O_{14}		14/0.16	—	16/0.08	16/0.10	—	—
	O_{15}		8/0.18	8/0.20	10/0.12	10/0.15	6/0.22	12/0.02
	O_{16}		—	—	20/0.10	—	16/0.20	18/0.15
J_2	O_{21}	2	18/0.20	—	8/0.10	20/0.06	14/0.12	—
	O_{22}		—	18/0.08	12/0.09	9/0.11	—	15/0.06
	O_{23}		7/0.12	—	20/0.11	12/0.15	18/0.20	—
J_3	O_{31}	2	18/0.13	20/0.15	8/0.20	7/0.06	6/0.10	—
	O_{32}		—	7/0.11	8/0.12	—	20/0.20	—
	O_{33}		7/0.23	10/0.12	—	14/0.07	—	20/0.02
	O_{34}		—	8/0.15	20/0.01	16/0.10	15/0.11	—
	O_{35}		20/0.05	—	18/0.15	10/0.10	10/0.20	15/0.13
J_4	O_{41}	5	22/0.01	—	19/0.10	16/0.11	20/0.10	—
	O_{42}		—	13/0.21	10/0.20	18/0.15	10/0.17	18/0.20
	O_{43}		6/0.25	10/0.13	—	—	—	20/0.01
	O_{44}		12/0.12	—	8/0.18	—	8/0.10	—
	O_{45}		20/0.02	12/0.15	20/0.10	15/0.18	—	—

续表 2

工件 J_i	工序 O_{ij}	工件到达时间 R_i	加工时间 T_{ij}^k /加工质量 L_{ij}^k					
			M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
J_5	O_{51}	10	—	8/0.20	—	10/0.15	15/0.11	10/0.10
	O_{52}		12/0.20	—	15/0.15	20/0.08	—	8/0.24
	O_{53}		16/0.12	15/0.12	—	—	20/0.08	10/0.21
	O_{54}		—	6/0.25	8/0.15	8/0.20	15/0.04	—
	O_{55}		15/0.08	—	—	10/0.09	—	12/0.08
	O_{56}		13/0.06	5/0.26	13/0.10	15/0.08	20/0.01	7/0.20
J_6	O_{61}	4	—	14/0.20	—	—	9/0.20	10/0.22
	O_{62}		—	—	12/0.17	15/0.15	—	9/0.20
	O_{63}		13/0.03	7/0.10	—	16/0.02	9/0.17	—
	O_{64}		20/0.01	—	13/0.09	—	—	17/0.06
单位时间加工成本 c_k			6	8	7	4	5	6

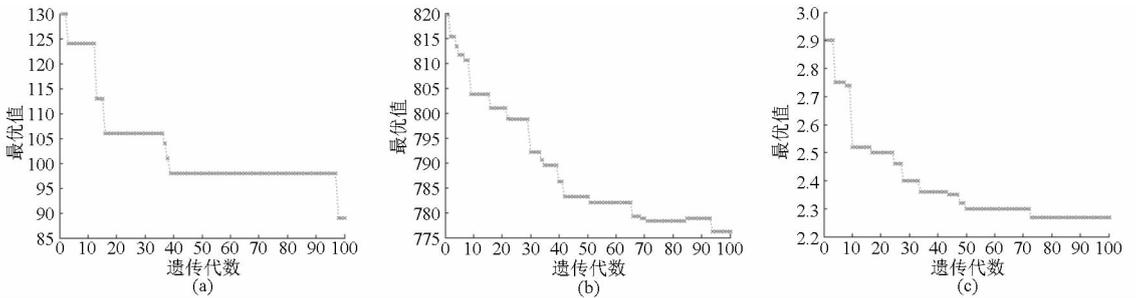


图 6 各目标函数最优值的进化过程

Fig. 6 Multi-objective evolution process

(a) 加工时间 T 最优值的进化过程 (b) 加工成本 C 最优值的进化过程 (c) 加工质量 Q 最优值的进化过程

表 3 最终代的 Pareto 最优解集

Tab. 3 Pareto optimal solution set

序号	完工时间 T	加工成本 C	加工质量 Q	序号	完工时间 T	加工成本 C	加工质量 Q
1	98	790.6	3.82	26	104	791.7	3.72
2	139	785.4	3.75	27	178	807.0	2.83
3	105	789.2	3.89	28	247	805.1	2.91
4	132	778.9	4.19	29	176	781.9	3.69
5	246	806.2	2.79	30	241	812.3	2.69
6	251	808.8	2.73	31	95	796.4	3.97
7	199	853.7	2.27	32	89	784.8	4.01
8	130	781.9	4.13	33	111	803.7	3.47
9	181	830.6	2.48	34	126	782.8	3.85
10	99	783.1	3.93	35	218	814.2	2.66
11	109	809.5	3.33	36	145	825.2	2.97
12	135	847.4	2.56	37	141	829.6	2.80
13	214	793.4	3.18	38	158	835.2	2.45
14	117	809.0	3.18	39	149	798.2	3.55
15	209	797.4	3.10	40	197	800.7	3.12
16	188	791.0	3.31	41	153	795.6	3.35
17	233	812.5	2.77	42	218	806.1	2.94
18	195	799.4	3.17	43	179	794.8	3.47
19	150	776.3	4.05	44	226	821.0	2.56
20	153	836.1	2.50	45	212	802.2	3.00
21	146	834.3	2.59	46	163	814.4	3.06
22	124	778.9	4.22	47	162	835.6	2.42
23	162	841.2	2.35	48	180	804.4	3.04
24	106	825.6	3.12	49	131	823.0	3.07
25	128	788.8	3.79	50	187	800.5	3.27

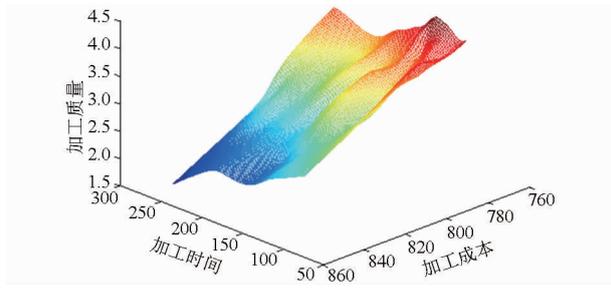


图 7 Pareto 解在时间-成本-质量空间的分布

Fig. 7 Distribution of Pareto solutions in time - cost - quality space

集的详细数据。计算结果表明该算法具有良好的收敛性和稳定性。

如表 3 所示,算法的最终结果为一个 Pareto 最优解集。但实际生产过程中,决策者根据生产实际情况,通过 AHP(层次分析法)确定不同的目标权重,假定 T 、 C 、 Q 的权重 w 分别为 0.5、0.3、0.2,则对表 2 的最优解集的各个解计算相应的 V_i 为

$$V_i = w_T \frac{T_{\max} - T_i}{T_{\max} - T_{\min}} + w_C \frac{C_{\max} - C_i}{C_{\max} - C_{\min}} + w_Q \frac{Q_{\max} - Q_i}{Q_{\max} - Q_{\min}} \quad (2)$$

式中 w_T 、 w_C 、 w_Q ——目标 T 、 C 、 Q 的权重

T_{\max} 、 T_{\min} ——目标 T 的最大值和最小值

C_{\max} 、 C_{\min} ——目标 C 的最大值和最小值

Q_{\max} 、 Q_{\min} ——目标 Q 的最大值和最小值

根据得到的所有 V_i 比较得到最终的最优解,其甘特图如图 8 所示。

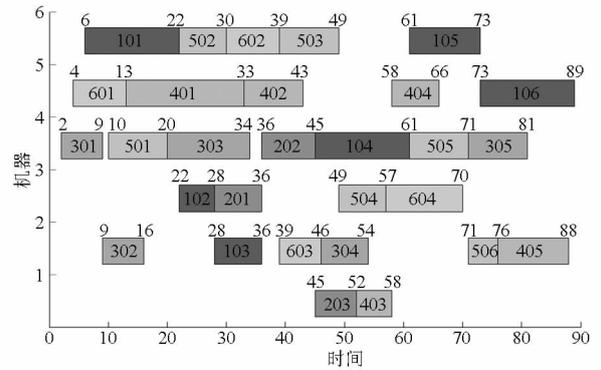


图 8 最优解的甘特图表示

Fig. 8 Gantt chart of optimal solution

4 结束语

根据实际制造车间对调度问题的需求,建立了以时间、成本、质量指标的调度模型,从最大完工时间、加工成本、成本加权质量等方面对加工过程进行优化调度。提出了基于近亲变异的 NSGA-II 算法,改善 NSGA-II 算法非支配解易于收敛到第一等级的非支配曲面的问题,通过染色体的血缘关系动态计算变异率,优化了 NSGA-II 的变异策略,避免算法的早熟问题。最后通过实例仿真证实了算法的有效性和可行性。

参 考 文 献

- 张超勇,董星,王晓娟,等. 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[J]. 机械工程学报,2010,46(11): 156 - 164.
Zhang Chaoyong, Dong Xing, Wang Xiaojuan, et al. Improved NSGA-II for the multi-objective flexible job-shop scheduling problem[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010,46(11):156 - 164. (in Chinese)
- 刘爱军,杨育,程文明,等. 复杂制造环境下的改进非支配排序遗传算法[J]. 计算机集成制造系统, 2012,18(11):2447 - 2458.
Liu Aijun, Yang Yu, Cheng Wenming, et al. Improved NSGA for complex manufacturing environment[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012,18(11):2447 - 2458. (in Chinese)
- 郑金华. 多目标进化算法及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2010:2 - 11,109 - 117.
- Xing Lining, Chen Yingwu, Yang Kewei. Multi-objective flexible job shop schedule: design and evaluation by simulation modeling [J]. Applied Soft Computing,2009,9(1):362 - 376.
- Zhang Guohui, Shao Xinyu, Li Peigen, et al. An effective hybrid particles warm optimization algorithm for multi-objective flexible job shop scheduling problem[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009,56(2):1309 - 1318.
- 徐新黎,应时彦,王万良. 求解模糊柔性 Job-shop 调度问题的多智能体免疫算法[J]. 控制与决策,2010, 25(2):171 - 184.
Xu Xinli, Ying Shiyuan, Wang Wanliang. Fuzzy flexible Job-shop scheduling method based on multi-agent immune algorithm[J]. Control and Decision, 2010, 25(2): 171 - 184. (in Chinese)
- 鞠全勇,朱剑英. 多目标批量生产柔性作业车间优化调度[J]. 机械工程学报,2007,43(8):148 - 154.
Ju Quanyong, Zhu Jianying. Multi-objective flexible job shop scheduling of batch production[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 148 - 154. (in Chinese)
- 吴秀丽,孙树栋,余建军,等. 多目标柔性作业车间调度优化研究[J]. 计算机集成制造系统, 2006,12(5):731 - 736.
Wu Xiuli, Sun Shudong, Yu Jianjun, et al. Research on multi-objective optimization for flexible job shop scheduling [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006,12(5):731 - 736. (in Chinese)
- 李俊青,潘全科,王玉亭. 多目标柔性车间调度的 Pareto 混合禁忌搜索算法[J]. 计算机集成制造系统,2010,16(7):1419 - 1426.
Li Junqing, Pan Quanke, Wang Yuting. Hybrid Pareto-based tabu search algorithm for solving the multi-objective flexible job shop scheduling problem[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(7): 1419 - 1426. (in Chinese)
- Ghasem M, Mehdi M. A Pareto approach to multi-objective flexible job-shop scheduling problem using particle swarm optimization

- and local search[J]. *International Journal of Production Economics*, 2011,129(1):14-22.
- 11 Fonseca C M, Fleming P J. Genetic algorithms for multiobjective optimization: formulation, discussion and generalization[C]// Forrest S. *Genetic Algorithms: Proceedings of the Fifth International Conference*, 1993: 416-423.
- 12 Horn J, Nafpliotis N, Goldberg D E. A niched Pareto genetic algorithm for multi-objective optimization[C]// *Proceedings of the 1st IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 1994:82-87.
- 13 Srinivas N, Deb K. Multi-objective function optimization using non-dominated sorting genetic algorithm [J]. *Evolutionary Computation*, 1995,2(3):221-248.
- 14 Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002,6(2):182-197.
- 15 Knowles J, Corne D. The Pareto archived evolution strategy: a new baseline algorithm for multi-objective optimization[C]// *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation*. Piscataway, 1999:98-105.
- 16 Zitzler E, Thiele L. Multi-objective evolutionary algorithm: a comparative case study and the strength Pareto approach[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1999,3(4):257-271.
- 17 Corne D W. The Pareto envelope based selection algorithm for multi-objective optimization [J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2000,1917:839-848.
- 18 曾三友,李晖,丁立新,等. 基于排序的非劣集合快速求解算法[J]. *计算机研究与发展*, 2004, 41(9): 1565-1571.
Zeng Sanyou, Li Hui, Ding Lixin, et al. A fast algorithm for finding non-dominated set based on sorting[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2004, 41(9): 1565-1571. (in Chinese)
- 19 Jensen M T. Reducing the run-time complexity of multiobjective EAs: the NSGA-II and other algorithms[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2003,7(5):503-515.
- 20 肖海宁,楼佩煌,严伟国,等. 柔性作业车间中机床与自动导引车在线调度方法[J]. *农业机械学报*, 2013,44(4):280-286.
Xiao Haining, Lou Peihuang, Yan Weiguo, et al. On-line scheduling method for simultaneous scheduling of machines and automated guided vehicles in flexible job shop [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013,44(4): 280-286. (in Chinese)
- 21 王云,冯毅雄,谭建荣,等. 基于多目标粒子群算法的柔性作业车间调度优化方法[J]. *农业机械学报*, 2011,42(2):190-196.
Wang Yun, Feng Yixiong, Tan Jianrong, et al. Optimization method of flexible job-shop scheduling based on multiobjective particle swarm optimization algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011,42(2): 190-196. (in Chinese)
- 22 Xia W J, Wu Z M. An effective hybrid optimization approach for multi-objective flexible job-shop scheduling problems [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2005, 48(2): 409-425.
- 23 Kacem I, Hammadi S, Borne P. Approach by localization and multiobjective evolutionary optimization for flexible job-shop scheduling problems [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, 2002, 32(1): 1-13.

(上接第 295 页)

- 14 郑尊清,尧命发,汪洋,等. 二甲醚均质压燃燃烧过程的试验研究[J]. *燃烧科学与技术*, 2003, 9(6): 561-565.
Zheng Zunqing, Yao Mingfa, Wang Yang, et al. Experimental study of HCCI combustion process fueled with DME [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2003, 9(6): 561-565. (in Chinese)
- 15 郑朝蕾,李善良. 车载二甲醚水蒸气重整制氢热力学分析[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(9): 1-6.
Zheng Zhaolei, Li Shanliang. Thermodynamics analysis of hydrogen production in vehicle DME steam reforming reaction system [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(9): 1-6. (in Chinese)
- 16 梁晨,纪常伟,孔令凯,等. 二甲醚-氢气混合燃料 HCCI 燃烧与排放试验[J]. *农业机械学报*, 2011,42(3):15-20.
Liang Chen, Ji Changwei, Kong Lingkai, et al. Combustion and emissions performance of a HCCI engine fueled with DME and hydrogen blends [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011,42(3):15-20. (in Chinese)
- 17 Pan Lun, Hu Erjiang, Zhang Jiaxiang, et al. Experimental and kinetic study on ignition delay times of DME/H₂/O₂/Ar mixtures [J]. *Combustion and Flame*, 2014,161(3):735-747.
- 18 陈朝阳,耿莉敏,巩静,等. 掺氢对二甲醚预混层流燃烧特性的影响[J]. *西安交通大学学报*, 2014, 48(6): 122-126.
Chen Zhaoyang, Geng Limin, Gong Jing, et al. Influence of hydrogen addition on combustion characteristics of premixed laminar dimethyl ether flames [J]. *Journal of Xi'an Jiao Tong University*, 2014, 48(6): 122-126. (in Chinese)
- 19 郑朝蕾,李善良. 二甲醚重整气对二甲醚均质压燃影响的数值模拟[J]. *内燃机学报*, 2013,31(4): 337-342.
Zheng Zhaolei, Li Shanliang. Numerical simulation on the effect of DME-reformed gas on dimethyl ether homogeneous compression ignition [J]. *Transactions of CSICE*, 2013,31(4): 337-342. (in Chinese)
- 20 陈朝阳,黄佐华,苗海燕,等. 二甲醚-空气-N₂/CO₂ 混合气燃烧特性研究[J]. *内燃机学报*, 2008,36(3): 207-213.
Chen Zhaoyang, Huang Zuohua, Miao Haiyan, et al. Study on combustion characteristics of dimethyl ether-air-N₂/CO₂ premixed mixtures[J]. *Transactions of CSICE*, 2008,36(3): 207-213. (in Chinese)